

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 332.1:338.439
DOI

УСТОЙЧИВОЕ ПРОИЗВОДСТВО. КОНЦЕПЦИЯ КАЧЕСТВА 4.0

¹Бурак Л.Ч., ²Ермошина Т.В., ³Саманкова Н.В.

¹ООО «Белросаква», Минск;

²АОЧУ ВО «Московский финансово-юридический университет МФЮА»,
Москва, e-mail: baricheva@mail.ru;

³УО «Белорусский государственный экономический университет», Минск

Целью данного исследования является обзор современных концепций качества с акцентом на максимальное удовлетворение запросов потребителя, а также краткая характеристика методов, которые традиционно используются для оценки качества пищевых продуктов. В обзор включены статьи на английском и русском языках за период с 2015 по 2025 г. Поиск зарубежной научной литературы на английском языке по данной теме проводился в библиографических базах Google Scholar, Scopus, Web of Science, Elsevier, ResearchGate. Для отбора научных статей на русском языке проводился поиск по ключевым словам в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU. На первом этапе в результате научного поиска отобрано 124 статьи, а для анализа источников и поиска ответов на поставленные вопросы исследования извлекались данные из 50 статей, соответствующих критериям включения. Анализ полученных научных данных был подготовлен в соответствии с контрольным списком PRISMA. Результаты свидетельствуют о необходимости развития области в рамках «треугольника концепции качества 4.0», тремя сторонами которого являются «наука о пищевых продуктах», «обеспечение качества» и «индустрия 4.0, обладающая инструментами и технологиями для поддержания и функционирования данной промышленной концепции». Данная область обладает многочисленными возможностями для использования в пищевой отрасли и для накопления информации и знаний, необходимых в настоящее время для пищевой промышленности, включая данные о возможности применения передовых технологий для производства продуктов питания, например 3D-печати, их связи с качеством и безопасностью, сокращением отходов, снижением влияния на экологию с целью достижения устойчивого производства продуктов питания. Представленный обзор концепции Качества 4.0, характеристика процессов систем и устойчивых нанотехнологий для улучшения производства и сокращения отходов может быть полезен в качестве практического руководства для заинтересованных сторон пищевой цепи: производителей, предприятий торговой сети, технологов, руководителей и специалистов систем менеджмента качества.

Ключевые слова: продукты питания, потребитель, концепция качества, устойчивое развитие, инновационные технологии, отходы, окружающая среда, аддитивное производство, 3D-печать

SUSTAINABLE PRODUCTION. QUALITY CONCEPT 4.0.

¹Burak L.Ch., ²Ermoshina T.V., ³Samankova N.V.

¹LLC Belrosakva, Minsk;

²Moscow University of Finance and Law, Moscow, e-mail: baricheva@mail.ru;

³Belarusian State Economic University, Minsk

The aim of this study is to review modern quality concepts with an emphasis on maximum satisfaction of consumer needs, as well as a brief description of the methods that are traditionally used to assess the quality of food products. The review includes articles in English and Russian for the period from 2015 to 2025. The search for foreign scientific literature in English on this topic was conducted in the bibliographic databases "Google Scholar", "Scopus", "Web of Science", "Elsevier". "ResearchGate". To select scientific articles in Russian, a search was conducted by keywords in the "Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU". At the first stage, 124 articles were selected as a result of the scientific search, and data from 50 articles that met the inclusion criteria were extracted to analyze the sources and find answers to the research questions. The analysis of the obtained scientific data was prepared in accordance with the PRISMA checklist. The results indicate the need to develop the field within the "quality 4.0 concept triangle", the three sides of which are "food science", "quality assurance" and "industry 4.0, possessing the tools and technologies to support and operate this industrial concept". This field has numerous opportunities for use in the food industry and for accumulating information and knowledge currently needed for the food industry, including data on the possibility of using advanced technologies for food production, such as 3D printing, their relationship with quality and safety, waste reduction, and reducing environmental impact in order to achieve sustainable food production. The presented review of the quality 4.0 concept, the characterization of process systems and sustainable nanotechnologies for improving production and reducing waste can be useful as a practical guide for stakeholders in the food chain: manufacturers, retailers, technologists, managers and specialists in quality management systems.

Keywords: food, consumer, quality concept, sustainable development, innovative technologies, waste, environment, additive manufacturing, 3D printing

Введение

Ключевая роль в сохранении и улучшении качества продуктов питания принадлежит пищевой инженерии. Это стало очевидным со времен промышленной революции и остается таковым до настоящего времени. В области пищевой инженерии постоянно появляется все больше инженерных решений, позволяющих повысить качество продуктов питания. Это достигается за счет использования знаний в области пищевой химии и физики с целью оптимизации многих факторов, таких как пищевая ценность продуктов, их безопасность, сенсорные характеристики (вкус, аромат, цвет и текстура), срок годности и стоимость. В результате пищевая инженерия и качество продуктов питания неразрывно связаны между собой и постоянно изменяются. В последние десятилетия спрос на высококачественные продукты питания неуклонно растет, равно как и интерес к проблеме качества продуктов питания. Он определяется как запросами со стороны все более требовательных и знающих потребителей, так и в качестве ответа на другие факторы, такие как проблемы здоровья человека и сохранение окружающей среды, изменение климата и требования законодательства страны [1, 2]. В Российской Федерации принят Федеральный Закон № 29-ФЗ от 02.01.2000 «О качестве и безопасности пищевых продуктов», в Республике Беларусь – Закон Республики Беларусь от 29 июня 2003 г. № 217-З «О качестве и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов для жизни и здоровья человека», в США – Закон США о модернизации безопасности пищевых продуктов, в Европейском союзе – Регламент ЕС 2019/1381 о прозрачности и устойчивости оценки рисков в пищевой цепочке и Общие принципы пищевой гигиены Codex Alimentarius [3, 4]. С появлением и развитием передовых технологических достижений происходило и постепенное развитие концепции качества продуктов питания. Концепция качества пищевых продуктов 1.0 была основана на инспекционном контроле готовой продукции и направлена на выявление и изъятие дефектных пищевых продуктов после их производства [5]. В период концепции 2.0 обеспечение качества было основано на предупреждающих действиях, которые направлялись на предотвращение дефектов качества путем применения инструментов и стандартов статистического контроля процессов во время производства [6]. Концепция 3.0 стала следующим шагом на пути к повышению качества, ориентированному на потребителя. Данная концепция была сосредоточена

на удовлетворении и превышении ожиданий потребителя посредством применения принципов тотального управления качеством (TQM) и методов постоянного улучшения качества продукции. Это включало использование передовых технологий и практик, таких как точное и органическое земледелие [7–9]. Осведомленность потребителей и спрос на продукцию с «чистой этикеткой», а также усилия регулирующих органов и промышленности по обеспечению безопасности и качества пищевых продуктов тоже имели немаловажное значение на этом этапе. Все эти меры являются частью перехода к концепции качества пищевых продуктов 4.0, которая характеризуется более передовыми технологиями, такими как Интернет вещей, анализ больших данных, искусственный интеллект и технологии блокчейн для возможности отслеживать безопасность пищевых продуктов и обеспечивать их качество. На сегодня концепция качества 4.0 представляет собой шаг вперед по сравнению с концепцией качества 3.0 за счет включения технологии цифровизации на всех трех этапах управления качеством: качество проектирования, качество соответствия, качество исполнения [10, 11]. Этот этап может также включать более широкое использование альтернативных источников белка, таких как мясо растительного и клеточного происхождения, обогащенные/функциональные продукты питания, культивированное мясо или точная ферментация, а также персонализированное питание и персонализированные диеты, адаптированные к индивидуальным запросам потребителей [12].

Цель исследования – обзор современных концепций качества с акцентом на максимальное удовлетворение запросов потребителя, а также краткая характеристика методов, которые традиционно используются для оценки качества пищевых продуктов.

Материалы и методы исследования

Поиск зарубежной научной литературы на английском языке, характеризующей концепции качества 1.0, 2.0, 3.0 и 4.0, проводился в библиографических базах Scopus, Web of Science, Elsevier, Google Scholar. Обзор научных статей на русском языке проводился по ключевым словам в «Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU». В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период с 2015 по 2025 г. Более ранние научные статьи изучались только при отсутствии новых публикаций по теме исследования. При выполнении работы применялись методы анализа, систематизации и обобщения.

Для поисковых запросов в зарубежных базах данных, базах Scopus, Web of Science, Elsevier, Google Scholar были использованы следующие ключевые слова и словосочетания: “leading quality in innovative technologies”, “link to sustainable development”, “pollution in agriculture”, “food sustainability”, “food waste”, “green technologies”, “additive manufacturing”, “3D printing”.

Изначально в результате научного поиска для исследования были отобраны 124 статьи.

Критерии включения статей в анализ:

1) статья написана в период с 2015 по 2025 г.;

2) статья соответствует теме исследования;

3) типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, материалы конференций, симпозиумов, краткие отчеты.

Критерии исключения статей из анализа:

1) статья не соответствует теме данного обзора: авторы не касаются тематики концепции качества продуктов питания от обеспечения базовой безопасности потребителей до ее современной версии, включающей цифровизацию для удовлетворения различных аспектов производства и потребления продуктов питания на многонациональных рынках;

2) статья написана не на английском языке;

3) статья написана на русском языке, не входит в РИНЦ;

4) содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Для обзора предметного поля проведенного исследования был использован алгоритм в соответствии с протоколом PRISMA и составлена схема проведения исследования (PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation, 2018 (<https://www.acpjournals.org/doi/10.7326/M18-0850>). In the public domain)

Для анализа источников и поиска ответов на поставленные вопросы исследования: обзор и анализ современных и традиционных концепций качества с акцентом на потребителях, краткая характеристика методов, которые традиционно используются для оценки качества, а также переход к концепции качества 4.0 (FQ 4.0) и его сравнение с традиционным FQ в контексте продуктов питания, процессы, системы и устойчивые (нано)технологии для улуч-

шения производства и сокращения отходов – извлекались данные из 50 статей, соответствующих критериям включения.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Традиционная концепция качества продуктов питания

Сохранение качества и пищевой ценности самого продукта, обеспечение его микробиологической безопасности и увеличение срока годности являются основными целями предприятий пищевой промышленности. Качество пищевых продуктов в общепринятом смысле представляет собой совокупность различных факторов, включающих физические свойства (плотность, вязкость), химический состав, сенсорные характеристики (цвет, вкус, аромат, текстура), микробиологические и токсикологические показатели, срок годности, упаковку и маркировку. Данные характеристики показывают, насколько благотворно продукт влияет на организм, взаимодействует с окружающей средой и побуждает потребителей совершать покупки [13, 14]. В последние годы пищевая ценность, биологически активные вещества и подлинность продуктов питания считаются факторами, которые помогают покупателям делать более осознанный выбор продуктов питания. Качество питания человека напрямую влияет на состояние его здоровья. Облегчение принятия обоснованных решений относительно покупки и использования пищевых продуктов усиливается за счет внедрения маркировки, которая содержит необходимые данные, касающиеся состава и пищевой ценности упакованных пищевых продуктов. Во многих странах существуют обязательные правила, контролируемые регулирующими органами, такими как Управление по контролю за продуктами и лекарствами (FDA) в США или Европейское управление по безопасности пищевых продуктов (EFSA) в Европе, Роспотребнадзор в РФ и Госстандарт РБ в Республике Беларусь. На этикетках должны быть указаны данные о макронутриентах (например, углеводах, белках и жирах), витаминах, минералах и других питательных веществах, содержащихся в продукте. Кроме того, они могут включать информацию об аллергенах и других компонентах, к которым может быть индивидуальная непереносимость [14, 15]. Традиционное понятие качества пищевых продуктов воспринимается потребителем прежде всего как отсутствие дефектов и фальсификаций. В дальнейшем оно было расширено, появилась необходимость учитывать законные ожидания потребителей от-

носителю качества продукции и требовать от участников рынка удовлетворять ожидаемым характеристикам, таким как органолептические и питательные свойства, получаемая польза от употребления таких продуктов. Наконец, качество включает характеристики, которые могут оправдать стоимость продукта, например способы производства (органическое земледелие, применение зеленых технологий и благополучие животных), районы производства (происхождение продукта) и связанные с ними традиции. Хотя в современной концепции качества пищевых продуктов особое внимание уделяется органолептическим, физико-химическим и микробиологическим показателям, потребители, как правило, не могут должным образом оценить качество пищевых продуктов без учета этих дополнительных сведений. Поскольку на этикетках обычно указаны только сведения о составе, сроке годности и основная информация о влиянии на здоровье, потребители часто полагаются на эти утверждения при оценке качества пищевых продуктов [16, 17].

2. Роль потребителей в изменении традиционной концепции качества продуктов питания

Восприятие потребителей той или иной продукции играет важную роль в понимании и оценке качества продуктов питания. Столкнувшись с проблемами XXI в.: глобальным ростом неинфекционных заболеваний, связанных с питанием (например, диабет, сердечно-сосудистые заболевания, ожирение), и экологическими проблемами, – современные потребители продуктов питания стали значительно больше обращать внимания на влияние качества питания на здоровье. Информация об использовании натуральных продуктов, отсутствии в них химических консервантов и о применении современных технологий переработки, позволяющих максимально сохранять пищевую ценность продукта, свежесть вкуса и аромата, привлекает потребителей и определяет их покупательскую способность. В результате этого качество продуктов питания стало ключевым вопросом в современной пищевой промышленности [4, 18]. Традиционная концепция качества продуктов питания в настоящее время подвергается сомнению со стороны различных категорий потребителей, как показано в таблице.

3. Традиционные методологии, используемые при оценке качества пищевых продуктов

Не существует единого стандартного метода определения параметров качества

пищевых продуктов, поскольку разные методы используются для показателей и типов продуктов. Существует достаточное количество широко используемых устоявшихся методов анализа пищевых продуктов, например рекомендованных Ассоциацией официальных химиков-аналитиков (AOAC) или Международной организацией по стандартизации (ISO). Некоторые стандарты применяются для внедрения Системы управления качеством для поддержания целостности продукции и качества продуктов питания, защиты здоровья потребителей, а также продвижения международной торговли продуктами питания [19]. Применение таких методов позволяет взаимно признавать лабораторные отчеты и сравнивать полученные результаты, обеспечивая их единообразие. Пищевые продукты содержат различные компоненты: углеводы, белки, жиры, пептиды, липиды, аминокислоты и органические кислоты, – напрямую влияющие на качество и пищевую ценность продукта. Кроме того, пища может также содержать вредные вещества, такие как остатки пестицидов, грибковые токсины, вредные пищевые добавки и канцерогены. Поэтому анализ и исследование состава продуктов питания является предпосылкой для будущих инноваций в пищевой науке и технологии, и эти компоненты требуют различных качественных и количественных анализов и методов обнаружения из-за их различных физико-химических свойств. Стоит отметить, что микроструктура и распределение состава пищи могут влиять на ее стабильность, сенсорные характеристики и даже на процесс биологического усвоения [20]. В настоящее время большинство традиционных методов определения качества пищевых продуктов являются разрушающими. Например, тестирование текстуры, твердости, общего содержания растворимых сухих веществ, кислотности, цветности, содержания сока, наличия патогенных микроорганизмов. Часто они требуют длительного времени, трудоемки и включают случайный отбор проб, что увеличивает вероятность неправильной оценки [21]. Также лабораторные методы определения качества пищевых продуктов имеют ограниченный объем испытаний, поскольку обычное тестирование качества пищевых продуктов обычно сосредоточено на определенном количестве показателей, таких как органолептические и физико-химические, игнорируя при этом другие важные факторы, такие как содержание питательных веществ, загрязняющих веществ и аллергенов [22].

Характеристика современного потребителя
и его понимание традиционного понятия о качестве продуктов питания

Категория потребителя	Характеристика восприятия и отношения
Научно ориентированные потребители	– Способны признавать ограничения традиционных подходов к качеству продуктов питания и потенциальные недостатки таких подходов к оценке качества. – Имеют новейшие научные знания о питании, безопасности и качестве пищевых продуктов. – Критически относятся к традиционным методам производства и переработки продуктов питания, которые не соответствуют современным научным знаниям. – Имеют знания в области новых технологий и инноваций в производстве и переработке продуктов питания, таких как растительные альтернативы мясу или биотехнологические культуры. – Открыты для употребления новых продуктов питания, основанных на последних научных достижениях, но также осторожны в отношении потенциальных рисков и неопределенностей, связанных с этими новыми технологиями
Потребители, заботящиеся об окружающей среде	– Рассматривают качество продуктов питания как многомерную концепцию, которая охватывает не только пищевые характеристики, но и экологические аспекты при их производстве (использование воды, выбросы парниковых газов, истощение природных ресурсов и биоразнообразие из-за изменений в землепользовании, эрозии почвы и вырубки лесов для производства продуктов питания). – Устраняют загрязнения окружающей среды и загрязняющие вещества, которые могут повлиять на безопасность и качество пищевых продуктов, такие как пестициды, тяжелые металлы и микропластик. – Предпочитают продукты, произведенные с использованием устойчивых методов ведения сельского хозяйства, таких как регенеративное или органическое земледелие. Также могут предпочитать продукты местного производства, чтобы уменьшить выбросы углекислого газа, связанные с транспортировкой и упаковкой. Кроме того, могут искать продукты, упакованные в экологически чистые материалы, например переработанную или биоразлагаемую упаковку. – Оценивают этические вопросы: условия труда работающих и благополучие животных, могут предпочитать продукты, произведенные с использованием гуманных методов животноводства
Потребители, ориентированные на спорт	– Придают большое значение питательным качествам пищевых продуктов, поскольку рассматривают еду прежде всего как средство достижения своих целей в спорте. Для таких потребителей качество продуктов питания выходит за рамки вкуса и внешнего вида и включает такие факторы, как повышенное содержание питательных веществ, качество ингредиентов и маркировка. – Предпочитают продукты с высоким содержанием белка, клетчатки и других питательных веществ, не содержащие искусственных ингредиентов, консервантов и добавленного сахара. Они также обращают внимание на методы производства продуктов питания, например являются ли они органическими, не содержащими ГМО или произведенными экологически устойчивым способом. – Ценят продукты, которые легко приготовить и которые вписываются в их напряженный образ жизни. Также используют цифровые технологии, такие как приложения для отслеживания калорийности питания и устройства, позволяющие контролировать потребление питательных веществ. – Готовы платить больше за продукты, которые удовлетворяют их потребности в питании и соответствуют их ценностям
Потребители, ориентированные на кулинарию	– Больше интересуются органолептическими и кулинарными свойствами продуктов, содержанием в них питательных веществ. – Ищут дополнительную информацию о влиянии различных способов приготовления пищи на качество конечного продукта. – Часто интересуются происхождением и методами производства продуктов питания, такими как использование органических или местных ингредиентов или гуманное обращение с животными

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Также следует отметить недостаточную чувствительность методов определения качества пищевых продуктов для обнаружения низких уровней загрязняющих веществ или примесей в пищевых продуктах, что может привести к неточным или вводящим в заблуждение результатам. Высокая стоимость анализа и длительное время его проведения могут создавать барьер для небольших производителей продуктов питания [23]. Ограниченная глобализация методов затрудняет мониторинг качества продуктов питания в цепочке поставок [24]. Часто отсутствуют методы исследования для обнаружения новых патогенов и загрязнителей, которые могут представлять угрозу общественного здоровья [25].

В последние годы технология гиперспектральной визуализации объединила визуализацию и спектроскопию и может служить неразрушающим методом контроля качества и безопасности пищевых продуктов в режиме реального времени [26, 27]. Технология визуализации с помощью рамановской спектроскопии может одновременно получать спектральную и пространственную информацию об анализе и имеет такие преимущества, как быстрота, неразрушаемость и низкая стоимость. Она также успешно применяется при оценке безопасности пищевых продуктов и контроле качества. Другие методы визуализации, такие как атомно-силовая микроскопия (АСМ), сканирующая электронная микроскопия, флуоресцентная микроскопия с маркировкой, а также иммуноокрашивание, используемое в биомедицинской визуализации, магнитно-резонансная томография, позитронно-эмиссионная томография, конфокальный лазерный сканирующий микроскоп и инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье, имеют высокое пространственное разрешение и обычно используются для изучения и проверки структуры пищевых продуктов на микроскопическом уровне [28]. К сожалению, эти методы визуализации не могут обеспечить интуитивное отображение молекулярных химических структур и их пространственное распределение. Поэтому разработка эффективных, точных и визуальных методов контроля имеет решающее значение для всестороннего анализа состава и пищевой ценности продуктов, что также является актуальной темой исследований в области пищевой науки.

Масс-спектрометрическая визуализация (MSI) – это новый метод молекулярной визуализации, основанный на масс-спектрометрическом анализе. Выполняя многоточечное обнаружение и многомерный сбор данных на образцах биологиче-

ских тканей, MSI позволяет одновременно обнаруживать различные молекулы с высокой чувствительностью даже при отсутствии меток [29]. Он визуализирует пространственное распределение и относительное содержание нескольких молекул в качестве характеристик изображения, предоставляя ценную информацию о химическом составе молекул, пространственном распределении целевых молекул и молекулярных структурах на поверхности образцов [30]. Концепция MSI изначально возникла из исследований поверхностного анализа полупроводниковых материалов с использованием вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS). Группа ученых Carpioli и др. официально представили метод MSI с лазерной десорбцией и ионизацией с помощью матрицы (MALDI) и применили его для создания карт инсулина в срезах поджелудочной железы крысы, гормональных пептидов в срезах гипофиза крысы и небольшого белка в эпителиальных клетках ротовой полости человека. Это ознаменовало начало исследований MSI в области пространственной визуализации. Как новый метод картирования молекулярного пространственного распределения, MSI обладает несколькими отличительными особенностями, включая анализ без меток, высокую чувствительность, высокую пропускную способность, сильную молекулярную специфичность и способность одновременно локализовать несколько биомолекул в образцах тканей. В последние годы MSI пережила быстрое развитие и созревание в исследовании молекулярного пространственного распределения. Данный метод вышел за рамки традиционных методов визуализации и нашел широкое применение в различных областях, включая биомедицину, науку об окружающей среде, судебно-медицинскую экспертизу и анализ материалов [31]. MSI позволяет обнаруживать *in situ* множество биомолекул, таких как белки, пептиды, липиды и метаболиты малых молекул в образцах. В настоящее время MSI постепенно становится важным аналитическим инструментом в области пищевой науки. Он демонстрирует замечательный потенциал и преимущества в целевом и нецелевом анализе изображений различных биомолекул в пище, включая эндогенные биомолекулы (малые метаболиты, липиды, пептиды и белки) и экзогенные молекулярные остатки (сельскохозяйственные и ветеринарные препараты и их метаболиты). Одной из важных характеристик этой технологии является то, что она позволяет проводить визуальный анализ поверхностей тканей образцов без необходимости

сложной предварительной обработки образцов, такой как окрашивание и маркировка. По сравнению с другими методами визуализации MSI предоставляет комплексную масс-спектральную информацию об анализах, точно отображая пространственное распределение питательных компонентов и вредных веществ в пище. Следовательно, он помогает контролировать качество и безопасность пищевых продуктов на молекулярном уровне. MSI имеет широкий спектр применения в области пищевой науки и обладает большим потенциалом для будущих достижений.

Что касается микробиологического анализа, то культуральные методы по-прежнему остаются «золотым стандартом» выявления и оценки жизнеспособности микроорганизмов в пищевых продуктах. В пищевой микробиологии под жизнеспособностью понимают способность бактериальных клеток размножаться в различных жидких средах или образовывать колонии на твердых культуральных средах [32]. Однако различие между жизнеспособными и мертвыми бактериальными клетками представляет собой чрезвычайно сложный вопрос, поскольку микроорганизмы в пищевых продуктах, которые подверглись каким-либо воздействиям, могут жить в различных метаболических состояниях или фазах развития (сублетально поврежденные, жизнеспособные, но неживые, пригодные для культивирования и находящиеся в состоянии покоя), и в некоторых из этих состояний они могут временно потерять способность расти на лабораторных средах [33]. Кроме того, культуральный анализ пищевых продуктов – трудоемкий процесс. Прежде чем можно будет провести окончательную идентификацию микробиологической обсемененности, требуется провести ряд процессов, включая предварительное обогащение, селективное обогащение, посев на селективную среду и биохимическое или серологическое определение. Все это занимает от 2–3 дней для предварительной изоляции и до недели для окончательной идентификации. Культуральные методы могут иметь ограниченную способность обнаружения, если в тестируемом продукте питания присутствуют микроорганизмы в поврежденном или жизнеспособном, но некультивируемом состоянии (VBNC) [33]. Для микробиологического контроля качества продуктов питания широко используются иммуноферментный анализ (ИФА) и полимеразная цепная реакция в реальном времени (ПЦР). ПЦР позволяет быстрее дифференцировать жизнеспособные и мертвые клетки, чем культура, и дает количественные результаты.

Значения отдельных показателей в пробах пищевых продуктов (влажность, зольность, содержание липидов, белков и углеводов) можно определить с помощью экспресс-анализа [34]. Эти значения декларируются как пищевая ценность, которая часто указывается на этикетках конечной продукции. Применяемые методы можно разделить на экспресс-методы, но неточные методы контроля качества или более точные, но трудоемкие стандартизированные методы исследований. Общее количество белков обычно измеряют методом Кьельдаля (определение содержания азота). Однако улучшенный метод Дюма намного проще и быстрее (менее четырех минут на измерение по сравнению с почти двумя часами для метода Кьельдаля) и не требует токсичных реактивов или катализаторов [35]. Спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона (NIRS) является бесспорным фаворитом среди методов измерения в реальном времени для мониторинга влажности в производстве твердых продуктов [36]. В таких системах спектры диффузного отражения обрабатываемого материала обычно измеряются с помощью погружного зонда. Однако присутствие воды в пищевом продукте может вызвать значительное снижение интенсивности сигнала NIRS, что затрудняет точное измерение концентрации других компонентов в продукте. Альтернативные методы, такие как спектроскопия среднего инфракрасного диапазона или рамановская спектроскопия, на которые вода оказывает меньшее влияние, могут быть использованы в будущем. Флуоресцентная спектроскопия может стать перспективным инструментом при оценке качества рыбных и мясных продуктов как быстрый и неинвазивный метод [37, 38].

Анализ профиля жирных кислот в пищевых продуктах важен для определения пищевой ценности и правильной маркировки продукта, поскольку показывает наличие различных жирных кислот в пищевых продуктах. Определение может быть проведено путем перевода жирных кислот в метиловые эфиры с последующей газовой хроматографией, которая является наиболее часто используемым методом по сравнению с другими (ЖХ-МС, ГХ-ПВД) благодаря ее эффективности, селективности и доступности [39, 40]. Однако не существует специальной системы экстракции и дериватизации жиров для различных пищевых продуктов. Метод Сокслета является наиболее часто используемым методом экстракции липидов из пищевых продуктов, поскольку он не требует контроля и прост в использовании. Однако он имеет ряд существенных недостатков,

в том числе применение опасных и легко-воспламеняющихся органических растворителей, имеющих высокую стоимость, потенциальные выбросы токсичных соединений при экстракции, трудоемкие процедуры, большие затраты времени. Напротив, микроволновая экстракция (МАЕ) более эффективна, чем традиционные методы, и имеет такие преимущества, как быстрота, надежность, малый расход растворителя для экстракции липидов, не требует обезживания образцов. Данный метод также имеет самую высокую повторяемость [41].

Физические испытания (например, измерение цвета, размера частиц, вязкости, текстуры и консистенции продукта) также используются для определения качества пищевых продуктов [42]. Текстурные свойства пищевых продуктов обычно проверяются с использованием ротационных реометров, реометров с закрытой полостью и капиллярных реометров – инструментов для понимания того, как материал ведет себя под действием напряжения сдвига и деформации. В некоторых случаях реологические измерения могут дать представление о переработке пищевых продуктов, поскольку материал подвергается сдвигу и температурным градиентам в течение определенного времени, что особенно важно для процессов экструзии и трехмерной (3D) печати [43, 44]. Испытания на растяжение и сжатие являются наиболее часто выполняемыми испытаниями. При этом измеряется сила, необходимая для сжатия или растяжения материала. При анализе текстуры, также известном как «испытание на двойное сжатие», образец определенной формы (часто вырезанный с помощью керна) дважды сжимается и разжимается с заданной скоростью между параллельными пластинами большего размера, чем образец. Основной целью разработки этого метода было моделирование двухстадийного процесса пластикации [43]. Испытания на силу резания и сдвиг также проводятся для оценки «твердости», как параметра, позволяющего количественно оценить степень формирования структуры и текстуры в образцах пищевых продуктов. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия (CLSM) широко используется для анализа размера частиц и распределения капель и других типов частиц, поскольку она имеет более высокое разрешение, чем традиционная световая микроскопия, и позволяет делать оптические срезы [45]. Миоглобин, его производные и денатурация мышечных белков ответственны за красный (например, мясо) или бело-бежевый (колбасы) цвета многих современных пищевых продуктов [46]. Различные пищевые

красители, такие как экстракт свекольного сока, соевый леггемоглобин, экстракт морковного сока и ликопин, часто добавляются к аналогам мяса, представленным на рынке, для достижения сходства с мясом [47]. Цвет поверхности часто измеряется колориметром и определяется с использованием цветовой системы координат CIELab со стандартным источником света D65. Колориметры обычно оснащаются импульсной ксеноновой дуговой лампой, облучающей образец равномерным пучком света. Свет, отраженный от поверхности образца, затем регистрируется фотоэлементами и используется для определения координат цветового пространства. Перед измерением колориметр калибруют с помощью белой пластины для стандартизации результатов. В цветовом пространстве CIELab L* определяет яркость образца (0 = черный, 100 = белый), a* находится в диапазоне от зеленого (-) до красного (+), а b* находится в диапазоне от синего (-) до желтого (+). Кроме того, коэффициент цветового различия ΔE дает информацию о том, можно ли невооруженным глазом обнаружить изменения цвета продукта.

Несмотря на многочисленные аналитические прорывы, наблюдаемые в пищевой промышленности, в этой области исследований все еще остается ряд проблем, которые подчеркивают острую необходимость в более перспективных и передовых аналитических методах. В ближайшем будущем вышеуказанные аналитические методы (спектроскопические, биологические, сепарационные, твердофазная экстракция) будут объединены с современными неразрушающими технологиями, такими как магнитно-резонансная томография (МРТ), ядерный магнитный резонанс (ЯМР), ультразвуковая доплеровская велосиметрия (UDV), акустические методы, компьютерная томография (КТ) и сенсорные методы, которые постепенно заменяют разрушающие, трудоемкие и утомительные традиционные аналитические методы [48, 49].

Заключение

Проведенный научный обзор показывает, что традиционные аспекты качества продуктов питания направлены на обеспечение их безопасности, пищевой ценности, качественных органолептических показателей, упаковки и срока годности. Хотя эти аспекты по-прежнему важны, переход к качеству продуктов питания 4.0 расширяет эту сферу, включая дополнительные факторы, такие как устойчивость, прозрачность и цифровизация. Качество пищевых продуктов 4.0 – это разработка, основанная на предыдущих

этапах управления качеством в пищевой промышленности и направленная на интеграцию цифровых технологий и анализа данных в существующие системы управления качеством, чтобы обеспечить мониторинг, прозрачность и оптимизацию производства пищевых продуктов в реальном времени, их качество на протяжении всей пищевой цепи. Основное различие между более ранними этапами диагностики качества продуктов питания и этапом 4.0 заключается в высоком уровне цифровизации и интеграции данных. На более ранних этапах концепций качества 1.0, 2.0 и 3.0, в основном использовались методы ручной проверки, а на этапе 4.0 используются цифровые технологии и анализ данных для автоматизации и оптимизации процессов управления качеством. Этап 4.0 также позволяет получить более целостное и динамичное представление о качестве продуктов питания по всей цепочке, а не сосредотачиваться на отдельных этапах. Кроме того, на более ранних этапах разработки концепции качества пищевых продуктов в основном использовались традиционные методы управления качеством, такие как статистический контроль процессов, тотальное управление качеством и постоянное улучшение. Эти методы по-прежнему актуальны и эффективны на этапе 4.0, но они улучшаются и дополняются новыми методами, использующими цифровые технологии и анализ данных. Это прогнозная аналитика, которая использует интеллектуальный анализ данных; машинное обучение и искусственный интеллект для прогнозирования будущих результатов и тенденций, основанных на исторических и текущих данных; предписывающая аналитика, которая использует системы оптимизации, моделирования и поддержки принятия решений, для рекомендации лучших действий или решений на основе анализа данных и бизнес-правил; когнитивная аналитика, которая использует обработку естественного языка, компьютерное зрение и распознавание речи, изображений и звуков и взаимодействия с ними; периферийные вычисления, в которых используются распределенные вычислительные устройства на границе сети для локальной обработки данных и снижения задержек, пропускной способности и затрат на хранение.

Список литературы

1. Baars C., Barbir J., Paulino Pires Eustachio J.H. How Can Climate Change Impact Human Health via Food Security? A Bibliometric Analysis // *Environments*. 2023. Vol. 10. P. 196. DOI: 10.3390/environments10110196.
2. Duchenne-Moutien R.A., Neetoo H. Climate Change and Emerging Food Safety Issues: A Review // *J Food Prot.* 2021. Vol. 84, Is. 11. P. 1884–1897. DOI: 10.4315/jfp-21-141.
3. Food Safety Modernization Act (FSMA). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fda.gov/food/guidance-regulation-food-and-dietary-supplements/food-safety-modernization-act-fsma> (дата обращения: 30.07.2025).
4. 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: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013.
5. Бурак Л.Ч., Ермошина Т.В., Саманкова Н.В. Достижение устойчивого развития за счет использования новых технологий переработки пищевых продуктов // *Фундаментальные исследования*. 2024. № 10. С. 171–179. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=43705> (дата обращения: 30.07.2025). DOI: 10.17513/fr.43705.
6. 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. 9. P. e18232. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18232.
7. Roberts R.J., Naimy V. Overcoming Agricultural Challenges with GMOs as a Catalyst for Poverty Reduction and Sustainability in Lebanon // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P. 16187. DOI: 10.3390/su152316187.
8. 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.
9. Леушкина В.В. Органическое сельское хозяйство в условиях экономического кризиса: опыт России и Германии // *Продовольственная политика и безопасность*. 2023. Т. 10. № 4. С. 663–676. DOI: 10.18334/ppib.10.4.119766.
10. Martín-Gómez A.M., Agote-Garrido A., Lama-Ruiz J.R. A Framework for Sustainable Manufacturing: Integrating Industry 4.0 Technologies with Industry 5.0 Values // *Sustainability*. 2024. Vol. 16. P. 1364. DOI: 10.3390/su16041364.
11. Kaur A., Singh G., Kukreja V., Sharma S., Singh S., Yoon B. Adaptation of IoT with Blockchain in Food Supply Chain Management: An Analysis-Based Review in Development, Benefits and Potential Applications // *Sensors*. 2022. Vol. 22. P. 8174. DOI: 10.3390/s22218174.
12. Hassoun A., Cropotova J., Trif M., Rusu A.V., Bobiş O., Nayik G.A., Jagdale Y.D., Regenstein J.M. Consumer acceptance of new food trends resulting from the fourth industrial revolution technologies: A narrative review of literature and future perspectives // *Front Nutr.* 2022. Vol. 9. P. 972154. DOI: 10.3389/fnut.2022.972154.
13. Hassoun A., Bekhit A.E., Jambrak A.R., Regenstein J.M., Chemat F., Bhat Z. The fourth industrial revolution in the food industry-part II: Emerging food trends // *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2024. Vol. 64, Is. 2. P. 407–437. DOI: 10.1080/10408398.2022.2106472.
14. Burak L.Ch., Sapach A.N. Use of omic heating technology in the process of processing fruits and vegetables. Overview of the subject field // *Food systems*. 2024. Vol. 7, Is. 1. P. 59–70. (In Russ.). DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70.
15. Anis Z.B., Rahman H.U., Khalid N. Effect of Food Quality and Nutritional Attributes on Consumer Choices during the COVID-19 Pandemic // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. P. 15172. DOI: 10.3390/su142215172.
16. Petrescu D.C., Vermeir I., Petrescu-Mag R.M. Consumer Understanding of Food Quality, Healthiness, and Environmental Impact: A Cross-National Perspective // *Int J Environ Res Public Health*. 2019. Vol. 17, Is. 1. P. 69. DOI: 10.3390/ijerph17010169.
17. Bai S., Zhang X., Han C., Yu D. Research on the Influence Mechanism of Organic Food Attributes on Customer Trust // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P. 6733. DOI: 10.3390/su15086733.
18. Sajdakowska M., Gębski J., Guzek D., Gutkowska K., Żakowska-Biemans S. Dairy Products Quality from a Consumer Point of View: Study among Polish Adults // *Nutrients*. 2020. Vol. 12. P. 1503. DOI: 10.3390/nu12051503.

19. Hassoun A., Jagtap S., Garcia-Garcia G., Trollman H., Pateiro M., Lorenzo J.M., Trif M., Rusu A.V., Aadil R.M., Šimat V., Crobotova J., Câmara J.S. Food quality 4.0: from traditional approaches to digitalized automated analysis // *J Food Eng.* 2023. Vol. 337. P. 111216. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111216.
20. Guo L., Chen H., Zhang Y., Yan S., Chen X., Gao X. Starch granules and their size distribution in wheat: Biosynthesis, physicochemical properties and their effect on flour-based food systems // *Comput Struct Biotechnol J.* 2023. Vol. 21. P. 4172–4186. DOI: 10.1016/j.csbj.2023.08.019.
21. Sarkar T., Salauddin M., Kirtonia K., Pati S., Rebezov M. et al. A Review on the Commonly Used Methods for Analysis of Physical Properties of Food Materials // *Appl. Sci.* 2022. Vol. 12. P. 2004. DOI: 10.3390/app12042004.
22. Nichani K., Uhlig S., Stoyke M., Kemmlin S., Ulberth F., Haase I., Döring M., Walch S.G., Gowik P. Essential terminology and considerations for validation of non-targeted methods // *Food Chem X.* 2022. Vol. 10. P. 100538. DOI: 10.1016/j.fchx.2022.100538.
23. Choi J.R., Yong K.W., Choi J.Y., Cowie A.C. Emerging Point-of-care Technologies for Food Safety Analysis // *Sensors.* 2019. Vol. 19. P. 817. DOI: 10.3390/s19040817.
24. Yang J., Lee J. Application of Sensory Descriptive Analysis and Consumer Studies to Investigate Traditional and Authentic Foods: A Review // *Foods.* 2019. Vol. 8. P. 54. DOI: 10.3390/foods8020054.
25. Dai C., Sun J., Huang X., Zhang X., Tian X., Wang W., Sun J., Luan Y. Application of Hyperspectral Imaging as a Non-destructive Technology for Identifying Tomato Maturity and Quantitatively Predicting Lycopene Content // *Foods.* 2023. Vol. 12. Is. 15. P. 2957. DOI: 10.3390/foods12152957.
26. Tahmasbian I., McMillan M.N., Kok J. Underwater hyperspectral imaging technology has potential to differentiate and monitor scallop populations // *Rev Fish Biol Fisheries.* 2024. Vol. 34. P. 371–383. DOI: 10.1007/s11160-023-09817-z.
27. Xia Q., Zhou C., Wu Z., Pan D., Cao J. Proposing processomics as the methodology of food quality monitoring: reconceptualization, opportunities, and challenges // *Curr Opin Food Sci.* 2022. Vol. 45. P. 100823. DOI: 10.1016/j.cofs.2022.100823.
28. Zhang Y., Chen D., Du M., Ma L., Li P., Qin R., Yang J., Yin Z., Wu X., Xu H. Insights into the degradation and toxicity difference mechanism of neonicotinoid pesticides in honeybees by mass spectrometry imaging // *Sci Total Environ.* 2021. Vol. 774. P. 145170. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145170.
29. Unsihuay D., Mesa Sanchez D., Laskin J. Quantitative Mass Spectrometry Imaging of Biological Systems // *Annu Rev Phys Chem.* 2021. Vol. 72. P. 307–329. DOI: 10.1146/annurev-physchem-061020-053416.
30. Fox B.W., Schroeder F.C. Toward spatially resolved metabolomics // *Nat Chem Biol.* 2020. Vol. 16. Is. 10. P. 1039–1040. DOI: 10.1038/s41589-020-00650-0.
31. Jha D., Blennow K., Zetterberg H., Savas J.N., Hanrieder J. Spatial neurolipidomics-MALDI mass spectrometry imaging of lipids in brain pathologies // *J. Mass Spectrom.* 2024. Vol. 59. № 3. P. e5008. DOI: 10.1002/jms.5008.
32. Al-Madani H., Du H., Yao J., Peng H., Yao C., Jiang B., Wu A., Yang F. Living Sample Viability Measurement Methods from Traditional Assays to Nanomotion // *Biosensors.* 2022. Vol. 12. P. 453. DOI: 10.3390/bios12070453.
33. Trinh K.T.L., Lee N.Y. Recent Methods for the Viability Assessment of Bacterial Pathogens: Advances, Challenges, and Future Perspectives // *Pathogens.* 2022. Vol. 11. P. 1057. DOI: 10.3390/pathogens11091057.
34. Zhang J., Yang H., Li J., Hu J., Lin G., Tan B.K., Lin S. Current Perspectives on Viable but Non-Culturable Foodborne Pathogenic Bacteria: A Review // *Foods.* 2023. Vol. 12. P. 1179. DOI: 10.3390/foods12061179.
35. Md Noh M.F., Gunasegavan R.D.N., Mustafa Khalid N., Balasubramaniam V., Abd Rashed A. Recent Techniques in Nutrient Analysis for Food Composition Database // *Molecules.* 2020. Vol. 25. P. 4567. DOI: 10.3390/molecules25194567.
36. Belyakov M.V. Comparative Analysis of Milk Souring by Reflective Infrared Spectroscopy // *Storage and Processing of Farm Products.* 2024. Vol. 32. P. 82–91. (In Russ.). DOI: 10.36107/spfp.2024.3.554.
37. Biradar K., Ravelombola W., Manley A., Ruhl C. Near Infrared Spectroscopy (NIRS) Model-Based Prediction for Protein Content in Cowpea // *American Journal of Plant Sciences.* 2024. Vol. 15. P. 145–160. DOI: 10.4236/ajps.2024.153011.
38. Czaja T., Sobota A., Szostak R. Quantification of Ash and Moisture in Wheat Flour by Raman Spectroscopy // *Foods.* 2020. Vol. 9. P. 280. DOI: 10.3390/foods9030280.
39. Hassoun A. Exploring the Potential of Fluorescence Spectroscopy for the Discrimination between Fresh and Frozen-Thawed Muscle Foods // *Photochem.* 2021. Vol. 1. P. 247–263. DOI: 10.3390/photochem1020015.
40. Hassoun A., Crobotova J., Rustad T., Heia K., Lindberg S.K., Nilsen H. Use of Spectroscopic Techniques for a Rapid and Non-Destructive Monitoring of Thermal Treatments and Storage Time of Sous-Vide Cooked Cod Fillets // *Sensors.* 2020. Vol. 20. P. 2410. DOI: 10.3390/s20082410.
41. Бурак Л.Ч. Перспективы использования технологии сверхкритического диоксида углерода в пищевой промышленности. Обзор предметного поля // *Ползуновский вестник.* 2025. № 1. С. 32–50. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.004.
42. Pan., Sun Q., Liu Y., Wei S., Xia Q., Zheng O., Liu S., Ji H., Hao J. The relationship between rheological and textural properties of shrimp surimi adding starch and 3D printability based on principal component analysis // *Food Sci Nutr.* 2021. Vol. 25. P. 2985–2999. DOI: 10.1002/2Ffsn.3.2257.
43. McClements D.J., Weiss J., Kinchla A.J., Nolden A.A., Grossmann L. Methods for Testing the Quality Attributes of Plant-Based Foods: Meat- and Processed-Meat Analogs // *Foods.* 2021. Vol. 10. P. 260. DOI: 10.3390/foods10020260.
44. Бурак Л.Ч. Ультрапереработанные продукты, их влияние на здоровье потребителей и методы повышения пищевой ценности // *Journal of Agriculture and Environment.* 2025. № 7 (59). DOI: 10.60797/JAE.2025.59.9.
45. Tomasevic I., Tomovic V., Milovanovic B., Lorenzo J., Đorđević V., Karabasil N., Djekic I. Comparison of a computer vision system vs. traditional colorimeter for color evaluation of meat products with various physical properties // *Meat Sci.* 2019. Vol. 148. P. 5–12. DOI: 10.1016/j.meatsci.2018.09.015.
46. Vila-Clarà G., Vila-Martí A., Vergés-Canet L., Torres-Moreno M. Exploring the Role and Functionality of Ingredients in Plant-Based Meat Analogue Burgers: A Comprehensive Review // *Foods.* 2024. Vol. 13. P. 1258. DOI: 10.3390/foods13081258.
47. 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: 10.3390/foods13010150.
48. Bousdekis A., Lepenioti K., Apostolou D., & Mentzas G. Data analytics in quality 4.0: literature review and future research directions // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing.* 2022. Vol. 36 (5). P. 678–701. DOI: 10.1080/0951192X.2022.2128219.
49. Modi B., Timilsina H., Bhandari S., Achhami A., Pakka S., Shrestha P., Kandel D., Parajuli N. Current Trends of Food Analysis, Safety, and Packaging // *Int J. Food Sci.* 2021. Vol. 24. P. 9924667. DOI: 10.1155/2021/9924667.
50. Бурак Л.Ч. Ограничения и возможности современных технологий по обеспечению микробиологической безопасности пищевых продуктов // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология.* 2024. № 2–3 (396). С. 6–13. DOI: 10.26297/0579-3009.2024.2-3.1.