

## Съедобные столовые приборы как устойчивая альтернатива пластиковым изделиям: обзор предметного поля

*Бурак Л.Ч., Сапач А.Н.*

**Аннотация.** Растущая обеспокоенность во всем мире по поводу загрязнения пластиком, микропластиком и его биоаккумуляции способствует исследованиям научного сообщества по разработке устойчивой и съедобной посуды из натуральных биополимеров. Цель данного обзора – системный анализ современных методов проектирования, производства и повышения функциональности биоразлагаемых столовых приборов. Материалом для данного обзора послужили оригинальные исследования, научные обзоры по теме исследования, опубликованные в рецензируемых журналах за 2019–2025 годы. Анализ результатов научных исследований показал, что в качестве сырья для изготовления съедобных столовых приборов используют крахмалы, растительные белки и пищевые волокна, а технологии изготовления такие как, формование, выпечку, термическое прессование и экструзию, которые определяют прочность, влагостойкость и срок хранения изделий. Установлено, что перспективными направлениями являются композиты на основе белков и полисахаридов, пищевое сшивание, введение биоактивных добавок и создание гидрофобных покрытий, что способствует увеличению механической прочности и функциональности. Возможность использования съедобной посуды зависит от стабильности в процессе хранения, экономической целесообразности и эффективности, соответствия требованиям безопасности, международным стандартам и законам о качестве и безопасности пищевых продуктов. Применение съедобных столовых приборов в сети общественного питания позволит снизить объемы отходов и их негативное влияние на окружающую среду. Вместе с тем обзор научных исследований показал отсутствие утвержденных стандартных методик оценки долговечности, влагостойкости и сенсорных характеристик съедобных приборов, что не дает возможности сравнить результаты различных исследований и их внедрение. Широкое использование съедобных столовых приборов в качестве устойчивой упаковки в системе общественного питания возможна при условии улучшения их потребительских свойств, экономической эффективности и увеличении общего жизненного цикла. Дальнейшие научные исследования должны быть направлены на разработку единых методик оценки съедобных столовых приборов, оптимизацию их состава и технологий, а также общего жизненного цикла и восприятия потребителями.

**Ключевые слова:** столовые съедобные приборы, пластик, отходы, водоросли, полисахариды, белки, пищевые волокна, экструзия, литье.

**Для цитирования:** Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Съедобные столовые приборы как устойчивая альтернатива пластиковым изделиям: обзор предметного поля // Инновационная техника и технология. 2026. Т. 13. № 1. С. 20–43.

## Edible cutlery as a sustainable alternative to plastic products: A field review

*Burak L.Ch., Sapach A.N.*

**Abstract.** Growing global concern about plastic pollution, microplastics, and their bioaccumulation is driving scientific research into developing sustainable and edible tableware from natural biopolymers. The purpose of this review is to systematically analyze current methods for designing, manufacturing, and enhancing the functionality of biodegradable cutlery. This review draws on original research and scientific reviews on the topic, published in peer-reviewed journals from 2019 to 2025. An analysis of the research results revealed that starches, plant proteins, and dietary fiber are used as raw materials for the manufacture of edible cutlery, while manufacturing technologies such as molding, baking, heat pressing, and extrusion determine the strength, moisture resistance, and shelf life of the products. Composites based on proteins and polysaccharides, food-grade cross-linking, the introduction of bioactive additives, and the creation of hydrophobic coatings, which contribute to increased mechanical

strength and functionality, have been identified as promising areas. The feasibility of using edible tableware depends on its shelf-life stability, economic feasibility, and effectiveness, as well as compliance with safety requirements, international standards, and food quality and safety laws. The use of edible cutlery in the food service industry will reduce waste and its negative impact on the environment. However, a review of scientific research revealed a lack of approved standard methods for assessing the durability, moisture resistance, and sensory properties of edible cutlery, preventing comparison of the results of various studies and their implementation. The widespread use of edible cutlery as sustainable packaging in the food service industry is possible only if its consumer properties, cost effectiveness, and overall life cycle are improved. Further scientific research should focus on developing unified methods for assessing edible cutlery, optimizing its composition and technology, as well as its overall life cycle and consumer perception.

**Keywords:** fedible cutlery, plastic, waste, algae, polysaccharides, proteins, dietary fiber, extrusion, molding.

**For citation:** Burak L.Ch., Sapach A.N. Edible cutlery as a sustainable alternative to plastic products: A field review. *Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]*. 2026. Vol. 13. No. 1. pp. 21–43. (In Russ.).

## Введение

Согласно оценкам, ежегодно выбрасываются миллиарды одноразовых пластиковых столовых приборов, включая чашки, миски и ложки, что оказывает существенное негативное влияние на окружающую среду. способствует загрязнению окружающей среды. Одноразовые пластиковые столовые приборы представляют собой серьезную экономическую, экологическую и социальную проблему, поскольку они в значительной степени не подлежат переработке и накапливаются в наземных и морских экосистемах [1]. Пластиковая посуда может сохраняться в окружающей среде многие десятилетия, распадаясь на микро- и нанопластик, который угрожает биоразнообразию и здоровью человека [1, 2]. В глобальном масштабе ежегодно производится около 141 миллиона тонн пластиковой упаковки, из которых почти 33% не попадает в официальные системы сбора отходов, в итоге скапливаясь на свалках и в естественной среде [2, 3]. Разложение этих пластиков приводит к выбросам парниковых газов и микропластика, которые сохраняются в наземных и водных экосистемах и могут биоаккумулироваться в организме человека, вызывая респираторные, желудочно-кишечные и иммунологические риски для здоровья [4, 5]. Используя пищевые биоразлагаемые ингредиенты, съедобная посуда может сократить количество пластиковых отходов, поддерживать принципы циклической экономики и предоставлять функциональные решения для упаковки и сохранения продуктов питания. Съедобные столовые приборы и устойчивая упаковка для пищевых продуктов играют решающую роль в снижении воздействия одноразовой посуды на окружающую среду, сохраняя при этом гигиену и функциональные характеристики во время обращения, транспортировки, хранения и потребления [6]. Выступая в качестве защитного барьера, съедобные чашки, миски и ложки помогают сохранить

качество продуктов питания и потенциально могут продлить срок их годности, одновременно предлагая биоразлагаемую альтернативу традиционной пластиковой упаковке [2, 6]. Поэтому разработка посуды на основе съедобных и биополимеров имеет первостепенное значение для снижения загрязнения окружающей среды, защиты здоровья человека и перехода к циклической и устойчивой системе упаковки пищевых продуктов [7]. Растущая обеспокоенность по поводу загрязнения пластиком, микропластиком и его биоаккумуляции ускорила переход к устойчивой и съедобной посуде из натуральных биополимеров. Полисахариды, белки и липиды широко используются в качестве съедобных полимеров благодаря своей биоразлагаемости, возобновляемости, биосовместимости и экологичности по сравнению с синтетическими пластиками на основе нефти [8]. Эти биополимеры разлагаются на естественные побочные продукты, такие как биомасса, вода и углекислый газ, посредством микробной активности, не способствуя долгосрочному накоплению в окружающей среде [6]. Полученные из растительных, животных или морских источников, эти материалы составляют основу съедобных столовых приборов, включая чашки, миски и ложки, которые можно безопасно потреблять вместе с продуктами питания, устраняя отходы после использования. Съедобная столовая посуда, такая как пленки и покрытия, служит защитным слоем, который сохраняет качество, вкус и свежесть пищи, предотвращая микробное загрязнение и порчу во время обработки, хранения и потребления [9]. Производство и использование съедобной столовой посуды регулируются строгими правилами безопасности, включая стандарты FDA, общепризнанные как безопасные (GRAS), стандарты Европейского агентства по безопасности пищевых продуктов (EFSA) и сертификацию ISO, что гарантирует безопасность потребителей и соответствие международным правилам контакта с пищевыми продуктами [6]. Кро-

ме того, съедобные столовые приборы могут быть функционализированы активными пищевыми агентами, придавая антиоксидантные, антимикробные или pH-чувствительные свойства, которые улучшают сохранность пищевых продуктов и контроль по всей цепочке поставок [10, 11]. Несмотря на растущее число публикуемых научных обзоров, посвященных съедобным пленкам, покрытиям и съедобным столовым приборам общего назначения, сохраняется потребность в узкоспециализированном обзоре, ориентированном на практическое применение, который был бы сосредоточен именно на съедобной столовой посуде. В отличие от тонких съедобных пленок и ложек, контейнеры должны удовлетворять четкому, а порой и противоречивому набору требований: достаточная прочность на изгиб и ударопрочность для выдерживания жидкости, контролируемая смачиваемость и барьерные свойства при длительном контакте с жидкостью, термостойкость к воздействию горячей пищи и напитков, а также требования безопасности пищевых продуктов, применимые к материалам, которые могут употребляться в пищу или находиться в тесном контакте с пищевыми продуктами. Во многих существующих обзорах особое внимание уделяется спискам ингредиентов или свойствам пленок, но не синтезируется путь от сырья → обработки → измеримых функциональных целей для стаканчиков и контейнеров. Поэтому, цель данного исследования - обзор научных исследований и системный анализ современных методов проектирования, производства и повышения функциональности биоразлагаемых столовых приборов..

### Объекты и методы исследований

Поиск опубликованной научной литературы по исследованию в области съедобных чашек, мисок и ложек как устойчивых альтернатив традиционной пластиковой посуде. проводили в библиографических базах «PubMed», «Scopus», «Web of Science» и «Google Scholar». Для поиска релевантных научных публикаций определены и использованы ключевые слова и словосочетания: «столовые съедобные приборы», «биоразлагаемость», «растительные белки», «полисахариды», «крахмалы», «водоросли», «пищевые волокна», «экструзия», «литье» «биоактивные соединения», «функциональные ингредиенты». В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период 2019–2025гг. На первом этапе было отобрано 298 научных публикаций, после проверки аннотаций и удаления дублирующих публикаций для целей настоящего обзора отобрано 93 источника, которые соответствовали критериям включения. Анализ данных выполнен с их систематизацией, обобщением, промежуточными выводами и общим заключением.

## Результаты и их обсуждение

### 1. Сырье для изготовления съедобной столовой посуды и приборов

Выбор приемлемого сырья и состав, который может обеспечить желаемую механическую прочность, структурную целостность, водостойкость и вкусовые качества, имеют решающее значение для разработки съедобных столовых приборов и посуды. Природные биополимеры, такие как белки [желатин, соевый белок, казеин), углеводы [крахмалы, мука, камеди) и липиды [растительные масла, воски), обычно используются в качестве основных ингредиентов при создании съедобных контейнеров [12]. Для повышения гибкости и улучшения свойств эти материалы часто смешивают со сшивающими агентами и пластификаторами, например, сорбитом и глицерином [9, 13]. Для увеличения срока годности и повышения потребительской привлекательности могут добавляться функциональные добавки, включая натуральные ароматизаторы, красители и антибактериальные вещества [14].

#### 1.1 Растительные источники

Зерновые культуры, такие как пшеница, рис и кукуруза, богаты углеводами, белками и пищевыми волокнами, что делает их идеальными для съедобных рецептур. Белки обеспечивают готовым изделиям прочность и гибкость, а крахмал обеспечивает превосходные структурообразующие и связующие качества. Зерновую муку можно использовать в тесте различных форм, что позволяет производить съедобные миски и чашки с регулируемой пищевой ценностью и вкусом [15]. Добавление гидроколлоидов или натуральных ингредиентов может улучшить их прочность и водостойкость, что делает их идеальными для полужидких и сухих блюд [16]. Кроме того, бобовые богаты белками, сложными углеводами и пищевыми волокнами, которые улучшают их структурообразующие и связующие свойства. Белки с гелеобразующей прочностью и стабильностью, такие как соя, горох и маш, можно использовать для изготовления долговечной съедобной упаковки [17]. Содержание крахмала и клетчатки в бобовой муке улучшает текстуру и структуру продуктов. Улучшить их гибкость и влагостойкость можно, используя гидроколлоиды или натуральные пластификаторы. Съедобные миски и чашки, изготовленные из бобовых, также обладают индивидуальными питательными и сенсорными качествами, повышая их полезность и привлекательность для потребителей [17, 18]. Бобовые являются экологичным вариантом съедобной посуды, поскольку они сокращают количество пластиковых отходов и соответствуют принципам циклической экономики [19]. Данная стратегия поддерживает цели безотходной и циклической экономики, предлагая экологичное и адаптивное решение для экологически чистой посуды. В исследовании, проведенном Subbuvel и др. была разработана съедобная форму (миска) на биооснове с натуральными эле-

ментами, такими как многозерновая мука, очищенная пшеница, льняное семя, джаггери и эфирное масло пажитника [20]. Для улучшения ее качества в рецептуру добавляли различное количество пшеничных отрубей (0–10%). Пшеничные отруби увеличивали антиоксидантную активность примерно на 28% и значительно снижали всасывание воды и жира. Также было обнаружено, что разработанная миска имела высокое содержание белка — 13,17 г белка на 100 г. Эксперименты по разложению ее в почве дополнительно подтвердили ее биоразлагаемость. Учитывая результаты данного исследования можно предполагать, что данный образец может служить экологической альтернативой пластиковым формам для торта [20]. Также, Meshram и соавторы разработали съедобную чашку на основе проса кодо, обогащенную порошком гибискуса, где они использовали малоиспользуемую питательную культуру просо кодо (*Paspalum scrobiculatum*) в качестве основного ингредиента [21]. Исследователи улучшали рецептуры, где при содержании 0%–6% экстракта гибискуса и гуаровой камеди, содержания влаги было в диапазоне 5,7% и 8,5%, а вязкость теста около 2690–4470 мПа с при скорости сдвига 50 с<sup>-1</sup>, растворимости в воде 18%–22% и индексов набухания 22%–32%. Оптимальная рецептура, содержащая 6% экстракта гибискуса, продемонстрировала высокую антиоксидантную активность (IC 50 ≈ 75 мкг/мл) и повышенную термическую стабильность. Лабораторные испытания показали, что чашки могут сохранять горячие напитки не менее 60 минут, а холодные напитки — несколько часов [21]. Авторы Andrejko D. и др., в качестве экологически предпочтительной альтернативы пластиковой столовой посуде исследовали производство съедобных тарелок и мисок из льняного семени и его побочных продуктов [22]. Они разработали веганскую посуду с использованием цельных семян льна или льняного жмыха. Тарелки из льняного жмыха показали меньшую деформацию под нагрузкой, но со значительно большим крошением и более ярким красновато-желтым оттенком. Водопоглощение было больше у изделий на основе жмыха, тогда как тарелки на основе семян имели самое низкое поглощение. Большинство образцов теряли прочность после использования, при этом тарелка из семян оставалась более долговечной. Исследование показывает, что съедобная льняная столовая посуда механически и органолептически приемлема, и может быть устойчивой и биоразлагаемой альтернативой одноразовым пластиковым тарелкам и мискам [22]. Также при разработке съедобных чашек и мисок в качестве устойчивой альтернативы одноразовой пластиковой и бумажной посуде использовались различные материалы, такие как пивная дробина (ПД) с пальчатым просом, очищенной мукой, неочищенным пальмовым сахаром и ксантановой камедью [16], пшеничная мука с рисовыми отрубями, мука из очищенного нута, арахисовый жмых, обогащенные яблочные выжимки, крахмал

из свеклы и патока [23], пальчатое просо и просо с рисовой мукой, пшеничной мукой и топленным маслом ванаспати [19], мелкое просо, просо кодо и просо с манной крупой, порошком неочищенного пальмового сахара и ксантановой камедью, а также сорговое просо с пшеничной мукой [24].

Биополимеры, содержащиеся в побочных продуктах переработки фруктов и овощей, таких как кожура, мякоть, сердцевина и семена, могут быть использованы для изготовления биоразлагаемых упаковочных материалов. Например, пектин из кожуры фруктов (манго, цитрусовых и яблок) улучшает удержание влаги, гелеобразование и формирование структуры [25]. Крахмал из отходов корнеплодов и клубней в формованных пищевых продуктах улучшает консистенцию и структуру. В то же время листовые овощи, такие как шпинат или свекольная ботва, не обладают сильной структурообразующей способностью, но содержат пигменты и обладают антиоксидантной активностью [26]. Из-за низкой механической прочности пленки на основе фруктов и овощей непригодны для изготовления съедобной посуды. Однако смешивание с натуральными добавками способствует улучшению гибкости, барьерных свойств и визуальной привлекательности [23]. Vyshali и др. исследовали производство съедобных контейнеров для пищевых продуктов из биоразлагаемых отходов фруктов в качестве устойчивой альтернативы пластику [27]. Использовали в качестве сырья сердцевину ананаса, кожуру граната и апельсина, которые содержат многие питательные вещества, а для улучшения связывания добавляли льняную муку и порошок из семян джекфрута. Съедобные столовые приборы содержали большое количество белка, мало жира и сырую клетчатку. Испытания на безопасность не выявили *E.Coli* и превышение содержания тяжелых металлов. Сенсорные исследования показали приемлемые результаты по внешнему виду, текстуре и вкусу. Авторы исследования пришли к выводу, что прототипы на основе фруктовых отходов являются безопасной, полезной и экологически приемлемой альтернативой пластиковой посуде [27]. Для изготовления съедобных ложек использовали также отходы кожуры мозамби и саговый крахмал. Примерный состав ложек варьировался (влажность 6,67–33,33%, содержание белка 1,65–2,33%, жира 0,94–4,96%), и их водопоглощение возрастало с увеличением содержания кожуры. Образец, содержащий 50% порошка мозамби, был признан наиболее приемлемым по сенсорной оценке (оценка 8,67), а разложение ложек на 46–60% в течение 12 дней продемонстрировало их перспективность как богатых питательными веществами, биоразлагаемых столовых приборов [28]. В другом исследовании были созданы биоразлагаемые ложки с превосходной механической прочностью, антиоксидантной активностью и повышенным содержанием полифенолов, с использованием в качестве сырья виноградной муки в сочетании с просом, пшеницей, ксантановой каме-

дью и пальмовым маслом. Наилучшие результаты показал образец с ксантатом и всеми тремя видами муки, продемонстрировав улучшенный пищевой профиль и структурную целостность [29]. Хотя эти результаты демонстрируют возможность использования фруктовых и овощных отходов в качестве устойчивого сырья, масштабирование такой упаковки с использованием свежих продуктов потребовало бы больших затрат, что делает утилизацию отходов более целесообразной с экономической и экологической точки зрения.

### 1.2 Водоросли

Биополимеры, полученные из морских водорослей, такие как агар, альгинат и каррагинан, обеспечивают сильные гелеобразующие и загущающие свойства, что делает их подходящими для разработки формованных изделий, таких как съедобные чашки и миски [17, 30]. Их гидрофильная природа ограничивает влагостойкость, но ее можно улучшить путем смешивания с белками или хитозаном, ламинирования гидрофобными слоями (например, пчелиным воском) или ионной сшивки (например, кальцием для альгината) [31]. Хитозан особенно привлекателен для съедобных столовых приборов, поскольку он антибактериальный, гибкий и биоразлагаемый. Его умеренные влагобарьерные свойства улучшаются в кислых средах и могут быть дополнительно улучшены с помощью многослойных структур, химической сшивки (например, глутаральдегидом) или смешивания с гидрофобными добавками [32, 33]. Использование микробных биополимеров, включая пуллулан, геллановую камедь, полигидроксиалканоаты (ПГА) и бактериальную целлюлозу (БЦ) [14], обладает рядом преимуществ. ПГА термопластичны и долговечны, БЦ образует прочные и гибкие сети, пуллулан создает прозрачные структуры, препятствующие проникновению кислорода, а геллановая камедь образует прочные гели. Поскольку пуллулан и БЦ гидрофильны, для повышения влагостойкости требуются дополнительные модификации, такие как пластификация, нанесение поверхностных покрытий или включение нанокомпозитов. Промышленные дизайнеры Chelsea Briganti и Leigh Ann Tucker разработали Loliware — съедобную чашку на основе морских водорослей с натуральными подсластителями. Эти чашки безопасны, полностью натуральны и не содержат пластика, промышленных химикатов, глютена, желатина, токсинов и генетически модифицированных организмов (ГМО). В настоящее время в коллекции, одобренной FDA, доступно пять различных вкусовых вариантов чашек [34]. Кроме того, в ходе исследования, проведенного Hongsheng были разработаны съедобные контейнеры на основе агара с использованием рисового крахмала и овощного сока в качестве устойчивой альтернативы пластиковым контейнерам [34].

### 2. Полисахариды

При разработке съедобных столовых приборов, таких как чашки и кухонные принадлежности,

камеди и гидроколлоиды (гуаровая камедь, ксантановая камедь и каррагинан) имеют решающее значение для их биосовместимости и практических качеств. Будучи экологически чистыми альтернативами одноразовому пластику, данные натуральные полисахариды улучшают текстуру, прочность и стабильность [35]. Гуаровая камедь увеличивает вязкость и помогает создавать слабые гели, в то время как ксантановая и камедь плодов рожкового дерева образуют прочные гели для структурной поддержки. Каппа-каррагинан обеспечивает термообратимые гели, идеально подходящие для жестких текстур. Эти камеди улучшают связывание воды, механическую прочность и стабильность при хранении [34]. В сочетании они повышают формуемость и долговечность, что позволяет моделировать съедобные столовые приборы по индивидуальным требованиям [34]. Крахмал является популярным биополимером в производстве съедобных столовых приборов из-за его доступности, низкой стоимости, биоразлагаемости и способности изготавливать формованные изделия, такие как съедобные чашки и миски [36]. Можно создавать жесткие, формуемые материалы, подходящие для ложек, вилок, чашек и мисок, путем термической и химической обработки крахмала, полученного из кукурузы, проса, риса, пшеницы и других злаковых источников [37]. Основным процессом, при котором гранулы нативного крахмала расширяются и теряют свою кристаллическую форму при нагревании в присутствии воды, называется желатинизацией. Гранулы поглощают воду и расширяются, когда крахмал нагревается в воде (около 60–80 °C). Водородные связи цепей крахмала разрываются. Когда амилоза просачивается, образуется густой, пастообразный гель [38]. Процесс желатинизации необходим для формирования крахмала в процессе изготовления съедобной посуды. После охлаждения и сушки правильно желатинизированные материалы становятся однородными и жесткими. Хрупкость или растрескивание могут быть результатом неполной желатинизации. Температура желатинизации кукурузного крахмала выше (около 70–75 °C), но рисовый крахмал желатинизируется при более низкой температуре (около 60–70 °C) и дает более гладкую текстуру. Исходя из соотношения амилозы к амилопектину, просяной и пшеничный крахмалы демонстрируют промежуточное поведение желатинизации. Гранулы крахмала имеют полукристаллические структуры, состоящие из кристаллических и аморфных областей, которые чередуются. Кристалличность варьируется в зависимости от ботанического источника; например, крахмалы типа В (клубневые крахмалы) имеют более рыхлую структуру и большее содержание воды, тогда как крахмалы типа А (злаковые крахмалы, такие как пшеница, рис и кукуруза) являются компактными и имеют высокий кристаллический порядок. Желатинизация снижает кристалличность [34, 40]. Для использования в качестве сырья для изготовления съедобных столовых приборов

они должны быть достаточно гибкими, прочными и эластичными. Чистый крахмал часто бывает хрупким, особенно при низкой влажности. С другой стороны, большая концентрация амилозы делает его прочнее, но также и более хрупким. Волокна и белки являются усилителями, которые увеличивают прочность [41], тогда как пластификаторы, такие как глицерин, увеличивают гибкость и уменьшают хрупкость. От количества пластификатора зависят типичная прочность на растяжение и удлинение при разрыве [42]. Водостойкость и долговечность можно улучшить путем смешивания с другими биополимерами и сшивания лимонной кислотой [34, 40]. В таблице 1 представлен перечень и характеристика материалов, используемых для изготовления съедобных столовых приборов.

### 3. Способы изготовления съедобных столовых приборов

Экологичные съедобные столовые приборы (съедобные чашки, миски и ложки) могут быть изготовлены различными методами, такими как компрессионное формование, экструзия, термоформование и литье под давлением с использованием вышеупомянутых съедобных материалов.

#### Компрессионное формование

Компрессионное формование является широко используемым традиционным и простым методом для разработки компонентов, используемых в транспорте, электрических переключающих плат, автоматических выключателей, крышек для бутылок, кнопок, уплотнений, контейнеров, корпусов, защитных шлемов, компонентов насосов, зубчатых передач, тормозных элементов, структурных рам, шкивных узлов, панелей кузова транспортного средства, кухонной утвари и форм для бытовой электроники [47]. Это в данном методе отмеренное количество сырья, помещают в предварительно нагретую форму и сжимают под гидравлическим прессом высокого давления, что приводит к размягчению материала, денатурации белка, полимеризации и химическим изменениям в формованном изделии. Он работает по принципу вязкого течения и деформации полимера под высоким давлением, имея высокую размерную точность, низкий уровень отходов биоразлагаемого материала [48]. Компрессионное формование использует гидравлические или пневматические системы и зависит от параметров процесса, включая время отверждения, температуру пресс-формы, давление формования, а также форму, размер и размещение предварительной нагрузки [49]. Новые технологии и достижения привели к переработке и разработке биополимеров и продуктов на основе биоматериалов с использованием компрессионного формования. Биоразлагаемые и съедобные материалы, такие как рисовая шелуха, кукурузный крахмал, пшеничные отруби, просо и сельскохозяйственные отходы, смешиваются с натуральными связующими для образования формовочного теста для приготовления чашек и мисок, что может быть эффективной альтернативой

использованию одноразового пластика в пищевой и пивоваренной промышленности. Согласно исследованию, проведенному Yodkum и соавторами, рисовая мука и обезжиренные отруби смешивались для изготовления съедобных ложек с использованием метода компрессионного формования при 150 °С и 9 бар в течение 7 мин. Изготовленная съедобная ложка, обладала превосходной механической прочностью и высокой влагостойкостью [50].

#### Экструзия

Новая технология производства полимеров методом экструзии использует химические или ферментативные процессы для изменения полимера, прививки, сшивания, полимеризации и поликонденсации [51]. В этом методе экструдер работает как реактор, где может происходить реакция, дающая лучший биополимер с хорошими свойствами. Экструдер представляет собой горизонтальный химический реактор, оснащенный одним или несколькими шнеками, предназначенный для непрерывной транспортировки молекул реагентов различных типов, включая твердые вещества, расплавы, жидкости и газы. Внутренние физические параметры, такие как сильные сдвиги, температура и давление, формируют рабочее поле экструдера. Транспортировочный элемент осуществляет перемещение материалов, в то время как диспергирующие, смешивающие и пластифицирующие компоненты представляют собой завершающие элементы, из которых формируются экструдированные продукты. Зоны давления и плавления имеют различные этапы обработки в шнеке экструдера, что обеспечивает эффективное взаимодействие между реагентами [34]. Биоразлагаемые и съедобные продукты производятся с использованием смесей ацетата целлюлозы/кукурузного крахмала, белка, пшеницы, кукурузной шелухи и проса [43]. Экструзия изменяет макронутриенты в сырье, что приводит к получению продуктов, которые либо полезны, либо неприемлемы в зависимости от предполагаемого использования. Широкий спектр биоразлагаемых полимеров свежих продуктов, в частности, глюкозы, белков или различных вариантов, был обработан для термического разложения, распада, трансформации и изменения с помощью ферментативного катализа, усиленного разнообразными перекрестными переменными, присутствующими в процессах экструзии [34, 52]. Снижение затрат на ферменты и производство также должно быть направлено на применение в промышленных масштабах. Это эффективно для включения биоактивных соединений в разработку активной упаковки. Технология экструзии и уникальные технологии экструдеров должны быть усовершенствованы, а затем использованы для увеличения систем упаковки пищевых продуктов для различных применений. Процесс экструзии сложен и плохо поддается эффективному регулированию и управлению. Кроме того, поскольку реагенты остаются в процессе реакционной экструзии только в течение короткого

Таблица 1 – Перечень материалов, используемых при изготовлении съедобных столовых приборов различными способами, и их характеристики

Основное сырье и его количество	Применяемые добавки	Метод изготовления	Основные характеристики ингредиентов	Источник
Семена льна или льняной жмых, 300гр.	Масло, льняной клей, пшеничная мука и рожковое дерево	Формовка и выпекание в форме для торта	Съедобные миски обладают хорошими механическими свойствами, так как семена льна богаты омега-3 жирными кислотами; льняная слизь усиливает структурообразование.	[22]
Пшеничные отруби, 0%–10%	Мука из нескольких видов зерна, рафинированная мука (майда), пальмовый сахар, льняное семя и эфирное масло пажитника	Формовка и выпечка теста	Пшеничные отруби повышают содержание клетчатки, антиоксидантную активность и снижают всасывание масла; пальмовый сахар улучшает вкус и действует как натуральное связующее вещество; масло пажитника оказывает антимикробное действие.	[20]
Пивная дробина, 0%–10%	Пальчиковое просо, рафинированная мука, джаггери и ксантановая камедь	Тесто прессуют и раскатывают в листы, затем придают ему форму и выпекают.	Низкое водопоглощение и снижение жиропоглощения, высокое содержание белка, полифенолы из дробины усиливают антиоксидантную активность; просо улучшает пищевой профиль; ксантан улучшает текстуру и прочность	[16]
Пшеничная мука, 40 – 60 г	Рисовые отруби, мука из очищенного нута, арахисовый жмых, обогащенный яблочным жмыхом, свекольным жмыхом и экстрактом патоки.	В качестве трафарета использовалась сталь, а расходники стаканчики вырезались ножом.	Обладают приятным вкусом, сбалансированным составом макроэлементов; выжимки фруктов повышают антиоксидантную активность; подходят как для горячих, так и для холодных блюд.	[23]
Пальчатое просо и просо, 20%–60%	Рисовая мука, пшеничная мука и топленое масло ванаспати	Лист сформирован и сформирован с помощью чашеобразной формы	Чашка обладает хорошей водоудерживающей способностью, просо улучшает питательный профиль, а ванаспати улучшает пластичность.	[19]
Просо кодо ( <i>Paspalum scrobiculatum</i> ), более 90%	Гуаровая камедь и порошок гибискуса	Лист сформирован и сформирован с помощью чашеобразной формы	Гуаровая камедь действует как связующее вещество; гибискус добавляет антиоксиданты и естественный красный оттенок; термостабильные и более крепкие чашки	[21]
Пшено, просо кодо и эхинохлойская трава (скотное просо) около 77 %	Манная крупа, порошок джаггери и ксантановая камедь	Лист сформирован и сформирован с помощью чашеобразной формы	Высокое содержание сырой клетчатки и белка; ксантан улучшает текстуру; манная крупа обеспечивает структуру, обладает антиоксидантным потенциалом (70% ингибирования DPPH)	[24]
Просо сорго, 7%–17,5%	Пшеничная мука	Густое тесто заливается в чашеобразную форму, делая	Просынная и пшеничная мука обеспечивают структуру, проращивание/обжаривание улучшает вкус, усвояемость и текстуру; чашки подходят для горячих/холодных напитков.	[44]
Мука из сорго	Порошок гибискуса, порошок розы	Формование	Повышенное содержание клетчатки и микроэлементов; превосходная прочность текстуры (56 Н); сохраняет целостность в горячих супах до 30 минут; микробиологически безопасен; полностью биоразлагаем в течение 12 дней.	[45]

Основное сырье и его количество	Применяемые добавки	Метод изготовления	Основные характеристики ингредиентов	Источник
Сердцевина ананаса, кожура граната и апельсиновая цедра, 26 – 110 г	Порошок из семян джекфрута и мука из льняного семени	Тесто помещают в формы.	Высокое содержание клетчатки, белка и антиоксидантов; безопасный и экологичный; хорошая структурная прочность благодаря кожуре, сердцевине и муке	[27]
Порошок из кожуры мосамби( 10-100%	Крахмал саго	Формование	Биоразлагаемые ложки: белок (1,65–2,33%), жир (0,94–4,96%); биоразлагаемость 46–60% за 12 дней.	[28]
Виноградная мука, 17–50 г	Мука из проса, пшеничная мука, ксантановая камедь, пальмовое масло	Формование	Ложки повышенной прочности; виноградная мука усиливает антиоксидантную активность и питательные свойства; ксантан улучшает структуру	[29]
Водоросли	Органические подсластители, фруктовые и овощные экстракты	Нет данных	Морские водоросли содержат натуральные гидроколлоиды; подсластители улучшают вкусовые качества; стаканчики биоразлагаемы, нетоксичны и подходят для соков.	[34]
Агар	Рисовый крахмал и овощной сок	Формование	Агар образует прочные гели; крахмал повышает жесткость; экологичен, растворим, может использоваться в качестве корма для животных после использования.	[34]
Желудевая мука, 10–30%	Мука из семян тыквы, маковая мука, пшеничная мука	Формование	Самое высокое содержание полифенолов (14 мг GAE/г) в 30% желудевой муки; сильная антиоксидантная активность и твердость, обеспечиваемые желудями; экологичная альтернатива пластику	[46]

периода времени (1–5 минут), можно использовать только быстропротекающие реакции. Экструзия благодаря шиванию и различным гидрофильным процессам может быть использована для активной упаковки пищевых продуктов [43]. В методе экструзии ультразвук, сверхкритические флюиды и ферменты используются для ускорения синтеза биополимеров. Это позволяет легко настраивать свойства производимых материалов, которые зависят от состава съедобных материалов и условий обработки. Недавно с помощью экструзии и нанесения покрытия были получены новые пены на основе крахмала с покрытием из поливинилового спирта (ПВС) с добавлением пероксида кальция. Полученная пена потенциально способна сохранять гуаву при транспортировке и хранении. Пена продемонстрировала улучшенную влагостойкость, превосходную буферную способность и способность к саморегулированию атмосферы хранения [34].

#### Термоформование

Процесс термоформования широко используется для производства пенопласта для упаковки пищевых продуктов и создания защитных материалов, съедобных стаканчиков, мисок и подносов. Процесс вспенивания включает в себя нагревание и давление для придания полимерному материалу желаемой формы путем нагревания, формования и охлаждения изделия с использованием экструзии,

выпекания, формования и сверхкритического флюидного вспенивания [53]. Свойства пенопласта, полученного методом термоформования, зависят от источника материала, условий процесса, типа и количества пластификатора и воды. Процесс производства термоформованного продукта включает в себя выбор и резку полимерного или биополимерного листа и нагревание его до размягчения, затем применяется давление или вакуум для разработки формы продукта, мисок, чашек, стакана и т. д. [54]. Эта калибровочная термоформовка используется для разработки мисок, чашек и подносов с использованием пищевых биополимеров или натуральных материалов, рисовой муки, пшеничных отрубей, сорго, желатина или проса, которые смешиваются с пластификаторами для повышения гибкости. При термоформовании съедобных продуктов нагрев осуществляется при более низких температурах, чтобы избежать деградации биополимеров, а формы проектируются для производства структурно стабильных, безопасных для употребления в пищу продуктов [55]. Согласно исследованию, проведенному Diaz и др. крахмал смешивали с полилактоном и армировали биоуглем на основе молотого кофе для разработки пищевых лотков на биологической основе. В рамках метода термоформования используются процессы внутреннего сдвигового смешивания, компрессионного формо-

вания и листового термоформования. Результаты показали, что разработанные лотки обладают превосходной прочностью, удлинением и жесткостью [56]. Другой биоразлагаемый лоток для пасты был разработан Грасиа и соавторами, для изготовления лотков использовался метод терраформирования со смесью бумаги и биополимера. Лотки, сформированные при 105 °С и 8 бар, показали улучшенную термостойкость (примерно 290 °С), прочность на разрыв (49,6 МПа) и влагонепроницаемость [57].

#### Литье под давлением

Процесс литья под давлением состоит из четырех этапов: пластификация, плавление, формование и охлаждение. На этапе пластификации твердые материалы подаются в нагретый цилиндр, где они расплавляются за счет совместного действия нагрева цилиндра и сдвига, создаваемого вращающимся шнеком, в результате чего образуется расплавленная матрица. Этот расплавленный материал впрыскивается под высоким давлением в охлаждаемую полость формы на этапе заполнения, где происходит сложная динамика потока и передача тепла, после чего наступает фаза уплотнения, где постоянное давление компенсирует усадку, вызванную охлаждением; это требует формования сжимаемым потоком с использованием соотношений давление-объем-температура ( $pVt$ ) для обеспечения точности размеров и предотвращения дефектов [34]. Наконец, на этапе охлаждения и выталкивания тепло отводится от формованной детали под воздействием формы и конвекции через охлаждающие каналы для получения конечных формованных изделий. Качество литьевого формования изделий зависит от типа сырья, точек плавления смеси, скорости шнека, температурного профиля, давления впрыска и времени пребывания [58]. Традиционно литье под давлением используется в электронной, автомобильной и медицинской промышленности. Проведены исследования по использованию метода литья под давлением в упаковке пищевых продуктов и разработке устойчивых материалов. В качестве биоматериалов использовались кукуруза, картофель, маниока, пшеница, рис, просо, желатин, соя, сыворотка и натуральные добавки, такие как глицерин, гуаровая камедь и продукты на основе растительных волокон [59]. Авторами Félix и др. проведено исследование, с использованием смеси изолятов соевого белка (ИСБ) и яичного альбумина, пластифицированного 40% глицерина по разработке биопластика с использованием литья под давлением при 130 °С и давлении 500 бар. Литье под давлением позволило добиться однородной формы и улучшить прозрачность, особенно при повышенном содержании альбумина. Механические испытания показали, что продукты с высоким содержанием альбумина обладают более высокими прочностными и вязкоупругими свойствами по сравнению с соевым биопластиком [34]. Процесс литья под давлением позволяет индивидуализировать формы и механические свойства для удов-

летворения различных потребностей в упаковке пищевых продуктов и напитков. Совместимость с биополимерами повышает функциональность и потребительскую привлекательность съедобных продуктов, а также способствует разработке мисок и стаканчиков.

#### 4. Методы улучшения функциональности съедобных столовых приборов

Несмотря на то, что съедобные стаканчики и миски кажутся эффективной альтернативой одноразовым столовым приборам, сохранение и долговечность их функциональных характеристик остаются сомнительными. Будучи съедобными и биоразлагаемыми, они зачастую не обладают механической, термической прочностью и влагустойчивостью из-за плохих барьерных свойств и пористой природы, что ограничивает их точное использование в основных приложениях для упаковки пищевых продуктов. С целью преодоления данных ограничений исследователи постоянно изучают функциональные ингредиенты и натуральные добавки, такие как сшивающие агенты, покрытия, биоактивные вещества и армирующие вещества [60]. Эффективные методы, которые были установлены в ходе исследований, это такие как, модификация сырья, сшивание, формирование нанокомпозитов и контролируемая кристаллизация. Наиболее эффективные методы включают комбинацию сшивания, нанонаполнителей и оптимизированной термической обработки. Они также показывают одновременное улучшение структуры, повышение пищевой ценности и общей приемлемости потребителем [22, 24, 34].

Прочность на разрыв, жесткость, устойчивость к деформации и деформация важны для определения потребительского восприятия и удобства использования съедобной посуды. Прочность на разрыв отражает способность материала выдерживать тяговые усилия без разрушения. Твердость указывает на устойчивость поверхности к вдавлению или проникновению и имеет решающее значение для сохранения формы во время обращения и использования. Жесткость – это сопротивление изгибу, которое гарантирует, что съедобные чашки и ложки могут выдерживать вес жидкостей без чрезмерной деформации. Деформация включает в себя усадку или изменение размеров в процессе производства, которые необходимо контролировать для обеспечения постоянства характеристик продукта и удовлетворенности потребителей [34, 61]. Несмотря на многие преимущества перед пластиковой посудой, съедобные миски обладают серьезными недостатками из-за низкой механической прочности, пористости, плохой термостойкости во влажных условиях и крайне ограниченной жиро- и маслонепроницаемости. Из-за своей хрупкости они подвержены высокой вероятности повреждения при транспортировке, погрузочно-разгрузочных работах и даже при складировании [34, 22]. Неприемлемые сенсорные характеристики при воздействии

высокой температуры в условиях сухого тепла и размокание при воздействии высокой влажности остаются основными проблемами. Отсутствие укрепляющих или защитных покрытий обычно приводит к тому, что пищевые контейнеры легко впитывают влагу. Чтобы улучшить термостойкость и механическую прочность, Nehra и др. включили ПД (побочный продукт, богатый волокнами и фенолами), с целью укрепления структурной матрицы [16]. Его добавление к исходной формуле смеси палчатого проса и пшеничной муки в соотношении 50:50 с ксантановой камедью в качестве связующего вещества поддерживало сцепление матрицы, значительно улучшая твердость, термическую стабильность за счет увеличения плотности материала и жесткости. Последующее контролируемое выпекание при 180 °С обеспечило получение прочных, трещиностойких и термостойких контейнеров. Жесткость и твердость разработанных мисок увеличивались на 18% с увеличением концентрации ПД. Сообщается, что увеличение твердости обусловлено присутствием различных ксилоолигосахаридов, которые изменяют вязкоупругую природу ПД [16]. Аналогичная исследовательская работа была проведена Niu и др., где авторы разработали биоразлагаемое волокно из кукурузного крахмала и жома с покрытием из ПДМС для формирования композитного материала на основе крахмала и целлюлозы для столовых приборов [61]. Волокно жома использовалось в качестве армирующего агента, что улучшило механические свойства разработанных столовых приборов. Было отмечено, что из-за увеличения концентрации жома прочность на растяжение и удлинение при разрыве улучшились до значений 22,4 МПа и 11,5% соответственно, что превосходит показатели пластика. Улучшение механических свойств было обусловлено эффективной передачей напряжения и уменьшением количества дефектов между крахмалом и волокном на границе раздела [62]. В другом исследовании съедобные чашечки на основе сорго были разработаны с помощью комбинации предварительной обработки, подбора рецептуры и термической оптимизации. Обжарка сорго усилила клейстеризацию крахмала и реакцию Майяра, что привело к образованию более слабых, но термостойких структур. При прорастании происходят ферментативные изменения, а также улучшается текстура и упругость крахмально-белковой матрицы. Изменяя концентрацию просяной муки в пшеничной муке (17,5:2,5), чашечки становились более плотными и менее пористыми, со способностью удерживать больше жидкости. Добавление небольшого количества масла и джаггери способствовало увеличению сцепления, делая матрицу более связанной. Контролируемая температура и время выпечки (70 °С) способствовали получению равномерной структуры (без трещин). Проведенные испытания показали, что менее пористые варианты требовали большего усилия для разрушения, что означало большую стабильность из-за улучшенных механи-

ческих свойств. Анализ FTIR также выявил молекулярную перестройку, что способствовало термостойкости и внутренним связям [44].

Прочность и долговечность также повышаются за счет включения растительных волокон в белковые матрицы. Увеличение гибкости и уменьшение водопоглощения наблюдалось при добавлении 5% волокон стебля ипомеи (*Ipomoea aquatica*) в матрицу изолята соевого белка (ИСБ). Это армирование показало большую прочность на сжатие, прочность на изгиб и ударную вязкость, что позволяет столовым приборам сохранять свои свойства в характерных условиях эксплуатации в пищевой промышленности [63]. Результаты микрографии соответствовали композиту ИСБ, армированному волокнами кокосовой шелухи, 3%–5% относительно хорошо диспергированы, но 7%–10% волокон кокосовой шелухи агломерированы, тем самым влияя на механические и биокompозитные свойства [63]. Создание многослойных биокompозитов с использованием целлюлозы полученной из комбучи, с добавлением желатина и дополнительно шито посредством реакций Майяра, что привело к высокой прочности на разрыв и гибкости с повышенной термо- и влагостойкостью [64]. Исследователи также предположили, что он на практике заменит традиционные столовые приборы на основе древесины. Эффект реакции Майяра привел к получению очень высокосшитого и прочного композита с прочностью на изгиб 117,27 МПа и твердостью со значением 76,6. Реакции влажного нагрева между белками и углеводами, такими как гороховый белок и пуллулан, приводят к образованию когезивных биополимерных сетей, которые могут значительно повысить прочность на разрыв и водостойкость по сравнению с необработанными аналогами из-за превосходной сшивки и улучшенной совместности между двумя биополимерами [64]. В исследовании Javier и соавторов формировали съедобные миски из семян льна и льняного жмыха в различные формы, такие как миски, тарелки и пирожные. Было отмечено, что съедобные пластины, изготовленные из льняного жмыха, имели самую высокую прочность на разрыв – 7,1 МПа по сравнению со всеми другими образцами [60]. В аналогичной работе Jaspal и др. разработали съедобные миски из проса кодо, куриного и мелкого проса для снижения количества пластиковых отходов. Результаты показали, что твердость увеличилась до 2,5 раз, что повысило структурную целостность мисок [24].

Триметафосфат натрия (ТМФН) — эффективный сшивающий агент в съедобных упаковочных материалах на основе белка и крахмала, позволяющий усилить механическую прочность, снизить растворимость в воде и улучшить термическую стабильность благодаря фосфатно-эфирным связям [24]. Лимонная кислота — легкодоступная пищевая поликарбонная кислота — подходит для процесса сшивания съедобных упаковочных материалов на основе полисахаридов и белка. В результате

этерификации она создает сложноэфирные связи с гидроксильными группами, содержащимися в крахмале и целлюлозе, и приводит к образованию сшитой сети с существенно повышенной механической прочностью и сниженной растворимостью в воде, а также длительной термической стабильностью [17]. Обработка разработанных контейнеров лимонной кислотой, возможно, снизит влагопроницаемость, что повысит устойчивость к деформации и набуханию, делая их полезными в тех случаях, когда съедобные стаканчики и миски должны содержать густые горячие жидкости, такие как подливки, макароны, сыр или макаронные изделия [66]. Разработка съедобных стаканчиков, мисок и ложек требует оптимизации ингредиентов и методов обработки для достижения баланса между механической прочностью, текстурой и устойчивостью к деформации.

В процессе использования или упаковки пищи, съедобные чашки, миски и ложки всегда будут подвергаться воздействию высокой влажности, масла и жира из-за общей природы потребляемой пищи. Следовательно, возникает необходимость покрытия для сохранения их структурной целостности. Результаты исследований подчеркивают успехи в разработке покрытий для съедобных чашек и мисок; по сути, столовых приборов. Эти покрытия не только обеспечивают защиту от масла и воды, но и безопасны для употребления человеком. Покрытия могут быть в основном, на основе воска, на основе полисахаридов и белков, композитными и многослойными. Натуральные воски, в частности полученные из насекомых, то есть шеллак, пчелиный воск, или растительного происхождения, то есть карнаубский воск, канделильский воск, воск рисовых отрубей, подсолнечный воск, соевый воск и кофейный лигнин, можно либо наносить на формованные съедобные материалы путем окунания, либо распылять на съедобные субстраты для получения равномерного слоя, образующего гидрофобное покрытие [67, 68, 69]. Покрытие окунанием создает проблему впитывания избыточной влаги, что может привести к разбуханию или дезориентации стаканчиков еще до того, как покрытие высохнет. Эту проблему можно эффективно решить, варьируя состав и распыляя покрытие с минимальным количеством растворителя. Использование этих покрытий позволяет добиться заметной гидрофобности и самоочищаемости съедобных чашек и мисок, в зависимости от сферы применения, особенно учитывая их устойчивость к маслам и слабым кислотам [34]. Помимо барьерного эффекта, стойкость, достигаемая благодаря покрытию, не повлияет на их съедобность.

Влажность является одним из критических параметров для съедобных стаканчиков и мисок. В съедобных стаканчиках и мисках достаточное количество влаги также устанавливает структурную целостность, предотвращая разбухание, размягчение и легкое разрушение. Поддержание влажности

может зависеть от качества, вкуса и органолептических свойств съедобных стаканчиков и мисок. Присутствие высокой влажности также увеличивает скорость ферментативной активности, что может привести к микробному загрязнению пищевых продуктов. Содержание влаги также влияет на механические свойства съедобных стаканчиков и мисок [70]. Полисахариды и белковые покрытия на основе хитозана, альгината натрия и крахмалов (например, пшеничного, кукурузного и картофельного) в сочетании с липофильными материалами, такими как пчелиный воск, олеиновая кислота или оливковое масло, и стабилизированные поверхностно-активными веществами, могут обеспечивать гораздо лучшую защиту от проницаемости для воды и масла [71, 72]. Более того, могут использоваться композитные и многослойные покрытия, включающие комбинацию различных биополимеров и других функциональных наноматериалов. Свойства покрытий в конечном итоге демонстрируют синергетическое улучшение как барьерных, так и механических свойств [73]. При введении коллагеновых волокон вместе с альгинатом натрия, поливинилбутиралем (ПВБ), нанофибриллами целлюлозы (НФЦ) и полидиметилсилоксаном (ПДМС) достигается превосходная водо- и маслостойкость покрытий при повышенной прочности на разрыв [34]. Такие композитные покрытия особенно перспективны в приложениях, где важна устойчивость материала к термическим или влажным условиям, но также требуется соответствие требованиям к пищевым продуктам. Съедобные стаканчики из матрицы печенья из сливочного масла, покрытые водостойкой пленкой из пектина и поливинилового спирта, показали улучшенную водостойкость. Это покрытие в сочетании с естественной структурой печенья позволило стаканчикам выдерживать любое давление как холодных, так и горячих напитков без деформации. Также наблюдалась устойчивость к уксусной кислоте и этиловому спирту, что указывает на барьерные свойства как для полярных, так и для неполярных жидкостей, хотя в этом случае не наблюдалось существенных изменений самого материала [34]. Исследование, проведенное Nehra и соавторами показало, что биоразлагаемая съедобная чаша с пальчиковым просом, неочищенным пальмовым сахаром, очищенной мукой и ксантановой камедью показало результаты испытаний на водо- и маслопоглощение [34]. Результаты показали, что разработанные съедобные чаши снизили водопоглощение и маслопоглощение до 3,34% и 5,83% соответственно, что позволяет сделать вывод о том, что сформированные съедобные чаши полезны для хранения жирных пищевых продуктов, таких как картофельные чипсы, пончики и картофель фри [16]. В 2025 году было проведено исследование авторами Meshram и другие, в котором были разработаны функциональные съедобные чашки с просом Кодо, модифицированным порошком гибискуса и гуаровой камедью. В этом исследовании авторы

сформулировали концентрацию порошка гибискуса, где высокая концентрация порошка гибискуса увеличивала барьер влажности до 8,5%, варьируясь в диапазоне более низкой активности воды [34]. Manivel и Paramasivam в 2024 году изготовили съедобные ложки на основе сорго с добавлением порошка гибискуса и цветков розы. В этом исследовании авторы установили, что содержание влаги в сформированных ложках на основе сорго составляло 5,32%, что значительно ниже [45]. Барьерные свойства съедобного покрытия, вероятно, будут менее эффективными при наличии дефектов поверхности. Чувствительность к влаге и прочность в значительной степени зависят от селективности и доли биополимеров, липидов и сшивающих агентов в составе. Крахмальные покрытия с большим содержанием амилозы обеспечивают большую прочность, но более восприимчивы к влаге. На эксплуатационные характеристики также влияет толщина покрытия: более толстые и субмикронные слои покрытия повышают водостойкость. Кроме того, для того чтобы быть принятыми потребителями, они должны быть однородными и иметь привлекательный внешний вид.

Функциональные свойства и срок годности. Долговечность и срок годности съедобных стаканчиков и мисок являются важным критерием определения их практичности и возможности промышленного использования. Более длительный срок годности обеспечивает более безопасное хранение без ущерба для качества, сохраняя целостность продукта и снижая риски для здоровья [45]. Использование съедобных стаканчиков и мисок с включенными функциональными биоактивными соединениями в упаковке пищевых продуктов является относительно недавней инновацией, которая все еще находится на стадии разработки в области устойчивой упаковки пищевых продуктов. Это решение способствует обеспечению пользы для здоровья в сочетании с удобством потребления съедобных столовых приборов, стаканчиков и мисок, а также соответствует требованиям потребителей к экологичности и многофункциональности продуктов. Съедобная упаковка также может служить пищевой добавкой, поскольку в нее могут быть включены биоактивные вещества, такие как антиоксиданты, пробиотики и растительные экстракты. Класс биоактивных веществ может включать антиоксиданты, пробиотики, растительные экстракты и другие разнообразные олеорезины и вкусовые соединения из природных источников [76]. Различные экстракты, богатые биоактивными соединениями, такими как антиоксиданты, могут быть извлечены из растительных источников и включены в разработанные столовые приборы. Например, съедобные чашки и миски, изготовленные с использованием таких материалов, как оливковый жмых, мука, сорго, будут обладать высоким содержанием витамина Е, полифенолов и омега-жирных кислот, которые обеспечивают антиоксидантный эффект, который

намного превосходит стандартную съедобную посуду из пшеничных отрубей или кукурузной муки. Кроме того, куркумин, полифенол, извлеченный из куркумы, всегда использовался из-за его противовоспалительных, антиоксидантных свойств и предполагаемых преимуществ для здоровья, что делает его эффективным дополнением к съедобным столовым приборам [17, 76]. Исследование, проведенное Manivel и др. показало, что съедобные ложки, изготовленные из муки сорго, пропитанной порошками из цветков гибискуса и розы, имеют большой потенциал в качестве жизнеспособных вариантов для замены одноразовых пластиковых столовых приборов. Добавление цветов повышает уровень микроэлементов, вкус, осязание и прочность, не делая их менее долговечными и биоразлагаемыми [45]. Потеря веса и микробный анализ съедобных ложек проводились методом общего количества микроорганизмов. В ходе исследования было отмечено, что разработанные обжаренные съедобные чашки с добавлением цветов имеют наименьшее общее количество микроорганизмов со значением  $10 \times 10^1$  КОЕ/г и потерю веса со значением 8,45% с добавлением цветов. Сформированные съедобные ложки из сорго были подвергнуты анализу с различными продуктами для определения удерживающей способности, и было установлено, что ложки имеют удерживающую способность 50 минут в лимонном соке, 60 минут в мороженом и 30 минут в горячих супах. Разработанные ложки, обогащенные цветками, хорошо сохранились в горячих супах, прошли испытание на падение, были безопасными на микробную и цитосовместимость, с наблюдаемой полной деградацией в течение 12 дней [34]. Следовательно, аналогичная методология может быть воспроизведена для съедобных чашек и мисок. Съедобные столовые приборы также могут служить носителями пробиотиков, которые используются для поддержания здоровья желудочно-кишечной системы, а также для расширения идеи съедобной упаковки как дополнительной добавки к пище [34]. Обширные исследования направлены на разработку инкапсулированных съедобных столовых приборов, обогащенных пробиотиками, которые обладают способностью защищать эти деликатные пробиотики и высвободить их в кишечнике [77]. Jaspal и соавторы провели исследование, в ходе которого разработали съедобные миски на основе проса в качестве альтернативы пластиковым стаканчикам. Полученные съедобные стаканчики использовались для хранения мороженого. Исследование показало, что мороженое не вытекло из миски, однако миски становились немного мягкими [24]. Также наблюдается новая тенденция к использованию экстрактов, таких как экстракт зеленого чая, орегано или базилик, которые обладают антимикробными, противогрибковыми и антиоксидантными свойствами, которые могут способствовать безопасности пищевых продуктов и сроку годности, а также соответствовать функциональным

требованиям самой упаковки [17]. Несмотря на то, что результаты обогащенной биоактивными веществами съедобной посуды кажутся перспективными существуют некоторые критические проблемы со стабильностью рецептуры, устойчивым, но эффективным источником для масштабируемости, коммерциализации, безопасности и, что наиболее важно, принятия потребителями. Сохранение химической стабильности и функциональной эффективности включенных биоактивных веществ во время обработки, хранения и потребления останется одной из самых сложных задач. Тепло, кислород, свет или любое изменение pH могут привести к разрушению этих чувствительных добавок (полифенолов, витаминов и пробиотиков) с течением времени, что в дальнейшем потребует технологий активной упаковки для увеличения срока годности самих мисок и чашек. Обеспечение достижения стабильного высвобождения является технически сложной задачей, особенно когда в единую матрицу включены различные биоактивные вещества. Добавление биоактивных веществ может придать продукту неприятные сенсорные ощущения, что снижает его приемлемость. Более того, безопасность и допустимые концентрации добавленных компонентов, особенно растительных экстрактов, требуют проведения полной токсикологической оценки, а также соответствия требованиям законодательства о пищевых продуктах. Для завоевания доверия потребителей необходимы прозрачная коммуникация и понятная маркировка.

5. Примеры использования съедобных столовых приборов в сети общественного питания

В настоящее время различные типы ресторанов и кафе уже используют эти виды съедобных стаканчиков и мисок, привлекая потребителей по всему миру. Arva Innovations предлагает съедобные столовые приборы, включая съедобные трубочки и ложки, с различными вкусами. Съедобные столовые приборы изготавливаются из зерновых, таких как кукуруза, рис и пшеница. Съедобный стаканчик, разработанный Arva Innovations, удерживает жидкость около 4-5 минут, в то время как ложки служат 30 минут [78]. Vakeys — одна из первых индийских компаний в сфере общественного питания, начавших производить съедобные столовые приборы из сорго, пшеницы и риса. Они выпускают ложки с разными вкусами, предлагая клиентам большее разнообразие [79]. Некоторые другие индийские кафе, такие как Third Wave Coffee (Бангалор), Blue Tokai Coffee (Дели), Chai Point (Мумбаи) и Café Peter (Пуна), подают кофе и чай в съедобных вафельных стаканчиках с различными вкусами. Съедобные стаканчики более функциональны и дарят посетителям дополнительный вкус и сенсорное наслаждение (съедобные вафельные стаканчики). Инновации в съедобных столовых приборах привели к созданию различных компаний и стартапов, движущих преобразующее движение к устойчивому питанию. Cupffee - это европейская компания,

которая разработала первую в мире компанию по производству съедобных чашек для кофе, чтобы сократить отходы и загрязнение окружающей среды. Съедобная чашка экологична, изготовлена из натуральных зерен и кокосового масла и обладает восхитительным ароматом, напоминающим свежее испеченное печенье. Компания утверждает, что разработанные чашки выделяют 0,6 кг углекислого газа на 10 чашек [80]. Stroodles, британская компания, разработала различные виды съедобных столовых приборов на основе пасты, которые потребляют клиенты. Stroodles известны своей устойчивостью и могут хранить горячие и холодные блюда в съедобных чашках и мисках в течение длительного времени. Эти съедобные столовые приборы от Stroodles полностью компостируются за 30 дней, обеспечивая устойчивость окружающей среды [81]. Сингапурская компания Crunchy Cutlery фокусируется на использовании растительных столовых приборов с различными вкусами и дизайном [82]. Создание различных компаний и стартапов представляет собой эффективный путь к циклической экономике в реальном мире. Эти инновации не только минимизируют загрязнение пластиком, но и вдохновляют потребителей на ответственное потребление. Авиакомпании и поезда выбрасывают миллионы тонн пластиковых отходов, что приводит к ухудшению состояния окружающей среды. Авиакомпания Air New Zealand выступила с инициативой подачи кофе в съедобных стаканчиках на основе ванили, чтобы минимизировать отходы. Эти стаканчики производит компания Twice, и они разработаны для сокращения потребления одноразовых стаканчиков авиапассажирами. Использование съедобных стаканчиков во время путешествий способствует распространению информации о бренде, формируя его имидж инновационного и экологически ответственного бренда. Съедобные стаканчики дарят чувственное наслаждение, одновременно повышая осведомленность клиентов об устойчивом развитии и воздействии на окружающую среду.

6. Проблемы и перспективы

Продолжающееся развитие инновационных съедобных столовых приборов, таких как съедобные чашки, миски и съедобные ложки, расширяет концепцию съедобной упаковки, которую можно потреблять без какого-либо риска для здоровья. Они могут быть доступны в различных формах, таких как пакеты, чашки, миски и ложки для пищевых продуктов, но пока их использование ограничено. Для решения этих проблем будущие исследования должны быть направлены на улучшение стабильности при хранении в различных условиях окружающей среды. Кроме того, обеспечение производительности при различной влажности, температуре, стандартных правилах и воздействии имеет решающее значение для длительного использования, коммерческой жизнеспособности и безопасного долгосрочного хранения [34]. Срок годности остается одной из самых важных проблем для съедобных столовых приборов.

добных столовых приборов. Большинство продуктов на основе крахмала и злаков демонстрируют ограниченный жизненный цикл при контакте с горячими или водянистыми продуктами. Например, чашки и ложки на основе вафель могут удерживать жидкость всего 15–20 минут, прежде чем потерять целостность, что ограничивает их использование в условиях длительного потребления [34]. Короткое время выдержки не только снижает функциональность, но и ограничивает применение в ресторанах или кафе, где напитки потребляются медленно. Проблема возникает из-за гидрофильной природы крахмала и белков, которые набухают при поглощении воды, что приводит к быстрой потере механической прочности. Гигроскопичность полисахаридов ускоряет микробную порчу, поскольку влажность увеличивает активность воды, способствуя росту бактерий и грибов. Съедобные миски из сушеных фруктов или овощей также восстанавливают водный баланс при контакте с жидкостью, что еще больше снижает их пригодность к использованию. Хотя антиоксиданты и антимикробные вещества добавляются для повышения стабильности, их использование в высоких концентрациях часто нарушает целостность материала и изменяет сенсорные свойства [83]. Решение этих ограничений предполагает использование многослойных систем и биокompозитов. Например, съедобные стаканчики, изготовленные из многослойных композитов на основе крахмала и белка в сочетании с гидрофобными слоями (липиды, воски, зеиновые пленки), могут обеспечить повышенную устойчивость к влаге [84]. Гигроскопичность материалов съедобных столовых приборов создает двойную проблему: снижение механической прочности и повышенную восприимчивость к росту микробов. Поглощение влаги приводит к размягчению, растрескиванию и микробному загрязнению, особенно во влажных условиях хранения [16]. Эта проблема усугубляется отсутствием исследований микробной безопасности, адаптированных для съедобной упаковки. В отличие от обычных пластиков, которые инертны, съедобные столовые приборы могут разлагаться, как и сама пища. Таким образом, исследования микробного воздействия должны быть разработаны для моделирования реалистичных сценариев хранения и потребления, включая испытания на повышенные температуру, время воздействия и стресс-тесты на влажность. Без таких результатов данных исследований проблемы безопасности ограничивают принятие потребителями и разрешения на использование регулирующими органами. Возможные решения существующих проблем включают покрытие съедобных столовых приборов пищевыми антимикробными веществами (например, хитозаном, маслом корицы, экстрактом гвоздики) или включение полифенольных соединений в качестве регуляторов влажности [85]. Однако их необходимо тщательно дозировать, чтобы не было ухудшения органолептических показателей. В дальнейшем для

безопасного коммерческого внедрения необходимы систематические оценки микробной стабильности в условиях контролируемой влажности, а также исследования биodeградации и компостируемости в соответствии со стандартами ISO.

Потребители могут отказаться от съедобных ложек или чашек из-за несовместимости вкуса, несоответствия текстуры или ограниченной пригодности для горячих напитков [83]. Более того, нет четкого понимания относительно того, следует ли съедобные столовые приборы употреблять в пищу после использования или выбрасывать, что вызывает опасения по поводу гигиены, безопасности пищевых продуктов и социальной приемлемости. Исследования среди потребителей показывают, что восприятие улучшается, когда съедобные столовые приборы позиционируются как дополнительный продукт питания, а не обязательная замена пластику [86]. Брендинг, подчеркивающий устойчивость, безопасность и новизну, также улучшает восприятие. Будущие исследования должны включать сенсорные исследования потребителей, тесты на кросс-культурную приемлемость и анализ готовности платить, чтобы привести разработку продукта в соответствие с ожиданиями потребителей. Критическим недостатком съедобных столовых приборов является механическая хрупкость. Матрицы на основе крахмала и муки обеспечивают жесткость, но легко трескаются под нагрузкой, особенно при транспортировке и погрузочно-разгрузочных работах. Белки, такие как соя, сыворотка или глютен, могут улучшить гибкость, но условия обработки, такие как температура выпекания, скорость сушки или экструзия, значительно влияют на конечную прочность [87]. Традиционная выпечка и компрессионное формование сохраняют съедобность, но менее масштабируемы для массового производства. Напротив, экструзия и термоформование могут обеспечить промышленную переработку, но могут денатурировать белки или включать сшивку за пределами безопасности пищевых продуктов, делая продукт несъедобным [88]. Таким образом, разработчикам необходимо найти баланс между масштабируемостью и съедобностью. Исследования в области методов мягкой экструзии, ферментативной сшивки и гибридной обработки предлагают перспективные решения.

В настоящее время большая часть съедобных столовых приборов производится в небольших масштабах или на пилотных предприятиях, а крупномасштабная коммерциализация ограничена из-за высоких производственных затрат и энергоемких процессов [34]. Такие процессы, как выпечка, формование, экструзия и сушка, вносят значительный вклад в потребление энергии и увеличивают общие расходы. Одним из перспективных подходов является валоризация побочных продуктов агропромышленного комплекса, таких как фруктовые выжимки, зерновые отруби, пивная дробина) и растительные остатки. Кроме того, энергосберегающие методы

сушки и формования, включая вакуумную сушку, солнечную сушку и сушку с использованием микроволнового излучения, могут дополнительно снизить эксплуатационные расходы по сравнению с традиционными высокотемпературными печами.

Неопределенность в нормативном регулировании остается ключевой проблемой в коммерциализации съедобных столовых приборов. Хотя такие продукты классифицируются как пищевые продукты, в настоящее время не существует гармонизированного международного стандарта, который одновременно рассматривал бы съедобность, безопасность при контакте с пищевыми продуктами, биоразлагаемость и компостируемость [89]. В Европейском союзе съедобные столовые приборы должны соответствовать Регламенту [ЕС] № 1935/2004, который гарантирует безопасность пищевых продуктов, но не содержит рекомендаций по показателям производительности, таким как способность удерживать жидкость, механическая прочность или сенсорная стабильность [34]. В США ингредиенты должны быть сертифицированы FDA по стандарту GRAS, однако многие новые ингредиенты не имеют достаточного количества данных об использовании в пищевых продуктах, что создает нормативную неопределенность [90]. В РФ и Республике Беларусь отсутствует нормативный документ на съедобную посуду и ее использование не установлено. В отличие от традиционных пластиков или материалов, контактирующих с пищевыми продуктами, съедобные столовые приборы не имеют установленных стандартов термостойкости, микробной безопасности, долговечности и сенсорных качеств. В результате производителям сложно подтверждать эксплуатационные характеристики продукции, а регулирующим органам — сертифицировать её соответствие [91]. Кроме того, проблемы с маркировкой возникают, когда продукты продаются как «съедобные» или «биоразлагаемые» без стандартизированных критериев, что может вводить потребителей в заблуждение и подрывать доверие рынка. Неправильная маркировка также может подвергнуть производителей юридическим и репутационным рискам [92]. Для решения этих проблем необходимы разработка и утверждение комплексных стандартов, включающие оценку безопасности ингредиентов, тестирование на миграцию, сенсорную оценку и оценку воздействия на окружающую среду [93]. Сотрудничество между ISO, Codex Alimentarius, национальными регулируемыми органами и заинтересованными сторонами отрасли имеет решающее значение для разработки четких руководств по производству, маркировке и сертификации. Эти шаги будут способствовать доверию потребителей и более широкому внедрению продукции на рынок, обеспечивая безопасность, надежность и достоверность экологических заявлений.

## Выводы

Растущая обеспокоенность по поводу загрязнения пластиком, микропластиком и его биоаккумуляции ускорила переход к устойчивой и съедобной посуде из натуральных биополимеров. Полисахариды, белки и липиды широко используются в качестве съедобных полимеров благодаря своей биоразлагаемости, возобновляемости, биосовместимости и экологичности по сравнению с синтетическими пластиками на основе нефти. Поскольку потребители всё чаще ищут альтернативы одноразовым пластиковым и бумажным стаканчикам, мискам и ложкам с покрытием из-за экологических проблем, сфера съедобных столовых приборов стремительно развивается. Обзор научных исследований за последние пять лет показал, что для производства съедобных биоматериалов рассматривают крахмалы, просяную муку, растительные волокна и белки, такие как соя, казеин и желатин, которые обладают заметными экологическими преимуществами по сравнению с традиционными пластиками. Для повышения структурной целостности и масштабируемости оптимизируются такие производственные процессы, как формование, выпечка, термическое прессование и экструзия. Кроме того, стратегии улучшения, включая химическое сшивание пищевыми агентами, гидрофобные покрытия с использованием пищевых восков и композитные составы на основе белка и полисахарида, продемонстрировали значительное улучшение механической прочности, влагостойкости и потребительской приемлемости. Несмотря на эти достижения, ряд препятствий ограничивает широкое внедрение съедобных приборов и посуды. Оценка эксплуатационных характеристик затруднена отсутствием стандартизированных методов испытаний по таким критериям, как долговечность, водо- и термостойкость, а также сенсорная совместимость. Широкомасштабное использование в сети общественного питания также затрудняют производственные затраты, ограничения по обработке, нестабильность материалов и ограниченный срок годности влагочувствительных продуктов. Для устранения этих пробелов необходимы целенаправленные междисциплинарные исследования, объединяющие зелёную химию, материаловедение, пищевую инженерию и сенсорный дизайн. Соблюдение нормативных требований и просвещение потребителей также имеют решающее значение для обеспечения безопасности, приемлемости и надлежащего использования. Разработка высокоэффективных съедобных чашек, мисок и ложек, которые будут функционально надёжными, безопасными и коммерчески выгодными, внесет значительный вклад в развитие устойчивой упаковки пищевых продуктов и инициатив по достижению безотходного производства. Преодоление этих текущих проблем не только будет способствовать практическому внедрению съедобных столовых приборов, но и укрепит экологическую устойчивость и снизит глобальную зависимость от одноразового пластика.

## Литература

- [1] Patil T. D., Deshmukh R. K., and Gaikwad K. K. Microbial Exopolysaccharide-Based Flexible Bioactive Film With *Murraya koenigii* Berries' Extract for Food Packaging: Physico-Chemical, Microstructural, Antioxidant, and Antimicrobial Properties // *ACS Food Science & Technology*. 2025.V. 5. pp. 695–708. DOI 10.1021/acsfoodscitech.4c00848
- [2] Бурак Л. Ч., Ермошина Т.В., Королева Л. П. Загрязнение почвенной среды микропластиком, факторы влияния и экологические риски // *Экология и промышленность России*. 2023. Т. 27, № 5. С. 58–63. DOI 10.18412/1816-0395-2023-5-58-63
- [3] Novakovic K., Thumbarathy D., Peeters M., et al. Zero-Waste Circular Economy of Plastic Packaging: The Bottlenecks and a Way Forward // *Sustainable Materials and Technologies*. 2023.V. 38. e00735. DOI 10.1016/J.SUSMAT.2023.E00735
- [4] Cech R., Zaller J. G., Lyssimachou A., Clausing P. And Linhart C. Pesticide Drift Mitigation Measures Appear to Reduce Contamination of Non-Agricultural Areas, but Hazards to Humans and the Environment Remain // *Science of the Total Environment*. 2023.V. 854. p. 158814. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.158814
- [5] Бурак Л. Ч., Писарик М.И., Богданов Н. П. Загрязнение микропластиком окружающей среды и потенциальные угрозы для здоровья человека // *Научное обозрение. Биологические науки*. 2024. № 2. С. 33–40. DOI 10.17513/srbs.1362
- [6] Kumar L., Tyagi, P. Lucia, L. and Pal L. Innovations in Edible Packaging Films, Coatings, and Antimicrobial Agents for Applications in Food Industry // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025. V. 24, no. 4. e70217. DOI 10.1111/1541-4337.70217.
- [7] Roy S., Pillai A. R. S., Madhumita M., Joshi R., Zhang W., and Shankar S. A Comprehensive Review on Recent Advances in Plant Flour-Based Edible Tableware // *International Journal of Biomaterials*. 2025, no. 1.p.6206991. DOI 10.1155/ijbm/6206991
- [8] Moeini A., Pedram P., Fattahi E., Cerruti P., and Santagata G. Edible Polymers and Secondary Bioactive Compounds for Food Packaging Applications: Antimicrobial, Mechanical, and Gas Barrier Properties // *Polymers*. 2022. V. 14, no. 12. P. 2395. DOI 10.3390/polym14122395.
- [9] Gupta D., Lall A., Kumar S., Patil T.D., and Gaikwad K.K. Plant-Based Edible Films and Coatings for Food-Packaging Applications: Recent Advances, Applications, and Trends // *Sustainable Food Technology*. Royal Society of Chemistry. 2025.V. 2 [5]. pp. 1428–1455. DOI 10.1039/d4fb00110a
- [10] Kumar N., Pratibha J., Prasad et al. Recent Trends in Edible Packaging for Food Applications—Perspective for the Future // *Food Engineering Reviews*. 2023. V.15, no. 4. pp. 718–747. DOI 10.1007/s12393-023-09358-y
- [11] Zhao Y., Li B., Li C., et al. Comprehensive Review of

## References

- [1] Patil T. D., Deshmukh R. K., and Gaikwad K. K. Microbial Exopolysaccharide-Based Flexible Bioactive Film With *Murraya koenigii* Berries' Extract for Food Packaging: Physico-Chemical, Microstructural, Antioxidant, and Antimicrobial Properties // *ACS Food Science & Technology*. 2025.V. 5. pp. 695–708. DOI 10.1021/acsfoodscitech.4c00848
- [2] Burak L. Ch., Ermoshina T. V., Koroleva L. P. Pollution of the soil environment with microplastics, influencing factors and environmental risks // *Ecology and Industry of Russia*. 2023. Vol. 27, No. 5. P. 58–63. DOI 10.18412/1816-0395-2023-5-58-63
- [3] Novakovic K., Thumbarathy D., Peeters M., et al. Zero-Waste Circular Economy of Plastic Packaging: The Bottlenecks and a Way Forward // *Sustainable Materials and Technologies*. 2023.V. 38. e00735. DOI 10.1016/J.SUSMAT.2023.E00735
- [4] Cech R., Zaller J. G., Lyssimachou A., Clausing P. And Linhart C. Pesticide Drift Mitigation Measures Appear to Reduce Contamination of Non-Agricultural Areas, but Hazards to Humans and the Environment Remain // *Science of the Total Environment*. 2023.V. 854. p. 158814. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.158814
- [5] Burak L. Ch., Pisarik M. I., Bogdanov N. P. Microplastic pollution of the environment and potential threats to human health // *Scientific Review. Biological Sciences*. 2024. No. 2. P. 33–40. DOI 10.17513/srbs.1362
- [6] Kumar L., Tyagi, P. Lucia, L. and Pal L. Innovations in Edible Packaging Films, Coatings, and Antimicrobial Agents for Applications in Food Industry // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025. V. 24, no. 4. e70217. DOI 10.1111/1541-4337.70217.
- [7] Roy S., Pillai A. R. S., Madhumita M., Joshi R., Zhang W., and Shankar S. A Comprehensive Review on Recent Advances in Plant Flour-Based Edible Tableware // *International Journal of Biomaterials*. 2025, no. 1.p.6206991. DOI 10.1155/ijbm/6206991
- [8] Moeini A., Pedram P., Fattahi E., Cerruti P., and Santagata G. Edible Polymers and Secondary Bioactive Compounds for Food Packaging Applications: Antimicrobial, Mechanical, and Gas Barrier Properties // *Polymers*. 2022. V. 14, no. 12. P. 2395. DOI 10.3390/polym14122395.
- [9] Gupta D., Lall A., Kumar S., Patil T.D., and Gaikwad K.K. Plant-Based Edible Films and Coatings for Food-Packaging Applications: Recent Advances, Applications, and Trends // *Sustainable Food Technology*. Royal Society of Chemistry. 2025.V. 2 [5]. pp. 1428–1455. DOI 10.1039/d4fb00110a
- [10] Kumar N., Pratibha J., Prasad et al. Recent Trends in Edible Packaging for Food Applications—Perspective for the Future // *Food Engineering Reviews*. 2023. V.15, no. 4. pp. 718–747. DOI 10.1007/s12393-023-09358-y
- [11] Zhao Y., Li B., Li C., et al. Comprehensive Review of Polysaccharide-Based Materials in Edible Packaging:

- Polysaccharide-Based Materials in Edible Packaging: A Sustainable Approach // *Foods*. 2021. V. 10, no. 8.P.1845. DOI 10.3390/foods10081845
- [12] Kumar S., Libertin A., Prakash A., Manikandan, and Sharathbabu. Study on the Different Materials for Making Edible Plates for Sustainable Environment // *AIP Conference Proceedings*. 2024.V.2962. p. 020005. DOI 10.1063/5.0192290.
- [13] Zhang W., Roy S., Ezati P., Yang D. P, and Rhim J. W. Tannic Acid: A Green Crosslinker for Biopolymer-Based Food Packaging Films // *Trends in Food Science & Technology*. 2023.V. 136. pp.11–23. DOI 10.1016/J.TIFS.2023.04.004
- [14] Patil T. D., Tripathi S., and Gaikwad K.K. Effect of Kefiran-Guar Gum-Based Edible Coating Infused With *Murraya Koenigii* Berry Extract on Quality of Button Mushroom [*Agaricus bisporus*] During Postharvest Storage // *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2024.V.18, no. 7.pp. 6264–6273. DOI 10.1007/s11694-024-02645-0
- [15] Kocira A., K. Kozłowicz K., Panasiewicz M., Staniak E., Szpunar-Krok, and Hortyńska P. Polysaccharides as Edible Films and Coatings: Characteristics and Influence on Fruit and Vegetable Quality—A Review // *Agronomy* . 2021. V.11,no. 5.p. 813. DOI 10.3390/agronomy11050813
- [16] Nehra A., Biswas D., and Roy S. Fabrication of Brewer’s Spent Grain Fortified Bio-Based Edible Bowls: A Promising Alternative to Plastic Containers // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024.V. 14, no. 14. pp. 16425–16434. DOI 10.1007/s13399-022-03698-1.
- [17] Бурак Л. Ч. Обзор разработок биоразлагаемых упаковочных материалов для пищевой промышленности // *Ползуновский вестник*. 2023. № 1. С. 91-105. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012
- [18] Proserpio C., Bresciani A., Marti A., and Pagliarini E. Legume Flour or Bran: Sustainable, Fiber-Rich Ingredients for Extruded Snacks? // *Foods*. 2020. V. 9, no. 11.p. 1680. DOI 10.3390/foods9111680.
- [19] Salunkhe S. R., Shirsat B., Sawant A., Mohod A., and Kolhe P. Development of Nutritive Enriched Edible Dessert Cups // *International Journal of Advanced Biochemistry Research*. 2024. V. 8, no. 10. pp. 529–533. DOI 10.33545/26174693.2024.v8.i10g.2529
- [20] Subbuvel M., Mohan R.,Dubey U., Gopaldaswamy Pillai U.T., and Kavan P. Fabrication of Nutritional Edible Bowls With Wheat Bran, Multigrain Powder, Refined Flour, Flax Seed Powder, Fenugreek Essential Oil, and Jaggery // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2025.V.105, no. 5. pp. 2836–2842. DOI 10.1002/jsfa.14057
- [21] Meshram B. P., Jain P., and Gaikwad K.K. Innovative Development of Kodo Millet [*Paspalum scrobiculatum*]-Based Functional Edible Cups Modified With Hibiscus Powder and Guar Gum: An Eco-Efficient Resource Utilization // *ACS Food Science & Technology*. 2025. V. 5, no. 2. pp. 788–799. DOI 10.1021/acsfoodscitech.4c00985
- A Sustainable Approach // *Foods*. 2021. V. 10, no. 8.P.1845. DOI 10.3390/foods10081845
- [12] Kumar S., Libertin A., Prakash A., Manikandan, and Sharathbabu. Study on the Different Materials for Making Edible Plates for Sustainable Environment // *AIP Conference Proceedings*. 2024.V.2962. p. 020005. DOI 10.1063/5.0192290.
- [13] Zhang W., Roy S., Ezati P., Yang D. P, and Rhim J. W. Tannic Acid: A Green Crosslinker for Biopolymer-Based Food Packaging Films // *Trends in Food Science & Technology*. 2023.V. 136. pp.11–23. DOI 10.1016/J.TIFS.2023.04.004
- [14] Patil T. D., Tripathi S., and Gaikwad K.K. Effect of Kefiran-Guar Gum-Based Edible Coating Infused With *Murraya Koenigii* Berry Extract on Quality of Button Mushroom [*Agaricus bisporus*] During Postharvest Storage // *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2024.V.18, no. 7.pp. 6264–6273. DOI 10.1007/s11694-024-02645-0
- [15] Kocira A., K. Kozłowicz K., Panasiewicz M., Staniak E., Szpunar-Krok, and Hortyńska P. Polysaccharides as Edible Films and Coatings: Characteristics and Influence on Fruit and Vegetable Quality—A Review // *Agronomy* . 2021. V.11,no. 5.p. 813. DOI 10.3390/agronomy11050813
- [16] Nehra A., Biswas D., and Roy S. Fabrication of Brewer’s Spent Grain Fortified Bio-Based Edible Bowls: A Promising Alternative to Plastic Containers // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024.V. 14, no. 14. pp. 16425–16434. DOI 10.1007/s13399-022-03698-1.
- [17] Burak L. Ch. Review of the development of biodegradable packaging materials for the food industry // *Polzunovsky Vestnik*. 2023. No. 1. P. 91-105. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012
- [18] Proserpio C., Bresciani A., Marti A., and Pagliarini E. Legume Flour or Bran: Sustainable, Fiber-Rich Ingredients for Extruded Snacks? // *Foods*. 2020. V. 9, no. 11.p. 1680. DOI 10.3390/foods9111680.
- [19] Salunkhe S. R., Shirsat B., Sawant A., Mohod A., and Kolhe P. Development of Nutritive Enriched Edible Dessert Cups // *International Journal of Advanced Biochemistry Research*. 2024. V. 8, no. 10. pp. 529–533. DOI 10.33545/26174693.2024.v8.i10g.2529
- [20] Subbuvel M., Mohan R.,Dubey U., Gopaldaswamy Pillai U.T., and Kavan P. Fabrication of Nutritional Edible Bowls With Wheat Bran, Multigrain Powder, Refined Flour, Flax Seed Powder, Fenugreek Essential Oil, and Jaggery // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2025.V.105, no. 5. pp. 2836–2842. DOI 10.1002/jsfa.14057
- [21] Meshram B. P., Jain P., and Gaikwad K.K. Innovative Development of Kodo Millet [*Paspalum scrobiculatum*]-Based Functional Edible Cups Modified With Hibiscus Powder and Guar Gum: An Eco-Efficient Resource Utilization // *ACS Food Science & Technology*. 2025. V. 5, no. 2. pp. 788–799. DOI 10.1021/acsfoodscitech.4c00985
- [22] Andrejko D., and Blicharz-Kania A. An Assessment of the Strength and Physical Properties of Edible

- [22] Andrejko D., and Blicharz-Kania A. An Assessment of the Strength and Physical Properties of Edible Tableware From Flax Seed and Flaxseed Cake // *Materials*. 2024.V. 17, no. 22.p. 5510. DOI 10.3390/ma17225510
- [23] Molu K. R., Aneena E., Panjikaran S. T., Sharon C., and LakshmyP. Standardization and Quality Evaluation of Wheat Flour Based Edible Tableware // *Journal of Research ANGRAU*. 2024.V. 52, no. 1.pp.94–102. DOI 10.58537/jorangrau.2024.52.1.11
- [24] Jaspal S., Aggarwal A., Verma A., Kumar R., Sharma P., Devpal R. Development of Multi-Millet Edible Bowls Using Little, Kodo & Barnyard: A Sustainable Alternative to Plastic Cups // *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2024.V. 18, no. 8.pp. 6485–6493. DOI 10.1007/s11694-024-02664-x
- [25] Syarifuddin A., Muflih M.H, Izzah N., Fadillah U., Ainani A.F, and Dirpan A. Pectin-Based Edible Films and Coatings: From Extraction to Application on Food Packaging Towards Circular Economy - A Review // *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* . 2025.V.9.p. 100680. DOI 10.1016/J.CARPTA.2025.100680
- [26] Бурак Л. Ч., Карбанович В.И. Антиоксидантная активность микрозелени, потенциал использования. Обзор предметного поля // *Научное обозрение. Биологические науки*. 2023. № 4. С. 58-70. DOI 10.17513/srbs.1342
- [27] Vyshali P., Muthamma P.B. Development of an Edible and Biodegradable Tableware Using Fruit Wastes – An Alternative to Plastic Tableware // *International Journal of Food and Nutritional Sciences*. 2022. V. 11, no. 4. p.8590. DOI 10.4103/ijfans\_114\_22
- [28] Siddiqui B., Ahmad A., Yousuf O., Younis K. Exploring the Potential of Mosambi Peel and Sago Powder in Developing Edible Spoons // *Sustainable Food Technology*. 2023.V. 1, no. 6.p. 921–929. DOI 10.1039/D3FB00111C.
- [29] Dordevic D., Necasova L., Antonic B., Jancikova S., Tremlová B. Plastic Cutlery Alternative: Case Study With Biodegradable Spoons // *Foods* .2021. V10,no. 7.p.1612. DOI 10.3390/foods10071612
- [30] Zinina O., Merenkova S., Galimov D. Development of Biodegradable Alginate-Based Films With Bioactive Properties and Optimal Structural Characteristics With Incorporation of Protein Hydrolysates // *Sustainability*. 2023.V. 15 no. 20.p. 15086. DOI 10.3390/su152015086.
- [31] Akshaya S., Nathanael A. J. A Review on Hydrophobically Associated Alginates: Approaches and Applications // *ACS Omega* 9. 2024.V. no. 4. pp. 42464262. DOI 10.1021/acsomega.3c08619
- [32] Jiang A., Patel R., Padhan B., et al. Chitosan Based Biodegradable Composite for Antibacterial Food Packaging Application // *Polymers*. 2023. V. 15, no. 10. p.2235. DOI 10.3390/polym15102235.
- [33] Бурак Л. Ч. Состояние и перспективы использования морских водорослей в качестве источника белка и биологически активных веществ // *Sciences of Tableware From Flax Seed and Flaxseed Cake // Materials*. 2024.V. 17, no. 22.p. 5510. DOI 10.3390/ma17225510
- [23] Molu K. R., Aneena E., Panjikaran S. T., Sharon C., and LakshmyP. Standardization and Quality Evaluation of Wheat Flour Based Edible Tableware // *Journal of Research ANGRAU*. 2024.V. 52, no. 1.pp.94–102. DOI 10.58537/jorangrau.2024.52.1.11
- [24] Jaspal S., Aggarwal A., Verma A., Kumar R., Sharma P., Devpal R. Development of Multi-Millet Edible Bowls Using Little, Kodo & Barnyard: A Sustainable Alternative to Plastic Cups // *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2024.V. 18, no. 8.pp. 6485–6493. DOI 10.1007/s11694-024-02664-x
- [25] Syarifuddin A., Muflih M.H, Izzah N., Fadillah U., Ainani A.F, and Dirpan A. Pectin-Based Edible Films and Coatings: From Extraction to Application on Food Packaging Towards Circular Economy - A Review // *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* . 2025.V.9.p. 100680. DOI 10.1016/J.CARPTA.2025.100680
- [26] Burak L. Ch., Karbanovich V. I. Antioxidant activity of microgreens, potential of use. Review of the subject field // *Scientific review. Biological sciences*. 2023. No. 4. P. 58-70. DOI 10.17513/srbs.1342
- [27] Vyshali P., Muthamma P.B. Development of an Edible and Biodegradable Tableware Using Fruit Wastes – An Alternative to Plastic Tableware // *International Journal of Food and Nutritional Sciences*. 2022. V. 11, no. 4. p.8590. DOI 10.4103/ijfans\_114\_22
- [28] Siddiqui B., Ahmad A., Yousuf O., Younis K. Exploring the Potential of Mosambi Peel and Sago Powder in Developing Edible Spoons // *Sustainable Food Technology*. 2023.V. 1, no. 6.p. 921–929. DOI 10.1039/D3FB00111C.
- [29] Dordevic D., Necasova L., Antonic B., Jancikova S., Tremlová B. Plastic Cutlery Alternative: Case Study With Biodegradable Spoons // *Foods* .2021. V10,no. 7.p.1612. DOI 10.3390/foods10071612
- [30] Zinina O., Merenkova S., Galimov D. Development of Biodegradable Alginate-Based Films With Bioactive Properties and Optimal Structural Characteristics With Incorporation of Protein Hydrolysates // *Sustainability*. 2023.V. 15 no. 20.p. 15086. DOI 10.3390/su152015086.
- [31] Akshaya S., Nathanael A. J. A Review on Hydrophobically Associated Alginates: Approaches and Applications // *ACS Omega* 9. 2024.V. no. 4. pp. 42464262. DOI 10.1021/acsomega.3c08619
- [32] Jiang A., Patel R., Padhan B., et al. Chitosan Based Biodegradable Composite for Antibacterial Food Packaging Application // *Polymers*. 2023. V. 15, no. 10. p.2235. DOI 10.3390/polym15102235.
- [33] Burak L. Ch. Status and prospects of using seaweed as a source of protein and biologically active substances // *Sciences of Europe*. 2024. No. 143 [143]. P. 4-13. DOI 10.5281/zenodo.12540670
- [34] Meshram B. P., Patil T. D., Tripathi S., et al. A Comprehensive Review of Bio-Based Edible Cutlery [Cups, Bowls, and Spoons) for Food and Beverage Serving Applications // *Comprehensive Reviews in*

- Europe. 2024. № 143 [143]. С. 4-13. DOI 10.5281/zenodo.12540670
- [34] Meshram B. P., Patil T. D., Tripathi S., et al. A Comprehensive Review of Bio-Based Edible Cutlery [Cups, Bowls, and Spoons) for Food and Beverage Serving Applications // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025.V. 24, no. 6. e70341. DOI 10.1111/1541-4337.70341
- [35] Liyanapathirana A., Dassanayake R. S. Gamage A., et al. Recent Developments in Edible Films and Coatings for Fruits and Vegetables // *Coatings*. 2023.V.13, no. 7.p. 1177. DOI 10.3390/coatings13071177.
- [36] Бурак Л. Ч., Карбанович В.И. Влияние валоризованных растительных белков и фенольных соединений на пищевую ценность и усвояемость. Обзор последних достижений // *Научное обозрение. Технические науки*. 2024. № 2. С. 35-41. DOI 10.17513/srts.1464
- [37] Santhosh R., Ahmed J., Thakur R., Sarkar P. Starch-Based Edible Packaging: Rheological, Thermal, Mechanical, Microstructural, and Barrier Properties—A Review // *Sustainable Food Technology*. 2024.V. 2, no. 2. pp.307–330. DOI 10.1039/D3FB00211J.
- [38] Бурак Л. Ч., Сапач А.Н. Использование технологии омического нагрева в процессе переработки плодов и овощей. Обзор предметного поля // *Пищевые системы*. 2024. Т. 7, № 1. С. 59-70 DOI 10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70
- [39] Chakraborty I., Mal S.S., Paul U. C., Rahman M. d. H., Mazumder N. An Insight Into the Gelatinization Properties Influencing the Modified Starches Used in Food Industry: A review // *Food and Bioprocess Technology*. 2022. V. 15, no. 6.p. 1195–1223. DOI 10.1007/s11947-022-02761-z
- [40] Бурак Л. Ч., Сапач А.Н., Писарик М.И. Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования: Обзор предметного поля // *Health, Food & Biotechnology*. 2023. Т. 5, № 1. С. 51-80. DOI 10.36107/hfb.2023.i1.s165
- [41] Teklehaimanot W. H., Ray S.S, Emmambux N. Characterization of Pre-Gelatinized Maize Starch-Zein Blend Films Produced at Alkaline pH // *Journal of Cereal Science*. 2020.V. 95.p. 103083. DOI 10.1016/J.JCS.2020.103083
- [42] Paluch M., Ostrowska J., Tyński P., Sadurski W., Konkol M. Structural and Thermal Properties of Starch Plasticized With Glycerol/Urea Mixture // *Journal of Polymers and the Environment*. 2022. V.30, no. 2. pp.728–740. DOI 10.1007/s10924-021-02235-x.
- [43] Бурак Л. Ч., Сапач А.Н. Инновационная упаковка для пищевых продуктов // *Научное обозрение. Технические науки*. 2023. № 2. С. 50-57. DOI 10.17513/srts.1434
- [44] Devatha S. M., Raajeswari P.A. Formulation and Quality Assessment of Edible Cups From Sorghum bicolor // *Indian Journal of Nutrition and Dietetics*. 2023. V. 60, no. 4. pp. 539–549. DOI 10.21048/IJND.2023.60.4.33218
- [45] Manivel D., Paramasivam R. Sorghum Spoons Enriched With Selected Edible Flowers: A Sustainable Alternative to Conventional Cutlery in the Food and Tourism Sectors // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025. V. 15, no. 11. pp.1707717090. DOI 10.1007/s13399-024-06272-z
- [46] Dordevic D., Pencak T., Slamova D., Zeljkovic S.C., Tremlova B., Zamaratskaia G. Development of Edible Spoons Using Non-Traditional Flours // *Applied Food Science and Food Safety*. 2025.V. 24, no. 6. e70341. DOI 10.1111/1541-4337.70341
- [35] Liyanapathirana A., Dassanayake R. S. Gamage A., et al. Recent Developments in Edible Films and Coatings for Fruits and Vegetables // *Coatings*. 2023.V.13, no. 7.p. 1177. DOI 10.3390/coatings13071177.
- [36] Burak L. Ch., Karbanovich V. I. Effect of valorized plant proteins and phenolic compounds on nutritional value and digestibility. Review of recent achievements // *Scientific Review. Technical Sciences*. 2024. No. 2. Pp. 35-41. DOI 10.17513/srts.1464
- [37] Santhosh R., Ahmed J., Thakur R., Sarkar P. Starch-Based Edible Packaging: Rheological, Thermal, Mechanical, Microstructural, and Barrier Properties—A Review // *Sustainable Food Technology*. 2024.V. 2, no. 2. pp.307–330. DOI 10.1039/D3FB00211J.
- [38] Burak L. Ch., Sapach A. N. Use of ohmic heating technology in the processing of fruits and vegetables. Review of the subject field // *Food Systems*. 2024. Vol. 7, No. 1. P. 59-70 DOI 10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70
- [39] Chakraborty I., Mal S.S., Paul U. C., Rahman M. d. H., Mazumder N. An Insight Into the Gelatinization Properties Influencing the Modified Starches Used in Food Industry: A review // *Food and Bioprocess Technology*. 2022. V. 15, no. 6.p. 1195–1223. DOI 10.1007/s11947-022-02761-z
- [40] Burak L. Ch., Sapach A. N., Pisarik M. I. Intelligent packaging for fruits and vegetables, classification and prospects of use: Review of the subject field // *Health, Food & Biotechnology*. 2023. Vol. 5, No. 1. P. 51-80. DOI 10.36107/hfb.2023.i1.s165
- [41] Teklehaimanot W. H., Ray S.S, Emmambux N. Characterization of Pre-Gelatinized Maize Starch-Zein Blend Films Produced at Alkaline pH // *Journal of Cereal Science*. 2020.V. 95.p. 103083. DOI 10.1016/J.JCS.2020.103083
- [42] Paluch M., Ostrowska J., Tyński P., Sadurski W., Konkol M. Structural and Thermal Properties of Starch Plasticized With Glycerol/Urea Mixture // *Journal of Polymers and the Environment*. 2022. V.30, no. 2. pp.728–740. DOI 10.1007/s10924-021-02235-x.
- [43] Burak L. Ch., Sapach A. N. Innovative packaging for food products // *Scientific review. Technical sciences*. 2023. No. 2. P. 50-57. DOI 10.17513/srts.1434
- [44] Devatha S. M., Raajeswari P.A. Formulation and Quality Assessment of Edible Cups From Sorghum bicolor // *Indian Journal of Nutrition and Dietetics*. 2023. V. 60, no. 4. pp. 539–549. DOI 10.21048/IJND.2023.60.4.33218
- [45] Manivel D., Paramasivam R. Sorghum Spoons Enriched With Selected Edible Flowers: A Sustainable Alternative to Conventional Cutlery in the Food and Tourism Sectors // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025. V. 15, no. 11. pp.1707717090. DOI 10.1007/s13399-024-06272-z
- [46] Dordevic D., Pencak T., Slamova D., Zeljkovic S.C., Tremlova B., Zamaratskaia G. Development of Edible Spoons Using Non-Traditional Flours // *Applied Food*

- Enriched With Selected Edible Flowers: A Sustainable Alternative to Conventional Cutlery in the Food and Tourism Sectors // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025. V. 15, no. 11. pp.1707717090. DOI 10.1007/s13399-024-06272-z
- [46] Dordevic D., Pencak T., Slamova D., Zeljkovic S. C., Tremlova B., Zamaratskaia G. Development of Edible Spoons Using Non-Traditional Flours // *Applied Food Research*. 2025. V. 5, no. 1. p.100995. DOI 10.1016/j.afres.2025.100995.
- [47] Abdellaoui H. Manufacturing Biocomposites: Compression Molding and Thermoforming Techniques // *In Biocomposites—Bio-Based Fibers and Polymers From Renewable Resources: Processing, Performance, Durability and Applications*. 2024. V. pp.95–115. Woodhead Publishing. DOI 10.1016/B978-0-323-97282-6.00010-4
- [48] Tatara R. A. 17–Compression Molding // *In Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Sustainability, Materials, and Applications*. 2024. pp.389–424. WilliamAndrew Publishing. DOI 10.1016/B978-0-323-88667-3.00011-4
- [49] Dumont P., Martoia F., Orgéas L. Compression Moulding // *In Design and Manufacture of Structural Composites*. 2023. pp.273–300. Elsevier. DOI 10.1016/B978-0-12-819160-6.00018-4.
- [50] Yodkum T., Pajareon S., Yokesahachart C. Effect of Defatted Rice Bran Content on Physicochemical and Sensory Properties of Edible Cutlery Made From Rice Flour Green Composites Using Compression Molding // *Journal of Current Science and Technology*. 2024. V. 14, no. 3. p. 62. DOI 10.59796/jcst.V14N3.2024.62
- [51] Prabha K.P., Ghosh A. S. Recent Development, Challenges, and Prospects of Extrusion Technology // *Future Foods*. 2021. V. 3. p. 100019. DOI 10.1016/J.FUFO.2021.100019.
- [52] Gulati P., Brahma S., Rose D. J. Impacts of Extrusion Processing on Nutritional Components in Cereals and Legumes: Carbohydrates, Proteins, Lipids, Vitamins, and Minerals // *In Extrusion Cooking*. 2020. pp. 415–443. Elsevier. DOI 10.1016/B978-0-12-815360-4.00013-4
- [53] Throne J. 19–Thermoforming // *In Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Sustainability, Materials, and Applications*. 2024. pp. 449–480. Elsevier. DOI 10.1016/B978-0-323-88667-3.00001-1
- [54] Didone M., Tosello G. Moulded Pulp Products Manufacturing With Thermoforming // *Packaging Technology and Science*. 2019. V. 32, no. 1. pp. 722. DOI 10.1002/PTS.2412.
- [55] Khandeparkar A. S., Paul R., Sridhar A., Lakshmaiah V.V., Nagella P. Eco-Friendly Innovations in Food Packaging: A Sustainable Revolution // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2024. V. 39. p. 101579. DOI 10.1016/J.SCP.2024.101579.
- [56] Diaz C. A., Shah R. K., Evans T., Trabold T. A., Draper K. Thermoformed Containers Based on Starch and Starch/Coffee Waste Biochar Composites // *Energies*. 2020. V. 13, no. 22. p. 6034. DOI 10.3390/EN13226034
- [57] Hernández-García E., Pacheco-Romeralo M., Zomeño P., et al. Development and Characterization of Thermoformed Bilayer Trays of Paper and Renewable Succinic Acid Derived Biopolyester Blends and Their Application to Preserve Fresh Pasta // *Materials*. 2023. V. 16, no. 10. p. 3872. DOI 10.3390/MA16103872/S1
- [58] Bessarab O. V., Posokina N. E. Use of polymer and combined retort packaging in the production of canned

- P., et al. Development and Characterization of Thermoformed Bilayer Trays of Paper and Renewable Succinic Acid Derived Biopolyester Blends and Their Application to Preserve Fresh Pasta // *Materials*. 2023. V. 16, no. 10, p. 3872. DOI 10.3390/MA16103872/S1
- [58] Бессараб О. В., Посокина Н.Е. Применение полимерной и комбинированной реторт-упаковки в производстве консервированной продукции [обзор] // *Пищевая промышленность*. 2021. № 10. С. 51-59. DOI 10.52653/PPI.2021.10.10.004
- [59] Mahmud M. Z. A., Mobarak M.H., Hossain N. 2024. Emerging trends in Biomaterials for Sustainable Food Packaging: A Comprehensive Review // *Heliyon*. 2024.V. 10, no. 1. e24122. DOI 10.1016/J.HELİYON.2024.E24122
- [60] Javier F., Orús E., Kulesza S., Bramowicz M. J., Andrejko D., Alicharz-Kania F. An Assessment of the Strength and Physical Properties of Edible Tableware From Flax Seed and Flaxseed Cake // *Materials*. 2024.V. 17, no. 22, p. 5510. DOI 10.3390/MA17225510
- [61] Anand K., Martinez A. Arce G., Bishop D., Fitzpatrick C. A Tasty Solution to Packaging Waste? Life Cycle Assessment of Edible Coffee Cups // *Resources, Conservation and Recycling*. 2024.V. 201, p.107320. DOI 10.1016/j.resconrec.2023.107320
- [62] Niu S., Chang Q., He Niu S., Chang Q., He W., Zhao D., Deng X. Mechanically Strong, Hydrostable, and Biodegradable Starch–Cellulose Composite Materials for Tableware // *Starch/Staerke* . 2022.V.74, no. 7–8, p. 2200019. DOI 10.1002/star.202200019.
- [63] Choeybundit W., Shiekh K.A., Rachtanapun P., Tongdeesoontorn W. Fabrication of Edible and Biodegradable Cutlery From Morning Glory [Ipomoea aquatic) Stem Fiber-Reinforced Onto Soy Protein Isolate // *Heliyon* . 2022. V.8, no. 5.e09529. DOI 10.1016/J.HELİYON.2022.E09529
- [64] Muralidharan V., Jebathomas C. R. T., Sundaramoorthy S., Madhan B., Palanivel S. Preparation and Evaluation of Novel Biodegradable Kombucha Cellulose-Based Multi-Layered Composite Tableware // *Industrial Crops and Products*. 2024.V. 215, p. 118629. DOI 10.1016/J.INDCROP.2024.118629.
- [65] Ferreira Karow M., Laste MacagnanK., Alves I., et al. Investigations on the Effect of Sodium Trimetaphosphate and Sodium Sulfate Concentrations on the Properties of Cross-Linked Cassava Starch Films // *Química Nova* . 2025. V.48, no. 5. e20250113. DOI 10.21577/0100-4042.20250113.
- [66] Chi Y., Maitland E., Pascall M. A. The Effect of Citric Acid Concentrations on the Mechanical, Thermal, and Structural Properties of Starch Edible Films // *International Journal of Food Science and Technology*. 2024. V. 59, no. 3, pp. 1801–1813. DOI 10.1111/IJFS.16933.
- [67] Ahuja A., Kumar Rastogi V. Spray Coating of Edible Insect Waxes for Liquid Food Packaging // *Applied Surface Science*. 2023. V. 624. P.157150. DOI 10.1016/J.APSUSC.2023.157150
- [68] Gupta M., Sanghi D. Edible Cutlery: An Emerging Sustainable Approach Towards a Healthy Future // *Pre QC 39*. 2023. V. 5. pp. 637–640. DOI 10.35248/0970-1907.23.39.637-640.
- [69] Shen T., Fan S., Li Y., Xu G., Fan. W. Preparation of Edible Non-Wettable Coating With Soybean Wax for Repelling Liquid Foods With Little Residue // *Materials*. 2020.V. 13, no. 15, p. 3308. DOI 10.3390/MA13153308
- [70] Suresh T., Sahoo S. K. Development of Moisture/ products [review] // *Food industry*. 2021. No. 10. pp. 51-59. DOI 10.52653/PPI.2021.10.10.004

- QC 39. 2023. V. 5. pp. 637–640. DOI 10.35248/0970-1907.23.39.637-640.
- [69] Shen T., Fan S., Li Y., Xu G., Fan. W. Preparation of Edible Non-Wettable Coating With Soybean Wax for Repelling Liquid Foods With Little Residue // *Materials*. 2020.V. 13, no. 15p. 3308. DOI 10.3390/MA13153308
- [70] Suresh T., Sahoo S. K. Development of Moisture/Oil-Resistant Biocoatings From Waste Cooking Oil for Packaging Applications: Scientific Upcycling With Circular Economy Potential // *ACS Sustainable Resource Management*. 2024.V. 1, no. 12.pp. 2612–2620. DOI 10.1021/ACSSUSRESMGT.4C00392
- [71] Kumar L., Ramakanth D., Akhila K., Gaikwad K.K. Edible Films and Coatings for Food Packaging Applications: A Review // *Environmental Chemistry Letters*. 2022.V. 20, no. 1.p. 875–900. DOI 10.1007/S10311-021-01339-Z
- [72] Matloob A., Ayub H., Mohsin M., et al. A Review on Edible Coatings and Films: Advances, Composition, Production Methods, and Safety Concerns // *ACS Omega*. 2023.V. 8, no. 32.pp. 28932-28944. DOI 10.1021/acsomega.3c03459
- [73] Xie F. Biopolymer-Based Multilayer Films and Coatings for Food Preservation: an Update of the Recent Development // *Current Food Science and Technology Reports* . 2023.V.1, no. 1.pp. 1–12. DOI 10.1007/S43555-023-00002-8
- [74] Shulga O., Koretska I., Shulga S., Lin Y. Consumer Properties of Biodegradable Edible Cups for Hot Drinks. 2023. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/42274>
- [75] Matheswari K. B., Arivuchudar R. Physiochemical and Sensory Properties of Edible Cups Conceptualized From Food By-Products // *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2024.V. 21, no. 1.pp. 255–260. DOI 10.13005/bbra/3221
- [76] Бурак Л. Ч. Влияние современных способов обработки и стерилизации на качество плодовоовощного сырья и соковой продукции // Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М». 2025. 236 с. DOI 10.12737/0.12737/2154991
- [77] Shivani T. M., Sathivelu M. A Comprehensive Review on Functionality of Probiotics in Edible Packaging // *Packaging Technology and Science*. 2023. V. 36, no. 1. pp. 15–30. DOI 10.1002/PTS.2690;WGROU:STRIN G:PUBLICATION
- [78] Arva Innovations Is Serving Sustainability With Its Edible Cutlery. Accessed November 31, 2025. <https://www.localsamosa.com/business/arva-innovations-1564680>
- [79] Bakeys Edible Cups. Accessed November 31, 2025. <https://dir.indiamart.com/impcat/edible-cup.html>
- [80] Nice to Eat You! | Cupffee. Accessed November 31, 2025. <https://cupffee.me/en>
- [81] Stroodles. Stroodles Edible Eco-Tableware—Change Made Easy | Stroodles—Eco Tableware. 2024. <https://stroodles.co.uk/>
- [82] Delicious Cutlery. Delicious Cutlery | Crunch Cutlery | Singapore.2025. <https://www.crunchcutlery.com/>
- [83] Demircan B., Velioglu Y. S. Revolutionizing Single-Use Food Packaging: A Comprehensive Review of Heat-Sealable, Water-Soluble, and Edible Pouches, Sachets, Bags, or Packets // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2025. V.65, no. 8. pp. 1497–1517. DOI 10.1080/10408398.2023.2295433.
- [84] Mukherjee K., Raju A. Edible Cutlery—A Prototype to Oil-Resistant Biocoatings From Waste Cooking Oil for Packaging Applications: Scientific Upcycling With Circular Economy Potential // *ACS Sustainable Resource Management*. 2024.V. 1, no. 12.pp. 2612–2620. DOI 10.1021/ACSSUSRESMGT.4C00392
- [71] Kumar L., Ramakanth D., Akhila K., Gaikwad K.K. Edible Films and Coatings for Food Packaging Applications: A Review // *Environmental Chemistry Letters*. 2022.V. 20, no. 1.p. 875–900. DOI 10.1007/S10311-021-01339-Z
- [72] Matloob A., Ayub H., Mohsin M., et al. A Review on Edible Coatings and Films: Advances, Composition, Production Methods, and Safety Concerns // *ACS Omega*. 2023.V. 8, no. 32.pp. 28932-28944. DOI 10.1021/acsomega.3c03459
- [73] Xie F. Biopolymer-Based Multilayer Films and Coatings for Food Preservation: an Update of the Recent Development // *Current Food Science and Technology Reports* . 2023.V.1, no. 1.pp. 1–12. DOI 10.1007/S43555-023-00002-8
- [74] Shulga O., Koretska I., Shulga S., Lin Y. Consumer Properties of Biodegradable Edible Cups for Hot Drinks. 2023. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/42274>
- [75] Matheswari K. B., Arivuchudar R. Physiochemical and Sensory Properties of Edible Cups Conceptualized From Food By-Products // *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2024.V. 21, no. 1.pp. 255–260. DOI 10.13005/bbra/3221
- [76] Burak L. Ch. The influence of modern methods of processing and sterilization on the quality of fruit and vegetable raw materials and juice products // Moscow: Limited Liability Company «Scientific Publishing Center INFRA-M». 2025. 236 p. DOI 10.12737/0.12737/2154991
- [77] Shivani T. M., Sathivelu M. A Comprehensive Review on Functionality of Probiotics in Edible Packaging // *Packaging Technology and Science*. 2023. V. 36, no. 1. pp. 15–30. DOI 10.1002/PTS.2690;WGROU:STRIN G:PUBLICATION
- [78] Arva Innovations Is Serving Sustainability With Its Edible Cutlery. Accessed November 31, 2025. <https://www.localsamosa.com/business/arva-innovations-1564680>
- [79] Bakeys Edible Cups. Accessed November 31, 2025. <https://dir.indiamart.com/impcat/edible-cup.html>
- [80] Nice to Eat You! | Cupffee. Accessed November 31, 2025. <https://cupffee.me/en>
- [81] Stroodles. Stroodles Edible Eco-Tableware—Change Made Easy | Stroodles—Eco Tableware. 2024. <https://stroodles.co.uk/>
- [82] Delicious Cutlery. Delicious Cutlery | Crunch Cutlery | Singapore.2025. <https://www.crunchcutlery.com/>
- [83] Demircan B., Velioglu Y. S. Revolutionizing Single-Use Food Packaging: A Comprehensive Review of Heat-Sealable, Water-Soluble, and Edible Pouches, Sachets, Bags, or Packets // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2025. V.65, no. 8. pp. 1497–1517. DOI 10.1080/10408398.2023.2295433.
- [84] Mukherjee K., Raju A. Edible Cutlery—A Prototype to

- [82] Delicious Cutlery. Delicious Cutlery | Crunch Cutlery | Singapore.2025. <https://www.crunchcutlery.com/>
- [83] Demircan B., Velioglu Y. S. Revolutionizing Single-Use Food Packaging: A Comprehensive Review of Heat-Sealable, Water-Soluble, and Edible Pouches, Sachets, Bags, or Packets // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2025. V.65, no. 8. pp. 1497–1517. DOI 10.1080/10408398.2023.2295433.
- [84] Mukherjee K., Raju A. Edible Cutlery—A Prototype to Combat Malnutrition and Plastic Waste Management // *Asian Journal of Biological and Life Sciences*. 2023. V. 12, no. 1. pp. 92–102. DOI 10.5530/ajbls.2023.12.14
- [85] Dybka-Stepień K., Antolak H., Kmiotek M., Piechota D., Koziróg K. Disposable Food Packaging and Serving Materials—Trends and Biodegradability // *Polymers*. 2021.V. 13, no. 20.p. 3606. DOI 10.3390/polym13203606
- [86] Trajkovska Petkoska A., Daniloski D., Kumar N., Broach A. T. Biobased Materials as a Sustainable Potential for Edible Packaging // Springer Singapore. 2021. pp. 111–135. DOI 10.1007/978-981-16-4609-6\_5
- [87] Pires A. F., Díaz O., Cobos A., Pereira C. D. A Review of Recent Developments in Edible Films and Coatings—Focus on Whey-Based Materials // *Foods*. 2024.V. 13, no. 16.p. 2638. DOI 10.3390/foods13162638
- [88] Patil, T. D., Bisht S., Meshram B. P., Gaikwad K.K. A review on emerging trends and developments in edible drinking straws for food and beverage applications // *Trends in Food Science & Technology*. 2025.V. 163.p. 105158. DOI 10.1016/J.TIFS.2025.105158
- [89] Thapliyal D., Karale M., Diwan V., Kumra S., Arya R. K., Verros G. D. Current Status of Sustainable Food Packaging Regulations: Global Perspective // *Sustainability [Switzerland]* . 2024.V.16, no. 13. p.5554. DOI 10.3390/su16135554
- [90] GRAS | FDA. 2025. Accessed September 14, 2025. [https://www.fda.gov/food/food-ingredients-packaging/generally-recognized-safe-gras?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.fda.gov/food/food-ingredients-packaging/generally-recognized-safe-gras?utm_source=chatgpt.com)
- [91] Nair S. S., Trafiałek J., Kolanowski W. Edible Packaging: A Technological Update for the Sustainable Future of the Food Industry // *Applied Sciences*. 2023.V. 13,no. 14.p. 8234. DOI 10.3390/app13148234
- [92] Moreno B. B., Rodrigues B. V, Afonso L. R., Jimenez P. C., Castro Í. B. High incidence of False Biodegradability Claims Related to Single-Use Plastic Utensils Sold in Brazil // *Sustainable Production and Consumption*. 2023.V. 41.pp.1–8. DOI 10.1016/J.SPC.2023.07.024.
- [93] Бурак Л. Ч., Ермошина Т.В., Саманкова Н. В. Устойчивое производство. Концепция качества 4.0 // *Фундаментальные исследования*. 2025. № 9. С. 81-90 DOI 10.17513/fr.43905
- Combat Malnutrition and Plastic Waste Management // *Asian Journal of Biological and Life Sciences*. 2023. V. 12, no. 1. pp. 92–102. DOI 10.5530/ajbls.2023.12.14
- [85] Dybka-Stepień K., Antolak H., Kmiotek M., Piechota D., Koziróg K. Disposable Food Packaging and Serving Materials—Trends and Biodegradability // *Polymers*. 2021.V. 13, no. 20.p. 3606. DOI 10.3390/polym13203606
- [86] Trajkovska Petkoska A., Daniloski D., Kumar N., Broach A. T. Biobased Materials as a Sustainable Potential for Edible Packaging // Springer Singapore. 2021. pp. 111–135. DOI 10.1007/978-981-16-4609-6\_5
- [87] Pires A. F., Díaz O., Cobos A., Pereira C. D. A Review of Recent Developments in Edible Films and Coatings—Focus on Whey-Based Materials // *Foods*. 2024.V. 13, no. 16.p. 2638. DOI 10.3390/foods13162638
- [88] Patil, T. D., Bisht S., Meshram B. P., Gaikwad K.K. A review on emerging trends and developments in edible drinking straws for food and beverage applications // *Trends in Food Science & Technology*. 2025.V. 163.p. 105158. DOI 10.1016/J.TIFS.2025.105158
- [89] Thapliyal D., Karale M., Diwan V., Kumra S., Arya R. K., Verros G. D. Current Status of Sustainable Food Packaging Regulations: Global Perspective // *Sustainability [Switzerland]* . 2024.V.16, no. 13. p.5554. DOI 10.3390/su16135554
- [90] GRAS | FDA. 2025. Accessed September 14, 2025. [https://www.fda.gov/food/food-ingredients-packaging/generally-recognized-safe-gras?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.fda.gov/food/food-ingredients-packaging/generally-recognized-safe-gras?utm_source=chatgpt.com)
- [91] Nair S. S., Trafiałek J., Kolanowski W. Edible Packaging: A Technological Update for the Sustainable Future of the Food Industry // *Applied Sciences*. 2023.V. 13,no. 14.p. 8234. DOI 10.3390/app13148234
- [92] Moreno B. B., Rodrigues B. V, Afonso L. R., Jimenez P. C., Castro Í. B. High incidence of False Biodegradability Claims Related to Single-Use Plastic Utensils Sold in Brazil // *Sustainable Production and Consumption*. 2023.V. 41.pp.1–8. DOI 10.1016/J.SPC.2023.07.024.
- [93] Burak L. Ch., Ermoshina T. V., Samankova N. V. Sustainable production. Quality concept 4.0 // *Fundamental research*. 2025. No. 9. P. 81-90 DOI 10.17513/fr.43905

## Сведения об авторах

## Information about the authors

<p><b>Бурак Леонид Чеславович</b> кандидат технических наук директор Общество с ограниченной ответственностью "БЕЛРОСАКВА" 220015 г. Минск, ул. Пономаренок, д.35А, пом.610 <b>Тел.:</b> +7(29) 646-65-25 <b>E-mail:</b> leonidburak@gmail.com</p>	<p><b>Burak Leonid Cheslavovich</b> PhD in Technical Sciences director Limited Liability Company "BELROSAKVA" <b>Phone:</b> +7(29) 646-65-25 <b>E-mail:</b> leonidburak@gmail.com</p>
<p><b>Сапач Александр Николаевич</b> заместитель директора Общество с ограниченной ответственностью "БЕЛРОСАКВА" 220015 г. Минск, ул. Пономаренок, д.35А, пом.610 <b>Тел.:</b> +7(29) 756-95-19 <b>E-mail:</b> info@belrosakva.by</p>	<p><b>Sapach Alexander Nikolaevich</b> deputy director Limited Liability Company "BELROSAKVA" <b>Phone:</b> +7(29) 756-95-19 <b>E-mail:</b> info@belrosakva.by</p>