

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 338.439.4

**АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ
КОНЦЕПЦИИ КАЧЕСТВА 4.0 ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО
ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ**¹Бурак Л.Ч. ORCID ID 0000-0002-6613-439X,²Ермошина Т.В. ORCID ID 0000-0003-4575-8969,²Родина Е.Е., ²Баландина С.В.¹*Общество с ограниченной ответственностью «Белросаква»,
Минск, Республика Беларусь, e-mail: leonidburak@gmail.com;*²*Аккредитованное образовательное частное учреждение высшего образования
«Московский финансово-юридический университет МФЮА», Москва, Российская Федерация*

Целью данного исследования является анализ современного состояния и тенденций развития концепции Качества 4.0, как основного пути устойчивого производства продуктов питания с акцентом на современные технологии, способствующие сокращению пищевых отходов, минимизацию воздействия производства продуктов питания на окружающую среду и обеспечение доступа потребителей к безопасным, высококачественным продуктам питания. С целью анализа провели библиографический обзор публикаций, используя программное обеспечение VOSViewer. Временной период был установлен с 2015 по 2025 г. Поиск на английском языке проводился в библиографической базе Web of Science, а на русском языке – по ключевым словам в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU. На первом этапе было отобрано 174 статьи, после анализа в обзор включено 50 публикаций, соответствующих критериям включения. Современная концепция качества пищевых продуктов, известная как Качество пищевых продуктов 4.0 (Food Quality 4.0), представляет собой интегрированный подход, сочетающий передовые технологии и аналитику данных для улучшения производства и переработки продуктов питания. Эта современная интеграция характеризуется включением в пищевую промышленность принципов Индустрии 4.0, таких как автоматизация, интернет вещей, искусственный интеллект и технологии блокчейн. Эти технологии улучшают прослеживаемость и позволяют осуществлять контроль качества продуктов питания в режиме реального времени. Концепция «треугольника качества пищевых продуктов 4.0» подчеркивает синергию между тремя важнейшими областями: пищевой наукой, обеспечением качества и технологиями Индустрии 4.0. Внедрение технологий Индустрии 4.0 в пищевую промышленность, несмотря на необходимость значительных инвестиций, продемонстрировало потенциал в повышении производительности, конкурентоспособности и устойчивости. Представленный обзор Концепции качества 4.0, характеристика процессов, систем и устойчивых нанотехнологий для улучшения производства и сокращения отходов может представлять интерес для участников пищевой цепи, производителей, торговой сети, технологов, руководителей и специалистов Систем менеджмента качества.

Ключевые слова: качество, устойчивое развитие, машинное обучение, искусственный интеллект, блокчейн, ультразвук, холодная плазма, окружающая среда, отходы, аддитивное производство, 3D-печать

**ANALYSIS OF THE STATUS AND DEVELOPMENT TRENDS
OF THE QUALITY 4.0 CONCEPT FOR SUSTAINABLE FOOD PRODUCTION**¹Burak L.Ch. ORCID ID 0000-0002-6613-439X,²Ermoshina T.V. ORCID ID 0000-0003-4575-8969,²Rodina E.E., ²Balandina S.V.¹*Limited Liability Company “Belrosakva”, Minsk, Republic of Belarus,
e-mail: leonidburak@gmail.com;*²*Accredited Private Educational Institution of Higher Education
“Moscow University of Finance and Law”, Moscow, Russian Federation*

The aim of this study is to analyze the current status and development trends of the Quality 4.0 concept as a key path to sustainable food production, with an emphasis on modern technologies that reduce food waste, minimize the environmental impact of food production, and ensure consumer access to safe, high-quality food. For this analysis, a bibliographic review of publications was conducted using VOSViewer software. The time period was set from 2015 to 2025. A search was conducted in English in the Web of Science bibliographic database, and in Russian, using keywords, in the Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU. In the first stage, 174 articles were selected; after analysis, 50 publications that met the inclusion criteria were included in the review. The modern concept of food quality, known as Food Quality 4.0, is an integrated approach combining advanced technologies and data analytics to improve food production and processing. This modern integration is characterized by the incorporation of Industry 4.0 principles into the food industry, such as automation, the Internet of Things, artificial intelligence, and blockchain technologies. These technologies improve traceability and enable real-time quality control of food products. The concept of the “Food Quality Triangle 4.0” emphasizes the synergy between three key areas: food science, quality assurance, and Industry 4.0 technologies. The implementation of Industry 4.0 technologies in the food industry, despite the need for significant investment, has demonstrated the potential to improve productivity, competitiveness, and sustainability. This overview of the Quality 4.0 concept, characterizing processes, systems, and sustainable nanotechnologies for improving production and reducing waste, may be of interest to food chain participants, manufacturers, retailers, technologists, managers, and Quality Management System specialists.

Keywords: quality, sustainability, machine learning, artificial intelligence, blockchain, ultrasound, cold plasma, environment, waste, additive manufacturing, 3D printing

Введение

Пищевая промышленность всегда была одной из главных составляющих жизнеобеспечения людей, и ее качественное развитие служит важнейшей основой для содействия экономическому росту, удовлетворения потребностей и улучшения питания населения. С постоянным обострением продовольственных кризисов, наступлением эпохи крупномасштабной индустриализации в продовольственном секторе и растущей обеспокоенностью относительно питания и гигиены пищевых продуктов, к пищевой науке и технологиям, к системе пищевой промышленности в целом предъявляются более высокие требования. Концепция Качество 4.0 (Food Quality 4.0) оказывает значительное влияние на управление предприятием, особенно актуальное для пищевых предприятий, сталкивающихся с такими проблемами, как сложность цепочки поставок, соответствие нормативным требованиям и различные предпочтения потребителей. Эта концепция объединяет передовые стратегии, инновационные методы и современные информационно-коммуникационные технологии для реагирования на динамичное развитие цифровых технологий, глобальные экономические изменения и нестабильные условия ведения бизнеса. Суть Food Quality 4.0 заключается в ее способности использовать данные и технологии для принятия решений и повышения операционной эффективности. Поскольку потребители все больше осознают экологические и социальные проблемы, пищевые предприятия должны внедрять устойчивые процессы и обеспечивать прозрачность и этичность своей деятельности. Это подразумевает не только соблюдение нормативных стандартов, но и выход за рамки соответствия для достижения более высоких стандартов корпоративной ответственности. Стратегии адаптивного управления рисками, выделенные в недавних исследованиях, подчеркивают необходимость всеобъемлющего многоуровневого механизма управления рисками, который интегрирует как традиционные, так и передовые методы анализа, оценки и минимизации рисков. Этот подход особенно актуален для предприятий пищевой промышленности, которым необходимо отслеживать рыночные тенденции, политические и экологические изменения, а также операционные процессы, чтобы оставаться устойчивыми и инновационными. Используя передовые технологии и инновационные методы управления, пищевые предприятия могут повысить свою эффективность, адаптивность и устойчивость, в итоге достигая конкурентного

преимущества на рынке. Технологические достижения последнего десятилетия привели к новой промышленной революции, которую часто называют четвертой промышленной революцией или «Индустрией 4.0». Это революция, вызванная экспоненциальным ростом прорывных технологий и изменениями, которые эти технологии вносят в рабочие места, рабочую силу и рынки, которые обслуживают организации. «Food Quality 4.0» – это термин, обозначающий будущее качества и организационного совершенства в контексте потребностей и ожиданий в области производительности Индустрии 4.0 [1]. Перспективы развития пищевой промышленности предполагают разработки и промышленное использование современных технологических процессов, которые с учетом экономических, экологических и социальных факторов способны наиболее эффективно влиять на продовольственную безопасность. Эффективность использования новых и перспективных технологий может быть достигнута при условии соблюдения всех санитарных норм и правил во всей пищевой цепи, обеспечивающих получение качественных, безопасных продуктов с высокой пищевой ценностью и в полной мере отвечающие запросам потребителей [2]. Первым шагом в анализе концепции качества продуктов питания 4.0 является понимание того, что такое Качество 4.0, и применение его в непрерывной цепочке поставок продуктов питания. Ученые полагают, что Качество 4.0 – это интеграция Индустрии 4.0 и управления качеством [3]. В отличие от этого, общества, ориентированные на изучение вопросов качества, такие как Американское общество качества (ASQ), предполагают, что Качество 4.0 является четвертым эволюционным шагом управления качеством (как наследник контроля качества начала XX в., обеспечения качества 1950-х гг. и тотального управления качеством с 1980-х гг.), поддерживаемое цифровыми решениями. Поэтому Качество 4.0 следует понимать как целостную синергию концепций качества и инструментов Индустрии 4.0. Этот целостный подход был также подтвержден в работе Gunasekaran и соавт., где Качество 4.0 включает в себя такие составляющие, как существенное уменьшения материальных затрат на качество, повышение эффективности процессов, разработка методов и способов принятия решений и решения проблем, а также интегрирование концепции в цепочки формирования себестоимости [4]. Вспомогательными технологиями для индустрии 4.0 являются Интернет вещей, большие данные (БД), искусственный интеллект (ИИ), киберфизические системы (КФС),

облачные вычисления (ОВ), машинное обучение (МО), блокчейн и виртуальная реальность (ВР). Сбор, обработка и анализ больших данных в пищевом секторе требует интеллектуальных датчиков и надежной связи, что приводит к созданию умных продуктов, процессов, технологий и производств [5]. В связи с этим важно проанализировать концепцию Качества 4.0 с трех точек зрения: продукты питания как продукт, пищевые процессы и продовольственные системы.

Цель исследования – анализ современного состояния и тенденций развития концепции Качества 4.0, как основного пути устойчивого производства продуктов питания с акцентом на современные технологии, способствующие сокращению пищевых отходов, минимизацию воздействия производства продуктов питания на окружающую среду и обеспечение доступа потребителей к безопасным, высококачественным продуктам питания.

Материалы и методы исследования

С целью анализа тенденций и существующего уровня качества продуктов питания 4.0 провели библиографический обзор публикаций, используя программное обеспечение VOSViewer [6, 7]. Анализ состоял из трех действий: сбор данных, обработка и исключение данных, визуализация и интерпретация. Вначале извлекали из научных статей, индексированных в Web of Science по поисковому запросу «качество продуктов питания» + «индустрия 4.0», название, данные авторов и аннотацию. В поиск были включены только оригинальные статьи и обзоры, за исключением глав книг и сборников статей. Временной период был установлен 10 лет, с 2015 по 2025 г., учитывая, что индустрия 4.0 ускорила свой темп с 2015 г., хотя индустрия 4.0 была инициирована в 2011 г. Поскольку количество публикаций по теме цифровизации и автоматизации качества продуктов питания значительно, в результате научного поиска было установлено 174 публикации. Для анализа источников и поиска ответов на поставленные вопросы исследования извлекались данные из 50 статей, соответствующих критериям включения.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Качество пищевых продуктов 4.0 – аспект, основанный на процессах

С целью обеспечения производства продукции, которую можно отнести к группе инновационной и технологически

сложной, целесообразно и необходимо внедрить «контролируемое качество», которое позволит повысить непосредственно качество продукции и процессов с ограниченными вариациями [8]. Одной из основ внедрения аспекта качества в процесс является анализ данных и их преобразование в новые источники знаний. Цифровые инструменты, разработанные в контексте Индустрии 4.0, могут изменить понимание качества. В ходе эволюции качества были внедрены различные инструменты, позволяющие компаниям улучшать свои процессы [9]. Параллельно в пищевой промышленности были внедрены методы бережливого производства для повышения операционной эффективности и производительности. Смысл бережливого производства в пищевой промышленности заключается в том, чтобы производить необходимые продукты питания в необходимом время, требуемого качества и в требуемом количестве, минимизируя отходы и складские запасы.

Многие авторы подтвердили, что использование данных инструментов открывает путь к успешной реализации программ обеспечения качества, хотя некоторые авторы отмечают отсутствие эффективности при использовании этих инструментов [10]. Kaoru Ishikawa предложил свои семь основных инструментов качества (рис. 2), которые нужны каждой компании. В результате ASQ назвал их «основной семеркой», а Montgomery – «великолепной семеркой» [11–13]. Пищевым предприятиям, особенно малым и средним предприятиям (МСП), сложно внедрить эти базовые инструменты. Это было подтверждено несколькими исследованиями в Сербии, Португалии и Швеции, где менее трети компаний используют эти инструменты. Значимость этого факта поднимает вопрос о том, чего можно ожидать от внедрения инструментов Качества 4.0 на пищевых предприятиях, когда основные инструменты используются редко. Когда речь идет о бережливом производстве, основными препятствиями являются сложность пищевых процессов применительно к конкретной пищевой отрасли, высокая вариативность параметров качества, связанных с сырьем, а также недостаток знаний и ресурсов [13].

В середине 1970-х гг. Союз японских ученых и инженеров разработал и внедрил семь инструментов управления (табл. 1), сместив акцент с контроля процессов на содействие планированию и инновациям. Исследования уровня внедрения этих новых инструментов в пищевой промышленности отсутствуют.

Таблица 1

Семь инструментов качества

Базовая семерка	Японская семерка	Семерка Качество 4.0
Блок-схема Контрольная карта Контрольный лист Причина и следствие Гистограмма Диаграмма Парето Корреляционная диаграмма	Диаграмма родства Диаграмма взаимосвязей Древовидная диаграмма Матричная диаграмма Анализ матричных данных Диаграмма стрелок Схема программы принятия процессуальных решений	Искусственный интеллект Большие данные Блокчейн Глубокое обучение Машинное обучение Наука о данных Включающие технологии (технологии, обеспечивающие возможности)

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

При переходе к качеству 4.0 ASQ определил семь новых инструментов (табл. 1), необходимых для развертывания в цифровых средах, системах искусственного интеллекта, больших данных, технологии блокчейна, глубокого обучения, машинного обучения, науки о данных и передовых технологий [12]. Тремя основными наиболее важными особенностями Качества 4.0 являются автоматизированный контроль, электронные результаты и цифровая интеграция цикла качества [10].

Искусственный интеллект включает в себя различные инструменты, такие как системы компьютерного зрения или использование роботов в пищевой промышленности. Это может помочь в принятии решений с учетом сложности продуктов питания. Примером использования ИИ является оценка растений на разных стадиях уборки и после сбора урожая для выявления возможных заболеваний и порчи [10]. Искусственный интеллект как междисциплинарная наука, поддерживаемая машинным обучением и глубоким обучением, может способствовать развитию пищевой промышленности за счет улучшения качества и безопасности продуктов питания, соблюдения правил гигиены и производства [14, 15]. БД используют инструменты, которые позволяют обрабатывать и анализировать значительный объем содержания данных. Сложность внедрения этих инструментов в продовольственном секторе обусловлена большими различиями в составе используемых наборов данных, отсутствием общих данных, а также навыков и знаний [14]. Блокчейн является перспективной технологией в пищевом секторе, поскольку он обеспечивает эффективную прослеживаемость, поддерживает отзыв, помогает бороться с различными фальсификациями и мошенничеством с пищевыми продуктами, а также повышает доверие

к маркировке (органический, кошерный продукт и др.). Эта технология позволяет отслеживать товары по всей цепочке поставок продуктов питания [16]. Глубокое обучение – это инструмент, который позволяет управлять данными многомерных гиперспектральных изображений. Это помогает в классификации изображений и распознавании сложных образов, которые применимы в пищевом секторе и расширяют перспективы различных прогнозов. Это стало современным методом обнаружения, распознавания и классификации в пищевом секторе и сельском хозяйстве [17].

Машинное обучение – это способность различных компьютеров и устройств улучшать свои возможности на основе собранных данных и их обработки. Машинное обучение в сочетании с методами распознавания изображений является полезным инструментом контроля качества пищевых продуктов, обладая потенциалом для анализа данных, обнаружения мошенничества и прогнозирования. Наука о данных объединяет разнородные наборы данных для дальнейшей классификации, анализа, поиска закономерностей и прогнозирования для разработки устойчивых моделей и решений. Наконец, передовые технологии поддерживают использование различных датчиков и исполнительных механизмов, Интернета вещей и виртуальной реальности для поддержания качества продуктов питания. Использование инструментов распознавания лиц в качестве новой технологии может применяться в сенсорных исследованиях и пероральной обработке пищевых продуктов [18].

2. Качество пищевых продуктов 4.0 – системное измерение

Известно, что концепция системы менеджмента качества (СМК) была разработана на основе философии гуру качества

(Joseph Juran, Kaoru Ishikawa, Edwards Deming) и работ Технического комитета 176 Международной организации по стандартизации. Стандарт ISO 9001 – это базовый стандарт СМК, разработанный для подтверждения компаниями способности поставлять продукцию, соответствующую требованиям потребителей и нормативным требованиям, достигая удовлетворенности потребителей и демонстрируя постоянное улучшение своих продуктов, процессов и систем [19]. Согласно недавнему опросу ISO, в настоящее время существует более миллиона сертификатов ISO 9001 в 189 странах мира, но менее 27 000 (2,5%) выдано компаниям, работающим в пищевом и сельскохозяйственном секторе [20].

Когда дело доходит до анализа состояния внедренных систем управления в пищевом секторе, типичные подходы зависят от времени: *ex ante* (до внедрения системы управления), *ex durante* (во время внедрения) и *ex post* (после завершения). Хотя преимущества внедрения СМК подтверждаются многими авторами, количество исследований, посвященных исключительно пищевой отрасли, весьма ограничено [20]. Большинство компаний подтверждают некоторые улучшения (в пищевых продуктах и процессах), повышение удовлетворенности клиентов и повышение конкурентоспособности. Однако некоторые авторы полагают, что процесс сертификации является скорее маркетинговым мероприятием, чем реальной выгодой [21]. Поскольку пищевая промышленность не является лидером по внедрению СМК, а сертифицированная СМК имеет ограниченное число пищевых компаний, перевод существующих систем менеджмента на Качество 4.0 является непростой задачей. Zulqarnain и соавт. конкретно обозначили необходимость систем управления качеством для реализации преимуществ «Качества 4.0» и подчеркнули растущий спрос на удобные для пользователя инструменты для МСП [9]. Признана необходимость стандартизации при внедрении Качества 4.0. Так, Германия и Испания сформировали различные рабочие группы по стандартизации. ASQ и Boston Consulting Group провели исследование состояния внедрения инструментов качества 4.0. Опрос проводился в обрабатывающей промышленности США и Германии, и результаты показали, что только 16% опрошенных компаний внедрились Качество 4.0, при этом почти две трети респондентов не планируют его внедрять. Основным

препятствием, указанным опрошенными компаниями, является отсутствие цифровых навыков, за которым следуют ограниченная культура цифрового качества, а также низкий уровень инфраструктуры и целостности данных [22]. Escobar и соавт. утверждают, что компаниям и их менеджерам не хватает видения того, как воспользоваться преимуществами больших данных и искусственного интеллекта [23]. Это соответствует исследованию Zonnenshain and Kenett о том, что наиболее важной основой успешного внедрения Качества 4.0 являются «данные», и наука о данных должна играть важную роль в управлении ими в реальном времени и во всех процессах [24].

Поскольку бережливое производство фокусируется на совершенствовании производственных процессов и повышении производительности, применение технологий Качества 4.0, таких как Интернет вещей, интеллектуальное управление процессами и оптимизация больших данных, открывает новый потенциал. Хотя бережливое производство до сих пор не получило широкого распространения на пищевых предприятиях, а его внедрение на МСП пищевого сектора является недостаточным из-за ограниченности знаний, ресурсов и организационной культуры, использование различных цифровых платформ и приложений, адаптированных для МСП, может иметь потенциал. В пищевой промышленности, например в системах мониторинга пищевых продуктов и холодильного оборудования в Великобритании, есть компании, которые признаны лидерами в использовании Интернета вещей для улучшения систем безопасности и отслеживания пищевых продуктов [10].

Цепочки поставок продовольствия состоят из множества участников, целью которых является доставка продуктов питания конечным потребителям. По сути, сети состоят из четырех основных участников: производителей, операторов продовольственного бизнеса, розничных продавцов и потребителей продуктов питания. Важным фактором, влияющим на пищевые цепи, является расстояние между каждым звеном цепи, что определяет их как глобальные или локальные. Локальные продовольственные цепи могут состоять только из производителей и потребителей, в отличие от глобальных цепей с множеством предпринимателей в области пищевой продукции и каналов распределения. Эта сложность влияет на качество и риск ухудшения качества пищевых продуктов на протяжении всей цепочки от «фер-

мы до прилавка» [24, 25]. Использование различных интеллектуальных датчиков, направленных на обеспечение качества по всему технологическому циклу от производства до конечного потребителя, является одним из самых эффективных способов применения технологий Качества 4.0. Интеллектуальные упаковочные системы применяются для мониторинга в режиме реального времени фруктов и овощей, мясных и молочных продуктов в цепочке поставок, посредством взаимодействия между небольшими компонентами внутри упаковки, такими как колориметрические индикаторные этикетки, датчики и целевые ответчики для предоставления информации о качестве продукта и параметрах окружающей сред [25]. Интернет вещей соединяет машины, информацию и людей через сеть подключенных устройств, создавая систему, которая может отслеживать, собирать, обмениваться и анализировать данные для оптимизации эффективной операционной деятельности. Автоматизация, использование искусственного интеллекта и Интернета вещей в сетях сельскохозяйственного производства и заводов позволяют оптимизировать цепочки поставок продуктов питания на обоих концах конвейера – спроса и предложения [26]. Ключевые показатели требуют многих составляющих, такие как финансы, производительность, качество продуктов питания и предотвращение различных потерь, в том числе, связанных с качеством.

3. Качество продуктов питания 5.0

Качество 5.0 – это новая концепция, соответствующая Индустрии 5.0. Обоснование перехода на новый уровень связано с ролью человека, поскольку многие авто-

ры критикуют Индустрию 4.0 за машиноцентричность, так как роботы заменяют людей на рабочих местах и способствуют развитию неравенства в обществе. Так например, Coronado и соавт. отмечают, что отрасли, ориентированные на производительность, должны включать человеческое измерение, связывая индустрию 5.0 как «человекоцентрированную» [27]. Человекоцентричность в рамках Качества 4.0 стала новой парадигмой Качества 5.0, ориентированной на качество взаимодействия между работниками и машинами. Некоторые атрибуты, соответствующие этой концепции, связаны с тем, насколько эффективны и удовлетворены работники в такой среде, а также с потенциалом для обучения и улучшения знаний, указывая на безопасность как на эргономичный аспект качества. Главный вопрос, который возникает в контексте качества пищевых продуктов: что должно быть краеугольным камнем качества пищевых продуктов 5.0? Принимая во внимание, что пищевые компании несут ответственность за поставку безопасных продуктов питания на рынке, юридическая ответственность за размещение безопасных продуктов питания определенного качества в роботизированной/цифровой рабочей среде должна иметь первостепенное значение [28]. Параллельно с этим потенциал улучшения качества продуктов питания (без ущерба для безопасности пищевых продуктов) на основе обучаемости и эффективности пищевой промышленности 5.0 определяет ключевые элементы качества продуктов питания 5.0. В табл. 2 представлены основные различия в качестве пищевых продуктов 4.0 и 5.0, модифицированные на основе данных исследований [29].

Таблица 2

Ключевые аспекты качества пищевых продуктов 4.0
и качества пищевых продуктов 5.0

Аспект	Качество продуктов питания 4,0	Качество продуктов питания 5,0
Рабочая среда	Умная пищевая фабрика	Совместное производство продуктов питания человеком и роботом
Контрольная среда	Цифровые технологии	Совместный контроль качества человек – робот
Производительность	Эффективность производства	Социальная эффективность
Преимущества	Экономическая выгода	Устойчивая выгода
Роль рабочей силы	Замена машинами	Развитие талантов и знаний
Обязанность	На роботах/машинах	Назад к людям

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

4. Современные технологии обработки и консервирования для повышения качества продуктов питания

Традиционный подход к обработке пищевых продуктов предполагает применение различных операций, которые часто используют повышенную температуру в качестве главного параметра обработки. Хотя температурная обработка улучшает сохранность, обеззараживание и массообмен пищевых продуктов, следует выделить ее некоторые важные недостатки с точки зрения питательных и сенсорных качеств. Во время обработки термическими методами (стерилизация, пастеризация и т.д.) может происходить разложение термочувствительных соединений, особенно биологически активных веществ (БАВ), таких как витамины, полифенолы, терпеноиды и каротиноиды, что отрицательно влияет на качество и органолептические свойства пищевых продуктов. Тепло, потребляемое во время этого процесса, генерируется нагревателями и затем передается пище. Это еще один важный аспект, который следует учитывать, поскольку высокое потребление энергии не является экологически чистым и экономически эффективным методом [30]. Нетермические технологии (НТТ) были признаны эффективной заменой традиционным подходам благодаря их способности вызывать инактивацию микроорганизмов при более низких температурах [30]. Сохранность термочувствительных молекул признана еще одним важным аспектом НТТ, хотя наблюдаются некоторые ограничения в инактивации микробных спор. Более низкие температуры и, следовательно, более низкое потребление энергии придают этим технологиям экологический аспект, поскольку они оказывают меньшее воздействие на окружающую среду. Основными НТТ, которые широко использовались в пищевой промышленности в последнее десятилетие, являются ультразвуковая (УЗ) обработка, импульсные электрические поля (ИЭП), обработка высоким давлением (ВД) и холодная плазма (ХП) [2, 30].

Ультразвуковые волны могут использоваться в качестве вспомогательного средства в различных технологиях обработки пищевых продуктов, а именно: инактивации микроорганизмов, резке, сушке, замораживании, экстракции и вспенивании [31]. УЗ способствует модификации качественных характеристик продуктов животного происхождения (например, молочных продуктов, мяса, яиц), влияя на несколько важных биохимических процессов (таких как окисление, реакция Майяра, протеолиз

и этерификация). Основными механизмами, лежащими в основе этих явлений, является изменение структуры белков, а следовательно, и микроструктуры пищи, а также высвобождение гидролитических центров для лучшего контакта с пищеварительными ферментами. Хотя УЗ-технология доказала свою эффективность при обработке мясных продуктов, следует подчеркнуть, что неправильная обработка может ухудшать качество пищи [30]. Обработка высокоинтенсивным УЗ показывает многообещающие результаты для жидких пищевых продуктов. Эффективность данной обработки проявляется в микробной и ферментативной инактивации, что, как следствие, улучшает их стабильность и срок годности. Однако особое внимание следует уделять оптимизации условий процесса для предотвращения потери летучих соединений, питательных веществ и биологически активных веществ [2]. В отличие от микробной инактивации, высокоинтенсивный УЗ с «мягкими» параметрами процесса может быть использован для стимуляции роста микробов, что полезно при производстве пробиотиков и ферментированных напитков. В продукте, обработанном УЗ, установлена более высокая концентрация олигосахаридов, биоактивных пептидов и меньшее количество органических кислот [2, 30].

Напитки и напитки, обогащенные нутрицевтиками и БАВ, нашли свое место на современном рынке. Применение термической обработки при их изготовлении ограничено по двум причинам: тепло может вызвать нежелательные физико-химические изменения в конечных продуктах; многие БАВ обладают недостаточной термостабильностью и могут разрушаться при повышенных температурах. Было доказано, что методы обработки УЗ и ВД являются эффективными технологиями для производства функциональных продуктов питания на основе инкапсуляции БАК в молочные продукты и напитки [2, 30]. Экстракция БАК из лекарственных и ароматических растений при воздействии УЗ продемонстрировала огромные преимущества по сравнению с традиционными процессами экстракции с точки зрения снижения потребления ресурсов и увеличения выхода и качества экстрактов, особенно в случае умеренно полярных соединений, таких как основные классы полифенолов. (фенольные кислоты, флавоноиды, антоцианы и др.) [32, 33].

Помимо текущих тенденций и инноваций в разработке новых продуктов питания, сырые свежие продукты (например, овощи, фрукты и мясо) остаются важной частью рациона человека. Хотя эти продук-

ты обычно содержат все необходимые питательные вещества, существует ряд проблем, связанных с их качеством, безопасностью и сроком хранения. Они подвержены порче как с биохимической, так и с микробиологической точки зрения [2, 34, 35].

Обработка ИЭП может использоваться для изменения структурных, текстурных и функциональных свойств мяса. Протеолиз мяса происходит посредством электропорации клеточной мембраны, индуцированной ИЭП. Изменение мышечной ткани может улучшить нежность мяса как показатель качества, что приводит к улучшению сенсорных характеристик и восприятия потребителем. Недостаток этой обработки состоит в нежелательном окислении липидов. Взаимодействие между окислителями и соединениями, склонными к окислению (фосфолипидами и ненасыщенными жирными кислотами), влияет на качество продукта, что выражается в появлении неприятного вкуса. Обработка ИЭП также может влиять на другие параметры мясных продуктов, такие как содержание минералов, цвет, потеря массы и др. [2]. Сушка фруктов и овощей с помощью ИЭП используется для улучшения тепло- и массообмена, сокращения времени обработки и предотвращения потери питательных веществ и БАВ [36]. Еще одним преимуществом, которое можно получить от этой обработки, является инаktivация местной микробиоты и ферментов, ответственных за окислительный распад.

Было показано, что экстракция с помощью ИЭП является новым подходом к выделению различных БАВ (полифенолов, углеводов, каротиноидов, сероорганических соединений, терпеноидов и т.д.) [2]. Экстракция с помощью ИЭП оказалась успешной в выделении БАВ из фруктовых и овощных отходов, отходов морепродуктов, побочных продуктов пищевой промышленности и сельскохозяйственных отходов. Тем не менее существуют определенные проблемы и ограничения для промышленного применения [2, 32]. Обработка ИЭП особенно подходит для повышения выхода фруктовых соков. Помимо увеличения выхода ценных соединений, обработка ИЭП также вызывает микробную и ферментативную инаktivацию, что приводит к повышению стабильности, безопасности и увеличению срока хранения продуктов [2, 33]. Благодаря этому ИЭП успешно применяется в производстве ферментированных вин, поскольку увеличивается содержание полифенолов в виноградном соке, сокращается время мацерации, улучшается цвет и инаktivируется микробная порча [32].

Изготовленными в условиях промышленного производства продуктами питания, обработанными высоким давлением (ВД), являются: фрукты и овощи (соки, смузи, пюре и т.п.), мясо и мясопродукты, морепродукты и готовые блюда. Преобладающими патогенами пищевого происхождения, вызывающими пищевые отравления, являются *Escherichia coli*, *Salmonella spp.* и *Listeria monocytogenes*. Установлено, что обработка при давлении 600 МПа способствует снижению численности вышеупомянутых бактерий на 5–8 log. Ограничения ВД в инаktivации микробных спор можно преодолеть путем применения сверхкритического CO₂ [37]. Механизм инаktivации основан на нарушении клеточной структуры и деградации клеточных белков и ферментов [38]. Добавление воды в качестве дополнительного растворителя обеспечивает синергетический эффект при инаktivации спор, а умеренная температура процесса обеспечивает стабильность текстурных, питательных и сенсорных свойств обработанного продукта.

Обработка ВД изменяет физико-химические и пищевые свойства полисахаридов (пектинов, крахмала и др.) в различных пищевых матрицах. Это может быть использовано для улучшения технических функций (гелеобразование, пленкообразование, пенообразование и эмульгирование) и пищевой ценности (усвояемости) полисахаридов без изменения вкуса и внешнего вида продуктов по сравнению с термической обработкой [2, 30, 37]. Такая обработка также улучшает биодоступность минералов, полифенольных антиоксидантов и фолиевой кислоты, что особенно наблюдалось в цельнозерновых и бобовых [2].

По данным Šojić и соавт. [38] липидные экстракты, богатые терпеноидами, могут быть использованы в качестве природных антимикробных агентов и антиоксидантов в различных мясных продуктах в качестве заменителей синтетических и токсичных добавок (например, нитритов). Гидродистилляция требует высоких температур для производства эфирного масла, и во время этого процесса происходят химические изменения. Сверхкритическая экстракция (СКЭ) имеет огромные преимущества перед гидродистилляцией, поскольку она проводится при умеренных температурах, что предотвращает разрушение целевых соединений, экстракт имеет более высокий выход, а затраты энергии и времени ниже. Поэтому СКЭ можно считать экологически безопасным методом [39]. Кроме того, эти экстракты обладают лучшим консервирующим действием на мясные продукты и лучшими органолептическими свойствами.

Холодная плазма (ХП) применялась как эффективный нетермический метод увеличения срока хранения различных пищевых продуктов за счет микробной и ферментативной инактивации, повышения обезжиривания пищевых продуктов и улучшения их упаковки [2, 30]. Что еще более важно, этот метод показывает многообещающие результаты для широкого спектра продуктов питания, а именно для фруктов и овощей (включая соки и свежие продукты), морепродукты, готовые блюда, ростки, крупы, мясные продукты и специи [2]. Консервирующий эффект обработки ХП выражается в антимикробном воздействии на распространенные патогены пищевого происхождения *Escherichia coli*, *Salmonella spp.* и *Listeria monocytogenes*, а также дрожжи и плесени [2, 40]. Эффекты инактивации основаны на повреждении микробных биомолекул (ДНК, белков и ферментов), перекисном окислении липидов и распаде клеточной структуры. Свободные радикалы, образующиеся при ХП, влияют на витамины, ферменты и антиоксиданты в свежих продуктах, и их содержание в результате такой обработки обычно снижается. По тем же причинам ХП также эффективен для консервирования фруктовых соков [2, 33]. Фактически содержание БАВ в соках, обработанных ХП, увеличивается, а также улучшаются текстура и сенсорные свойства [2]. Хотя обработка ХП оказалась эффективной в лабораторных условиях, существуют определенные технологические ограничения и ограничения по безопасности, которые следует учитывать. До сих пор отсутствуют данные о безопасности и токсикологии свободных радикалов, образующихся во время обработки, и о том, как именно они модифицируют пищевые компоненты [2]. Другие ограничения связаны с масштабом применения, поскольку однократно можно обрабатывать относительно небольшое количество продукта [2].

Учитывая потенциальные возможности применения нетермических методов обработки и консервирования (НТТ), а также их преимущества и ограничения, очевидно, что ни один из вышеперечисленных способов обработки не является универсальным для всех типов пищевых продуктов. Выбор подходящего подхода во многом зависит от конкретного случая и требует обширной работы по оптимизации процесса. Сочетание НТТ, известное как подход «концепции препятствий», направлено на то, чтобы подчеркнуть синергетический эффект выбранных методов для улучшения качества пищевых продуктов, минимизации недостатков и уменьшения воздействия на свойства пи-

щевых продуктов. Такой подход позволяет преодолеть ограничения одной технологии, повышает эффективность и спектр применения, а также сохраняет качество продуктов питания [2, 39].

5. Аддитивное производство как развивающаяся индустрия 4.0

Технология трехмерной (3D) печати – это новая перспективная технология, которая представляет большой интерес для исследователей, промышленности и общественности благодаря различным областям применения, таким как медицина, гостиничный бизнес, инженерия, производство и искусство. Основной особенностью этой технологии является послойное добавление материала, позволяющее производить изделия сложной конфигурации, чего было бы трудно или невозможно достичь с помощью традиционных методов производства [41]. В последнее время технология 3D-печати пищевых продуктов как новое направление в процессах производства продуктов питания привлекает внимание всего мира. Исследование Data Bridge показывает, что глобальный рынок 3D-печати продуктов питания, по прогнозам, будет расти в среднем на 52,30% к 2021–2028 гг. Распространение знаний о необходимости модернизации технологий производства продуктов питания является важным фактором, способствующим росту рынка пищевой 3D-печати [41]. Особую важность эта технология представляет для производства функциональных продуктов питания, особенно в период пандемии и глобального кризиса. Эта технология позволяет с помощью компьютера создавать трехмерные геометрически сложные объекты пищевых продуктов различного состава [41]. В пищевом секторе технология 3D-печати имеет широкий спектр применения: от производства продуктов питания для пожилых людей и детей до производства функциональных продуктов питания для использования в космических миссиях. Так как добавление материалов осуществляется послойно, эта технология также известна как «аддитивное производство». Эта технология позволяет создавать сложные 3D-модели без лишних затрат материала и без использования форм, штампов, ребер жесткости и режущего инструмента, распространенных в традиционном производстве [42]. В настоящее время для целей аддитивного производства в пищевом секторе доступно несколько технологий 3DP, таких как экструзионная печать, печать селективным спеканием, связывающая печать и струйная печать. Наиболее широко используемым процессом печати

является экструзия, то есть послойное выдавливание подготовленного материала из печатающей головки (экструдера) на подложку с целью формирования запрограммированной объемной формы. Эта технология позволяет создавать 3D-структуры с высоким разрешением и сложностью, но ограничивается использованием порошковых материалов, таких как сахар, жир или гранулы крахмала. Физико-химические свойства материала (например, размер частиц, плотность, текучесть, влажность и сжимаемость) оказывают большое влияние на толщину слоя и, следовательно, на качество печати [8]. Слой порошкового материала должен быть тонким и однородным, что имеет решающее значение для механической прочности и точности печатаемого объекта. Кроме того, порошок должен быть рыхлым, не склонным к образованию агломератов или прилипанию к контактным поверхностям. Как и в случае любой 3DP, помимо свойств материала важны такие факторы обработки, как тип лазера, мощность и диаметр лазерного пучка [43]. Струйная печать используется для заполнения и украшения поверхности пищевых продуктов, таких как торты, печенье или пицца. Принцип струйной печати заключается в том, что капли печатаемого пищевого материала (называемые чернилами) пропускаются через термическую или пьезоэлектрическую головку. Существует два типа струйной печати: непрерывная струйная печать и печать по требованию. При непрерывной струйной печати чернила выбрасываются непрерывно через пьезоэлектрический кристалл, колеблющийся с постоянной частотой, а при печати по требованию чернила выбрасываются в виде капель под давлением клапана. Независимо от используемой технологии, процесс 3D-печати продуктов питания можно разделить на три основных этапа. На первом этапе продукты питания подвергаются предварительной обработке, то есть приводятся в форму, пригодную для печати. Поскольку ингредиенты печатаются в виде порошка, жидкости, теста или пасты, необходимо провести предварительные операции, такие как помол (мука), варка (картофель или крахмалистые вещества) или смешивание (мясо). Для получения смеси с оптимальными реологическими свойствами обычно необходимо добавлять различные добавки (например, гидроколлоиды) [42, 43]. Второй этап, для которого сегодня доступно несколько методик, – печать подготовленного материала. Третий этап состоит из процессов, благодаря которым продукт становится готовым к употреблению или готовым для достижения конеч-

ной желаемой текстуры. Распространенными примерами являются замораживание, запекание и обжаривание.

Материалы для печати 3D-продуктов можно классифицировать по простоте печати, основным ингредиентам, связанным с питанием (например, белки, крахмалы, волокна, функциональные соединения, такие как витамины и антиоксиданты), а также происхождению материала, например чернила на основе молочных продуктов, мяса, фруктов и овощей. Самыми популярными такими материалами для печати являются шоколад и картофельное пюре. Благодаря высокому содержанию жира в шоколаде и высокому содержанию крахмала в картофеле такие смеси могут хорошо смешиваться с биоактивными соединениями и другими функциональными ингредиентами, улучшающими качество печати [41, 43]. Цифровизация процесса позволяет контролировать продукт в процессе печати и дает возможность вносить желаемые изменения в дизайн. Технология 3D-печати снижает количество отходов и выбросов углекислого газа, а также затраты на энергию, подготовку и транспортировку и открывает большие возможности для инноваций. Хотя возможности технологии 3D-печати пищевых продуктов огромны, остается еще много проблем, которые необходимо решить, например печать сложных продуктов питания с множеством ингредиентов, частей или текстур (например, гамбургеры), которые требуют специализированной и сложной обработки, а также использование различных пищевых ингредиентов с большими различиями в физико-химических свойствах. Основными проблемами при производстве продуктов питания, напечатанных на 3D-принтере, являются безопасность, маркировка, сложность обработки и транспортировки, а также организация крупного производства [41, 44]. Применение устойчивых нетермических технологий для поддержания качества и продления срока годности продуктов, напечатанных на 3D-принтере, также недостаточно изучено, поэтому они, безусловно, представляют собой сложную задачу и являются объектом будущих научных исследований.

6. Предотвращение образования отходов

Сельское хозяйство является одним из первых этапов производства продуктов питания, определяющим их качество после последующей промышленной переработки. Вода, почва, воздух и другие факторы окружающей среды постоянно оказывают влияние на качество продуктов питания, воздействуя на них, можно избежать всевоз-

можных потерь, в том числе связанных с качеством. Инновационное развитие последних десятилетий в области нанотехнологий изменило ряд научных и промышленных областей, включая пищевую промышленность. Развитию и использованию нанотехнологий способствует растущая потребность в наночастицах в различных областях науки и технологий, включая переработку, упаковку, продление срока годности пищевых продуктов, разработку функциональных продуктов питания, обнаружение патогенов пищевого происхождения [2]. Кроме того, применение наночастиц в пищевой промышленности необходимо для обеспечения потребителей безопасными и незагрязненными продуктами питания. В целом использование нанотехнологий в продовольствии и сельском хозяйстве направлено на улучшение качества, безопасности и устойчивости продуктов питания и поддержку устойчивого сельского хозяйства [45].

Пестициды, фармацевтические препараты, красители и другие вещества используются в процессе промышленного производства потребительских и промышленных товаров. С целью повышения урожайности зерновых, предотвращения и борьбы с заражением вредителями и болезнями сельскохозяйственных культур в процессе сельхозпроизводства используются пестициды и другие агрохимикаты [30]. Фармацевтические препараты широко используются для борьбы с болезнями и улучшения здоровья людей, животных и экосистем. Остатки фармацевтических продуктов могут попадать в окружающую среду в процессе их производства, использования при орошении земель, использования не по назначению и утилизации. Пищевая промышленность является одним из крупнейших потребителей питьевой воды в мире. В условиях растущей нехватки питьевой воды повторное использование сточных вод стало важной экономической и экологической проблемой. Химические загрязнители стали одним из опасных факторов, воздействующих на пищевые продукты, поскольку остатки вышеупомянутых загрязнителей окружающей среды постоянно встречаются в пищевых продуктах. Стойкие органические загрязнители накапливаются по всей пищевой цепи, поэтому загрязнение окружающей среды является растущей глобальной проблемой.

Учитывая широкое распространение химических загрязнителей в пищевых продуктах и их серьезный риск для здоровья, предотвращение загрязнения является приоритетом общественного здравоохранения. Хотя все природные ресурсы в равной степени подвержены опасному воздействию

различных загрязнителей, наличие стойких органических загрязнителей в водной среде является одной из наиболее серьезных глобальных проблем. Сточные воды пищевой промышленности содержат стойкие органические соединения и обладают некоторой степенью токсичности. Различные технологии, такие как физические процессы (например, фильтрация и адсорбция) и процессы химического окисления, исследуются в качестве альтернативы или улучшения существующих процессов очистки сточных вод [46]. В частности, для удаления микрозагрязнителей из питьевой и сточной воды были предложены световые (например, ультрафиолет) и свободнорадикальные (например, гидроксильные) процессы [47]. В настоящее время ведется разработка новых методов очистки сточных вод и их использование для эффективного удаления из них загрязняющих веществ, особенно фармацевтических препаратов и пестицидов. Усовершенствованные процессы окисления (УПО) – это новые экологически чистые химические технологии, которые являются перспективной и устойчивой альтернативой традиционным методам, упомянутым выше. УПО основаны на образовании высокореактивных форм кислорода, таких как радикалы $\bullet\text{OH}$, которые разлагают опасные загрязняющие вещества, переводя их из восстановленных форм в конечную, нетоксичную окисленную форму [48]. Среди различных УПО, таких как реакция Фентона, озонирование, каталитическое влажное пероксидное окисление, каталитическое влажное воздушное окисление и электрохимическое окисление или комбинация некоторых из них, фотокатализ, особенно его гетерогенная форма, являются наиболее активно изучаемыми процессами для очистки воды [46]. Более того, фотокатализ оказался высокоэффективным и экологически чистым в разложении вредных органических загрязнителей за счет использования возобновляемой солнечной энергии [47].

К настоящему времени исследовано и использовано в качестве фотокатализаторов множество полупроводников, наиболее популярными из которых являются TiO_2 и ZnO . В целом наноматериалы способны поглощать или разлагать больше загрязняющих веществ, чем обычные материалы, поскольку они имеют большее соотношение поверхности к объему и содержат больше активных центров, что также способствует усилению фотокаталитической активности [48, 49]. В настоящее время большое внимание уделяется созданию различных наноматериалов на основе TiO_2 для фотокаталитических и других

целей. Наноматериалы могут быть синтезированы в различных структурах, таких как 0D, 1D, 2D и 3D. Например, сферический TiO_2 как 0D-наноматериал имеет большую площадь поверхности, что является важным фактором адсорбции и фотокатализа. Впоследствии одномерные структуры из волокон и трубок могут уменьшить потенциальную рекомбинацию фотогенерированных электронно-дырочных пар из-за короткого расстояния для диффузии носителей, светорассеивающих свойств и изготовления самостоятельных нетканых матов. Кроме того, 2D-наноллисты имеют гладкую поверхность и прочную адгезию, а 3D-монолиты обладают высокой подвижностью носителей [49].

Фотокатализ наноматериалов – инновационная технология, основанная на зеленой химии, которая эффективно способствует разложению загрязняющих веществ. В частности, фотокатализаторы на основе TiO_2 обычно используются для очистки воды, загрязненной пестицидами. В последние годы наноматериалы на основе ZnO также привлекли значительное внимание для эффективного разложения пестицидов. Это говорит о том, что фотокатализаторы на основе ZnO эффективны для потенциального применения в фотодеградационных сельскохозяйственных загрязнителях. Хотя такие соединения можно превратить с помощью этой технологии в промежуточные и нетоксичные конечные продукты, условия реакции для достижения высокой эффективности разложения с каждым типом наноматериалов сильно различаются [50]. Несмотря на значительный прогресс в синтезе фотокатализаторов для восстановления окружающей среды, их фотокаталитические характеристики в отношении разложения и минерализации возникающих органических загрязнителей и их промежуточных продуктов все еще нуждаются в дальнейшем совершенствовании с целью широкого промышленного использования.

Подводя итог, следует отметить, что вода является наиболее широко используемым сырьем в пищевой промышленности. Пищевые предприятия оказывают негативное влияние на окружающую среду и экономику из-за растущего спроса на воду и увеличения количества сточных вод, а также, как следствие, негативного воздействия на качество продуктов питания. Методы очистки воды на основе зеленых наноматериалов являются перспективными технологиями с преимуществами энергосбережения и защиты окружающей среды. Дальнейшее развитие данной технологии должно быть направлено на оптимизацию солнечных

поглотителей, с точки зрения влияния субстрата, срока службы и переработки, и, конечно, необходима совершенная технология солнечной термической парогенерирующей очистки сточных вод.

Выводы

Эволюция качества пищевых продуктов от версии 1.0 к версии 4.0 сопровождалась совершенствованием традиционных методов и технологий производства и переработки пищевых продуктов, а также расширением их сферы применения за счет сокращения потерь и отходов производства. Анализ результатов многих исследований показал, что перспектива развития Концепции качества пищевых продуктов 4.0 включает в себя: человеческие ресурсы, процессы, инновационные технологии и менеджмент. Касаемо пищевой промышленности, следует отметить, что существуют проблемы использования данных из-за их разнообразия, достоверности, совместимости наборов данных, ценности инноваций, пробела в навыках и использования инструментов поддержки принятия решений. На основании вышеизложенного для внедрения и эффективного развития концепции качества продуктов питания 4.0 необходимо:

1. Осуществлять разработку приемлемых и удобных для конкретной организации индивидуальных решений, применимых в цепочке поставок продуктов питания. Также, ввиду отсутствия знаний о Качестве 4.0, целесообразно создавать учебные программы и системы сертификации, сопоставимые с «Шестью сигмами» или другими системами, разработанными различными международными организациями по Системам менеджмента. Темы должны включать следующее: «статистика», учитывая важность контроля качества, «качество» и его различные инструменты и концепции, такие как бережливое производство и шесть сигм, «производство», охватывающее понимание всех аспектов процесса, позволяющее осуществлять контроль качества. «программирование» как важная тема в использовании информационных технологий в качестве.

2. Так как большинство компаний пищевой промышленности являются малыми и средними предприятиями, на которых занято более 50% всех работников отрасли, разработка мероприятий и мер должна учитывать особенность малых предприятий.

3. В настоящее время необходимо развивать область внутри «треугольника качества продуктов питания 4.0», тремя гранями которого являются «пищевая наука», «обеспечение качества» и «индустрия 4.0». «Пищевая наука» включает в себя пищевые

технологии, безопасность пищевых продуктов и качество продуктов питания (включая сенсорный анализ и науку о потреблении). «Обеспечение качества» включает в себя различные инструменты качества, применимые как к цепочке создания стоимости продуктов питания, так и к среде Индустрии 4.0. «Индустрия 4.0» состоит из всех инструментов и технологий, поддерживающих эту индустриальную концепцию. Эта область представляет собой возможность не только для роста различных приложений, адаптированных к производству продуктов питания, но и для развития и накопления знаний, которые так необходимы современному производству с целью разумного и эффективного достижения цели устойчивого производства продуктов питания.

В заключение следует отметить, что в настоящее время производство продуктов питания находится в рамках четвертой промышленной революции. Однако ожидается, что в течение следующих нескольких лет, особенно в начале 2030-х гг., произойдет переход к пятой промышленной революции, обычно называемой промышленной революцией 5.0. Предполагается, что предстоящая революция увеличит его возможности и расширит сферу его действия до формирующегося FQ 5.0. Индустрия 5.0 (Industry 5.0) представляет собой новый и быстро развивающийся этап индустриализации, на котором работники-люди сотрудничают со сложными технологиями и роботами с искусственным интеллектом для оптимизации рабочих процессов. Предлагаемый подход будет основан на трех ключевых принципах, а именно: ориентированность на человека, устойчивое развитие и устойчивость.

Список литературы

1. Хайдер М.А., Коробов С.А. Инновационная концепция Качества 4.0: организационные особенности внедрения // *Индустриальная экономика*. 2022. Т. 5. № 3. С. 429–433. DOI: 10.47576/2712-7559_2022_3_5_429.
2. Бурак Л.Ч. Ограничения и возможности современных технологий обеспечения микробиологической безопасности пищевых продуктов // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2024. № 2–3 (396). С. 6–13. DOI: 1026297/0579-3009.2024.2-3.1.
3. Citybabu G., Yamini S. Lean Six Sigma and Industry 4.0 – a bibliometric analysis and conceptual framework development for future research agenda // *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2024. Vol. 73. Is. 5. P. 1502–1534. DOI: 101108/IJPPM-10-2022-0549.
4. Краковская И.Н., Казаков Е.А., Шумкина А.А. Развитие промышленных бизнес-моделей: Индустрия 4.0, устойчивость и непрерывность бизнеса, менеджмент качества // *Вопросы инновационной экономики*. 2023. Т. 13. № 4. С. 2025–2038. DOI: 1018334/vinec.13.4.120010.
5. Gunasekaran A., Subramanian N., Ngai W.T.E. Quality management in the 21st century enterprises: Research pathway towards Industry 4.0 // *International Journal of Production Economics*. 2019. Vol. 207. P. 125–129. DOI: 101016/j.ijpe.2018.09.005.
6. Bukar U.A., Sayeed M.S., Razak S.F.A., Yogarayan S., Amodu O.A., Mahmood R.A.R. A method for analyzing text using VOSviewer // *MethodsX*. 2023. Vol. 11. P. 102339. DOI: 101016/j.mex.2023.102339.
7. Павлова И.А. Построение карты соприсутствия ключевых слов по теме «капитал здоровья» в программе Vosviewer // *Векторы благополучия: экономика и социум*. 2023. Т. 49. № 2. С. 38–54. DOI: 1018799/26584956/2023/2/1592.
8. Hassoun A., Aït-Kaddour A., Abu-Mahfouz A.M., Galanakis C.M., Jambak A.R., Lorenzo J.M., Mâge I., Ozogul F., Regenstein J. The fourth industrial revolution in the food industry-Part I: Industry 4.0 technologies // *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2023. Vol. 63. P. 6547–6563. DOI: 101080/10408398.2022.2034735.
9. Zulqarnain A., Wasif M., Iqbal S.A. Developing a quality 4.0 implementation framework and evaluating the maturity levels of industries in developing countries // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. P. 11298. DOI: 103390/su141811298.
10. Djekić I., Velebit B., Pavlič B. Food Quality 4.0: Sustainable Food Manufacturing for the Twenty-First Century // *Food Eng Rev*. 2023. Vol. 15. P. 577–608. DOI: 101007/s12393-023-09354-2.
11. Hchaichi R. The Key Success Factors of Total Quality Management Implementation in State-Owned Enterprise // *International Journal of Public Administration*. 2023. Vol. 46. P. 156–167. DOI: 101080/01900692.2021.1993902.
12. Radu E., Dima A., Dobrota E.M., Badea A.M., Dobrin C., Stanciu S. Global trends and research hotspots on HACCP and modern quality management systems in the food industry // *Heliyon*. 2023. Vol. 15. Is. 9. P. e18232. DOI: 101016/j.heliyon.2023.e18232.
13. Režek Jambak, Marinela Nutrizio, Ilija Djekić, Sanda Pleslić and Farid Chemat. Internet of Nonthermal Food Processing Technologies (IoNTP): Food Industry 4.0 and Sustainability // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Is. 2. P. 686. DOI: 103390/app11020686.
14. Kakani V., Nguyen V.H., Kumar B.P., Kim H., Pasupuleti V.R. A critical review on computer vision and artificial intelligence in food industry // *J Agric Food Res*. 2020. Vol. 2. P. 100033. DOI: 101016/j.jafr.2020.100033.
15. Rejeb A., Keogh J.G., Zailani S., Treiblmaier H., Rejeb K. Blockchain technology in the food industry: a review of potentials, challenges and future research directions // *Logistics*. 2020. Vol. 4. P. 27. DOI: 103390/logistics4040027.
16. Khan P.W., Byun Y.C., Park N. IoT-Blockchain Enabled Optimized Provenance System for Food Industry 4.0 Using Advanced Deep Learning // *Sensors*. 2020. Vol. 20. P. 2990. DOI: 103390/s20102990.
17. Xu M., Sun J., Yao K., Cai Q., Shen J., Tian Y., Zhou X. Developing deep learning-based regression approaches for prediction of firmness and pH in Kyoho grape using Vis/NIR hyperspectral imaging // *Infrared Phys Technol*. 2022. Vol. 120. P. 104003. DOI: 103390/foods12010132.
18. Al-Sarayreh M., Reis M.M., Yan Q., Klette R. Potential of deep learning and snapshot hyperspectral imaging for classification of species in meat // *Food Control*. 2020. Vol. 117. P. 107332. DOI: 101016/j.foodcont.2020.107332.
19. Visalli M., Galmarini M.V. Multi-attribute temporal descriptive methods in sensory analysis applied in food science: A systematic scoping review // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2024. Vol. 23. P. e13294. DOI: 101111/1541-4337.13294.
20. Leonardo Stertz Sfreddo, Guilherme Bergmann Borges Vieira, Gabriel Vidor & Carlos Honorato Schuch Santos. ISO 9001 based quality management systems and organisational performance: a systematic literature review // *Total Quality Management & Business Excellence*. 2021. Vol. 32. P. 389–409. DOI: 101080/14783363.2018.1549939.
21. Matsumoto T. Fact-finding survey on quality assurance among food manufacturers // *J Jpn Soc Food Sci Technol-Nip-*

- pon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi. 2022. Vol. 69. P. 431–442. DOI: 103136/nskkk.69.431.
22. Javaid M., Haleem A., Singh R.P., Suman R., Gonzalez E.S. Understanding the adoption of industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability // *Sustain Oper Comput.* 2022. Vol. 3. P. 203–217. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.susc.2022.01.008>.
23. Escobar C.A., McGovern M.E., Morales-Menendez R. Quality 4.0: a review of big data challenges in manufacturing // *J Intell Manuf.* 2021. Vol. 32. P. 2319–2334. DOI: 101007/s10845-021-01765-4.
24. Zonnenshain A., & Kenett R.S. Quality 4.0—the challenging future of quality engineering // *Quality Engineering.* 2020. Vol. 32. Is. 4. P. 614–626. DOI: 101080/08982112.2019.1706744.
25. Helgheim B.I., van der Linden N., Teryokhin S. Economic sustainability of local food producers: a mixed methods study // *Frontiers in Sustainable Food Systems.* 2024. Vol. 8. P. 1342373. DOI: 103389/fsufs.2024.1342373.
26. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н., Писарик М.И. Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования: обзор предметного поля // *Health, Food & Biotechnology.* 2023. Т. 5. С. 51–80. DOI: 1036107/hfb.2023.i1.s165.
27. Coronado E., Kiyokawa T., Ricardez G.A.G., Ramirez-Alpizar I.G., Venture G., Yamanobe N. Evaluating quality in human-robot interaction: a systematic search and classification of performance and human-centered factors, measures and metrics towards an industry 5.0 // *J Manuf Syst.* 2022. Vol. 63. P. 92–410. DOI: 101016/j.jmsy.2022.04.007.
28. Florens L., Burgert Matthäus Windhausen, Maximilian Kehder, Niklas Steireif, Susanne Mütze-Niewöhner, Verena Nitsch. Workforce scheduling approaches for supporting human-centered algorithmic management in manufacturing: A systematic literature review and a conceptual optimization model // *Procedia Computer Science.* 2024. Vol. 232. P. 1573–1583. DOI: 101016/j.procs.2024.01.155.
29. Oosthuizen R.M. The Fourth Industrial Revolution – Smart Technology, Artificial Intelligence, Robotics and Algorithms: Industrial Psychologists in Future Workplaces // *Front Artif Intell.* 2022. Vol. 6. Is. 5. P. 913168. DOI: 103389/frai.2022.913168.
30. Бурак Л.Ч. Использование современных технологий обработки для увеличения срока хранения фруктов и овощей. Обзор предметного поля // *Ползуновский вестник.* 2024. № 1. С. 99–119. DOI: 1025712/ASTU.2072-8921.2024.01.013.
31. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Влияние действия ультразвука на функциональные свойства растительных белков. Обзор предметного поля // *Химия растительного сырья.* 2024. № 4. С. 5–23. DOI: 1014258/jcrpm.20240413599.
32. Бурак Л.Ч. Использование современных технологий в производстве ферментированных продуктов // *Научное обозрение. Технические науки.* 2023. № 5. С. 5–13. DOI: 1017513/srts.1446.
33. Abdulstar A.R., Altemimi A.B., Al-Hilphy A.R. Exploring the Power of Thermosonication: A Comprehensive Review of Its Applications and Impact in the Food Industry // *Foods.* 2023. Vol. 12. P. 1459. DOI: 103390/foods12071459.
34. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н., Писарик М.И. Влияние ультразвука на процесс замораживания и качество замороженных фруктов и овощей // *Вестник Международной академии холода.* 2024. № 1. С. 71–78. DOI: 1017586/1606-4313-2024-23-1-71-78.
35. Naliyadhara N., Kumar A., Girisa S., Daimary U.D., Hegde M., Kunnumakkara A.B. Pulsed electric field (PEF): Avantgarde extraction escalation technology in food industry // *Trends Food Sci Technol.* 2022. Vol. 122. P. 238–255. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.019>.
36. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Влияние предварительной обработки импульсным электрическим полем на процесс сушки: обзор предметного поля // *Хранение и переработка сельхозсырья.* 2023. № 2. С. 44–71. DOI: 1036107/spfp.2023.418.
37. Silva F.V.M., Evelyn. Pasteurization of Food and Beverages by High Pressure Processing (HPP) at Room Temperature: Inactivation of *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella*, and Other Microbial Pathogens // *Appl. Sci.* 2023. Vol. 13. P. 1193. DOI: 103390/app13021193.
38. Šojić B., Putnik P., Danilović B., Teslić N., Bursać Kovačević D., Pavlić B. Lipid Extracts Obtained by Supercritical Fluid Extraction and Their Application in Meat Products // *Antioxidants.* 2022. Vol. 11. P. 716. DOI: 103390/antiox11040716.
39. Бурак Л.Ч. Перспективы использования технологии сверхкритического диоксида углерода в пищевой промышленности. Обзор предметного поля // *Ползуновский вестник.* 2025. № 1. С. 32–50. DOI: 1025712/ASTU.2072-8921.2025.01.004.
40. Usman I., Afzaal M., Asif Shah M. Recent updates and perspectives of plasma in food processing: a review // *Int J Food Prop.* 2023. Vol. 26. P. 552–566. DOI: 101016/j.ifset.2024.103580.
41. Tejada-Ortigoza V., Cuan-Urquiza E. Towards the Development of 3D-Printed Food: A Rheological and Mechanical Approach // *Foods.* 2022. Vol. 11. P. 1191. DOI: 103390/foods11091191.
42. Hao Shi, Min Zhang, Arun S. Mujumdar 3D/4D printed super reconstructed foods: Characteristics, research progress, and prospects // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* 2024. Vol. 23. Is. 2. P. 13310. DOI: 101111/1541-4337.13310.
43. Ur Rehman A., Saleem M.A., Liu T., Zhang K., Pitir F., Salamci M.U. Influence of Silicon Carbide on Direct Powder Bed Selective Laser Process (Sintering/Melting) of Alumina // *Materials.* 2022. Vol. 15. P. 637. DOI: 103390/ma15020637.
44. Yap C.K., Al-Mutairi K.A. A Conceptual Model Relationship between Industry 4.0–Food-Agriculture Nexus and Agroecosystem: A Literature Review and Knowledge Gaps // *Foods.* 2024. Vol. 13. P. 150. DOI: 103390/foods13010150.
45. Nowacka M., Trusinska M., Chraniuk P., Drudi F., Lukasiewicz J., Tylewicz U. et al. Developments in Plant Proteins Production for Meat and Fish Analogues // *Molecules.* 2023. Vol. 28. P. 2966. DOI: 103390/molecules28072966.
46. Бурак Л.Ч. Использование озоновой технологии в пищевой промышленности // *Минск: СтройМедиаПроект.* 2022. 144 с. ISBN 978-985-7172-84-9. DOI: 1012731/978-985-7172-84-9.
47. Srivastava S.K. Recent advances in removal of pharmaceutical pollutants in wastewater using metal oxides and carbonaceous materials as photocatalysts: a review // *RSC Applied Interfaces.* 2024. Vol. 1. P. 430–434. DOI: 101039/D3LF00239J.
48. Hua S., Shah S.A., Ullah N., Ullah N., Yuan A. Synthesis of Fe₂O₃ Nanorod and NiFe₂O₄ Nanoparticle Composites on Expired Cotton Fiber Cloth for Enhanced Hydrogen Evolution Reaction // *Molecules.* 2024. Vol. 29. P. 3082. DOI: 103390/molecules29133082.
49. Manganyi M.C., Dikobe T.B., Maseme M.R. Exploring the Potential of Endophytic Microorganisms and Nanoparticles for Enhanced Water Remediation // *Molecules.* 2024. Vol. 29. P. 2858. DOI: 103390/molecules29122858.
50. Bolan S. et al. The distribution, fate, and environmental impacts of food additive nanomaterials in soil and aquatic ecosystems // *Science of the Total Environment.* 2024. Vol. 916. P. 170013. DOI: 101016/j.scitotenv.2024.170013.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.