

<https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s283>

УДК 66.011

Современное состояние технологий инкапсулирования

А. В. Вейберов, М. И. Губанова, П. О. Орел, И. А. Кирш, О. А. Банникова

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

Корреспонденция:

Вейберов Анатолий Васильевич,
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
125080, Россия, Москва,
Волоколамское шоссе, 11
E-mail: veyberov2000@mail.ru

Конфликт интересов:

авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 27.06.2025

Поступила после

рецензирования: 23.12.2025

Принята: 26.12.2025

Copyright: © 2025 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья рассматривает методы получения микрокапсул и их применение в пищевой и фармацевтической промышленности для защиты чувствительных веществ и повышения функциональности продуктов.

Цель. Анализ состояния и перспектив применения технологий инкапсулирования в пищевой и фармацевтической отраслях, а также оценка развития данного рынка в РФ.

Материалы и методы. Проведен систематический обзор 106 релевантных научных публикаций (1991–2025 гг.) из международных и российских баз данных с применением методов сравнительного и системного анализа.

Результаты. Результаты статьи подчеркивают актуальность и востребованность технологий инкапсулирования для улучшения качества и функциональности продуктов в пищевой и фармацевтической промышленности.

Выводы. Наиболее универсальным методом для пищевой отрасли показала себя распылительная сушка, для целевой доставки в фармацевтике — межфазная полимеризация. Технология инкапсулирования на рынке РФ устойчиво растет благодаря спросу на функциональные продукты, но его развитие сдерживается экономическими рисками и потребностью в обновлении стандартов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

инкапсулирование, фармацевтическая промышленность, пищевая промышленность, полимерные оболочки, контролируемое высвобождение, защитные свойства, органолептика, биодоступность



Для цитирования: Вейберов, А. В., Губанова, М. И., Орел, П. О., Кирш, И. А., & Банникова, О. А. (2025). Современное состояние технологий инкапсулирования. *Health, Food & Biotechnology*, 7(4), 56-80. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s283>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s283>

Current State of Encapsulation Technologies

Anatoliy V. Veyberov, Marina I. Gubanova, Polina O. Orel, Irina A. Kirsh, Olga A. Bannikova

Russian Biotechnological University
(BIOTECH University), Moscow, Russia

Correspondence:

Anatoliy V. Veyberov,
Russian Biotechnological University,
11, Volokolamskoe highway,
Moscow, 125080, Russia
E-mail: veyberov2000@mail.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 27.06.2025

Received in revised form: 23.12.2025

Accepted: 26.12.2025

Copyright: © 2025 The Authors

ABSTRACT

Introduction. The article examines methods for producing microcapsules and their application in the food and pharmaceutical industries to protect sensitive substances and enhance product functionality.

The purpose. To analyze the current state and prospects of applying encapsulation technologies in the food and pharmaceutical sectors, as well as to assess the development of this market in the Russian Federation.

Materials and Methods. A systematic review of 106 relevant scientific publications (1991–2025) from international and Russian databases was conducted using comparative and systemic analysis methods.

Results. The findings highlight the relevance and demand for encapsulation technologies to improve the quality and functionality of products in the food and pharmaceutical industries.

Conclusions. Spray drying has proven to be the most versatile method for the food industry, while interfacial polymerization is optimal for targeted delivery in pharmaceuticals. The encapsulation technology market in the Russian Federation is steadily growing due to the demand for functional products, but its development is constrained by economic risks and the need to update standards.

KEYWORDS

encapsulation, pharmaceutical industry, food industry, polymer shells, controlled release, protective properties, organoleptics, bioavailability.



To cite: Veyberov, A. V., Gubanova, M. I., Orel, P. O., Kirsh, I. A., & Bannikova, O. A. (2025). Current state of encapsulation technologies. *Health, Food & Biotechnology*, 7(4), 56-80. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s283>

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность микрокапсулирования как научного направления обусловлена значительными преимуществами данной технологии, ключевым из которых является возможность создания интеллектуальных систем с программируемыми физико-химическими свойствами, обеспечивающими принципиально новые функциональные решения.

В фармацевтической отрасли технология микрокапсулирования эволюционировала в инструмент для создания прецизионных систем таргетной доставки. Как показывают исследования, проанализированные в данном обзоре, ключевыми стали три направления развития: 1) преодоление биологических барьеров (например, гематоэнцефалического) за счет целенаправленной функционализации поверхности капсул; 2) создание «отзывчивых» систем, высвобождающих препарат в ответ на специфические стимулы организма, такие как изменение pH или концентрация ферментов; 3) обеспечение пролонгированного действия для поддержания стабильной терапевтической концентрации. Таким образом, на смену простой доставке приходят сложные системы, способные решать фундаментальные проблемы биофармацевтики, такие как низкая стабильность и биодоступность белковых терапевтиков (Putney & Burke, 1998), а также обеспечивать целенаправленную доставку и повышенную усвояемость биологически активных пищевых ингредиентов (Jafari & McClements, 2017).

В пищевой промышленности микрокапсулирование решает критические задачи: 1) сохранение жизнеспособности пробиотических культур (*Lactobacillus*, *Bifidobacterium*) при пастеризации и последующая их доставка в кишечник; 2) совмещение химически несовместимых ингредиентов в одной рецептуре (например, железо и витамин E); 3) создание многослойных систем пролонгированного высвобождения ароматизаторов и нутриентов (Ghorbanzade et al., 2023; Carvalho et al., 2023). Сравнительный анализ работ, посвященных решению этих задач, показывает, что универсального подхода не существует: для термочувствительных пробиотиков требуются одни методы (например, экструзия или эмульсионные техники), в то время как для стабилизации летучих ароматизаторов — принципиально другие (коацервация, распылительная сушка). Это подчеркивает важность целевого выбора технологии под конкретный ингредиент и производственные условия.

В агрохимической отрасли микрокапсулирование агрохимикатов в полимерные оболочки позволяет полностью изолировать токсичное действующее вещество,

исключая прямой контакт и обеспечивая его высвобождение в целевой зоне. Препараты с замедленным высвобождением минимизируют воздействие на окружающую среду за счет снижения выщелачивания, испарения и разложения агрохимикатов, повышают водоудерживающую способность почвы, а также лучше борются с сорняками. Такой подход можно использовать для более безопасного применения агрохимикатов (Campos et al., 2015). Аналогичный принцип применяется для безопасной работы с цитостатиками и другими опасными соединениями (Кролевец, 2013).

Концепция инкапсуляции в пищевой промышленности значительно изменилась за последние несколько десятилетий в связи с необходимостью улучшить сохранность продуктов и их питательную ценность. Изначально методы инкапсуляции были разработаны для предотвращения потерь после сбора урожая в результате ферментативных реакций и роста микроорганизмов, которые создавали серьезные проблемы для продовольственной безопасности и экономической жизнеспособности производителей (Chaudhary et al., 2021; Gómez-Gaete et al., 2024).

Современные методы инкапсуляции обеспечивают разный уровень защиты активных веществ¹.

Растущий потребительский спрос на функциональные продукты питания, обладающие противомикробными и антиоксидантными свойствами, стимулирует разработку передовых методов микрокапсулирования биологически активных соединений для их эффективного включения в пищевые матрицы (Chaudhary et al., 2021; Tripathy et al., 2021).

На ранних этапах развития технологии инкапсуляции в пищевой промышленности, основное внимание уделялось защите чувствительных ингредиентов: витаминов — от окисления, ароматических соединений — от испарения и окислительной порчи, масел и жиров — от прогоркания (Jackson & Lee, 1991). Позднее, с развитием функциональных продуктов, ключевой задачей стала защита пробиотических культур от потери жизнеспособности при прохождении через агрессивную кислую среду желудка, что необходимо для обеспечения их терапевтического эффекта (Anal & Singh, 2007).

Выбор материала оболочки (полимерной, липидной или белковой) является критическим параметром, определяющим эффективность инкапсуляции. Такие материалы, как полисахариды, белки и липиды, широко применяются благодаря своей биосовместимости, способности к биodeградации и возможности тонко настра-

¹ All About Feed. (2012). Процессы инкапсуляции приводящие к различным уровням защиты. <https://www.allaboutfeed.net/animal-feed/feed-additives/encapsulation-processes-lead-to-varying-levels-of-protection/>

ивать кинетику высвобождения активного вещества. Исследования показывают, что правильный подбор материала-носителя напрямую влияет на стабильность и конечную биодоступность инкапсулированного агента (Gonçalves et al., 2016; Jafari & McClements, 2017).

В пищевой промышленности инкапсуляция активно применяется для защиты конкретных биоактивных соединений: омега-3 жирных кислот от окисления и для маскировки вкуса (Kaushik et al., 2015); антоцианов для повышения стабильности, контроля высвобождения и сохранения цвета (Sharif et al., 2020); предотвращения некоторых нежелательных сенсорных изменений, которые могут происходить при употреблении продуктов, обогащенных железом (Hurrell, 2002); пробиотических культур для повышения их выживаемости (Ghorbanzade et al., 2023); ферментов для контролируемой активности (Li et al., 2018); фитоэкстрактов с антимикробными свойствами (Carvalho et al., 2023); летучих ароматизаторов от испарения и окисления (Gharsallaoui et al., 2007); каротиноидов для повышения стабильности и биодоступности (McClements, 2015); и антимикробных пептидов для защиты от деградации (Malheiros et al., 2010).

Несмотря на появление множества инновационных подходов, проведенный нами анализ литературных данных однозначно указывает, что решающими факторами для массового производства в пищевой индустрии остаются экономическая эффективность и возможность организации непрерывного технологического процесса. Это объясняет явление, при котором метод, детально описанный еще в работах (Levi et al., 2011), сохраняет статус промышленного стандарта, тогда как более сложные и точные методы зачастую остаются в нише дорогостоящих специализированных продуктов.

Данная технология демонстрирует особую эффективность при работе с широким спектром биологически активных соединений, включая термочувствительные компоненты. Ключевое преимущество метода заключается в возможности точного контроля размеров частиц (от 10 до 200 мкм) посредством регулирования технологических параметров: диаметра форсунки, скорости распыления, температурного режима и давления.²

Современное развитие технологии распылительной сушки позволило существенно расширить диапазон получаемых частиц до наноразмерного уровня (100–500 нм). Использование двухсопелных систем распыления и оптимизация рецептур стенового материала обеспечивают получение частиц с улучшенными функциональными характеристиками: повышенной стабильностью,

контролируемым высвобождением и улучшенной биодоступностью (English et al., 2023).

Тенденция к более здоровым привычкам питания и растущая осведомленность о функциональных продуктах питания способствует инновациям на рынке пищевых инкапсуляций. Управление по контролю за продуктами и лекарствами также отметило, что инкапсулированные ингредиенты необходимы в разработке нутрицевтиков, что еще больше укрепило актуальность этой технологии³

В результате инкапсуляция натуральных соединений и пробиотиков в пищевые продукты стала важнейшей стратегией для повышения функциональности при сохранении желаемых органолептических свойств (Chaudhary et al., 2021; Gómez-Gaete, 2024).

Структура капсул включает два основных компонента: защитную оболочку (стенку), формируемую капсулирующим агентом, и заключенное в нее активное вещество. Последнее может быть либо локализовано в центральной части, образуя четко выраженное ядро, либо равномерно диспергировано в материале оболочки (Gibbs et al., 1999; Jafari, 2017). Широкий спектр доступных капсулирующих материалов открывает возможности для создания систем с контролируемым высвобождением активного компонента в ответ на различные внешние воздействия (Ильина, 2023). На Рисунке 1 представлено схематичное изображение инкапсулированных веществ в полимерные оболочки соединений.

Инкапсулирование классифицируется по размеру частиц на макро- (>1000 мкм), микро- (1–1000 мкм) и нанокапсулирование (<1 мкм). Понятие «биоинкапсулирование» относится к целевой функции (инкапсуляция биоактивных агентов) и не зависит от размера. Хотя нанокапсулирование является самостоятельным направлением, микрокапсулирование остается наиболее распространенным методом в промышленных масштабах благодаря отработанности и экономической эффективности технологий (Gibbs et al., 1999; Mozafari et al., 2008).

Данная технология нашла применение для широкого спектра веществ:

- фармацевтические препараты различных групп;
- биологически активные добавки;
- косметические средства;
- функциональные чернила (включая чернила для 3D-биопечати, струйной печати и печати гибкой электроники).

² Inner engineering. Распылительная сушка (2025). <https://inner.su/articles/raspylitelnaya-sushka-spray-drying-eto/>

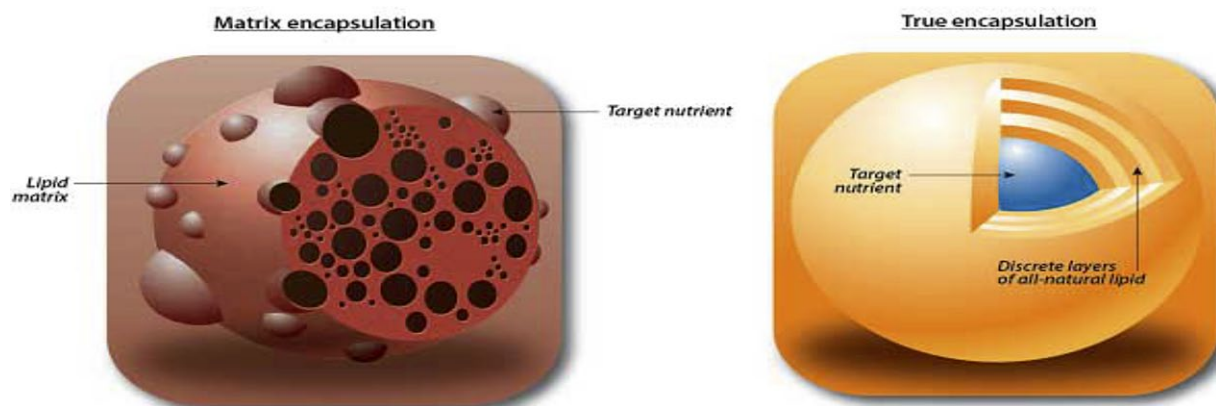
³ Verified Market Reports. Рынок продуктов питания рынка технологий (2023). <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/food-encapsulating-technology-market/>

Рисунок 1

Схематичное изображение инкапсулированных веществ в полимерных оболочках соединений⁴

Figure 1

Schematic Representation of Encapsulated Substances in Polymeric Shells.



Первым коммерческим продуктом на основе микрокапсул стала копировальная бумага безуглеродного типа, разработанная в 1950-е гг. с использованием метода комплексной коацервации желатина и гуммиарабика.⁵ Однако в дальнейшем технология микрокапсулирования получила наибольшее развитие в фармацевтической и пищевой промышленности.

В фармацевтике микрокапсулы начали использовать для создания лекарственных форм с контролируемым высвобождением, защиты активных ингредиентов от разрушения в желудке и маскировки неприятного вкуса (Benita, 2006). Сегодня микрокапсулирование применяется при производстве таблеток, ингаляционных и инъекционных препаратов.

Современные исследования расширяют спектр применения инкапсуляции в фармацевтике. Перспективными направлениями считаются системы, повышающие биодоступность противоопухолевых препаратов за счет таргетированной доставки (Danhier, 2016; Liu et al., 2022).

Активно изучаются технологии позволяющие преодолеть барьеры для пероральной доставки белковых препаратов, таких как инсулин, с помощью систем, защищающих активное вещество в ЖКТ и обеспечивающих его контролируемое высвобождение (Fonte et al., 2013; Putney & Burke, 1998).

Кроме того, большое внимание уделяется созданию частичных систем доставки вакцин (например, на основе полимерных микрочастиц или липосом), которые

не только защищают антиген от деградации, но и действуют как адъюванты, модулируя силу и тип иммунного ответа (De Temmerman et al., 2011; O'Hagan & Rappuoli, 2004).

В пищевой промышленности первые разработки были связаны с защитой и стабилизацией ароматизаторов и витаминов (1960–1970-е гг.) (Gharsallaoui et al., 2007). В настоящее время метод широко используется для капсулирования пробиотиков, нутрицевтиков и функциональных ингредиентов, что позволяет контролировать их высвобождение и повышать стабильность продуктов (Augustin & Sanguansri, 2015).

В фармацевтической и пищевой промышленности выбор технологии микрокапсулирования напрямую зависит от требуемых характеристик продукта. Одним из ключевых параметров является размер частиц: капсулы могут варьироваться от 1 мкм до 7 мм. Этот показатель определяет специфику конечного продукта, технологические особенности процесса производства, а также устойчивость систем к внешним воздействиям (Cui et al., 2006; Tressa et al., 2025).

Существуют микрокапсулы которые могут содержать одновременно несколько фармакологически активных веществ различной природы: капсула может содержать одно вещество в мембране, а второе вещество в ядре (Степанова и др., 2014).. Кроме того, активно развиваются конструкции с многослойными оболочками: вокруг активного ядра формируются последовательные защитные слои из полисахаридов, белков или липидов,

⁴ All About Feed. (2012). Процессы инкапсуляции...

⁵ Green, B. K., & Schleicher, L. (1957). Oil-containing microscopic capsules and method of making them (U.S. Patent No. 2,800,457). U.S. Patent and Trademark Office.

что позволяет повысить стабильность пробиотиков при хранении и обеспечить их высвобождение в кишечнике, а также обеспечивалась выше жизнеспособность пробиотиков (Жантлесова, 2021; Tressa et al., 2025).

Целью данной работы является анализ современного состояния и перспектив использования технологий инкапсулирования в пищевой и фармацевтической отраслях, а также оценка развития данного рынка в Российской Федерации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методологической основой данного исследования является систематический аналитический обзор научной литературы, посвященной технологиям инкапсулирования. Исследование проводилось в несколько этапов: поиск, первичный скрининг и углубленный анализ отобранных источников.

Стратегия поиска и информационные базы Сбор данных осуществлялся за период с 1991 по 2025 год включительно. Для обеспечения полноты охвата как мировых, так и отечественных разработок, поиск релевантных публикаций проводился в следующих базах данных:

- (1) Международные библиографические базы: Scopus, Web of Science, PubMed.
- (2) Российские научные электронные библиотеки: eLibrary, CyberLeninka.

Поиск выполнялся по ключевым словам и их комбинациям на русском и английском языках: «микрокапсулирование», «инкапсуляция», «контролируемое высвобождение», «биодоступность», microencapsulation, encapsulation, targeted delivery, probiotics.

На начальном этапе по заданным поисковым запросам было идентифицировано 153 публикации. Для формирования итоговой выборки применялись строгие критерии отбора, а именно (1) оригинальные исследовательские статьи и фундаментальные обзоры; (2) наличие детального описания конкретного метода инкапсуляции; (3) наличие характеристик физико-химических (размер, форма) или функциональных (стабильность, биодоступность) свойств полученных систем; (4) данные об эффективности применения технологий в пищевой или фармацевтической отраслях.

Критерии исключения: (1) тезисы докладов и материалы конференций (ввиду краткости изложения методологии); (2) работы с недостаточным описанием условий

эксперимента или необоснованными выводами; (3) дубликаты публикаций в разных базах данных.

В результате первичного скрининга, включавшего оценку названий и аннотаций на соответствие тематике, было отсеяно 47 работ. Для финального полнотекстового анализа и систематизации было отобрано 106 наиболее релевантных источников.

В ходе работы использовались следующие научные методы:

Сравнительный анализ — для сопоставления технико-экономической эффективности различных технологий (например, распылительной сушки и коацервации).

Системный подход — для классификации методов инкапсулирования по размерам частиц (макро-, микро-, нано-), типу используемых материалов (полисахариды, белки, липиды) и механизму высвобождения активных веществ.

Синтез информации — для обобщения текущих тенденций рынка и оценки перспектив импортозамещения и развития технологий инкапсулирования в Российской Федерации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

История появления капсулирования. Технологии инкапсулирования имеют древние корни: ещё в Древнем Египте (≈1550 г. до н. э.) медицинские папирусы (включая папирус Эберса) содержат рецептуры и указания по приготовлению лекарственных смесей, что свидетельствует о ранних практиках защиты и консервации лекарственных веществ (Metwaly et al., 2021).

Переход к формализованным фармацевтическим капсулам произошел в XIX в.: в 1833–1834 гг. французские фармацевты Joseph G. A. Dublanc и F. A. B. Mothes запатентовали метод получения желатиновых капсул, что принято считать началом эры современных фармацевтических капсул.⁶

В XX в. технология инкапсуляции получила активное развитие: в 1950-е гг. микрокапсулы нашли применение в производстве копировальной бумаги без углерода (Benita, 2006), а уже в 1970-х гг. методы микрокапсулирования начали широко использоваться в пищевой промышленности для защиты ароматизаторов, витаминов и жиров от окисления (Gharsallaoui et al., 2007).

⁶ Bleiner, P. (2025). A brief history of gelatin in soft caps: Why it is still the leading choice for manufacturers.

<https://www.pbleiner.com/en/insights-news/insights-blog/brief-history-gelatin-soft-caps-why-it-still-leading-choice-manufacturers>

Современный этап развития инкапсуляции характеризуется значительным разнообразием как подходов (коацервация, распылительная сушка, эмульсионная полимеризация и др.), так и материалов (белки, полисахариды, липиды, синтетические полимеры), что позволяет контролировать размер, форму и поведение капсул при хранении и высвобождении активных веществ (Naharro-Molinero et al., 2024). Наиболее широко используемым в промышленных масштабах методом остается распылительная сушка благодаря её высокой производительности и экономичности.

Вместе с тем активно исследуются и внедряются новые технологии, такие как электрораспыление, комплексная коацервация, дражирование, ионотропное гелеобразование, формирование комплексов включения, микрофлюидные и сверхкритические методы, которые обеспечивают возможность получения капсул с заданными размерами, многослойными оболочками и улучшенной стабильностью биологически активных соединений (Ribeiro et al., 2021; Семкина, 2021). Эти инновационные подходы расширяют потенциал применения инкапсуляции не только в пищевой и фармацевтической промышленности, но и в косметологии, а также в смежных областях.

Эти технологии особенно активно применяются в пищевой промышленности, где микрокапсулы стали ключевым инструментом для создания продуктов с повышенной стабильностью и улучшенными потребительскими свойствами.

Если изначально акцент делался на защите отдельных ингредиентов, то сегодня всё большее внимание уделяется созданию комбинированных систем. Перспективным направлением стали синбиотические микрокапсулы, в которых одновременно заключены пробиотики и пребиотики: такая форма значительно повышает выживаемость микроорганизмов и усиливает их физиологический эффект (Malos et al., 2025).

Дополнительно развивается капсулирование пептидов и биологически активных фитонутриентов, что открывает возможности для разработки функциональных напитков и специализированных продуктов питания (Yan et al., 2022; Hu et al., 2024).

На сегодняшний день желатин остается одним из наиболее часто применяемых материалов для капсул, однако всё шире используются и альтернативы. Среди них — полисахариды, производные целлюлозы и растительные полимеры. Например, гидроксипропилметилцеллюлоза (HPMC) зарекомендовала себя как перспективная за-

мена желатину благодаря стабильности при хранении и возможности точного контроля высвобождения действующих веществ.

Капсулы на основе pullulan и HPMC выпускаются рядом производителей и применяются для создания веганских продуктов, а также для форм с замедленным или целенаправленным высвобождением (Sharma et al., 2023). Кроме желатина, современные оболочки капсул включают растительные и полусинтетические полимеры, а также ряд вспомогательных веществ, обеспечивающих требуемые свойства. Так, в энтеросолюбильных рецептурах применяется гипромеллоза фталата в сочетании с желатином и полиэтиленгликолем-4000, что позволяет капсулам сохранять целостность в кислой среде желудка и высвобождать содержимое уже в кишечнике (Ramezani Kalmer et al., 2023).

Перспективным направлением стали полностью растительные капсулы на основе pullulan, обладающие высокой механической прочностью и устойчивостью к влаге (Ramezani Kalmer et al., 2024). Сравнительные исследования также показали, что HPMC- и pullulan-капсулы более стабильны при хранении, чем желатиновые аналоги (Yang et al., 2025). Для получения энтеросолюбильных и пролонгированных форм используются композиции pullulan с полиакриловыми смолами, позволяющие регулировать скорость распада (Hu et al., 2024).

Дополнительно разрабатываются мягкие капсулы на основе растительных крахмалов, например гидроксипропил горохового крахмала в сочетании с каррагинаном и пластификаторами, которые позиционируются как альтернатива желатиновым оболочкам и находят применение в производстве веганских продуктов.⁷

Методы получения микро- и нанокапсул. Анализ литературных данных выявил определенное терминологическое несоответствие, связанное со структурой инкапсулированных продуктов. Для систематизации подхода в данном обзоре мы предлагаем ориентироваться на классификацию, основанную на морфологии частиц. Как наглядно демонстрирует Таблица 1, помимо базового разделения на микро- и нанокапсулы, критически важным является различие между капсулами (с жидким ядром) и сферами (с твердым ядром), поскольку это определяет их функциональные свойства и области применения (Кролевец, 2013; Podgornik & Šumiga, 2008).

Классификация методов микрокапсулирования. Основные методы получения нанокапсул представлены в Таблице 2. В данный момент единая система класси-

⁷ Roquette. (2024, May 14). Lycagel Flex hydroxypropyl pea starch premix for softgel capsules [Press release]. <https://www.outsourcing-pharma.com/Article/2024/05/14/roquette-s-new-capsules-solving-drug-delivery-issues>

Таблица 1
Терминология существующей инкапсуляции, которая детально представлена авторами (Podgornik & Šumiga, 2008)

Table 1
Terminology of Existing Encapsulation (Podgornik & Šumiga, 2008)

Название	Описание	Размер	Изображение
Микрокапсулы	Частицы, содержащие жидкие ядра и твердые оболочки	мкм	
Нанокapsулы	Структура как у микрокапсул, но размер меньше	нм	
Микросферы	Частицы, содержащие твердые ядра и твердые оболочки	мкм	
Наносферы	Структура как у микросфер, но размер меньше	нм	
Липосомы	Липидная оболочка, часто из фосфолипидов и холестерина. Подтипы: однослойные и многослойные	от мкм до нм	
Ниосомы	Структура как у липосом, но оболочка изготавливается из синтетических амфифильных молекул		

фикации методов микрокапсулирования не разработана. Исходя из данных, опубликованных в российской литературе, методы получения микрокапсул могут быть разделены на три основные группы.

Следует отметить, что данная классификация, основанная на природе процессов инкапсуляции и представленная в Таблице 3, носит условный характер, поскольку на практике нередко используют комбинации различных подходов (Yan et al., 2022). Так, метод аэрозольного микрокапсулирования может быть отнесен как к химическим, так и к физическим методам, поскольку соче-

тает процессы химического взаимодействия и физической коалесценции частиц (Ribeiro et al., 2021).

В последние годы появились и другие гибридные технологии: сочетание распылительной сушки с липосомальными системами для повышения биодоступности липофильных соединений (Hu et al., 2024),

Для термочувствительных объектов, таких как пробиотики, комбинация методов инкапсуляции (коацервация) с сублимационной сушкой является стандартным

Таблица 2
Современные методы инкапсуляции (2008–2025) и области применения
Table 2
Modern Encapsulation Methods (2008–2025) and Areas of their Application

Класс методов	Примеры	Особенности	Основные области применения
Традиционные масштабируемые	Распылительная сушка, включая nano-spray drying (Ribeiro et al., 2021)	Высокая производительность, отработанные технологии	Пищевая промышленность (ароматы, витамины, омега-3), БАДы, кормовые добавки
Классические лабораторно-промышленные	Коацервация, эмульсионная/суспензионная полимеризация, межфазная полимеризация (Hu et al., 2024)	Гибкость в подборе материалов, возможность сложных капсул	Фармацевтика (контролируемое высвобождение), пищевая промышленность (чувствительные ингредиенты), косметика
Нанотехнологические и высокоточные	Микрофлюидные системы, электроспрей и технологии на основе сверхкритических флюидов (Zuidam & Nedović, 2010).	Узкий контроль размера, создание многослойных оболочек, «чистые» процессы	Фармацевтика (таргетная доставка, пептиды, пробиотики), пищевая промышленность (пробиотики, липофильные нутриенты), косметика
Новые аддитивные технологии	3D/inkjet printing (Oral et al., 2021)	Персонализированная дозировка, формирование сложных структур	Фармацевтика (индивидуализированные препараты), функциональные продукты питания

Таблица 3
Методы инкапсуляции по принципу действия и области применения
Table 3
Encapsulation Methods by their Operating Principle and Application Area

Группа методов	Примеры	Основные области применения
Физико-химические	Коацервация; Осаждение нерастворителем; Образование новой фазы при изменении температуры; Упаривание летучего растворителя; Отверждение расплавов в жидких средах; Экстракционное замещение; Высушивание распылением; Физическая адсорбция	Фармацевтика (контролируемое высвобождение, пробиотики); Пищевая промышленность (витамины, омега-3, ароматизаторы); Косметика (ароматические масла, активные вещества)
Химические	Образование новой фазы путем сшивания полимеров; Поликонденсация; Полимеризация	Фармацевтика (полимерные наночастицы, таргетная доставка); Биотехнология (ферменты, пептиды); Материаловедение (капсулы для функциональных покрытий)
Физические	Напыление в псевдооживленном слое; Экструзия; Конденсация паров	Фармацевтика (таблетированные формы, энтеросорбционные покрытия); Пищевая промышленность (добавки, кормовые компоненты); Химическая промышленность (капсулы с катализаторами, красителями)

подходом для обеспечения длительной стабильности при хранении (Krasaekoort et al., 2003).

Критерии выбора метода инкапсуляции во многом определяются свойствами целевого вещества и желаемыми характеристиками конечного продукта. В Таблице 4 представлены основные факторы, которые учитываются при подборе технологии, а также примеры веществ и соответствующие методы.

Сложность классификации методов обусловлена возможностью комбинации нескольких механизмов в одном процессе, а также изменением терминологии с течением времени. Сравнительный анализ методов, представленных различными авторами, приведен в Таблице 5 (Кролевец, 2013; Balagani, 2011; Адиканова, 2016; Chaudhary et al. 2021). Анализ таблиц наглядно демонстрирует, что универсального решения не существует — выбор метода диктуется конкретной прикладной задачей.

Таблица 4*Факторы выбора метода инкапсуляции и примеры применения***Table 4***Encapsulation Method Selection Factors and their Application Examples*

Фактор	Особенности вещества	Подходящие методы	Примеры веществ
Термоллабильность	Разрушаются при нагревании	Лиофилизация, LbL-инкапсуляция, микрофлюидные системы	Пробиотики (<i>Lactobacillus</i> spp.), ферменты, витамин С
Летучесть	Потеря аромата и активности при хранении	Коацервация, межфазная полимеризация, липосомы	Эфирные масла, ароматизаторы
Растворимость	Липофильные компоненты плохо диспергируются в воде	Эмульсионные методы, липосомальные системы, Pickering-эмульсии	Омега-3 жирные кислоты, каротиноиды, куркумин
Чувствительность к pH	Разрушение в кислой или щелочной среде	Энтеросолюбильные покрытия (Eudragit®, HPMCPH), капсулы двойного покрытия	Пробиотики, пептиды, белки
Необходимость пролонгированного высвобождения	Требуется постепенное или таргетное высвобождение	Коацервация, полимеризация, многослойные оболочки	Антиоксиданты, нутрицевтики
Форма конечного продукта	Требуются порошки с узким распределением частиц	Spray-drying, nano-spray drying	Витамины, сухие экстракты, ароматизаторы

Таблица 5*Методы инкапсулирования и их применение в промышленности***Table 5***Encapsulation Methods and their Industrial Applications*

Метод	Применение
Химические методы	
Суспензионная полимеризация	Текстиль
Эмульсионная полимеризация	Фармацевтика
Дисперсионный метод	Биологические науки
Межфазный метод	Защита растений, катализ, фармацевтика
Физические методы	
Суспензионное шивание	Фармацевтика
Экстракция	
Сушка распылением	
Коацервация	
Аэрозольный метод	Фармацевтика, пищевая промышленность
Кристаллизация из расплавов	Пищевая промышленность
Осаждение	Пищевая промышленность
Коэкструзия	Биологические науки
Покрывание в кипящем слое	Биомедицина
Вымораживание-замораживание	Биологические науки
Дисковое вращение	Фармацевтика
Метод пропитки	Фармацевтика

Суспензионная полимеризация служит распространенным способом синтеза поливинилхлорида, полистирола и полиметилметакрилатов. Применение водной дисперсионной среды с высокой теплоемкостью обеспечивает эффективный теплоотвод, способствуя формированию полимера с узким молекулярно-массовым распределением. Метод дает сферические частицы (5–1000 мкм), легко отделяемые от среды и характеризующиеся низким содержанием примесей (Адиканова, 2016).

Эмульсионная полимеризация основана на введении мономера в водный раствор, содержащий эмульгатор и инкапсулируемое вещество. Полимеризация сопровождается образованием первичных ядер, рост которых приводит к формированию микрокапсул.

Дисперсный метод характеризуется образованием оболочки в результате полимеризации мономеров, введенных в инкапсулируемое вещество. Особенностью процесса является отсутствие реактивных агентов в основном материале. Полимеризация протекает исключительно в непрерывной фазе с формированием дисперсного ядра: первоначально образуется низкомолекулярный форполимер, который постепенно увеличивает молекулярную массу, после чего на его поверхности осаждается основной материал с последующим образованием капсул.

Межфазная полимеризация предполагает образование оболочки на поверхности капель с использованием многофункциональных мономеров (изоцианатов, хлоридов кислот). Мономер диспергируют в водной фазе, содержащей материал ядра и диспергатор, после чего добав-

ляют многофункциональный амин для инициирования быстрой полимеризации.

Суспензионное сшивание представляет собой метод получения микрокапсул полисахаридов, при котором водный раствор полимера диспергируют в органическую фазу, содержащую материал ядра капсул в несмешивающихся растворителях. Данный подход универсален для инкапсуляции как жидких, так и твердых веществ.

Экстракция наиболее распространенный метод, подразумевающий эмульгирование раствора полимера с препаратом в несмешивающихся растворителях, удаление растворителя (нагревом, вакуумом или испарением) и последующую сушку микросфер. Широко применяется в фармацевтике (Кролевец, 2013).

Распылительная сушка заключается в диспергировании эмульсии капсулируемого вещества в потоке горячего газа, что приводит к удалению растворителя и образованию плотных частиц с равномерным распределением активного компонента (Меньшутина, 2014).

Коацервация реализуется в двух формах: простой (с десольватирующим агентом) и сложной (основанная на комплексообразовании полимеров). Процесс включает три этапа: создание несмешивающихся фаз, осаждение оболочки и ее отверждение (Кролевец, 2013).

Аэрозольный метод основан на использовании газовой дисперсионной среды. Этапы его реализации: распыление частиц в парах капсулирующего материала; распыление эмульсий/дисперсий; смешение аэрозолей реагирующих компонентов (Меньшутина, 2014).

Кристаллизация из расплавов включает расплавление полимера, смешение с препаратом, добавление несмешивающихся растворителей, нагрев до 50 °C при перемешивании и последующее охлаждение (Кролевец, 2013).

Метод осаждения. Осаждение полимера на капли эмульсии в неводных эмульсиях приводит к образованию прочной оболочки без загрязнения сердцевины, что идеально подходит для герметизации чувствительных к воде или смешивающихся с водой материалов (Lak et al., 2022).

Кокструзия осуществляется путем одновременной экструзии растворов капсулирующего агента и целевого материала через концентрические форсунки. Ламинарный поток разбивается на капли с последующим отверждением оболочки (охлаждением, сушкой или химической обработкой). Метод обеспечивает защиту активных компонентов и контроль высвобождения (Ильина, 2023).

Метод покрытия в кипящем слое. При использовании этого метода частицы находятся во взвешенном состоянии в слое, на них распыляется жидкость для нанесения покрытия, после чего они высушиваются. Иными словами, процессы псевдоожижения и распыления применяются одновременно. Для получения однородного продукта важны размер частиц и вязкость среды для нанесения покрытия распылением. Благодаря мелким частицам и низкой вязкости распыляемой среды получают однородные продукты. Кроме того, качество покрытия во многом зависит от статистического времени пребывания частиц в зоне нанесения покрытия. Псевдоожиженный слой для нанесения покрытий может быть устроен по принципу нижнего распыления (по Вурстеру), верхнего распыления или роторного (тангенциального) распыления (Dehghani & Farhadian, 2023).

Вымораживание-замораживание Механизм инкапсуляции был изучен путем анализа влияния температур замораживания-оттаивания на морфологические изменения гигантских однослойных пузырьков, инкапсуляции ДНК и образования кристаллов льда, а также взаимосвязи этих процессов. После образования кристаллов льда форма сферических пузырьков была изменена, а целостность мембраны нарушена, эти явления оказались необходимыми условиями для инкапсуляции.

Само по себе нагревание не оказало влияния на инкапсуляцию ДНК, но было полезно для восстановления сферической формы и целостности мембран гигантских однослойных пузырьков, поврежденных при замораживании. Эти результаты исследования ученых из Китая показали, что замораживание-оттаивание может способствовать инкапсуляции ДНК в ГВ посредством следующего механизма: мембрана везикулы нарушается при образовании кристаллов льда во время замораживания, ДНК проникает в поврежденные ГВ через эти мембранные промежутки и инкапсулируется после повторного запечатывания мембраны в процессе оттаивания (Qiao, 2016).

Дисковое вращение. Способ формирования тканевых микрокапсул с использованием устройства для капсулирования с вращающимся диском, в котором подаваемая смесь вводится в смесительную камеру стакана с помощью одной иглы, нескольких или концентрических игл. При вращении чаши покрытые частицы под действием центробежной силы поднимаются из камеры смешивания вдоль внутренней поверхности чашки, выступая радиально наружу в виде шариков, и попадают в желирующий раствор, находящийся в одном из резервуаров⁸.

⁸ Kent, C. C. (1999). *Spin disk encapsulation apparatus and method of use* (Patent No. US6001387A). U.S. Patent and Trademark Office.

Метод пропитки основан на диффузионном насыщении полимерных матриц термолабильными органическими соединениями из среды сверхкритического диоксида углерода (ScCO_2) при комнатной температуре. Технология исключает использование органических растворителей и применяется для инкапсуляции фармацевтических субстанций (Кролевец, 2013).

В пищевой промышленности методы инкапсулирования используются для двух основных целей: защиты пищевых добавок и ингредиентов (путем создания макропокрытий) и обогащения продуктов микронутриентами и биологически активными веществами (БАВ).

Прямое внесение БАВ в пищевые системы часто сопряжено с их деградацией. Актуальными задачами являются: разработка методов, минимизирующих потери биологически активных компонентов, и поиск новых подходов к инкапсулированию (Ильина, 2023).

Инкапсулирование в промышленности. Нутрицевтики, функциональные продукты питания, стимуляторы иммунитета, микрокапсулы, наноэмульсии, пищевая упаковка и безопасные продукты питания — новые прогрессивные термины, принятые для описания пищевой промышленности. Кроме того, растущая осведомленность потребителей о них создала возможность для производителей продуктов питания и ученых по всему миру использовать продукты питания в качестве средства доставки

Упаковка играет очень важную роль в цепочке поставок пищевых продуктов, а также является неотъемлемой частью процесса производства пищевых продуктов.

Исследования, посвященные пищевой упаковке, — это быстро развивающаяся область науки, где используются пищевые биополимеры, такие как липиды, полисахариды, белки, смолы и т. д., а также другие расходуемые компоненты, извлекаемые из различных нетрадиционных источников, таких как микроорганизмы. Эти компоненты применяются по отдельности или в комбинации.

Эта пищевая упаковка незаменима и предназначена для употребления с пищевыми продуктами. Переход от традиционной упаковки пищевых продуктов к съедобным, экологически чистым средствам доставки биоактивных соединений открыл новые возможности для упаковочной промышленности. Биоактивные соединения, усваиваемые пищевыми системами, постепенно разлагаются, или могут изменять свои свойства из-за внутренних или внешних факторов, таких как реакции окисления, или они могут вступать в реакцию друг с другом, что снижает их биодоступность и в конечном итоге может привести к появлению неприемлемых органолептических свойств (цвета или вкуса).

Сочетание нового материала для упаковки пищевых продуктов и инновационных технологий может служить отличным средством контроля биодоступности этих соединений в пищевых матрицах.

Одной из перспективных технологий для преодоления вышеупомянутых проблем является капсулирование. Его можно использовать как метод улавливания желаемых ароматизаторов, пробиотиков или других добавок для устранения недостатков обычной пищевой упаковки (Chaudhary et al., 2021).

Эффективность микрокапсулирования в фармацевтике наиболее наглядно демонстрирует пример с пробиотиками. Прямое введение культур в ЖКТ малоэффективно из-за агрессивной желудочной среды. Однако, как свидетельствуют экспериментальные данные (Астафьева, 2022), инкапсуляция позволяет не просто немного увеличить, а на порядки повысить выживаемость пробиотиков. Полученные результаты — «повышение на два порядка» — означают, что до цели доходит не несколько процентов, а большинство бактерий. Это коренным образом меняет эффективность пробиотической терапии и открывает путь к созданию принципиально новых лекарственных форм, что подтверждается и исследованиями других авторов (Какимов, 2016).

Применение методики инкапсулирования антибиотиков обеспечивает высокую биодоступность за счет повышения способности прохождения через естественные барьеры организма (Цепелев, 2023).

В исследовании ученых из Казахстана было установлено, что для сохранения активности роста *L. casei* в желудочно-кишечном тракте необходимо применить инкапсулирование пробиотиков. Инкапсулирование *L. casei* обеспечит защиту лактобацилл от действия желудочного сока и тем самым позволит жизнеспособным клеткам лактобацилл достичь нижних отделов кишечника, где они будут способны обеспечить успешное лечебное воздействие (Какимов, 2016).

Свойства оболочек (носителей) микрокапсул можно варьировать таким образом, чтобы действующее вещество (инкапсулят) полностью сохраняло свой состав и характеристики при технологической обработке продукта (Базарнова, 2014). Это может позволить вносить пробиотики в пищевые продукты, требующие температурной обработки.

Исследование возможности температурной обработки пищевых продуктов с инкапсулированными пробиотическими культурами актуально, так как это позволит существенно расширить ассортимент таких функциональных продуктов (Астафьева, 2022).

Микрокапсулирование обеспечивает сохранение свойств биологически активных веществ (БАВ) при воздействии агрессивных факторов внешней среды, предотвращая инактивацию физиологически активных компонентов, включая белки, в процессах хранения и переработки. Данная технология поддерживает нативную конформацию функциональных пищевых ингредиентов как до, так и после обогащения продуктов, одновременно повышая биодоступность БАВ за счет контролируемого высвобождения.

Исследование кинетики высвобождения сывороточного альбумина из полиэлектролитных капсул (альгинат натрия/карбоксиметилцеллюлоза) в условиях *in vitro*, моделирующих ЖКТ, показало, что в желудочной фазе теряется 20 % белка, тогда как 80 % БАВ высвобождается в кишечной фазе. При этом 90 % белка десорбировалось из моно- и полислойных систем именно в кишечных условиях, что подтверждает их защитную функцию и механизм таргетированной доставки (Дружинина, 2017).

В качестве коллоидных систем доставки, пригодных для инкапсулирования белков, используют межфазные системы, например, микроэмульсии, эмульсии, мицеллы, твердые липидные наночастицы, липосомы, полимерсомы, золь-гели и гидрогели. Активно применяют неорганические мезопористые частицы (наночастицы диоксида кремния, гидроксиапатит, фосфаты кальция и др.) и частицы на полимерной основе, в том числе белковой природы.

Коллоидные системы, пригодные для инкапсулирования белков, включают межфазные структуры: микроэмульсии, эмульсии, мицеллы, твердые липидные наночастицы, липосомы, полимерсомы, золь-гели и гидрогели. Активно применяются неорганические мезопористые частицы (наночастицы SiO_2 , гидроксиапатит, фосфаты кальция) и полимерные носители, включая белковые.

Примером служит инкапсуляция инсулина в хитозан-пектиновые нано- и микрочастицы, позволившая разработать пероральные формы вместо инъекционных. Липосомальные системы обеспечивают преодоление проблем биосовместимости, таргетную доставку и защиту от иммунных факторов, что актуально при конструировании вакцин для индукции антител и Т-клеточного ответа.

Однако эти технологии имеют ограничения, такие как необходимость стандартизации матриц по размеру, форме и заряду частиц для контролируемого высвобождения. В частности, малый размер пор неорганических носителей ограничивает инкапсуляцию крупных белковых молекул (Соколов, 2021).

Технология инкапсулированных пищевых добавок имеет следующие преимущества: возможность получения

порошкообразных субстанций и составления композиций многоцелевого назначения; сохранение вкусоароматических и цветовых свойств природных веществ; пролонгация фитонцидного и антиоксидантного действия фитокомпонентов натуральных пищевых добавок в продукте; синергетический эффект фитокомпонентов в составе композиций; отсутствие химических взаимодействий с другими компонентами продукта; термо- и криостабильность инкапсулируемых ингредиентов за счет защитного покрытия материала инкапсулянта; гомогенность распределения микрокапсул по массе продукта (Базарнова, 2014).

Формирование капсул, материалы. Содержание инкапсулированного вещества в микрокапсулах варьируется в диапазоне 70–85 % от массы капсулы и определяется технологическими параметрами: методом получения, требуемым соотношением оболочка/ядро, температурой, степенью диспергирования, вязкостью среды и наличием ПАВ (Levi et al., 2011; Степанова и др., 2014).

Термины «микрокапсулы» и «нанокпсулы» обозначают гетерогенные структуры, включая молекулярные комплексы с иммобилизованным активным компонентом и самоорганизующиеся наносистемы. Критерием разграничения микро- и нанокпсуляции служит размер частиц. Нанокпсулы, как правило, характеризуются диапазоном 1–1000 нм, что позволяет существенно увеличить биодоступность и контролировать проникновение активных веществ в целевые ткани. Микрокапсулы, напротив, имеют размеры от 1 до 1000 мкм и применяются в основном для защиты действующих веществ от внешних воздействий и обеспечения пролонгированного высвобождения (McClements & Xiao, 2014).

К липидным матрицам относят пчелиный воск и глицеролдистеарат, которые используются для защиты летучих ароматических веществ и масел (Augustin & Nema, 2009). Белковые материалы включают желатин, зеин и модифицированные растительные белки, применяемые для создания капсул с контролируемым высвобождением и высокой биосовместимостью (Gharsallaoui et al., 2007).

Углеводные соединения, такие как крахмалы, хитозан и производные целлюлозы, широко используются в пищевой и фармацевтической промышленности благодаря их превосходной биосовместимости, естественной биоразлагаемости. Кроме того, они способны образовывать коллоидные дисперсии, гидрогели или системы с твердыми частицами, которые обеспечивают физическую защиту биологически активных соединений от воздействия окружающей среды, таких как окисление, тепло и свет (Sethunga et al., 2025).

Среди синтетических полимеров, например, применяются поли(молочная кислота) и сополимеры метакриловой кислоты, обеспечивающие энтеросолюбильные и пролонгированные формы лекарственных препаратов (Hu et al., 2024).

Выбор капсулирующей матрицы обусловлен целевым назначением, физико-химическими свойствами активного вещества, механизмом высвобождения и спецификой метода инкапсулирования. Высвобождение содержимого капсул зависит от состава оболочки; основные факторы приведены в Таблице 6 (Меньшутина, 2014).

Таблица 6
Факторы, оказывающие влияние на высвобождение содержимого капсул
Table 6
Factors Affecting the Release of Capsule Contents

Фактор	Примеры материалов оболочки
Температура	Пчелиный воск, карнаубский воск, глицеролдистеарат, стеариновая кислота
Влага	Гидрофильные полимеры: альгинат натрия, крахмалы, пектин, желатин, хитозан
pH	Кишечнорастворимые покрытия: HPMSPh, Eudragit® L/S, целлюлозные эфиры
Ферменты	Липидные матрицы (триглицериды), крахмальные матрицы, белковые материалы (зеин, сывороточные белки), капсулы с покрытием на основе HPMS

Современное развитие инкапсулирования. Совместные исследования выявили ряд биологически активных соединений с доказанным позитивным влиянием на здоровье человека, что активизировало изучение материалов для инкапсуляции (Sun et al., 2023), технологических параметров инкапсулирования биологически активных веществ, молочнокислых микроорганизмов и дрожжей (Laina et al., 2025), а также применения инкапсулированных ингредиентов в функциональных пищевых продуктах (Jiang et al., 2020).

Инкапсуляция повышает термостабильность и растворимость, обеспечивает защиту от ультрафиолетового излучения и возможность контролируемого высвобождения. Кроме того, это повышает шансы на обеспечение безопасности и органолептической приемлемости продуктов, хотя при этом необходимо свести к минимуму повреждение естественного вкуса продуктов, упакованных таким образом (Chaudhary et al., 2021).

Перспективность метода подтверждается его широким применением в т. ч. в производстве строительных материалов, лакокрасочной и текстильной промышленности, в производстве косметики и парфюмерии, пищевом

производстве, ветеринарии, медицине, фармацевтике, полиграфии (чернила, краски), сельском хозяйстве, генной инженерии, а также в автомобилестроении (Быковская, 2012). Это доказывает, что инкапсулирование превратилось из узкотехнологического приема в универсальный инструмент для решения разнообразных прикладных задач.

Исследования технологии комплексной коацервации показали более высокий выход и стабильность получаемого продукта, но основным недостатком остается ограниченная доступность материала оболочки. Желатин является одним из наиболее широко используемых белков для получения микрокапсул методом комплексной коацервации, особенно в комбинации с гуммиарабиком, из-за ее большого количества, биосовместимости и биоразлагаемости (Liu et al., 2022; Li et al., 2018).

Однако в присутствии полисахаридов также было обнаружено, что растительные белки способны образовывать сложные коацерваты. Их более низкая стоимость, более высокая доступность и экологичность в сочетании с другими функциональными свойствами также являются стимулом для дальнейших исследований в этой области (Chaudhary et al., 2021).

В различных отчетах высказывается предположение, что сложные коацервированные микрокапсулы эфирных масел потенциально могут контролировать рост микробов в хранящихся свежих и переработанных пищевых продуктах, таких как фрукты, молоко, овощи, соки и пирожные. (Calderón-Oliver & Ponce-Alquicira, 2022).

В настоящее время перспективным инновационным направлением в технологии производства пищевых продуктов является использование приемов молекулярной гастрономии, позволяющих модифицировать потребительские свойства традиционных продуктов питания. Одним из приемов этого направления является технология сферификации, представляющей собой процесс капсулирования различных пищевых масс (соусов, соков, экстрактов и т. д.). Широкий потенциал технологии капсуляции, частью которой является сферификация, демонстрирует её применение в различных отраслях промышленности (Рисунок 2). Данная технология позволит не только использовать ее в качестве инструмента инновационного менеджмента в ресторанном бизнесе, но и расширить область применения инкапсуляции в связи с использованием структурообразующих веществ отечественного производства и побочных продуктов молочной промышленности (Zhuravlev, 2017).

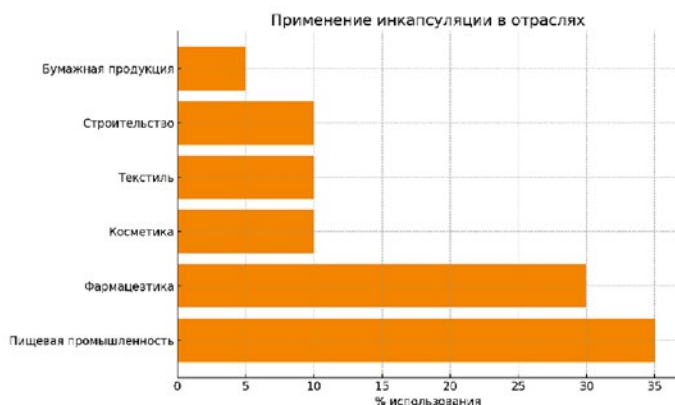
Рынок инкапсулирования в Российской Федерации. Российский рынок инкапсулирования, как показывают отраслевые отчеты, демонстрирует уверенный рост. Однако важно подчеркнуть, что за общими цифрами стоит

Рисунок 2

Применение инкапсуляции в отраслях в процентном соотношении по состоянию на 2025 г.

Figure 2

Encapsulation Adoption by Industry as a Percentage of 2025

**Рисунок 3**

Прогноз роста рынка инкапсуляции в период до 2028 г.

Figure 3

Encapsulation Market Growth Forecast through 2028



структурный сдвиг. Рост обусловлен не только макроэкономическими факторами (увеличение доходов и численности населения), но и, что более важно, растущим спросом на функциональные продукты и БАДы. Этот спрос, в свою очередь, напрямую связан с технологическими возможностями, рассмотренными в предыдущих разделах: потребитель готов платить за продукты с инкапсулированными пробиотиками, витаминами и омега-3, чья эффективность гарантирована именно применением технологий микрокапсулирования⁹. Таким образом, научные разработки становятся прямым драйвером рыночного роста.

Исторически сложилось так, что рынок инкапсуляции в России претерпел значительные изменения, перейдя от примитивных методов консервации в XIX в. к передовым технологиям микроинкапсуляции в XXI в. (Solodova et al., 2021). Эти достижения позволяют контролировать высвобождение питательных веществ и повышают биодоступность питательных веществ в продуктах питания, стимулируя спрос на функциональные продукты и пищевые добавки¹⁰.

По прогнозам, в период до 2028 г. совокупный среднегодовой темп роста (CAGR) рынка составит 6,77%, что подчеркивает динамичный характер этой отрасли и её восприимчивость к технологическим инновациям и меняющимся потребительским тенденциям¹¹. Динамика прогнозируемого роста наглядно представлена на Рисунке 3.

Рынок инкапсуляции сталкивается с проблемами, которые могут повлиять на его рост. К ключевым проблемам относится необходимость обновления правил и стандартов для процессов инкапсуляции, что может препятствовать инновациям и разработке продуктов (Solodova, 2021).

Кроме того, экономическая неопределенность и геополитические факторы также могут создавать риски для стабильности рынка и усилий по его расширению^{12,13}.

⁹ Infinium Global Research. (2022). *Российский рынок пищевых капсул: перспективы, анализ тенденций, объём рынка и прогнозы до 2028 года*. <https://www.marketresearch.com/Infinium-Global-Research-v4127/Russia-Food-Encapsulation-Prospects-Trends-33513748>

¹⁰ Bonafide Research. (2025). *Обзор российского рынка пищевых капсулирования, 2028 год*. <https://www.bonafideresearch.com/product/6306297825/russia-food-encapsulation-market>

¹¹ Там же.

¹² Infinium Global Research. (2022). *Российский рынок пищевых капсул*

¹³ Custom Market Insights. (2024). *Мировой рынок микрокапсулирования 2024–2033*. <https://www.custommarketinsights.com/report/microencapsulation-market>

Региональные идеи

Перспективы развития рынка в разных регионах России неодинаковы. В отчете описаны потенциальные возможности роста в развивающихся отраслях, где востребованы решения по инкапсуляции, например, в пищевой промышленности и фармацевтике¹⁴.

Поскольку участники рынка сосредотачивают свои усилия на быстрорастущих регионах, ожидается, что индустрия инкапсуляции адаптируется к региональным потребностям, открывая путь для специализированных предложений и локализованных стратегий¹⁵.

Производители

Крупнейшими производителями капсулированных лекарственных препаратов на сегодняшний день являются фирмы стран «Большой семерки», а также Бельгии, Южной Кореи, Швейцарии, Мексик¹⁶.

На российском рынке капсульной продукции можно выделить два направления. Первое связано с производством традиционных твердых и мягких желатиновых капсул для биологически активных добавок и лекарственных средств.

Крупнейшим производителем такого формата является компания «Эвалар» — фармацевтическое предприятие, лидер на российском рынке БАДов, с производственными мощностями в Бийске (Алтайский край).¹⁷ Компания «АРТ Современные научные технологии» (Московская область) также предлагает широкий ассортимент капсулированных продуктов¹⁸, аналогичные решения предлагают Uni-Eco, «МегаФарм Союз» и ряд малых предприятий. Сложившаяся структура рынка отражает общий тренд: лидерство фармацевтики и значительный нереализованный потенциал пищевого сектора.

Второе направление связано с развитием технологий микроинкапсуляции, которые находят применение в пищевой промышленности, фармацевтике и косметологии.

Несмотря на ограниченность открытых статистических данных по России, коммерческие отчеты оценивают рынок микроинкапсуляции в РФ примерно в 98,4 млн долл. США в 2023 г., с прогнозом роста до 180 млн долл. США к 2030 г.¹⁹ Глобальные обзоры также подтверждают устойчивый рост сектора микроинкапсулированных ингредиентов, прогнозируя среднегодовые темпы роста на уровне 8–11 %²⁰.

Это позволяет предположить, что аналогичные тенденции характерны и для российского рынка, где технологии инкапсуляции постепенно интегрируются в производство функциональных продуктов питания и специализированных фармацевтических форм (Polkovnikova et al., 2021).

Помимо применения в фармацевтической и пищевой промышленности, технологии инкапсуляции находят ограниченное использование и в других отраслях. Так, в нефтесервисном секторе инкапсуляция применяется преимущественно для создания технических материалов, например замедлителей (брейкеров) при гидроразрыве пласта и реагентов для повышения нефтеотдачи. В России в этом направлении работает компания ООО «ЭКОНО-ТЕХ» (Нижевартовск), которая с 2016 г. управляет специализированным заводом по производству инкапсуляционных материалов для нужд нефтедобычи. Продукция компании поставляется в разные регионы страны и используется крупными корпорациями, такими как ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Лукойл» и др.²¹ Следует подчеркнуть, что данное направление относится к техническому применению и существенно отличается от пищевой и фармацевтической инкапсуляции по материалам, технологиям и целям, поэтому в рамках статьи оно упоминается лишь как дополнительный пример промышленного использования.

¹⁴ Mordor Intelligence. (2025). *Размер и доля рынка пищевых капсул — тенденции роста и прогнозы (2025–2030)*. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/food-encapsulation-market>

¹⁵ Generis Online. (2024). *Understanding environmental regulations in Russia*. <https://generisonline.com/understanding-environmental-regulations-and-compliance-obligations-in-russia/>

¹⁶ PharmPack. (2010). *Из чего производят желатиновые капсулы*. <https://pharmpack.wordpress.com/2010/07/08/из-чего-производят-желатиновые-капсулы/>

¹⁷ Эвалар. *Собственное производство лекарственных препаратов и средств, БАД в России*. <https://corp.evalar.ru/manufacturing/technologies/>

¹⁸ ART Lab. (2025). *Капсулирование: производство капсул*. <https://artlab-russia.ru/capsules>

¹⁹ Grand View Research. (2023). *Размер и тенденции рынка Микрокапсулирования*. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/microencapsulation-market>

²⁰ MarketsandMarkets. (2024). *Microencapsulation market size, share, and forecast*.

²¹ Investugra. (2020). *Революция в производстве химических реагентов от ООО «ЭКОНО-ТЕХ»*. <https://investugra.ru/media/news/216260/>

Компания Sibur, крупный игрок в нефтехимическом секторе, начала изучать экологически чистые материалы для упаковки, в частности, в соответствии с глобальными тенденциями в области устойчивого развития. Компания активно сотрудничает с крупными брендами для разработки биоразлагаемых вариантов, что отражает переход к экологическим инновациям в производственных процессах²².

Помимо вышеупомянутых компаний, на рынке инкапсулянтов в России работают и другие производители. К ним относятся Dow Corning Corporation, Henkel AG & KGaA и 3M Company, которые известны своими инновационными разработками и значительным присутствием на мировом рынке. Их присутствие на российском рынке подчеркивает конкурентную природу и ориентацию на передовые материалы, предназначенные для различных областей применения, включая электронику и фармацевтику.

По мере развития рынка эти производители всё больше внимания уделяют исследованиям и разработкам, чтобы создавать новые материалы, соответствующие экологическим нормам и требованиям потребителей, и оставаться лидерами в области технологий инкапсуляции в России^{23,24,25}.

ВЫВОДЫ

Анализ развития технологий показал, что инкапсуляция эволюционировала от классических методов коацервации с использованием желатина и гуммиарабика до современных гибридных подходов, сочетающих распылительную сушку, лиофилизацию и липосомальные системы. Такой прогресс обеспечивает более высокий уровень контроля над размерами и свойствами капсул.

Существующие методы целесообразно классифицировать на физико-химические, химические и физические, при этом на практике широко применяются их комбинации. Это отражает переход от изолированных технологий к комплексным решениям, позволяющим адаптировать процесс под конкретные вещества и условия производства.

Применение инкапсуляции в фармацевтике продемонстрировало значимые результаты: повышение биодоступности противоопухолевых препаратов за счет таргетной доставки, разработку пероральных форм инсулина и создание систем доставки вакцин. Эти направления имеют высокую практическую значимость и отражают современный вектор исследований.

В пищевой промышленности технологии микрокапсулирования обеспечивают стабильность витаминов, пробиотиков и ароматических соединений, что напрямую связано с ростом рынка функциональных продуктов питания. Таким образом, инкапсуляция выступает связующим звеном между наукой о питании и потребительскими запросами на продукты с доказанной пользой.

Для России характерно формирование собственного сегмента рынка: активно работают фармацевтические предприятия («Эвалар» и др.) и производители материалов технического назначения. Вместе с тем выявлены проблемы, такие как ограниченность доступных матриц и зависимость от импортных технологий, что требует усиленного внимания к локализации и разработке отечественных решений. Таким образом, ключевой вызов для России — не догоняющая адаптация, а создание собственных конкурентоспособных решений.

Перспективы дальнейшего развития заключаются в использовании экологичных биополимеров, создании многофункциональных и гибридных систем, а также в стандартизации подходов и терминологии. Достижение этих целей возможно при условии расширения экспериментальной базы, систематизации научных данных и тесного взаимодействия исследователей с промышленностью. Именно это позволит интегрировать отечественные наработки в глобальное научно-производственное пространство.

Вместе с тем требуется дальнейшее проведение экспериментальных исследований, углубленный анализ литературных данных и разработка новых методических подходов, что позволит не только совершенствовать существующие системы инкапсуляции, но и формировать инновационные решения для фармацевтической и пищевой отраслей.

²² The Moscow Times. (2019, August 22). *Russian companies slowly embracing recycled plastics*.

<https://www.themoscowtimes.com/2019/08/22/russian-companies-slowly-embracing-recycled-plastics-a66969>

²³ Research and Markets. (2024). *Рынок инкапсулянтов по типу химического вещества... глобальный прогноз на 2025–2030 годы*.

<https://www.researchandmarkets.com/report/encapsulant>

²⁴ Market Data Forecast. (2024). *Рынок Инкапсуляторов*. <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/encapsulants-market>

²⁵ Longda. *Топ-10 компаний по производству гибкой упаковки... в России*.

<https://longdapac.com/top-10-recyclable-flexible-packaging-companies-in-russia/>

ВКЛАД АВТОРОВ

Вейберов А.В.: Создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации

Губанова М.И.: Контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования

Орел П.О.: Осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных/доказательств

Кирш И.А.: Формулирование замысла/идеи исследования, целей и задач

Банникова О.А.: Разработка или проектирование методологии исследования; создание моделей

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Anatoliy V. Veiberov: Preparation, creation and/or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision — including pre- or post-publication stages

Marina I. Gubanova: Oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team

Polina O. Orel: Conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection

Irina A. Kirsh: Ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims

Olga A. Bannikova: Development or design of methodology; creation of models

ЛИТЕРАТУРА

- Адиканова, Д. К. (2016). Получение полимерных суспензий различного целевого назначения методом гетерофазной полимеризации. [Автореферат диссертации кандидата химических наук, КазННТУ им. К. И. Сатпаева]. Алматы
- Астафьева, Б. В., Бабинцев, К. А., Курбонова, М. К., Тютков Н., & Бараненко Д. А. (2022). Исследование термостабильности функционального пробиотического пищевого ингредиента на основе инкапсулированных микроорганизмов *Lactobacillus plantarum* SP-A3. Вестник Международной академии холода, (2), 42–47. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2022-21-2-42-47>
- Базарнова, Ю. Г. (2014). Технология инкапсулирования пищевых ингредиентов. Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности, (S1), 61–63
- Базарнова, Ю. Г., & Москалев, Е. В. (2010). Инкапсулирование композитов натуральных пищевых ингредиентов. Мясная индустрия, (5), 52–56
- Бородина, Т. Н. (2008). Получение и исследование биodeградируемых полиэлектролитных микрокапсул с контролируемым выходом белков, ДНК и других биоактивных соединений [Автореферат диссертации кандидата химических наук, МГУ им. М.В. Ломоносова]. Москва
- Быковская, Е. Е., & Кролевец, А. А. (2012). Применение технологии инкапсулирования в различных отраслях промышленности. Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Физика и химия, (2), 137–140
- Дружинина, Л. С., Евтеев, А. В., Ларионова, О. С., Банникова, А. В., & Евдокимов, И. А. (2017). Получение функциональных ингредиентов с применением принципа инкапсулирования для сохранения нативной структуры биологически активных белков. Молочнохозяйственный вестник, 2 (26), 100–109. <https://doi.org/10.24411/2225-4269-2017-00011>
- Жантлесова, С. (2021). Иммунизация клеток пробиотических микроорганизмов для разработки функциональных продуктов питания. Международный научно-исследовательский журнал, 3(105)
- Ильина, В. С., Соколова, О. Б., Шуватова, Е. Д., Аллох, П., Мельчаков, Р. М., Лепешкин, А. И., Александрова, И. В., & Бараненко, Д. А. (2023). Способ микроинкапсулирования масел, содержащих полиненасыщенные жирные кислоты, для использования в составе функциональных пищевых продуктов. Ползуновский вестник, (2), 7–14. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.001>
- Какимов, А. К., Бепеева, А. Е., Какимова, Ж. Х., & Хуторянский, В. В. (2016). Обоснование необходимости инкапсулирования пробиотиков. Вестник Алматинского технологического университета, (2), 86–89

- Кролевец, А. А., Тырсин, Ю. А., & Быковская, Е. Е. (2013). Применение нано и микрокапсулирования в фармацевтике и пищевой промышленности. Часть 2. Характеристика инкапсулирования. *Вестник РАЕН*, 13(1), 77–84
- Меньшутина, Н. В. (2014). Технологии инкапсуляции. *Фармацевтические технологии и упаковка*, (5), 30–33
- Семкина О. А., Джавахян М. А., Белошапкина О. М., Громакова А. Н. (2021). Технологические аспекты получения микрокапсул веществ растительного происхождения. *Проблемы биологической, медицинской и фармацевтической химии*, 24(5), 5–14. <https://doi.org/10.29296/25877313-2021-05-01>
- Соколов, А. В., Лимарева, Л. В., Ильясов, П. В. [и др.] (2021). Методы инкапсулирования биомакромолекул и живых клеток. *Журнал органической химии*, 57(4), 457–473. <https://doi.org/10.31857/S0514749221040017>
- Степанова Э.Ф., Ким М.Е., Мурзагулова К.Б., Евсеева С.Б. (2014). Микрокапсулы: перспективы использования в современной фармацевтической практике. *Современные проблемы науки и образования*, 5, 767
- Цепелев, В. Ю., Лазарева, И. А., & Яковлева, Д. Р. (2023). Современные способы доставки антибактериальных средств. *Вестник фармации*, 4(102), 54–60. <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2023.4.54>
- Anal, A. K., & Singh, H. (2007). Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery. *Trends in Food Science & Technology*, 18(5), 240–251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.01.004>
- Augustin, M. A., & Hemar, Y. (2009). Nano- and micro-structured assemblies for encapsulation of food ingredients. *Chemical Society Reviews*, 38(4), 902–912. <https://doi.org/10.1039/B801739P>
- Augustin, M. A., & Sanguansri, L. (2015). Challenges and solutions to incorporation of nutraceuticals in foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 6(1), 463–477. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022814-015507>
- Balagani, P. K., Chandiran, I., Bhavya, B., & Manubolu, S. (2011). Microparticulate drug delivery system: A review. *Indian Journal of Pharmaceutical Science and Research*, 1, 19–37
- Benita, S. (Ed.). (2006). Microencapsulation: Methods and industrial applications. *CRC Press*
- Boh Podgornik, B., & Šumiga, B. (2008). Microencapsulation technology and its applications in building construction materials. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 55, 329–344
- Calderón-Oliver, M., & Ponce-Alquicira, E. (2022). The role of microencapsulation in food application. *Molecules*, 27(5), 1499. <https://doi.org/10.3390/molecules27051499>
- Campos, E. V. R., de Oliveira, J. L., Fraccio, L. F., & Singh, B. (2015). Polysaccharides as safer release systems for agrochemicals. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 47–66. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0263-0>
- Carvalho, A. G. S., Silva, M. P., & Hubinger, M. D. (2023). Microencapsulation of plant extracts with antimicrobial properties for food preservation applications. *Food Research International*, 173, 113289. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113289>
- Chaudhary, V., Thakur, N., Kajla, P., Thakur, S., & Punia, S. (2021). Application of encapsulation technology in edible films: Carrier of bioactive compounds. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 734921. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.734921>
- Cui, F., Zhang, H., Wang, D., Tan, X., Li, X., Li, Y., Li, J., & Li, T. (2023). Advances in the preparation and application of microencapsulation to protect food functional ingredients. *Food & Function*, 14(15), 6766–6783. <https://doi.org/10.1039/d3fo01077e>
- Danhier, F. (2016). To exploit the tumor microenvironment: Since the EPR effect fails in the clinic, what is the future of nanomedicine? *Journal of Controlled Release*, 244, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.11.015>
- De Temmerman, M.-L., Rejman, J., Vandenbroucke, R. E., De Cock, L. J., Demeester, J., & De Smedt, S. C. (2011). Particulate vaccines: On the quest for optimal delivery and immune response. *Drug Discovery Today*, 16(13-14), 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2011.04.006>
- Dehghani, F., & Farhadian, N. (2023). Encapsulation: Fluidized bed coating technology. *Principles of Biomaterials Encapsulation : Volume One*, 143–156. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85947-9.00012-1>
- English, M., Okagu, O. D., Stephens, K., Goertzen, A., & Udenigwe, C. C. (2023). Flavour encapsulation: A comparative analysis of relevant techniques, physiochemical characterisation, stability, and food applications. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1019211. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1019211>
- Fonte, P., Araújo, F., Reis, S., & Sarmento, B. (2013). Oral insulin delivery: How far are we? *Journal of Diabetes Science and Technology*, 7(2), 520–531. <https://doi.org/10.1177/193229681300700228>
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voille, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9), 1107–1121. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>

- Ghorbanzade, T., Jafari, S. M., & Akhavan, S., & Hadavi, R. (2017). Nano-encapsulation of fish oil in nano-liposomes and its application in fortification of yogurt. *Food Chemistry*, 216, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.022>
- Gibbs, B. F., Kermasha, S., Alli, I., & Mulligan, C. N. (1999). Encapsulation in the food industry: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 50(3), 213–224. <https://doi.org/10.1080/096374899101256>
- Gómez-Gaete, C., Avendaño-Godoy, J., Escobar-Avello, D., Campos-Requena, V. H., Rogel-Castillo, C., Estevinho, L. M., Martorell, M., Sharifi-Rad, J., & Calina, D. (2024). Revolutionizing fruit juice: exploring encapsulation techniques for bioactive compounds and their impact on nutrition, flavour and shelf life. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00190-9>
- Gonçalves, A., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2016). Microencapsulation of vitamin A: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.001>
- Hu, S., Xu, C., Zhang, Y., Du, Y., Tang, J., & Chen, L. (2024). Preparation of enteric capsules with pulsatile drug delivery potential using pullulan and polyacrylic acid resin III. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(4), 105691. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105691>
- Hurrell, R. F. (2002). Fortification: overcoming technical and practical barriers. *The Journal of Nutrition*, 132(4), 806–812. <https://doi.org/10.1093/jn/132.4.806S>
- Jackson, L. S., & Lee, K. (1991). Microencapsulation and the food industry. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 24(4), 289–297
- Jafari, S. M. (Ed.). (2017). Nanoencapsulation technologies for the food and nutraceutical industries. Academic Press
- Jafari, S. M., & McClements, D. J. (2017). Nanotechnology approaches for increasing nutrient bioavailability. In *Advances in Food and Nutrition Research*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2016.12.008>
- Kaushik, P., Dowling, K., Barrow, C. J., & Adhikari, B. (2015). Microencapsulation of omega-3 fatty acids: A review of microencapsulation and characterization methods. *Journal of Functional Foods*, 19, 868–881. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.06.029>
- Krasaekoopt, W., Bhandari, B., & Deeth, H. (2003). Evaluation of encapsulation techniques of probiotics for yoghurt. *International Dairy Journal*, 13(1), 3–13. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(02\)00155-3](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(02)00155-3)
- Laina, K. T., Drosou, C., Frakolaki, G., & Krokida, M. (2025). Advancing probiotic delivery in functional yogurt: Encapsulation in electrohydrodynamic processing and freeze drying. (2025). *Foods*, 14(8), 1423. <https://doi.org/10.3390/foods14081423>
- Lak, S. N., Ahmed, S., Shamberger, P. J., & Pentzer, E. B. (2022). Encapsulation of hygroscopic liquids via polymer precipitation in non-aqueous emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 628, 605–613. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.08.083>
- Levi, S., Rac, V., Manojlovi, V., Raki, V., Bugarski, B., Flock, T., Krzyczmonik, K. E., & Nedovi, V. (2011). Limonene encapsulation in alginate/poly (vinyl alcohol). *Procedia Food Science*, 1, 1816–1820. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.266>
- Li, Y., Zhang, X., Zhao, Y., Ding, J., & Lin, S. (2018). Investigation on complex coacervation between fish skin gelatin from cold-water fish and gum arabic: Phase behavior, thermodynamic, and structural properties. *Food Research International*, 107, 596–604. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.053>
- Liu, Y., Bhattarai, P., Dai, Z., & Chen, X. (2022). Photothermal therapy and photoacoustic imaging via nanotheranostics in fighting cancer. *Chemical Society Reviews*, 48(7), 2053–2108. <https://doi.org/10.1039/c8cs00618k>
- Malheiros, P. S., Daroit, D. J., & Brandelli, A. (2010). Food applications of liposome-encapsulated antimicrobial peptides. *Trends in Food Science & Technology*, 21(6), 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.03.003>
- Malos, I. G., Pasarin, D., Ghizdareanu, A., & Frunzareanu, B. (2025). A promising approach for the food industry: Enhancing probiotic viability through microencapsulated synbiotics. *Microorganisms*, 13(2), 336. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13020336>
- McClements, D. J. (2015). Nanoscale nutrient delivery systems for food applications: Improving bioactive dispersibility, stability, and bioavailability. *Journal of Food Science*, 80(7), 1602–1611. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12919>
- McClements, D. J., & Xiao, H. (2014). Excipient foods: Designing food matrices that improve the oral bioavailability of pharmaceuticals and nutraceuticals. *Food & Function*, 5(7), 1320–1333. <https://doi.org/10.1039/C4FO00100A>
- Metwaly, A. M., Ghoneim, M. M., Eissa, I. H., Elsehemy, I. A., Mostafa, A. E., Hegazy, M. M., Afifi, W. M., & Dou, D. (2021). Traditional ancient Egyptian medicine: A review. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(10), 5823–5832. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.044>

- Mozafari, M. R., Johnson, C., Hatziantoniou, S., & Demetzos, C. (2008). Nanoliposomes and their applications in food nanotechnology. *Journal of liposome research*, 18(4), 309–327. <https://doi.org/10.1080/08982100802465941>
- Naharros-Molinero, A., Caballo-González, M. Á., de la Mata, F. J., & García-Gallego, S. (2023). Shell formulation in soft gelatin capsules: Design and Characterization. *Advanced Healthcare Materials*, 13(1). <https://doi.org/10.1002/adhm.202302250>
- O'Hagan, D. T., & Rappuoli, R. (2004). Novel approaches to vaccine delivery. *Pharmaceutical Research*, 21(9), 1519–1530. <https://doi.org/10.1023/B:PHAM.0000041443.17935.33>
- Oral, M. O., Derossi, A., Caporizzi, R., & Severini, C. (2021). Analyzing the most promising innovations in food printing. Programmable food texture and 4D foods. *Future Foods*, 4, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100093>
- Polkovnikova, Yu. A., & Kovaleva, N. A. (2021). Modern Research in the Field of Microencapsulation (Review). *Drug Development. Registration*, 10(2), 50–61. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-2-50-61>
- Putney, S. D., & Burke, P. A. (1998). Improving protein therapeutics with sustained-release formulations. *Nature Biotechnology*, 16(2), 153–157. <https://doi.org/10.1038/nbt0298-153>
- Qiao, H., Hu, N., & Bai, J. (2016). Encapsulation of nucleic acids into giant unilamellar vesicles by freeze-thaw: a way protocells may form. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 47(4), 499–510. <https://doi.org/10.1007/s11084-016-9527-9>
- Ramezani Kalmer, R., Karimi, A., Ramezanalizadeh, H., Ghanbari, M., Samandarian, D., Sadjadinia, A., & Moosavi, B. S. (2024). Design and preparation of a novel pullulan hard capsule formulation: A promising green candidate and study of crucial capsule features. *Heliyon*, 10(7), e28969. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28969>
- Ramezani Kalmer, R., Mohammadi Haddadan, M., Azizi, M., Ghanbari, M., Samandarian, D., & Golizadeh, M. (2023). Industrial manufacture of enteric hard capsules using novel formulations based on hypromellose phthalate/gelatin and investigation of pantoprazole release. *ACS Omega*, 8(12), 11293–11303. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08290>
- Ribeiro, A. M., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2021). Improvement of vitamin E microencapsulation and release using different biopolymers as encapsulating agents. *Food and Bioproducts Processing*, 130, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.08.008>
- Sethunga, M., Rangani, S. C., Munaweera, I., & Ranaweera, K. K. D. S. (2025). Hybrid nanoencapsulation systems: integrating natural polymers with synthetic nanomaterials for enhanced delivery of bioactive compounds in functional foods. *Nanoscale Advances*, 7(24), 7867–7890. <https://doi.org/10.1039/d5na00751h>
- Sharif, N., Khoshnoudi-Nia, S., & Jafari, S. M. (2020). Nano/microencapsulation of anthocyanins; a systematic review and meta-analysis. *Food Research International*, 132, 109077. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109077>
- Sharma, G. S., Manasagoud, L., Gayathri, P., Zainab Fatima, & Rama Rao, T. (2023). A review on HPMC capsule. *International Journal of Biology Pharmacy and Allied Sciences*, 12, 5137–5153. <https://doi.org/10.31032/ijbpas/2023/12.11.7558>
- Solodova, E., Solovova, N., & Kalmykova, D. (2021). Innovative Industry Development In The Russian Federation. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*, 1978–1985. <https://doi.org/10.15405/epsbs.2021.09.02.222>
- Sun, Q., Yin, S., He, Y., Cao, Y., & Jiang, C. (2023). Biomaterials and Encapsulation Techniques for Probiotics: Current Status and Future Prospects in Biomedical Applications. *Nanomaterials*, 13(15), 2185. <https://doi.org/10.3390/nano13152185>
- Tressa, A., Singh, A., Pal, R., & Kumar, N. (2025). Novel Nanocarriers Microencapsulation: Current, Patents and Clinical Trials Comprehensive Review. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 15(4), 188–208. <https://doi.org/10.22270/jddt.v15i4.7103>
- Tripathy, S., Verma, D. K., Thakur, M., Patel, A. R., Srivastav, P. P., Singh, S., Chávez-González, M. L., & Aguilar, C. N. (2021). Encapsulated food products as a strategy to strengthen immunity against COVID-19. *Frontiers in Nutrition*, 8, 673174. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.673174>
- Yan, C., Kim, S.-R., Ruiz, D. R., & Farmer, J. R. (2022). Microencapsulation for food applications: A review. *ACS Applied Bio Materials*, 5(12), 5497–5512. <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00673>
- Yang, X., Liang, Y., Li, K., Hu, Q., He, J., & Xie, J. (2025). Advances in microencapsulation of flavor substances: Preparation techniques, wall material selection, characterization methods, and applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c11399>

- Zhuravlev, R. A., Tamova, M. Yu., Bugayets, N. A., Poznyakovskiy, V. M., & Penov, N. D. (2017). Innovative encapsulation technology of food systems using a by-product of dairy production. *Foods and Raw Materials*, 5(1), 81–89. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-81-89>
- Zuidam, N. J., & Nedovic, V. (Eds.). (2010). *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1008-0>

REFERENCES

- Adikanova, D. K. (2016). Preparation of polymer suspensions for various purposes by heterogeneous polymerization. [Abstract of a PhD thesis in Chemical Sciences, Satbayev University]. Almaty.
- Anal, A. K., & Singh, H. (2007). Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery. *Trends in Food Science & Technology*, 18(5), 240–251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.01.004>
- Astafyeva, B. V., Babintsev, K. A., Kurbonova, M. K., Tyutkov, N., & Baranenko, D. A. (2022). Study of thermal stability of a functional probiotic food ingredient based on encapsulated microorganisms *Lactobacillus plantarum* SP-A3. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, (2), 42–47. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2022-21-2-42-47>
- Augustin, M. A., & Hemar, Y. (2009). Nano- and micro-structured assemblies for encapsulation of food ingredients. *Chemical Society Reviews*, 38(4), 902–912. <https://doi.org/10.1039/B801739P>
- Augustin, M. A., & Sanguansri, L. (2015). Challenges and solutions to incorporation of nutraceuticals in foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 6(1), 463–477. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022814-015507>
- Balagani, P. K., Chandiran, I., Bhavya, B., & Manubolu, S. (2011). Microparticulate drug delivery system: A review. *Indian Journal of Pharmaceutical Science and Research*, 1, 19–37
- Bazarnova, Yu. G. (2014). Technology of food ingredient encapsulation. *Problems of Economics and Management in Trade and Industry*, (S1), 61–63
- Bazarnova, Yu. G., & Moskalev, E. V. (2010). Encapsulation of natural food ingredient composites. *Meat Industry*, (5), 52–56
- Benita, S. (Ed.). (2006). *Microencapsulation: Methods and industrial applications*. CRC Press
- Boh Podgornik, B., & Šumiga, B. (2008). Microencapsulation technology and its applications in building construction materials. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 55, 329–344
- Borodina, T. N. (2008). Preparation and study of biodegradable polyelectrolyte microcapsules with controlled release of proteins, DNA, and other bioactive compounds [Abstract of a PhD thesis in Chemical Sciences, Lomonosov Moscow State University]. Moscow
- Bykovskaya, E. E., & Krolevec, A. A. (2012). Application of encapsulation technology in various industries. Proceedings of the South-West State University. *Series: Physics and Chemistry*, (2), 137–140
- Calderón-Oliver, M., & Ponce-Alquicira, E. (2022). The role of microencapsulation in food application. *Molecules*, 27(5), 1499. <https://doi.org/10.3390/molecules27051499>
- Campos, E. V. R., de Oliveira, J. L., Fraccio, L. F., & Singh, B. (2015). Polysaccharides as safer release systems for agrochemicals. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 47–66. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0263-0>
- Carvalho, A. G. S., Silva, M. P., & Hubinger, M. D. (2023). Microencapsulation of plant extracts with antimicrobial properties for food preservation applications. *Food Research International*, 173, 113289. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113289>
- Chaudhary, V., Thakur, N., Kajla, P., Thakur, S., & Punia, S. (2021). Application of encapsulation technology in edible films: Carrier of bioactive compounds. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 734921. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.734921>
- Cui, F., Zhang, H., Wang, D., Tan, X., Li, X., Li, Y., Li, J., & Li, T. (2023). Advances in the preparation and application of microencapsulation to protect food functional ingredients. *Food & Function*, 14(15), 6766–6783. <https://doi.org/10.1039/d3fo01077e>
- Danhier, F. (2016). To exploit the tumor microenvironment: Since the EPR effect fails in the clinic, what is the future of nanomedicine? *Journal of Controlled Release*, 244, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.11.015>

- De Temmerman, M.-L., Rejman, J., Vandenbroucke, R. E., De Cock, L. J., Demeester, J., & De Smedt, S. C. (2011). Particulate vaccines: On the quest for optimal delivery and immune response. *Drug Discovery Today*, 16(13-14), 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2011.04.006>
- Dehghani, F., & Farhadian, N. (2023). Encapsulation: Fluidized bed coating technology. *Principles of Biomaterials Encapsulation : Volume One*, 143–156. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85947-9.00012-1>
- Druzhinina, L. S., Evteev, A. V., Larionova, O. S., Bannikova, A. V., & Evdokimov, I. A. (2017). Production of functional ingredients using encapsulation principles to preserve the native structure of biologically active proteins. *Dairy Industry Bulletin*, 2 (26), 100–109. <https://doi.org/10.24411/2225-4269-2017-00011>
- English, M., Okagu, O. D., Stephens, K., Goertzen, A., & Udenigwe, C. C. (2023). Flavour encapsulation: A comparative analysis of relevant techniques, physiochemical characterisation, stability, and food applications. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1019211. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1019211>
- Fonte, P., Araújo, F., Reis, S., & Sarmento, B. (2013). Oral insulin delivery: How far are we? *Journal of Diabetes Science and Technology*, 7(2), 520–531. <https://doi.org/10.1177/193229681300700228>
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9), 1107–1121. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>
- Ghorbanzade, T., Jafari, S. M., & Akhavan, S., & Hadavi, R. (2017). Nano-encapsulation of fish oil in nano-liposomes and its application in fortification of yogurt. *Food Chemistry*, 216, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.022>
- Gibbs, B. F., Kermasha, S., Alli, I., & Mulligan, C. N. (1999). Encapsulation in the food industry: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 50(3), 213–224. <https://doi.org/10.1080/096374899101256>
- Gómez-Gaete, C., Avendaño-Godoy, J., Escobar-Avello, D., Campos-Requena, V. H., Rogel-Castillo, C., Estevinho, L. M., Martorell, M., Sharifi-Rad, J., & Calina, D. (2024). Revolutionizing fruit juice: exploring encapsulation techniques for bioactive compounds and their impact on nutrition, flavour and shelf life. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00190-9>
- Gonçalves, A., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2016). Microencapsulation of vitamin A: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.001>
- Hu, S., Xu, C., Zhang, Y., Du, Y., Tang, J., & Chen, L. (2024). Preparation of enteric capsules with pulsatile drug delivery potential using pullulan and polyacrylic acid resin III. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(4), 105691. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105691>
- Hurrell, R. F. (2002). Fortification: overcoming technical and practical barriers. *The Journal of Nutrition*, 132(4), 806–812. <https://doi.org/10.1093/jn/132.4.806S>
- Ilyina, V. S., Sokolova, O. B., Shuvalova, E. D., Allokh, P., Melchakov, R. M., Lepeshkin, A. I., Alexandrova, I. V., & Baranenko, D. A. (2023). Method for microencapsulation of oils containing polyunsaturated fatty acids for use in functional foods. *Polzunovskiy Vestnik*, (2), 7–14. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.001>
- Jackson, L. S., & Lee, K. (1991). Microencapsulation and the food industry. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 24(4), 289–297
- Jafari, S. M. (Ed.). (2017). Nanoencapsulation technologies for the food and nutraceutical industries. Academic Press
- Jafari, S. M., & McClements, D. J. (2017). Nanotechnology approaches for increasing nutrient bioavailability. In *Advances in Food and Nutrition Research*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2016.12.008>
- Kakimov, A. K., Bepeeva, A. E., Kakimova, Zh. Kh., & Khutoryansky, V. V. (2016). Justification of the need for probiotic encapsulation. *Bulletin of the Almaty Technological University*, (2), 86–89
- Kaushik, P., Dowling, K., Barrow, C. J., & Adhikari, B. (2015). Microencapsulation of omega-3 fatty acids: A review of microencapsulation and characterization methods. *Journal of Functional Foods*, 19, 868–881. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.06.029>
- Krasaekoopt, W., Bhandari, B., & Deeth, H. (2003). Evaluation of encapsulation techniques of probiotics for yogurt. *International Dairy Journal*, 13(1), 3–13. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(02\)00155-3](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(02)00155-3)
- Krolevec, A. A., Tyrsin, Yu. A., & Bykovskaya, E. E. (2013). Application of nano- and microencapsulation in pharmaceuticals and the food industry. Part 2. *Characteristics of encapsulation*. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*, 13(1), 77–84

- Laina, K. T., Drosou, C., Frakolaki, G., & Krokida, M. (2025). Advancing probiotic delivery in functional yogurt: Encapsulation in electrohydrodynamic processing and freeze drying. (2025). *Foods*, 14(8), 1423. <https://doi.org/10.3390/foods14081423>
- Lak, S. N., Ahmed, S., Shamberger, P. J., & Pentzer, E. B. (2022). Encapsulation of hygroscopic liquids via polymer precipitation in non-aqueous emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 628, 605–613. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.08.083>
- Levi, S., Rac, V., Manojlovi, V., Raki, V., Bugarski, B., Flock, T., Krzyczmonik, K. E., & Nedovi, V. (2011). Limonene encapsulation in alginate/poly (vinyl alcohol). *Procedia Food Science*, 1, 1816–1820. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.266>
- Li, Y., Zhang, X., Zhao, Y., Ding, J., & Lin, S. (2018). Investigation on complex coacervation between fish skin gelatin from cold-water fish and gum arabic: Phase behavior, thermodynamic, and structural properties. *Food Research International*, 107, 596–604. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.053>
- Liu, Y., Bhattarai, P., Dai, Z., & Chen, X. (2022). Photothermal therapy and photoacoustic imaging via nanotheranostics in fighting cancer. *Chemical Society Reviews*, 48(7), 2053–2108. <https://doi.org/10.1039/c8cs00618k>
- Malheiros, P. S., Daroit, D. J., & Brandelli, A. (2010). Food applications of liposome-encapsulated antimicrobial peptides. *Trends in Food Science & Technology*, 21(6), 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.03.003>
- Malos, I. G., Pasarin, D., Ghizdareanu, A., & Frunzareanu, B. (2025). A promising approach for the food industry: Enhancing probiotic viability through microencapsulated synbiotics. *Microorganisms*, 13(2), 336. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13020336>
- McClements, D. J. (2015). Nanoscale nutrient delivery systems for food applications: Improving bioactive dispersibility, stability, and bioavailability. *Journal of Food Science*, 80(7), 1602–1611. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12919>
- McClements, D. J., & Xiao, H. (2014). Excipient foods: Designing food matrices that improve the oral bioavailability of pharmaceuticals and nutraceuticals. *Food & Function*, 5(7), 1320–1333. <https://doi.org/10.1039/C4FO00100A>
- Menshutina, N. V. (2014). Encapsulation technologies. *Pharmaceutical Technologies & Packaging*, (5), 30–33
- Metwaly, A. M., Ghoneim, M. M., Eissa, I. H., Elsehemy, I. A., Mostafa, A. E., Hegazy, M. M., Afifi, W. M., & Dou, D. (2021). Traditional ancient Egyptian medicine: A review. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(10), 5823–5832. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.044>
- Mozafari, M. R., Johnson, C., Hatziantoniou, S., & Demetzos, C. (2008). Nanoliposomes and their applications in food nanotechnology. *Journal of liposome research*, 18(4), 309–327. <https://doi.org/10.1080/08982100802465941>
- Naharros-Molinero, A., Caballo-González, M. Á., de la Mata, F. J., & García-Gallego, S. (2023). Shell formulation in soft gelatin capsules: Design and Characterization. *Advanced Healthcare Materials*, 13(1). <https://doi.org/10.1002/adhm.202302250>
- O'Hagan, D. T., & Rappuoli, R. (2004). Novel approaches to vaccine delivery. *Pharmaceutical Research*, 21(9), 1519–1530. <https://doi.org/10.1023/B:PHAM.0000041443.17935.33>
- Oral, M. O., Derossi, A., Caporizzi, R., & Severini, C. (2021). Analyzing the most promising innovations in food printing. Programmable food texture and 4D foods. *Future Foods*, 4, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100093>
- Polkovnikova, Yu. A., & Kovaleva, N. A. (2021). Modern Research in the Field of Microencapsulation (Review). *Drug Development. Registration*, 10(2), 50–61. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-2-50-61>
- Putney, S. D., & Burke, P. A. (1998). Improving protein therapeutics with sustained-release formulations. *Nature Biotechnology*, 16(2), 153–157. <https://doi.org/10.1038/nbt0298-153>
- Qiao, H., Hu, N., & Bai, J. (2016). Encapsulation of nucleic acids into giant unilamellar vesicles by freeze-thaw: a way protocells may form. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 47(4), 499–510. <https://doi.org/10.1007/s11084-016-9527-9>
- Ramezani Kalmer, R., Karimi, A., Ramezanalizadeh, H., Ghanbari, M., Samandarian, D., Sadjadinia, A., & Moosavi, B. S. (2024). Design and preparation of a novel pullulan hard capsule formulation: A promising green candidate and study of crucial capsule features. *Heliyon*, 10(7), e28969. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28969>
- Ramezani Kalmer, R., Mohammadi Haddadan, M., Azizi, M., Ghanbari, M., Samandarian, D., & Golizadeh, M. (2023). Industrial manufacture of enteric hard capsules using novel formulations based on hypromellose phthalate/gelatin and investigation of pantoprazole release. *ACS Omega*, 8(12), 11293–11303. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08290>
- Ribeiro, A. M., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2021). Improvement of vitamin E microencapsulation and release using different biopolymers as encapsulating agents. *Food and Bioproducts Processing*, 130, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.08.008>

- Semkina, O. A., Dzhevakhyan, M. A., Beloshapkina, O. M., Gromakova, A. N. (2021). Technological aspects of obtaining microcapsules of plant origin substances. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 24(5), 5–14. <https://doi.org/10.29296/25877313-2021-05-01>
- Sethunga, M., Rangani, S. C., Munaweera, I., & Ranaweera, K. K. D. S. (2025). Hybrid nanoencapsulation systems: integrating natural polymers with synthetic nanomaterials for enhanced delivery of bioactive compounds in functional foods. *Nanoscale Advances*, 7(24), 7867–7890. <https://doi.org/10.1039/d5na00751h>
- Sharif, N., Khoshnoudi-Nia, S., & Jafari, S. M. (2020). Nano/microencapsulation of anthocyanins; a systematic review and meta-analysis. *Food Research International*, 132, 109077, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109077>
- Sharma, G. S., Manasagoud, L., Gayathri, P., Zainab Fatima, & Rama Rao, T. (2023). A review on HPMC capsule. *International Journal of Biology Pharmacy and Allied Sciences*, 12, 5137–5153. <https://doi.org/10.31032/ijbpas/2023/12.11.7558>
- Sokolov, A. V., Limareva, L. V., Ilyasov, P. V. [et al.] (2021). Methods of encapsulating biomacromolecules and living cells. *Journal of Organic Chemistry*, 57(4), 457–473. <https://doi.org/10.31857/S0514749221040017>
- Solodova, E., Solovova, N., & Kalmykova, D. (2021). Innovative Industry Development In The Russian Federation. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*, 1978–1985. <https://doi.org/10.15405/epsbs.2021.09.02.222>
- Stepanova, E. F., Kim, M. E., Murzagulova, K. B., Evseeva, S. B. (2014). Microcapsules: prospects for use in modern pharmaceutical practice. *Modern Problems of Science and Education*, 5, 767
- Sun, Q., Yin, S., He, Y., Cao, Y., & Jiang, C. (2023). Biomaterials and Encapsulation Techniques for Probiotics: Current Status and Future Prospects in Biomedical Applications. *Nanomaterials*, 13(15), 2185. <https://doi.org/10.3390/nano13152185>
- Tressa, A., Singh, A., Pal, R., & Kumar, N. (2025). Novel Nanocarriers Microencapsulation: Current, Patents and Clinical Trials Comprehensive Review. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 15(4), 188–208. <https://doi.org/10.22270/jddt.v15i4.7103>
- Tripathy, S., Verma, D. K., Thakur, M., Patel, A. R., Srivastav, P. P., Singh, S., Chávez-González, M. L., & Aguilar, C. N. (2021). Encapsulated food products as a strategy to strengthen immunity against COVID-19. *Frontiers in Nutrition*, 8, 673174. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.673174>
- Tsepelev, V. Yu., Lazareva, I. A., & Yakovleva, D. R. (2023). Modern methods of antibacterial agent delivery. *Bulletin of Pharmacy*, 4(102), 54–60. <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2023.4.54>
- Yan, C., Kim, S.-R., Ruiz, D. R., & Farmer, J. R. (2022). Microencapsulation for food applications: A review. *ACS Applied Bio Materials*, 5(12), 5497–5512. <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00673>
- Yang, X., Liang, Y., Li, K., Hu, Q., He, J., & Xie, J. (2025). Advances in microencapsulation of flavor substances: Preparation techniques, wall material selection, characterization methods, and applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c11399>
- Zhanlesova, S. (2021). Immobilization of probiotic microorganisms cells for the development of functional foods. *International Research Journal*, 3(105).
- Zhuravlev, R. A., Tamova, M. Yu., Bugayets, N. A., Poznyakovskiy, V. M., & Penov, N. D. (2017). Innovative encapsulation technology of food systems using a by-product of dairy production. *Foods and Raw Materials*, 5(1), 81–89. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-81-89>
- Zuidam, N. J., & Nedovic, V. (Eds.). (2010). *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1008-0>