

Обзорная статья

УДК 664.8.022

DOI: 10.17586/2310-1164-2026-19-3-43-71

## Обзор технологических аспектов и инновационных методов глубокой переработки яблочных выжимок

О.И. Андреева, Р.С. Полищук, А.Г. Шерстюков, Е.Х.А. Мунассар, И.А. Шорсткий\*

*Кубанский государственный технологический университет  
Россия, Краснодар, \*i-shorstky@mail.ru*

**Аннотация.** Систематизировали и обобщили современные научные знания о методах сушки яблочных выжимок, а также изучили их продуктивность с помощью стандартизированных показателей с целью выявления рациональных и эффективных способов глубокой переработки. Акцент сделан на анализе функциональности и целесообразности различных технологий переработки яблочных выжимок в ценные ингредиенты и роли сушки в повышении рационального использования этих отходов. Сравнивали такие технологии глубокой переработки, как экструзия, инкапсуляция, экстракция, а также сушка в сочетании с электрофизическими методами. Показано, что нетепловые методы позволяют максимально сохранить биологическую ценность сырья при длительном хранении, однако для их практического внедрения необходима дальнейшая оптимизация масштабируемости и снижение затрат.

**Ключевые слова:** пищевые технологии; консервирование; глубокая переработка; яблочные выжимки

**Финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда, ООО «Биодинамика» в рамках проекта № НТИП-25.1/3

Review article

## Technological aspects and innovative methods in the advanced processing of apple pomace: A comprehensive review

Oksana I. Andreeva, Roman S. Polishchuk, Andrey G. Sherstyukov, Emad H.A. Munassar, Ivan A. Shorstky\*

*Kuban State University of Technology,  
Krasnodar, Russia, \*i-shorstky@mail.ru*

**Abstract.** The authors systematized and summarized current scientific knowledge about the methods of drying apple pomace, and evaluated their effectiveness using standardized indicators to identify rational and efficient methods of deep processing. The purpose of the review is to highlight the importance of efficient processing of apple pomace as a valuable secondary raw material rich in dietary fiber, antioxidants, and other biologically active substances. The review explores modern technologies for deep processing, such as extrusion, encapsulation, extraction, and drying combined with electrophysical methods. Based on the analysis conducted, it can be concluded that non-thermal methods allow for maximum preservation of the biological value of raw materials during long-term storage, but further optimization of scalability and cost reduction is necessary for their practical implementation.

**Keywords:** food technology; canning; deep processing; apple pomace

**Funding:** The study was carried out with the financial support of the Kuban Scientific Foundation and Biodynamics LLC as part of project no. NTIP-25.1/3

## Введение

Яблочные выжимки – это вторичный продукт перерабатывающей промышленности, образующийся в больших количествах при производстве соков, сидра и вина [1]. Яблочная выжимка, состоящая на 40% из растительной массы плодов, включая кожуру, сердцевину, семена, чашечку, плодоножку и мягкие ткани, является богатым источником полезных для здоровья питательных веществ [2], включая минералы, пищевые волокна, антиоксиданты, незаменимые жирные кислоты, белок и урсоловую кислоту [3], что указывает на ее потенциальное применение в качестве диетической добавки, функционального продукта питания или пищевой добавки [4]. Кроме того, доклинические исследования показали улучшение липидного обмена [5, 6], антиоксидантную активность и пользу для пищеварения от употребления продуктов переработки яблочных выжимок [7, 8].

Несмотря на высокий потенциал продуктов глубокой переработки яблочных выжимок, предприятия в основном направляют их на корм скоту или вовсе утилизируют. Недостаточное использование яблочных выжимок создает серьезные экологические и экономические проблемы, особенно в связи с тем, что высокое содержание влаги ускоряет их порчу, затрудняя хранение и транспортировку [9].

По данным открытых источников, производство яблок в России находится на уровне 1,7–1,8 млн тонн за период 2020–2025 год [10]. Вариация уровня производства связана с сезонными факторами, влиянием климатических условий, а также региональными особенностями аграрного сезона. Объем яблочных выжимок ежегодно достигает порядка 0,6 млн тонн.

Существуют направления использования яблочных выжимок для производства таких продуктов с высокой добавленной стоимостью, как ферменты, одноклеточные белки, ароматические соединения, этанол, пектин, органические кислоты, полисахариды. На рисунке показаны основные коммерчески реализованные области переработки: производство пищевых волокон, пектина пищевого назначения, биопленок и экоупаковок, а также функциональных продуктов методами сублимационной сушки.



Рисунок – Добавленная стоимость яблочных выжимок  
Figure 1. Added value of apple pomace

Уровень производимого пищевого пектина представляется недостаточным для покрытия потребностей внутреннего рынка. В 2023 г. отечественное производство пектиновых веществ значительно уступало объему импорта: зарубежные поставки превышали российские более чем в 150 раз, а выпуск внутри страны исчислялся лишь десятками тонн [10]. Доминирующими странами в сегменте импорта пектина являются Китай, Германия, Франция и др. [10].

Наибольший удельный вес среди биоотходов плодоовощной продукции занимают яблоки — на их долю приходится 29% от общего объема. Этот показатель свидетельствует о существенных потерях в агропромышленном секторе и подчеркивает особую актуальность внедрения устойчивых методов обращения с побочными продуктами переработки яблок. Эффективное использование вторичного сырья становится не только ресурсосберегающей, но и стратегически важной задачей для минимизации сельскохозяйственных потерь и повышения экологической ответственности отрасли.

Сокращение издержек, повышение эффективности переработки пищевого сырья, снижение потерь за счет рационального обращения с отходами и стратегии экономики замкнутого цикла являются приоритетными направлениями развития в сфере АПК России [11, 12]. В настоящее время существуют различные технологии, позволяющие повысить ценность яблочных выжимок — извлечение биологически активных веществ, биоконверсия (например, получение биотоплива, биоэтанола, биополимеров и биопленок), получение пищевых волокон, пищевого пектина. У каждой

из них есть свои преимущества (короткое время обработки, эффективное использование энергии, высокое качество) и недостатки (высокие капитальные и эксплуатационные затраты или трудности, связанные с масштабированием) [13].

Эффективное использование вторичных продуктов переработки яблок часто затруднено из-за их неоднородности, различного уровня спелости плода и высокого содержания влаги. Кроме этого, существенным препятствием является отсутствие надлежащего сбора, транспортировки и хранения до момента порчи плодов [9].

Сушка яблочных выжимок — важный процесс, позволяющий удалить излишки воды, приводящие к быстрой порче продукта до его использования [14]. Предварительная сушка необходима для процессов повышения ценности продукта и извлечения целевых компонентов, например, большинство биологически активных соединений лучше извлекаются из высушенных выжимок, чем из свежих. Кроме того, хранение высушенных выжимок требуют меньше места и материалов, чем для хранения свежих выжимок. Чтобы предотвратить порчу яблочных выжимок, важно использовать подходящие методы сушки на месте переработки [15, 16].

В пищевой промышленности используются различные технологии сушки, в том числе сушка горячим воздухом, распылительная сушка и сублимационная сушка, использование которых зависит от таких факторов, как эффективность, качество продукта и энергопотребление. Выбор оптимального метода переработки яблочных выжимок зависит от сорта яблок и их химического состава. С точки зрения качества, при сушке должны сохраняться вкус, аромат, цвет, внешний вид и пищевая ценность исходного материала. Эффективность сушки — еще один ключевой фактор для оценки качества продукта [17, 18]. Оптимизация технологии сушки вторичных продуктов переработки яблок должна основываться на таких ключевых показателях эффективности, как экономические, экологические и качественные показатели [19, 20].

За последние 10 лет нетепловые методы сушки — это методы удаления влаги из материалов, при которых не используется значительный нагрев, например, сублимационная сушка, сушка с применением ультразвука, электрогидродинамического потока и др. В отличие от традиционных (тепловых) способов, где влага испаряется за счет высокой температуры, нетепловые технологии основаны на других физических или физико-химических принципах. Такие методы имеют ряд преимуществ из-за их энергоэффективности и меньшего влияния на качество пищевых продуктов и привлекают интерес научной части общества.

Хотя внимание к переработке яблочных выжимок постоянно растет, в научной литературе по-прежнему ощущается нехватка комплексных исследований. В существующих работах часто отсутствуют критические сравнения традиционных промышленных методов сушки и инновационных технологий, применяемых именно к этому виду сырья. Данный пробел мешает объективно оценить преимущества и недостатки каждого подхода для практического внедрения.

Большинство доступных исследований [23, 24] либо сосредоточены на одном методе, либо не дают систематической оценки эффективности с точки зрения экономики, экологии и качества. Кроме того, научные работы в области технологий нетепловой сушки носят фрагментарный характер, и информации об их масштабируемости в реальных производственных условиях, технико-экономической целесообразности и пригодности для таких способов повышения ценности, как разработка функциональных продуктов питания, биоактивная экстракция и синтез биополимеров, недостаточно. Также мало обсуждается вопрос о том, насколько эти методы сушки соответствуют национальным стратегиям сокращения пищевых отходов и способам переработки промышленных побочных продуктов [22, 23].

Цель данного обзора — систематизировать и обобщить современные знания о методах сушки яблочных выжимок, оценить их эффективность с помощью стандартизированных показателей. Основное внимание уделено анализу функциональности и целесообразности различных технологий переработки яблочных выжимок в ценные ингредиенты, а также роли сушки в повышении эффективности рационального использования этих отходов.

## Методология

Настоящий обзор подготовлен на основе систематического сбора и анализа научной литературы, посвященной повышению добавленной стоимости яблочных выжимок, с особым акцентом на технологии сушки и новые направления их применения. В рамках исследования осуществляли комплексный поиск в ведущих научных базах данных, включая Scopus, PubMed, ScienceDirect и Google Scholar. В качестве поисковых ключевых слов использовали такие термины, как «яблочные выжимки», «повышение ценности», «методы сушки», «нетепловая сушка», «утилизация пищевых отходов», «переработка побочных продуктов», «устойчивые продовольственные системы» и «ключевые показатели эффективности».

Первоначальный этап поиска не ограничивался временными рамками, однако впоследствии круг исследования сузили до публикаций, вышедших с 2010 по 2026 годы, поскольку именно в этот период произошел основной технологический прорыв в методах сушки и переработки сырья, а также резко вырос интерес к экономике замкнутого цикла. Это позволяет сфокусироваться на самых современных, эффективных и экологически безопасных технологиях, исключая устаревшие решения.

В качестве критериев отбора использовали англоязычные и русскоязычные рецензируемые, методологически обоснованные и тематически релевантные публикации, содержащие оригинальные данные, сравнительный анализ методов сушки, либо характеризующие технологические, экономические и экологические параметры, а также показатели качества продуктов при переработке яблочных выжимок. Были включены обзорные статьи, что обеспечило более широкий охват рассматриваемой тематики. Исключали исследования, фокусирующиеся на качестве яблок, иных побочных продуктов переработки фруктов или жмыха и работы с недостаточной методологической детализацией.

Полученные данные обобщены для выявления современных технологических тенденций, барьеров на пути их внедрения, контрольных показателей эффективности и приоритетных направлений будущих исследований в области экологически устойчивых методов переработки яблочных выжимок и рационального использования пищевых отходов в глобальном масштабе.

## Пищевая ценность и химический состав яблочных выжимок

Яблочные выжимки – отходы переработки яблок после отжима сока – представляют собой сложную биомассу, включающую основные ткани плода — кожуру и мякоть (~95%), а также семена (2–4%) и черешки (~1%).

По данным исследований [5, 7], их химический состав (в пересчете на сухое вещество) характеризуется высоким содержанием пищевых волокон, основу которых составляют полисахариды: клетчатка, пектин и гемицеллюлозы. Содержание пектина может достигать 10–15% сухой массы, что определяет его ценность как структурообразователя и функционального ингредиента для пищевой промышленности. В составе выжимок присутствуют и жиры (0,6–4,2%) [26], преимущественно за счет семян, богатых жирными кислотами, и белки (1,1–4,7%), источником которых так же является семенной материал. Углеводная фракция представлена, в основном, моно- и дисахаридами (фруктозой, глюкозой, сахарозой), а минеральная часть включает макро- и микроэлементы (калий, кальций, магний, железо, цинк), что повышает их питательную ценность.

Благодаря высокому содержанию растворимых пищевых волокон, в первую очередь пектина [24], яблочные выжимки обладают выраженными технологическими и физиологическими свойствами: они влияют на текстуру и структуру пищевых продуктов, улучшают функциональность пищевых и кормовых смесей, служат сырьем для получения пектина и других функциональных ингредиентов. В связи с этим, яблочные выжимки рассматриваются не как отход, подлежащий утилизации, а как ценное вторичное сырье для различных отраслей: производства пектина и функциональных пищевых ингредиентов, обогащения продуктов питания пищевыми волокнами, применения в кормопроизводстве, биотехнологии, а также для создания энтеросорбентов и других фармацевтических продуктов.

В таблице 1 представлены основные компоненты и свойства яблочных выжимок, которые дают представление об их питательной ценности и возможных способах использования.

Таблица 1. Основные компоненты и свойства яблочных выжимок

Table 1. Main components and properties of apple pomace

| Компоненты                   | Описание                                                                                                                                                                          | Источник |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Содержание влаги             | высокое, около 700 г/кг; затрудняет хранение из-за риска развития микроорганизмов                                                                                                 | [5]      |
| Метаболизируемая энергия     | в диапазоне от 7,7 до 9,1 мдж/кг сухого вещества                                                                                                                                  | [5]      |
| Содержание жира              | 1,1–3,6%, больше, чем в яблоках (0,16–0,18%); богаты линолевой и олеиновой кислотами из семян                                                                                     | [26]     |
| Содержание белка             | 2,7–5,3%, выше, чем в яблоках (0,24–0,28%) из-за содержания семян                                                                                                                 | [26]     |
| Первичное волокно            | 10–15% пектина – источника растворимой клетчатки                                                                                                                                  | [26]     |
| Состав кожицы                | 95% выжимок богаты фенолами, в т.ч. коричной кислотой, эпикатехином и процианидином                                                                                               | [7]      |
| Минералы                     | содержит натрий, калий, кальций, фосфор, магний, железо, марганец, цинк и медь                                                                                                    | [26]     |
| Витамины                     | витамин Е (22,4 мг/100 г) и витамин С (5,5 мг/100 г)                                                                                                                              | [26]     |
| Растворимые твердые вещества | 40% (по массе) в пересчете на сухой вес, состоящих из простых сахаров (фруктозы, глюкозы, сахарозы) и яблочной кислоты. Также содержит солибилизированный пектин и ксиланоглюканы | [27]     |
| Углеводы                     | 670 г/кг (сухой вес), из них 50 г/кг — свободные сахара (в основном фруктоза и глюкоза)                                                                                           | [27]     |
| Полисахариды                 | состоит из целлюлозы, ксиланоглюканов и пектиновых полисахаридов                                                                                                                  | [27]     |

## Проблемы в технологии консервирования и хранения

Хранение яблочных выжимок сопряжено со значительными трудностями из-за высокого содержания в них влаги — около 700 г/кг, которая создает идеальную среду для быстрого роста нежелательных микроорганизмов, приводя к порче продукта и ограничению сроков его пригодности для использования. Решением этой проблемы обычно является сушка. В качестве альтернативы применяется силосование, при котором используется естественно низкий рН яблочных выжимок (от 3,2 до 4,1), замедляющий ферментацию и предотвращающий порчу, что подходит для краткосрочного и среднесрочного хранения. Оба метода играют важную роль в стабилизации яблочных выжимок, позволяя эффективно использовать их в различных целях [25].

## Эффективное использование яблочных выжимок в пищевой промышленности

Извлечение биологически активных соединений — основной метод переработки яблочных выжимок [28], при котором используются различные способы консервирования или обработки (сушка, экстракция, инкапсуляция, стерилизация, экструзия и т. д.) в зависимости от характеристик продукта, его влажности и физико-химических показателей. Кроме того, в настоящее время применяются такие технологические методы, как экструзия, инкапсуляция, восстановление и обогащение.

**Извлечение биологически активных веществ.** Экстракция по Сокслету является одним из самых распространенных методов извлечения биологически активных соединений из растительного сырья, включая яблочные выжимки. Его эффективность зависит от таких факторов, как температура экстракции, полярность и состав растворителя, размер частиц сырья, соотношение твердой и жидкой фаз, а также время контакта экстрагента с образцом. В качестве растворителей чаще всего применяют гексан, ацетон и N-диметилформамид. Несмотря на высокую эффективность извлечения, метод Сокслета имеет ряд недостатков: он требует использования легковоспламеняющихся органических растворителей, что приводит к негативному воздействию вредных паров, и является относительно дорогостоящим из-за высокой чистоты и объемов применяемых растворителей. Эти особенности требуют оптимизации условий экстракции при сохранении выхода и биологической активности целевых соединений [29]. С этой целью разработаны другие передовые методы экстракции (суперкритическая экстракция, экстракция с использованием микроволн, экстракция с использованием ультразвука),

которые снижают время обработки, наименее затратные и расходуют меньше растворителя в сравнении с методом экстракции по Сокслету [30].

Исследования подчеркивают эффективность применения комбинированных методов экстракции, позволяющих избегать высоких температур и токсичных растворителей, при извлечении антиоксидантных соединений. Импульсные электрические поля (ИЭП) — это нетепловая технология, при которой короткие высоковольтные импульсы разрушают клеточные мембраны и увеличивают выход целевых соединений без значительного нагрева, что помогает сохранить термолабильные антиоксиданты. Такие факторы, как интенсивность поля, количество импульсов и энергия обработки существенно влияют на эффективность извлечения полифенолов (дубильные вещества, лигнин, меланин) и общее содержание флавоноидов (ОСФ). В частности, в работе [31] установлено, что под влиянием ИЭП общее содержание фенольных соединений (в частности, галлановой кислоты) из апельсиновой цедры увеличилось на 20, 129, 153 и 159%, обработанной при напряжении 1, 3, 5 и 7 кВ/см соответственно в сравнении с контрольным образцом. Ультразвуковая экстракция (УЭ) основана на кавитации — образовании и схлопывании микропузырьков в среде, что ускоряет разрушение клеточной структуры и диффузию растворителя. Этот метод широко применяется для выделения оксибензойных, оксикоричных кислот (галловая, кофейная и др.) и флавоноидов (в частности антоцианов и флавонолов) из различных растительных материалов. Авторы [32] установили, что УЭ дает высокий выход фенольных соединений при низких температурах и существенно сокращает время экстракции в сравнении с мацерацией и традиционными тепловыми методами.

Однако эффективность твердофазной экстракции можно значительно повысить, используя различные методы предварительной обработки. Например, сублимационная сушка яблочных выжимок перед экстракцией почти вдвое увеличила выход глицерилдипалинолеат, линолевой кислоты и диацилглицерин, а также значительное количество урсоловой кислоты по сравнению с показателями, полученными при использовании свежих выжимок [33]. Предварительная сублимация яблочных выжимок позволяет увеличить кинетику экстракции почти в 1,5 раза. В изученных исследованиях [34, 35] показано, что предварительная обработка сырья нетепловыми технологиями улучшает проницаемость клеточных структур, усиливая массообмен и доступ растворителя к целевым биологически активным соединениям. Так, в модели двухэтапного процесса экстракции с применением предварительной обработки высоковольтными электрическими разрядами (ВЭР), импульсным электрическим полем и ультразвуком установлено, что наибольший выход антоцианов достигается именно после обработки ИЭП с последующей гидротермической экстракцией, что подтверждает его потенциал как эффективного нетеплового предобработчика для повышения извлечения ценных фенольных пигментов [34].

Ультразвуковая обработка (УЗ) продуктов питания представляет собой физико-механический метод, при котором на пищевую или растительную матрицу воздействуют акустическими волнами высокой частоты. В пищевой технологии ультразвук используется для интенсификации множества процессов — от очистки и гомогенизации до стерилизации и экстракции полезных компонентов [35]. Частоты ультразвука, применяемые с этой целью, чаще всего находятся в диапазоне примерно 20–40 кГц, что обеспечивает достаточный уровень кавитационного воздействия без разрушительного термического эффекта. В исследовании отмечается [36], что ультразвуковая экстракция позволяет не только увеличить выход извлекаемых компонентов, но и сократить время процесса, что делает ее перспективной для получения функциональных ингредиентов из растительного сырья и отходов пищевого производств.

Ряд ученых [37, 38] отмечает, что при ультразвуковой экстракции повышение мощности действительно увеличивает кавитационные эффекты, ускоряя разрушение клеточных структур и массопередачу, но высокая интенсивность может приводить к образованию гидроксильных радикалов и окислению чувствительных соединений (например, фенольных) из растительного сырья [37]. Н.В. Jadhav и др. [38] сообщили, что ультразвук высокой мощности (>500 Вт) увеличивает образование гидроксильных радикалов, что может привести к разрушению липидов.

Обработка микроволнами (СВЧ) основана на использовании микроволн частотой от 0,3 до 300 ГГц для интенсивного нагрева и разрушения матрикса клеточной стенки. Микроволновое тепло усиливает выделение биоактивных компонентов из клетки в растворитель. Экстракция пектина методом СВЧ

при мощности 520 Вт и pH 2,0 показала увеличение на 3,3% по сравнению с традиционной обработкой кислым раствором [39, 40]. Однако мощность СВЧ, превышающая определенный порог, приводит к значительным потерям биологически активных соединений из-за ферментативного и термического окисления [41]. Кроме того, к серьезным недостаткам относится повышенная техническая сложность, высокие первоначальные затраты на установку и необходимость соблюдения протоколов электромагнитной безопасности, а контроль и оптимизация СВЧ технологии ограничены из-за нерегулируемого входного энергопотребления [41].

Среди современных технологий переработки растительного сырья методы ультразвуковой и микроволновой экстракции рассматриваются как наиболее перспективные для комплексной переработки яблочных выжимок. Их применение позволяет повысить степень извлечения целевых компонентов, сократить продолжительность процесса и уменьшить расход органических растворителей. Ультразвуковая экстракция, особенно при использовании водно-этанольных растворов, демонстрирует высокую эффективность при извлечении фенольных соединений. В то же время СВЧ обработка и традиционная кислотная экстракция при нагревании более результативны при выделении полисахаридов, прежде всего пектина. Выбор способа существенно определяет химический состав и функциональные свойства остаточного жмыха. Например, после извлечения фенольных соединений формируются фракции, обогащенные пищевыми волокнами, которые могут быть использованы в качестве функциональных добавок или субстратов для микробиологической ферментации.

Дополнительные методы интенсификации – импульсные электрические поля и ферментативная предварительная обработка – способствуют разрушению клеточных стенок и высвобождению связанных фенольных соединений. Это позволяет увеличить выход целевых веществ при сохранении их структурной целостности. В то же время важным ограничивающим фактором остается возможное присутствие остаточных количеств пестицидов и антипитательных веществ (повышенное содержание флоридзина), что может снижать чистоту экстракта и ограничивать области его применения. Соблюдение нормативных требований к содержанию токсикантов и потенциально нежелательных соединений имеет принципиальное значение для обеспечения безопасности и коммерческой привлекательности продукции, особенно в пищевой, нутрицевтической и фармацевтической сферах.

Таким образом, для эффективной реализации биоэкономического потенциала яблочных выжимок целесообразно комбинировать селективные методы экстракции с этапами предварительной обработки и последующей очистки, что позволит получать высококачественные и безопасные продукты с добавленной стоимостью.

**Обогащение.** Яблочные выжимки считаются отличным функциональным ингредиентом для добавления в различные пищевые продукты из-за высокого содержания пищевых волокон, фенольных соединений и других потенциальных питательных веществ. В обзоре, подготовленном I. M. Bodea и др. [42], установлено, что добавление порошка из яблочных выжимок в йогурт перемешиваемого типа приводит к потенциальной стабилизации кисломолочного напитка и уменьшению осаждения белковых агрегатов. Добавление яблочных выжимок в хлебобулочные изделия повысило содержание пищевых волокон, улучшив полезные свойства продуктов. Однако в большинстве случаев добавление выжимок приводило к ухудшению качества и органолептических свойств выпечки [43]. При повышении содержания выжимок цвет корочки и твердость хлеба увеличивались, но общая органолептическая оценка снижалась. А.Е. Ковалева и коллеги [44] выявили, что добавление яблочных выжимок в пшеничную муку снижает одноосную растяжимость, но повышает двухосную вязкость теста при растяжении. Из-за этого хлеб получается плотным и маловоздушным. Результаты показали, что добавление яблочных выжимок может замедлить процесс черствения.

Однако исследования по разработке различных видов функциональных хлебобулочных изделий с добавлением яблочных выжимок и определением их оптимальной доли в качестве ингредиента отсутствуют, не изучены изменения в процессе обработки, которые могут улучшить органолептические свойства.

**Инкапсуляция.** Биоактивные соединения, в большом количестве присутствующие в яблочных выжимках (фенольные кислоты, флавоноиды, антоцианы), подвержены разрушению под воздействием

таких факторов окружающей среды, как тепло, свет и кислород. Их можно инкапсулировать с помощью распылительной сушки, сублимационной сушки, нанесения покрытия в псевдооживленном слое, эмульгирования и коацервации. Распылительная сушка — наиболее распространенный метод инкапсуляции экстрактов яблочных выжимок из-за его экономичности и масштабируемости [45].

Недавние исследования [95, 96] показали успешное применение метода распылительной сушки для инкапсуляции общего содержания фенольных соединений — флавоноидов, в том числе антоцианов, а также катехина, эпикатехина, эпигаллокатехина и эпигаллокатехин-3-галлат яблочных выжимок, что значительно повысило их устойчивость к окислению и обеспечило контролируемое высвобождение, необходимое для применения в функциональных напитках. Например, S. Ibrahim и S. Bowra [46] обнаружили, что инкапсуляция субкритических водных экстрактов яблочных выжимок с помощью гидроксипропил- $\beta$ -циклодекстрина методом распылительной сушки позволяет получить порошки с пониженной гигроскопичностью и повышенной антиоксидантной стабильностью, что делает их пригодными для использования в косметических и фармацевтических продуктах.

Кроме того, инкапсуляция может продлить срок хранения экстрактов яблочных выжимок и облегчить их включение в состав порошкообразных добавок, ингредиентов для выпечки или эмульгированных пищевых матриц. Хотя яблочные выжимки являются многообещающим источником таких инкапсулируемых биологически активных веществ, как флавоноидные соединения, высокое содержание сахарозы и гигроскопичность могут привести к липкости и плохому образованию порошка при распылительной сушке [47]. Из-за различий в составе выжимки, обусловленных сортом яблок, способом обработки и содержанием влаги, стандартизация параметров инкапсуляции затруднена. Кроме того, некоторые материалы, из которых изготовлены стенки, могут неблагоприятно взаимодействовать с экстрактами из яблочных выжимок, что приводит к низкой эффективности инкапсуляции или нестабильности [48].

Термическая деструкция чувствительных соединений в ходе высокотемпературных процессов и ограниченная масштабируемость нетепловых методов (сублимационная сушка или коацервация) еще больше затрудняют их промышленное применение. Эти факторы необходимо учитывать, чтобы в полной мере использовать яблочные выжимки в качестве функциональной среды для инкапсуляции. В целом инкапсуляция представляет собой эффективный способ переработки яблочных выжимок, но для реализации всего его потенциала требуется оптимизация процесса, изучение совместимости материалов и разработка масштабируемой технологии, учитывающей особенности яблочных выжимок.

**Экструзия.** Этот высокотемпературный метод кратковременной обработки, широко используется в пищевой промышленности для производства готовых к употреблению круп, снеков и текстурированных ингредиентов. Яблочные выжимки — основной побочный продукт производства фруктовых соков, содержащий моно-, ди- и полисахариды, органические кислоты, фенольные соединения — представляют собой многообещающий потенциал в качестве функционального ингредиента для экструдированных пищевых продуктов.

В исследованиях [93, 94] отмечается, что добавление яблочных выжимок в экструдированные продукты (завтраки и снеки) увеличивает содержание пищевых волокон и фенольных соединений и антиоксидантную активность в сравнении с контрольными смесями без выжимок. При этом питательная ценность таких экструдированных изделий повышается за счет функциональных компонентов яблочного жмыха [49].

В одной из работ авторы [50] анализировали влияние условий экструзии (высокие температуры, влажность смеси) на содержание фенольные соединения в экструдированных продуктах с яблочными выжимками и показали, что значительная их часть сохраняется, а антиоксидантная активность остается на уровне, сопоставимом с исходной смесью. Таким образом экструзия может быть оптимальным процессом для создания готовых к употреблению продуктов, обогащенных антиоксидантами, при тщательно подобранных параметрах процесса.

Использование яблочных выжимок значительно влияет на характеристики конечного продукта, увеличивая способность удерживать воду и облегчая процесс всасывания, что способствует лучшей усвояемости организмом. Тем не менее, наличие в составе выжимок фенольных соединений, а также частиц семян приводит к незначительному снижению органолептических показателей, в частности,

появления горьковатого привкуса. Для достижения оптимального баланса качеств продукта были подобраны наиболее подходящие условия экструзии, включающие влажность сырья (22–26%), температуру нагрева (150°C) и частоту вращения элементов оборудования (180 об/мин). Это позволило сохранить такие ключевые показатели, как степень увеличения объема, влагоудерживающая способность –  $5,60 \pm 0,08$  г/г и  $5,66 \pm 0,53$  мл/г и удельная механическая энергия. Несмотря на риск снижения объема изделия и насыщенности окраски вследствие высокого содержания пищевых волокон, негативное влияние можно минимизировать путем предварительного удаления сердцевинки яблок и высушивания выжимок при точно контролируемых температурных условиях. Таким образом, использование яблочных выжимок представляется перспективным решением благодаря своей экологичности, экономичности и полезным свойствам для здоровья потребителей.

**Компостирование для производства биогаза и обогащения почвы.** Яблочные выжимки содержат большое количество органических веществ, что делает их идеальным сырьем для анаэробного сбраживания. В результате образуется биогаз, который в основном состоит из метана и углекислого газа. Количество биогаза может быть значительным из-за наличия в выжимках натуральных сахаров и целлюлозы, которые легко расщепляются микроорганизмами [51]. Метан может использоваться в качестве возобновляемого источника энергии для отопления, выработки электроэнергии или топлива для транспортных средств. После переработки яблочных выжимок остатки предварительно проверяются: проводится визуальный осмотр, оценивается цвет, запах, влагосодержание, выполняются физико-химические анализы и микробиологические тесты. Для повышения плодородия почвы применяют дигестат — продукт предварительной переработки, который насыщает грунт азотом, фосфором и калием, улучшая его структуру и питательные свойства. Компост на основе яблочных выжимок обогащает почву органикой, способствует лучшему удержанию влаги, активизирует полезную микрофлору и создает благоприятные условия для роста растений, что обеспечивает получение здоровых урожаев. Использование такого компоста снижает негативное воздействие на окружающую среду и уменьшает выбросы парниковых газов, выступая экологически безопасной альтернативой и способствуя долгосрочному оздоровлению почв и развитию устойчивого сельского хозяйства [52, 53].

Однако предварительная термическая обработка, направленная на повышение растворимости органических побочных продуктов, существенно не увеличивает выработку метана. Наблюдаемые ограниченные улучшения могут быть связаны с низким содержанием целлюлозы в побочных продуктах переработки фруктов. Это говорит о том, что гидролиз не является лимитирующей стадией процесса анаэробного сбраживания [52, 54]. С учетом данных факторов биологическая или ферментативная обработка могут более эффективно повышать выход биогаза из побочных продуктов переработки фруктов. Эти подходы позволят целенаправленно воздействовать на органические соединения в побочных продуктах переработки фруктов и стимулировать эффективное расщепление микроорганизмами без необходимости термического воздействия [55, 56].

**Производство биотоплива.** Биомассу в виде побочных продуктов переработки фруктов можно преобразовать в топливо или промежуточные продукты в твердой (биоуголь), жидкой (биоэтанол или пиролизное масло) и газообразной (биогаз или биометан) формах с помощью различных механических, биохимических или термохимических процессов. До 80% органического вещества в жмыхе можно превратить в биотопливо с энергетическим выходом 10–30 Вт/м<sup>3</sup>.

Яблочные выжимки богаты ферментируемыми углеводами: в них содержится 19,2% фруктозы и 1,0% сахарозы, а также небольшое количество тяжелых металлов. Это делает их подходящим сырьем для производства биотоплива. В исследовании Н. Carrère [54] предлагается использовать сушеные яблочные выжимки для предварительной кислотной обработки перед ферментацией, чтобы увеличить производство биоэтанола и метана. В. Molinuevo-Salces и др. [57] подтвердили, что высушенные яблочные выжимки можно использовать в качестве твердого биотоплива. При анаэробном совместном сбраживании навоза достигается высокий выход метана, особенно при низкой концентрации субстрата и органического вещества в смесях. F. Thomas и др. [9] отметили, что яблочные выжимки обладают высоким потенциалом благодаря содержанию клетчатки, антиоксидантов и липидов. Биопереработка позволяет получать ферменты, этанол и функциональные полисахариды.

*Корма для домашних и сельскохозяйственных животных.* Использование яблочных выжимок в качестве компонента кормов для животных и домашних питомцев представляет собой коммерчески выгодную и устойчивую стратегию переработки этого побочного продукта пищевой промышленности. Его интеграция в кормовые системы не только повышает питательную и функциональную ценность, но и способствует сокращению отходов и достижению целей экономии. Яблочные выжимки могут частично заменить более дорогие ингредиенты (зерно и сою) в кормах для животных и питомцев, снижая затраты без ущерба для окружающей среды.

S. Jones и др. отмечают [58], что яблочные выжимки можно использовать как дешевый и устойчивый компонент кормов для крупного рогатого скота (КРС), свиней и птиц, благоприятно влияя на их продуктивность и улучшая пищеварение за счет содержания пищевых волокон. Для жвачных животных яблочные выжимки являются источником ферментируемых углеводов, которые поддерживают здоровье рубца. Их можно смешивать с силосом или другими кормами для обеспечения сбалансированного питания, поскольку они являются источником клетчатки и могут улучшать вкус корма, потенциально повышая его усвояемость.

Л.Н. Фиялович и др. в своей работе [59] установили, что добавление в корм гусей 7% сухих яблочных выжимок, обогащенных хелатом меди и цинка, обеспечивает повышение яйценоскости гусей, способствует повышению выводимости и сохранности гусят.

Исследования, проведенные А.Н. Aghili и коллегами [60], показали, что сушеные яблочные выжимки эффективнее свежих при различных уровнях включения. Использование их в рационе овец привело к улучшению морфологических показателей кишечника и значительному повышению титров антител против вируса болезни Ньюкасла и эритроцитов. Эти результаты демонстрируют практическую пользу яблочных выжимок в животноводстве, птицеводстве и производстве кормов для домашних животных, способствуя как поддержанию их здоровья, так и экономии кормов. Таким образом они достаточно перспективны для переработки в промышленных масштабах, однако для стандартизации переработки, оценки параметров безопасности (содержание пестицидов) и подтверждения экономической эффективности при массовом использовании в коммерческих кормовых рецептурах необходимы дальнейшие исследования.

## **Роль технологий сушки в переработке яблочных выжимок**

Эффективность сушки заключается не только в снижении влажности, но и в прямом влиянии на стабильность фенольных соединений, сохранение структуры волокнистых матриц и экстрагируемость целевых биологически активных веществ. В связи с этим при выборе подходящей технологии сушки необходимо учитывать как чувствительность яблочных выжимок к составу, так и требования к предполагаемому способу их переработки. Традиционные методы термической сушки, в том числе сушка горячим воздухом и сублимационная сушка, широко применяются, но существенно различаются по своему влиянию на качество продукта. Хотя сушка горячим воздухом экономически выгодна и легко адаптируема к производственным условиям, она часто приводит к значительным потерям антиоксидантной активности и фенольных соединений [61]. Сублимационная сушка, хотя и лучше сохраняет термочувствительные соединения, ограничена высоким энергопотреблением и низкой производительностью, что ограничивает ее применение в промышленных масштабах. Новые методы нетепловой сушки, в частности электрогидродинамическая сушка и технологии с использованием импульсного электрического поля, открывают альтернативные пути стабилизации яблочных выжимок с сохранением биоактивных веществ и снижением термической деградации [62, 63]. Эти методы продемонстрировали свой потенциал в сохранении питательных и функциональных свойств при одновременном снижении энергопотребления. Однако проблемы, связанные с оптимизацией процессов, стандартизацией оборудования и технико-экономической целесообразностью остаются нерешенными. В недавнем исследовании [64] для оценки сравнительных преимуществ методов сушки в контексте переработки яблочных выжимок использовали сравнительный анализ производительности с использованием таких интегрированных показателей, как энергоэффективность, углеродный след и скорость сушки. Данный подход позволяет стратегически подходить к выбору методов сушки

в соответствии с последующими этапами переработки, включая экстракцию поли- и фенольных соединений, инкапсуляцию, обогащение кормов и получение биополимеров.

Исходя из этого рассмотрим влияние методов сушки на физико-химические характеристики, функциональные свойства и возможность оптимального использования яблочных выжимок в пищевой и непищевой промышленности.

## Различные методы сушки: оптимальные условия и ограничения

**Сушка горячим воздухом.** Сушка яблочных выжимок горячим воздухом требует особой оптимизации для сохранения питательных веществ и обеспечения эффективности [65]. Оптимизация процесса включает в себя контроль температуры, скорости воздушного потока, времени сушки и содержания влаги для получения продукта, который будет устойчив к хранению и богат питательными веществами такими, как клетчатка и антиоксиданты. Сушка выжимок сопровождается двумя процессами – тепловым гидролизом протопектина при температуре выше 80°C, в результате которого образуются растворимые пектины и ряд других продуктов гидролиза, и разрушением растворимого пектина, происходящим при повышенных температурах. При низких температурах (ниже 80°C) сушки и пониженном давлении (ниже 50 кПа) растворимые пектины разрушаются в минимальной степени [9], но в то же время еще происходит гидролиз протопектинов, в результате которого количество растворимых пектинов пополняется. В связи с этим, сушка выжимок при  $T = 100^\circ\text{C}$  и  $P = 70$  кПа характеризуется максимальным содержанием растворимого пектина [66].

Качество пектина зависит не только от свойств сырья, из которого его получают, но и от способа подготовки к производству данного сырья. Яблочные выжимки содержат множество минеральных веществ и витаминов, например калий (150–200 мг/100г), витамин С (5,5 мг/100 г) и др., но после непродолжительного хранения сырых выжимок на открытом воздухе происходит их быстрое окисление и порча [66]. Следовательно, необходимо их консервирование, одним из наиболее распространенных способов которого является сушка. К основным недостаткам сушки горячим воздухом относятся высокая усадка продукта и высокое энергопотребление. Ограничения, связанные с сушкой горячим воздухом, можно устранить с помощью таких гибридных методов, как комбинированная сушка микроволнами и горячим воздухом или предварительная обработка (в электрическом поле), которые повышают эффективность и сохраняют качество.

I.M. Bhat и др. в исследовании [67] сравнивали два метода, подчеркивая преимущества новейших способов консервирования. Сушка выжимок в микроволновой печи привела к увеличению насыпной плотности ( $0,55 \pm 0,01$  г/см<sup>3</sup>), способности к гидратации ( $3,35 \pm 0,09$  мл/г), способности связывать масло ( $0,95 \pm 0,04$  г/г), индекса растворимости ( $14,0 \pm 0,9\%$ ) и эмульгирующей способности ( $60,0 \pm 1,0\%$ ) порошка. В высушенном в печи порошке наблюдались более низкие значения насыпной плотности ( $0,50 \pm 0,01$  г/см<sup>3</sup>), способности к гидратации ( $3,04 \pm 0,08$  мл/г), способности связывать масло ( $0,70 \pm 0,03$  г/г), индекса растворимости ( $10,0 \pm 0,8\%$ ) и эмульгирующей способности ( $48,0 \pm 0,9\%$ ).

Для снижения энергопотребления и минимизации потерь качества при сушке горячим воздухом необходимы дальнейшие исследования. Также следует изучить гибридные подходы (микроволновая сушка горячим воздухом) и управление процессом в режиме реального времени для повышения эффективности и однородности продукта.

**Сублимационная сушка.** Сублимационная сушка (СС), которую часто называют лиофилизацией, проводится при низких температурах и высоком вакууме. Этот метод идеально подходит для продуктов, чувствительных к теплу и склонных к окислению. Сохранение влаги в твердом агрегатном состоянии (лед) позволяет максимально сохранить первоначальную форму, структуру, объем и питательные вещества пищевого продукта. Несмотря на ряд преимуществ, СС является одним из самых дорогостоящих методов консервирования, поскольку ее энергоемкость значительно выше в сравнении с конвективной сушкой горячим воздухом. Для получения качественного сублимированного изделия критически важен контроль следующих параметров: скорость фронта замораживания, температура, общее давление газа и конечное среднее содержание влаги. Поскольку сублимационная сушка во всем мире считается эталоном качества конечного продукта, ее эффективность часто принимают за базовый уровень для сравнения с другими методами дегидратации.

Для гарантированного осуществления фазового перехода всей содержащейся в продукте влаги в твердое состояние необходимо охладить сырье ниже его криоскопической температуры. Для яблок, в зависимости от сорта и степени зрелости, она в среднем составляет от минус 1,5 до минус 2,5°C. Поскольку жмых содержит меньше свободной влаги, по сравнению с целым плодом, его точка замерзания будет несколько ниже.

Применение режимов быстрого замораживания при температурах минус 40–45°C, что существенно ниже криоскопической температуры продукта, является ключевым фактором эффективности всего последующего цикла сублимационной сушки. Этот температурный порог обеспечивает высокую скорость продвижения фронта кристаллизации, что приводит к формированию множества мелких кристаллов льда внутри клеточной структуры, а не единичных крупных, которые повреждают мембраны. Образовавшаяся мелкокристаллическая структура льда обладает развитой поверхностью, что многократно ускоряет процесс последующей сублимации (перехода льда в пар), напрямую сокращая время основной стадии сушки и повышая качество готового продукта за счет сохранения его исходной пористости и формы.

Многостадийный процесс, особенно сублимация, может занимать 12–24 ч в зависимости от объема высушиваемого жмыха. Для сублимированных продуктов характерна минимальная усадка, высокая пористость и сохранение исходной клеточной структуры сырья [69]. В условиях промышленного производства СС яблочного жмыха может возникать ряд технологических ограничений, связанных с длительностью цикла и высокими энергозатратами. Это делает метод более целесообразным для малотоннажных партий или высокомаржинальных продуктов.

В ряде работ [71–74], посвященных сублимационной сушке фруктовых выжимок, показано, что повышение температуры хранения до 40°C может сократить время сушки более чем на 50%. Несмотря на то, что данный метод консервирования сохраняет высокое качество продукта, он довольно дорогостоящий и трудоемкий. Для повышения промышленной эффективности СС необходимы исследования в области оптимизации, направленные на экономию энергии, сокращение цикла сушки и улучшение предварительной обработки.

Изучение воздействия низкотемпературной плазмы (НП) на процесс лиофилизации плодов калины [70] показало, что предварительная плазменная обработка в режиме дугового разряда существенно ускоряет сублимационное высушивание благодаря формированию сквозных каналов на поверхности их покровной оболочки. Применение НП позволило увеличить скорость обезвоживания в три раза, существенно сократив общий цикл операции. В частности, плазменная модификация сокращает время высушивания слайсов клубники на 47–89 мин при достижении целевой массовой доли влаги 5% [71].

*Сушка в псевдооживленном слое.* Сушка в псевдооживленном слое (СПС) широко применяется для обработки влажных сыпучих и гранулированных материалов, включая суспензии, пасты и взвеси, которые могут быть псевдооживлены в слоях инертных твердых веществ. Данный метод особенно востребован в пищевой, фармацевтической и биотехнологической отраслях для сушки углеводов, биоматериалов, напитков, фармацевтических препаратов, товаров для здоровья, дубильных веществ и других продуктов. Для поддержания стабильного псевдооживленного режима часто используют такие инертные материалы, как гранулы полиэтилена высокой плотности, полистирола, алюминия или тефлона.

К основным преимуществам СПС относятся высокая скорость удаления влаги, эффективная теплопередача, хорошая транспортировка материала внутри сушилки, простота управления процессом и относительно низкие затраты на техническое обслуживание. Однако метод имеет и ряд недостатков: значительный перепад давления, высокое энергопотребление, сложности с псевдооживлением некоторых сыпучих материалов, а также нестабильное качество продукции при несовершенных конструкциях сушилок. Дополнительные сложности связаны с эрозией оборудования, уносом и измельчением мелких частиц, а также их агломерацией. Эти недостатки зачастую обусловлены несоблюдением технологических режимов и ошибками в проектировании сушильных агрегатов.

Исследование F. Thomas и соавторов показало [73], что применение вихревого движения или механического вибратора с большей амплитудой и меньшей частотой способствует повышению скорости

сушки и снижению энергозатрат. Это улучшает псевдооживление, диспергирование воздуха, а также процессы тепло- и массообмена. Наиболее эффективным способом создания вихревого движения признано использование модифицированного воздухораспределителя, который не увеличивает электрическую или механическую нагрузку и не приводит к дополнительному росту гидродинамического перепада давления в колонне с псевдооживленным слоем.

Примеры сушки неоднородных ежевичных выжимок с помощью СПС описаны в работе A. Sozzi и др. [74], где режим барботирования обеспечивал интенсивный тепло- и массообмен, позволяя существенно сократить время процесса (до 12–30 мин). Полученные гранулы ежевики содержали около 80% пищевых волокон, сохраняли до 45% общего содержания фенольных соединений и обладали характерным цветом. Сушка при повышенной температуре (70–80°C) приводила к уменьшению размера гранул и ускорению процесса, тогда как при 50°C физико-химические свойства гранул сохранялись лучше. Оптимальной для получения функциональной клетчатки с высоким содержанием фенольных веществ признана температура 60°C.

**Распылительная сушка.** При реализации метода распылительной сушки жидкая фаза диспергируется в сушильной камере с образованием мелкодисперсного аэрозоля. Полученные капли вступают в контакт с потоком горячего сушильного агента (как правило, воздуха), что инициирует интенсивный тепло- и массообмен. Данный технологический процесс включает три основных этапа: диспергирование, смешивание с испарением влаги, а также сепарацию с последующим отбором сухого продукта, в твердой матрице микрочастиц которого оказываются инкапсулированы целевые биологически активные вещества (БАВ) [75].

Указанный метод эффективен для инкапсулирования биоактивных соединений, извлеченных из растительного сырья, в частности из яблочных выжимок [97]. Технологический цикл начинается с получения жидкого экстракта путем смешивания сырья с водой или органическим растворителем для выделения целевых компонентов. Затем в полученную систему вводится материал-носитель (например, мальтодекстрин или гуммиарабик), выполняющий роль защитной оболочки для нативных соединений.

Эффективность данного подхода подтверждается тем, что экстракт с высокой концентрацией общего содержания фенолов (ОСФ), составляющей  $97,4 \pm 1,1$  мг ГАЕ/г в пересчете на сухое вещество, был успешно инкапсулирован с применением мальтодекстрина в качестве агента оболочки [97].

Преобразование БАВ в порошкообразную форму обеспечивает их стабилизацию, что способствует значительному увеличению срока хранения. Это достигается за счет снижения скорости окислительных и гидролитических процессов, а также деградации, которым жидкие формы подвержены в значительно большей степени.

Многие биологически активные вещества (целлюлоза, гемицеллюлоза), содержащиеся в побочных продуктах переработки фруктов, не растворяются в воде, ограничивая их усвоение. Сушка распылением улучшает их растворимость и диспергируемость, что позволяет эффективнее интегрировать БАВ в состав продуктов питания, напитков и пищевых добавок [76]. При данном виде обработки необходимо оптимизировать такие параметры, как температура воздуха на входе, относительная влажность воздуха, температура воздуха на выходе и скорость подачи продукта, производительность форсунки. В ряде исследований [98, 99] показано, что при сушке распылением семян и кожуры жабутикабы, кожуры ананаса антиоксидантная активность полученных порошков сохранялась в большей степени чем у образцов, высушенных классическими способами, однако, использование яблочных выжимок с помощью этого метода остается недостаточно изученным.

Переработка яблочных выжимок методом распылительной сушки сопряжена со значительными эксплуатационными трудностями. Высокое содержание моно- и дисахаридов в сырье приводит к их термической деградации в процессе высокотемпературной обработки, вследствие чего высушиваемый материал интенсивно налипает на внутренние поверхности сушильных камер. Данный фактор вызывает технологические сбои и снижает общую эффективность оборудования. Ситуация усугубляется присутствием растительных волокон, способствующих засорению распылительных устройств, что дополнительно снижает выход целевого порошка.

Другой существенной проблемой является диспергирование выжимок в процессе сушки с образованием мелкодисперсной пыли. Ее унос газовым потоком не только сокращает объем готового

продукта, но и повышает риск взрывопожароопасности производства, что обуславливает необходимость интеграции высокоэффективных систем пылеулавливания (циклонов и рукавных фильтров).

Указанные ограничения делают распылительную сушку сложным и многофакторным методом утилизации яблочных выжимок, требующим тщательного подбора параметров процесса для сохранения нативных свойств БАВ [63]. В связи с этим актуальным направлением дальнейших исследований остается оптимизация режимов распыления и компонентного состава материалов-носителей с целью повышения эффективности инкапсуляции и улучшения сыпучести получаемых порошков.

**Сушка солнечной энергией.** Цель сушки на солнце — обеспечить дополнительный нагрев при низкой влажности. Теплый воздух может поглощать больше влаги, чем холодный [77]. Солнечное излучение снижает относительную влажность воздуха, в котором происходит сушка, и повышает давление пара внутри продукта. Таким образом, сушка на солнце обеспечивает желаемое качество продукта без негативного воздействия на окружающую среду. Температура и скорость воздушного потока при сушке на солнце важны, поскольку они влияют на количество фенольных соединений в продукте. Сушка яблочной кожуры в солнечной сушилке при температуре 50–80°C и относительной влажности 18–38% позволила сократить время процесса до 100–310 мин [78]. Воздухообмен в 150 и 300 м<sup>3</sup>/ч незначительно влиял на сушку яблочной кожуры при высоких температурах, но оказывал существенное влияние при низких температурах. Потребление энергии было низким — в диапазоне от 6,72 до 14,48 Вт·ч. Сушка с применением солнечной энергии экологична, но сильно зависит от погодных условий.

Развитие гибридных методов сушки пищевого сырья (в частности, с интеграцией солнечной энергии) требует глубокого изучения кинетики процессов. Проведение таких исследований позволит оптимизировать нестационарный тепло- и массообмен, повысить энергоэффективность технологии и гарантировать сохранение нативных свойств продукции.

**Электрогидродинамическая сушка.** Электрогидродинамическая (ЭГД) сушка представляет собой перспективную технологию низкотемпературного обезвоживания, характеризующуюся относительно малым энергопотреблением и низкими эксплуатационными затратами. Согласно данным работы [79], кинетические закономерности ЭГД-сушки биоматериалов аналогичны конвективному процессу и также включают периоды постоянной и падающей скорости испарения. Физический механизм интенсификации массообмена при ЭГД-воздействии обусловлен генерацией холодной плазмы в сильном электрическом поле: возникающий при этом «ионный ветер» турбулизирует пограничный слой среды

Продолжительность сушки термолабильных биоматериалов в ЭГД условиях при температуре 20°C эквивалентна сушке горячим воздухом при температуре 40°C, а режимные параметры ЭГД процесса обеспечивают высокое качество конечного продукта [79]. При сравнении указанных способов авторы выявили преимущества сушки в электростатическом поле и определили, что в условиях ЭГД сушки наблюдается незначительное повреждение клеточной структуры и уменьшение содержания фенольных соединений сушеных яблочных долек, лучше сохраняется их цвет и другие органолептические показатели. Кроме того, на примере сушки с помощью электромагнитного излучения оценивалось влияние толщины продукта на кинетику сушки, энергопотребление и качество продукта [80].

K. Iranshahi и коллеги [22] проанализировали эффективность сушки яблочных ломтиков с учетом энергии, воздействия на окружающую среду, кинетики сушки, экономических показателей и качества конечного продукта и выявили эффективность применения и снижения энергозатрат. К сожалению, масштабирование такого процесса в производственных условиях для сушки с использованием ЭГД по-прежнему является проблемой.

Несмотря на высокий потенциал ЭГД-сушки в аспекте сохранения качества целевых продуктов и повышения энергоэффективности, ее практическая реализация ограничивается использованием малопроизводительных установок, не рассчитанных на переработку промышленных объемов сырья. В связи с этим актуальной задачей является оценка масштабируемости данного метода и проведение исследований по его интеграции в действующие технологические линии перерабатывающих предприятий. Сравнительный анализ преимуществ, недостатков и удельной энергоемкости различных способов обезвоживания представлен в таблице 2

Таблица 2. Сравнительная характеристика методов сушки

Table 2. Comparison of drying methods

| Метод                                         | Возможности                                                                                                                               | Ограничения                                                                                                                                                                               | Удельный расход энергии, кВт·ч/кг | Источник    |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| сушка горячим воздухом                        | широко доступен и масштабируем; эффективен для быстрого снижения влажности                                                                | риск потери БАВ, цвета и усадки продукта; ограниченное сохранение летучих веществ                                                                                                         | 2,2–22,2                          | [81]        |
| сушка солнечной энергией                      | экологически безопасный; низкий расход энергии; подходит для небольших предприятий и с/х угодий                                           | зависимость от погодных условий; низкая скорость сушки; плохой контроль температуры и влагосодержания; риск загрязнения                                                                   | 3,00                              | [82]        |
| распылительная сушка                          | эффективен для жидких экстрактов яблочных выжимок; хороший потенциал для инкапсуляции; высокая производительность                         | требует подачи продукта в жидком виде; термическое воздействие на чувствительные БАВ; не предназначена для твердых веществ                                                                | 1,58                              | [81]        |
| сушка в псевдооживленном слое                 | равномерное высушивание; хорошая эффективность тепло- и массообмена; подходит для гранулированных яблочных выжимок                        | механическое повреждение продукта, пылеобразование: нужны дополнительные системы аспирации и фильтрации; неравномерность сушки                                                            | 1,36                              | [72–74]     |
| микроволновая печь с функцией вакуумной сушки | быстрая сушка при низких температурах; хорошая сохранность цвета, аромата и БАВ; энергоэффективность при сушке в вакууме                  | стоимость оборудования; риск неравномерного нагрева; ограниченная масштабируемость; требует тщательного контроля процесса                                                                 | 1,0–1,4                           | [23]        |
| сублимационная сушка                          | сохранность фенольных соединений при тем-рах сушки не выше 40°C, антиоксидантная активность и структурная целостность; минимальная усушка | высокие эксплуатационные расходы; длительность сушки от 10 ч; энергозатратность                                                                                                           | 4,72–11,67                        | [68–71, 74] |
| электрогидродинамическая сушка                | низкое энергопотребление; сохранность цвета конечного продукта, фенольных и БАВ                                                           | ограничено лабораторными экспериментами; высокая влажность влияет на эффективность сушки; сложность интеграции в реальное производство                                                    | 0,03–0,75                         | [79], [80]  |
| сушка с помощью ультразвука                   | сокращение времени сушки; сохранение термочувствительных соединений; может использоваться в сочетании с другими методами                  | требует точного контроля параметров; сложность интеграции в реальное производство; высокоинтенсивный УЗ может повреждать клеточные стенки и структуру некоторых чувствительных материалов | 2,0–3,8                           | [83]        |

## Ключевые показатели эффективности

К. Iranshahi и соавторы [22] проанализировали различные методы сушки с точки зрения энергопотребления, эксергии, воздействия на окружающую среду, кинетики сушки, экономической эффективности и качества конечного продукта. Ключевые показатели эффективности для оценки результативности различных технологий сушки в этом исследовании можно разделить на четыре категории: энергетический анализ, анализ затрат и выгод, анализ качества и анализ воздействия на окружающую среду.

**Энергетический анализ.** Процессы термического обезвоживания характеризуются высокой энергоемкостью, при этом точный объем энергозатрат существенно варьируется в зависимости от параметров технологического процесса. Для оценки эффективности сушильного оборудования предложен ряд критериев, однако объективное сравнение различных технологий возможно лишь на основе таких абсолютных параметров, как удельное энергопотребление (УЭП) и удельная скорость сушки (УСШ).

Параметр УЭП отражает количество затраченной энергии, необходимое для испарения единицы массы влаги, и в международной практике выражается в мегаджоулях на килограмм (МДж/кг). Данная величина рассчитывается как отношение общей потребляемой мощности установки  $P$  (кВт) к средней скорости влагоудаления (кг/ч) с учетом коэффициента перевода временных единиц. В свою очередь, УСШ характеризует интенсивность процесса и определяет изменение влагосодержания материала в единицу времени, отнесенное к единице поверхности испарения (или массы сухого вещества) [22].

**Качество.** Качество продукта во многом зависит от технологии и режимных параметров процесса влагоудаления. Для потребителей очень важны органолептические свойства, которые являются одной из основных характеристик сушеных продуктов питания. Степень регидратации считается показателем повреждения материала в результате сушки и обработки. Чем выше коэффициент регидратации, тем меньше структурных повреждений происходит в процессе обезвоживания. Общее содержание фенолов связано с более высокой антиоксидантной активностью фруктовых продуктов, которые следует учитывать [22]. Содержание влаги не должно превышать 5–7% и более, в зависимости от вида продукции, активность воды ( $a_w$  на уровне ниже 0,6) и допустимый порог микробной нагрузки в сухих продуктах (не больше 10 000 КОЕ/г) — это другие факторы качества, которые необходимо учитывать с точки зрения безопасности для человека.

**Воздействие на окружающую среду.** Вторичная переработка яблочных выжимок способствует снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду, минимизируя процессы гниения биомассы и сопутствующую эмиссию парниковых газов [84]. Тем не менее, совокупный экологический эффект может нивелироваться за счет существенного потребления энергоресурсов на этапе переработки. Количественная оценка воздействия технологий обезвоживания на изменение климата осуществляется на основе глобальной статистики выбросов диоксида углерода.

Данный методологический подход базируется на анализе удельного энергопотребления (УЭП) сушильной установки, которое находится в прямой зависимости от величины углеродного следа (УС) производства [64]. При этом структура эмиссии  $\text{CO}_2$  определяется типом используемого энергоносителя: для электроприводных систем учитываются косвенные выбросы на этапе генерации электроэнергии, в то время как при сжигании ископаемого топлива в расчет принимаются прямые выбросы непосредственно от сушильного агрегата.

**Экономический анализ.** Переработка побочных продуктов производства сопряжена не только с определенными расходами, но и с потенциальной коммерческим эффектом, обусловленным созданием добавленной стоимости и сокращением затрат на утилизацию отходов. Для объективной оценки экономической целесообразности внедрения подобных инициатив необходим комплексный анализ издержек и выгод, позволяющий определить соотношение прогнозируемой экономии и затраты на реализацию проекта.

В структуре оценки затрат на сушильное оборудование и процессы сушки выделяют три основные группы факторов.

Постоянные расходы (fixed costs) – представляют собой долгосрочные инвестиции, не зависящие от объема производства. К ним относятся первоначальные капитальные вложения на приобретение,

монтаж и запуск сушильного оборудования, амортизационные отчисления по основным средствам и зданиям, выплаты процентов по инвестиционному капиталу, страховые взносы, постоянные налоговые и арендные платежи, а также фиксированная часть затрат на техническое обслуживание и административно-управленческие расходы.

Переменные расходы (variable costs) – непосредственно зависят от объема выпускаемой продукции. В эту категорию входят затраты на сырье, энергоносители и коммунальные услуги, прямые расходы на оплату труда производственного персонала (включая операторов, транспортировщиков, контролеров и лабораторный персонал), текущий ремонт оборудования, а также прочие прямые издержки и альтернативные расходы.

Альтернативные издержки (opportunity costs) – отражают упущенную экологическую или социальную выгоду, возникающую при выборе одной технологии сушки в ущерб другой. Этот компонент анализа позволяет учесть не только прямые экономические, но и косвенные эффекты, связанные с воздействием на окружающую среду и общество.

Комплексный учет перечисленных факторов обеспечивает объективную оценку экономической эффективности проектов по утилизации побочных продуктов и внедрению современных технологий сушки [64].

**Анализ затрат и выгод.** Эффективность применения технологии сушки в структуре пищевых систем определяется как прирост ценности конечного продукта по сравнению с исходным сельскохозяйственным сырьем. Ключевыми составляющими этой технологической выгоды являются:

- повышение ценности готового продукта за счет улучшения его качественных и потребительских свойств, а также концентрирования нутриентов;
- увеличение срока хранения пищевой матрицы (стабилизация сырья) и возможность реализации продукции вне сезона сбора урожая, что снижает продовольственные потери и расширяет рыночные возможности;
- снижение объемов и массы дегидратированного продукта, что приводит к уменьшению логистических затрат на его хранение и транспортировку в общей цепи поставок.

Перечисленные преимущества могут быть выражены в денежном эквиваленте, например, через годовой объем выручки от реализации продукции.

Для оценки инвестиционной привлекательности проектов по внедрению сушильного оборудования используются следующие экономические показатели:

- ✓ период окупаемости (Payback Period, PP) — срок, в течение которого вложенные инвестиции возвращаются за счет полученной прибыли. Чем короче этот период, тем ниже инвестиционные риски и выше привлекательность проекта. Однако данный показатель не учитывает временную стоимость денег и рентабельность проекта за пределами срока окупаемости [64];
- ✓ чистая приведенная стоимость (Net Present Value, NPV) — отражает разницу между дисконтированными денежными притоками и оттоками за весь жизненный цикл проекта. Положительное значение NPV свидетельствует о том, что проект генерирует доход, превышающий альтернативные издержки капитала;
- ✓ внутренняя норма доходности (Internal Rate of Return, IRR) — ставка дисконтирования, при которой NPV проекта равна нулю. Проект считается экономически эффективным, если IRR превышает стоимость привлеченного капитала;
- ✓ анализ жизненного цикла (Life Cycle Costing, LCC) — метод оценки совокупных затрат на владение и эксплуатацию оборудования на протяжении всего срока его службы. В сушильных технологиях основная доля расходов обычно приходится на операционные затраты (энергия, сырье, обслуживание), а не на капитальные вложения.

Например, в своей работе Е.В. Костина [100] оценивала экономическую целесообразность использования солнечных сушилок, проводя комплексный экономический анализ, включающий расчет годовых затрат, экономии в течение жизненного цикла, срока окупаемости и внутренней нормы доходности. В качестве ключевого показателя эффективности сушки биомассы использовалась переменная стоимость сушки на единицу массы.

Стоит отметить, что эффективность сушки зависит как от физических, так и от экономических факторов. Например, в работе [64] показано, что если скорость сушки ограничена внутренней диффузией влаги в продукте, то увеличение скорости обдува практически не ускоряет процесс. При этом затраты на электроэнергию заметно растут, что делает технологию экономически невыгодной.

### **Направления применения продуктов переработки яблочных выжимок**

Яблочные выжимки, остающиеся после отжима сока и производства сидра, представляют собой богатый источник пищевых волокон, фенольных соединений, пектина и других биологически активных веществ, что делает их перспективным ресурсом для различных отраслей, включая пищевую промышленность, фармацевтику, косметику и биотехнологии. В рамках концепции экономики замкнутого цикла и устойчивого развития этот некогда просто утилизируемый материал все чаще рассматривается как ценная добавка в функциональные продукты питания [85]. Благодаря высокому содержанию растворимых и нерастворимых пищевых волокон (целлюлоза, гемицеллюлоза, пектин) яблочные выжимки способны обогащать хлебобулочные изделия, йогурты и закуски, улучшая их пищевую ценность и текстуру [86, 93].

Яблочные выжимки рассматриваются не только как побочный продукт переработки фруктов, но и как ценное кормовое сырье и субстрат для энергетического использования. В работе D. Malenica показано [101], что включение яблочных выжимок в рацион жвачных животных может положительно влиять на ферментацию в рубце и метаболизм микробиоты, что отражается на профиле ферментации и экспрессии полезных ферментативных реакций. Например, добавление высушенных яблочных выжимок в корм молочных коров улучшало параметры ферментации, снижало концентрацию аммиака и выбросы метана, а также увеличивало общее содержание летучих жирных кислот, свидетельствуя о положительном влиянии на пищеварительные процессы у животных, за счет сочетания пищевых волокон и биоактивных веществ [87]. Кроме кормовой ценности, яблочные выжимки являются перспективным субстратом для анаэробного сбраживания с целью производства биогаза и других энергетических продуктов. К исходным материалам с высоким потенциалом биогазовой отдачи относятся выжимки из яблочного сока и сидра, структурными углеводами, что делает их подходящими для ферментации с получением как метана, так и биоэтанола. В рамках подхода биоконверсии замкнутого цикла такие выжимки могут сначала использоваться для получения этанола, а затем остаточная твердая фракция — для повышения выхода метана при анаэробном сбраживании, что демонстрирует энергетическую ценность этих отходов и их потенциал в рамках устойчивых технологий производства возобновляемой энергии [88]. Кроме того, фенольные соединения и другие биологически активные компоненты, содержащиеся в яблочных выжимках, успешно используются в косметических формулах, способствуя защите кожи от оксидативного повреждения и стабилизации структуры косметических продуктов [2]. Яблочный жмых также является источником пектина и пищевых волокон, которые находят применение в производстве биоразлагаемых пленок и упаковочных материалов за счет своих гелеобразующих и эмульгирующих свойств, что особенно актуально в контексте развития устойчивых и экологичных материалов. Например, порошки яблочных выжимок успешно интегрируют в состав пленок на основе пектина для создания биополимерных упаковок, снижая количество промышленных отходов и минимизируя экологическое воздействие [89].

В настоящее время яблочные выжимки рассматриваются как перспективное органическое удобрение и почвенный кондиционер, позволяющие улучшить физико-химические и биологические свойства почвы. Экспериментальные данные показывают [90, 91], что внесение яблочного жмыха в почву стимулирует микробную активность, ускоряет превращение азота и может оказывать влияние на рост сельскохозяйственных культур, что делает его полезным компонентом для повышения плодородия почв и поддержания устойчивого земледелия. Кроме того, яблочные выжимки часто используются в процессе компостирования органических отходов вместе с навозом или другими материалами, улучшая качество компоста и способствуя сохранению азота в органическом матриксе, благодаря чему снижаются потери аммиака и оксидов азота [91]. Современные исследования [92, 102] подтверждают потенциал яблочных выжимок в качестве натурального адсорбента для очистки загрязненных водных систем. Благодаря высокому содержанию клетчатки, пектина и других природных полисахаридов, яблочный

жмых обладает выраженной способностью связывать и адсорбировать ионы тяжелых металлов и другие загрязняющие вещества из водных растворов, что делает его эффективным и экономичным материалом для экологически безопасной очистки сточных вод и устранения токсичных примесей [92].

## Заключение

Яблочные выжимки, являющиеся вторичным сырьем переработки яблок, богаты питательными веществами и обладают значительным потенциалом для рационального использования в пищевой, энергетической, фармацевтической и экологической отраслях. Однако для сохранения качественных характеристик побочных продуктов производств переработки яблочного сырья, обладающего высокой влажностью и склонностью к быстрой порче, необходимы дополнительные исследования с применением современных методов и средств технологии консервирования. В данном обзоре особое внимание уделено технологиям сушки, позволяющим продлить срок хранения сырья и повысить эффективность его переработки в продукты с высокой добавленной стоимостью.

Среди рассматриваемых методов, представлены термические, в частности сублимационная сушка, позволяющая высушивать продукт при температурах от минус 40 до минус 45°C, и такие перспективные комбинированные технологии, как электрогидродинамическая сушка. Оба метода дают неоспоримые преимущества в сохранении питательных и органолептических свойств, однако их широкое внедрение в промышленность сопряжено с рядом вызовов: высокие капитальные затраты на оборудование и значительная энергоемкость процесса, что увеличивает себестоимость продукции. Для электрогидродинамической сушки — это относительная новизна технологии, отсутствие единых стандартов и, как следствие, ограниченный выбор серийного промышленного оборудования.

Традиционные термические методы, в частности сушка горячим воздухом, по-прежнему широко используются из-за простоты эксплуатации, но часто приводят к ухудшению качества продукции и высокому энергопотреблению. Несмотря на достигнутый прогресс, сравнительные оценки методов дегидратации на основе таких единых показателей эффективности, как энергоэффективность, качество продукции, углеродный след и экономическая целесообразность, в существующей литературе представлены в ограниченном объеме. Кроме того, отмечается дефицит пилотных и промышленных испытаний, подтверждающих возможность практического внедрения новых технологий. В будущих исследованиях необходимо уделить первоочередное внимание оптимизации режимных параметров сушки, разработке гибридных систем или методов с предварительной обработкой сырья. Также критически важно проведение анализа затрат и выгод совместно с оценкой жизненного цикла для обеспечения эффективной, масштабируемой и устойчивой переработки яблочных выжимок. Устранение этих пробелов будет способствовать развитию экономики замкнутого цикла и соответствовать глобальным стратегиям сокращения продовольственных потерь.

## Декларация об использовании искусственного интеллекта

При подготовке рукописи были использованы инструменты искусственного интеллекта GigaChat (разработчик Сбер, модель GigaChat-3-Ultra) и ChatGPT (разработчик OpenAI, модель GPT- 4o) исключительно для языкового редактирования, улучшения стиля изложения и проверки грамматики. Авторы заверяют, что все фактические данные и выводы были ими проверены и верифицированы, они несут полную ответственность за содержание данной рукописи.

## Литература

1. Ferreira J., Tkacz K., Turkiewicz I.P., Wojdyło A., Sousa I. Apple pomace flour fractions as functional ingredients: compositional and bioactivity profiling. *Food Chemistry*. 2026, V. 530, article 147862. DOI: 10.1016/j.foodchem.2026.147862
2. Vandorou M., Plakidis C., Tsompanidou I.M., Adamantidi T., Panagopoulou E.A., Tsoupras A. A review on apple pomace bioactives for natural functional food and cosmetic products with therapeutic health-promoting properties. *Int J Mol Sci*. 2024, V. 25, no. 19, article 10856. DOI: 10.3390/ijms251910856
3. Naseem Z., Bhat N.A., Mir S.A. Valorisation of apple pomace for the development of high-fibre and polyphenol-rich wheat flour cookies. *Scientific Reports*. 2024, no. 1, V. 530, article 25912. DOI: 10.1038/s41598-024-77377-8

4. Sun X., Zhang W., Meng X., & Shokri S. Optimizing microwave-assisted extraction of ursolic acid from apple pomace using response surface methodology. *Frontiers in Nutrition*. 2025. V. 12, article 1604863. DOI: 10.3389/fnut.2025.1604863
5. Kosmala M., Kołodziejczyk K., Zdunczyk Z., Juskiewicz J., Boros D. Chemical composition of natural and polyphenol-free apple pomace and the effect of this dietary ingredient on intestinal fermentation and serum lipid parameters in rats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011, V. 59, no. 17, pp. 9177–9185. DOI: 10.1021/jf201950y
6. Bartel I., Koszarska M., Wysocki K., Kozłowska M., Szumacher-Strabel M., Cieślak A., Józwiak A. Effect of dried apple pomace (DAP) as a feed additive on antioxidant system in the rumen fluid. *Int J Mol Sci*. 2022, V. 23, no. 18, article 10475. DOI:10.3390/ijms231810475
7. Gadulrab K., Sidoruk P., Kozłowska M., Szumacher-Strabel M., Lechniak D., Kołodziejski P., Cieślak A. Effect of feeding dried apple pomace on ruminal fermentation, methane emission, and biohydrogenation of unsaturated fatty acids in dairy cows. *Agriculture*. 2023, V. 13, no. 10, article 10475. DOI:10.3390/ijms231810475
8. Juśkiewicz J., Żary-Sikorska E., Zduńczyk Z., Król B., Jarosławska J., Jurgoński A. Effect of dietary supplementation with unprocessed and ethanol-extracted apple pomaces on caecal fermentation, antioxidant and blood biomarkers in rats. *Br J Nutr*. 2012, V. 107, no. 8, pp. 1138–1146. DOI:10.1017/S0007114511004144
9. Thomas F., Abebe G., Emenike C., Martynenko A. Sustainable utilization of apple pomace: Technological aspects and emerging applications. *Food Res Int*. 2025, article 117149. DOI: 10.1016/j.foodres.2025.117149
10. Семенова А.А., Федорченко Е.А. Перспективы развития виноградарства и виноделия в России [Электронный ресурс] // Вектор экономики. 2022. № 12. [https://vectoreconomy.ru/images/publications/2022/12/regionaleconomy/Semenova\\_Fedorchenko.pdf](https://vectoreconomy.ru/images/publications/2022/12/regionaleconomy/Semenova_Fedorchenko.pdf) (дата обращения: 20.04.2026)
11. Filimonau V., Ermolaev V. A. Mitigation of food loss and waste in primary production of a transition economy via stakeholder collaboration: A perspective of independent farmers in Russia. *Sustainable Production and Consumption*. 2021, V. 28, pp. 359–370. DOI: 10.1016/j.spc.2021.06.002
12. Гайдук В.И., Линченко В.В. Циклическая экономика в АПК региона // Московский экономический журнал. 2025. № 4. С. 154–165. DOI: 10.55186/2413046X\_2025\_10\_4\_101
13. Zaky A.A., Witrowa-Rajchert D., Nowacka M. Turning apple pomace into value: sustainable recycling in food production—a narrative review. *Sustainability*. 2024, V. 16, no. 16, article 7001. DOI: 10.3390/su16167001
14. Донченко Л.В., Красноселова Е.А. Физико-химические основы процесса извлечения пектиновых веществ из яблочного сырья // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2018. №. 5-6. С. 14–17. DOI: 10.26297/0579-3009.2018.5-6.3
15. Tulej W., Głowacki S. Modeling of the drying process of apple pomace. *Appl Sci*. 2022, V. 12, no. 3, article 1434. DOI: 10.3390/app12031434
16. Llavata B., Picinelli A., Simal S., Carcel J.A. Cider apple pomace as a source of nutrients: Evaluation of the polyphenolic profile, antioxidant and fiber properties after drying process at different temperatures. *Food Chemistry*. 2022, V. 15, article 100403. DOI: 10.1016/j.fochx.2022.100403
17. Jin J., Yurkow E. J., Adler D., Lee T. C. Improved freeze-drying efficiency by ice nucleation proteins with ice morphology modification. *Food Res Int*. 2018, V. 106, pp. 90–97. DOI: 10.1016/j.foodres.2017.12.028
18. Соколов С.А., Кураш М.А., Зотова И.А. Экспериментальные исследования кинетики сушки яблочных выжимок // Вестник Керченского гос. морского технолог. ун-та. 2024. № 1. С. 71. DOI: 10.26296/2619-0605.2024.5.1.007
19. Оганнисян Ф.А., Зыкин К.А., Басковцева А.С., Баракова Н.В., Афanasenko А.Е., Самоделкин Е.А., Туралин Д.О. Влияние ферментативной обработки мезги и способа сушки выжимок на время сушки, гранулометрический состав и растворимость яблочных и морковных выжимок // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2025. №. 1. С. 34–43. DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-1-34-43
20. Рябина Е.И., Никитина Т.Н., Зотова Е.Е., Пономарева Н.И. Влияние способа получения сухих яблочных выжимок на органолептические, технологические и сорбционные свойства порошка // Прикладные информационные аспекты медицины. 2021. Т. 24. №. 4. С. 52–57. DOI: 10.18499/2070-9277-2021-24-4-52-57
21. Al-Najjar S.Z., Al-Sharify Z.T., Onyeaka H., Miri T., Obileke K., Anumudu C.K. Advances in mass transfer and fluid flows in non-thermal food processing industry – a review. *Food Prod Process Nutr*. 2023, V. 5, no. 1. article 50. DOI: 10.1186/s43014-023-00162-z
22. Iranshahi K., Rubineti D., Onwude D.I., Psarianos M., Schlüter O.K., Defraeye T. Electrohydrodynamic drying versus conventional drying methods: A comparison of key performance indicators. *Energy Convers Manag*. 2023, V. 279, article 116661. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.116661
23. Martynenko A., Vieira G.N.A. Sustainability of drying technologies: system analysis. *Sustain Food Technol*. 2023, V. 1, no. 5. pp. 629–640. DOI: 10.1039/D3FB00080J
24. Андреева Н.А., Васючкин С.В., Бынина Н.В., Рябина Е.И. Разработка состава и исследование свойств новых комбинированных пектинсодержащих энтеросорбентов на основе яблочных выжимок // Научно-медицинский вестник Центрального Черноземья. 2017. № 67. С. 75–77. DOI: 10.18499/1990-472X-2017-0-67-75-77

25. Pirmohammadi R., Rouzbehan Y., Rezayazdi K., Zahedifar M. Chemical composition, digestibility and in situ degradability of dried and ensiled apple pomace and maize silage. *Small Rumin Res.* 2006, V. 66, no. 1-3, pp. 150–155. DOI: 10.1016/j.smallrumres.2005.07.054
26. Waldbauer K., McKinnon R., Kopp B. Apple pomace as potential source of natural active compounds. *Planta Medica.* 2017, V. 83, no. 12/13, pp. 994–1010. DOI: 10.1055/s-0043-111898
27. Queji M.D., Wosiacki G., Cordeiro G.A., Peralta-Zamora P.G., Nagata N. Determination of simple sugars, malic acid and total phenolic compounds in apple pomace by infrared spectroscopy and PLSR. *Int J Food Sci Technol.* 2010, V. 45, no. 3, pp. 602–609. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2009.02187.x
28. Перфилова О.В. Яблочные выжимки как источник биологически активных веществ в технологии продуктов питания // Новые технологии. 2017. № 4. С. 65–71.
29. Ле В.М., Степанова А.А., Шевель А.А., Ларичев Т.А., Лузянин С.Л. Основные факторы, влияющие на экстракцию биологически активных соединений из клеточных культур растений // Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 2. С. 439–453. DOI: 10.21603/2074-9414-2025-2-2567
30. Белокуров С.С., Наркевич И.А., Флисюк Е.В., Каухова И.Е., Ароян М.В. Современные методы экстрагирования лекарственного растительного сырья (обзор) // Химико-фармацевтический журнал. 2019. Т. 53. № 6. С. 48–53. DOI: 10.30906/0023-1134-2019-53-6-48-53
31. Luengo E., Álvarez I., Raso J. Improving the pressing extraction of polyphenols of orange peel by pulsed electric fields. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2013, V. 17, pp. 79–84 DOI: 10.1016/j.ifset.2012.10.005
32. Бугаец Н.А., Шамкова Н.Т., Кобзарь И.Н., Кечин К.Я. Сравнительный анализ технологий экстракции полифенолов из растительного сырья // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2025, no. 11. С. 281–297. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11 -281 -297
33. Numa V., Crampon C., Bellon A., Mouahid A., Badens E. Valorization of food side streams by supercritical fluid extraction of compounds of interest from apple pomace. *J Supercrit Fluids.* 2023, V. 202, article 106056. DOI: 10.1016/j.supflu.2023.106056
34. Barba F.J., Galanakis C.M., Esteve M.J., Frigola, A., Vorobiev E. Potential use of pulsed electric technologies and ultrasounds to improve the recovery of high added value compounds from blackberries. *J Food Eng.* 2015, V. 167, pp. 38–44. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.02.001
35. Стремин А.А., Федоренко Б.Н. Использование ультразвука для ускорения экстракции в пищевой промышленности // Вестник науки. 2023. Т. 3. № 5. С. 725–730.
36. Туманян Х.А. Исследование многопоточных эжекторов для перспективных струйных технологий // Актуальные вопросы современных научных исследований: сб. тр. Пенза: Наука и просвещение, 2025. Ч. 1. С. 47–51.
37. Елапов А.А., Кузнецов Н.Н., Марахова А.И. Применение ультразвука в экстракции биологически активных соединений из растительного сырья, применяемого или перспективного для применения в медицине (обзор) // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2021. Т. 10. № 4. С. 96–116. DOI: 10.33380/2305-2066-2021-10-4-96-116
38. Jadhav H.B., Gogate P., Annapure U. Analysing the repercussions of ultrasound on triacylglycerols in food. *Food Chem Adv.* 2023, V. 2, article 100332. DOI: 10.1016/j.focha.2023.100332
39. Sharma P., Osama K., Varjani S., Farooqui A., Younis K. Microwave-assisted valorization and characterization of Citrus limetta peel waste into pectin as a perspective food additive. *J Food Sci Technol.* 2023, V. 60, no. 4, pp. 1284–1293. DOI: 10.1007/s13197-023-05672-9
40. Spinei M., Oroian M. Microwave-assisted extraction of pectin from grape pomace. *Scientific Reports.* 2022, V. 12, no. 1, article 12722. DOI: 10.1038/s41598-022-16858-0
41. Bodea I.M., Garre Pérez A., Cătușescu G.M., Palop A. A review on microwave and ultrasound-assisted extractions of essential oil from orange peel waste. *Food and Bioprocess Technology.* 2025, V. 18, no. 8, pp. 7060–7082. DOI: 10.1007/s11947-025-03882-x
42. Wang X., Kristo E., LaPointe G. Adding apple pomace as a functional ingredient in stirred-type yogurt and yogurt drinks. *Food Hydrocolloids.* 2020, V. 100, article 105453. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105453
43. Popescu L., Ceșco T., Gurev A., Ghendov-Mosan A., SSturza R., Tarna R. Impact of apple pomace powder on the bioactivity, and the sensory and textural characteristics of yogurt. *Foods.* 2022, V. 11, no. 22. article 3565. DOI: 10.3390/foods11223565
44. Ковалева А.Е., Пьяникова Э.А., Ткачева Е.Д., Рязанцева А.С. Оценка показателей качества хлеба пшеничного, обогащенного вторичным яблочным сырьем // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 3. С. 200–207. DOI: 10.20914/2310-12Q2-2Q2Q-3-20Q-2Q6
45. Bińkowska W., Szpicer A., Stelmasiak A., Wojtasik-Kalinowska I., Półtorak A. Microencapsulation of polyphenols and their application in food technolog. *Applied Sciences.* 2024, V. 14, no. 24, article 11954. DOI: 10.3390/app142411954
46. Ibrahim S., Bowra S. Improving oxidative stability of polyphenolic fraction of apple pomace by encapsulation using naturally occurring polymers. *J Encapsu. Adsorpt Sci.* 2019, V. 9, pp. 83–108. DOI: 10.4236/jeas.2019.92005

47. Buljeta I., Pichler A., Šimunović J., Kopjar M. Polysaccharides as carriers of polyphenols: Comparison of freeze-drying and spray-drying as encapsulation techniques. *Molecules*. 2022, V. 27, no. 16, article 5069. DOI: 10.3390/molecules27165069
48. Rahul P.B., Tiwari R.K., Dash K.K., Sharma M. Recent advances in encapsulation of pomegranate peel extract and combination of wall materials: A review of encapsulation technologies, characterization and applications in the food industry. *Sustain Food Technol*. 2025, V. 3, no. 1, pp. 123–144. DOI: 10.1039/D4FB00196F
49. Sudha M.L. Apple pomace (by-product of fruit juice industry) as a flour fortification strategy. In Preedy V., Watson R., Patel V. (Eds.) *Flour and breads and their fortification in health and disease prevention*. Amsterdam; Boston : Elsevier/Academic Press, 2011, pp. 395–405. DOI: 10.1016/B978-0-12-380886-8.10036-4
50. Leyva-Corral J., Quintero-Ramos A., Camacho-Dávila A., de Jesús Zazueta-Morales J., Aguilar-Palazuelos E., Ruiz-Gutiérrez M.G., et al. Polyphenolic compound stability and antioxidant capacity of apple pomace in an extruded cereal. *LWT*. 2016, V. 65, pp. 228–236. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.07.073
51. Czubaszek R., Wysocka-Czubaszek A., Tyborowski R. Methane production potential from apple pomace, cabbage leaves, pumpkin residue and walnut husks. *Applied Sciences*. 2022, V. 12, no. 12, article 6128. DOI: 10.3390/app12126128
52. Пальвинский В.В., Васильев Ф.А., Евтеев В.К. Методы обработки органосодержащего сырья перед анаэробным сбраживанием // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32. №. 1. С. 10–27. DOI: 10.15507/2658-4123.032.202201.010-027
53. Kell C.J.K., Sempíra J.E., Gottumukkala L., Rensburg E. V., Louw T., Görgens J. Anaerobic co-digestion of apple juice processing waste with manure and corn stover; impact on biogas and methane yield. *Waste and Biomass Valorization*. 2026, V. 17, no. 3, pp. 1323–1331. DOI: 10.1007/s12649-025-03230-2
54. Carrère H., Dumas C., Battimelli A., Batstone D. J., Delgenès J.P., Steyer J.P., Ferrer I. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: a review. *J Hazard Mater*. 2010, V. 183, no. 1–3, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.06.129
55. Darmey J., Narra S., Achaw O.W., Stinner W., Ahiekpor J.C., Ansah H.F., et al. A review of pretreatment strategies for anaerobic digestion: Unlocking the biogas generation potential of wastes in Ghana. *Waste*. 2025, V. 3, no. 3, article 24. DOI: 10.3390/waste3030024
56. Wagner A.O., Lackner N., Mutschlechner M., Prem E.M., Markt R., Illmer P. biological pretreatment strategies for second-generation lignocellulosic resources to enhance biogas production. *Energies*. 2018, V. 11, no. 7, article 1797. DOI: 10.3390/en11071797
57. Molinuevo-Salces B., Riaño B., Hijosa-Valsero M., González-García I., Paniagua-García A.I., Hernández D., et al. Valorization of apple pomaces for biofuel production: A biorefinery approach. *Biomass and Bioenergy*. 2020, V. 142, article 105785. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105785
58. Jones S., Novicoff W., Nadeau J., Evans S. Unlicensed GS-441524-like antiviral therapy can be effective for at-home treatment of feline infectious peritonitis. *Animals*. 2021, V. 11, no. 8, article 2257. DOI: 10.3390/ani11082257
59. Фиялович Л.Н., Кирилив Я.И. Влияние сухих яблочных выжимок, обогащенных хелатными микроэлементами на продуктивность племенных гусей // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького. 2015. Т. 17. №. 1–3. С. 227–232.
60. Aghili A.H., Toghyani M., Tabeidian S.A. Effect of incremental levels of apple pomace and multi enzyme on performance, immune response, gut development and blood biochemical parameters of broiler chickens. *Int J Recycl Org Waste Agric*. 2019, V. 8, Suppl 1, pp. 321–334. DOI: 10.1007/s40093-019-00305-8
61. Birtic S., Regis S., Le Bourvellec C., Renard C.M. Impact of air-drying on polyphenol extractability from apple pomace. *Food Chemistry*. 2019, V. 296, pp. 142–149. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.05.131
62. Liu J., Jiao Z., Zhang C., Yang W., Liu H., Lv Z. Effects of different drying methods on phenolic contents, antioxidant, and tyrosinase inhibitory activity of peach blossoms. *J Food Meas Charact*. 2018, V. 12, no. 4, pp. 2339–2348, DOI: 10.1007/s11694-018-9850-0
63. Araujo B.Z., Martins V.F., Pintado M.E., Morais R.M., Morais A.M. A comparative study of drying technologies for apple and ginger pomace: Kinetic modeling and antioxidant properties. *Processes*. 2024, V.12, no. 10, article 2096. DOI: 10.3390/pr12102096
64. Martynenko A., Vieira G.N.A. Sustainability of drying technologies: system analysis. *Sustain Food Technol*. 2023, V. 1, no. 5, pp. 629–640. DOI: 10.1039/D3FB00080J
65. Мулдабекова Б.Д., Иссаков Ш.А.У., Садуллаев Д.М.У., Шингисов А.У. Исследование влияния сублимационной сушки на сохранение питательных веществ и органолептических свойств овощей и фруктов // *Universum: технические науки*. 2024. Т. 3. №. 9. С. 8–11.
66. Дранников А.В., Тутов С.А., Беломыльцева Д.В., Корышева Н.Н., Костина Д.К., Давыдов А.М. Исследование влияния параметров процесса сушки яблочных выжимок на выход пектиновых веществ // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2018. Т. 80. № 4. С. 35–40. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-4-35-40
67. Bhat I.M., Wani S.M., Mir S.A., Naseem Z.I. Effect of microwave-assisted vacuum and hot air oven drying methods on quality characteristics of apple pomace powder. *Food Prod Process Nutr*. 2023, V. 5, no. 1, article 26. DOI: 10.4314/ajb.v8i24.68794

68. Nowak D., Jakubczyk E. The freeze-drying of foods — The characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. *Foods*. 2020, V. 9, no. 10, article 1488. DOI: 10.3390/foods9101488
69. Karwacka M., Ciurzyńska A., Galus S., Janowicz M. Freeze-dried snacks obtained from frozen vegetable by-products and apple pomace – Selected properties, energy consumption and carbon footprint. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2022, V. 77, article 102949. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.102949
70. Андреева О.И., Шорсткий И.А. Интенсификация вакуум-сублимационной сушки плодов калины за счет предварительной обработки низкотемпературной плазмой // Хранение и переработка сельхозсырья. 2024. № 2. С. 89–98. DOI: 10.36107/spfr.2024.2.560
71. Андреева О.И., Шорсткий И.А., Семенов Г.В. Обработка ягод клубники низкотемпературной плазмой для интенсификации процесса сублимационной сушки и повышения их качества // Ползуновский вестник. 2025. № 4. С. 109–113. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.018
72. Ai C., Wang Z., Liu C., Wu A. Study on the mechanism of erosion and wear of elbow pipes by coarse particles in filling slurry. *Scientific Reports*. 2024, V. 14, no. 1, article 30888. DOI: 10.1038/s41598-024-81849-2
73. Thomas F. A comparative study of three drying techniques for apple pomace valorization based on key performance indicators. *Thesis*. 2025. 155 p.
74. Sozzi A., Zambon M., Mazza G., Salvatori D. Fluidized bed drying of blackberry wastes: Drying kinetics, particle characterization and nutritional value of the obtained granular solids. *Powder Technology*. 2021, V. 385, pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.02.058
75. Mujumdar A.S., Huang L.X., Chen X.D. An overview of the recent advances in spray-drying. *Dairy Sci Technol*. 2010, V.90, no. 2, pp. 211–224. DOI: 10.1051/dst/2010015
76. Qadri T., Naik H.R., Hussain S.Z., Bhat T.A., Naseer B., Zargar I., Beigh M.A. Impact of spray drying conditions on the reconstitution, efficiency and flow properties of spray dried apple powder-optimization, sensorial and rheological assessment. *Heliyon*. 2023, V.9, no. 8, article e18527. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18527
77. Davis R.E., McGregor G.R., Enfield K.B. Humidity: A review and primer on atmospheric moisture and human health. *Environmental Research*. 2016, V.144, pp. 106–116. DOI: 10.1016/j.envres.2015.10.014
78. Moussaoui H., Bahammou Y., Tagnamas Z., Kouhila M., Lamharrar A., Idlimam A. Application of solar drying on the apple peels using an indirect hybrid solar-electrical forced convection dryer. *Renewable Energy*. 2021, V. 168, pp. 131–140. DOI: 10.1016/j.renene.2020.12.046
79. Shinkevich A.I., Kudryavtseva S.S., Ershova I.G. Modelling of energy efficiency factors of petrochemical industry. *Int J Energy Econ Policy*. 2020, V. 10, no. 3, pp. 465–470. DOI: 10.32479/ijeep.9396
80. Kriaa K., Nassar A.F. Comparative study of pretreatment on microwave drying of Gala apples (*Malus pumila*): Effect of blanching, electric field and freezing. *LWT*. 2022, V. 165, article 113693. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113693
81. Calín-Sánchez Á., Lipan L., Cano-Lamadrid M., Kharaghani A., Masztalerz K., Carbonell-Barrachina A., Figiel A. Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs. *Foods*. 2020, V.9, no. 9, article 1261. DOI: 10.3390/foods9091261
82. Tiwari A. A review on solar drying of agricultural produce. *J Food Process Technol*. 2016, V. 7, no. 9, article 623. DOI: 10.4172/2157-7110.1000623
83. Zhang Y., Abatzoglou N. Fundamentals, applications and potentials of ultrasound-assisted drying. *Chem Eng Res Des*. 2020, V. 154, pp. 21–46. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.11.025
84. Patinha C.C., Vlysidis A., Fiore G., De L.V., Vignali G., Sala S. Sustainability of food waste biorefinery: A review on valorization pathways, techno-economic constraints, and environmental assessment. 2020, V. 312, article 123575. *Bioresour Technol*. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123575
85. Geana E.I., Ciucure C.T., Niculescu V.C., Marinas I.C., Pircalabioru G.G., Dutu D., Andronescu E. Valorization of apple pomace by obtaining some bioactive ingredients with antioxidant, antimicrobial and prebiotic activities. *Food Bioprod Process*. 2025, V. 150, pp. 182–197. DOI: 10.1016/j.fbp.2025.01.006
86. Lyu F., Luiz S.F., Azeredo D.R.P., Cruz A.G., Ajlouni S., Ranadheera C.S. Apple pomace as a functional and healthy ingredient in food products: A review. *Processes*. 2020, V. 8, no. 3, article 319. DOI: 10.3390/pr8030319
87. Gadulrab K., Sidoruk P., Kozłowska M., Szumacher-Strabel M., Lechniak D., Kołodziejewski P., et al. Effect of feeding dried apple pomace on ruminal fermentation, methane emission, and biohydrogenation of unsaturated fatty acids in dairy cows. *Agriculture*. 2023, V. 13, no. 10, article 2032. DOI: 10.3390/agriculture13102032
88. Selmi H., Presutto E., Totaro M., Spano G., Capozzi V., Fragasso M. Apple waste/by-products and microbial resources to promote the design of added-value foods: A review. *Foods*. 2025, V. 14, no. 11, article 1850. DOI: 10.3390/foods14111850
89. Pakulska A., Bartosiewicz E., Galus S. The potential of apple and blackcurrant pomace powders as the components of pectin packaging films. *Coatings*. 2023, V. 13, no. 8, article 1409. DOI:10.3390/coatings13081409
90. Nosalewicz A., Maksim M., Brzezińska M., Siecińska J., Siczek A., Nosalewicz M., Lipiec J. The use of apple pomace as a soil amendment enhances the activity of soil microorganisms and nitrogen transformations and affects crop growth. *J Soil Sci Plant Nutr*. 2021, V. 21, no. 3, pp. 1831–1841. DOI: 10.1007/s42729-021-00483-3

91. Mao H., Zhang T., Li, R., Zhai B., Wang Z., Wang Q., Zhang Z. Apple pomace improves the quality of pig manure aerobic compost by reducing emissions of  $\text{NH}_3$  and  $\text{N}_2\text{O}$ . *Scientific Reports*. 2017, V. 7, no. 1, article 870. DOI: 10.1038/s41598-017-00987-y
92. Gryko K., Kalinowska M., Świdorski G. The use of apple pomace in removing heavy metals from water and sewage. *Environmental Sciences Proceedings*. 2021, no. 1, article 24. DOI: 10.3390/envirosci2021009024
93. Asif M., Javaid T., Razzaq Z.U., Khan M.K.I., Maan A.A., Yousaf S., Shahid S. Sustainable utilization of apple pomace and its emerging potential for development of functional foods. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2024, V. 31, no. 12, pp. 17932–17950. DOI: 10.1007/s11356-023-28479-9
94. Faisal S., Mani I., Gupta R.K., et al. Development of extruded snacks using maize, soy, apple pomace—a response surface methodology approach. *J Agric Eng*. 2018, V. 55, no. 3, pp. 21–31. DOI: 10.52151/jae2018553.1658
95. Buljeta I., Pichler A., Šimunović J., Kopjar M. Polysaccharides as carriers of polyphenols: Comparison of freeze-drying and spray-drying as encapsulation techniques. *Molecules*. 2022, V. 27, no. 16, article 5069. DOI: 10.3390/molecules27165069
96. Bušić A., Komes D., Belščak-Cvitanović A., et al. The potential of combined emulsification and spray drying techniques for encapsulation of polyphenols from rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) leaves. *Food Technol Biotechnol*. 2018, V. 56, no. 4, pp. 494–505. DOI: 10.17113/ftb.56.04.18.5680
97. Silva J.T.D.P., Borges M.H., de Souza C.A.C., Fávaro-Trindade C.S., et al. Grape pomace rich-phenolics and anthocyanins extract: Production by pressurized liquid extraction in intermittent process and encapsulation by spray-drying. *Foods*. 2024, V. 13, no. 2, article 279. DOI: 10.3390/foods13020279
98. Borges L.L., Martins F.S., Conceição E.C., Silveira D. Jabuticaba, ellagic acid, spray drying, optimization. *J Food Process Eng*. 2017, V. 40, no. 1, article 12276. DOI: 10.1111/jfpe.12276
99. de Ramos R.M.Q., Siacor F.D.C., Taboada E.B. Effect of maltodextrin content and inlet temperature on the powder qualities of spray-dried pineapple (*Ananas comosus*) waste extract. *Waste and biomass valorization*. 2020, V. 11, no. 7, pp. 3247–3255. DOI: 10.1007/s12649-019-00651-8
100. Костина Е.В. Совершенствование процесса сушки яблочных выжимок и их применение в энергоэффективной технологии порошкообразного холинхлорида: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж. 2013.
101. Malenica D., Kass M., Bhat R. Sustainable management and valorization of agri-food industrial wastes and by-products as animal feed: for ruminants, non-ruminants and as poultry feed. *Sustainability*. 2022, V. 15, no. 1, article 117. DOI: 10.3390/su15010117
102. Gołębiewska E., Kalinowska M., Yildiz G. Sustainable use of apple pomace (AP) in different industrial sectors. *Materials*. 2022, V. 15, no. 5, article 1788. DOI: 10.3390/ma15051788

## References

1. Ferreira J., Tkacz K., Turkiewicz I.P., Wojdyło A., Sousa I. Apple pomace flour fractions as functional ingredients: compositional and bioactivity profiling. *Food Chemistry*. 2026, V. 530, article 147862. DOI: 10.1016/j.foodchem.2026.147862
2. Vadorou M., Plakidis C., Tsompanidou I.M., Adamantidi T., Panagopoulou E.A., Tsoupras A. A review on apple pomace bioactives for natural functional food and cosmetic products with therapeutic health-promoting properties. *Int J Mol Sci*. 2024, V. 25, no. 19, article 10856. DOI: 10.3390/ijms251910856
3. Naseem Z., Bhat N.A., Mir S.A. Valorisation of apple pomace for the development of high-fibre and polyphenol-rich wheat flour cookies. *Scientific Reports*. 2024, no. 1, V. 530, article 25912. DOI: 10.1038/s41598-024-77377-8
4. Sun X., Zhang W., Meng X., & Shokri S. Optimizing microwave-assisted extraction of ursolic acid from apple pomace using response surface methodology. *Frontiers in Nutrition*. 2025, V. 12, article 1604863. DOI: 10.3389/fnut.2025.1604863
5. Kosmala M., Kołodziejczyk K., Zdunczyk Z., Juskiewicz J., Boros D. Chemical composition of natural and polyphenol-free apple pomace and the effect of this dietary ingredient on intestinal fermentation and serum lipid parameters in rats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011, V. 59, no. 17, pp. 9177–9185. DOI: 10.1021/jf201950y
6. Bartel I., Koszarska M., Wysocki K., Kozłowska M., Szumacher-Strabel M., Cieślak A., Józwiak A. Effect of dried apple pomace (DAP) as a feed additive on antioxidant system in the rumen fluid. *Int J Mol Sci*. 2022, V. 23, no. 18, article 10475. DOI: 10.3390/ijms231810475
7. Gadulrab K., Sidoruk P., Kozłowska M., Szumacher-Strabel M., Lechniak D., Kołodziejcki P., Cieślak A. Effect of feeding dried apple pomace on ruminal fermentation, methane emission, and biohydrogenation of unsaturated fatty acids in dairy cows. *Agriculture*. 2023, V. 13, no. 10, article 10475. DOI: 10.3390/ijms231810475
8. Juśkiewicz J., Żary-Sikorska E., Zduńczyk Z., Król B., Jarosławska J., Jurgoński A. Effect of dietary supplementation with unprocessed and ethanol-extracted apple pomaces on caecal fermentation, antioxidant and blood biomarkers in rats. *Br J Nutr*. 2012, V. 107, no. 8, pp. 1138–1146. DOI: 10.1017/S0007114511004144

9. Thomas F., Abebe G., Emenike C., Martynenko A. Sustainable utilization of apple pomace: Technological aspects and emerging applications. *Food Res Int.* 2025, article 117149. DOI: 10.1016/j.foodres.2025.117149
10. Semenova A.A., Fedorchenko E.A. Prospects for the development of viticulture and winemaking in Russia. *Vektor Ekonomy.* 2022, no. 12. URL: [https://vectoreconomy.ru/images/publications/2022/12/regionaleconomy/Semenova\\_Fedorchenko.pdf](https://vectoreconomy.ru/images/publications/2022/12/regionaleconomy/Semenova_Fedorchenko.pdf) (Accessed 20.04.2026) (In Russian)
11. Filimonau V., Ermolaev V. A. Mitigation of food loss and waste in primary production of a transition economy via stakeholder collaboration: A perspective of independent farmers in Russia. *Sustainable Production and Consumption.* 2021, V. 28, pp. 359–370. DOI: 10.1016/j.spc.2021.06.002
12. Gaiduk V. I., Linchenko V. Circular economy in the regional agricultural industry. *Moscow Economic Journal.* 2025, no. 4, pp. 154–165. DOI: 10.55186/2413046X\_2025\_10\_4\_101 (In Russian)
13. Zaky A.A., Witrowa-Rajchert D., Nowacka M. Turning apple pomace into value: sustainable recycling in food production—a narrative review. *Sustainability.* 2024, V. 16, no. 16, article 7001. DOI: 10.3390/su16167001
14. Donchenko L.V., Krasnoselova E.A. Physical and chemical bases of process of extraction of pectinaceous substances of apple raw materials. *Izvestiya vuzov. Food technology.* 2018. no. 5-6. pp. 14–17. DOI: 10.26297/0579-3009.2018.5-6.3 (In Russian)
15. Tulej W., Głowacki S. Modeling of the drying process of apple pomace. *Appl Sci.* 2022, V. 12, no. 3, article 1434. DOI: 10.3390/app12031434
16. Llavata B., Picinelli A., Simal S., Carcel J.A. Cider apple pomace as a source of nutrients: Evaluation of the polyphenolic profile, antioxidant and fiber properties after drying process at different temperatures. *Food Chemistry.* 2022, V. 15, article 100403. DOI: 10.1016/j.fochx.2022.100403
17. Jin J., Yurkow E. J., Adler D., Lee T. C. Improved freeze-drying efficiency by ice nucleation proteins with ice morphology modification. *Food Res Int.* 2018, V. 106, pp. 90–97. DOI: 10.1016/j.foodres.2017.12.028
18. Sokolov S.A., Kurash M.A., Zotova I.A. Experimental studies of apple pumes drying. *Vestnik Kerchenskogo Gosudarstvennogo Morskogo Tekhnologicheskogo Universiteta.* 2024, no. 1, article 71. DOI: 10.26296/2619-0605.2024.5.1.007. (In Russian)
19. Hovhannisyanyan F.A., Zykin K.A., Baskovtseva A.S., Barakova N.V., Afanasenko A.E., Samodelkin E.A., Turalin D.O. Effects of enzymatic treatment of pomace and processing method on drying time, particle size distribution, and solubility of apple and carrot pomace. *Processes and Food Production Equipment.* 2025, no. 1, pp. 34–43. DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-1-34-43. (In Russian)
20. Ryabinina E.I., Nikitina T.N., Zotova E.E., Ponomareva N.I. The influence of the method for producing dry apple sucks on the organoleptic, technological and sorption properties of the powder. *Applied Information Aspects of Medicine.* 2021, V. 24, no. 4, pp. 52–57. DOI: 10.18499/2070-9277-2021-24-4-52-57. (In Russian)
21. Al-Najjar S.Z., Al-Sharify Z.T., Onyeaka H., Miri T., Obileke K., Anumudu C.K. Advances in mass transfer and fluid flows in non-thermal food processing industry – a review. *Food Prod Process Nutr.* 2023, V. 5, no. 1. article 50. DOI: 10.1186/s43014-023-00162-z
22. Iranshahi K., Rubineti D., Onwude D.I., Psarianos M., Schlüter O.K., Defraeye T. Electrohydrodynamic drying versus conventional drying methods: A comparison of key performance indicators. *Energy Convers Manag.* 2023, V. 279, article 116661. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.116661
23. Martynenko A., Vieira G.N.A. Sustainability of drying technologies: system analysis. *Sustain Food Technol.* 2023, V. 1, no. 5. pp. 629–640. DOI: 10.1039/D3FB00080J
24. Andreeva N. A., Vasyuchkin S. V., Bynina N. V., Ryabinina E. I. Razrabotka sostava i issledovanie svoystv novykh kombinirovannykh pektinsoderzhashchikh enterosorbentov na osnove yablochnykh vyzhimok. *Nauchno-meditinskii vestnik Tsentral'nogo Chernozem'ya.* 2017, no. 67, pp. 75–77. DOI: 10.18499/1990-472X-2017-0-67-75-77 (In Russian)
25. Pirmohammadi R., Rouzbehan Y., Rezayazdi K., Zahedifar M. Chemical composition, digestibility and in situ degradability of dried and ensiled apple pomace and maize silage. *Small Rumin Res.* 2006, V. 66, no. 1-3, pp. 150–155. DOI: 10.1016/j.smallrumres.2005.07.054
26. Waldbauer K., McKinnon R., Kopp B. Apple pomace as potential source of natural active compounds. *Planta Medica.* 2017, V. 83, no. 12/13, pp. 994–1010. DOI: 10.1055/s-0043-111898
27. Queji M.D., Wosiacki G., Cordeiro G.A., Peralta-Zamora P.G., Nagata N. Determination of simple sugars, malic acid and total phenolic compounds in apple pomace by infrared spectroscopy and PLSR. *Int J Food Sci Technol.* 2010, V. 45, no. 3, pp. 602–609. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2009. 02187.x
28. Perfilova O.V. Apple pomace as a source of biologically active substances in food technology. *New Technologies.* 2017, no. 4, pp. 65–71. (In Russian)
29. Le V.M., Stepanova A.A., Shevel A.A., Larichev T.A., Luzyanin S.L. Factors affecting extraction of bioactive substances from plant cell cultures. *Food Processing: Techniques and Technology.* 2025, V. 55, no. 2, pp. 439–453. DOI: 10.21603/2074-9414-2025-2-2567. (In Russian)

30. Belokurov S.S., Narkevich I.A., Fliseyk E.V., Kaukhova I.E., Aroyan M.V. Modern extraction methods for medicinal plant raw material (review). *Pharmaceutical Chemistry Journal*. 2019, V. 53, no. 6, pp. 48–53. DOI: 10.30906/0023-1134-2019-53-6-48-53. (In Russian)
31. Luengo E., Álvarez I., Raso J. Improving the pressing extraction of polyphenols of orange peel by pulsed electric fields. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2013, V. 17, pp. 79–84. DOI: 10.1016/j.ifset.2012.10.005
32. Bugaets N.A., Shamkova N.T., Kobzar I.N., Kechin K.Y. Comparative analysis of polyphenol extraction technologies from plant raw materials. *The Bulletin of KrasGAU*. 2025, no. 11, pp. 281–297. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11 -281 -297. (In Russian)
33. Numa V., Crampon C., Bellon A., Mouahid A., Badens E. Valorization of food side streams by supercritical fluid extraction of compounds of interest from apple pomace. *J Supercrit Fluids*. 2023, V. 202, article 106056. DOI: 10.1016/j.supflu.2023.106056
34. Barba F.J., Galanakis C.M., Esteve M.J., Frigola, A., Vorobiev E. Potential use of pulsed electric technologies and ultrasounds to improve the recovery of highadded value compounds from blackberries. *J Food Eng*. 2015, V. 167, pp. 38–44. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.02.001
35. Stremin A.A., Fedorenko B.N. Using ultrasound to accelerate extraction in the food industry. *Vestnik Nauki*. 2023, V. 3, no. 5, pp. 725–730. (In Russian)
36. Tumanyan H.A. Study of multi-stream ejectors for advanced jet technologies. *Topical Issues of Modern Scientific Research*. Penza, Science and Education Publ. 2025, Part 1, pp. 47–51. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-5-146-151. (In Russian)
37. Elapov A.A., Kuznetsov N.N., Marakhova A.I. The use of ultrasound in the extraction of biologically active compounds from plant raw materials, used or promising for use in medicine. *Drug Development & Registration*. 2021, V. 10, no. 4, pp. 96–116. DOI: 10.33380/2305-2066-2021-10-4-96-116. (In Russian)
38. Jadhav H.B., Gogate P., Annapure U. Analysing the repercussions of ultrasound on triacylglycerols in food. *Food Chem Adv*. 2023, V. 2, article 100332. DOI: 10.1016/j.focha.2023.100332
39. Sharma P., Osama K., Varjani S., Farooqui A., Younis K. Microwave-assisted valorization and characterization of Citrus limetta peel waste into pectin as a perspective food additive. *J Food Sci Technol*. 2023, V. 60, no. 4, pp. 1284–1293. DOI: 10.1007/s13197-023-05672-9
40. Spinei M., Oroian M. Microwave-assisted extraction of pectin from grape pomace. *Scientific Reports*. 2022, V. 12, no. 1, article 12722. DOI: 10.1038/s41598-022-16858-0
41. Bodea I.M., Garre Pérez A., Cătușescu G.M., Palop A. A review on microwave and ultrasound-assisted extractions of essential oil from orange peel waste. *Food and Bioprocess Technology*. 2025, V. 18, no. 8, pp. 7060–7082. DOI: 10.1007/s11947-025-03882-x
42. Wang X., Kristo E., LaPointe G. Adding apple pomace as a functional ingredient in stirred-type yogurt and yogurt drinks. *Food Hydrocolloids*. 2020, V. 100, article 105453. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105453
43. Popescu L., Ceșco T., Gurev A., Ghendov-Mosanu A., SSturza R., Tarna R. Impact of apple pomace powder on the bioactivity, and the sensory and textural characteristics of yogurt. *Foods*. 2022, V. 11, no. 22, article 3565. DOI: 10.3390/foods11223565
44. Kovaleva A.E., Pyanikova E.A., Tkacheva E.D., Ryazantseva A.S. Evaluation of quality indicators of wheat bread enriched with secondary apple raw materials. *Proceedings of VSUET*. 2020, V. 82, no. 3, pp. 200–207. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-3-200-206. (In Russian)
45. Bińkowska W., Szpicer A., Stelmasiak A., Wojtasik-Kalinowska I., Półtorak A. Microencapsulation of polyphenols and their application in food technolog. *Applied Sciences*. 2024, V. 14, no. 24, article 11954. DOI: 10.3390/app142411954
46. Ibrahim S., Bowra S. Improving oxidative stability of polyphenolic fraction of apple pomace by encapsulation using naturally occurring polymers. *J Encapsu. Adsorpt Sci*. 2019, V. 9, pp. 83–108. DOI: 10.4236/jeas.2019.92005
47. Buljeta I., Pichler A., Šimunović J., Kopjar M. Polysaccharides as carriers of polyphenols: Comparison of freeze-drying and spray-drying as encapsulation techniques. *Molecules*. 2022, V. 27, no. 16, article 5069. DOI: 10.3390/molecules27165069
48. Rahul P.B., Tiwari R.K., Dash K.K., Sharma M. Recent advances in encapsulation of pomegranate peel extract and combination of wall materials: A review of encapsulation technologies, characterization and applications in the food industry. *Sustain Food Technol*. 2025, V. 3, no. 1, pp. 123–144. DOI: 10.1039/D4FB00196F
49. Sudha M.L. Apple pomace (by-product of fruit juice industry) as a flour fortification strategy. In Preedy V., Watson R., Patel V. (Eds.) *Flour and breads and their fortification in health and disease prevention*. Amsterdam; Boston : Elsevier/Academic Press, 2011, pp. 395–405. DOI: 10.1016/B978-0-12-380886-8.10036-4
50. Leyva-Corral J., Quintero-Ramos A., Camacho-Dávila A., de Jesús Zazueta-Morales J., Aguilar-Palazuelos E., Ruiz-Gutiérrez M.G., et al. Polyphenolic compound stability and antioxidant capacity of apple pomace in an extruded cereal. *LWT*. 2016, V. 65, pp. 228–236. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.07.073
51. Czubaszek R., Wysocka-Czubaszek A., Tyborowski R. Methane production potential from apple pomace, cabbage leaves, pumpkin residue and walnut husks. *Applied Sciences*. 2022, V. 12, no. 12, article 6128. DOI: 10.3390/app12126128

52. Palvinskiy V.V., Vasilev F.A., Evteev V.K. Methods of pretreating raw materials containing organic compounds before anaerobic digestion. *Engineering Technologies and Systems*. 2022, V. 32, no. 1, pp. 10–27. DOI: 10.15507/2658-4123.032.202201.010-027. (In Russian)
53. Kell C.J.K., Sempíra J.E., Gottumukkala L., Rensburg E. V., Louw T., Görgens J. Anaerobic co-digestion of apple juice processing waste with manure and corn stover; impact on biogas and methane yield. *Waste and Biomass Valorization*. 2026, V. 17, no. 3, pp. 1323–1331. DOI: 10.1007/s12649-025-03230-2
54. Carrère H., Dumas C., Battimelli A., Batstone D. J., Delgenès J.P., Steyer J.P., Ferrer I. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: a review. *J Hazard Mater*. 2010, V. 183, no. 1-3, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.06.129
55. Darmey J., Narra S., Achaw O.W., Stinner W., Ahiekpor J.C., Ansah H.F., et al. A review of pretreatment strategies for anaerobic digestion: Unlocking the biogas generation potential of wastes in Ghana. *Waste*. 2025, V. 3, no. 3, article 24. DOI: 10.3390/waste3030024
56. Wagner A.O., Lackner N., Mutschlechner M., Prem E.M., Markt R., Illmer P. biological pretreatment strategies for second-generation lignocellulosic resources to enhance biogas production. *Energies*. 2018, V. 11, no. 7, article 1797. DOI: 10.3390/en11071797
57. Molinuevo-Salces B., Riaño B., Hijosa-Valsero M., González-García I., Paniagua-García A.I., Hernández D., et al. Valorization of apple pomaces for biofuel production: A biorefinery approach. *Biomass and Bioenergy*. 2020, V. 142, article 105785. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105785
58. Jones S., Novicoff W., Nadeau J., Evans S. Unlicensed GS-441524-like antiviral therapy can be effective for at-home treatment of feline infectious peritonitis. *Animals*. 2021, V. 11, no. 8, article 2257. DOI: 10.3390/ani11082257
59. Fiyalovich L.M., Kiriliv Ya.I. Influence of dry apple pomace enriched with chelated microelements on the productivity of breeding geese. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. 2015, V. 17, no. 1-3, pp. 227–232. (In Ukrainian)
60. Aghili A.H., Toghyani M., Tabeidian S.A. Effect of incremental levels of apple pomace and multi enzyme on performance, immune response, gut development and blood biochemical parameters of broiler chickens. *Int J Recycl Org Waste Agric*. 2019, V. 8, Suppl 1, pp. 321–334. DOI: 10.1007/s40093-019-00305-8
61. Birtic S., Regis S., Le Bourvellec C., Renard C.M. Impact of air-drying on polyphenol extractability from apple pomace. *Food Chemistry*. 2019, V. 296, pp. 142–149. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.05.131
62. Liu J., Jiao Z., Zhang C., Yang W., Liu H., Lv Z. Effects of different drying methods on phenolic contents, antioxidant, and tyrosinase inhibitory activity of peach blossoms. *J Food Meas Charact*. 2018, V. 12, no. 4, pp. 2339–2348, DOI: 10.1007/s11694-018-9850-0
63. Araujo B.Z., Martins V.F., Pintado M.E., Morais R.M., Morais A.M. A comparative study of drying technologies for apple and ginger pomace: Kinetic modeling and antioxidant properties. *Processes*. 2024, V.12, no. 10, article 2096. DOI: 10.3390/pr12102096
64. Martynenko A., Vieira G.N.A. Sustainability of drying technologies: system analysis. *Sustain Food Technol*. 2023, V. 1, no. 5, pp. 629–640. DOI: 10.1039/D3FB00080J
65. Muldabekova B.D., Issakov S.A.U., Sadullaev D.M.U., Shingisov A.U. Study of the effect of sublimation drying on the preservation of nutrients and organoleptic properties of vegetables and fruits. *Universum: Technical Sciences*. 2024, V. 3, no. 9, pp. 8–11. (In Russian)
66. Drannikov A.V., Titov S.A., Belomytseva D.V., Korysheva N.N., Kostina D.K., Davydov A.M. Research of influence of parameters of process of drying of an apple residue on an exit of pectinaceous substances. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018, V. 80, no. 4, pp. 35–40. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-4-35-40. (In Russian)
67. Bhat I.M., Wani S.M., Mir S.A., Naseem Z.I. Effect of microwave-assisted vacuum and hot air oven drying methods on quality characteristics of apple pomace powder. *Food Prod Process Nutr*. 2023, V. 5, no. 1, article 26. DOI: 10.4314/ajb.v8i24.68794
68. Nowak D., Jakubczyk E. The freeze-drying of foods — The characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. *Foods*. 2020, V. 9, no. 10, article 1488. DOI: 10.3390/foods9101488
69. Karwacka M., Ciurzyńska A., Galus S., Janowicz M. Freeze-dried snacks obtained from frozen vegetable by-products and apple pomace – Selected properties, energy consumption and carbon footprint. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2022, V. 77, article 102949. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.102949
70. Andreeva O.I., Shorstky I.A. The intensification of vacuum freeze drying of viburnum fruits utilizing low-temperature plasma pre-treatment. *Storage and Processing of Farm Products*. 2024, no. 2, pp. 89–98. DOI: 10.36107/spfp.2024.2.560. (In Russian)
71. Andreeva O.I., Shorstky I.A., Semenov G.V. Strawberry berry treatment with low-temperature plasma to intensify freeze-drying process and improve their quality. *Polzunovskiy Vestnik*. 2025, no. 4, pp. 109–113. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.018. (In Russian)

72. Ai C., Wang Z., Liu C., Wu A. Study on the mechanism of erosion and wear of elbow pipes by coarse particles in filling slurry. *Scientific Reports*. 2024, V. 14, no. 1, article 30888. DOI: 10.1038/s41598-024-81849-2
73. Thomas F. A comparative study of three drying techniques for apple pomace valorization based on key performance indicators. *Thesis*. 2025. 155 p.
74. Sozzi A., Zambon M., Mazza G., Salvatori D. Fluidized bed drying of blackberry wastes: Drying kinetics, particle characterization and nutritional value of the obtained granular solids. *Powder Technology*. 2021, V. 385, pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.02.058
75. Mujumdar A.S., Huang L.X., Chen X.D. An overview of the recent advances in spray-drying. *Dairy Sci Technol*. 2010, V.90, no. 2, pp. 211–224. DOI: 10.1051/dst/2010015
76. Qadri T., Naik H.R., Hussain S.Z., Bhat T.A., Naseer B., Zargar I., Beigh M.A. Impact of spray drying conditions on the reconstitution, efficiency and flow properties of spray dried apple powder-optimization, sensorial and rheological assessment. *Heliyon*. 2023, V.9, no. 8, article e18527. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18527
77. Davis R.E., McGregor G.R., Enfield K.B. Humidity: A review and primer on atmospheric moisture and human health. *Environmental Research*. 2016, V.144, pp. 106–116. DOI: 10.1016/j.envres.2015.10.014
78. Moussaoui H., Bahammou Y., Tagnamas Z., Kouhila M., Lamharrar A., Idlimam A. Application of solar drying on the apple peels using an indirect hybrid solar-electrical forced convection dryer. *Renewable Energy*. 2021, V. 168, pp. 131–140. DOI: 10.1016/j.renene.2020.12.046
79. Shinkevich A.I., Kudryavtseva S.S., Ershova I.G. Modelling of energy efficiency factors of petrochemical industry. *Int J Energy Econ Policy*. 2020, V. 10, no. 3, pp. 465–470. DOI: 10.32479/ijeep.9396
80. Kriaa K., Nassar A.F. Comparative study of pretreatment on microwave drying of Gala apples (*Malus pumila*): Effect of blanching, electric field and freezing. *LWT*. 2022, V. 165, article 113693. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113693
81. Calín-Sánchez Á., Lipan L., Cano-Lamadrid M., Kharaghani A., Masztalerz K., Carbonell-Barrachina A., Figiel A. Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs. *Foods*. 2020, V.9, no. 9, article 1261. DOI: 10.3390/foods9091261
82. Tiwari A. A review on solar drying of agricultural produce. *J Food Process Technol*. 2016, V. 7, no. 9, article 623. DOI: 10.4172/2157-7110.1000623
83. Zhang Y., Abatzoglou N. Fundamentals, applications and potentials of ultrasound-assisted drying. *Chem Eng Res Des*. 2020, V. 154, pp. 21–46. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.11.025
84. Patinha C.C., Vlysidis A., Fiore G., De L.V., Vignali G., Sala S. Sustainability of food waste biorefinery: A review on valorization pathways, techno-economic constraints, and environmental assessment. 2020, V. 312, article 123575. *Bioresour Technol*. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123575
85. Geana E.I., Ciucure C.T., Niculescu V.C., Marinas I.C., Pircalabioru G.G., Dutu D., Andronescu E. Valorization of apple pomace by obtaining some bioactive ingredients with antioxidant, antimicrobial and prebiotic activities. *Food Bioprod Process*. 2025, V. 150, pp. 182–197. DOI: 10.1016/j.fbp.2025.01.006
86. Lyu F., Luiz S.F., Azeredo D.R.P., Cruz A.G., Ajlouni S., Ranadheera C.S. Apple pomace as a functional and healthy ingredient in food products: A review. *Processes*. 2020, V. 8, no. 3, article 319. DOI: 10.3390/pr8030319
87. Gadulrab K., Sidoruk P., Kozłowska M., Szumacher-Strabel M., Lechniak D., Kołodziejewski P., et al. Effect of feeding dried apple pomace on ruminal fermentation, methane emission, and biohydrogenation of unsaturated fatty acids in dairy cows. *Agriculture*. 2023, V. 13, no. 10, article 2032. DOI: 10.3390/agriculture13102032
88. Selmi H., Presutto E., Totaro M., Spano G., Capozzi, V., Fragasso M. Apple waste/by-products and microbial resources to promote the design of added-value foods: A review. *Foods*. 2025, V. 14, no. 11, article 1850. DOI: 10.3390/foods14111850
89. Pakulska A., Bartosiewicz E., Galus S. The potential of apple and blackcurrant pomace powders as the components of pectin packaging films. *Coatings*. 2023, V. 13, no. 8, article 1409. DOI:10.3390/coatings13081409
90. Nosalewicz A., Maksim M., Brzezińska M., Siecińska J., Siczek A., Nosalewicz M., Lipiec J. The use of apple pomace as a soil amendment enhances the activity of soil microorganisms and nitrogen transformations and affects crop growth. *J Soil Sci Plant Nutr*. 2021, V. 21, no. 3, pp. 1831–1841. DOI: 10.1007/s42729-021-00483-3
91. Mao H., Zhang T., Li, R., Zhai B., Wang Z., Wang Q., Zhang Z. Apple pomace improves the quality of pig manure aerobic compost by reducing emissions of NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O. *Scientific Reports*. 2017, V. 7, no. 1, article 870. DOI: 10.1038/s41598-017-00987-y
92. Gryko K., Kalinowska M., Świdorski G. The use of apple pomace in removing heavy metals from water and sewage. *Environmental Sciences Proceedings*. 2021, no. 1, article 24. DOI: 10.3390/environsciproc2021009024
93. Asif M., Javaid T., Razzaq Z.U., Khan M.K.I., Maan A.A., Yousaf S., Shahid S. Sustainable utilization of apple pomace and its emerging potential for development of functional foods. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2024, V. 31, no. 12, pp. 17932–17950. DOI: 10.1007/s11356-023-28479-9
94. Faisal S., Mani I., Gupta R.K., et al. Development of extruded snacks using maize, soy, apple pomace-a response surface methodology approach. *J Agric Eng*. 2018, V. 55, no. 3, pp. 21–31. DOI: 10.52151/jae2018553.1658

95. Buljeta I., Pichler A., Šimunović J., Kopjar M. Polysaccharides as carriers of polyphenols: Comparison of freeze-drying and spray-drying as encapsulation techniques. *Molecules*. 2022, V. 27, no. 16, article 5069. DOI: 10.3390/molecules27165069
96. Bušić A., Komes D., Belščak-Cvitanović A., et al. The potential of combined emulsification and spray drying techniques for encapsulation of polyphenols from rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) leaves. *Food Technol Biotechnol*. 2018, V. 56, no. 4, pp. 494–505. DOI: 10.17113/ftb.56.04.18.5680
97. Silva J.T.D.P., Borges M.H., de Souza C.A.C., Fávaro-Trindade C.S., et al. Grape pomace rich-phenolics and anthocyanins extract: Production by pressurized liquid extraction in intermittent process and encapsulation by spray-drying. *Foods*. 2024, V. 13, no. 2, article 279. DOI: 10.3390/foods13020279
98. Borges L.L., Martins F.S., Conceição E.C., Silveira D. Jabuticaba, ellagic acid, spray drying, optimization. *J Food Process Eng*. 2017, V. 40, no. 1, article 12276. DOI: 10.1111/jfpe.12276
99. de Ramos R.M.Q., Siacor F.D.C., Taboada E.B. Effect of maltodextrin content and inlet temperature on the powder qualities of spray-dried pineapple (*Ananas comosus*) waste extract. *Waste and biomass valorization*. 2020, V. 11, no. 7, pp. 3247–3255. DOI: 10.1007/s12649-019-00651-8
100. Kostina E.V. Improvement of the apple pomace drying process and its application in the energy-efficient technology of powdered choline chloride. *Candidate's thesis*. Voronezh, 2013
101. Malenica D., Kass M., Bhat R. Sustainable management and valorization of agri-food industrial wastes and by-products as animal feed: for ruminants, non-ruminants and as poultry feed. *Sustainability*. 2022, V. 15, no. 1, article 117. DOI: 10.3390/su15010117
102. Gołębiewska E., Kalinowska M., Yildiz G. Sustainable use of apple pomace (AP) in different industrial sectors. *Materials*. 2022, V. 15, no. 5, article 1788. DOI: 10.3390/ma15051788

### Информация об авторах

Оксана Ивановна Андреева – аспирант кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; инженер НИЛ  
Роман Сергеевич Полищук – магистрант кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, лаборант НИЛ  
Андрей Геннадьевич Шерстюков – магистрант кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; лаборант-исследователь

Емад Хусейн Али Мунассар – аспирант кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; инженер-проектировщик НИЛ

Иван Александрович Шорсткий – канд. техн. наук, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, старший научный сотрудник, руководитель НИЛ

### Information about the authors

Oksana I. Andreeva, Postgraduate Student, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; Research Engineer  
Roman S. Polishchuk, Master's Student, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; Research Assistant  
Andrey G. Sherstyukov, Master's Student, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; Research Assistant  
Emad H.A. Munassar, Postgraduate Student, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; Design Engineer  
Ivan A. Shorstky, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Equipment and Life Support Systems, Senior Researcher, Head of the Research Laboratory

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 26.03.2026

Одобрена после рецензирования 15.06.2026

Принята к публикации 02.07.2026

The article was submitted 26.03.2026

Approved after reviewing 15.06.2026

Accepted for publication 02.07.2026