

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-100-106>

Поступила 11.04.2022

Поступила после рецензирования 29.04.2022

Принята в печать 06.05.2022

© Ульрих Е. В., Верхотуров В. В., 2022

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

Обзорная статья

Open access

ОСОБЕННОСТИ ФУД-ДИЗАЙНА НА 3D-ПРИНТЕРЕ. ОБЗОР

Ульрих Е. В.*, Верхотуров В. В.

Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

*фуд-дизайн, консистенция,
3D-печать, персонализация,
структура, вкусовые ощущения*

АННОТАЦИЯ

Технология 3D-печати привлекает большое внимание своей универсальностью и возможностью применения в различных отраслях производства, таких как аэрокосмическая промышленность, электроника, архитектура, медицина и пищевая промышленность. В пищевой промышленности данная инновационная технология называется фуд-дизайном. Трехмерная печать — это технология аддитивного производства, которая может помочь пищевой промышленности в разработке новых и более сложных пищевых продуктов и потенциально помогает производить продукты, адаптированные к конкретным потребностям. Как технология, которая создает продукты питания слой за слоем, 3D-печать может представить новую методологию создания реалистичных текстур продуктов питания путем точного размещения структурирующих элементов в продуктах питания, печати продуктов из нескольких материалов и проектирования сложных внутренних структур. Важным фактором приемлемости для потребителей, помимо внешнего вида и вкуса, является консистенция пищи. Пожилые люди и люди с дисфагией нередко страдают от недоедания из-за визуально и текстурно непривлекательной пищи. Целью данного обзора является изучение существующей литературы по 3D-печати и оценка последних разработок в области технологий, касающихся фуд-дизайна. В данном обзоре рассматриваются существующие работы по 3D-печати пищевых продуктов и последние разработки, касающиеся дизайна пищевых текстур. Обсуждаются преимущества и ограничения 3D-печати в пищевой промышленности, возможности печати на основе материалов и консистенции на основе моделей, а также будущие тенденции в 3D-печати, включая технологии приготовления пищи печатью на пищевых принтерах. Также подробно рассматриваются ключевые проблемы, препятствующие массовому внедрению 3D-печати.

Received 14.04.2022

Accepted in revised 29.04.2022

Accepted for publication 06.05.2022

© Ulrikh E. V., Verkhoturov V. V., 2022

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

Review article

Open access

FEATURES OF FOOD DESIGN ON A 3D PRINTER. A REVIEW

Elena V. Ulrikh*, Vasily V. Verkhoturov

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

KEY WORDS:

*food design, texture, 3D-printing,
personalization, structure, taste
sensations*

ABSTRACT

3D printing technology attracts considerable attention due to its versatility and possibility of using in different industries such as the aerospace industry, electronics, architecture, medicine and food industry. In the food industry, this innovative technology is called food design. 3D printing is a technology of additive manufacturing, which can help the food industry in the development of new and more complex food products and potentially help manufacture products adapted to specific needs. As a technology that create foods layer by layer, 3D printing can present a new methodology for creating realistic food textures by precise placement of structuring elements in foods, food printing from several materials and design of complex internal structures. In addition to appearance and taste, food consistency is an important factor of acceptability for consumers. The elderly and people with dysphagia not infrequently suffer from undernutrition due to visual or textual unattractiveness of foods. The aim of this review is to study the available literature on 3D printing and assess recent developments in food design technologies. This review considers available studies on 3D food printing and recent developments in food texture design. Advantages and limitations of 3D printing in the food industry, possibilities of printing based on materials and consistency based on models as well as future trends in 3D printing including technologies of food preparation by printing on food printers are discussed. In addition, key problems that prevent mass introduction of 3D printing are examined in detail.

1. Введение

Пищевая промышленность переживает смену парадигмы. Рост количества потребляемой населением пищи и стремление людей к новым индивидуальным ощущениям подталкивают производителей к разработке новых технологий, которые могут удовлетворить новые стандар-

ты потребителей [1]. Одна из таких новых технологий, 3D-печать, существует уже несколько десятилетий, однако только в 2007 году она впервые была применена в производстве пищевых структур [1]. С тех пор 3D-печать используется для создания визуально сложных геометрических структур, выходящих за рамки возможностей традиционных методов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ульрих, Е. В., Верхотуров, В. В. (2022). Особенности фуд-дизайна на 3D-принтере. Обзор. *Пищевые системы*, 5(2), 100-106. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-100-106>

FOR CITATION: Ulrikh, E. V., Verkhoturov, V. V. (2022). Features of food design on a 3D printer. A review. *Food systems*, 5(2), 100-106. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-100-106>

производства продуктов питания [2,3]. В последнее время акцент сместился с визуальных аспектов пищевых продуктов на их контроль и персонализацию [3,4,5]. Продукты должны быть не только внешне привлекательными, но и обладать полезными питательными свойствами.

3D-печать также определяется другими терминами, такими как аддитивное многослойное производство, изготовление твердой произвольной формы и быстрое прототипирование [2,6,7]. Для простоты понимания 3D-печать — это термин, используемый для обозначения технологии продуктов питания с заданными свойствами.

Эта технология привлекла большое внимание общественности своей универсальностью и возможностью применения в различных отраслях производства, таких как аэрокосмическая промышленность, электроника, архитектура и медицина [8,9,10]. В секторе производства пищевых продуктов данная технология может быть использована для создания персонализированных пищевых продуктов, позволяющих создавать продукты питания с особыми характеристиками дизайна, вкуса и цвета, геометрической структурой, консистенцией и профилями питательных веществ [2,5,11,12].

Некоторые корпорации уже используют эту технологию при производстве своей продукции, например Hershey's (шоколад), Barilla (макароны и лапша), Ruffles (картофельные чипсы), Oreo (печенье) и Mazola (фрукты и овощи) [13]. При производстве мясных продуктов компании Aleph Farms [14] и Meatech [15] используют 3D-печать для производства мяса, выращенного в лаборатории, а Redefine Meat [16] и Novameat [17] применяют эту технологию для изготовления мяса на растительной основе.

Помимо вкуса и внешнего вида, одним из основных факторов приемлемости для потребителей является консистенция и ощущение пищи во рту [18,19,20]. В то время как вкус и внешний вид являются факторами, которые привлекают больше внимания во время производства и покупки продуктов питания, консистенция имеет решающее значение для пищевых предпочтений и также может представлять важность во время покупки [21].

В настоящее время наблюдается тенденция к снижению содержания соли, сахара и жира в пищевых продуктах, однако этот процесс имеет сложность реализации, так как перечисленные соединения являются структурными и консервирующими компонентами продуктов питания [22]. Сокращение количества соли, жира и сахара (или замена этих веществ) может осуществляться за счет использования альтернативных добавок, модификаций консистенции или неоднородного пространственного распределения соединений [22,23,24]. Однако более полезные продукты часто воспринимаются как непривлекательные и пресные по сравнению с их обычными аналогами [25,26].

Трехмерная печать — это инновационная, актуальная и, по мнению ученых, прорывная технология, которая постоянно расширяется, о чем свидетельствует растущее число обзоров, глав в книгах, а также исследовательских статей, публикуемых каждый год [1].

Цель этого обзора — изучить существующую литературу по 3D-печати и оценить последние разработки в области технологий, касающихся дизайна пищевых текстур.

2. Объекты и методы

Объектами данного исследования являлись научные публикации и патенты российских и зарубежных авторов по исследованию 3D-печати пищевых продуктов. Был проведен поиск в PubMed исследований, опубликованных в период с 1999 по 2022 годы, с использованием нескольких ком-

бинаций ключевых слов, включая следующие: 3D-печать, фуд-дизайн, пищевые продукты, вкусовые предпочтения, функциональные продукты питания, специализированное и персонализированное питание. Статьи, доступные только в виде рефератов, библиографии редакционных статей, а также статей, написанных не на английском и русском языках, были исключены. Основным методом исследования было обобщение [27]. В частности, были проанализированы статистические и исследовательские данные, относящиеся к исследованию существующих методов 3D-печати пищевых продуктов, их видового разнообразия, структуры и органолептических свойств.

3. Результаты и обсуждение

В то время как окончательное значение консистенции до сих пор не однозначно, консенсус, как это определено Международной организацией по стандартизации (ISO) [28], состоит в том, что консистенция включает в себя «все механические, геометрические и поверхностные атрибуты продукта, воспринимаемые средствами механических, тактильных и при необходимости зрительных и слуховых рецепторов» [18,21,28]. Другими словами, консистенция, по-видимому, охватывает все аспекты пищевого продукта, которые могут быть восприняты человеческими органами чувств, особенно руками и ртом.

Как восприятие консистенции, так и предпочтения у людей сильно различаются и зависят от личного опыта и культуры человека [21]. К примеру, в Японии существует более 400 терминов для описания консистенции пищи, в то время как в западных странах, таких как США и Австрия, только 78 и 105 соответственно [29].

Другой важной концепцией, которую следует учитывать, является сенсорное восприятие, или ощущение пищи во рту. Ощущение во рту определяется как ощущение консистенции пищи во время ее потребления [18]. Исследования показали, что консистенция и ощущение во рту играют важную роль в выборе пищи, при приеме пищи и даже в процессе насыщения [30,31].

На сенсорное восприятие потребителей влияют упаковка и текстурные, визуальные и тактильные свойства продуктов, что оправдывает ожидания в отношении продуктов и, следовательно, вероятность покупки [32]. Jansson-Boyd и Kobescak [33] показали, что на восприятие потребителями полезности пищи влияют визуальные имплицитные свойства поверхности. Ученые пришли к выводу, что сладкие продукты, такие как печенье, покупают с большей вероятностью, если они выглядят менее «здоровыми» и воспринимаются как более вкусные [33]. Также было обнаружено, что дизайн упаковки и рисунок поверхности влияют на сенсорное восприятие мороженого, чипсов, кофе и шоколадных напитков [34–36]. Авторы показали, что поверхности с гладкой консистенцией усиливают восприятие сладости мороженого, а шероховатые поверхности усиливают горечь кофе и соленость картофельных чипсов [34–36]. Представленные результаты могут быть полезны в продвижении более здоровых пищевых продуктов, играя с текстурными свойствами упаковки и продукта.

Оценка консистенции образцов часто выполняется с помощью реологического анализа и анализа профиля консистенции. Чаще всего изучаются текстурные свойства: твердость, когезивность, упругость, клейкость, возможность легкого измельчения при жевании и вязкость [9,20,37,38]. Твердость — это сила, необходимая для того, чтобы вызвать определенный уровень деформации, и способность пищевого продукта сохранять свою форму. Адгезионная способность связана со способностью склеивания компонен-

тов материалов и с силой, необходимой для разрыва связи между поверхностью образца и внешними поверхностями, с которыми образец соприкасается. Когезивность связана с клейкостью внутри самого образца и способностью образцов деформироваться до того, как они разорвутся. Упругость связана с эластичностью образцов и с их способностью восстанавливать свою первоначальную структуру после сжатия. Наконец, вязкость и возможность легкого измельчения при жевании связаны с энергией, необходимой для фрагментации и пережевывания пищи. Соответственно, при этом вязкость применяется только к полутвердым продуктам, а возможность легкого измельчения при жевании — к твердым продуктам [38–40].

Как упоминалось выше, 3D-печать можно применять для создания новых структур с индивидуальной консистенцией, вкусом и питательным профилем [12,13,41]. Ее также можно использовать для создания новых и сложных геометрических форм, которые придают печатной продукции уникальные характеристики [11].

Трехмерную печать можно применять для разработки более здоровых пищевых продуктов с пониженным содержанием жира, сахара и соли [31]. Одним из способов достижения этого является компонентная пространственная дисперсия материалов [26,27,31]. Например, диспергирование капелек жира во внешних слоях пищевых продуктов может повлиять на физико-химические свойства продуктов и создать более приятное ощущение во рту, в то время как неоднородное распределение соли или сахара по пищевым продуктам может улучшить их органолептические качества,

способствуя производству более здоровых пищевых продуктов со сниженным уровнем этих компонентов [26,28,29,42].

Одним из основных препятствий для использования 3D-печати является отсутствие изобилия материалов для печати. Подходящий материал должен иметь определенные характеристики для печати [2,43]. Материалы были разделены на три категории: продукты, пригодные для печати (гели, пасты, тесто), продукты, не предназначенные для печати (мясо, рыба, овощи) и альтернативные ингредиенты (насекомые, водоросли) [25,27,31].

На Рисунке 1 представлены этапы процесса 3D-печати продуктов питания, от выбора используемого материала, моделирования и нарезки 3D-структуры до методов 3D-печати и применяемой постобработки [1].

Во время процесса печати некоторые параметры такие как, скорость печати и скорость двигателя, диаметр наконечника иглы, высота иглы, скорость экструзии, температура) могут вызывать изменения в печатных структурах [3,11,29]. Следовательно, существует необходимость оптимизации состава материалов и параметров процесса печати, чтобы сбалансировать оптимальные условия и получить желаемый результат [27,33,38,40,44].

Разработчиками были предложены некоторые методологии и рекомендации с целью ускорения оценки пригодности материалов для печати и оптимизации рецептов пищевых продуктов [44,45]. Чтобы стандартизировать измерение пригодности материалов для печати, Kim с соавторами [45] предложил систему классификации пригодности для печати с использованием гидроколлоидов. Авторы выбрали метил-



Рисунок 1. Этапы процесса 3D-печати продуктов питания [1]

Figure 1. Stages of 3D food printing process [1]

целлюлозу в качестве эталонного материала и использовали ее стабильность и эксплуатационные свойства для разработки категоризированной (А, В, С и D) системы для пищи, полученной фуд-дизайном, позволяющей классифицировать пригодность пищевых продуктов для печати по сравнению с эталонным материалом. Тем не менее при сравнении эталонного материала с печатными пищевыми материалами наблюдались некоторые расхождения в скорости деформации. Эти различия заключались в количестве компонентов состава: у пищевых материалов состав многокомпонентный, в то время как у эталонного материала — однокомпонентный [45]. Чтобы облегчить процесс составления рецептуры и печати, Zhu с соавторами [44] изучили взаимосвязь между реологическими свойствами материалов и характеристиками печати, используя томатное пюре в качестве эталона, и разработали рациональное руководство, которое применяет напряжение текучести в качестве критерия при разработке рецептур пищевых продуктов. Данное руководство может быть применено при разработке рецептур на водной основе благодаря их хорошей корреляции с эталонным материалом, однако оно не может использоваться при создании рецептур продуктов на жировой основе. Это связано с тем, что такие продукты имеют отчетливую печать, схожую с печатью эталонным томатным пюре [44].

Большинству материалов требуются усилители текучести, чтобы они стали пригодными для печати или с целью улучшения их пригодности для печати [38,46]. Для этого в подавляющем большинстве исследований используются гидроколлоиды для обеспечения и улучшения вязкоупругих свойств, необходимых для экструдированного материала [28,38,47]. Гидроколлоиды увеличивают вязкость составов, позволяя повысить степень их экструзии, в дополнение к увеличению структурной стабильности и твердости печатной продукции [48–50]. Однако следует уделять некоторое внимание используемым гидроколлоидам и их концентрации, поскольку эти факторы могут привести к чрезмерной твердости составов, затрудняющих процесс экструзии и приводящих к плохой точности печати [50].

Для пищевой промышленности большая часть исследований по 3D-печати пищевых продуктов описывает экструзионную печать, и многие расходные материалы для 3D-принтеров предназначены именно для экструзионного способа. Материалы должны иметь псевдопластическое истончение при сдвиге с достаточной вязкостью, чтобы течь через иглу, и с достаточной эластичностью, чтобы восстановить свою структуру при печати [26,29,35].

Для 3D-печати применялись различные источники материалов, наиболее часто используемые из которых — шоколад, картофель и тесто [6,7,35,45,51,52]. В качестве альтернативных источников материала были введены грибы, мука насекомых и водоросли [9,28,53–55].

Большое внимание уделяется разработке здоровых пищевых продуктов, богатых клетчаткой, напечатанных на 3D-принтере [4,9,10]. Однако печать материалов с высоким содержанием волокон, в частности, является сложной задачей из-за характеристик материалов и связующих свойств, при которых материал может забивать сопло и препятствовать непрерывной экструзии [4,9,10]. Высокое содержание клетчатки также связано с хрупкими структурами из-за агрегации частиц. Было обнаружено, что добавление обезжиренного молока и гидроколлоидов уменьшало эти проблемы [10,56]. Тем не менее разработка и печать снежков, богатых клетчаткой, из нескольких пищевых материалов (грибы, композитная мука, шпинат) были успешными, и по крайней мере два из них получили хорошую приемлемость на сенсорных панелях [4,9,10,56].

Ферменты, такие как трансглютаминаза, также применялись для улучшения пригодности для печати материалов, используемых в мясных конструкциях, таких как сурими, индейка и пюре из морского гребешка [57,58].

Что касается консистенции, Le Tohic с соавторами [37] доказали, что процесс печати вызвал значительные изменения консистенции образцов сыра. Авторы подтвердили, что напечатанный сыр имел меньшую твердость, толщину, клейкость и более высокую плавкость, чем необработанный сыр, что было объяснено результатом воздействия тепла и напряжения сдвига во время процесса печати, которые вызвали структурные изменения в жировых шариках. В результате получились более мягкие структуры [37]. Диаметр сопла и скорость печати также вызывали структурные изменения твердости и ломкости конструкций из рисового крахмала, при этом большие диаметры иглы создавали печатные структуры с повышенной твердостью [38]. Точно так же Huang и его соавторы [20] оценили параметры печати (диаметр иглы), уровни заполнения и влияние периметра на точность печати и текстурные свойства отпечатков коричневого риса [20]. Наибольшая точность печати была достигнута за счет меньшего диаметра сопла и более широкого периметра [20]. Авторы заметили, что при увеличении диаметра иглы конструкции из коричневого риса переходили от мягкой консистенции к более твердой консистенции [20].

Биопечать культур живых клеток, широко используемая при создании каркасов для протезов и тканей органов, также может создавать более реалистичные консистенции пищевых продуктов. Было предложено включение тканей каллусных клеток салата и моркови в гидроколлоидные матрицы и их использование в качестве печатных материалов для имитации консистенции реальной пищи [43,59]. Vancauwenberghe с соавторами [43] применили инкапсулированные клетки салата в пектиновых матрицах, используя бычий сывороточный альбумин для создания пористости. Было показано, что на механическую прочность матриц салата/пектина положительно влияет концентрация пектина и отрицательно — пористость и концентрация клеток. Концентрация пектина влияла на жизнеспособность клеток, а более высокие концентрации препятствовали жизнеспособности [43]. Park и соавторы [59] включили клетки моркови в матрицы из альгината натрия и дополнили их с помощью ионов кальция. Было показано, что размерность структур зависит от плотности клеток, при этом более высокие концентрации приводят к отпечаткам с более низким разрешением. Механическая прочность морковно-альгинатной матрицы зависела от концентрации альгината и пролиферации клеток. Снижение твердости структур объясняли ростом клеток и образованием неравномерных скоплений клеток [59]. Оба исследования доказали, что можно печатать 3D-ткань растительных клеток с хорошей пригодностью для печати и структурной точностью для имитации настоящей пищи. Однако для разработки реалистичных текстур необходимы дополнительные исследования по улучшению свойств конструкций [43,59].

Использование материалов с различными характеристиками для создания многослойных структур с новыми консистенциями почти не применялось в других продуктах, и мало что известно о влиянии многослойных структур на воспринимаемую текстуру печатных конструкций. Для этой цели можно использовать принтеры с несколькими печатающими головками, при этом каждое сопло наносит разный материал, создавая сложные структуры из нескольких материалов с лучшим контролем над распределением и составом материалов [49]. Liu, Zhang и Bhandari [49] применили две различные методологии на принтере с двойной экструзией

Таблица 1. Влияние параметров внутренней структуры исходных материалов на свойства консистенции печатной продукции

Table 1. Effect of the internal structure parameters of initial raw materials on properties of printed product consistency

Материал	Вид принтера	Геометрическая форма	Изучаемые параметры	Воздействие на печатную продукцию	Источник
Злаки	3D-принтер Дельта 2039	Параллелепипед с внутренними кубами		Размер и положение пор влияют на печатную продукцию; Пористость отрицательно влияет на вес, влажность и активность воды; Пористость влияет на твердость, которая уменьшается со снижением относительной плотности печатной продукции	[8]
Тесто	3D-принтер	Куб, конус и сфера	Давление сжатия (300, 400, 500, 600 и 700 кПа); скорость движения иглы (3, 6, 9, 12 и 15 мм/с); диаметр иглы (0,25, 0,41, 0,58, 0,84 и 1,19 мм); уровни заполнения принтера (10, 30, 50, 70 и 100%)	Наилучшие результаты печати наблюдаются при давлении 600 кПа, скорости печати 6 мм/с, диаметре иглы 0,58 мм и уровне заполнения 50%; Добавление оливкового масла и порошка манго снижает твердость, но повышает эластичность и упругость печатной продукции; Процесс печати приводит к дальнейшему снижению твердости, клейкости, эластичности и упругости	[49]
Темный шоколад	Принтер с ротационной экструзией (Porimy 1.0)	Цилиндр со звездой, кривой Гильберта и внутренними узорами в виде сот	Уровни заполнения принтера (5, 30, 60 и 100%);	Уровень заполнения влияет на вес печатной продукции, что в свою очередь влияет на пустоты в конструкциях; Повышение процента заполнения приводит к увеличению веса отпечатков и уменьшению доли пустот в конструкциях; Увеличение уровня начинки также повышает твердость продуктов, но даже 100% начинка имеет меньшую твердость, чем литой шоколад; Звездообразные и сотовые узоры обеспечивают наибольшую стабильность и твердость при 60% заполнении отпечатков	[52]

для создания структур из нескольких материалов с использованием картофельного пюре и клубничного варенья. Одна методология заключалась в разработке различных 3D-моделей с последующим объединением в stl. файлы и назначение отдельных частей экструдеру, в то время как другая методология создавала 3D-модель и назначала разные части одной и той же модели каждому экструдеру. Обе методологии позволяют создавать визуально привлекательные структуры из нескольких материалов и изготавливать различные консистенции в одних и тех же продуктах, чередуя слои с разными консистенциями [49].

Помимо материала, используемого в печатной продукции, структура также может влиять на воспринимаемую консистенцию продукта. В 3D-печати создание отчетливых текстурных свойств в пищевых конструкциях достигается за счет введения пор в проектируемую модель и посредством печати изделий с различной внутренней структурой [32,35,60].

В Таблице 1 перечислены некоторые исследования, в которых проверялось влияние параметров внутренней структуры исходных материалов на консистенцию печатной продукции [1].

Анализ Таблицы 1 позволил сделать вывод о том, что параметры внутренней структуры (такие как рисунок, уровень и объем пустот) влияют на структурные свойства и свойства консистенции печатной пищи.

Знание влияния параметров на готовую продукцию позволяет более контролируемо изменять внутреннюю структуру для производства индивидуальных продуктов. Доказано, что технология трехмерной печати способна настраивать свойства консистенции печатной продукции путем изменения внутреннего структурного дизайна, что позволяет разрабатывать новые органолептические характеристики [35,55].

Различные материалы имеют разные характеристики жидкости, и, поскольку пищевые рецептуры состоят из разных компонентов, которые могут изменить динамику чернил, всегда существует необходимость оптимизации рецептур для достижения рациональных характеристик печати [40,49,61]. Что касается дизайнов, важным требованием

является настройка различных переменных, участвующих в печати образцов, поскольку дизайны становятся более сложными [22,36,62]. Разработка компьютерных моделей, учитывающих эти факторы и предсказывающих влияние переменных на процесс печати, теоретически могла бы ускорить весь процесс [63].

Принятие трехмерной печати широчайшим потребителем, по-видимому, зависит от осведомленности людей о технологии и ее преимуществах. Дальнейшее распространение информации о потенциале 3D-печати может помочь повысить восприимчивость потребителей к этой новой технологии [64].

4. Выводы

Трехмерная печать — это инструмент, который может произвести революцию в пищевой промышленности и способствовать эпохе персонализации, позволяя разрабатывать продукты, адаптированные к конкретным индивидуальным потребностям. Благодаря дизайну консистенции можно добиться производства более здоровых пищевых продуктов с меньшим содержанием соли, сахара и масла. В 3D-печати консистенция еды может быть разработана с помощью печати из нескольких материалов и проектирования сложных внутренних структур. На данный момент в существующей литературе, по-видимому, предполагается, что печатные пищевые продукты обладают отличной консистенцией по сравнению с традиционными продуктами — например, имеют более низкий уровень твердости, чем их традиционные аналоги, что делает их возможными альтернативами, подходящими для людей с проблемами глотания.

Численное моделирование может быть использовано для оценки печатных свойств материалов и оптимизации параметров печати. Кроме того, как и в случае применения любой другой новой технологии, следует принимать во внимание осведомленность потребителей о продуктах питания, напечатанных на 3D-принтере, и отношение населения к таким пищевым продуктам. Также следует инициировать дальнейшие рекламные и образовательные инициативы, чтобы подчеркнуть преимущества 3D-печати.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Pereira, T., Barroso, S., Gil, M. M. (2021). Food Texture Design by 3d Printing: A Review. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(2), Article 320. <https://doi.org/10.3390/foods10020320>
- 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>
- Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., Lin, L. — Y. (2018). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028>
- Krishnaraj, P., Anukiruthika, T., Choudhary, P., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2019). 3D extrusion printing and post-processing of fibre-rich snack from indigenous composite flour. *Food and Bioprocess Technology*, 12(10), 1776–1786. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02336-5>
- 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>
- Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., Yang, C. (2018). Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.017>
- Yang, F., Zhang, M., Prakash, S., Liu, Y. (2018). Physical properties of 3D printed baking dough as affected by different compositions. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.01.001>
- Derossi, A., Caporizzi, R., Ricci, I., Severini, C. (2019). Critical variables in 3D food printing. Chapter in a book: Fundamentals of 3D Food Printing and Applications: Academic Press, Cambridge, MA: USA. 2019. 41–91.
- Keerthana, K., Anukiruthika, T., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2020). Development of fiber-enriched 3D printed snacks from alternative foods: A study on button mushroom. *Journal of Food Engineering*, 287, Article 110116. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110116>
- Lille, M., Nurmela, A., Nordlund, E., Metsä-Kortelainen, S., Sozer, N. (2018). Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.034>
- Pérez, B., Nykvist, H., Brøgger, A. F., Larsen, M. B., Falkeborg, M. F. (2019). Impact of macronutrients printability and 3D-printer parameters on 3D-food printing: A review. *Food Chemistry*, 287, 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.090>
- Sun, J., Zhou, W., Huang, D., Yan, L. (2018). 3D food printing: Perspectives. Chapter in a book: Polymers for Food Applications: Springer International Publishing: Cham, Switzerland. 2018. 725–755.
- Kakuk, C. (2019). The Ultimate Guide to 3D Food Printing. Retrieved from <http://ww16.3dfoodprinting.us/wp-content/uploads/2019/04/The-Ultimate-Guide-to-3D-FoodPrinting041419.pdf?sub1=20210202-2030-1540-a773-f044d95581d1> Accessed April 8, 2022.
- Aleph Farms Aleph Farm Meat Growers. Retrieved from <https://aleph-farms.com/> Accessed April 8, 2022.
- Meatech Meatech 3D Printed Clean and Real Meat. Retrieved from <https://meatech3d.com/#intro> Accessed April 7, 2022.
- Redefine Meat for the Love of Meat. Redefine Meat. Why Redefine Meat? Retrieved from <https://www.redefinemeat.com/>. Accessed April 7, 2022.
- Novameat Barcelona Novameat Plant-Based Meat. Retrieved from <https://www.novameat.com/>. Accessed April 7, 2022.
- Stokes, J. R., Boehm, M. W., Baier, S. K. (2013). Oral processing, texture and mouthfeel: From rheology to tribology and beyond. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 18(4), 349–359. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2013.04.010>
- Sethupathy, P., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2021). Food oral processing and tribology: Instrumental approaches and emerging applications. *Food Reviews International*, 37(5), c. 538–571. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1710749>
- Huang, M. — S., Zhang, M., Bhandari, B. (2019). Assessing the 3D printing precision and texture properties of brown rice induced by infill levels and printing variables. *Food and Bioprocess Technology*, 12(7), 1185–1196. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02287-x>
- Chen, J., Rosenthal, A. (2015). Food texture and structure. Chapter in a book: Modifying Food Texture: Novel Ingredients and Processing Techniques: Volume 1: Woodhead Publishing: Cambridge: UK. 2015. 3–24.
- Stieger, M., Van de Velde, F. (2013). Microstructure, texture and oral processing: New ways to reduce sugar and salt in foods. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 18(4), 334–348. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2013.04.007>
- Di Monaco, R., Miele, N. A., Cabisidan, E. K., Cavella, S. (2018). Strategies to reduce sugars in food. *Current Opinion in Food Science*, 19, 92–97. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.03.008>
- Mosca, A. C., Rocha, J. A., Sala, G., van de Velde, F., Stieger, M. (2012). Inhomogeneous distribution of fat enhances the perception of fat-related sensory attributes in gelled foods. *Food Hydrocolloids*, 27(2), 448–455. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.11.002>
- Chung, C., McClements, D. J. (2015). Structure and texture development of food-emulsion products. Chapter in a book: Modifying Food Texture: Novel Ingredients and Processing Techniques: Volume 1: Woodhead Publishing: Cambridge: UK. 2015. 133–155.
- Raghunathan, R., Naylor, R. W., Hoyer, W. D. (2006). The unhealthy — Tasty intuition and its effects on taste inferences, enjoyment, and choice of food products. *Journal of Marketing*, 70, 170–184. <https://doi.org/10.1509/jmkg.70.4.170>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., Altman, D., Antes, G. et al. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), Article e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- International Organization for Standardization (ISO) (2020). Sensory Analysis-Methodology-Texture Profile (ISO 11036) ISO: Geneva: Switzerland. 2020.
- Mouritsen, O. G., Styrbaek, K. (2017). Mouthfeel. How Texture Makes Taste. Chapter in a book: Columbia University Press: New York: USA. 2017.
- McCrickard, K., Forde, C. G. (2016). Sensory influences on food intake control: Moving beyond palatability. *Obesity Reviews*, 17(1), 18–29. <https://doi.org/10.1111/obr.12340>
- Biswas, D., Szocs, C., Krishna, A., Lehmann, D. R. (2014). Something to chew on: The effects of oral haptics on mastication, orosensory perception, and calorie estimation. *Journal of Consumer Research*. 41(2), 261–273. <https://doi.org/10.1086/675739>
- Pramudya, R. C., Seo, H.-S. (2019). Hand-feel touch cues and their influences on consumer perception and behavior with respect to food products: A review. *Foods*, 8(7), Article 259. <https://doi.org/10.3390/foods8070259>
- Jansson-Boyd, C. V., Kobescak, M. (2020). To see is to hold: Using food surface textures to communicate product healthiness. *Food Quality and Preference*, 81, Article 103866. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2019.103866>
- Van Rompay, T. J. L., Groothedde, S. (2019). The taste of touch: Enhancing saltiness impressions through surface texture design. *Food Quality and Preference*, 73, 248–254. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.11.003>
- Van Rompay, T. J. L., Kramer, L.-M., Saakes, D. (2018). The sweetest punch: Effects of 3D-printed surface textures and graphic design on ice-cream evaluation. *Food Quality and Preference*, 68, 198–204. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.02.015>
- Van Rompay, T. J. L., Finger, F., Saakes, D., Fenko, A. (2017). «See me, feel me»: Effects of 3D-printed surface patterns on beverage evaluation. *Food Quality and Preference*, 62, 332–339. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2016.12.002>
- Le Tohic, C., O'Sullivan, J. J., Drapala, K. P., Chartrin, V., Chan, T., Morrison, A. P. et al. (2018). Effect of 3D printing on the structure and textural properties of processed cheese. *Journal of Food Engineering*, 220, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.003>
- Oyinloye, T. M., Yoon, W. B. (2021). Stability of 3D printing using a mixture of pea protein and alginate: Precision and application of additive layer manufacturing simulation approach for stress distribution. *Journal of Food Engineering*, 288, Article 110127. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110127>
- Yang, F., Zhang, M., Bhandari, B., Liu, Y. (2018). Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters. *LWT — Food Science and Technology*, 87, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.054>
- Szczesniak, A. S. (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*, 15(4), 215–225. [https://doi.org/10.1016/S0950-3295\(01\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0950-3295(01)00039-8)
- Le-Bail, A., Maniglia, B. C., Le-Bail, P. (2020). Recent advances and future perspective in additive manufacturing of foods based on 3D printing. *Current Opinion in Food Science*, 35, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.01.009>
- Mosca, A. C., Bult, J. H. F., Stieger, M. (2013). Effect of spatial distribution of tastants on taste intensity, fluctuation of taste intensity and consumer preference of (semi-)solid food products. *Food Quality and Preference*, 28(1), 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2012.07.003>
- Vancauwenberghe, V., Baiye Mfortaw Mbong, V., Vanstreels, Els., Verboven, P., Lammertyn, J., Nicolai, B. (2019). 3D printing of plant tissue for innovative food manufacturing: Encapsulation of alive plant cells into pectin based bio-ink. *Journal of Food Engineering*, 263, 454–464. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.003>
- Zhu, S., Stieger, M. A., van der Goot, A. J., Schutyser, M. A. I. (2019). Extrusion-based 3D printing of food pastes: Correlating rheological properties with printing behaviour. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 58, Article 102114. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102114>
- 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>
- 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>
- Tan, C., Toh, W. Y., Wong, G., Lin, L. (2018). Extrusion-based 3D food printing-Materials and machines. *International Journal of Bioprinting*, 4(2), Article 143. <https://doi.org/10.18063/ijb.v4i2.143>

48. Azam, R. S. M., Zhang, M., Bhandari, B., Yang, C. (2018). Effect of different gums on features of 3D printed object based on vitamin-D enriched orange concentrate. *Food Biophysics*, 13(3), 250–262. <https://doi.org/10.1007/s11483-018-9531-x>
49. Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B. (2018). Effect of gums on the rheological, microstructural and extrusion printing characteristics of mashed potatoes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 117, 1179–1187. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.048>
50. Kim, H. W., Lee, I. J., Park, S. M., Lee, J. H., Nguyen, M.-H., Par, H. J. (2019). Effect of hydrocolloid addition on dimensional stability in post-processing of 3D printable cookie dough. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 101, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.019>
51. Hao, L., Li, Y., Gong, P., Xiong, W. (2019). Material, process and business development for 3D chocolate printing. Chapter in a book: Fundamentals of 3D Food Printing and Applications: Academic Press: Cambridge MA: USA. 2019. 207–255.
52. Mantihal, S., Prakash, S., Bhandari B. (2019). Textural modification of 3D printed dark chocolate by varying internal infill structure. *Food Research International*, 121, 648–657. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.034>
53. Feng, C., Zhang, M., Bhandari, B. (2020). Controlling the three-dimensional printing mechanical properties of Nostoc sphaeroides system. *Food Biophysics*, 15(2), 240–248. <https://doi.org/10.1007/s11483-019-09611-0>
54. Severini, C., Azzollini, D., Albenzio, M., Derossi, A. (2018). On printability, quality and nutritional properties of 3D printed cereal based snacks enriched with edible insects. *Food Research International*, 106, 666–676. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.034>
55. Vieira, M. V., Oliveira, S. M., Amado, I. R., Fasolin, L. H., Vicente, A. A., Pastrana, 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>
56. Lee, J. H., Won, D. J., Kim, H. W., Park, H. J. (2019). Effect of particle size on 3D printing performance of the food-ink system with cellular food materials. *Journal of Food Engineering*, 256, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.014>
57. Lipton, J., Arnold, D., Nigl, F., Lopez, N., Cohen, D., Norén, N. et al. (August 8–10, 2010). Multi-material food printing with complex internal structure suitable for conventional post-processing. Proceedings of the 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium — An Additive Manufacturing Conference SFF: Austin: TX: USA. 9–11. 809–815.
58. Dong, X., Pan, Y., Zhao, W., Huang, Y., Qu, W., Pan, J. et al. (2020). Impact of microbial transglutaminase on 3D printing quality of *Scomberomorus niphonius surimi*. *LWT*, 124, Article 109123. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109123>
59. Park, S. M., Kim, H. W., Park, H. J. (2020). Callus-based 3D printing for food exemplified with carrot tissues and its potential for innovative food production. *Journal of Food Engineering*, 271, Article 109781. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109781>
60. Vancauwenbergh, V., Delele, M. A., Vanbiervliet, J., Aregawi, W., Verboven, P., Lammertyn, J. et al. (2018). Model-based design and validation of food texture of 3D printed pectin-based food simulants. *Journal of Food Engineering*, 231, 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.010>
61. Guo, C., Zhang, M., Bhandari, B. (2019). Model building and slicing in food 3D printing processes: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18, 1052–1069. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12443>
62. 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>
63. Yang, F., Zhang, M., Liu, Y. (2019). Effect of post-treatment microwave vacuum drying on the quality of 3D-printed mango juice gel. *Drying Technology*, 37(14), 1757–1765. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1536884>
64. Zhang, L., Lou, Y., Schutyser, M. A. I. (2018). 3D printing of cereal-based food structures containing probiotics. *Food Structure*, 18, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.10.002>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Ульрих Елена Викторовна — доктор технических наук, заместитель директора Института агроинженерии и пищевых систем по научной и международной деятельности, Калининградский государственный технический университет 236022, Калининград, проспект Советский, 1 Тел.: +7-904-960-94-96 E-mail: elen.ulrich@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4107-7277 * автор для контактов	Elena V. Ulrikh, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director of the Institute of Agroengineering and Food Systems for Scientific and International Activities, Kaliningrad State Technical University 1, Prospekt Sovetskiy, 1236022, Kaliningrad, Russia Tel.: +7-904-960-94-96 E-mail: elen.ulrich@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4107-7277 * corresponding author
Верхотуров Василий Владимирович — доктор биологических наук, доцент, директор Института агроинженерии и пищевых систем, Калининградский государственный технический университет 236022, Калининград, проспект Советский, 1 Тел.: +7-950-099-21-62 E-mail: tpp.kafedra@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2979-9867	Vasily V. Verkhoturov, Doctor of Biological Sciences, Docent, Director of the Institute of Agroengineering and Food Systems for Scientific and International Activities, Kaliningrad State Technical University 1, Prospekt Sovetskiy, 236022, Kaliningrad, Russia Tel.: +7-950-099-21-62 E-mail: tpp.kafedra@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2979-9867
Критерии авторства	Contribution
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.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.