Научная статья
УДК 664:004.942

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В КОНДИТЕРСКОЙ ОТРАСЛИ

Н.А. Фролова[1,*] В.В. Верхотуров[1], Е.П. Щербакова[1], О.С. Губарь[1], С.В. Фёдоров[1]

[1] Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия
[*] E-mail: nina.frolova@klgtu.ru

Аннотация. Кондитерская промышленность сталкивается с растущими проблемами в области качества, воспроизводимости, эстетических инноваций и оптимизации затрат, в то время как изменчивость сырья и сложность физико-химических превращений делают управление процессами особенно сложным. В этом контексте интеграция цифровых двойников в производственный процесс становится перспективным подходом к повышению производительности и внедрения практических кейсов оптимизации рецептур, а также к соблюдению стандартов безопасности пищевых продуктов и ожиданий потребителей. Применение цифровых двойников в проектировании, производстве, дизайне и управлении качеством кондитерских изделий является актуальным и современным направлением. В статье последовательно рассматриваются ключевые функции цифрового двойника для кондитерской отрасли. Цифровой двойник представляется стратегическим рычагом для трансформации управления качеством в кондитерской промышленности, что позволит сократить количество отходов, ускорить инновации в продуктах и обеспечить долгосрочное соответствие санитарным нормам. Перспективы на будущее включают в себя обогащение моделей искусственным интеллектом, их распространение на цепочки поставок и обеспечение массовой персонализации, что открывает новые возможности для более гибкой, устойчивой и ориентированной на потребителя отрасли.

Ключевые слова: *цифровые двойники; кондитерские изделия; художественное оформление; системный инжиниринг; аддитивные технологии.*

Для цитирования Фролова Н.А., Верхотуров В.В., Щербакова Е.П., Губарь О.С., Фёдоров С.В. Применение цифровых двойников в кондитерской отрасли // *Вестник науки и образования Северо-Запада России.* 2026. Т.12. № 3. С. 16–26.

Original article

THE USE OF DIGITAL TWINS IN THE CONFECTIONERY INDUSTRY

N. A. Frolova[1,*] V.V. Verkhoturov[1], E.P. Shcherbakova[1], O.S. Gubar[1], S.V. Fedorov[1]

[1] Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia
[*] E-mail: nina.frolova@klgtu.ru

Abstract. The confectionery industry faces increasing challenges in quality, reproducibility, aesthetic innovation, and cost optimization, while raw material variability and the complexity of physical and chemical transformations make process control particularly challenging. In this context, integrating digital twins into the production process is emerging as a promising approach to increasing productivity and implementing practical recipe optimization practices, as well as meeting food safety standards and consumer expectations. The application of digital twins in the design,

© Фролова Н.А., Верхотуров В.В., Щербакова Е.А., Губарь О.С., Фёдоров С.В. 2026

production, and quality management of confectionery products is a relevant and contemporary area. This article examines the key functions of a digital twin for the confectionery industry. A digital twin is presented as a strategic lever for transforming quality management in the confectionery industry, reducing waste, accelerating product innovation, and ensuring long-term compliance with sanitary standards. Future prospects include enriching models with artificial intelligence, extending them to supply chains, and enabling mass personalization, opening up new opportunities for a more flexible, sustainable, and consumer-focused industry.

Key words: *digital twins; confectionery products; artistic design; systems engineering; additive technologies.*

For citation: Frolova N.A., Verkhoturov V.V., Shcherbakova E.P., Gubar O.S., Fedorov S.V. The use of digital twins in the confectionery industry. *Journal of Science and Education of North-West Russia.* 2026. V.12. No. 3, pp. 16–26.

Введение

Индустрия 5.0 – пятая промышленная революция в области производства продуктов питания, которая характеризуется слиянием физических, цифровых и агробиологических достижений в науке и технологиях продуктов питания и рассматривается как более целостный, междисциплинарный и многомерный подход [1]. Методология цифрового моделирования может предложить полезные решения для пищевой промышленности в целях повышения производительности и устойчивости. Широкое и эффективное внедрение этого подхода во многом будет зависеть от разработки высокоточных цифровых моделей с возможностью моделирования в реальном времени [2]. Пищевая промышленность неизбежно будет все чаще внедрять цифровые технологии для обеспечения безопасности и качества продукции, минимизации затрат в условиях низкой рентабельности, сокращения сроков выполнения заказов и гарантирования своевременной доставки все большего числа продуктов, несмотря на простои и неопределенность в производстве [3-4]. Цифровые двойники обладают значительным потенциалом в решении проблем, стоящих перед цепочками поставок продуктов питания [5]. Технология цифровых двойников трансформирует цепочки поставок продуктов питания за счет мониторинга в реальном времени, прогнозного моделирования и оптимизации [6]. Рост числа проблем и инцидентов, связанных с безопасностью пищевых продуктов, привел к острой необходимости визуализации пищевых сетей. Цифровые технологии не только помогают визуализировать цепочки поставок продуктов питания, но и предоставляют заинтересованным сторонам (таким как розничные продавцы и дистрибьюторы продуктов питания) возможность анализировать риски и прогнозировать проблемы, связанные с цепочками поставок продуктов питания [7]. Цифровую теорию можно определить как высокоточную виртуальную копию потенциальной или реальной физической системы, причем обе системы связаны в реальном времени, то есть существует двусторонняя связь и поток данных/информации [8-9]. Применение цифровых технологий широко распространено в пищевой промышленности при производстве напитков, пищевых продуктов и пищевых ингредиентов [10].

Цель данной статьи - систематизировать применение цифровых двойников в проектировании, производстве, дизайне и управлении качеством кондитерских изделий путем выявления соответствующих методологий, научных моделей и показателей эффективности, а также предложения структурированного подхода к их внедрению в реальных промышленных условиях.

Результаты и их обсуждение

Цифровые двойники - это стратегический инструмент для кондитерской промышленности, позволяющий обеспечить согласованную интеграцию технических, качественных и экономических аспектов производственного процесса.

Оптимизация процессов кондитерского производства с использованием цифровых двойников основана на детальном моделировании критических параметров на каждом этапе и прогнозировании физико-химических эффектов, вызванных их изменениями. Для замешивания и формования цифровой двойник включает реологические модели, которые связывают вязкость и эластичность теста с условиями эксплуатации, включая температуру, время и скорость замешивания, а также с результирующей структурой белка и полисахаридов. Такой подход стабилизирует конечную текстуру и пористость, одновременно уменьшая вариации партий, обусловленные изменчивостью сырья [11]. Во время выпечки и сушки используются модели теплопередачи и массопередачи для моделирования распространения теплового фронта и испарения воды внутри теста с учетом геометрии и начальной плотности. Температурные профили зон печи, влажность воздуха и скорость конвейера регулируются для обеспечения равномерного цвета, хрустящей текстуры и целевого содержания влаги при минимизации энергопотребления.

Практические кейсы оптимизации рецептур и процессов с цифровыми двойниками представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Практические кейсы оптимизации рецептур и процессов с цифровыми двойниками [12-13]

Кейс / объект оптимизации	Подход и решение	Используемые технологии и данные	Результаты и экономический эффект
Оптимизация рецептуры бисквитного полуфабриката с частичной заменой яиц	Подбор заменителей на основе белковых и эмульгирующих свойств; моделирование структуры пористости	Регрессионные модели, микроскопия структуры, реология теста	Снижение стоимости сырья на 12%; сохранение объёма бисквита и пористости; дегустационная оценка ≥4,3/5
Снижение сахара в начинке для вафельных конфет при сохранении текстуры	Подбор подсластителей и гидроколлоидов; моделирование вязкости и кристаллизации сахаров	Реологические тесты, модели «состав–текстура», сенсорные панели	Снижение сахара на 20%; отсутствие расслоения и кристаллизации; срок годности ≥6 месяцев
Оптимизация выпечки слоёных изделий в конвекционной печи	Настройка температурных зон и скорости конвейера по тепловой модели изделия	CFD + теплофизическая модель, датчики температуры в центре изделия	Сокращение времени выпечки на 8%; снижение энергозатрат на 11%; выход годной продукции ≥97%
Автоматизированная коррекция рецептуры глазури при изменении влажности какао-порошка	Онлайн-анализ влажности сырья; автоматическая пересчёт пропорций в рецептуре	Датчики влажности, адаптивная модель, интеграция с MES	Стабильный цвет и глянец глазури; снижение перерасхода какао-продуктов на 7–9%
Планирование загрузки линий и оптимизация партий для минимизации простоев и брака	Имитационное моделирование производственных линий; оптимизация расписания	Дискретно-событийное моделирование (DES), алгоритмы оптимизации, данные о простоях	Сокращение времени переналадки на 22%; рост OEE на 13–15%.

Для сложных шоколадных украшений цифровой двойник включает в себя анализ методом конечных элементов и термомеханические модели для прогнозирования внутренних напряжений и минимизации риска хрупкости или растрескивания во время охлаждения. Колориметрическая калибровка, основанная на спектрофотометрических измерениях и

профилях ICC, обеспечивает строгое соответствие глазури рекомендациям бренда, даже после изменений, вызванных условиями выпечки или хранения. Кроме того, 3D-визуализация праздничных подарочных корзин для каталогов позволяет оптимизировать оформление, освещение и композицию без необходимости физической фотосъемки, тем самым сокращая затраты и время на производство маркетинговых материалов. Наконец, автоматическое создание персонализированных надписей на печенье или тортах основано на технологических цепочках, которые объединяют оптическое распознавание символов (OCR), векторизацию и расчет траектории для декорирующих машин, обеспечивая как идеальную читаемость, так и персонализацию в больших масштабах. В этом контексте применение цифровых двойников для художественного оформления кондитерских изделий представлено в табл. 2 [14-15].

Таблица 2 - Применения цифровых двойников для художественного оформления кондитерских изделий

Кейс / задача	Решение и подход	Используемые технологии	Результаты и художественные преимущества
Создание серии тортов с фирменным узором	Параметрическое моделирование узора; автоматическая подгонка под разные диаметры тортов	Grasshopper (Rhino), скрипты масштабирования узоров	Единообразие узора на тортах разного размера; сокращение времени на отрисовку
Разработка шоколадных декоров сложной формы	Моделирование тонких элементов с учётом хрупкости шоколада; симуляция напряжений при остывании	FEM-анализ, термомеханическая модель	Снижение ломкости тонких деталей; возможность более изящных форм
Подбор цвета глазури под брендбук кондитерской	Колориметрия образцов глазури; коррекция рецептуры по модели цветового пространства	Спектрофотометр, цветовые профили, оптимизация рецептуры	Стабильное попадание в фирменные цвета; снижение количества корректировок
Визуализация праздничного набора для каталога	Виртуальная сервировка и рендеринг при разных сценариях освещения	3ds Max + Corona Renderer, PBR-материалы	Экономия на фотосъёмке; возможность показать разные варианты подачи без физических образцов
Автоматизация создания индивидуальных надписей на пряниках/тортах	Распознавание рукописного текста; генерация траектории для айсинг-принтера	OCR, векторизация, G-code генерация	Высокая читаемость и эстетика надписей; персонализация без потери качества

Цифровые двойники позволяют систематически интегрировать эстетические соображения и технологические ограничения в процесс проектирования и декорирования кондитерских изделий. Благодаря параметрическому 3D-моделированию и моделированию реологических свойств материалов (глазури, покрытия, сахарные пасты, изомальт) можно

точно предсказать поведение декоративных элементов, включая их текучесть, усадку и хрупкость, еще до начала физического производства. Интегрированное в цифровой двойник управление цветом, поддерживаемое ICC-профилями и спектрофотометрическими измерениями, обеспечивает точность цветопередачи между виртуальным изображением и конечным продуктом даже после изменений, вызванных выпечкой или охлаждением [16]. Наконец, моделирование презентации (освещение, угол обзора, постановка) способствует оптимизации визуального воздействия маркетинговых материалов, одновременно сокращая количество необходимых физических образцов и ускоряя цикл разработки коллекции (рис. 1).



Рисунок 1 - Цифровые двойники в кондитерском дизайне [17]

Применение цифровых двойников для контроля качества в кондитерском производстве усиливает контроль над критическими точками процесса и обеспечивает

постоянное соответствие техническим и нормативным требованиям. На этапах декорирования и наполнения компьютерное зрение и автоматизированный контроль размеров выявляют эстетические или структурные дефекты (трещины, деформации, неоднородности) до упаковки, тем самым ограничивая процент брака и возвратов от клиентов. Закрытие и герметизация упаковки проверяются системами неразрушающего контроля, данные которых передаются в систему-близнец для сопоставления отказов с параметрами сварки или давления. Методы и модели цифровых двойников для управления качеством: назначение и измеримые эффекты представлены в табл. 3 [18-19].

Таблица 3 - Методы и модели цифровых двойников для управления качеством: назначение и измеримые эффекты

Метод / модель цифрового двойника	Назначение в системе качества	Входные данные	Эффект и измеримые результаты
Регрессионные модели «состав–свойство» (QSPR)	Прогнозирование органолептических и физико-химических свойств при изменении рецептуры	Данные лабораторных анализов, сенсорные панели, параметры сырья	Снижение доли неудачных пробных партий на 30–40%; стабильность вкуса ≥4,2/5 по дегустации
CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics)	Оптимизация тепло- и массопереноса в печах и камерах охлаждения	Геометрия печи, температура по зонам, скорость воздуха, свойства продукта	Снижение брака по структуре на 15–20%; экономия энергии 10–14%
FEM-анализ (метод конечных элементов)	Оценка напряжений и деформаций в хрупких изделиях (шоколад, вафли, изомальт)	Механические свойства материалов, геометрия изделия, условия транспортировки	Снижение ломкости на 25–35%; возможность более тонких и сложных форм декора
Предиктивная аналитика и анализ отказов (FMEA + ML)	Прогнозирование рисков и отказов оборудования, влияющих на качество	Журналы ТО, данные вибрации, энергопотребление, статистика брака	Снижение внеплановых простоев на 20–30%; рост OEE на 12–15%
Компьютерное зрение и классификация дефектов	Автоматизированный контроль внешнего вида, трещин, пустот, наплывов	Камеры высокого разрешения, базы эталонов, нейросети	Снижение доли ручного контроля на 40–50%; точность обнаружения дефектов ≥95%

Это обеспечивает стабильный внешний вид и текстуру и снижает долю партий, отбракованных из-за этого дефекта. Автоматизированная проверка упаковки конфет основана на системах компьютерного зрения, обученных выявлять эстетические или структурные дефекты (трещины, деформации, неоднородности), достигая точности обнаружения и сокращая количество возвратов, связанных с внешним видом. Для стабилизации качества начинок и кремов система использует модели вязкости и кинетики расслоения для корректировки профилей охлаждения и времени выдержки, тем самым ограничивая расслоение фаз и синерезис и обеспечивая однородность текстуры на протяжении всего срока годности.

Следующий этап использования цифровых двойников в кондитерской индустрии - это валидация цифрового двойника в кондитерском производстве (рис. 2) [20].



Рисунок 2 - Валидация цифрового двойника в кондитерском производстве

Интеграция цифрового двойника с системой HACCP и инструментами отслеживания позволяет отображать критические контрольные точки, автоматически записывать данные для каждой партии (температуры, продолжительность, идентификаторы сырья) и генерировать отчеты, соответствующие санитарным стандартам. Эта комплексная система отслеживания упрощает аудиты, сокращает время, необходимое для обработки предупреждений, и позволяет проводить целенаправленный отзыв продукции в случае несоответствия, сокращая среднее время реагирования на предупреждение о качестве.

Заключение

Анализ, проведенный в этой статье, показывает, что цифровые двойники представляют собой «стратегический рычаг – перспективные технологии» для проектирования, производства, дизайна, оформления и управления качеством в промышленной кондитерской промышленности, отвечая на многочисленные проблемы отрасли: эстетические инновации, воспроизводимость, экономическая эффективность и устойчивость. От параметрического 3D-моделирования художественного оформления до физико-химического моделирования преобразований, включая интегрированный контроль качества и отслеживание – показывают, что двойник позволяет рационализировать традиционно эмпирические процессы, сохраняя при этом творческое измерение, присущее кондитерским изделиям. По сравнению с традиционными подходами, часто ориентированными на краткосрочную максимизацию и плохо интегрированными, цифровой двойник предлагает системное видение жизненного цикла продукта, позволяя предвидеть отклонения, оптимизировать ресурсы (воду, энергию, сырье) и снижать потери, что соответствует современным экологическим и нормативным требованиям. Однако широкому внедрению этой технологии по-прежнему препятствуют структурные препятствия: инвестиционные затраты, нехватка сквозных навыков (пищевая инженерия, данные, моделирование), неоднородность данных и проблемы кибербезопасности. Для малого и среднего бизнеса, в частности, наиболее актуальным для демонстрации рентабельности и операционной эффективности двойника представляется прогрессивный подход, ориентированный на пилотные проекты с немедленной добавленной стоимостью. Таким образом, хотя путь внедрения сложен и требует глубокой организационной трансформации, цифровой двойник позиционируется как фундаментальный инструмент для создания более

гибкой, более устойчивой и более ориентированной на потребителя кондитерской промышленности, сочетающей традиции и технологические инновации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Глинянов С.В. Интернет вещей и цифровые двойники в пищевой промышленности: преимущества и вызовы для потребителей и производителей // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Т. 13. № 4-1. С. 843-852. DOI 10.34670/AR.2023.54.96.099.

2. Феслер Х.А. Цифровые технологии в управлении качеством пищевой продукции: тренды и перспективы // Вестник науки и образования. 2025. № 5-1(160). С. 33-38.

3. Пряничникова Н.С., Бедретдинова С.А., Галстян А.Г. Применение цифровых технологий прослеживаемости и интеллектуального контроля в производстве специализированного питания: анализ мирового опыта // Пищевая промышленность. 2026. № 4. С. 92-99.

4. Беседин А.Ю. Внедрение цифровых двойников в пищевую промышленность // Студенческий вестник. 2024. № 27-2(313). С. 56-57.

5. Староверова, Д.Ю., Светлова И.Д. Применение виртуального моделирования и симуляции для оптимизации производственных процессов в пищевой отрасли // Технологии в управлении. 2024. Т. 1. № 1. С. 84-92.

6. Подашев Д.Б., Фролова Н.А. Теоретические аспекты совершенствования механизма реализации системы менеджмента качества пищевой продукции // Журнал монетарной экономики и менеджмента. 2025. № 3. С. 313-322.

7. Purlis E. Digital Twin Methodology in Food Processing: Basic Concepts and Applications // Current nutrition reports. 2024. V. 13(4). P. 914–920.

8. Koulouris A., Misailidis N., Pyotrides D. Applications of process and digital twin models for production simulation and scheduling in the manufacturing of food ingredients and products // Food and Bioproducts Processing. 2021. V. 126. P. 317–333.

9. Verboven P., Defraeye T., Datta A.K. & Nicolai B. Digital twins of food process operations: the next step for food process models? // Current Opinion in Food Science. 2020. V. 35. P. 79–87.

10. Huang Y., Ghadge A. & Yates N. Implementation of digital twins in the food supply chain: a review and conceptual framework. International Journal of Production Research. 2024. Vol. 62(17), P. 6400–6426.

11. Hassoun A., Jagtap S., Trollman H., Garcia-Garcia G., Duong L.N.K., Saxena P., Bouzembrak Y., Treiblmaier H., Parra-López C., Carmona-Torres C., Dev K., Mhlanga D. & Aït-Kaddour A. From Food Industry 4.0 to Food Industry 5.0: Identifying technological enablers and potential future applications in the food sector // Comprehensive reviews in food science and food safety. 2024. V. 23(6). P. e370040.

12. Hosseini S., Ivanov D. and Dolgui A. Ripple Effect Modelling of Supplier Disruption: Integrated Markov Chain and Dynamic Bayesian Network Approach. International Journal of Production Research. 2020. V. 58 (11). P. 3284–3303.

13. Defraeye T., Shrivastava C., Berry T., Verboven P., Onwude D., Schudel S. et al. Digital twins are coming: will we need them in supply chains of fresh horticultural produce? Trends Food Sci Technol. V. 2021. V.109. P. 245–258.

14. Cabeza-Gil.I., Ríos-Ruiz I., Martínez M.Á., Calvo B., Grasa J. Digital twins for monitoring and predicting the cooking of food products: A case study for a French crêpe. J. Food Eng. 2023. V. 359. P.111697.

15. HongY.-K., Stanley R., Tang J., Bui L., Ghandi A. Effect of electric field distribution on the heating uniformity of a model ready-to-eat meal in microwave-assisted thermal sterilization using the FDTD method. Food Secur. 2021. V.10. P. 311.

16. Watson N.J., Bowler A.L., Rady A., Fisher O.J., Simeone A., Escrig J. et al. Intelligent sensors for sustainable food and drink manufacturing. Front. Sustain. Food Syst. 2021. V. 5. P. 642786.

17. Eppinger T., Longwell G., Mas P., Goodheart K., Badiali U., Aglave R. Increase food production efficiency using the executable digital twin (xDT). Chem. Eng. Trans. 2021. V. 87 P. 37–42.

18. Wu D., Zheng A., Yu W., Cao H., Ling Q., Liu J.et al. Digital twin technology in transportation infrastructure: a comprehensive survey of current applications, challenges, and future directions. Appl. Sci. 2025. V. 15 (4). P. 1911.

19. Kritzinger W. Karner M. Traar G. HenjesJ. Sihn W. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. Ifac-Papers Online. 2018. V. 51 (11). P. 1016–1022.

20. MasihI S. Integrated deep learning and internet of things: a review of technologies, applications and challenges in smart food systems. J. Asian Dev. Stud. 2025. V. 14 (3), P. 1425–1437.

REFERENCES

1. Glinyanov S.V. *Internet veshchey i tsifrovyye dvoyniki v pishchevoy promyshlennosti: preimushchestva i vyzovy dlya potrebiteley i proizvoditeley* [The Internet of Things and Digital Twins in the Food Industry: Benefits and Challenges for Consumers and Producers]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra*. 2023. V.13. No. 4-1, pp. 843-852. DOI 10.34670/AR.2023.54.96.099.

2. Fesler H.A. *Tsifrovyye tekhnologii v upravlenii kachestvom pishchevoy produktsii: trendy i perspektivy* [Digital technologies in food quality management: trends and prospects]. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2025. No. 5-1 (160), pp. 33-38.

3. Pryanichnikova N.S., Bedretdinova S.A., Galstyan A.G. *Primeneniye tsifrovykh tekhnologiy proslezhivayemosti i intellektual'nogo kontrolya v proizvodstve spetsializirovannogo pitaniya: analiz mirovogo opyta* [Application of digital traceability technologies and intelligent control in the production of specialized food: analysis of world experience]. Pishchevaya promyshlennost'. 2026. No. 4, pp. 92-99.

4. Besedin A.Yu. *Vnedreniye tsifrovykh dvoynikov v pishchevuyu promyshlennost* [Implementation of digital twins in the food industry]. *Studencheskiy vestnik*. 2024. No. 27-2 (313), pp. 56-57.

5. Staroverova D.Yu., Svetlova I.D. *Primeneniye virtual'nogo modelirovaniya i simulyatsii dlya optimizatsii proizvodstvennykh protsessov v pishchevoy otrasli* [Application of virtual modeling and simulation to optimize production processes in the food industry]. *Tekhnologii v upravlenii*. 2024. V.1. No. 1, pp. 84-92.

6. Podashev D.B., Frolova N.A. *Teoreticheskiye aspekty sovershenstvovaniya mekhanizma realizatsii sistemy menedzhmenta kachestva pishchevoy produktsii* [Theoretical aspects of improving the mechanism for implementing the food quality management system]. *Zhurnal monetarnoy ekonomiki i menedzhmenta*. 2025. No. 3, pp. 313-322.

7. Purlis E. Digital Twin Methodology in Food Processing: Basic Concepts and Applications. Current nutrition reports. 2024. V. 13(4), pp. 914–920.

8. Koulouris A., Misailidis N., Pyotrides D. Applications of process and digital twin models for production simulation and scheduling in the manufacturing of food ingredients and products. Food and Bioproducts Processing. 2021. V. 126, pp. 317–333.

9. Verboven P., Defraeye T., Datta A.K. & Nicolai B. Digital twins of food process operations: the next step for food process models? Current Opinion in Food Science. 2020. V. 35, pp. 79–87.

10. Huang Y., Ghadge A. & Yates N. Implementation of digital twins in the food supply chain: a review and conceptual framework. International Journal of Production Research. 2024. V. 62(17), pp.6400–6426.

11. Hassoun A., Jagtap S., Trollman H., Garcia-Garcia G., Duong L.N.K., Saxena P., Bouzembrak Y., Treiblmaier H., Parra-López C., Carmona-Torres C., Dev K., Mhlanga D. & Aït-Kaddour A. From Food Industry 4.0 to Food Industry 5.0: Identifying technological enablers and potential future applications in the food sector. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2024. V. 23(6), pp. e370040.

12. Hosseini S., Ivanov D. and Dolgui A. Ripple Effect Modelling of Supplier Disruption: Integrated Markov Chain and Dynamic Bayesian Network Approach. International Journal of Production Research. 2020. V. 58 (11), pp. 3284–3303.

13. Defraeye T, Shrivastava C, Berry T, Verboven P, Onwude D, Schudel S, et al. Digital twins are coming: will we need them in supply chains of fresh horticultural produce. Trends Food Sci Technol. V. 2021. V.109, pp. 245–258.

14. Cabeza-Gil.I., Ríos-Ruiz I., Martínez M.Á., Calvo B., Grasa J. Digital twins for monitoring and predicting the cooking of food products: A case study for a French crêpe. J. Food Eng. 2023. V. 359, P. 111697.

15. HongY.-K., Stanley R., Tang J., Bui L., Ghandi A. Effect of electric field distribution on the heating uniformity of a model ready-to-eat meal in microwave-assisted thermal sterilization using the FDTD method. Food Secur. 2021. V.10, pp. 311.

16. Watson N.J., Bowler A.L., Rady A., Fisher O.J., Simeone A., Escrig J. et al. Intelligent sensors for sustainable food and drink manufacturing. Front. Sustain. Food Syst. 2021. V. 5, P. 642786.

17. Eppinger T., Longwell G., Mas P., Goodheart K., Badiali U., Aglave R. Increase food production efficiency using the executable digital twin (xDT). Chem. Eng. Trans. 2021. V. 87, pp. 37–42.

18. Wu D., Zheng A., Yu W., Cao H., Ling Q., Liu J.et al. Digital twin technology in transportation infrastructure: a comprehensive survey of current applications, challenges, and future directions. Appl. Sci. 2025. V. 15 (4), pp 1911.

19. Kritzinger W. Karner M. Traar G. HenjesJ. Sihn W. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. Ifac-Papers Online. 2018. V. 51 (11), pp. 1016–1022.

20. MasihI. S. Integrated deep learning and internet of things: a review of technologies, applications and challenges in smart food systems. J. Asian Dev. Stud. 2025. V. 14 (3), pp. 1425–1437.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Фролова Нина Анатольевна – доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, Калининград, Советский проспект, д. 1, nina.frolova@klgtu.ru)	*Frolova Nina Anatolievna* - Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, Russia, e-mail: nina.frolova@klgtu.ru)
Верхотуров Василий Владимирович – доктор биологических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, Калининград, Советский проспект, д. 1, vasilij.verkhoturov@klgtu.ru)	*Verkhoturov Vasily Vladimirovich* - Dr. Sci. (Biol.), Professor, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: vasilij.verkhoturov@klgtu.ru)
Щербакова Елена Петровна – кандидат технических наук, доцент, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, Калининград, Советский проспект, д. 1, elena.shcherbakova@klgtu.ru)	*Shcherbakova Elena Petrovna* - Ph.D. (Eng), Associate Professor, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: elena.shcherbakova@klgtu.ru)

Губарь Ольга Сергеевна - старший преподаватель, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, Калининград, Советский проспект, д. 1, gubaro39@mail.ru)	*Gubar Olga Sergeevna* - senior lecturer, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: gubaro39@mail.ru)
Фёдоров Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, Калининград, Советский проспект, д. 1, fedorov@klgtu.ru)	*Fedorov Sergey Vasilyevich* - Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, Russia, e-mail: fedorov@klgtu.ru)

Статья поступила в редакцию 02.09.2026; одобрена после рецензирования 09.09.2026, принята к публикации 14.09.2026.
The article was submitted 02.09.2026; approved after reviewing 09.09.2026; accepted for publication 14.09.2026.