

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-450-468>



Поступила 13.05.2025

Поступила после рецензирования 26.09.2025

Принята в печать 30.09.2025

© Никитина М. А., Горбунова Н. А., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Open access

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Никитина М. А.^{*}, Горбунова Н. А.

Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

3D-печать, 3D-принтер, пищевая промышленность, пищевые биочернила, «напечатанные» продукты, персонализированные продукты, реологические свойства, цели устойчивого развития (ЦУР)

3D-печать, также известная как аддитивное производство, представляет собой технологию, которая используется для изготовления объектов с помощью послойной печати на основе цифровых моделей. Она применяется в пищевой промышленности для персонализации питания, оптимизации цепочек поставок и расширения ассортимента доступных продуктов. Кроме того, показано, что эта технология помогает решать глобальные задачи, включая сокращение пищевых отходов за счет оптимизации технологических процессов и рационального использования сырья, в том числе через включение восстановленных питательных веществ из побочных продуктов агропромышленного производства в печатные продукты питания. В статье рассмотрены сильные стороны и риски применения аддитивных технологий, ключевые тренды и особенности их применения в пищевой промышленности, а также современное состояние мирового рынка 3D-технологий. Проанализированы возможности 3D-печати различных видов продуктов на основе последних научных разработок, рассмотрены проблемы печати мясных продуктов и их аналогов, а также перспективы использования 3D-печати для персонализации питания с учетом требований и предпочтений потребителей. В статье оценили препятствия для выхода пищевых 3D-принтеров и технологий на потребительский рынок. Проанализированы свойства исходных материалов (пищевые чернила), оказывающих значительное влияние на пищевые продукты, напечатанные на 3D-принтере, особенно на их механическую прочность и вязкость, которые влияют на точность и формуемость напечатанных продуктов. Показано, что метод смешивания функциональных компонентов и материалов для печати имеет высокий потенциал для индивидуальной настройки функциональных продуктов питания под потребности разных групп потребителей. Кроме того, в данной работе обобщены методы оценки эффективности 3D-печати пищевых продуктов и определено влияние 3D-печати на достижение «Целей устойчивого развития».

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию НИР № FGUS-2024-0003 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН.

Received 13.05.2025

Accepted in revised 26.09.2025

Accepted for publication 30.09.2025

© Nikitina M. A., Gorbunova N. A., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

ADDITIVE MANUFACTURING IN THE FOOD INDUSTRY

Marina A. Nikitina^{*}, Nataliya A. Gorbunova

V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

KEY WORDS:

3D-printing, 3D-printer, food industry, food bio-ink, "printed" products, personified products, rheological properties, Sustainable Development Goals (SDGs)

ABSTRACT

3D-printing, also known as additive manufacturing, is a technology that is used to produce objects through the layer-by-layer printing process based on digital models. It is employed in the food industry to personify nutrition, optimize the supply chains and extend a range of available products. Moreover, it has been shown that this technology helps solve global tasks including a reduction of food waste due to the optimization of technological processes and rational use of raw materials, including by introducing recovered nutritional substances from by-products of agro-industrial production into printed food products. The paper examines advantages and risks of additive manufacturing, key trends and peculiarities of their use in the food industry, as well as the current state of the world market of 3D technologies. Possibilities of 3D printing of various types of products based on the latest scientific developments are analyzed, problems of printing meat products and their analogs are examined, and prospects of using 3D printing to personify nutrition with account for consumers' requirements and preferences are discussed. Obstacles for launching 3D food printers and technologies on the consumer market were assessed. The authors analyzed properties of initial materials (food inks) that exert a significant impact on food products printed on a 3D printer, especially their mechanical strength and viscosity, which affect accuracy and formability of printed products. It has been shown that the method of mixing functional components and materials for printing has a high potential for tailoring functional foods according to needs of various consumer groups. Furthermore, methods for assessment of the efficiency of 3D food printing are summarized and an effect of 3D printing on achieving Sustainable Development Goals is determined.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. No FGUS-2024-0003 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS.

1. Введение

Пищевая промышленность переживает смену парадигмы своего функционирования и развития. Растущая осведомленность потребителей о составе пищи и интерес к персонализированным сенсорным ощущениям стимулируют разработку технологий, способных удовлетворить новые потребительские запросы [1]. При этом необходимо учитывать, что в дополнение к последствиям изменения климата существует проблема скорости использования природных

ресурсов по сравнению с темпами их восполнения, известная как «глобальный след». Считается, что для поддержания нынешних потребностей человечеству требуется в 1,8 раза больше ресурсов, чем доступно на Земле. Поэтому необходимо развивать альтернативные технологии производства продовольствия, а не полагаться исключительно на традиционные методы [2].

Одной из таких технологий является 3D-печать, впервые использованная для производства пищевых продуктов в 2007 году. С тех

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никитина, М. А., Горбунова, Н. А. (2025). Аддитивные технологии в пищевой промышленности. *Пищевые системы*, 8(3), 450–468. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-450-468>

FOR CITATION: Nikitina, M. A., Gorbunova, N. A. (2025). Additive manufacturing in the food industry. *Food Systems*, 8(3), 450–468. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-450-468>

пор 3D-печать используется для создания визуально сложных геометрических структур, выходящих за рамки возможностей традиционных методов производства продуктов питания. В последнее время акцент сместился с визуальных аспектов продуктов на контроль и персонализацию пищевых характеристик продуктов. Продукты должны быть не только визуально привлекательными, но и обладать здоровым питательным профилем [1].

Согласно словарю Merriam-Webster [3], 3D-печать — это «изготовление твердых объектов путем нанесения слоев материалов в соответствии со спецификациями, которые хранятся и отображаются в электронном виде в виде цифровой модели».

3D-печать также обозначается другими терминами, такими как аддитивное производство слоев (ALM), твердотельное производство произвольной формы (SFF) и быстрое прототипирование (RP). В настоящее время термин «3D-печать» используется как обобщающее обозначение этой технологии [1].

Аддитивное производство как более широкий термин, включающий в себя и технологию 3D-печати, охватывает различные технологии, которые создают объекты путем добавления материала слой за слоем. При производстве продуктов питания аддитивные технологии включают в себя создание съедобных биообъектов путем постепенного наложения слоев различных пищевых материалов. Такой подход позволяет индивидуализировать питание, оптимизировать управление пищевыми процессами и повысить эффективность производства продуктов, обеспечивая преимущества, такие как оптимизация цепочки поставок, индивидуальное формование продукта, персонализация питания и расширение ассортимента доступных источников (ингредиентов) пищи [4]. Разнообразные области применения 3D-печати продуктов питания оказывают благотворное влияние на социальные, экологические и экономические факторы, способствуя достижению целей в области устойчивого развития [5].

Аддитивное производство в пищевой промышленности сочетает в себе междисциплинарное взаимодействие в области кулинарного искусства, пищевой инженерии и материаловедения [6].

3D-технологии являются движущей силой крупных инноваций в пищевой промышленности, так как аддитивные технологии в пищевом секторе имеют большой потенциал для создания 3D-конструкций со сложной геометрией, тщательно продуманными текстурами и индивидуальным содержанием питательных веществ [7].

Цель данного обзора — анализ и систематизация исследований современного состояния технологии 3D-печати продуктов питания, а также оценка ее потенциальных областей применения, рисков, ограничений и преимуществ при разработке пищевых продуктов. Кроме того, рассматривается влияние 3D-печати на пищевую промышленность в контексте достижения целей устойчивого развития (ЦУР), реализуемых в настоящее время.

2. Материалы и методы

В данном исследовании был проведен интегративный обзор научно-технической литературы с использованием баз данных Google Scholar, Science Direct, PubMed, eLibrary, выполненный по алгоритму, представленному на Рисунке 1. Он направлен на анализ и обобщение современных технологий 3D-печати, применяемых для создания пищевых продуктов. Кроме того, проведен анализ материалов, представленных на сайтах компаний-производителей 3D-принтеров.



Рисунок 1. Алгоритм интегративного обзора научно-технической литературы

Figure 1. Algorithm of the integrative review of scientific-technical literature

Поиск был осуществлен по ключевым словам, связанным с такими аспектами, как 3D-печать продуктов питания, аддитивное производство, пищевые материалы для 3D-печати, требования к пищевым чернилам, кастомизация продуктов питания и применение 3D-технологий для достижения ЦУР. Рецензирование, проведенное двумя авторами для минимизации предвзятости, включало определенные критерии включения и исключения, а также извлечение данных.

Критерии включения статей в системный обзор:

- области применения 3D-печати пищевых продуктов;
- классификация технологий 3D-печати в зависимости от принципов их работы;
- технология 3D-печати в области кастомизации и разработки продуктов питания;
- принтеры, параметры, материалы для 3D-печати пищевых продуктов;
- свойства пищевых чернил и требования к ним;
- проблемы, барьеры и риски, которые необходимо преодолеть в процессе 3D-печати пищевых продуктов;
- использование 3D-технологий для достижения ЦУР.

Критерии исключения:

- цифровые продукты питания и молекулярная гастрономия;
- оценка культуры питания, связанной с аддитивными технологиями;
- клинические исследования продуктов, полученных с использованием 3D-печати;
- эстетические аспекты производства продуктов, полученных с использованием 3D-печати;
- постобработка продуктов, полученных с использованием 3D-печати;
- подходы к 3D-печати для интеллектуальной упаковки пищевых продуктов.

Теоретической и методической основой исследования являлись систематизированные данные, представленные в научных статьях, опубликованных на английском и русском языках с января 2014 по март 2025 гг., которые дают полное представление о последних достижениях и о текущем состоянии 3D-печати в пищевой промышленности.

Отобранные статьи были тщательно проанализированы, чтобы понять интерактивные факторы, необходимые для рационального выбора методов 3D-печати в дизайне пищевых продуктов, а именно их пригодность для печати, применимость и возможность последующей обработки. Первоначальный поиск выявил 478 статей, из которых 58 повторяющихся статей были удалены, 142 статьи были исключены из-за проблем с поиском, а 117 статей были исключены после проверки названия и аннотации на предмет несоответствия критериям включения. Были проанализированы полные тексты 161 статьи, отобранной по критериям высокого качества и соответствия теме, направленной на достижение цели исследования. В итоге для методической проверки были отобраны 115 статей, а также 5 патентов. Таким образом, данная методическая оценка предлагает подробное изучение технологий 3D-печати пищевых продуктов и их применения, обеспечивая тщательный и непредвзятый процесс анализа, позволяющий выделить важные исследования и разработки в этой области.

3. Современное состояние мирового рынка 3D-технологий

3.1. Развитие мирового рынка 3D-печати продуктов питания

Эксперты прогнозируют, что мировое производство полностью готовых продуктов питания с помощью 3D-печати значительно вырастет в ближайшие годы, увеличившись с \$6422,5 млн в 2019 году до \$44520 млн к 2026 году. Согласно исследованиям, пищевой сектор может извлечь выгоду из 3D-печати за счет использования автоматизированных пищевых машин и прогнозной аналитики для повышения эффективности, производительности и экономичности [8].

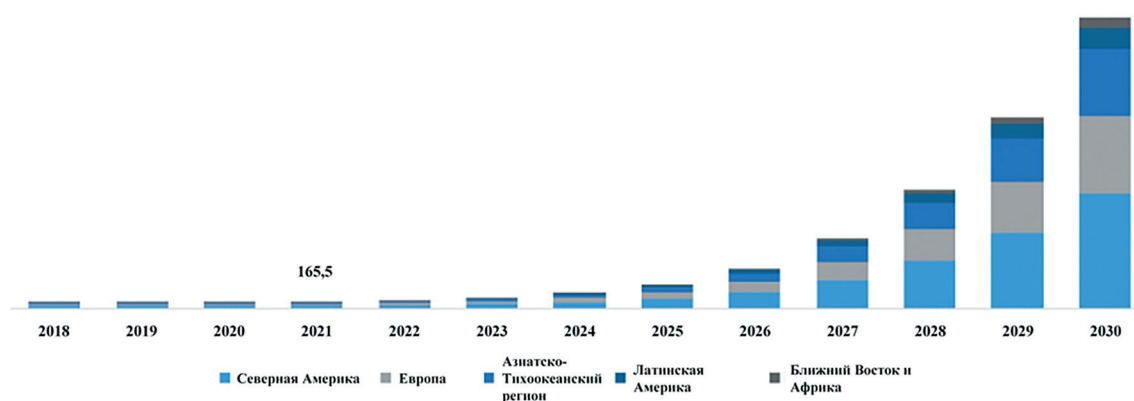
Мировой рынок 3D-печати продуктов питания в 2021 году оценивался в 165,5 млн долларов США, и ожидается, что в течение прогнозируемого периода 2022–2030 г. (Рисунок 2) он будет расти в среднем на 57,3 % [9].

Основная часть компаний, занимающихся исследованиями и разработками в области 3DP, сосредоточена в США и странах Евросоюза, на их долю приходится 65,6 % мирового рынка (37,8 и 27,8 % соответственно), затем следуют КНР (9,7 %) и Япония (9,3 %).

Аналитики компании Emergen Research считают, что мировой рынок пищевых технологий достигнет к 2027 году \$342,52 млрд. 3D-печать принесет производителям новые возможности, так как с ее помощью можно будет создавать новые вкусы и блюда без построения сложных производственных линий.

Пищевая 3D-печать по регионам, 2018–2030

(USD, млн)



Источник: Polaris Market Research Analysis

Рисунок 2. Динамика развития мирового рынка 3D-печати продуктов питания [9]

Figure 2. Dynamics of the development of the world market of 3D food printing [9]

Целый ряд международных корпораций уже используют эту технологию при производстве своей продукции, например, Hershey's (шоколад), Barilla (макароны), Ruffles (картофельные чипсы), Oreo (печенье) и Mazola (фрукты и овощи). При производстве мясных продуктов Aleph Farms и Meatech используют 3D-печать для производства мяса, выращенного в лаборатории, а Redefine Meat и Novameat — для мяса на растительной основе [1].

В России наблюдается значительное отставание промышленного использования 3D-печати по сравнению с развитыми странами. В нашей стране используется всего 1,5% аддитивного оборудования, существующего в мире. Анализ информации показывает, что в России пищевая 3D-печать применяется в основном для декорирования кондитерских изделий по заказу, при этом оборудование по большей части поставляется из Китая. Расходные материалы — это сахарная и вафельная бумага, шоколадная паста и листы, пищевой пластик, съедобные чернила. Использование этих материалов позволяет создавать уникальные пищевые продукты, отвечающие интересам клиентов к инновационным и персонализированным решениям в питании. По мнению специалистов, аддитивные технологии обладают значительным потенциалом для применения в лечебных и оздоровительных целях. Массового внедрения аддитивных технологий в России как альтернативного способа приготовления пищи пока не происходит, поскольку оно требует значительных финансовых вложений и сдерживается традициями и менталитетом россиян [10].

3.2. Рынок пищевых 3D-принтеров

3D-принтеры (3DP) уже стали активно использоваться на предприятиях пищевой промышленности и общественного питания (например, в ресторанах).

Рынок пищевых 3D-принтеров находится в стадии роста. Существует два основных вида 3D-принтеров: карусельного и экструзионного типа. Они различаются по принципу работы и конструкции.

1. Экструзионные 3D-принтеры.

Принцип работы: слой за слоем выдавливает съедобную массу на рабочую поверхность, может формировать полноценное блюдо или продукт.

Структура: обычно имеют статичную платформу и движущуюся печатающую головку, которая перемещается по осям X, Y и Z.

Преимущества: простота в использовании, доступность материалов, широкая распространенность.

Недостатки: ограниченная скорость печати, качество поверхности может варьироваться.

2. Карусельные 3D-принтеры

Принцип работы: эти принтеры используют вращающуюся платформу (карусель), на которой размещаются печатаемые объекты. Печать происходит за счет того, что объект вращается, а печатающая головка может двигаться вверх и вниз или вбок, создавая слои. Из вращающейся емкости с сырьем выбирается нужный ингредиент и выдавливается указанная в рецептуре дозировка (объем, массовая доля). В базе пищевого 3D-принтера карусельного типа может храниться практически неограниченное количество рецептов пищевых продуктов.

Структура: обычно имеют более сложную конструкцию с вращающейся платформой и фиксированной печатающей головкой.

Преимущества: возможность печати нескольких объектов одновременно, потенциально более высокая скорость печати для больших объектов.

Недостатки: более сложная конструкция может увеличить стоимость и потребовать более точной настройки.

В 2012 году компания Essential Dynamics¹ представила принтер Imagine 3D, который осуществляет печать различными материалами: шоколадом, сыром, силиконом, эпоксидной смолой и бетоном. Он мог быть использован в различных отраслях — от кулинарного искусства до строительства и образования. Цена принтера Imagine 3D составляла 3000 долларов.

Первый мясной продукт (небольшие лоскуты мяса размером примерно 2 см в длину, 1 см в ширину и толщиной 1 мм), напечатанный на 3D-принтере, был представлен в 2013 году компанией Modern Meadow². Они продемонстрировали технологию биопринтинга, которая позволяла создавать мясные структуры, используя животные клетки (мышцы, жировые клетки, а также клетки других типов).

В 2016 году NASA запустило 3DP (The Zero-Gravity) для создания готовых 3D-форм в космосе. Наличие 3DP стало существенным улучшением условий пребывания на МКС. Астронавты самостоятельно могут печатать необходимые инструменты и предметы, не дожидаясь доставки необходимых объектов с Земли.

Британская компания Cadbury³ впервые использовала свой первый 3D-принтер — Cadbury Dairy Milk — для производства молочного шоколада в Мельбурне в 2019 году. Компания использует 3D-печать для изготовления пресс-форм и прототипов новых кондитерских изделий.

Итальянская компания Barilla⁴ совместно с голландским исследовательским институтом TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, Нидерландская организация прикладных научных исследований) в 2016 году представила свой первый пищевой 3D-принтер, способный создавать свежую пасту. При помощи воды и манной муки, перемолотой из твердой пшеницы, машина может печатать пасту любой формы. В 2024 году Barilla запустила производство кастомизированных 3D-печатных макаронных изделий через компанию BluRhapsody⁵. Технология применяется для создания форм пасты, соответствующих индивидуальным предпочтениям клиентов, включая уникальные дизайны, отражающие природные или сезонные особенности. На сайте представлен широкий ассортимент форм, включая фигуры в виде бабочек, сердец, сфер, ракушек и морских ежей.

Немецкая компания Biozoon Food Innovations⁶ с 2014 года применяет технологию 3D-печати для создания блюд, адаптированных для

¹ Essential Dynamics Imagine 3D Printer. Retrieved from <https://essentialdynamics.net>. Accessed February 20, 2025.

² Modern Meadow. Retrieved from <https://modernmeadow.com>. Accessed February 20, 2025.

³ Cadbury Dairy Milk. Retrieved from <https://mondelezinternational.com>. Accessed February 20, 2025.

⁴ Barilla. Retrieved from <http://www.barillagroup.com>. Accessed February 20, 2025.

⁵ Artisia by Barilla (2025). Finger food 3D pasta for glamorous aperitifs. Retrieved from <http://blurhapsody.com>. Accessed February 20, 2025.

⁶ Biozoon Food Innovations. Retrieved from <https://biozoon.de/en/>. Accessed February 20, 2025.

пожилых людей. 3D-принтер, оснащенный 48 соплами, смешивает пюре из продуктов, таких как спаржа, цыпленок, свинина, горох, макароны и картофель, с веществом, состав которого компания Biozoop не раскрывает. Этот ингредиент обеспечивает сохранение формы пюре и его легкое растворение при употреблении.

В 2014 году британская дизайнерская студия Dovetailed⁷ представила свой пищевой 3D Fruit Printer на хакатоне Tech Food Hack в Кембридже. Совместно с Microsoft они разработали фруктовый 3D-принтер, работающий на базе технологии молекулярной гастрономии (сферификация). 3D-принтер может напечатать фрукт любой формы и размера. Технология заключается в соединении отдельных капель жидкости с разными ароматизаторами.

В 2015 году компания 3D Bioprinting Solutions⁸ совместно с сетью ресторанов быстрого питания KFC начала разработку инновационной технологии для создания куриного мяса с использованием 3D-биопринтера. В 2018 году компания запустила магнитный биопринтер, а в сентябре 2020 фудпринтер от 3D Bioprinting Solutions был представлен в ресторане Twins Garden. На фудпринтере был напечатан кальмар из растительного белка.

В 2018 году Novameat⁹ стала первой компанией в мире, которая напечатала на 3D-принтере стейк из говядины без мяса.

В настоящее время существуют следующие направления использования 3D-принтеров:

□ для печати шоколадом объемных фигур, плоских изображений и надписей:

- 1) 3D-принтер Choc Edge Choc Creator 2.0 Plus¹⁰. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 180 × 180 × 50 мм; б) толщина слоя: 0,8 мм; в) скорость печати: 150 мм/с. Для пользователей разработаны мобильные приложения: Choc Draw, Mix & Match и Choc Text, с их помощью можно создавать свои рисунки и надписи.
- 2) 3D-принтер Chocola3d¹¹. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 250 × 210 × 80 мм; б) толщина слоя: 0,1 мм; в) скорость печати: 50 мм/с. Данный 3D-принтер может печатать не только шоколадными чернилами, но и кондитерскими смесями, мягкими сырами, паштетом и другими пастообразными ингредиентами-чернилами.
- 3) 3D-принтер Rokit Chocosketch¹². Характеристики 3D-печати: а) область печати: 240 × 120 × 70 мм; б) толщина слоя: 0,3 мм; в) скорость печати: 20 мм/с. Пользователи могут скачать 3D-модели на сайте производителя или загрузить их с SD-карты.

□ для печати сахаром:

- 1) 3D-принтер ChefJet Pro Food¹³. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 203 × 203 × 152 мм; б) толщина слоя: 1 мм; в) скорость печати: 0,014 мм/с. Настольная модель принтера ChefJet печатает монохромные изделия, а более крупный аппарат ChefJet Pro — цветные объекты с различными вкусами: шоколадным, ванильным, мясным, вишневым, яблочным и так далее. В ресторане Melisse в Санта-Монике 3D-принтер ChefJet Pro применяется для изготовления гренков с индивидуальными формами, предназначенных для подачи с луковым супом. Компания The Sugar Lab¹⁴ в Лос-Анджелесе, первая в мире цифровая пекарня, использует 3D-печать для создания украшений для свадебных тортов. Дизайнеры разрабатывают модели, которые затем изготавливаются на 3D-принтерах.

□ для печати блинов и оладий:

- 1) 3D-принтер PancakeBot¹⁵. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 430 × 210 мм; б) скорость печати: регулируемая. 3D-принтер PancakeBot позволяет создавать блины с индивидуальными формами, включая сложные и декоративные дизайны. Пользователь может загрузить дизайны блинов через SD-карту или разработать свой дизайн с использованием программного обеспечения, идущего в комплекте.

⁷ Dovetailed. Retrieved from <https://www.dovetailed.co>. Accessed February 20, 2025.

⁸ 3D Bioprinting Solutions. Retrieved from <https://www.bioprinting.ru>. Accessed February 20, 2025.

⁹ Novameat. Retrieved from <https://novameat.com>. Accessed February 20, 2025.

¹⁰ Choc Edge Ltd. Retrieved from <https://www.chocedge.com>. Accessed February 20, 2025.

¹¹ Chocola3d. Retrieved from <http://chocola3d.com>. Accessed February 20, 2025.

¹² Rokit. 3Dison Chocosketch. Retrieved from <http://en.3disonprinter.com>. Accessed February 20, 2025.

¹³ 3D Systems. ChefJet Pro Food. Retrieved from <https://3dsystems.com>. Accessed February 20, 2025.

¹⁴ The Sugar Lab. Retrieved from <https://sugarlab3d.com>. Accessed February 20, 2025.

¹⁵ PancakeBot. Retrieved from <https://pancakebot.com>. Accessed February 20, 2025.

- 2) Принтер ZBOT Commercial Art Pancakes Printer F5¹⁶. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 180 × 180 × 15 мм; б) толщина слоя: 0,4 мм; в) скорость печати: 300 мм/с.

3) 3D-принтер Commercial Art Pancakes Printer F5 предназначен для создания блинов с индивидуальными узорами и надписями. □ для нанесения рисунков и надписей на пенку напитков, таких как кофе или капучино:

- 1) Cafe maker. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 110 × 110 мм; б) скорость печати: 10 с/чашка.

3D-принтер Cafe maker предназначен для нанесения изображений как монохромных, так и цветных. Он позволяет печатать 3 цветами — синим, красным и желтым. В приложении CupShow можно выбрать имеющиеся изображения и напечатать собственные фотографии.

- 2) Принтер Ripple Maker. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 110 × 110 мм; б) скорость печати: 10 с/чашка.

3D-принтер Ripple Maker за несколько секунд перенесет изображение, надпись или рисунок на поверхность кофейной или пивной пенки (пены). В приложении Barista есть большая библиотека готовых изображений.

□ для 3D-печати пастообразных пищевых материалов, таких как пюре из манго, шпината, авокадо и других ингредиентов, позволяющих создавать изделия сложной формы и дизайна.

- 1) Принтер Foodini¹⁷. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 250 × 165 × 120 мм; б) толщина слоя: 0,1 мм; в) скорость печати: 100 мм/с.

Foodini — универсальный пищевой 3D-принтер, изготовленный испанской фирмой Natural Machines для упрощения рутинных процессов при приготовлении пищи. Он может печатать пельмени, пасту, печенье, съедобные элементы декора и даже гамбургеры. В 3D-принтер можно одновременно загружать до пяти различных ингредиентов. Аппарат поставляется с соплами разного диаметра, поэтому для печати подходит пища различной текстуры.

Принтер Foodini используют в ресторане La Enoteca в Барселоне для печати изображения в виде коралла чернилами-пюре из морепродуктов для блюда Sea Coral.

- 2) Принтер byFlow Focus¹⁸. Характеристики 3D-печати: а) область печати: 208 × 228 × 150 мм; б) толщина слоя: 0,1–0,4 мм; в) скорость печати: 60 мм/с.

В ресторане Food Ink принтер byFlow Focus применяется для создания блюд и элементов сервировки с использованием технологии 3D-печати. Это иммерсивное футуристическое пространство представляет концептуальную серию ужинов, где кухня сочетается с искусством, философией и передовыми технологиями.

3D-принтер byFlow Focus также используют в испанском ресторане La Boscana для создания различных блюд, таких как мясо в шампанском, карпаччо с соусом гуакамоле, 3D-сыр.

Таким образом, 3D-принтеры демонстрируют универсальность в создании разнообразных пищевых продуктов, включая мясные, молочные и декоративные элементы.

Компания Steakholder Foods¹⁹, основанная в 2019 году, специализируется на разработке и продаже производственных машин для 3D-печати (MX200 для мяса и HD144 для рыбы), работающих на основе запатентованных премиксов из высококачественного сырья. Эти инновационные устройства позволяют производителям любого масштаба эффективно создавать пищевые продукты, соответствующие ожиданиям потребителей по вкусу, текстуре и внешнему виду, а также предоставлять безопасную и экологически устойчивую альтернативу традиционному производству мяса и морепродуктов.

В ноябре 2024 года UMAMI Bioworks²⁰, ведущий мировой поставщик платформ для культивирования морепродуктов, и Steakholder Foods¹⁹, ведущий новатор в области альтернативных белков и технологий 3D-печати, объявили о кульминации двухлетнего сотрудничества в области исследований и разработок, финансируемого SIIRD (грантом Сингапура и Израиля на промышленные исследования и разработки). Партнерство заложило основу для производства культивированного рыбного филе премиум-класса с использованием

¹⁶ ZBOT. Commercial Art Pancakes Printer F5. Retrieved from <https://www.zbot.cc>. Accessed February 20, 2025.

¹⁷ Natural Machines. Foodini. Retrieved from <https://www.naturalmachines.com/how-it-works>. Accessed February 20, 2025.

¹⁸ Food Ink. The world's first 3D-printing restaurant. Retrieved from <https://foodink.io>. Accessed February 20, 2025.

¹⁹ Steakholder Foods. 3D Printing the future of Food. Retrieved from <https://steakholderfoods.com>. Accessed February 20, 2025.

²⁰ UMAMI Bioworks. Retrieved from <https://www.umamibioworks.com>. Accessed February 20, 2025.

технологии 3D-печати, что стало значительным шагом на пути к устойчивой коммерциализации морепродуктов.

3D-печать рыбного продукта сложнее, чем печать говяжьего стейка, из-за волокнистой текстуры. Разработанный алгоритм позволяет воспроизводить слоистую структуру рыбы.

Другой израильский стартап от компании Plantish Salmon™²¹ — технология 3D-печати растительного филе лосося из белков бобовых и экстракта водорослей. Филе лосося, полностью изготовленное из растительных материалов с использованием 3D-печати, воспроизводит текстуру, вкус и внешний вид приготовленного натурального лосося. Цель компании — разработать универсальную запатентованную технологию аддитивного производства, которая позволит производить растительные альтернативы рыбе по низкой цене и в больших масштабах.

3D-биопечать является многообещающим направлением для повышения качества и выхода продукции, снижения производственных затрат и повышения экологической устойчивости культивируемого мяса. Это позволяет удовлетворять растущий спрос на мясо за счет экологически устойчивых методов производства.

Несмотря на вышеказанное, в июне 2024 года американский производитель лабораторного мяса методом 3D-печати SciFi Foods прекратил деятельность, не реализовав ни одной порции продукции. Основатели планировали выпускать котлеты для бургеров из смеси растительных ингредиентов и культивируемых клеток крупного рогатого скота в пропорции 90:10. Инвестиции, вложенные в проект, составили 40 млн долларов.

Американская биотехнологическая компания Finless Foods, специализирующаяся на выращивании рыбы, в частности голубого тунца, сократила штат сотрудников, т. е. инвестиции в стартапы по выращиванию искусственного мяса в 2022–2023 гг. сократились на 75 %.

4. Технологии 3D-печати пищевых продуктов, их характеристика и классификация

Аддитивные технологии — методы производства, при которых объекты создаются путем последовательного добавления материалов. В отличие от традиционных методов, таких как фрезерование или литье, которые предполагают удаление материала из заготовки, аддитивные технологии формируют изделия слой за слоем. Основоположником аддитивных технологий считается американский изобретатель Чак Халл (Chuck Hull). В 1983 году он разработал метод стереолитографии (Stereolithography, SLA). Халл создал первый 3D-принтер, который использовал ультрафиолетовое световое излучение для полимеризации жидкой смолы, слой за слоем формируя трехмерные объекты. В 1986 году ученый получил патент на свою технологию [11], что стало отправной точкой для дальнейшего развития аддитивных технологий.

В последующие годы появились и другие методы:

- 1) селективное лазерное спекание (SLS, Selective Laser Sintering). Технология аддитивного производства, позволяющая выращивать модели из полимерных порошков, спекая их лучом лазера. Разработано в середине 1980-х годов доктором Карлом Декардом (Carl Deckard) и научным руководителем доктором Джо Биманом (Joe Beaman) в Техасском университете в Остине при спонсорской поддержке DARPA [12].
- 2) производство ламинированных объектов (LOM, Laminated object manufacturing). Способ формирования цельного изделия из ламинатов (LOM) подразумевает поэтапное склеивание листов бумаги, пластика или металлической фольги с последующим формированием контура при помощи лазерной резки. Данный метод предложил в 1987 году Михаэль Фейген (Michael Feygin) [13].
- 3) моделирование методом наплавления (FDM, Fused Deposition Modeling). Технология заключается в создании объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластики, поставляемые в виде катушек нитей или прутков. Разработано в 1988 году С. Скоттом Крампом (S. Scott Crump), соучредителем компании Stratasys [14].
- 4) струйная трехмерная печать (3D printing, 3DP). Принцип работы заключается в послойном построении физических объектов на основе цифровой трехмерной модели. Осуществляется впрыскиванием связующего порошкового материала на выбранные области слоя с получением связанного композита, соответствующего поперечному сечению трехмерной модели. Технология была разработана в Массачусетском технологическом институте (Massachusetts Institute of Technology, MIT) в 1989 году и запатентована в 1993 [15,16].

²¹ Plantish Salmon™. Retrieved from <https://www.plantish.com>. Accessed February 20, 2025.

Таким образом, временной отрезок с 1980 по 1990 годы можно считать наиболее важным в истории развития аддитивных технологий, в частности 3D-печати. В этот период времени были разработаны основные технологии: SLA (Stereolithography), SLS (Selective Laser Sintering), LOM (Laminated object manufacturing), FDM (Fused Deposition Modeling), 3DP (3D printing).

Основные характеристики аддитивных технологий:

1. Слой за слоем: процесс начинается с цифровой модели, которая разбивается на слои. Затем материал добавляется по одному слою, пока не будет создано полное изделие.
2. Разнообразие материалов: аддитивные технологии могут использовать различные материалы, включая пластики, металлы, керамику и даже биологические материалы.
3. Гибкость дизайна: технологии позволяют создавать сложные геометрические формы и структуры, которые трудно или невозможно произвести с помощью традиционных методов.
4. Экономия материалов: поскольку материал добавляется только в тех местах, где это необходимо, отходы производства могут быть значительно снижены.

В настоящее время не существует устоявшейся классификации аддитивных технологий. Первый документ о систематизации терминов, определений и базовых понятий принадлежит американскому обществу по материалам и их испытаниям American Society for Testing and Materials (ASTM). В 2012 году ASTM создало стандарт ASTM F2792-12A²². В соответствии с данным стандартом выделяют семь видов аддитивных технологий:

- binder jetting** — «разбрызгивание связующего» (порошковые материалы соединяются выборочным нанесением жидкого связующего);
- directed energy deposition** — «прямой подвод энергии в место построения» (энергия от внешнего источника используется для соединения материалов путем их сплавления в процессе нанесения);
- material extrusion** — «экструзия/выдавливание материала» (материал выборочно подается через сопло или отверстие (жиклер));
- material jetting** — «разбрызгивание материала» (послойное струйное нанесение основного вещества);
- powder bed fusion** — «сплавление в слое порошкового материала» (энергия от внешнего источника используется для избирательного спекания/сплавления предварительно нанесенного слоя порошкового материала);
- sheet lamination** — «листовое наплавление/ламинирование» (изготовление детали осуществляется послойным соединением листовых материалов);
- vat photopolymerization** — «фотополимеризация в ванне» (жидкий фотополимер выборочно отверждается (полимеризуется) в ванне световым излучением).

Деление основывалось на способе подвода тепла, на методе фиксации слоя и на форме используемого материала.

В 2015 году стандарт ASTM F2792-12A²² был пересмотрен. ASTM совместно с Международной организацией по стандартизации (ISO) разработали международный стандарт ISO/ASTM 52900:2015²³. В 2021 году вышла новая версия данного стандарта ISO/ASTM 52900:2021²⁴. В этом документе установлены и определены термины, используемые в технологии аддитивного производства, которая применяет принцип аддитивного формования и тем самым создает физическую трехмерную (3D) геометрию путем последовательного добавления материала. Термины были классифицированы по конкретным областям применения.

Российский ГОСТ Р 57558-2017²⁵ был разработан на основе ISO/ASTM 52900:2015²³.

На Рисунке 3 представлена классификация 3D-печати по типу используемых материалов, принципу работы, степени автоматизации, области применения и толщине слоя.

С момента появления первых аддитивных технологий, включая 3D-печать, достигнут значительный прогресс: улучшено качество печати с использованием различных материалов, существенно снижена стоимость продукции и оборудования, а также расширен спектр применения, охватывающий медицину, авиакосмическую отрасль, пищевую промышленность и другие области. На Рисунке 4 представлены главные этапы развития аддитивных технологий.

²² ASTM F2792-12A (American Society for Testing and Materials). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. 2012.

²³ ISO/ASTM 52900:2015 (Additive manufacturing — General principles — Terminology). 2015.

²⁴ ISO/ASTM 52900:2021 (Additive manufacturing — General principles — Terminology). 2021.

²⁵ ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. Москва: Стандартинформ, 2018.



5. Особенности 3D-технологий производства пищевых продуктов

5.1. Требования к пищевым биочернилам для 3D-печати продуктов

Пригодность для печати является ключевым/критически важным параметром в технологии 3D-печати и, по сути, определяет способность пищевого материала печататься и сохранять свою форму.

Несмотря на многочисленные преимущества, технология 3D-печати пищевых продуктов связана с рядом сложностей, включая обеспечение стабильного качества и точности при печати биоматериалов. Wilson и соавторы [17] отмечают, что на производительность 3D-печати и качественные характеристики печатных изделий (объектов) влияют свойства пищевых чернил и параметры печати [18,19].

Для успешной 3D-печати пищевые чернила должны обладать определенными реологическими свойствами, обеспечивающими текучесть для экструзии, стабильность для сохранения формы и пластичность для создания сложных структур [19,20]. При этом необходимо поддерживать баланс этих свойств, сохраняя пищевую ценность и органолептические качества продукта [21,22]. То есть для обеспечения пригодности к 3D-печати пищевые чернила должны обладать вязкоупругими свойствами, которые обеспечивают текучесть во время экструзии и переход в твердую структуру после нанесения, поддерживая форму и стабильность изделия [19,20].

Так, была изучена взаимосвязь между печатаемостью пищевых паст и их реологическими характеристиками. При исследованиях использовали картофельное и томатное пюре, температура в 3D-принтере регулировалась в диапазоне от 20 до 200 °С, температура экструзии – 25 °С. В результате проведенных исследований авторы отметили, что материалы для экструзии во время 3D-печати должны обладать рациональным соотношением параметров предела текучести и модуля упругости для поддержания печатной формы, а также иметь относительно низкие индексы консистенции и течения потока для легкого выдавливания из наконечника сопла в принтере экструзионного типа. Кроме этого, для оценки стабильности печати и силы экструзии пищевых паст в качестве индикатора необходимо использовать показатель напряжение сдвига [23].

Большинство исследований посвящено изучению влияния добавления гидроколлоидов, желатина и белковых ингредиентов в пищевые чернила на их реологические свойства, а также на повышение механической прочности и точности формирования структуры продуктов после 3D-печати [24–27].

На реологические свойства пищевых чернил значительно влияют гидроколлоиды, длинные полимерные цепи которых образуют 3D-сети под действием сил Ван-дер-Ваальса, гидростатических взаимодействий и/или водородных связей [24,25]. Добавление гидроколлоидов в рецептуру пищевых чернил существенно изменяет

реологические свойства смесей, таких как тесто, растительные аналоги мяса и йогурт, улучшая их пригодность для 3D-печати [26].

Вместе с тем углеводы, чаще всего сахара и крахмалы, используются в рецептурах пищевых чернил благодаря их термопластичным свойствам, обеспечивающим текучесть при экструзии в процессе 3D-печати [28]. Белки, полученные из сои или молока, обладают широким спектром функциональных возможностей, включая гелеобразование и эмульгирование, которые необходимы для определенных технологий 3D-печати [27]. Липиды, в том числе масла и жиры, обеспечивают пищевые продукты органолептическими свойствами и энергетической ценностью, а их текучесть при комнатной температуре способствует пригодности для процессов 3D-печати. Пищевые волокна, особенно целлюлоза, усиливают прочность напечатанных изделий и, благодаря растительному происхождению, поддерживают экологическую устойчивость продуктов [29].

Такие продукты, как мясо, фрукты, овощи и т. д., должны быть предварительно обработаны и дополнены гидроколлоидами в качестве добавок для улучшения их пригодности к 3D-печати [30]. Эти гидроколлоиды представляют собой разнообразную группу длинных цепей гидрофильных полимеров, состоящих из полисахаридов и некоторых белков, полностью или частично растворимых при диспергировании в воде. Наиболее широко используемыми гидроколлоидами являются камеди, за которыми следуют крахмал, целлюлоза, фикоколлоид и другие гидроколлоиды, такие как желатин и декстрины. Эти гидроколлоиды получают из растений (крахмалы, целлюлоза, гуаровая камедь, конжаковая камедь, арабская камедь, инулин), водорослей (альгинат, агар, каррагинан), животного сырья (желатин), микроорганизмов (геллановая камедь, ксантановая камедь) и из их модифицированных форм (модифицированные крахмалы и карбоксиметилцеллюлоза) [30]. Гидроколлоиды растительного происхождения являются более дешевыми, поскольку они требуют меньшей обработки для экстракции, в то время как фикоколлоиды, особенно полученные из морских водорослей, считаются самыми дорогими гидроколлоидами из-за стоимости процесса сбора и обезвоживания [22].

Добавление гидроколлоидов требует точного контроля, поскольку недостаточное их количество может привести к слабости консистенции, препятствующей сохранению формы напечатанного продукта, а избыточное — к чрезмерной твердости, делающей пищу непригодной для пациентов с дисфагией [31].

Так, на примере аналога котлеты, созданной из ферментированных соевых бобов, оценивали добавление глюкоманнана конжака с различными концентрациями (0, 2, 4 и 6 % по массе). Добавление конжака не оказывало значимого влияния на содержание белка и цвет приготовленной котлеты ($p > 0,05$), но существенно улучшало водоудерживающую способность ($p < 0,05$), приводя к повышению влагоудерживающих свойств. Кроме гидроколлоида — конжака, в рецептуру добавляли коньяк для улучшения вкусовых и текстурных качеств котлеты [26].

Nida и др. исследовали пригодность к 3D-печати фракций рисовой шелухи различной степени измельчения с добавлением гуаровой камеди и без нее [32]. Основная идея исследования заключается в том, что измельчение играет важную роль в обеспечении лучшей текучести продукта через сопло. Из-за сложности, связанной со свойствами волокнистых материалов при печати, добавление гидроколлоида снижает вязкость и водопоглощающую способность, что приводит к улучшению пригодности для печати измельченной рисовой шелухи. Стабильность слоев при печати достигалась при максимальной высоте сопла 0,2 мм и скорости потока $0,678 \pm 0,003$ г/мин. Таким образом, исследование демонстрирует возможность преобразования рисовой шелухи, непригодной для печати, в подходящий для 3D-печати материал [32]. Полученное вещество может использоваться как биоразлагаемый упаковочный материал для пищевых продуктов, способствуя снижению зависимости от небiorазлагаемых пластиков [32].

Scheele и др. [33] изучали пригодность картофельного пюре для 3D-печати и придания ему правильной формы при добавлении богатых белком порошков из сверчка и гороха. В 100 г картофельного пюре вносили процентные доли этих добавок (5, 15 и 30 %) с различным соотношением воды и белка (0, 1, 2 и 3 %). Картофельное пюре с добавлением порошка из сверчка и горохового порошка обеспечивает высокую точность отпечатков при соотношении воды и добавок, равном 2 к 3 соответственно. Реологические испытания показали, что такое картофельное пюре имеет значения модуля упругости в диапазоне от 15 до 25 Па. Исследование взаимосвязи между точностью печати, модулем упругости и содержанием белка в картофельном пюре с добавлением белков сверчка и гороха выявило снижение

точности формы и пригодности к 3D-печати при увеличении концентрации белковых добавок.

Целью работы Liu и соавторов [34] было создание пищевого имитатора для 3D-печати на основе молочного белка и исследование влияния концентрации изолята сывороточного белка (WPI) на эффективность печати концентрата молочного белка (MPC). Порошки изолята сывороточного белка и концентрата молочного белка в различных соотношениях были приготовлены в виде пасты (35 мас.%, общее содержание сухого вещества). Данные по реологическим свойствам и текстуре показали, что присутствие изолята сывороточного белка позволяет снизить вязкость и размягчить пасту концентрата молочного белка, улучшая процесс печати. Пастообразная смесь на основе сухого молока с добавлением MPC и WPI в соотношении 5:2 обеспечивает оптимальные реологические свойства для 3D-печати методом экструзии, позволяя точно воспроизводить разработанную 3D-модель. Кроме того, увеличение WPI постепенно повышает устойчивость к деформации биообъекта и улучшает пригодность для печати, что значительно отличалось от результатов, полученных Scheele и соавторами [33], где наблюдалась тенденция к снижению этих параметров. Это может быть связано с разницей в свойствах между картофельным пюре и концентратом молочного белка.

Еще одним важным фактором, влияющим на совместимость процесса экструзии в 3D-технологиях и на пригодность пищевого материала для печати, является добавление крахмала в качестве сырьевого ингредиента. Исследование, проведенное Anukiruthika и соавторами [35], позволило оценить пригодность для печати порошка яичного желтка (EY) и яичного белка (EW) с использованием смесей рисовой муки, богатой крахмалом, с помощью экструзионного 3D-принтера CARC. Результаты показали, что добавление наполнителя (рисовой муки в соотношении 1:1 и 1:2 по массе) оказало значительное влияние на повышение стабильности и прочности печатных материалов. Смесь яичного желтка и рисовой муки в соотношении 1:2 пригодна для 3D-печати с высокой точностью и четкостью слоев при следующих параметрах: сопло 0,84 мм, скорость печати 600–800 мм/мин, частота вращения двигателя 180 об/мин, скорость экструзии $0,005 \text{ см}^3/\text{с}$ с минимальными изменениями цвета.

Изучение вязкоупругих свойств смесей крахмал-манго и крахмал-арабиноксилан в качестве материалов для 3D-печати с учетом их поведения во время экструзии показало, что смесь с высоким содержанием крахмала имеет более высокую прочность геля, что улучшает печатные свойства при сохранении стабильной печатной структуры благодаря высокому тиксотропному индексу [36].

Были проведены исследования использования натурального кукурузного крахмала, а также трех типов модифицированных крахмалов, добавленных в эмульсионные гели для получения более качественных 3D-печатных изделий. Для производства гелей применяли кукурузный крахмал с содержанием амилозы 28 %, чистой 98 % и влажностью 12,04 %, прежелатинизированный крахмал (содержание 99,9 %), окисленный крахмал (содержание 99 %) и карбоксиметилкрахмал натрия (содержание 99 %). Эмульсионные гели с добавлением различных крахмалов использовались в качестве биочернил для 3D-печати цилиндрических образцов со следующими параметрами 3D-печати: температура печати = 25 °C, диаметр сопла = 0,84 мм, плотность заполнения среднего слоя = 50 %, плотность заполнения трех нижних слоев и трех верхних слоев = 100 %, скорость печати = 15 мм/с. Тип крахмала существенно повлиял на печатные свойства композитных гидрогелей, образованных различными модифицированными крахмалами. Все модифицированные крахмалы снижали механическую прочность гелей, но разные типы модифицированных крахмалов вызывали существенно отличающиеся эффекты. Окисленный крахмал приводил к агрегации капель эмульсии и к увеличению размера частиц, но в некоторой степени улучшал термическую стабильность эмульсионного геля при большой разнице в размерах напечатанных изделий. Прежелатинизированный крахмал в геле с эмульсией подвергался значительной агрегации и взаимодействовал с белками, что снижало стабильность эмульсии. Это препятствовало формированию стабильной структуры при 3D-печати. Карбоксиметилкрахмал натрия увеличивал вязкость гелей и уменьшал размер частиц гелей, что способствовало равномерной экструзии нитей и слиянию между напечатанными слоями. Высокое содержание кукурузного крахмала и карбоксиметилкрахмал натрия в геле (> 20 %, по массе) и окисленного крахмала (20 %) позволило значительно повысить точность печати. Использование прежелатинизированного крахмала показало наиболее низкую точность печати из-за малого модуля упругости, недостаточной адгезии и недостаточных восстановительных свойств. Высокая механическая прочность геля с кукурузным крахмалом затрудняла экструзию

из сопла и вызывала образование толстых нитей при формировании продукта. Наиболее точно структура и форма при 3D-печати сохранялись при внесении в гель карбоксиметилкрахмала натрия. Тесты на текстуру и испытания IDDSI (капельный тест, тест давления вилкой, тест наклона ложкой) показали, что модифицированные крахмалы улучшают текстурные свойства гелей, обеспечивая создание пищевых продуктов, пригодных для пациентов с дисфагией. По мнению авторов, это исследование является эталоном для применения модифицированного крахмала в 3D-печати [37].

Благодаря исследованию 3D-печати желатиновых гелей из кожи лосося (SGG) различных концентраций (2%, 5%, 8%, 11%, и 14%), которая является побочным продуктом рыбной промышленности, было показано, что стабильная печатная модель была получена с использованием геля 8%-ной концентрации из-за его наиболее эффективной способности выдерживать вес слоев и сохранять хорошую форму [38].

Были исследованы реологические свойства смесей изолята соевого белка с альгинатом натрия и желатином на пригодность для 3D-печати. Рассмотренные смеси, обладая выраженной способностью к разжижению при сдвиге, являются наилучшим материалом для 3D-печати пищевых продуктов. Вязкость и модуль упругости смеси соевого изолята с желатином были ниже при температуре 35 °C, в то время как реологические показатели быстро повышались при снижении температуры до 25 °C, что обеспечивало сохранение структуры нанесенных слоев и сохраняло заданную форму. Смеси соевого изолята с 2, 6 и 10%-ным содержанием желатина позволяют получать печатные формы со стабильной геометрией. Добавление альгината натрия и желатина в смеси не привело к образованию химических сшивок между белковыми субъединицами во время смешивания и 3D-печати при температуре 35 °C, а также улучшило твердость и консистенцию геометрических фигур, напечатанных на 3D-принтере. Общие результаты показали, что пищевая матрица из соевого изолята, альгината натрия и желатина станет перспективным материалом для 3D-печати пищевых продуктов [39].

Пшеничная мука, широко применяемая в качестве добавки, повышает пригодность к 3D-печати и обеспечивает стабильность структуры пищевых материалов. Так, исследовалось использование рафинированной пшеничной муки в качестве добавки при введении в различных пропорциях в куриный фарш (1:1, 2:1 и 3:1 по массе) для улучшения его пригодности для 3D-печати за счет увеличения вязкости фарша. Для получения оптимизированной рецептуры 2:1 были изменены параметры экструзионной печати, которые составили: высота сопла 0,64 мм, размер сопла 0,82 мм, скорость печати 1000 мм/мин, скорость экструзии 8,8 мм³/с, и давление экструзии 4 бара. Напечатанный на 3D-принтере образец куриного фарша был подвергнут последующей обработке путем сушки на горячем воздухе с последующим обжариванием во фритюре. Хрустящие куриные наггетсы, напечатанные на 3D-принтере, с энергетической ценностью 166,72 ± 0,07 ккал/100 г, могут быть изготовлены по индивидуальному заказу в любой форме, что позволяет использовать их в индустрии быстрого питания [17].

Важную роль в 3D-печати продуктов питания играют липиды. Они улучшают текстуру и вкусовые характеристики пищевых продуктов, обеспечивают необходимую смазывающую способность и адгезию в процессе печати, способствуют равномерному распределению и межслойному склеиванию слоев напечатанного материала. В контексте 3D-печати липиды выполняют множество важнейших функций. Жиры также могут быть составлены в филаменты с определенной температурой плавления для облегчения экструзии и затвердевания в процессе печати. Кроме того, липиды могут инкапсулировать биологически активные соединения, обогащая питательную ценность и функциональность конечного пищевого продукта [40,41].

Методы 3D-печати на основе горячего расплава и холодной экструзии обычно используются для 3D-печати шоколада, продукта с высоким содержанием липидов. Какао-масло является основным ингредиентом шоколада с содержанием в диапазоне 23–35%.

Кристаллическая морфология и температура плавления какао-масла существенно влияют на характеристики шоколада при 3D-печати. В технологии 3D-печати текучесть, скорость осаждения и межслойная адгезия шоколада тесно связаны с кристаллической формой какао-масла. Температура плавления какао-масла, обычно колеблющаяся от 32 до 36 °C, имеет важное значение для 3D-печати, поскольку она гарантирует, что шоколад будет сохранять необходимую текучесть во время экструзии и быстро застывать при охлаждении для сохранения целостности формы напечатанной фигуры. Был разработан шоколад с пониженным содержанием жира, подходящий для 3D-печати. Путем добавления эмульсии воды в масле была сбалансирована рецептура

шоколада, сохраняющая при этом необходимую кристаллическую форму и температуру плавления [41]. Однако следует учитывать, что индекс жир/сухое вещество, который количественно определяет соотношение какао-масла к общему содержанию твердых веществ в шоколаде, оказывает значительное влияние на вязкость и характеристики потока экструзии шоколада. Повышенный индекс означает более высокую концентрацию какао-масла, что потенциально может привести к более упорядоченному и плавному процессу экструзии. Тем не менее это может потребовать корректировки параметров печати для предотвращения таких дефектов, как растекание или размазывание материала. 3D-печать шоколада на основе экструзии горячего расплава дает преимущества с точки зрения простоты и доступности. Однако это требует строгого контроля температуры и использования дополнительного охлаждающего оборудования [29].

Метод холодной экструзии обеспечивает эффективную 3D-печать шоколада, однако высокое содержание липидов и повышение температуры при экструзии через сопло могут снижать прочность и стабильность структуры напечатанного продукта. Чтобы противодействовать этому, исследователи включили такие добавки, как какао-порошок, олеогель и экстракт рожкового дерева. Путем тонкой настройки соотношения липидов относительно других компонентов в шоколадной смеси можно оптимизировать реологические свойства. Такая оптимизация приводит к более эффективному и качественному процессу 3D-печати [29].

В нескольких исследованиях сообщалось о влиянии состава и параметров печати на свойства сыра, напечатанного на 3D-принтере. Например, цитрат тринатрия был добавлен в сыр чеддер в качестве добавки для хелатирования кальция, эмульгирования жиров и стимулирования дисперсии казеина, что может улучшить полутвердые свойства и пригодность сыра к 3D-печати [42]. Реологические методы позволили установить оптимальный диапазон вязкости (7,55–10,94 Па·с), обеспечивающий стабильную 3D-печать плавленого сыра с беспрепятственной экструзией и формированием слоистой структуры. Установлено, что добавление плавленого сыра с pH 5,8 обеспечивает напечатанный продукт с более мягкой и эластичной текстурой по сравнению с сыром с pH 5,4 или 5,6. Сыр, содержащий исключительно свежий творог, был значительно тверже, чем сыр, содержащий мягкий или зрелый сыр Чеддер. Благодаря 3D-печати при более высоких температурах (60 °C) сыр получается более твердым и эластичным, чем при печати при более низких температурах (40 °C).

5.2. Основные проблемы 3D-печати мясных продуктов и их аналогов

Возможность создавать индивидуальные мясные продукты может сохранить огромные ресурсы, необходимые для животноводства, и преодолеть значительные экологические проблемы, устранить препятствия на пути устойчивого развития пищевых технологий.

Применение 3D-печати в мясных технологиях по-прежнему связано со многими проблемами, однако объем исследований, направленных на их решение, неуклонно расширяется.

Мясные материалы, используемые в 3D-печати, можно представить как многофазную коллоидную систему, где вода является непрерывной фазой. В то же время белки, углеводы и неорганические соли составляют дисперсную фазу. Указанная система отличается сложными реологическими свойствами, что делает ее непригодной для процедур печати и представляет серьезную проблему для развития технологии 3D-печати [43].

Предварительная обработка улучшает пригодность мясных материалов к печати за счет улучшения их реологических и гелеобразующих свойств, которые имеют решающее значение для достижения требуемого эффекта. Это достигается за счет стимулирования взаимодействия между коллоидами в системе фарш-вода или путем добавления других гидроколлоидов в измельченное мясо, что позволяет мясной пасте сохранять низкую вязкость во время экструзии, обеспечивая при этом достаточную вязкость и предел текучести для сохранения формы и поддержки последующих слоев при формировании. Видами предварительной обработки, повышающими пригодность мяса к печати, являются [44]:

- ультразвуковая обработка, которая усиливает реологические и гелеобразные свойства миофибриллярного белка [45];
- микроволновая обработка. Тепловой эффект микроволнового излучения денатурирует белки в системе фарша и обратимо связывает их с образованием растворимых агрегатов, тем самым изменяя некоторые белки из золя в гель и увеличивая самоподдерживающуюся способность мясной начинки [46];
- обработка под высоким давлением влияет на структурные и функциональные свойства белков, способствует адсорбции белка на границе жир/вода, что улучшает эмульгацию пищевых

чернил, повышает термическую стабильность белков, способствует гелеобразованию и фиксирует свободную воду, в результате чего получаются плотные и однородные гели [47,48]. Кроме того, высокое давление может улучшить текстуру и пригодность мяса к печати за счет повышения эластичности, удержания воды и адгезии; вместе с тем следует отметить, что технологии высокого давления в 3D-печати нуждаются в дальнейшем развитии [44].

Dick и соавторы [49] разработали 3D-печатный продукт из говядины с композитным слоем на основе экструзии с двумя слоями и изучили влияние содержания жира и плотности заполнения (50, 75 и 100%) на печать и свойства продукта. Основа мясной пасты состояла на 85% из говядины и на 15% из воды с добавлением 1,5% NaCl и 0,5% гуаровой камеди для печати конструкций с использованием прямоугольной призматической конструкции ($40 \times 40 \times 10 \text{ мм} = \text{Д} \times \text{Ш} \times \text{В}$). Слои свиного жира (0, 1, 2 и 3 слоя высотой 1 мм) располагались во внутренней части конструкции (по 2 мм с каждой стороны), окруженные мясной пастой (по периметру и сплошными верхним и нижним слоями) для уменьшения выделения жира с боков напечатанных мясных изделий при постобработке при приготовлении методом су-вид.

На основе предварительных испытаний были определены следующие параметры печати: высота слоя 1,95 мм и высота первого слоя 1,5 мм для экструдера 1 (мясная паста), высота слоя 1 мм для экструдера 2 (сало), 2 вертикальных периметра оболочки, 2 сплошных слоя сверху и снизу, скорость 20 мм/с и скорость потока 100%. Производство 3D-печатных продуктов из говядины требует уменьшения размера частиц мяса, что снижает затраты, делая технологию особенно подходящей для переработки дешевых, малоиспользуемых и жестких кусков говядины [49].

Внесение пищевых добавок или предварительная обработка являются важными способами улучшения свойств обычного мяса для обработки с помощью 3D-печати. Липиды — важные компоненты в повышении производственности 3D-печати мясных продуктов. При нагреве мясных чернил липиды заполняют сетчатую структуру, образованную денатурированными белками, или сополимеризуются с ними, формируя эмульгированные гели. Такие гели повышают текучесть материала, снижают его вязкость и улучшают эффективность экструзии через сопло 3D-принтера [50]. Например, печатная пригодность мяса индейки была значительно повышена за счет добавления беконного жира с последующим ферментативным сшиванием с использованием трансглутаминазы [51]. В идеале напечатанный мясной продукт должен выдерживать обработку после 3D-печати с сохранением формы и размеров продукта. Тем не менее жиры часто вызывают усадку мяса, напечатанного на 3D-принтере, во время постобработки. В частности, отклонение размеров (особенно отклонение по высоте) композитных многослойных мясных продуктов увеличивалось по мере повышения содержания жира. Поэтому при реальной 3D-печати мяса количество жира должно контролироваться таким образом, чтобы мясо плавно вытекало через сопло, а также выдерживало термическую обработку без деформации. Помимо добавок, предварительная обработка микроволновым нагревом также является способом улучшения характеристик мясной 3D-печати. Zhao и соавторы использовали синергетический подход микроволнового нагрева и TGase для достижения самосклеивания сурими в процессе печати [51].

Изменяя соотношение мясных и немясных ингредиентов в рецептурах мясных чернил, можно улучшить их реологию и пригодность к печати, а также получить продукты, богатые питательными веществами.

В исследовании Chen и соавторов [52] проведена оценка влияния шести гидроколлоидов на пригодность чернил TSP (textured soybean protein) и DSP (drawing soy protein) для 3D-печати стейковых продуктов. Изучена текстурная разница между жареными образцами, напечатанными на 3D-принтере, и жареной коммерческой куриной грудкой (контроль). Результаты демонстрируют, что использование различных чернильных подложек (TSP, DSP) и гидроколлоидов (ксантовой, конжаковой, гуаровой камедей, альгината натрия, карбоксиметилцеллюлозы натрия, гидроксиэтилцеллюлозы) обеспечивает стабильную 3D-печать. Чернила, состоящие из TSP и ксантановой камеди, обладали наилучшими печатными характеристиками и целостностью образца после обжарки. В исследовании было установлено, что различные схемы наполнения и скорости заполнения оказывали существенное влияние на текстурные свойства обжаренных образцов. Треугольная форма заполнения использовалась со скоростью заполнения 60%, продукт имел наиболее близкую к контрольному образцу твердость ($2585,13 \pm 262,55$), жевательность ($1227,18 \pm 133,00$) и липкость ($1548,09 \pm 157,82$).

Исследование показывает целесообразность включения гидроколлоидов в рецептуру чернил для печати стейкоподобных продуктов, схожих с куриной грудкой.

Аналоги мяса рассматриваются как перспективное решение, направленное на удовлетворение потребительского спроса на мясные продукты.

Современные аддитивные технологии производства аналогов мяса — это в основном термоэкструзия, процесс измельчения, электроформование (электропрядение), структурирование сублимацией и формование белка [25,53]. Основным недостатком данных методов является ограниченная вариабельность формы и структуры аналогов мяса. Однако потребности различных групп потребителей, включая пациентов с дисфагией, пожилых людей и лиц с особыми диетическими требованиями, предполагают необходимость создания продуктов с разнообразными формами и свойствами. В этом контексте большой интерес может представлять технология трехмерной (3D) печати. Технология 3D-печати позволяет создавать продукты сложной формы, с индивидуальным подходом к питанию, внешним видом, текстурой, вкусом и другими сенсорными свойствами [25,54].

Канадскими исследователями изучалось влияние добавления гидроколлоидов на 3D-печать аналогов мяса на основе растительного белка. Чернила были созданы на основе изолята соевого белка, глютена, рапсового масла и воды. В рецептуры аналогов мяса добавляли гидроколлоиды (ксантановую камедь, пектин, гидроксипропилметилцеллюлозу, гуаровую камедь, камедь рожкового дерева). Разработанные чернила были использованы для создания определенной геометрии цилиндрической 3D-модели растительного аналога мяса, который был подвергнут обжариванию во фритюре (при температуре 180 °C, в течение 90 с) в рапсовом масле, так как перед употреблением растительные аналоги мяса требуют тепловой обработки [54].

Результаты показали, что введение гидроколлоидов повлияло на вязкость мясных аналогов чернил, которая составила 3871–5482 Па·с, при этом параметры: скорость 3D-печати ($0,34\text{--}0,39 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$), погрешность печати (2,51–10,37%), точность печати (81,97–97,27%), стабильность размеров (91,22–98,61%) и потери при варке (5,69–14,23%) значительно ($p < 0,05$) зависели от добавления вида гидроколлоида. Соотношение влаги и жира в сырых аналогах мяса, напечатанных на 3D-принтере, было идентичным, однако наблюдались различия в цветовых характеристиках образцов с добавлением гидроколлоидов. Обжаривание во фритюре существенно повлияло на качество аналогов мяса, напечатанных на 3D-принтере. Во время обжаривания во фритюре потеря влаги, поглощение жира и изменение цвета были связаны с типами гидроколлоидов, которые были включены в состав чернил для аналогов мяса. Так, сравнение содержания жира в опытных и контрольном (без гидроколлоидов) образцах показало, что все используемые гидроколлоиды были высокоэффективными для снижения поглощения жира при жарке 3D-печатных аналогов мяса, так как содержание жира в исследуемых образцах (в диапазоне от 0,38 до 0,43 г/г) было значительно ниже, чем в контрольных образцах (0,51 г/г). Наряду с этим ученые отмечают, что гидроколлоиды, такие как гуаровая камедь, пектин, камедь рожкового дерева, ксантановая камедь и т. д., целесообразно использовать при создании пищевых чернил для 3D-печати аналогов мяса [25,55].

Koranne и соавторы представили результаты процесса 3D-печати пищевых продуктов для скаффолдов, изготовленных из пищевого гидролизованного коллагена, предназначенного для биопроизводства культивируемого мяса [56].

Мясные продукты и их растительные аналоги требуют приготовления или нагрева перед употреблением. В связи с этим ключевое значение имеют процессы обработки продукта после 3D-печати.

Так, добавление гидроколлоидов, а также типы используемых гидроколлоидов в чернилах, аналогичных мясным, оказали значительное влияние на структуру поверхности, химический профиль и температуру стеклования аналогов мяса, напечатанных на 3D-принтере и обжаренных во фритюре [54]. Также изучалось влияние добавления гидроколлоидов (в качестве ингредиентов рецептуры чернил) и жарки во фритюре на параметры процесса 3D-печати, теплофизические, структурные и физико-химические свойства мясных аналогов. Включение гидроколлоидов в рецептуру аналогов чернил для мяса не только улучшает процесс 3D-печати, но и обеспечивает сохранение размеров продукта, снижает потери при приготовлении, стабилизирует термохимическую природу 3D-печатных объектов во время их постпечатной обработки во фритюре [54]. Таким образом, можно сделать вывод, что добавление гидроколлоидов в рецептуру чернил для 3D-печати аналогов мяса будет эффективно для модификации свойств используемых растительных белков.

В работе [57] изучали характеристику термомеханических переходов при жарке продуктов на основе мяса и растительных аналогов в панировке из пшеничной и рисовой муки. Обжарку во фритюре производили при температуре 180 °C в рапсовом масле. Ученые-исследователи установили, что рецептура кляра существенно влияет на температуру стеклования (Tg) покрытия жареных продуктов, т. е. корочки. Tg корочки жареных продуктов колебалась от –20 °C до –24 °C. Tg положительно коррелировала со временем обжарки и внутренней микропористостью (%) и отрицательно — с содержанием влаги. Внутренняя микроструктура сильно влияет на текстурные характеристики (твердость, хрупкость, хрустящую корочку). Отрицательное значение Tg способствует изменениям текстуры растительных аналогов мяса после жарки, проявляющимся в переходе от твердой и хрупкой к мягкой и пластичной структуре при комнатной температуре (25 °C) и инфракрасном нагреве (65 °C).

Авторы подчеркивают, что, несмотря на популярность и скорость метода обжарки во фритюре, этот способ приготовления пищи ассоциируется с повышенным риском ожирения и ишемической болезни сердца [58,59].

Изолят соевого белка, метилцеллюлоза, изолят сывороточного белка и изолят белка пшеничного глютена являются лучшими материалами для покрытия, в зависимости от субстрата. Они позволяют снизить поглощение масла на 35–40 %. Исследования также показывают, что большая часть масла в жареных продуктах поглощается во время охлаждения (после жарки), чем во время жарки. Поэтому требуются дальнейшие исследования влияния гидроколлоидов на эффективность 3D-печати аналогов мяса. Это также позволит оптимизировать состав для уменьшения содержания масла. Например, для снижения содержания жира в жареных продуктах было предложено использовать гидроколлоидное покрытие [60,61].

Одним из подходов к 3D-печати мясных продуктов является биопечать живых клеток. Kang и соавторы [62] разработали инженерную ткань, имитирующую стейк (диаметр 5 мм, длина 10 мм), используя биопечать клеток крупного рогатого скота: мышечных, жировых и сосудистых. Всего было создано 72 волокна, включая 42 мышечных, 28 жировых и 2 сосудистых.

По мнению Dong и соавторов [44], одним из ключевых преимуществ биопечати мяса является ее потенциал для решения проблем устойчивого развития за счет минимизации затрат природных ресурсов на обеспечение потребностей животноводства.

Разработка способа культивирования биомассы миоцитов (мышечных клеток), полученных из мышц рыбы, позволила создать технологию для производства искусственного мяса стерили в 3D-принтере из выращенных мышечных клеток [63].

Ученые из ДГТУ и ВолгГМУ разработали технологию биопечати гибридного культивированного мясного продукта — он получен с использованием мышечных клеток кролика, альгината натрия и белка подсолнечника в скаффолде [64].

Новый подход к 3D-печати пищевых продуктов с использованием выращенных растительных клеток дает возможность регулировать свойства продукта и создавать изделия с заданными биохимическими характеристиками. Разработанная технология позволит создавать продукты с заданными текстурой, питательностью, внешним видом и вкусом [65].

5.3. Применение 3D-печати для персонализированного питания

В последние годы рынок демонстрирует расширение возможностей персонализации продуктов питания с учетом вкусовых предпочтений, эстетических характеристик и диетических потребностей потребителей. Существует два варианта производства продуктов питания с учетом индивидуальных особенностей. Один из них заключается в использовании большого набора материалов, достаточного для удовлетворения запросов всех потребителей, а другой — в применении небольшого набора материалов, который можно комбинировать в различных пропорциях. Однако стоимость таких продуктов питания относительно высока.

Пищевые свойства 3D-печатных продуктов можно улучшить путем снижения гликемического индекса, регулирования калорийности и повышения содержания растворимой клетчатки, омега-3 жирных кислот и белка. Кроме того, с помощью этих методов возможно обогащать продукт витаминами, микро- и макроэлементами. Персонализация пищевых продуктов позволяет учитывать диетические потребности различных групп потребителей: пациентов с различными заболеваниями, детей, пожилых людей, беременных женщин, спортсменов, лиц, выполняющих тяжелую физическую работу, и т. д.

Технология 3D-печати позволяет создавать пищевые продукты со сложной формой, персонализированными питательными харак-

теристиками, заданными внешним видом, текстурой и сенсорными свойствами [25,55,66]. Она также обеспечивает регулирование консистенции, позволяя производить продукты с пониженным содержанием соли, сахара и жиров [67].

Pereira и соавторы [1] отмечают, что важным фактором приемлемости пищи для потребителей, помимо внешнего вида и вкуса, является текстура. Пожилые люди и люди с дисфагией чаще страдают от недоедания из-за визуальной и текстурной непривлекательности пищи. Однако в литературе, посвященной 3D-печати пищевых продуктов, практически не уделяется внимания адаптации пищевых привычек и поведения, необходимой для широкого внедрения таких продуктов у пациентов с нарушениями глотания, подверженных риску недоедания, аспирационной пневмонии или удушья [68]. Диеты с модифицированной текстурой, включающие загущенные жидкости и пюре, помогают пациентам с дисфагией, вызванной инсультом, онкологическими заболеваниями или нервно-мышечными расстройствами, предотвращать аспирационную пневмонию и улучшать качество питания [69]. Пациенты с дисфагией часто потребляют недостаточно калорий, так как модификация текстуры пищи включает разбавление водой или другими жидкостями, что снижает калорийность смеси [70].

Систематизация данных научных исследований показала целесообразность внесения пробиотических бактерий, продуцирующих антимикробные вещества и оказывающих благотворное влияние на состояние иммунитета человека, в смеси для печати продуктов питания. Учитывая термическое воздействие при 3D-печати, необходимо обеспечить максимально возможную выживаемость пробиотических бактерий. Рядом исследователей была оценена выживаемость бактерий *Lactobacillus plantarum*, цианобактерий *Nostoc sphaeroides* в смесях на основе картофельного крахмала, *Bifidobacterium animalis* при введении в картофельное пюре при 3D-печати. Для бактерий *Lactobacillus plantarum* показано, что в диапазоне температур от 145 °C до 205 °C концентрация бактерий не изменялась, в то же время при выпекании при 145 °C в течение 6 мин концентрация бактерий составляла больше 10⁶ КОЕ/г. При гидратации цианобактерий *Nostoc sphaeroides* в смесях на основе картофельного крахмала качество создаваемых продуктов значительно повышается. При экструзии смеси из картофельного пюре с *Bifidobacterium animalis* с использованием самого маленького диаметра (0,6 мм) сопла 3D-принтера концентрация бактерий уменьшалась очень незначительно. Однако при нагревании в течение 45 мин при температуре 55 °C концентрация бактерий *Bifidobacterium animalis* существенно снижалась [71].

Итальянские ученые исследовали возможности использования технологии 3D-печати для разработки персонализированных формул питания, в частности, для создания 3D-закусок (снеки), обеспечивающих суточную калорийность 5–10 % и обогащенных кальцием, железом и витамином D, для детей от 3 до 10 лет [72]. В состав продукта входят свежие бананы (*Musa acuminata* Colla) сорта *Dwarf Cavendish*, сушеные грибы (*Boletus edulis*), консервированная белая фасоль, сухое обезжиренное молоко и лимонный сок, а также пектиновый порошок E440. В качестве антиоксиданта использовали аскорбиновую кислоту. Было изучено влияние двух переменных печати на качество напечатанных снеков: 1) скорость печати (мм/с), определяющая скорость осаждения материала; 2) уровень текучести (%), который указывает на количество материала, выдавленного во время печати. Расход на 70 % означает снижение на 30 % количества шагов двигателя на миллиметр экструзии филамента по сравнению с условиями печати по умолчанию, предложенными производителем. И наоборот, расход в 130 % означает увеличение количества шагов двигателя на 30, что соответствует увеличению скорости осаждения материала на 30 %. В ходе экспериментов использовались три различных уровня для обеих переменных печати: скорость печати 30 мм/с, 50 мм/с и 70 мм/с; расход 70 %, 100 % и 130 %.

При печати при более низком уровне текучести потока пищевой смеси внутренняя структура снеков была неравномерной, с прерывистыми нитями продукта и чрезмерной пористостью. С другой стороны, при повышении уровня текучести потока увеличивалась толщина внутренней структуры образцов, поскольку нити продукта сливаются друг с другом. Это приводило к уменьшению пористости снеков и к увеличению размеров и общего объема. На скорость роста массы продукта влияли как скорость печати, так и уровень потока, достигающие максимальной скорости 0,00362 г/с при потоке 130 % и скорости печати 70 мм/с. Эти исследования доказали возможность получения инновационных продуктов питания желаемой формы и размера, в том числе персонализированной формулы питания [72].

В будущем технологии микрокапсулирования и 3D-печати позволят повышать питательную ценность продуктов для пациентов

с дисфагией за счет включения в рецептуру антиоксидантов, а также биоактивных гидрофобных веществ — токоферолов и полифенолов [73]. Это поможет повысить их биодоступность и минимизировать чувствительность к температуре, pH и окислению [69].

Pant и соавторы [74] разработали новую форму персонализированных продуктов питания, напечатанных на 3D-принтере, из свежих овощей: бок-чоя (китайская черешковая капуста), зеленого горошка и моркови с добавлением гидроколлоидов (ксантановая камедь, каппа-каррагинан и камедь рожкового дерева), которые сохраняют питательные вещества, обеспечивают формирование необходимой текстуры и улучшают привлекательную форму продукта.

Qiu и соавторы [75] оценили применимость камеди льняного семени (0–1,5 %) как текстуромодифицирующего средства для приготовления продуктов для пациентов с дисфагией на основе белка бобов мунг и порошка розы. Чернила, содержащие 0,3–1,2 % камеди льняного семени, имели однородную текстуру, лучшую вязкость, модуль упругости и предел текучести, чем смесь бобов и порошка розы. Дальнейшее увеличение содержания камеди льняного семени до 1,5 % усилило несовместимость между измельченными бобами мунг и камедью льняного семени, приведя к разделению их по микрофазам, что ухудшило качество печати и стабильность отпечатанных форм. Пищевые чернила с содержанием камеди льняного семени 0,9 % легко глотаются и обеспечивают наилучшие характеристики печати, а также не препятствуют перевариванию смеси *in vitro*.

Yun и соавторы [76] разработали пищевые чернила для 3D-печати на основе порошка моллюска морского ушка (галиотиса), соевого белка и желатина, обеспечивающие текстуру, которая соответствует требованиям к продуктам для пожилых людей. Повышение пригодности для печати при изготовлении каркасных структур из белков морского ушка было достигнуто за счет добавления желатинизированного крахмала в различных концентрациях (0, 1, 3, 5 и 7 %). Добавление крахмала в количестве 3 % показало наиболее оптимальное разрастание 3D-печати [76].

Чтобы увеличить разнообразие пищевых продуктов на основе животного белка, доступных для пациентов с дисфагией и трудностями при жевании и глотании, разработан продукт из свинины с модифицированной текстурой, напечатанный на 3D-принтере [77]. Свиную ногу варили при 150 °C в воде в течение 65 минут, измельчали, а затем получали печатную мясную пасту с добавлением поваренной соли, дистиллированной воды, гуаровой камеди и/или ксантановой камеди. Контрольные образцы были разработаны без добавления гидроколлоидов. Различий в стабильности среди образцов, содержащих гидроколлоиды, не наблюдалось, однако, по сравнению с контрольными образцами, образцы, содержащие гидроколлоиды, обладали более высокой вязкостью, что свидетельствует об улучшении стабильности пищевой матрицы. Текстура напечатанных образцов, обработанных по-разному (охлажденных до 37 °C, замороженных при минус 18 °C или нагретых при 100 °C в течение 7 минут), показала существенные различия. Образцы, содержащие гидроколлоиды, по отдельности или в сочетании показали более низкую твердость и когезивность, чем контрольный образец после нагревания. Отмеченные текстурные изменения связаны с формированием менее плотной матрицы продукта с увеличенными неоднородными полостями в результате дополнительной задержки воды при добавлении гидроколлоидов. Разработанный мясной продукт был отнесен к категории потенциальных переходных продуктов питания в рамках Международной инициативы по стандартизации рациона питания при дисфагии (IDDSI) [77].

Учитывая важность пищевых волокон для здоровья кишечника, Lille и соавторы [78] разработали напечатанную на 3D-принтере пищевую закуску, богатую клетчаткой и белком. Было использовано сухое молоко с содержанием 27 % белка, 41 % углеводов, 25 % жира и цельнозерновой ржаной муки, состоящей из 10 % белка, 57 % углеводов, 2,3 % жира и 20 % пищевых волокон. Пищевые чернила на основе сухого молока и ржаной муки в соотношениях 1:0, 1:1, 1:3, 3:1 и 0:1 использовали для 3D-печати сетчатых конструкций с последующим выпеканием при 150 °C. Печать выполнялась при температуре окружающей среды на 3D-принтере Foodini (Natural Machines Inc., США) с применением капсулы для печати с соплом диаметром 1,5 мм. Напечатанный узор представлял собой решетчатую структуру из ячеек (5 × 3) с внешними размерами около 67 × 40 мм. Предел текучести сетчатой структуры, определяющий начало ее разрушения и течения, варьировался от 10 до 60 Па. Паста на основе ржаной муки имела наименьший предел текучести, а паста с составом 25 % ржаной муки и 75 % сухого молока — наибольший. Испытания пищевых чернил с различными соотношениями сухого молока и ржаной муки показали, что все рецептуры были пригодными для 3D-печати

и способствовали стабильности формы после печати. Однако, несмотря на это, при выпечке образцов при температуре 150 °C чернила с высоким содержанием сухого молока значительно расширились, что приводило к разрушению напечатанной формы. Данный дефект может быть устранен за счет включения в рецептуру ржаной муки. Сухое молоко придавало объем и блеск поверхности («глянцевость») выпекаемым образцам, в то время как ржаная мука, по-видимому, повышала стабильность и прочность выпечки. Тем не менее концепция создания персонализированных продуктов питания с помощью 3D-печати все еще находится на ранней стадии разработки, и необходимо проделать дополнительную работу для преодоления технологических трудностей [78].

Mirazimi и соавторы [79] оценили реологические и текстурные измерения картофельного пюре, предназначенного для пациентов с дисфагией, при добавлении соевого белка и агара. Рецептуры обогащенных картофельных пюре были получены путем добавления соевого белка (3 %, 5 % и 7 %) и агара (до 0,2 %). Исследованиями установлено, что реологические свойства пюре на основе крахмала улучшаются при добавлении агара в низких концентрациях. Кроме того, механическая прочность улучшается с добавлением агара благодаря его сильным водородным связям и образованию гидрофобных агрегатов. Добавление соевого белка приводило к сильным изменениям в текстуре и питательной ценности составов.

Специалисты Института мясо-молочной промышленности республики Беларусь [80,81] разработали специальные смеси для пищевого 3D-принтера, содержащие натуральное мясное сырье без применения красителей, консервантов и стабилизаторов. Использование аддитивных технологий в мясоперерабатывающей промышленности и сегменте HoReCa позволяет создавать натуральные уникальные высококачественные 3D-продукты (полуфабрикаты и кулинарные изделия) с учетом индивидуальных физиологических потребностей потребителя. Это способствует развитию персонализированного, лечебно-профилактического и диетического, спортивного, детского, геродиетического питания, оказывает положительное влияние на укрепление здоровья нации и обеспечивает повышение конкурентоспособности пищевой промышленности Республики Беларусь [81].

В своем выступлении в Московском государственном университете пищевых производств директор ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН Оксана Кузнецова отметила: «Биопринтинг имеет особую прикладную ценность в специализированном питании. По этой технологии можно создать продукт, необходимый человеку по состоянию здоровья, причем «напечатанная» пища будет не протеиновой обогащенной смесью, а едой, очень похожей на привычную. Разумеется, такой продукт не заменит традиционный, но станет хорошим дополнением к рациону»²⁶.

6. Методы оценки эффективности 3D-печати пищевых продуктов

С развитием технологии 3D-печати разрабатывается и внедряется все больше технологий инженерной оценки биоматериалов, так как характеристики материала имеют решающее значение для процесса 3D-печати. Например, реологические свойства материала могут быть определены с помощью реотестов, свойства текстуры — с помощью анализатора текстуры, свойства порошков — сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) и рентгенографией и т. д. [21].

В основе явления ядерного магнитного резонанса (ЯМР) лежат магнитные свойства атомных ядер с ненулевым спином. ЯМР широко используется в пищевой промышленности, например, для мониторинга распределения и миграции молекул воды при сушке пищевых продуктов [82,83], для оценки влияния состояния гидратации мясного белка на подвижность воды и жира в мясных фаршах [84]. В настоящее время метод низкочастотного ядерного магнитного резонанса (НП-ЯМР/LF-NMR) используется в качестве метода анализа реологических свойств и текстуры при 3D-печати пищевых продуктов, поскольку наличие воды в пищевом сырье и продуктах является важным свойством, определяющим их реологические характеристики [21].

Liu и соавторы представили метод, основанный на использовании низкочастотного ядерного магнитного резонанса (НП-ЯМР), для быстрого прогнозирования характеристик 3D-печати картофельного пюре, который позволяет оценить пригодность для печати конкретных материалов без проведения длительных экспериментов с печатью образцов [85]. Авторы провели исследования, включающие:

²⁶ Ученые и аспиранты МГУПП экспериментируют с биопринтингом. Retrieved from <https://meat-expert.ru/news/12348-uchenye-i-aspiranty-mguppekperimentiruyut-s-bioprintingom?ysclid=m7lvfb5f2606975619>. Accessed February 20, 2025.

(1) определение реологических свойств для 3D-печати картофельного пюре с различными рецептурами; (2) корреляционный анализ реологических свойств и оценку эффективности печати с помощью анализа основных компонентов (PCA); (3) определение возможности использования реологических свойств для оценки эффективности 3D-печати с помощью дискриминантного анализа Фишера; (4) установление корреляции между параметрами НП-ЯМР и реологическими свойствами картофельного пюре [85].

Была предложена технология НЧ-ЯМР для точной оценки влияния предварительной микроволновой обработки на реологические свойства теста и эффективность 3D-печати, учитывая, что микроволновая обработка ведет к желатинизации крахмала в тесте и к изменению распределения воды в нем. Корреляционный анализ Пирсона показал, что реологические параметры теста и параметры НП-ЯМР были взаимосвязаны. На основе исследований была разработана прогнозная модель с точностью более 90%. Модель базируется на НП-ЯМР и частичной регрессии методом наименьших квадратов для быстрого определения эффективности печати [21].

Phuhongsung и соавторы [86] также установили значительную корреляцию реологических свойств гелей соевого белка, содержащих (или не содержащих) ксантановую камедь или раствор NaCl в различных концентрациях, с параметрами низкочастотной ЯМР-спектроскопии. Эти параметры позволяют прогнозировать пригодность гелей для 3D-печати.

Проведены сравнительные исследования эффективности НП-ЯМР и диэлектрической спектроскопии при прогнозировании реологических свойств и возможности 3D-печати гелей сурими. Анализ потенциала низкочастотного ядерного магнитного резонанса и диэлектрических характеристик (на частотах 915 и 2450 МГц) для прогнозирования реологических свойств и оценки печатной пригодности гелей сурими с различными концентрациями растворов NaCl показал, что применение дискриминантного анализа НП-ЯМР обеспечивает более высокую точность классификации характеристик печати, а модели регрессии по методу частичных наименьших квадратов, использующие НП-ЯМР для прогнозирования основных реологических свойств, имели лучшую прогностическую точность и надежность [87].

Еще один способ оценки эффективности 3D-печати пищевых материалов осуществляется с помощью компьютерного моделирования на основе вычислительной гидродинамики (CFD) [21]. Этот метод, широко применяемый в пищевой промышленности для моделирования процессов сушки, охлаждения, стерилизации, выпечки и смешивания, задействует физические, математические и численные подходы для анализа потоковых процессов.

CFD позволяет прогнозировать в пищевой промышленности не только поведение потоков жидкостей, но и химические реакции, механические перемещения, фазовые переходы, тепло- и массообмен. Для описания реологических свойств применяются дифференциальные уравнения переноса Навье-Стокса, учитывающие массу, импульс и энергию жидкости, а также уравнения состояния плотности [21]. Исследования по применению CFD сосредоточены на численном моделировании процесса экструзии пищевых продуктов для понимания характеристик течения жидкости внутри экструдера. Поскольку процесс экструзии используется в 3D-печати пищевых продуктов, особенно в технике экструзионной печати, предположено, что CFD может быть применен для прогнозирования и оценки характеристик материалов при 3D-печати пищевых продуктов [21].

Guo и соавторы [88] сравнили два метода 3D-печати пищевых продуктов на основе экструзии с использованием шнека и шприца. Оценка проводилась по характеристикам потока жидкости и профилю печати с помощью CFD и экспериментальной печати. Компьютерная имитационная модель показала, что зависимости характеристик текучести материала по профилю скорости сдвига и распределению давления в шприцевых принтерах во время экструзии были более простыми, их можно было легко настроить. В то же время характеристики течения материала в шнековых принтерах во время экструзии были относительно сложными, с обратным течением жидкости во внутренней полости. Более того, экспериментальная 3D-печать показала, что шнековые 3D-принтеры не подходят для экструзии пищевых чернил с высокой вязкостью. Таким образом, определено, что CFD обладает потенциалом для прогнозирования характеристик пищевых материалов при 3D-печати пищевых продуктов [88].

Используя технологию компьютерного моделирования вычислительной гидродинамики, Guo и соавторы [88] также разработали точный, простой и быстрый метод оценки пригодности материалов для 3D-печати пищевых продуктов на основе экструзии. Гели из выбранных зерновых культур (черный рис, семена бусенника

(Иовлевы слезы), бобы мунг, коричневый рис и гречневая крупа) были протестированы в качестве потенциальных материалов для 3D-печати. Моделирование CFD проводилось с использованием модели Берда-Карро (Bird-Carrageau), поскольку тестируемые зерновые гели представляли собой неньютоновскую жидкость. Для описания динамических реологических свойств системы была задействована модель, позволяющая получить более реалистичные результаты моделирования. Затем эти динамические параметры были применены для моделирования. Наконец, смоделированное значение распределения давления может быть использовано для оценки экструдимости материала. Чем выше значение моделируемого давления, тем сложнее экструдировать материал, что было доказано экспериментальными результатами. Смоделированное требуемое давление на поршне для печати испытанных гелей было самым высоким для геля бобов мунг и снижалось в порядке убывания для гелей из коричневого риса, гречихи, черного риса и семян бусенника (Иовлевы слезы). Эти результаты согласуются с результатами моделирования минимального напряжения потока и с результатами экспериментов по печати, подтверждая, что смоделированное давление поршня может быть использовано для оценки и прогнозирования простоты 3D-печати материала [89].

Для оценки эффективности 3D-печати пищевых продуктов используются и другие методы компьютерного моделирования.

Yang и соавторы исследовали влияние различных видов крахмала на эффективность печати геля с лимонным соком. Было смоделировано влияние различных свойств гелей и параметров процесса (вязкость исследуемого материала, время релаксации, объемный расход на входе и диаметр сопла) на изменение профиля скорости, сдвига и давления в проточном канале 3D-принтера с помощью программного обеспечения POLYFLOW. Данное ПО, основанное на методе конечных элементов (МКЭ), обладает мощными функциями для моделирования течения неньютоновских жидкостей и нелинейных потоков [90].

Целью исследования Jonkers и др. [91] являлось получение конститутивной модели, описывающей поведение материала в условиях большой деформации продуктов на основе крахмала, напечатанных на 3D-принтере. Чтобы количественно оценить различные аспекты механического поведения, проводится ряд экспериментов. Экспериментальная процедура, основанная на испытаниях на сжатие, позволяет оценивать внутренние механические свойства продуктов, напечатанных на 3D-принтере, и моделирует процессы их разрушения. 3D-модель структуры образцов учитывает высокую нелинейность, неупругую деформацию и деформационное поведение исследуемого материала. Важным ограничением представленной модели (учитывая процесс послойного производства продукта) является то, что свойства материала считаются изотропными. Модель реализована в рамках конечных элементов для идентификации параметров материала с учетом условий эксперимента. В этом исследовании методом конечных элементов на уровне образца учитывается влияние геометрии на механическую реакцию при приложении деформационного воздействия, включая деформацию до достижения напряжения разрушения [91].

Качество готовых напечатанных 3D-продуктов можно контролировать по точности соблюдения формы и размера, которая определяется степенью приближения напечатанной и сохраняемой формы продукта к заданной 3D-модели. Nijdam и соавторы [92] исследовали факторы, влияющие на стабильность размеров 3D-печати пищевых структур. Они также рассмотрели возможность создания метода быстрого скрининга потенциальных пищевых чернил с использованием реологического теста для оценки их пригодности для 3D-печати. Ими предположено, что точность и стабильность структуры зависит от трех факторов [92]:

- рабочие параметры 3D-принтера, включая точность калибровки смещения, степень люфта систем моторного привода, а также способность принтера оказывать силу или давление, необходимые для выдавливания пищевых чернил заданной вязкости с желаемой скоростью потока;
- качество филамента (нити накала) — пластиковой нити, которая используется в 3D-принтерах для создания объектов методом послойного нанесения. Стабильность печатной структуры зависит от скорости сопла экструдера при его движении по поверхности печати относительно скорости выдавливания пищевых чернил из сопла;
- стабильность размеров, что зависит от того, обладают ли пищевые чернила механической жесткостью, чтобы противостоять гравитационной силе, которая деформирует формующую нить после экструзии и пищевую структуру во время и после печати.

С использованием метода размерного анализа и натурального эксперимента была исследована деформация цилиндров вязкоупругих пищевых чернил при размещении на плоской поверхности, деформирующихся под действием собственного веса. Представлен способ испытания пищевых чернил на предмет их способности формировать 3D-структуры достаточной жесткости. Для характеристики жесткости использовались модуль накопления и коэффициент демпфирования, полученные из амплитудной развертки при измерениях колебательного сдвига образцов цилиндров исследуемых пищевых чернил. Модуль накопления представлен безразмерным числом, выражающим отношение силы деформации от веса пищевой структуры к силе, противодействующей деформации за счет жесткости пищевых чернил. Это безразмерное число и коэффициент демпфирования образуют оси графика, которые формируют окно размерной стабильности. Оно основано на критерии, согласно которому пищевая структура должна деформироваться не более чем на 5 % в течение часа, чтобы считаться размерно-стабильной. Окно размерной стабильности позволяет подбирать пищевые чернила с оптимальной жесткостью, а также на основе реологических свойств чернил определять высоту структуры, обеспечивающую размерную стабильность 3D-продукта.

Оценить эффективность печати пищевых материалов при различных параметрах печати непросто из-за их сложного состава и изменчивых свойств. Различные типы гелей на водной основе можно рассматривать как простые эталонные модели для пищевых продуктов [21].

Так, был разработан метод систематической оценки качества печати пищевых продуктов с использованием гидроколлоидов как эталонного материала. На основе результатов оценки проведена классификация пищевых продуктов, которая может служить стандартом для выбора сырья для 3D-печати. Система классификации пригодности пищевых материалов для печати включает классы А, В, С и D, определенные по стабильности размеров и степени обработки. В качестве эталонного материала была использована метилцеллюлоза, и для проверки результатов моделирования были выбраны 12 видов пищевых продуктов с различными реологическими свойствами. Результаты экспериментов показали, что выбранные эталонные материалы могут полностью имитировать поведение при деформации и характеристики обработки реальных пищевых продуктов, а эффективность 3D-печати пищевых продуктов может быть оценена путем непосредственного сравнения с характеристиками эталонного материала [93].

Аналогичный подход был предложен Хи и соавторами в качестве эталонных модельных соединений использовался низкомолекулярный препарат индометацин. Препараты, смешанные с полимерами с различной растворимостью, использовались в качестве материалов для 3D-печати на основе экструзии. Анализ взаимосвязи механических и печатных свойств экструдированных нитей, а также определение их реологических параметров позволили разработать метод количественной оценки и прогнозирования печатных свойств нитей для 3D-печати методом плавного осаждения [94].

Российскими учеными [95] предложен алгоритм автоматизированного контроля технологического процесса 3D-печати шоколадной массой. В качестве главного датчика предложено использование системы технического зрения, задача которой заключается в анализе и оценке состояния верхнего слоя печати. По результатам оценки верхнего слоя печати шоколада происходит управление скоростью нанесения материала следующего слоя.

Учитывая разнообразие пищевого сырья и сложность его состава, функционально-технологических, структурно-механических свойств и др. характеристик, необходимо разработать более совершенную технологию оценки их пригодности для 3D-печати пищевых продуктов, а результаты оценки могут быть использованы в качестве основы для выбора материалов или корректировки рецептуры продукта. Традиционные методы оценки часто не могут в полной мере отражать характеристики пищевых материалов. Методы оценки материалов для 3D-печати должны быть стандартизированы, чтобы соответствовать требованиям для оценки различных материалов, особенно с учетом того, что в процессе 3D-печати существует множество факторов, влияющих на характеристики материала, такие как температура, скорость, усилие сдвига и т. д. [21].

7. Преимущества и ограничения при 3D-печати продуктов питания

У каждой технологии есть свои плюсы и минусы, и 3D-печать продуктов питания не является исключением [96].

3D-печать продуктов питания представляет собой значительный шаг вперед в области пищевых технологий.

Наиболее важным преимуществом технологии 3D-печати является возможность индивидуального проектирования продуктов питания, как по форме, так и по содержанию питательных веществ. При этом расширяется потенциал персонализации, что дает возможность беспрецедентно настраивать форму, текстуру и питательную ценность продуктов. Это позволяет создавать персонализированные диеты, которые могут принести пользу здоровью и в то же время снизить спрос на продукты с высокой степенью переработки, способствуя продовольственной устойчивости [2].

Технология 3D-печати позволяет точно контролировать рацион питания и обеспечивать удовлетворение потребностей и предпочтений потребителей, страдающих пищевой непереносимостью. Даже пищевые ингредиенты с известными свойствами требуют адаптации к конкретным рецептурам с учетом технологических процессов производства. Еще одно преимущество 3D-печати продуктов питания заключается в упрощении, гибкости и сокращении цепочек поставок. Также есть возможность использовать альтернативные материалы, такие как грибы и водоросли, которые богаты питательными веществами, но не поддаются обработке традиционными методами. Кроме того, пищевые 3D-принтеры позволяют создавать художественные блюда в высокой кухне и способствуют массовой кастомизации в промышленном кулинарном секторе [97].

Несмотря на многообещающий потенциал 3D-печати продуктов питания, существует ряд проблем, препятствующих ее широкому внедрению, в частности из-за ограниченной доступности подходящих для использования материалов [1].

Пищевые материалы, используемые для 3D-печати на основе экструзии, можно разделить на три категории [17]. Во-первых, это материалы, пригодные для печати, такие как шоколад, сыр и глазурь для тортов, которые обладают отличными печатными свойствами и плавно выдавливаются во время печати. Во-вторых — традиционные пищевые материалы, такие как овощи, мясо, яйца, рыба и фрукты, которые не поддаются печати по своей природе и требуют предварительной обработки для улучшения их пригодности к печати для гладкой экструзии во время печати. Эти материалы являются основными блюдами и употребляются ежедневно. И третья группа — альтернативные ингредиенты, которые включают в себя новые источники белка и клетчатки, такие как морские водоросли (морская капуста, нори или вакаме), микроводоросли (пресноводные и морские микроорганизмы, состоящие из одной клетки), насекомые и грибы, которые являются устойчивой заменой основным продуктам питания [1].

Использование каждой из указанных выше категорий продуктов для 3D-печати создает проблемы и возможности в достижении необходимых реологических свойств смесей и в подборе ассортимента пригодных продуктов. Требуется комплекс исследований для разработки оптимальных режимов печати. Кроме того, одной из ключевых проблем является сложность контроля вкуса, текстуры и цвета печатной продукции.

В настоящее время большинство пищевых ингредиентов необходимо хранить в сухом виде и преобразовать в пасту перед печатью, а процесс печати пищевых материалов намного сложнее с технической точки зрения, чем печать пластика или металлов. Кроме того, следует отметить дороговизну пищевых 3D-принтеров.

Еще одна проблема, стоящая перед коммерческой 3D-печатью продуктов питания, — это эффективность производства. Медленная скорость 3D-печати может замедлить массовое производство. Скорость печати или диаметр сопла могут быть увеличены, но при частом выполнении операции разрешение и точность печати могут снизиться. Поэтому этот вариант следует использовать только в том случае, если можно сохранить точность печати. В качестве альтернативы исследователи предложили использовать адаптивные алгоритмы для ускорения печати за счет регулировки параметров печати, которые уравнивают время печати и ее качество. Производство нескольких изделий одновременно с помощью принтера с несколькими соплами — еще одна возможная стратегия повышения эффективности 3D-печати. В настоящее время эта функция недоступна в промышленных принтерах, и нелегко создать доступные и надежные принтеры, которые могут быстро и качественно производить продукцию [98].

Еще одним из ограничений для массовой 3D-печати является размер предметов, которые могут быть изготовлены. Размер печатаемого объекта определяется размерами принтера и печатного стола и часто ограничивается стоимостью, пространством производственного помещения и требованиями к мощности. Кроме того, печать продукта большого размера может занять больше времени и потребовать больше материала, что увеличивает затраты и вероятность

появления неточностей в соблюдении размера и формы. Некоторые 3D-принтеры позволяют печатать большое количество предметов по частям, а затем собирать их, но это может поставить под угрозу сохранение структуры и эстетики готового изделия [99].

Важным препятствием для внедрения этих технологий является ограниченное регулирование и изучение рисков безопасности, связанных с 3D-печатью. Технические проблемы 3D-печати пищевых продуктов и безопасность 3D-печатных продуктов были упомянуты во многих обзорных исследованиях [2,69,100–102]. Исследования показывают, что необходимо проведение дополнительных работ, направленных на определение способов минимизации потенциальных опасностей. Последние не ограничиваются образованием теплогенерирующих соединений, микробиологическими и физическими рисками, которые могут представлять угрозу для здоровья людей и приводить к возникновению опасных техногенных инцидентов [5]. Кроме того, интенсификация автоматизации, связанная с 3D-печатью продуктов питания, может оказать влияние на традиционный труд в пищевой промышленности, создавая социальные и экономические проблемы [2].

Поскольку большинство напечатанных на 3D-принтере пищевых продуктов являются пастами, срок их годности достаточно ограничен. Например, реологические свойства теста, подготовленного для 3D-печати, начинают изменяться через 2 часа после его изготовления. Большинство процессов 3D-печати продуктов питания включают нагрев в процессе экструзии и охлаждение после осаждения. Процессы нагрева и охлаждения или повторного нагрева могут способствовать росту микроорганизмов и влиять на безопасность пищевых продуктов. Кроме того, существует прямой контакт между рабочими частями принтера (например, соплами, лотками) и сырьем для приготовления пищевого продукта. Severini и др. [103] в исследовании морфологических и микроструктурных свойств фруктовых и овощных смузи, полученных технологией 3D-печати, обнаружили присутствие психрофильных, мезофильных и дрожжевых микроорганизмов концентрацией 4,27, 5,02 и 4,23 log КОЕ/г соответственно. Эти высокие значения подразумевают, что контактное взаимодействие между пищевыми чернилами и рабочими механизмами принтера в процессе 3D-печати увеличивает микробное загрязнение. Также ряд исследований показал, что большинство настольных принтеров сделаны из пластика и могут выделять его ультратонкие частицы. Такие токсичные частицы могут выделяться в процессе печати и вызывать неблагоприятные последствия для здоровья. Большинство исследователей считают, что проблемы безопасности 3D-печатных продуктов питания будут преодолены. Тем не менее, опасения по поводу безопасности 3D-печатных продуктов питания могут замедлить развитие этой технологии. Кроме того, в настоящее время отсутствуют национальные, региональные или международные обязательные стандарты специально для 3D-печатных продуктов питания, что может привести к тому, что напечатанные на 3D-принтере продукты не будут использоваться в диетотерапии [69].

Очередная угроза для развития 3D-печати — быстрый прогресс в других областях пищевых технологий: на рынке могут появиться более эффективные или привлекательные альтернативы, особенно с учетом низкой доступности 3D-биопечати для малого бизнеса [2].

8. Восприятие потребителями и приемлемость пищевых продуктов, напечатанных на 3D-принтере

Приемлемость продуктов, напечатанных на 3D-принтере, до сих пор остается проблемной. Исследование, проведенное Lupton и соавторами [104], показало обеспокоенность значительного числа австралийских участников (всего было опрошено 30 человек) возможностью появления «напечатанных» продуктов. Во-первых, по мнению респондентов, пища, напечатанная на 3D-принтере, может быть несъедобной, небезопасной или ненатуральной. Во-вторых, технология трансформирует понятие пищи, вводя новые методы приготовления и обработки съедобных ингредиентов. Все участники дискуссии ассоциировали термин «принтер» с непищевой промышленностью.

Исследование среди 1045 ирландцев об отношении потребителей к использованию технологий 3D-печати продуктов питания [105] установило, что принятие или неприятие продуктов, напечатанных на 3D-принтере, зависит от: 1) предоставленной первоначальной информации, т. е. первого впечатления; 2) хорошо продуманной коммуникации. Неофобия пищевых технологий препятствует принятию 3D-печатных пищевых продуктов и готовности потребителей их пробовать.

Результаты онлайн-опроса австралийской дискуссионной группы [106], направленного на обсуждение отношения к новой технологии — 3D-печати пищевых продуктов, показали, что участники

признают потенциальную пользу для общества печатных продуктов питания на основе насекомых и культивируемого мяса. Однако их приоритеты в выборе продуктов питания больше сосредоточены на традиционных, натуральных, «здоровых» и вкусных. Лишь немногие участники выразили заинтересованность или поддержку идеи употребления напечатанных на 3D-принтере пищевых продуктов, изготовленных из культивируемого мяса или насекомых. Большинство выразило свое беспокойство по поводу степени переработки культивируемого мяса, а также антипатию к идее употребления в пищу печатной продукции, содержащей насекомых.

В работе [107] опубликовано исследование о восприятии потребителями продуктов, напечатанных на 3D-принтере. На основании результатов опроса было сформировано три кластера. Кластер № 1 ($n = 140$) — с ярко выраженным интересом, кластер № 2 ($n = 98$) — с умеренным интересом, кластер № 3 ($n = 91$) без интереса. Участники первого кластера проявляли интерес к 3D-печатным пищевым продуктам, считая, что технология снизит стоимость продуктов питания и принесет пользу в будущем. Участники второго кластера выражали готовность пробовать такие продукты, тогда как третий кластер считал их неприемлемыми и небезопасными для потребления.

В исследованиях, рассматривающих отношение потребителей и специалистов с опытом работы в области питания и разработки продуктов питания к 3D-печатным продуктам, отмечено, что опрошенные были обеспокоены питательными качествами 3D-печатных продуктов питания и считали, что технология 3D-печати продуктов питания может нарушить первоначальную пищевую ценность продуктов [1], так как отмечено, что процессы, связанные с 3D-печатью продуктов питания и постобработкой (приготовление на пару, выпечкой и другие виды тепловой обработки) 3D-печатной пищи, могут повлиять на пищевую ценность [108]. Во время печати и последующей обработки происходят многие химические реакции и физические изменения (такие как денатурация белка, желатинизация и фрагментация крахмала, а также уменьшение влажности, усушка), которые могут повлиять на пищевую ценность конечного продукта [108,109]. Martínez-Monzó и соавторы [108] сравнили концентрацию ацетата витамина Е в арахисовом масле до и после 3D-печати, а также после 3D-печати и термической постобработки, и показали, что процесс экструзии при 3D-печати способствовал небольшому снижению ацетата витамина Е, но термическая обработка привела к значительному снижению концентрации ацетата витамина Е.

Технологии предварительной обработки (дробление, гелеобразование) пищевого материала, предназначенного для печати на 3D-принтере, могут изменить пищевую структуру и исказить пищевую матрицу [110]. Потеря естественного матрикса в результате переработки может повлиять на высвобождение, трансформацию и последующую абсорбцию определенных питательных веществ в желудочно-кишечном тракте [111].

Работа [112] посвящена причинам возникновения страха перед использованием инноваций в пищевой промышленности, в том числе и перед внедрением 3D-технологий. Автор отмечает, что использование 3D-печати в пищевой промышленности — это переход к цифровой трансформации пищевых систем, что вызывает беспокойство потребителей. На основании анализа публикаций по теме 3D-печати пищевых продуктов автор делает вывод, что принятие инновационных технологий зависит от осведомленности людей об используемой технологии и ее преимуществах.

9. Вклад 3D-печати в достижение «Целей устойчивого развития» (ЦУР)

Технологические, ресурсные и промышленные аспекты 3D-печати продуктов питания имеют потенциал, позволяющий «печатать» продукты питания с высокой степенью индивидуализации, не только по форме, но и по структуре, текстуре, вкусу, питательной ценности, с новыми пищевыми ингредиентами и по специальным рецептурам для разных потребителей. Растущее значение глобальных проблем подталкивает к рассмотрению вопроса о том, может ли способ производства напечатанного продукта и 3D-печати быть устойчивым — и каким образом.

Технология 3D-печати продуктов оказывает достаточное влияние на устойчивое развитие благодаря своей способности достигать некоторых из 17 целей устойчивого развития (ЦУР), включая возможность использования пищевых отходов, развитие системы персонализированного питания и изготовление индивидуальных форм продуктов. Кроме того, развитие данной технологии улучшает имидж пищевой промышленности путем выявления ее текущих проблем и ограничений, а также устойчивого вклада, который способствует созданию пищевых продуктов для профилактики заболеваний.

Alami и соавторы оценили влияние 3D-печати продуктов на успешное достижение девяти ЦУР, а именно ЦУР 1, ЦУР 2, ЦУР 3, ЦУР 7, ЦУР 8, ЦУР 11, ЦУР 12, ЦУР 13, ЦУР 17 из общего числа ЦУР, установленных Организацией Объединенных Наций [5].

ЦУР 1 призывает к искоренению нищеты во всех ее формах к 2030 году. Часть проблем, стоящих перед миром, проистекает из неспособности производить достаточное количество продовольствия для всех групп населения по доступной цене. Ожидается, что в будущем показатель недоедания увеличится в связи с повышением численности населения мира. Alami и соавторы [5] полагают, что 3D-печать продуктов питания может конкурировать с традиционным производством продуктов питания, увеличивая объемы продовольствия для обеспечения населения, особенно насыщая рынок Азиатско-Тихоокеанского региона. Применение 3D-печати значительно снижает затраты на закупку комплектующих и расходных материалов. Это также позволяет проводить менее дорогой и простой ремонт благодаря локализованному и недорогому производству запасных частей [5].

ЦУР 2 направлена на искоренение голода, обеспечение доступа к продовольствию для всех групп населения, на улучшение продовольственного питания и продвижение устойчивых методов ведения сельского хозяйства. Глобальный голод — это проблема, связанная с доступностью продовольствия, изменением климата, стихийными бедствиями и с другими проблемами, которые могут повлиять на поставки и распределение продовольствия. Технология 3D-печати пищевых продуктов может способствовать решению проблемы глобальной продовольственной безопасности: она позволяет использовать альтернативные источники белка, такие как овощи, насекомые и водоросли, снижая зависимость от животных белков [5]. Кроме того, технология поддерживает применение растений с высоким содержанием клетчатки, включая дикорастущие, для создания более здоровых пищевых продуктов.

ЦУР 3. До пандемии COVID-19 был достигнут значительный прогресс в улучшении здоровья многих людей. Тем не менее, по-прежнему существует необходимость в дополнительных усилиях для полной ликвидации распространения болезней и решения всех проблем здравоохранения. Основная цель ЦУР 3 заключается в том, чтобы гарантировать здоровый образ жизни и содействовать благополучию людей всех возрастов. Кроме того, в ЦУР 3 подчеркивается необходимость активизации научных исследований и разработок, увеличения финансирования здравоохранения и расширения возможностей в области снижения и управления рисками для здоровья населения всех стран. 3D-печать продуктов питания имеет потенциал для точного управления рационом питания людей, преобразуя их потребности в питательных и энергетических продуктах в цифровой формат, который затем может быть настроен в зависимости от их физического состояния, уровня здоровья и с учетом конкретных пищевых потребностей. Концепция печати персонализированных продуктов питания способна решить проблемы недоедания и значительно улучшить общее состояние здоровья и самочувствие [5]. 3D-печать продуктов питания позволяет обогащать продукты необходимыми витаминами и минеральными веществами. Она может помочь контролировать размер порций и калорийность, способствуя снижению числа заболеваний, связанных с питанием, таких как ожирение и диабет [2].

ЦУР 7. Основной задачей ЦУР 7 является поддержка доступной, устойчивой и современной энергетики. 3D-печать продуктов питания напрямую связана с ЦУР 7. Снижение требований к вводу и выводу 3D-печати продуктов питания в отраслях с высокой добавленной стоимостью может привести к снижению потребления энергии и к сокращению концентрации углеродного следа в атмосфере. Еще одним преимуществом применения / широкого внедрения 3D-печати является снижение затрат на рабочую силу, так как 3D-производство продуктов питания на сегодняшний день не требует привлечения высокопрофессиональных сотрудников. Усовершенствование принтеров, разумная организация деятельности, оптимизация цепочки поставок и снижение логистических затрат — все это может помочь повысить устойчивость применения 3D-печати [5].

ЦУР 8 направлена на достижение инклюзивного и устойчивого экономического роста, а также на обеспечение возможностей трудоустройства. По прогнозам аналитиков компании Emergen Research, сектор 3D-печати пищевых продуктов значительно вырастет, достигнув стоимости около 342,52 миллиардов долларов к 2027 году²⁷. На мировом рынке 3D-печати продуктов питания в основном доминирует Северная Америка, на долю которой приходится примерно

36 % рынка. За ней следует Европа с 31 % доли рынка, в то время как Азиатско-Тихоокеанский регион занимает 22 % рынка. Кроме того, технология 3D-печати пищевых продуктов позволяет производить альтернативные источники пищи, такие как растительное мясо, блюда из водорослей или насекомых в привлекательных формах и вкусах, способствуя общественному признанию и ее распространению, а также выходу пищевой промышленности на новые рынки. Дальнейшее развитие и совершенствование 3D-технологий продуктов питания потребует привлечения высококвалифицированных сотрудников для полного использования ее потенциала. В результате 3D-печать продуктов питания может значительно изменить бизнес-модели, повлиять на мировую экономику и трансформировать существующие цепочки поставок [5].

ЦУР 11 призывает к устойчивому развитию городов и населенных пунктов. Несмотря на некоторые достижения, достигнутые в рамках проектов «умных городов», города потребляют 80 % ресурсов Земли. В связи с этим использование передовых технологий в городском производстве продуктов питания может повысить эффективность пищевой цепочки в области поставок, переработки и распределения, а также логистики и управления пищевыми отходами за счет использования принципов Четвертой промышленной революции. Технология 3D-печати может преобразовать пищевую промышленность, позволяя потребителям создавать продукты с заданными формой, текстурой, цветом, вкусом и диетическими свойствами [5]. Такая гибкость, соответствующая стандартам экологической безопасности и качества пищевых продуктов, повышает доступность высококачественных готовых блюд для городских жителей.

ЦУР 12. По оценкам экспертов²⁸, во всем мире потери или порча продовольствия составляют около 1,3 миллиарда тонн продовольствия по всей цепочке поставок. Это количество составляет треть от общего объема имеющегося продовольствия. В результате одной из наиболее актуальных мировых проблем является согласование экологических целей с экономическими целями для предотвращения ухудшения состояния окружающей среды. Устойчивые модели потребления и производства способствуют переходу к экологичной и социально инклюзивной глобальной экономике. Для этого необходимы стратегии оптимизации использования ресурсов и снижения экологического воздействия. Эти стратегии предполагают сокращение использования природных ресурсов при одновременной минимизации воздействия экономической деятельности на окружающую среду. ЦУР 12 направлена на обеспечение устойчивых моделей потребления и производства и включает в себя задачи по повышению эффективности использования ресурсов, сокращению отходов и загрязнения, а также поощрению устойчивых практик по всей цепочке поставок [5].

3D-печать способствует эффективному использованию съедобных ингредиентов. Точное количество необходимых ингредиентов рассчитывается 3D-принтером по заранее спланированному рецепту. 3D-печать продуктов питания позволяет производить продукты питания по требованию, снижая потребность в хранении. Эта технология способствует улучшению контроля качества пищи, минимизации отходов за счет эффективного использования ингредиентов и расширению ассортимента персонализированных пищевых продуктов [4].

Трехмерная печать может повысить эффективность использования продуктов питания и сократить пищевые отходы за счет использования деформированных овощей и фруктов, которые не соответствуют критериям продажи, или побочных продуктов животного происхождения для получения более приемлемых для потребителей пищевых продуктов [69].

Технология 3D-печати продуктов питания может предложить творческие решения для повторного использования различных пищевых отходов и побочных продуктов. Эта технология способна превращать эти материалы в полезные и ценные продукты. Это позволяет расширить ассортимент выпускаемой пищевой продукции и, следовательно, может выступить как фактор сокращения голода в мире. Некоторые из этих пищевых отходов включают сырье и продукты, богатые пребиотиками и пищевыми волокнами, которые известны своей пользой для здоровья [113].

Jagdishwaran и соавторы [114] исследовали применение виноградных выжимок и пшеничной дробины — отходов, обычно используемых в кормлении животных, — как ключевых ингредиентов для 3D-печати функционального печенья. Использование виноградных выжимок повышает питательную ценность и антиоксидантные свойства печенья. Печать с использованием сопла диаметром

²⁷ Отчет об анализе размера, доли и тенденций мирового рынка 3D-печати продуктов питания — обзор отрасли и прогноз до 2032 года. Retrieved from <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-3d-food-printing-market> Accessed February 20, 2025.

²⁸ World Health Organization. (2024). Food safety. Retrieved from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>. World Health Organization, Geneva, Switzerland. Accessed February 20, 2025.

1,28 мм, при скорости вращения двигателя экструдера 600 об/мин и скорости печати 400 мм/мин обеспечила оптимальную производительность пищевого 3D-принтера CARK собственной разработки авторов. Напечатанные образцы были подвергнуты последующей обработке при температуре 130 °C в течение 12 минут, и при органолептической оценке наибольшее предпочтение было отдано рецептуре с использованием 6% виноградных выжимок. Разработанный продукт был богат белками, пищевыми волокнами и целым рядом биологически активных компонентов. Такой подход подчеркивает потенциал использования отходов с учетом положительных потребительских предпочтений. Таким образом, аддитивное производство демонстрирует индивидуализацию производства пищевых продуктов с точки зрения их питательной ценности, обеспечивая при этом возможность для более чистых методов производства и для получения дополнительных пищевых ресурсов из побочного сырья пищевой промышленности.

3D-печать может быть использована для создания биоразлагаемой упаковки из сельскохозяйственных пищевых отходов. Например, Nida и соавторы показали, что добавление гуаровой камеди в непечатаемую рисовую шелуху создает напечатанные на 3D-принтере коробки для хранения продуктов [32].

В целом, 3D-печать рассматривается как экологически чистый производственный процесс, который обеспечивает значительные экологические преимущества благодаря трем основным факторам: эффективному использованию ресурсов, эффективному обращению с отходами и регулированию уровня загрязнения. По сравнению с обычными процессами производства продуктов питания, количество пищевых отходов, производимых при 3D-печати продуктов питания, минимально. Это связано с тем, что 3D-принтер рассчитывает и использует точное количество ингредиентов в соответствии с заранее определенным рецептом. Кроме того, 3D-печать продуктов питания обеспечивает воспроизводимость продуктов питания, что означает, что те же ингредиенты могут быть повторно использованы для создания аналогичного пищевого продукта. Таким образом, 3D-печать продуктов питания имеет потенциал для продвижения устойчивого развития в производстве продуктов питания [5].

ЦУР 13 направлена на недопущение повышения глобальной температуры больше чем на 2 °C, что будет иметь серьезные последствия для экосистемы планеты. Метан и закись азота являются основными парниковыми газами, выбрасываемыми в результате животноводства, и считаются наиболее значительными факторами, способствующими изменению климата. По сравнению с традиционными процессами производства продуктов питания, 3D-печать позволяет производить продукты питания без выбросов вредных загрязняющих веществ в окружающую среду. Более того, эта технология значительно изменила цепочку поставок продуктов питания, устранив несколько этапов и повысив ее оперативность, сокращая время и расстояние между спросом и предложением по сравнению с традиционными методами производства и доставки продуктов питания. В результате 3D-печать продуктов питания снижает углеродный след производства продуктов питания [5].

ЦУР 17 направлена на совершенствование путей реализации всей повестки ЦУР и содействие международному сотрудничеству. 3D-печать продуктов питания напрямую способствует достижению ЦУР 17 и выполнению ее задач. Пищевой сектор является хорошо развитой отраслью со значительным глобальным экономическим значением. На его долю приходится более 4 триллионов долларов США в год.

Исследователи отмечают, что потенциал для внедрения инноваций в промышленность путем партнерства с различными сторонами и применения наиболее подходящих методов (т. е. планирования и бизнес-моделей) для коммерциализации новых продуктов может повысить вероятность их выхода на рынок [5].

10. Заключение

Аддитивные технологии, включая 3D-печать, уже начинают трансформировать пищевую промышленность, а в будущем их влияние может стать еще более значительным.

Ключевые аспекты применения аддитивных технологий в настоящее время включают: (1) персонализированное питание: создание продуктов с учетом индивидуальных потребностей (например, печатать протеиновых батончиков с точным составом макронутриентов); (2) фуд-дизайн и презентация блюд: рестораны высокой кухни используют 3D-печать для создания сложных десертов, украшений и нестандартных форм (например, шоколадные фигуры, «напечатанные» суши или паста необычной формы); (3) альтернативные источники белка: печать продуктов из насекомых, растительных заменителей мяса или культивируемых клеток (например, стартапы печатают «мясо» из растительных компонентов); (4) специализированные рационы для космических миссий и военных операций: NASA и ESA исследуют 3D-печать еды для длительных космических миссий (например, печать пиццы на МКС).

В будущем возможны следующие перспективы применения аддитивных технологий: (1) массовая кастомизация продуктов: супермаркеты и фудтех-стартапы смогут предлагать «печать на заказ» с учетом вкусов и диетических ограничений покупателя; (2) устойчивое производство: снижение пищевых отходов за счет точного дозирования ингредиентов; использование местных и альтернативных источников белка (водоросли, грибы, насекомые); (3) автоматизация и роботизация кухонь: 3D-принтеры в сочетании с ИИ смогут готовить сложные блюда автоматически (например, в ресторанах или дома); (4) медицинское питание: печать продуктов для людей с дисфагией (нарушениями глотания) или специфическими медицинскими потребностями.

Потенциал 3D-печати продуктов питания подчеркивается также тем, что она может внести значительный вклад в достижение контрольных показателей устойчивого развития, установленных Организацией Объединенных Наций.

Однако на данном этапе производства существует ряд технологических вызовов: (1) скорость и масштабируемость: 3D-печать еды медленнее традиционного производства; (2) стоимость: оборудование и ингредиенты (например, пищевые чернила) остаются дорогостоящими; (3) регулирование: необходимы стандарты безопасности для новых пищевых технологий, то есть 3D-печать в пищевой промышленности пока находится на раннем этапе, но в перспективе она может революционизировать, сделав производство еды более персонализированным, устойчивым и инновационным.

Таким образом, технология 3D-печати пищевых продуктов позволяет создавать персонализированные продукты, соответствующие индивидуальным диетическим потребностям, для улучшения здоровья. Она также способствует снижению выбросов парниковых газов и поддерживает экологически устойчивое производство.

Систематические исследования и разработки будут иметь решающее значение для преодоления препятствий и для раскрытия всего потенциала 3D-печати в пищевой промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Pereira, T., Barroso, S., Gil, M. M. (2021). Food texture design by 3D printing: A review. *Foods*, 10, Article 320. <https://doi.org/10.3390/foods10020320>
- Millán, M. G. D., de la Torre, M. G. M. V. (2024). 3D food printing: Technological advances, personalization and future challenges in the food industry. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 37, Article 100963. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2024.100963>
- Dictionary Merriam-Webster (2022). Retrieved from <https://www.merriam-webster.com/dictionary/3D%20printing/> Accessed March 27, 2025.
- Rinshana, P. F., Murugesan, B., Kim, Y. H., Alaguthvear, R., Rhim, J.-W. (2025). Advances in 3D food printing technology: Innovation and applications in the food industry. *Food Science and Biotechnology*, 34, 403–421. <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01779-7>
- Alami, A. H., Olabi, A. G., Khuri, S., Aljaghoub, H., Alasad, S., Ramadan, M. et al. (2024). 3D printing in the food industry: Recent progress and role in achieving sustainable development goals. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), Article 102386. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102386>
- Waseema, M., Tahir, A. U., Majeed Y. (2023). Printing the future of food: The physics perspective on 3D food printing. *Food Physics*, 1, Article 100003. <https://doi.org/10.1016/j.foodp.2023.100003>
- Godoi, F. C., Prakash, S., Bhandari, B. R. (2016). 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>
- Ramachandriah, K. (2021) Potential development of sustainable 3d-printed meat analogues: A review. *Sustainability*, 13(2), Article 938. <https://doi.org/10.3390/su13020938>
- Polaris Market Research (2022). 3D Food Printing Market Share, Size, Trends, Industry Analysis Report. Retrieved from <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/3d-food-printing-market> Accessed February 20, 2025.
- Коноваленко, Л. Ю., Мишулов, Н. П., Голубев, И. Г., Никитина, М. А., Бредихин, С. А. (2020). Цифровая трансформация пищевой и перерабатывающей промышленности: анализ. Обзор. Москва: Издательство «Росинформатех», 2020. [Konovalenko, L. Yu., Mishurov, N. P., Golubev, I. G., Nikitina, M. A. (2020). Digital transformation of food and processing industry: An analytical review. Moscow: Rosinfomagrotech, 2020. (In Russian)]
- Hull, Ch. "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography", U. S. Patent 4,575,330, published March 11, 1986.
- Debard, C. "Method and apparatus for producing parts by selective sintering", U. S. Patent 4,863,538, filed October 17, 1986, published September 5, 1989.

13. Feygin, M. "Apparatus and method for forming an integral object from laminations" patent 4,752,352 US № 07/040361 filed April 17, 1987, published June 21, 1988.
14. Crump, S. S. "Apparatus and method for creating three-dimensional objects" patent 5,121,329 US № 07/429012 filed October 30, 1989, published June 9, 1992.
15. Sachs, E., Cima, M., Williams, P., Brancazio, D., Cornie, J. (1992). Three dimensional printing: Rapid tooling and prototypes directly from a CAD model. *Journal of Engineering for Industry*, 114(4), Article 481. <https://doi.org/10.1115/1.2900701>
16. Sachs E., Haggerty J., Cima M., Williams. P. "Three-dimensional printing techniques" patent 5,204,055 US № 07/447677 filed December 8, 1989, published April 20, 1993.
17. Wilson, A., Anukiruthika, T., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2020). Customized shapes for chicken meat-based products: Feasibility study on 3D-printed nuggets. *Food and Bioprocess Technology*, 13(11), 1968–1983. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02537-3>
18. Wilson, A., Anukiruthika, T., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2023). Preparation of fiber-enriched chicken meat constructs using 3D printing. *Journal of Culinary Science and Technology*, 21(1), 127–138. <https://doi.org/10.1080/15428052.2021.1901817>
19. Enfield, R. E., Pandya, J. K., Lu, J., McClements, D. J., Kinchla, A. J. (2022). The future of 3D food printing: Opportunities for space applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(29), 10079–10092. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2077299>
20. Bulut, E. G., Candoğan, K. (2022). Development and characterization of a 3D printed functional chicken meat based snack: Optimization of process parameters and gelatin level. *LWT*, 154, Article 112768. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112768>
21. Jiang, Q. Y., Zhang, M., Mujumdar, A. S. (2021). Novel evaluation technology for the demand characteristics of 3D food printing materials: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(5), 4669–4685. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1878099>
22. Molimi, M. B., Egan, P., Adeb, O. A. (2025) Progress in three-dimensional (3D) printed foods for dysphagia patients: Food sources, processing techniques, printability, nutrition, acceptability, and safety aspects. *Food Research International*, 202, Article 115629. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115629>
23. Бредихин С. А., Антипов С. Т., Андреев В. Н., Мартеха А. Н. (2021). Влияние реологических характеристик на качество 3Д-печати пищевых паст. *Вестник ВГУИТ*, 83 (2), 40–47. [Bredihin, S. A., Antipov, S. T., Andreev, V. N., Martekha, A. N. (2021). Influence of rheological characteristics on the quality of 3D printing of food pastes. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 83(2), 40–47. (In Russian)] <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-2-40-47>
24. Lorenz, T., Iskandar, M. M., Baeghbali, V., Ngadi, M. O., Kubow, S. (2022). 3D food printing applications related to dysphagia: A narrative review. *Foods*, 11(12), Article 1789. <https://doi.org/10.3390/foods11121789>
25. Wen, Y., Chao, C., Che, Q. T., Kim, H. W., Park, H. J. (2023). Development of plant-based meat analogs using 3D printing: Status and opportunities. *Trends in Food Science and Technology*, 132, 76–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.12.010>
26. Yuliarti, O., Ng, L., Koh, W. M., Abdullah Tan, M. F. B. M. F., Sentana, A. D. (2023). Structural properties of meat analogue with added konjac gels. *Food Hydrocolloids*, 142, Article 108716. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108716>
27. Guo, Z., Arslan, M., Li, Z., Cen, S., Shi, J., Huang, X. et al. (2022). Application of protein in extrusion-based 3D food printing: Current status and prospectus. *Foods*, 11(13), Article 1902. <https://doi.org/10.3390/foods11131902>
28. Chen, Y., McClements, D. J., Peng, X., Chen, L., Xu, Z., Meng, M. et al. (2022). Starch as edible ink in 3D printing for food applications: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(3), 456–471. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2106546>
29. Zhong, Yu., Wang, B., Lv, W., Wu, Yi., Lv, Yi, Sheng, S. (2024). Recent research and applications in lipid-based food and lipid-incorporated bioink for 3D printing. *Food Chemistry*, 458, Article 140294. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140294>
30. Bhat, Z. F., Morton, J. D., Kumar, S., Bhat, H. F., Aadil, R. M., Bekhit A.-E.-D.-A. (2021). 3D printing: Development of animal products and special foods. *Trends in Food Science and Technology*, 118(Part A), 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.020>
31. Chen, J., Rosenthal A. (2015) Food texture and structure. Chapter in a book: *Modifying Food Texture*. Woodhead Publishing, 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-333-1.00001-2>
32. Nida, S., Anukiruthika, T., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D printing of grinding and milling fractions of rice husk. *Waste Biomass Valorization*, 12(1), 81–90. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01000-w>
33. Scheele, S. C., Hoque, M. N., Christopher, G., Egan, P. F. (August 17–19, 2021). *Printability and fidelity of protein-enriched 3d printed foods: A case study using cricket and pea protein powder*. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. <https://doi.org/10.1115/detc2021-67783>
34. Liu, Y., Liu, D., Wei, G., Ma, Y., Bhandari, B., Zhou, P. (2018). 3D printed milk protein food simulant: Improving the printing performance of milk protein concentration by incorporating whey protein isolate. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.018>
35. Anukiruthika, T., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends. *Journal of Food Engineering*, 265, Article 109691. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109691>
36. Montoya, J., Medina, J., Molina, A., Gutiérrez, J., Rodríguez, B., Marín, R. (2021). Impact of viscoelastic and structural properties from starch-mango and starch-arabinoxylans hydrocolloids in 3D food printing. *Additive Manufacturing*, 39(2), Article 101891. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101891>
37. Cheng, Y., Wang, B., Li, B., Li, G., Zhong, Yu., Lv, W., Xiao, H. (2025). Modified Starch-Based Emulsion-Filled Gels for 3D Printing: Preparation, Characterization, and Printability. *Food and Bioprocess Technology*, 18, 3732–3746. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03669-6>
38. Carvajal-Mena, N., Tabilo-Munizaga, G., Perez-Won, M., Lemus-Mondaca, R. (2022). Valorization of salmon industry by-products: Evaluation of salmon skin gelatin as a biomaterial suitable for 3D food printing. *LWT*, 155, Article 112931. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112931>
39. Chen, J., Mu, T., Goffin, D., Blecker, C., Gaëtan, R., Richel, A. et al. (2019). Application of soy protein isolate and hydrocolloids based mixtures as promising food material in 3D food printing. *Journal of Food Engineering*, 261, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.016>
40. Mu, R., Wang, B., Lv, W., Yu, J., Li, G. (2023). Improvement of extrudability and selfsupport of emulsion-filled starch gel for 3D printing: Increasing oil content. *Carbohydrate Polymers*, 301(Part 1), Article 120293. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120293>
41. You, S., Huang, Q., Lu, X. (2023). Development of fat-reduced 3D printed chocolate by substituting cocoa butter with water-in-oil emulsions. *Food Hydrocolloids*, 135, Article 108114. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108114>
42. Ross, M. M., Crowley, S. V., Crotty, S., Oliveira, J., Morrison, A. P., Kelly, A. L. (2021). Parameters affecting the printability of 3D-printed processed cheese. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 72, Article 102730. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102730>
43. Domzalska, Z., Jakubczyk, E. (2025) Characteristics of food printing inks and their impact on selected product properties. *Foods*, 14(3), Article 393. <https://doi.org/10.3390/foods14030393>
44. Dong, H., Wang, P., Yang, Z., Xu, X. (2023). 3D printing based on meat materials: Challenges and opportunities. *Current Research in Food Science*, 6(12), Article 100423. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.100423>
45. Alarcon-Rojo, A. D., Janacua, H., Rodriguez, J. C., Paniwnyk, L., Mason, T. J. (2015). Power ultrasound in meat processing. *Meat Science*, 107, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.04.015>
46. Cai, L., Feng, J., Cao, A., Zhang, Y., Lv, Y., Li, J. (2018). Denaturation kinetics and aggregation mechanism of the sarcoplasmic and myofibrillar proteins from grass carp during microwave processing. *Food and Bioprocess Technology*, 11(2), 417–426. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2025-x>
47. Wang, Y., Zhou, Y., Wang, X., Li, P., Xu, B., Chen, C. (2020). Water holding capacity of sodium-reduced chicken breast myofibrillar protein gel as affected by combined CaCl₂ and high-pressure processing. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(2), 601–609. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14313>
48. Yang, H.-J., Han, M.-Y., Wang, H.-f., Cao, G.-t., Tao, F., Xu, X.-L. et al. (2021). HPP improves the emulsion properties of reduced fat and salt meat batters by promoting the adsorption of proteins at fat droplets/water interface. *LWT*, 137(17), Article 110394. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110394>
49. Dick, A., Bhandari, B., Prakash, S. (2019). Post-processing feasibility of composite-layer 3D printed beef. *Meat Science*, 153, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.02.024>
50. Dick, A., Bhandari, B., Prakash, S. (2019). 3D printing of meat. *Meat Science*, 153, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.03.005>
51. Zhao, Z., Wang, Q., Yan, B., Gao, W., Jiao, X., Huang, J. et al. (2021). Synergistic effect of microwave 3D print and transglutaminase on the self-gelation of surimi during printing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, Article 102546. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102546>
52. Chen, Y., Zhang, M., Bhandari, B. (2021). 3D printing of steak-like foods based on textured soybean protein. *Foods*, 10(9), Article 2011. <https://doi.org/10.3390/foods10092011>
53. Xia, S., Shen, S., Song, J., Li, K., Qin, X., Jiang, X. et al. (2023). Physicochemical and structural properties of meat analogues from yeast and soy protein prepared via high-moisture extrusion. *Food Chemistry*, 402, Article 134265. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134265>
54. Bhuiyan, Md. H. R., Yeasmen, N., Ngadi, M. (2025). Effect of food hydrocolloids on 3D meat-analog printing and deep-fat-frying. *Food Hydrocolloids*, 159, Article 110716. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110716>
55. Su, W., Woo, H., Hyeock, M., Jin, H. (2023). Improved printability of pea protein hydrolysates for protein-enriched 3D printed foods. *Journal of Food Engineering*, 350, Article 111502. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111502>
56. Koranne, V., Jonas, O. L. C., Mitra, H., Bapat, S., Ardekani, A. M., Sealy, M. P. et al. (2022). Exploring properties of edible hydrolyzed collagen for 3D food printing of scaffold for biomaterial manufacturing cultivated meat. *Procedia CIRP*, 110, 186–191. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.06.034>
57. Bhuiyan, M. H. R., Ngadi, M. (2024). Thermomechanical transitions of meat-analog based fried foods batter coating. *Food Chemistry*, 447, Article 138953. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138953>
58. Bhuiyan, H. R., Yeasmen, N., Ngadi, M. (2024). Restructuring plant-derived composites towards the production of meat-analog based coated fried food. *Food Chemistry*, 443, Article 138482. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138482>
59. Mittal, S., Bhuiyan, M. H. R., Ngadi, M. (2023). Challenges and prospects of plant-protein-based 3D printing. *Foods*, 12(24), Article 4490. <https://doi.org/10.3390/foods12244490>
60. Liberty, J. T., Dehghannia, J., Ngadi, M. O. (2019). Effective strategies for reduction of oil content in deep-fat fried foods: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 92, 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.050>
61. Zhang, X., Zhang, M., Adhikari, B. (2020). Recent developments in frying technologies applied to fresh foods. *Trends in Food Science and Technology*, 98, 68–81. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.007>
62. Kang, D.-H., Louis, F., Liu, H., Shimoda, H., Nishiyama, Y., Nozawa, H. et al. (2021). Engineered whole cut meat-like tissue by the assembly of cell fibers using tendon-gel integrated bioprinting. *Nature Communications*, 12, Article 5059. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25236-9>
63. Аймалетдинов, А. М., Маланьева, А. Г., Тамбовский, М. А., Закирова, Е. Ю. (2024). 3D-биопечать, как метод тканевой инженерии: применение и перспективы. *Биотехнология*, 40(2), 3–22. [Aimaletdinov, A. M., Malanieva, A. G., Tambovsky, M. A., Zakirova E. Yu. (2024). 3D bioprinting as a method of tissue engineering: Applications and prospects. *Biotechnologiya*, 40(2), 3–22. (In Russian)] <https://doi.org/10.56304/S0234275824020029>

64. Golovin, S. N., Kirichenko, E. Yu., Khanukaev, M. M., Logvinov, A. K. (2026). 3D bioprinting of hybrid cultured meat from rabbit cells and sunflower protein. *Foods and Raw Materials*, 14(1), 52–60. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-1-659>
65. Belova, K., Dushina, E., Popov, S., Zlobin, A., Martinson, E., Vityazev, F. et al. (2023). Enrichment of 3D-Printed k-Carrageenan food gel with callus tissue of narrow-leaved lupin *Lupinus angustifolius*. *Gels*, 9(1), Article 45. <https://doi.org/10.3390/gels9010045>
66. Zhu, Y., Chen, L., Zhang, X., Meng, T., Liu, Z., Chitrakar, B. et al. (2024). 3D-printed pea protein — based dysphagia diet affected by different hydrocolloids. *Food and Bioprocess Technology*, 17, 1492–1506. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03210-1>
67. Ульрих, Е. В., Верхотуров, В. В. (2022). Особенности фуд-дизайна на 3D-принтере. Обзор. *Пищевые системы*, 5(2), 100–106. [Ulrikh, E. V., Verkhotur, V. V. (2022). Features of food design on a 3D printer. A review. *Food Systems*, 5(2), 100–106. (In Russian)]. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-100-106>
68. Hemsley, B., Palmer, S., Kouzani, A., Adams, S., Balandin, S. (January 8–11, 2019). *Review informing the design of 3d food printing for people with swallowing disorders: Constructive, conceptual, and empirical problems*. Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences, University of Hawai'i at Mānoa, Honolulu, 2019. <https://doi.org/10.24251/hicss.2019.692>
69. Zhu, W., Iskandar, M. M., Baeghbal, V., Kubow, S. (2023). Three-dimensional printing of foods: A critical review of the present state in healthcare applications, and potential risks and benefits. *Foods*, 12(17), Article 3287. <https://doi.org/10.3390/foods12173287>
70. Costa, A., Carrión, S., Puig-Pey, M., Juárez, F., Clave, P. (2019). Triple adaptation of the mediterranean diet: Design of a meal plan for older people with oropharyngeal dysphagia based on home cooking. *Nutrient*, 11(2), Article 425. <https://doi.org/10.3390/nu11020425>
71. Корниенко, В. Ю., Минаев, М. Ю. (2022). Тенденции в развитии трехмерной печати продуктов питания. *Пищевые системы*, 5(1), 23–29. [Kornienko, V. Yu., Minaev, M. Yu. (2022). Trends in the development of 3d food printing. *Food Systems*, 5(1), 23–29. (In Russian)]. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-1-23-29>
72. Derossi, A., Caporizzi, R., Azzollini, D., Severini, C. (2018). Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children. *Journal of Food Engineering*, 220, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.015>
73. Vieira, M. V., Oliveira, S. M., Amado, I. R., Fasolin, L. H., Vicente, A. A., Pas-trana, L. M. et al. (2020). 3D printed functional cookies fortified with *Arthrospira platensis*: Evaluation of its antioxidant potential and physical-chemical characterization. *Food Hydrocolloids*, 107, Article 105893. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105893>
74. Pant, A., Lee, A. Y., Karyappa, R., Lee, C. P., An, J., Hashimoto, M. et al. (2021). 3D food printing of fresh vegetables using food hydrocolloids for dysphagic patients. *Food Hydrocolloids*, 114, Article 106546. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106546>
75. Qiu, L., Zhang, M., Adhikari, B., Lin, J., Luo, Z. (2024). Preparation and characterization of 3D printed texture-modified food for the elderly using mung bean protein, rose powder, and flaxseed gum. *Journal of Food Engineering*, 361(6), Article 111750. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111750>
76. Yun, H. J., Jung, W.-K., Kim, H. W., Lee, S. (2023). Embedded 3D printing of abalone protein scaffolds as texture-designed food production for the elderly. *Journal of Food Engineering*, 342, Article 111361. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111361>
77. Dick, A., Bhandari, B., Dong, X., Prakash, S. (2020). Feasibility study of hydrocolloid incorporated 3D printed pork as dysphagia food. *Food Hydrocolloids*, 107, Article 105940. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105940>
78. Lille, M., Kortekangas, A., Heinio, R.-L., Sozer, N. (2020). Structural and textural characteristics of 3d-printed protein- and dietary fibre-rich snacks made of milk powder and wholegrain rye flour. *Foods*, 9(11), Article 1527. <https://doi.org/10.3390/foods9111527>
79. Mirazimi, F., Saldo, J., Sepulcre, F., Gràcia, A., Pujola, M. (2022). Enriched puree potato with soy protein for dysphagia patients by using 3D printing. *Food Frontiers*, 3(4), 706–715. <https://doi.org/10.1002/fft2.149>
80. Гусакон, Г., Калтович, И. (2024). 3D-печать в индустрии питания. *Наука и инновации*, 10(259), 37–42. [Gusakov, G., Kaltovich, I. (2024). 3D printing in the food industry. *Science and Innovation*, 10(259), 37–42. (In Russian)]
81. Мелешеня, А. В., Гордыnets, С. А., Калтович, И. В., Шапель, Т. П., Кимосhevская, О. И., Пинчук, Г. П. (2021). Теоретические и практические аспекты использования аддитивных технологий при производстве пищевых продуктов. Минск: Институт мясо-молочной промышленности, 2021. [Mel-schenya, A. V., Gordynets, S. A., Kaltovich, I. V., Shakel, T. P., Kimoshevskaya, O. I., Pinchuk, G. P. (2021). Theoretical and practical aspects of using additive technologies in food production. Minsk: Institute of Meat and Dairy Industry, 2021. (In Russian)]
82. Wang, C., Wang, X., Liu, C., Liu, C. (2021). Application of LF-NMR to the characterization of camellia oil-loaded pickering emulsion fabricated by soy protein isolate. *Food Hydrocolloids*, 112, Article 106329. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106329>
83. Yang, D., Wu, G., Li, P., Qi, X., Zhang, H., Wang, X. et al. (2020). The effect of fatty acid composition on the oil absorption behavior and surface morphology of fried potato sticks via LF-NMR, MRI, and SEM. *Food Chemistry: X*, 7, Article 100095. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2020.100095>
84. Shao, J.-H., Deng, Y.-M., Song, L., Batur, A., Jia, N., Liu, D.-Y. (2016). Investigation the effects of protein hydration states on the mobility water and fat in meat batters by LF-NMR technique. *LWT-Food Science and Technology*, 66, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.008>
85. Liu, Z., Zhang, M., Ye, Y. (2020). Indirect prediction of 3D printability of mashed potatoes based on LF-NMR measurements. *Journal of Food Engineering*, 287, Article 110137. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110137>
86. Phuongsung, P., Zhang, M., Devahastin, S. (2020). Investigation on 3D printing ability of soybean protein isolate gels and correlations with their rheological and textural properties via LF-NMR spectroscopic characteristics. *LWT*, 122, Article 109019. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109019>
87. Chen, H.-Z., Zhang, M., Yang, C.-H. (2021). Comparative analysis of 3D printability and rheological properties of surimi gels via LF-NMR and dielectric characteristics. *Journal of Food Engineering*, 292, Article 110278. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110278>
88. Guo, C.-H., Zhang, M., Bhandari, B. (2019). A comparative study between syringe-based and screw-based 3D food printers by computational simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.032>
89. Guo, C., Zhang, M., Devahastin, S. (2020). 3D extrusion-based printability evaluation of selected cereal grains by computational fluid dynamic simulation. *Journal of Food Engineering*, 286, Article 110113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110113>
90. Yang, F., Guo, C., Zhang, M., Bhandari, B., Liu, Y. (2019). Improving 3D printing process of lemon juice gel based on fluid flow numerical simulation. *LWT*, 102, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.031>
91. Jonkers, N., van Dommelen, J. A. W., Geers, M. G. D. (2020). Experimental characterization and modeling of the mechanical behavior of brittle 3D printed food. *Journal of Food Engineering*, 278, Article 109941. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109941>
92. Nijdam, J. J., LeCorre-Bordes, D., Delvart, A., Schon, B. S. (2021). A rheological test to assess the ability of food inks to form dimensionally stable 3D food structures. *Journal of Food Engineering*, 291, Article 110235. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110235>
93. Kim, H. W., Bae, H., Park, H. J. (2018). Reprint of: Classification of the printability of selected food for 3D printing: Development of an assessment method using hydrocolloids as reference material. *Journal of Food Engineering*, 220, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.023>
94. Xu, P., Li, J., Meda, A., Osei-Yeboah, F., Peterson, M. L., Repka, M. et al. (2020). Development of a quantitative method to evaluate the printability of filaments for fused deposition modeling 3D printing. *International Journal of Pharmaceutics*, 588, Article 119760. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119760>
95. Шибанов, Э. Д., Рылов, С. А., Благовещенский, И. Г. (2023). Алгоритм автоматизированного контроля и управления процессом 3D-печати шоколадной массой. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*, 16(8), 57–63. [Shibanov, E. D., Rylov, S. A., Blagoveshchensky, I. G. (2023). Algorithm for automated control of the process of 3D printing with chocolate mass. *LETI Transactions on Electrical Engineering and Computer Science*, 16(8), 57–63. (In Russian)] <https://doi.org/10.32605/2071-8985-2023-16-8-57-63>
96. Pulatsu, E., Su, J.-W., Kenderes, S. M., Lin, J., Vardhanabhuti, B., Lin, M. (2022). Restructuring cookie dough with 3D printing: Relationships between the mechanical properties, baking conditions, and structural changes. *Journal of Food Engineering*, 319, Article 110911. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110911>
97. Sun, J., Peng, Z., Zhou, W., Fuh, J. Y. H., Hong, G. S., Chiu, A. (2015). A review on 3D printing for customized food fabrication. *Procedia Manufacturing*, 1, 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.057>
98. Rinsana, P. F., Murugesan, B., Kim, Y. H., Alaguthevar, R., Rhim, J.-W. (2025). Advances in 3D food printing technology: Innovation and applications in the food industry. *Food Science and Biotechnology*, 34, 403–421. <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01779-7>
99. Zhang, J. Y., Pandya, J. K., McClements, D. J., Lu, J., Kinchla, A. J. (2022). Advancements in 3D food printing: A comprehensive overview of properties and opportunities. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(17), 4752–4768. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1878103>
100. Piyush, C., Kumar, R., Kumar, R. (2020). 3D printing of food materials: A state of art review and future applications. *Materials Today Proceedings*, 33(30), 1463–1467. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.005>
101. Baiano, A. (2020). 3D-printed foods: A comprehensive review on technologies, nutritional value, safety, consumer attitude, regulatory framework, and economic and sustainability issues. *Food Reviews International*, 38, 986–1016. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1762091>
102. Burke-Shyne, S., Gallegos, D., Williams, T. (2020). 3D food printing: Nutrition opportunities and challenges. *British Food Journal*, 123(2), 649–663. <https://doi.org/10.1108/BFJ-05-2020-0441>
103. Severini, C., Derossi, A., Ricci, I., Caporizzi, R., Fiore, A. (2018). Printing a blend of fruit and vegetables. New advances on critical variables and shelf life of 3D edible objects. *Journal of Food Engineering*, 220, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.025>
104. Lupton, D., Turner, B. (2018). “Both fascinating and disturbing”: Consumer responses to 3D food printing and implications for food activism. Chapter in a book: *Digital Food Activism*. Routledge, 2018.
105. Ross, M. M., Collins, A. M., McCarthy, M. B., Kelly, A. L. (2022). Overcoming barriers to consumer acceptance of 3D-printed foods in the food service sector. *Food Quality and Preference*, 100, Article 104615. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104615>
106. Lupton, D., Turner, B. (2018). Food of the future? Consumer responses to the idea of 3D-printed meat and insect-based foods. *Food and Foodways*, 26(4), 269–289. <https://doi.org/10.1080/07409710.2018.1531213>
107. Manstan, T., McSweeney, M. B. (2020). Consumers' attitudes towards and acceptance of 3D printed foods in comparison with conventional food products. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(1), 323–331. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14292>
108. Scerra, M., Barrett, A., Eswaranandam, S., Okamoto, M. (2018). Effects of 3D printing and thermal post processing on the stability of vitamin E acetate. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 118(10), Article A148. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2018.08.101>
109. Martínez-Monzo, J., Cárdenas, J., García-Segovia, P. (2019). Effect of temperature on 3D printing of commercial potato puree. *Food Biophysics*, 14, 225–234. <https://doi.org/10.1007/s11483-019-09576-0>

110. He, C., Zhang, M., Fang, Z. (2020). 3D printing of food: Pretreatment and post-treatment of materials. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(14), 2379–2392. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1641065>

111. Parada, J., Aguilera, J. M. (2007). Food microstructure affects the bioavailability of several nutrients. *Journal of Food Science*, 72(2), R21–R32. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00274.x>

112. Smykov, I. T. (2022). Neophobia: Socio-ethical problems of innovative technologies of the food industry. *Food Systems*, 5(4), 308–318. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-4-308-318>

113. Yoha, K. S., Moses, J. A. (2023). 3D printing approach to valorization of agri-food processing waste streams. *Foods*, 12(1), Article 212. <https://doi.org/10.3390/foods12010212>

114. Jagadiswaran, B., Alagarasan, V., Palanivelu, P., Theagarajan, R., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2021). Valorization of food industry waste and by-products using 3D printing: A study on the development of value-added functional cookies. *Future Foods*, 4(10), Article 100036. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100036>

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	Принадлежность к организации
Никитина Марина Александровна — доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, руководитель направления Информационные технологии Центра «Экономико-аналитических исследований и информационных технологий», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: m.nikitina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8313-4105 * автор для контактов	Marina A. Nikitina , Doctor of Technical Sciences, Docent, Leading Scientific Worker, Head of the Direction of Information Technologies of the Center of Economic and Analytical Research and Information Technologies, V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: m.nikitina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8313-4105 * corresponding author
Горбунова Наталья Анатольевна — кандидат технических наук, ученый секретарь, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: n.gorbunova@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4249-9316	Nataliya A. Gorbunova , Candidate of Technical Sciences, Scientific Secretary, V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: n.gorbunova@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4249-9316
Contribution	Критерии авторства
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Conflict of interest	Конфликт интересов
The authors declare no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.