

Гелевые комплексы: принципы создания, материалы и технологии для инкапсулирования антоцианов (Обзор предметного поля)

Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Российская Федерация

Н.В. Неповинных

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Наталья Владимировна Неповинных
E-mail: nnevinnykh@yandex.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Неповинных, Н.В. (2025). Гелевые комплексы: принципы создания, материалы и технологии для инкапсулирования антоцианов (Обзор предметного поля). *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(3), 134-164. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.3.645>

ПОСТУПИЛА: 13.05.2025

ПРИНЯТА: 15.09.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.09.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Поисково-аналитическое исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-26-00108).



АННОТАЦИЯ

Введение: Пищевой гелевый комплекс можно определить, как сферическую сложную трехмерную коллоидную систему, в которой активные вещества (функциональные пищевые ингредиенты) могут быть диспергированы или заключены в ядро, окруженное непрерывной защитной оболочкой. Функциональные пищевые ингредиенты эффективно инкапсулируются и используются для контролируемой пероральной доставки с помощью гелевых комплексов на основе биополимеров.

Цель: Проанализировать отечественные и зарубежные исследования, описывающие принципы изготовления, материалы, характеристики и практическое применение гелевых комплексов для инкапсулирования функциональных пищевых ингредиентов (на примере инкапсулирования антоцианов) для определения перспективных направлений дальнейших исследований.

Материалы и методы. При составлении обзора предметного поля были изучены российские и зарубежные научные публикации, посвященные принципам изготовления, материалам, характеристике и практическому применению гелевых комплексов для создания инкапсулированных форм антоцианов, опубликованные в период с 2001 по 2025 г. Систематический поиск научной литературы был проведен по базам данных РИНЦ, PubMed, Science Direct и в системах Google Scholar.

Результаты: Выявлено, что наиболее популярными инкапсуляторами антоцианов являются такие гидроколлоиды, как мальтодекстрин, сывороточный протеин, изолят соевого белка, а также в последнее время у исследователей наблюдается тенденция к использованию комбинаций биополимеров взамен отдельных полимеров из-за их более высокой эффективности инкапсуляции и более низкой стоимости. Для инкапсулирования биоактивных соединений в гелевые комплексы используются различные способы, учитывающие природу готовых комплексов, их назначение, природу основного материала, место высвобождения, размер частиц и т. д. Показано, что при разработке гелевых комплексов необходимо учитывать основные принципы изготовления: состав гелевых комплексов, механизмы высвобождения, структуру и размер, биосовместимость и стабильность.

Выводы: Анализ публикаций отечественных и зарубежных исследователей, посвященных принципам изготовления, материалам, характеристике и практическому применению гелевых комплексов для инкапсулирования функциональных пищевых ингредиентов (на примере инкапсулирования антоцианов), показал актуальность проведения подобных исследований. Дальнейшие исследования в области более эффективных производственных процессов должны быть направлены на разработку новых подходов к стабилизации натуральных растительных пигментов с помощью гелевых комплексов для расширения их применения в пищевой промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

гель; пищевые гидроколлоиды; инкапсулирование; биологически активные вещества; физиологически функциональные ингредиенты; антоцианы

Gel Complexes: Principles of Creation, Materials and Technologies for Encapsulating Functional Food Ingredients (A Scoping Review)

Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russian Federation

Nataliia V. Nepovinnykh

CORRESPONDENCE:

Nataliia V. Nepovinnykh

E-mail: nnepovinnykh@yandex.ru

FOR CITATIONS:

Nepovinnykh, N.V. (2025). Gel complexes: Principles of creation, materials and technologies for encapsulating functional food ingredients (A scoping review). *Storage and Processing of Farm Products*, 33(3), 134-164. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.3.645>

RECEIVED: 13.05.2025

ACCEPTED: 15.09.2025

PUBLISHED: 30.09.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

The search and analytical research was carried out with the support of the Russian Science Foundation (Project № 24-26-00108)



ABSTRACT

Background: A food gel complex can be defined as a spherical complex three-dimensional colloidal system in which active substances (functional food ingredients) can be dispersed or enclosed in a core surrounded by a continuous protective shell. Domestic and foreign researchers have reported that functional food ingredients are effectively encapsulated and used for controlled oral delivery using gel complexes based on biopolymers.

Purpose: To analyze domestic and foreign studies on the principles of creation, materials, characteristics and practical application of gel complexes for encapsulating functional food ingredients (using the example of anthocyanin encapsulation).

Materials and Methods: Domestic and foreign scientific publications on the principles of manufacturing, materials, characteristics and practical application of gel complexes for the creation of encapsulated forms of anthocyanins, published in the period from 2001 to 2025 was studied when compiling the review. A systematic search of scientific literature was conducted using the RSCI, PubMed, Science Direct databases and Google Scholar systems.

Results: It has been revealed that the most popular encapsulators of anthocyanins are hydrocolloids such as maltodextrin, whey protein, soy protein isolate, and recently researchers have tended to use combinations of biopolymers instead of individual polymers due to their higher encapsulation efficiency and lower cost. Various methods are used to encapsulate bioactive compounds in gel complexes, taking into account the nature of the finished complexes, their purpose, the nature of the base material, the place of release, particle size, etc. It is shown that when developing gel complexes, it is necessary to take into account the basic principles of manufacturing: the composition of gel complexes, release mechanisms, structure and size, biocompatibility and stability.

Conclusion: An analysis of publications by domestic and foreign researchers devoted to the principles of manufacturing, materials, characteristics and practical application of gel complexes for encapsulating functional food ingredients (using the example of anthocyanin encapsulation) has shown the relevance of conducting such studies. Further research in the field of more efficient production processes should be aimed at developing new approaches to the stabilization of natural plant pigments using gel complexes to expand their use in the food industry.

KEYWORDS

gel; food hydrocolloids; encapsulation; biologically active substances; physiologically functional ingredients; anthocyanins

ВВЕДЕНИЕ

Пищевой гелевый комплекс можно определить как сферическую сложную трехмерную коллоидную систему, в которой активные вещества (функциональные пищевые ингредиенты) могут быть диспергированы или заключены в ядро, окруженное непрерывной защитной оболочкой. Исследователями сообщалось о том, что функциональные пищевые ингредиенты эффективно инкапсулируются и используются для контролируемой пероральной доставки с помощью гелевых комплексов на основе биополимеров (Тешаев и др., 2011; Ribeiro & Veloso 2021; Barbosa-Nuñez et al., 2025). Помимо своей функциональности, они также могут придавать пище привлекательную текстуру и приятный вкус (Saqib et al., 2022). Сообщалось (Karimi & Namazi, 2022), что гелевые комплексы, полученные путем инкапсуляции наночастиц оксида железа в альгинатные гранулы, были использованы в качестве адсорбента для удаления антибиотиков тетрациклина и амоксициллина из водных растворов методом периодической адсорбции. Таким образом, гелевые комплексы обладают огромным потенциалом в дизайне пищевых систем для создания продуктов будущего, к которым могут быть отнесены не только новые источники белка и пищевых нутриентов из животного (насекомые) и растительного (водоросли и продукты их переработки) сырья, но и передовые технологии, в том числе технологии инкапсулирования пищевых веществ, позволяющие производить уникальные продукты с заданными свойствами, составом и вкусами.

Антоцианы — это уникальные химические вещества, которые отвечают за яркую окраску и визуальную привлекательность многих фруктов и овощей. В основном они считаются вторичными растительными соединениями, которые играют важную роль в важнейших биологических процессах растений, включая метаболизм, улавливание света при фотосинтезе, регуляцию развития и защиты, а также защиту от фотоокислительного повреждения. Их потребление связано со снижением вероятности развития различных заболеваний у людей. Однако антоцианы нестабильны при хранении, что снижает их биодоступность и положительное влияние на здоровье при употреблении. Технология инкапсулирования за последние несколько лет вызвала растущий интерес

в различных областях и сферах применения, в том числе при сохранении свойств красящих веществ, а также применении инкапсулированных форм биологически активных веществ при разработке продуктов питания, в том числе функционального назначения.

Цель данного обзора предметного поля заключается в сборе актуальной информации о принципах изготовления, материалах, характеристике и практического применения гелевых комплексов для инкапсулирования функциональных пищевых ингредиентов (на примере инкапсулирования антоцианов) для определения перспективных направлений дальнейших исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Базы данных

Обзор предметного поля гелевых комплексов для инкапсулирования функциональных пищевых ингредиентов (на примере антоцианов) обобщает значительный пласт практической информации о принципах изготовления, материалах, характеристиках и практическом применении данной технологии, объединяя результаты узких эмпирических и обзорных работ в контексте общей концепции, что позволяет представить собранную информацию в классифицированном и систематизированном виде.

Базы данных

Систематический поиск научной литературы проводился с использованием библиографических баз данных. База данных RSCI (ПИНЦ) применялась для работы с публикациями отечественных ученых. Для работы с иностранной научной литературой применялись международные англоязычные платформы научного издательства Elsevier, среди которых онлайн-ресурс полнотекстовой научной информации ScienceDirect и реферативная и аналитическая база данных в области научно-технической и медицинской информации Scopus. При работе с материалами биомедицинских исследований применялась бесплатная поисковая система PubMed. Поиск проводился с использованием внутреннего инструментария платформ или с использованием

бесплатной поисковой системы по научным публикациям — Google Scholar. Использование данного набора инструментов поиска позволяет охватить значительную часть актуальной научно-технической литературы.

Стратегия поиска

Поисковые запросы были сгруппированы по тематическим областям обзора. Были выделены следующие основные тематические блоки:

Блок 1: гели и гидроколлоиды. Для поиска литературы использовались следующие ключевые запросы для англоязычных баз данных: gel, hydrogel, food hydrocolloids, polysaccharide, protein. И для поиска в русскоязычных источниках: гель, гидрогель, пищевые гидроколлоиды, полисахариды, белки. Пример поискового запроса для англоязычных источников: («food hydrocolloid*» OR hydrogel* OR gel OR polysaccharides* OR proteins*) и русскоязычных («пищевые гидроколлоиды*» OR гидрогель* OR гель OR полисахарид* OR белки*).

Блок 2: инкапсулирование. Запросы для англоязычных баз данных: encapsulation, microencapsulation, gel complex, delivery system. И для поиска в русскоязычных источниках: инкапсуляция, микрокапсулирование, гелевый комплекс, система доставки. Пример поискового запроса для англоязычных источников: (encapsulation* OR microencapsulation* OR «gel complex*» OR «delivery system*») и русскоязычных (инкапсуляция* OR микрокапсулирование* OR «гелевый комплекс*» OR «система доставки*»).

Блок 3: функциональные ингредиенты / антоцианы. Запросы для англоязычных баз данных: anthocyanins, bioactive compounds, functional ingredients. И для поиска в русскоязычных источниках: антоцианы, биологически активные соединения, функциональные ингредиенты. Пример поискового запроса для англоязычных источников: (anthocyanin* OR «bioactive compound*» OR «functional ingredient*») и русскоязычных (антоциан* OR «биологически активное соединение*» OR «функциональный ингредиент*»).

Примеры комбинированных поисковых запросов: для англоязычных источников:

(«food hydrocolloids*» OR hydrogel* OR gel OR polysaccharides* OR proteins*) AND (encapsulation* OR microencapsulation* OR «gel complex*» OR «delivery system*») AND (anthocyanin* OR «bioactive compound*» OR «functional ingredient*») и русскоязычных («пищевые гидроколлоиды*» OR гидрогель* OR гель OR полисахариды* OR белки*) AND (инкапсуляция* OR микрокапсулирование* OR «гелевый комплекс*» OR «система доставки*») AND (антоциан* OR «биологически активное соединение*» OR «функциональный ингредиент*»).

Для обзора предметного поля важно реализовать системный подход к поиску информации, что позволяет обеспечить релевантность и полноту результатов. На первом этапе была произведена декомпозиция исследовательской проблемы на соответствующие предметному полю блоки, среди которых: матричные материалы, технологический процесс и функциональные ингредиенты. Использование булевой алгебры и лингвистических инструментов релевантности способствует минимизации информационного шума и обеспечивает воспроизводимость результатов поиска.

Критерии отбора источников

- (1) Тип публикации.
Рецензируемые источники, среди которых главным образом можно выделить оригинальные экспериментальные статьи и обзорные статьи.
- (2) Тематика работ.
Содержит результаты исследований по разработке гелевых комплексов на основе пищевых гидроколлоидов или белково-полисахаридных систем; эти комплексы используются для инкапсулирования антоцианов или других биоактивных соединений пищевого происхождения; описаны материалы-носители, технология получения, свойства комплекса (размер, стабильность, эффективность инкапсулирования, профиль высвобождения).
- (3) Объект и область применения.
Пищевые системы нового поколения, функциональные пищевые продукты, технология функциональных пищевых ингредиентов.

(4) Хронологические рамки. Работы, опубликованные после 2001 г., что объясняется необходимостью охвата массива данных, появившихся на этапе формирования и развития направления использования гелевых комплексов для инкапсулирования функциональных пищевых ингредиентов.

(5) Язык. Источники представлены на русском и английском языках, преимущественно зарубежные публикации.

Критерии исключения

- (1) Конференционные тезисы, короткие сообщения без описания методики инкапсулирования;
- (2) Нерецензируемые источники, популярные обзоры, учебные материалы;
- (3) Публикации, посвященные гелям, применяемым вне сферы пищевых технологий, и полимерным системам без гелеобразования;
- (4) Статьи, опубликованные ранее 2001 г.

Использованные фильтры

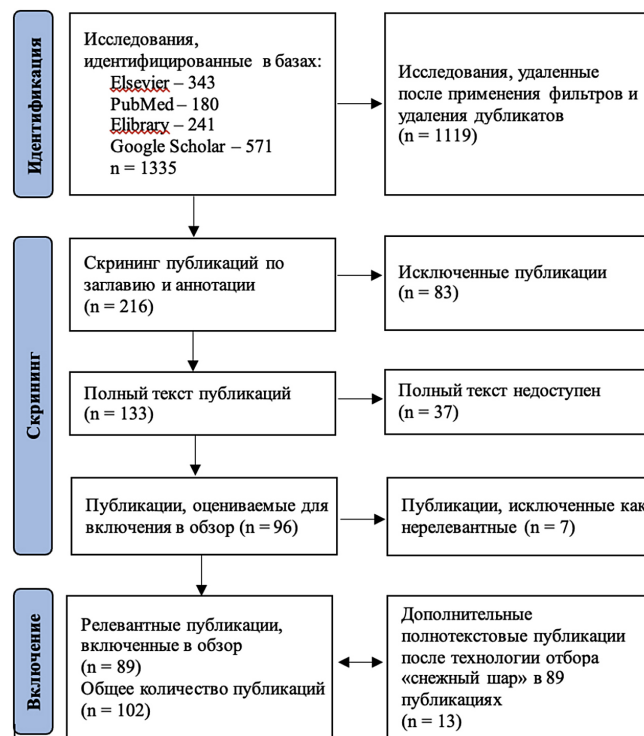
После идентификации исследований и применения поисковых фильтров информация о публикациях была экспортирована в таблицу Excel, были удалены дублирующие записи об исследованиях, индексируемых в нескольких базах данных. Собранный массив информации о публикациях использовался в дальнейшем для детального скрининга.

На первом этапе отбор проводился по названию и аннотации: исключались публикации, явно несвязанные с гелевыми комплексами на основе пищевых гидроколлоидов и/или инкапсулированием антоцианов и других пищевых биоактивных компонентов.

На втором этапе отбирались работы, доступные для полнотекстового анализа и представленные в читаемом электронном формате.

На третьем этапе полный текст потенциально релевантных статей анализировался на предмет соответствия критериям включения. Первичный

Рисунок 1
 Диаграмма PRISMA 2020
Figure 1
 PRISMA 2020 Chart



скрининг и полнотекстовая оценка выполнялись автором; при возникающих сомнениях относительно принадлежности работы к предметному полю обзор обсуждался с экспертом в области пищевых гидроколлоидов.

Схема отбора публикаций, включенных в обзор, представлена на Рисунке 1.

Извлечение данных

С целью структурирования информации, полученной из включенных в анализ источников, была использована унифицированная схема сбора данных. Все релевантные данные последовательно заносились в Таблицу 1 по заранее определенному протоколу, что обеспечило их сопоставимость и пригодность для дальнейшего синтеза.

Фиксировались следующие параметры: (1) библиографические данные (авторы, год, страна, журнал); (2) источники антоцианов или других био-

Таблица 1

Критерии каталогизации исследований, используемых при обзоре литературы

Table 1

Criteria for Cataloging Research Used in Literature Reviews

Библиографические данные	Объект и источник антоцианов / биоактивных соединений	Тип гелевого комплекса	Матрица и гидроколлоиды	Технология получения	Ключевые характеристики
Авторские коллективы	Черника; Черная малина; Бузина обыкновенная (<i>Sambucus nigra L.</i>); Экстракт черной смородины; Кожица сладкой вишни; Высушенный виноградный сок	Комплексы с жидким наполнителем	Агар; Альгинаты; Каррагинан	Экструзия	Эффективность инкапсулирования
Год публикации	Экстракт из выжимок жаботикабы; <i>L. Crantz</i> (рыжик посевной); Рыжик посевной	Комплексы с эмульсионным наполнителем	Гуаровая камедь; Гуммиарабик; Конжак-маннан; Камедь бобов рожкового дерева; Ксантановая камедь; Целлюлоза; Пектин; Крахмал	Распылительная сушка	Профиль высвобождения
Журнал	Экстракты оболочки семян черной сои; Краснокочанная капуста	Двойные инкапсулированные гелевые комплексы	Сывороточный протеин; Желатин; Хитозан	Сублимационная сушка	Стабильность (к свету, температуре, pH)
Количество цитирований	Листья базилика пурпурнолистного		Соевые белки; Зеин	Эмульгирование Комплексная коацервация	Функциональное назначение (таргетная доставка, маскировка вкуса, текстурообразование и т.д.)

активных компонентов (вид растительного сырья, способ получения экстракта); (3) тип гелевого комплекса (твердый, с жидким или эмульсионным наполнителем, двойной), диапазон размеров частиц; (4) состав матрицы (виды гидроколлоидов и их комбинации); (5) используемые технологии получения (экструзия, распылительная сушка, лиофильная сушка, эмульгирование, комплексная коацервация и др.); (6) ключевые функционально-технологические характеристики (эффективность инкапсулирования, стабильность к свету, температуре и pH, профиль высвобождения, органолептические свойства).

Извлеченные данные использовались для заполнения сводных таблиц (например, таблиц, описывающих гелевые комплексы для инкапсулирования антоцианов и перечень используемых гидроколлоидов) и последующего тематического анализа.

Синтез данных

Синтез данных проводился в формате тематического (нарративного) анализа. На основании извлеченных параметров исследования были сгруппированы по четырем основным направлениям: (1) типология гелевых комплексов (твердые, с жидким и эмульсионным наполнителем, двойные структуры); (2) состав и свойства гидроколлоидной матрицы; (3) используемые технологии получения гелевых систем; (4) функциональные назначения гелевых комплексов (текстурообразование, инкапсулирование и таргетная доставка биоактивных соединений, снижение калорийности и др.).

Для описания тенденций в области материалов и технологий дополнительно использовались элементы описательной статистики (подсчет частоты использования отдельных гидроколлоидов, типов технологий и источников антоцианов в включенных работах).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Типология гелевых комплексов

Анализ отобранных публикаций показал, что в области пищевых гелевых комплексов доминируют различные виды пищевых гелей, представляющих собой трехмерную сеть, образованную поперечными связями в различных жидких средах. При образовании гелевой сети в водной среде образуются гидрогели, при аэрировании и высушивании гидрогелевых структур создаются аэрогели (ксерогели), а при структурировании растительных масел природными органогелаторами — эмульсионные наполненные масляные гели и/или олеогели, при возможном комбинировании гидрогеля и олеогеля образуются так называемые гибридные (смешанные) бигели. Гелевые комплексы также можно классифицировать по их структуре, свойствам и области применения. Возможны нано-, микро-,

макро- и миллиметровые размеры. Гелевые комплексы можно разделить на следующие категории в зависимости от их структуры.

Твердые гелевые комплексы

Твердые гелевые комплексы представляют собой наиболее распространенные и популярные виды комплексов, их можно эффективно изготовить из различных гидроколлоидов. Они могут быть изготовлены из одного гидроколлоида или из комбинации различных гидроколлоидов, в составе твердых гелевых комплексов может находиться широкий спектр биологически активных веществ. Активный компонент может как взаимодействовать с гелевой матрицей, так и сохранять инертность.

В отношении инкапсулирования антоцианов наиболее активно используются гелевые комплексы, представленные в Таблице 2.

Таблица 2

Гелевые комплексы для инкапсулирования антоцианов

Table 2

Gel Complexes for Anthocyanin Encapsulation

Источник антоцианов	Гидроколлоиды	Свойства гелевого комплекса	Литературный источник
Экстракт из выжимок жаботикабы	Мальтодекстрин, пектин и изолят соевого белка	Уменьшает деградацию, вызванную ультрафиолетовым излучением	Souza et al., 2017
Экстракты оболочки семян черной сои	Изолят соевого белка	Снижает скорость деградации и повышает стабильность	Chen et al., 2019
Высушенный виноградный сок	Соевый белок и сывороточный протеин	Повышает стабильность при длительном хранении	Moser et al., 2017
Бузина обыкновенная (<i>Sambucus nigra</i> L.)	Сывороточный протеин и пектин	Повышает эффективность инкапсуляции	Stanciuc et al., 2018
Рыжик посевной (<i>L. Crantz</i>)	Нейтральные полисахариды и белки	Повышает стабильность	Ferron et al., 2022
Экстракт черной смородины	Изолят сывороточного протеина, инулин и хитозан	Повышает стабильность	Enache et al., 2020
Кожица сладкой вишни	Сывороточный протеин	Повышает стабильность	Milea et al., 2019
Черника	Изолят сывороточного протеина	Улучшает биологическую активность	Zang et al., 2021
Листья базилика пурпурнолистного	Мальтодекстрин	Повышает сохранность	Дейнека и др., 2018
Краснокочанная капуста	Мальтодекстрин	Повышает устойчивость и сохранность	Кульченко и др., 2017
Черная малина	Желатин, аравийская камедь	Повышает устойчивость и сохранность	Shaddel et al., 2017

Из представленных данных следует, что источником антоцианов служит различное растительное сырье (ягоды, овощи, а также отходы растительного сырья), наиболее популярными инкапсуляторами антоцианов, выделенных из растительного сырья, являются такие гидроколлоиды, как мальтодекстрин, сывороточный протеин, изолят соевого белка. Больше всего антоцианов содержится в кожце ягод и плодов. Несмотря на то что в овощах антоцианов содержится меньше, чем в ягодах, они также являются источниками этих соединений, поскольку характеризуются более длительным хранением и доступностью. Антоцианы - лабильные соединения, которые быстро разрушаются. Их стабильность зависит от ряда факторов, таких как ферменты и сопутствующие компоненты растительного матрикса, концентрация антоцианидинов и их структура, свойства растворителя, pH, температура, действие кислорода, солнечный свет, присутствие металлов. В целом антоцианы относительно устойчивы в кислой среде и быстро разрушаются в щелочной среде до темно-коричневых окисленных соединений. Гидроколлоиды могут использоваться для стабилизации антоцианов в пищевых продуктах, например, при создании инкапсулированных форм. Также в последнее время у исследователей наблюдается тенденция к использованию комбинаций гидроколлоидов взамен отдельных полимеров из-за их более высокой эффективности инкапсуляции и более низкой стоимости.

Разработка новых гелевых комплексов обусловлена их возможными функциональными свойствами:

- (1) Гелевые комплексы с жидким наполнителем. Этот тип комплексов имеет жидкую сердцевину, покрытую бесшовной оболочкой или мембраной, и часто называется «системой-резервуаром». Мембрана может служить барьером или препятствовать диффузии. Этот тип гелевых комплексов обычно получают методом иотропного гелеобразования. Капля жидкости может быть преобразована в нерастворимую полость с помощью контролируемого ионного взаимодействия между анионным и катионным полимерами в рамках граничных условий. Такие гелевые комплексы недавно стали популярны как съедобные шарики с разнообразными вкусами (Bremond et al., 2010).
- (2) Гелевые комплексы с эмульсионным наполнителем. Этот тип комплексов похож на гелевый

комплекс с жидким наполнителем, представленный выше, за исключением того, что материалом наполнителя может быть эмульсия, наноэмульсия, липосома или эмульсионный гель. Этот тип гелевых комплексов обычно используется с гидрофобными материалами. Поскольку спрос на функциональные продукты питания растет, производители продуктов питания и исследователи всё больше интересуются разработкой гидрофобных материалов для доставки (Feng et al., 2018; Lin et al., 2020; Ильина и др., 2023).

- (3) Двойные инкапсулированные гелевые комплексы. Этот тип является довольно сложным по сравнению с другими типами комплексов. В нём микрошарики обычно повторно инкапсулируются в относительно более крупные сферы. В одной системе могут быть инкапсулированы два материала с противоположными или несовместимыми свойствами. Например, в сравнительно недавнем исследовании зарубежных ученых пробиотики и антибиотики были инкапсулированы в альгинатный матрикс (Li et al., 2018).

Материалы и носители: сравнительный анализ гидроколлоидов

Среди включенных работ наиболее часто в качестве матрицы для гелевых комплексов используются альгинаты, пектины и смеси на основе мальтодекстрина с белками (Таблица 3). Реже встречаются агар, каррагинан, гуаровая камедь и гуммиарабик, преимущественно в зарубежных публикациях, тогда как отечественные работы традиционно опираются на использование модифицированных крахмалов, пектина и желатина.

При создании гелевых комплексов для инкапсулирования широко используются гидроколлоиды, поскольку они безопасны, технологичны, могут быть носителями широкого спектра биологически активных соединений и, что самое важное, могут изменять и формировать органолептические и физико-химические свойства пищевых систем (Goff & Guo, 2020; Неповинных & Петрова, 2025). Кроме того, в последнее время всё больше обсуждается возможное влияние пищевых гидроколлоидов на здоровье человека и механизмы их усвоения (Ağagündüz et al., 2023), благодаря чему гидрокол-

лоиды стали пользоваться большей популярностью в использовании. Наиболее часто биополимеры используются в комбинации из двух или более компонентов в зависимости от их свойств.

В Таблице 3 представлены наиболее эффективные и доступные гидроколлоиды, используемые при изготовлении гелевых комплексов для инкапсулирования биологически активных веществ.

Таблица 3

Гидроколлоиды, используемые при изготовлении гелевых комплексов для инкапсулирования биологически активных веществ

Table 3

Hydrocolloids Used in the Production of Gel Complexes for Encapsulating Biologically Active Substances

Наименование гидроколлоида	Источник получения	Название связующих блоков	Применение	Достоинства и недостатки	Литературный источник
Агар	Красные морские водоросли	В основном агар состоит из повторяющихся звеньев агаробиозы, состоящей из 1,3-D-галактопиранозы и 3,6-ангидро- α -L-галактопиранозы	Гелевые комплексы для получения гидрофобных и гидрофильных материалов, инкапсуляции пробиотиков, ферментов, используемых в качестве заменителя желатина в различных продуктах для вегетарианских диет	Термообратимый гель, широко доступный, универсальный в применении	Stanley, 2006; Sharma et al., 2014
Альгинаты	Бурые морские водоросли	Линейный сополимер, образованный остатками β -D-маннуроновой кислоты и α -L-гулуруновой кислоты, соединенными 1-4 связью	Гелеобразование с помощью двухвалентных катионов, иммобилизация и инкапсуляция, наиболее распространенный гидроколлоид для изготовления гелевых комплексов	Наиболее часто используемый гидроколлоид для капсулирования, гель обладает низкой механической и химической стабильностью, но процесс может быть легко улучшен в сочетании с другими коллоидами. Образование геля сложно контролировать, поскольку гелеобразование зависит от молекулярной структуры альгината, которая значительно варьируется в зависимости от вида сырья и других факторов	Cao et al., 2020; Nordgård & Draget, 2021; Saqib et al., 2022
Целлюлоза	Гидроколлоид клеточной стенки растений и химические модификации целлюлозы	Гомополимер (1, 4) D-глюкозы	Обеспечивает механическую устойчивость гелевых комплексов, дополнительный слой защиты, инкапсуляцию	Нерастворимая в воде, недорогая клетчатка, некоторые химически модифицированные виды целлюлозы могут оказывать негативное влияние на организм человека	Ergun et al., 2016; Ibrahim et al., 2019; Rakhshaei et al., 2020; Nie et al., 2021
Каррагинан	Красные морские водоросли	Сульфатированная D-галактоза и L-ангидрогалактоза	Гелевые комплексы для иммобилизации биологически активных веществ	Термообратимый гель, частичная деградация при низком pH ограничивает применение для доставки в кишечник или толстую кишку	Keppeler et al., 2009; BeMiller, 2019; Yermak et al., 2021

Продолжение Таблицы 3

Наименование гидроколлоида	Источник получения	Название связующих блоков	Применение	Достоинства и недостатки	Литературный источник
Гуаровая камедь	Эндосперма бобов гуара	Линейная цепь галактоманнанных звеньев	Наполнители из гелевых комплексов используются в основном в десертах и йогуртах	Используется в качестве наполнителя или загустителя в гелевых комплексах	Eskin et al., 2007; Theocharidou et al., 2022
Гуммиарабик	Экссудаты дерева акации сенегальской (<i>Acacia senegal</i>) и акации сеяльской (<i>Vachellia seyal</i>)	Сложная смесь сахаридов и гликопротеинов	Мармеладные конфеты, шоколадные конфеты и жевательные резинки	Эффективный наполнитель для гелевых комплексов, но имеются некоторые незначительные побочные эффекты, такие как вздутие живота и тошнота (при высоких дозах); некоторые антибиотики и лекарства взаимодействуют с гуммиарабиком	Eltayeb et al., 2004
Конжакманн	Клубни конжака	Гетерополисахарид, состоящий из D-глюкозы и D-маннозы, связанных между собой β -D-1,4-связью	Желирующий, текстурирующий и связывающий воду гидроколлоид, обеспечивающий замену жира в мясных продуктах без жира и с низким содержанием жира	Широко распространенный гидроколлоид для снижения веса, улучшает реологические и текстурные свойства, замедляет высвобождение биоактивных веществ	Guo et al., 2021
Камедь бобов рожкового дерева	Семена рожкового дерева	Состоит из звеньев галактозы и маннозы, соединенных гликозидными связями	Желирующее вещество, растворимое как в горячей, так и в холодной воде	Заменитель жира, снижает функциональные нарушения желудочно-кишечного тракта	Dakia et al., 2007; Сагитова и др., 2024
Пектин	Гетерополисахарид, получаемый из клеточной стенки высших наземных растений и фруктов	Линейная α -(1–4)-связанная D-галактоуроновая кислота, обычно этерифицированная метильными группами в положении 6. Анионный полисахарид, низкометоксилированный пектин образует гель в присутствии ионов двухвалентных металлов, а высокометоксилированный пектин – при низком значении pH	Желирующее вещество, используемое в джемах, желе, мармеладе	Широко доступен, нетоксичен, реагирует на изменение pH и обладает биоадгезивными свойствами. Нестабильные гелеобразующие свойства и низкая воспроизводимость, высокая концентрация сахара или низкий pH, необходимые для образования геля, могут использоваться при более высокой температуре, чем другие гелеобразующие агенты	Günter & Popeyko, 2016; Vityazev et al., 2020; Chen et al., 2021
Крахмал	Картофель, пшеница, рис, кукуруза, тапиока и др.	Связанные глюкозные полимеры, в основном состоящие из амилозы (линейной) и амилопектина (разветвленного)	Загуститель, экономичный, используется в сочетании с другими гидроколлоидами для эффективного гелеобразования	Дешевый, доступный гидроколлоид, не придает постороннего вкуса	Anal & Singh, 2007; Lozano-Vazquez et al., 2015; Mitchell & Hill, 2021

Продолжение Таблицы 3

Наименование гидроколлоида	Источник получения	Название связующих блоков	Применение	Достоинства и недостатки	Литературный источник
Ксантановая камедь	Ферментация глюкозы или сахарозы (<i>Xanthomonas Campestris</i>)	Полисахарид состоит из двух звеньев β-D-глюкозы, соединенных через 1-е и 4-е положения. Боковые цепочки состоят из двух звеньев маннозы и одного звена глюкуроновой кислоты. В целом структура представляет собой повторяющиеся модули, состоящие из пяти звеньев сахара	Загуститель, помогает стабилизировать эмульсии, предотвращать образование пены, действуя как эмульгатор и модификатор текстуры в различных продуктах питания	Обладает высокой вязкостью, может сохранять свойства в широком диапазоне pH и температур, является одним из широко используемых загустителей в пищевой и фармацевтической промышленности. Чрезмерное употребление вызывает расстройство желудка и проблемы с пищеварением, а также может изменить микрофлору кишечника	Leela & Sharma, 2000; Kurbanov et al., 2024; Kusherova et al., 2024
Сывороточный протеин	Молочный сывороточный белок	В основном состоит из глобулярных белков, таких как лактоглобулин и лактоальбумин	Гелеобразователь и загуститель в пищевой промышленности, эмульгатор в эмульсионных гелях	Богатый питательными веществами, он может образовывать комплексы с другими полисахаридами (например, сывороточный протеин-пектиновый комплекс); неустойчив к нагреванию, чувствителен к pH и окружающей среде	Aguilera, 2004; Chen et al., 2020; Du et al., 2022
Хитозан	Хитин панцирей ракообразных	β-(1→4)-связанный D-глюкозамин N-ацетилглюкозамин	Инкапсуляция белка, инкапсуляция масла, богатого Омега-3, покрытие капсул, текстура гелевых комплексов и механическая устойчивость	Второй по распространенности гидроколлоид, обеспечивает дополнительный слой защиты для гелевых комплексов, улучшает барьерные и механические свойства, но растворимость в кислоте ограничивает его применение, может препятствовать усвоению жирорастворимых витаминов, вызывает аллергию у чувствительных людей и негативно взаимодействует с некоторыми лекарствами	Kulig et al., 2016; Fernandes et al., 2020; Hamed et al., 2020; Romo et al., 2020
Желатин	Кожа и кости животных (получен путем частичного гидролиза коллагена животной соединительной ткани)	Белок с высоким содержанием глицина и пролина	Наполнитель в гелевых комплексах в сочетании с другими полимерами, желеобразующее вещество в желатиновых десертах	Водорастворимый, чувствительный к нагреванию, может изменять свойства материала (эластичность, жесткость, прочность на разрыв) без влияния на микроструктуру	Schrieber & Herbert, 2007; Шатабаева и др., 2020

Окончание Таблицы 3

Наименование гидроколлоида	Источник получения	Название связующих блоков	Применение	Достоинства и недостатки	Литературный источник
Соевые белки	Соевые бобы	Взаимодействие двух глобулиновых белков, таких как глицинин и β -конглицинин	Гелеобразователь, приготовление пищевых эмульсий	Недорогой источник белка, низкие механические свойства, высокая чувствительность к влаге	Bhattacharya & Jena, 2007; Zeeb et al., 2015; Lin et al., 2020
Зеин	Кукуруза	Пептидная цепь, содержащая в основном проламин	Наночастицы зеина, поверхностное покрытие, микрогранулы, эмульсии Пикеринга, стабилизатор	Высокая устойчивость к нагреванию, воздействию воды и хорошие барьерные свойства по отношению к кислороду, покрытие для продуктов питания и лекарств, альтернатива синтетическим полимерам, улучшенные свойства высвобождения, нерастворимость в воде, специфический запах и цвет	Liu et al., 2006; Tortorella et al., 2021; Huang et al., 2023

Зарубежные исследователи (Ching et al., 2017; Yuan et al., 2017; Enache et al., 2020; Yermak et al., 2021; Maleki et al., 2022) для инкапсулирования чаще используют хитозан и альгинаты, тогда как отечественные работы концентрируются на пектиновых и крахмальных системах, что связано с доступностью сырья и регуляторными ограничениями. Выбор гидроколлоида определяет не только свойства геля, но и технологически допустимые способы его получения (экструзию, распылительную сушку, ионотропное гелеобразование), что отражается в структуре используемых технологий, рассмотренных в следующем разделе.

На основе обзора ряда публикаций, содержащих экспериментальные или обзорные данные о применении гидроколлоидов в пищевых гелевых комплексах, установлено, что наибольшее распространение получили альгинаты, пектин, хитозан и желатин. Альгинат натрия упоминается в большей половине проанализированных исследований как основной гелеобразующий агент благодаря его способности формировать устойчивые гели в присутствии ионов кальция (Li et al., 2021; Cao et al., 2020). Однако было отмечено, что физико-химические свойства конечного комплекса зависят от соотношения маннуриновых и гулуриновых блоков в молекуле альгината, что делает контроль свойств геля сложным (Saqib et al., 2022).

Пектин, используемый преимущественно для инкапсуляции гидрофильных биоактивных веществ, характеризуется высокой чувствительностью к уровню pH и ионной силе среды. Он применяется в сочетании с белками (например, соевым или сывороточным), что позволяет стабилизировать гель при прохождении через желудочно-кишечный тракт (Du et al., 2022).

Хитозан демонстрирует хорошие барьерные свойства и механическую прочность, но его ограниченная растворимость в нейтральной среде сдерживает его использование в системах с длительным высвобождением (Maleki et al., 2022). Использование хитозана чаще встречается в фармацевтических применениях, однако его доля в пищевых технологиях увеличивается, особенно при создании съедобных упаковок. Желатин, в свою очередь, применяется в системах, ориентированных на органолептические свойства, однако его чувствительность к температуре ограничивает диапазон применения (Шатабаева et al., 2020).

Таким образом, выбор гидроколлоида определяется не только желаемыми механическими и реологическими свойствами геля, но и стратегией высвобождения действующих веществ, их чувствительностью к внешней среде и требованиями к пищевой безопасности.

Технологии получения гелевых комплексов

Среди включенных работ наиболее распространены методы ионотропного гелеобразования и сушильные технологии (распылительная и лиофильная сушка), тогда как методы сложной коацервации и двойной инкапсуляции используются значительно реже и представлены в основном в зарубежных публикациях.

Гелевые комплексы производятся для изменения текстуры, инкапсулирования и таргетной доставки биологически активных веществ. Способ производства должен быть экономически эффективным, универсальным, воспроизводимым и относительно простым. Для инкапсулирования биоактивных соединений в гелевые комплексы используются различные способы, учитывающие природу готовых комплексов, их назначение, природу основного материала, место высвобождения, размер частиц и т. д. Способы выбираются в соответствии с конкретной целью, с учетом эффективности инкапсулирования, скорости производства и адекватности процесса. Для различных типов гранул, в которые можно поместить гидрофильные, липофильные и гидрофобные материалы, было разработано множество способов, в том числе различные виды экструзии, распыления, эмульгирования и многое другое (Ching et al., 2017). Ниже представлены основные способы, которые можно разделить на две категории, и приведены наиболее часто используемые техники:

- (1) способы изготовления гелевых комплексов (например, экструзия, сушка и т. д.);
- (2) способы включения биологически активных веществ в состав гранул (например, эмульгирование, коацервация, создание липосом и т. д.).

Экструзия

Наиболее распространенным и широко используемым способом получения гелевых комплексов является простая капающая или экструзионная технология (Kuo & Ma, 2001; Puguang et al., 2014; Davarci et al., 2017). Экструзия — это щадящий и удобный способ, с помощью которого можно успешно инкапсулировать различные соединения, в том числе гидрофильные или гидрофобные соединения с длительным сроком хранения. Как правило, шарики диаметром более 1,0 мм можно приготовить с по-

мощью шприца с иглой или пипетки. Капельный раствор, который может содержать или не содержать активные соединения, по каплям переносится в слегка перемешиваемый гелеобразный раствор. В основе этого метода лежит капельное выдавливание заряженных полимерных капель из наполненного шприца в гелевую ванну с противоположным зарядом. Например, альгинатные шарики, полученные простым выдавливанием, обычно имеют размер в миллиметровом диапазоне (1–2 мм). Примеры соединений, инкапсулированных с помощью этого метода, включают клетки, масла, ферменты, ароматизаторы и растительные экстракты (Déat-Lainé et al., 2012; Larosa et al., 2018; Gómez-Mascaraque et al., 2019; Hariyadi & Islam, 2020).

Хотя экструзия с помощью шприца является самым простым методом получения однородных гелевых комплексов, при этом способе образуются гелевые частицы больших размеров, а трудности масштабирования ограничивают применение этого способа только в лабораторных условиях. Кроме того, этот способ применим только к растворам с низкой вязкостью из-за трудностей с перекачиванием и риска с закупоркой иглы. Крупный размер частиц также требует, чтобы свежеприготовленные частицы некоторое время отверждались в ёмкости для гелеобразования. Поверхность капли мгновенно отверждается при попадании в гелеобразующий раствор. Для диффузии катионов внутрь капли, в зависимости от размера частиц геля, требуется больше времени. Однако способ экструзии позволяет получать относительно крупные частицы с пористой структурой, что ограничивает его применение в промышленности для контролируемого высвобождения, а также может снижать стабильность конечного продукта. Экструзионная каплеустройная обработка с использованием различных механических установок позволяет получать гранулы с широким диапазоном размеров частиц (от нано- до микро-).

Альтернативой обычной капельной инкапсуляции является обратная экструзия (гелеобразование/сферизация). Этот способ позволяет использовать различные ингредиенты, обеспечивает более высокую прочность геля, жесткость, меньшую толщину, гладкую поверхность и лучшую проницаемость. Метод экструзии может быть усовершенствован и дополнен различными способами, например, применением многосопловой системы

или вращающегося диска, центробежной экструзией, совместной экструзией, электростатической экструзией и экструзией расплава (Lević et al., 2014; Rodríguez et al., 2016).

Распылительная сушка

Распылительная сушка широко применяется, особенно для улавливания ароматических соединений, используется из-за своей экономичности, эффективности и отсутствия необходимости в специализированном оборудовании. Распылительная сушка обычно применяется для производства микро- и наногранул. Основной принцип заключается в увлажнении материала стенок после гомогенизации сердцевины и материала-носителя. Затем смесь подается в распылительную сушилку, где для распыления смеси используется форсунка или вращающееся колесо. Например, для инкапсулирования вкусовых добавок в пищу наиболее перспективной и развивающейся стратегией является распылительное охлаждение. При этом распыляемые капли жидкости превращаются в частицы размером от нескольких микрон до миллиметров. Это недорогой и эффективный метод улавливания соединений, но этот метод не подходит для термочувствительных материалов, таких как пробиотики.

Сублимационная сушка

Лиофилизация дает дополнительные преимущества при применении различных методов сушки и инкапсулирования и используется для лучшего сохранения нестабильных соединений и натуральных красителей, а также для получения порошков с быстрой растворимостью (Madene et al., 2006; Anandharamakrishnan, 2014; Perumalla Venkata & Subramanyam, 2016).

Сублимационная сушка состоит из четырех простых этапов: замораживание, первичная сушка, вторичная сушка и окончательная обработка. Сублимационная сушка может быть полезна в двух аспектах. Во-первых, весь процесс сушки проводится в условиях вакуума, поэтому отсутствует контакт с воздухом, что предотвращает аэробную деградацию. Во-вторых, температура сушки не превышает температуру окружающей среды. Соединения, которые очень чувствительны к окислению и термическому разложению (например, ароматизаторы), можно высушить в вакууме с минимальным

физическим и химическим воздействием. Однако наиболее важными недостатками сублимационной сушки являются более высокие энергозатраты и продолжительность (не менее 20 часов). Кроме того, при сублимационной сушке образуются открытые пористые структуры неправильной формы, которые неэффективны, когда требуется длительное высвобождение ароматических соединений (Hundre et al., 2016).

Эмульгирование

Эмульгирование подходит для инкапсулирования гидрофильных и гидрофобных смесей (Gumus et al., 2017). Эмульсия используется для удержания жирорастворимых веществ в качестве основной фазы гелевых комплексов. Эмульгирование может осуществляться с использованием высокоэнергетического и низкоэнергетического подходов для получения микро- или наноэмульсий (de Souza Simões et al., 2017). Гомогенизация под высоким давлением играет важнейшую роль в контроле размера молекул, индекса полидисперсности, дзета-потенциала, сохранения биоактивности и стабильности эмульсий (Piorkowski & McClements, 2014). Однако методы высокоэнергетического эмульгирования требуют сложного оборудования и больших затрат энергии (Joye & McClements, 2014).

Стратегии низкоэнергетического эмульгирования, такие как инверсия фаз и свободное эмульгирование, являются эффективными, экономичными и не требуют специального оборудования. Однако методы низкоэнергетического эмульгирования позволяют использовать только небольшое количество масла и поверхностно-активного вещества и требуют более эффективного смачивающего агента.

Комплексная коацервация

Комплексная коацервация — это простой и один из наиболее часто используемых методов микро- и наноинкапсуляции. В зависимости от количества используемых биополимеров метод подразделяется на простую комплексную коацервацию с использованием одного биополимера и сложную комплексную коацервацию с использованием двух или более биополимеров. Сложное коацерватное осаждение обладает более высокой функциональностью, чем простое коацерватное осаждение, поэтому сложное коацерватное осаждение является

лучшим выбором для пищевой и фармацевтической промышленности (de Souza Simões et al., 2017; Yuan et al., 2017).

Функциональные назначения гелевых комплексов

Прежде чем проектировать гелевый комплекс для создания пищевого продукта или системы таргетной (целенаправленной, «умной») доставки пищевых веществ, необходимо ответить на вопрос: для чего он необходим? Ответ на этот вопрос следующий: дизайн гелевых комплексов чрезвычайно разнообразный и соответствует конкретной цели. Так, например, современная пищевая промышленность нуждается в эффективных стратегиях для разработки низкокалорийных продуктов с желаемыми сенсорными свойствами. Многие продукты на жировой основе имеют относительно высокую калорийность, поэтому в настоящее время особое внимание исследователей уделяется разработке эффективных стратегий по снижению калорийности продуктов питания. Вторым направлением исследований является важность того, что существует множество биологически активных соединений (полифенолы, эфирные масла, пигменты и др.), которые подвержены разрушению в условиях окружающей среды под воздействием внешних факторов, и для их лучшей сохранности требуется разработка и использование различных способов микроинкапсулирования. Третья причина разработки заключается в том, что некоторые активные соединения необходимо доставлять к определенному месту их действия. Для транспортировки таких компонентов к месту назначения и защиты их от агрессивной среды используются материалы-носители или пленочные покрытия. Среди других применений можно упомянуть улучшение обработки и хранения, маскировку специфического вкуса и запаха, продление срока годности продуктов и улучшение их сенсорных свойств. Существует множество перспективных аспектов применения гелевых комплексов для решения таких задач, как способность встраиваться в пищевую матрицу без ущерба для качества; способность защищать функциональные соединения от химической, физической или биологической деградации; маскировать посторонние привкусы; доставлять биологически активные вещества к определенному месту действия, где они проявляют активность; улучшать хранение, транспортировку и использование; продлевать срок хранения.

Гелевые комплексы активно разрабатывают для инкапсулирования, транспортировки, защиты и высвобождения функциональных или биологически активных соединений, таких как ароматизаторы, ферменты, противомикробные, антиоксидантные, биологически активные питательные вещества, минералы, пробиотики и т. д. (Saifullah et al., 2019; Li et al., 2021; Li et al., 2022; Saqib & Tanver Rahman, 2022; Ильина и др., 2023; Тихонов & Тихонова, 2023). Так, например, концепция инкапсуляции развивалась в пищевой науке с тех пор, как стало понятно, что многие пищевые компоненты невозможно использовать в качестве прямой добавки из-за низкой стабильности или негативного влияния на вкусовые ощущения. Кроме того, некоторые функциональные компоненты также должны попадать в целевую область, преодолевая агрессивную пищеварительную среду. В то же время некоторые компоненты необходимо модифицировать для длительного хранения или удобства транспортировки. Коллоидные частицы выводят концепцию инкапсуляции на новый уровень.

Таким образом, гелевые комплексы могут быть предпочтительнее некоторых традиционных систем по следующим причинам:

- (1) **Безопасность.** Гелевые комплексы обычно изготавливают с использованием натуральных пищевых гидроколлоидов. Таким образом, они являются безопасными, биосовместимыми и нетоксичными и обычно не вступают в реакцию с функциональным инкапсулированным компонентом (Barbosa-Núñez et al., 2025).
- (2) **Привлекательность.** После обеспечения безопасности первое, что важно для потребителя это привлекательная текстура и вкус. В этом отношении гелевые комплексы являются универсальными, поскольку их возможно изготовить с любой желаемой текстурой, размером, формой или цветом, и обладающими требуемыми качествами, которые способствуют повышению потребительской привлекательности (Stribițcaia et al., 2020).
- (3) **Особые требования.** Поскольку в настоящее время производство продуктов питания должно рассматриваться в глобальном масштабе, необходимо соблюдать особые требования, такие как халяль или кошерность. Большинство гелевых комплексов изготавливаются из широкого спектра натуральных ги-

дроколлоидов, которые соответствуют этим нормам (Seisun & Zalesny, 2021).

- (4) Таргетная доставка. Гелевые комплексы можно легко сконструировать для целенаправленной доставки в желудок, кишечник или толстую кишку, их можно изготовить для поддержания различных условий в пищеварительном тракте (Wong et al., 2021).
- (5) Простое изготовление. Хотя для производства некоторых гелевых комплексов требуются специальные и сложные способы изготовления, большинство гелевых комплексов можно производить без использования дорогостоящего оборудования или высокотехнологичных процессов. Для их изготовления с универсальными инкапсулянтами можно использовать стандартные технологии пищевой промышленности (Anandharamakrishnan, 2014).
- (6) Разнообразие. Одни и те же гелевые комплексы могут быть предназначены для транспортировки различных функциональных ингредиентов. Система может эффективно инкапсулировать как низкомолекулярные, так и высокомолекулярные соединения (Joye & McClements, 2014).
- (7) Контролируемое высвобождение. Высвобождение материалов из гелевых комплексов можно легко контролировать. Всасывание в кишечнике требует медленного, продолжительного высвобождения, в то время как восприятие вкуса требует быстрого высвобождения в ротовой полости (Ağagündüz et al., 2023).
- (8) Выживаемость. Гелевые комплексы могут защищать активные вещества во время обработки, приготовления пищи или в агрессивной среде желудка. Биоактивные соединения могут быть защищены от агрессивной внешней среды за счет повышения биодоступности молекул в матрице геля, вводимых перорально (Corstens et al., 2017).
- (9) Транспортировка и хранение. Гелевые комплексы можно легко транспортировать и хранить, поскольку они сохраняют форму благодаря достаточной прочности (Joye & McClements, 2014).

Тенденции и пробелы в исследованиях

За период 2001–2025 гг. наблюдается смещение от разработки и использования одиночных гидроколлоидных матриц к комбинированным системам (белок–полисахарид), что отражает тенденцию к более тонкой настройке профиля высвобождения и механической стабильности.

При разработке гелевых комплексов необходимо учитывать основные принципы изготовления:

- (1) Состав гелевых комплексов. Наиболее важным параметром, который необходимо учитывать при разработке гелевых комплексов, является их состав. Он определяет как реагирует система доставки, насколько эффективно она работает, как реагируют промежуточные продукты расщепления, от него зависят стабильность и чувствительность активного вещества и матрицы доставки, как матрица диссоциирует и реагирует в различных условиях (например, при изменении температуры, pH, воздействии ферментов). Наряду с этими факторами, обусловленными регулированием и безопасностью, необходимо учесть условия хранения, маркировку, сертификацию, а также маркетинговые требования — в частности, соответствие религиозным и этическим стандартам (халяль, кошерность, вегетарианство).
- (2) Механизмы высвобождения. Гелевые комплексы могут иметь множество различных профилей высвобождения в зависимости от конкретной цели, такие как мгновенное высвобождение, длительное высвобождение, инициированное высвобождение и целенаправленное высвобождение (McClements, 2017).
- (3) Структура и размер. Гелевые комплексы обычно имеют сферическую форму, но могут принимать и другие конфигурации — грушевидную, цилиндрическую или неправильную (Cao & Mezzenga, 2020). В зависимости от назначения гелевые комплексы могут иметь размер от микрометров до нескольких миллиметров. Очень важны съедобные гелевые комплексы, специально разработанные для эстетических целей или в качестве модификатора текстуры.
- (4) Биосовместимость гелевых комплексов. Биосовместимость и биодоступность гелевых комплексов очень сложны и значимы. В процессе пищеварения человека могут участвовать сот-

ни факторов. На основе составов гелевых комплексов на среду желудочно-кишечного тракта могут влиять ионная сила, pH, поверхностный заряд, электрические потенциалы, ферменты, поведение при движении, внутренние силы, связывание с биологической поверхностью и т. д. (Kharkar et al., 2013; Redaelli et al., 2017).

- (5) Стабильность гелевых комплексов. Изготовленные гелевые комплексы должны быть стабильными вплоть до места назначения — от ротовой полости до толстого кишечника (Đorđević et al., 2014). Например, если гелевый комплекс предназначен для текстурного профиля, он должен сохранять свою текстуру во время обработки в ротовой полости, при хранении, замораживании или в осмотической среде; если он предназначен для функционирования в толстом кишечнике, он должен выдерживать обработку в полости рта, желудочную среду или переваривание в кишечнике (Shahidi et al., 2020).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный обзор показал, что исследования гелевых комплексов для инкапсулирования антоцианов формируют устойчивое, но методологически неоднородное предметное поле, в котором доминируют твердые и жидконаполненные гелевые структуры на основе пищевых гидроколлоидов. Полученные данные подтверждают, что наиболее широко применяются мальтодекстрин, сывороточный протеин и изолят соевого белка, причем в последние годы наблюдается отчетливый сдвиг в сторону комбинированных белково-полисахаридных матриц.

Данная тенденция согласуется с выводами McClements (2017) и Cao и Mezzenga (2020), которые рассматривают мультикомпонентные биополимерные системы как ключевой инструмент управления механическими и диффузионными свойствами гелевых носителей. Аналогичные выводы представлены в работах Ching et al. (2017) и Saqib et al. (2022), где подчеркивается, что комбинации белков и полисахаридов позволяют достигать более высокой эффективности инкапсуляции и стабильности биоактивных соединений по сравнению с одиночными гидроколлоидами. Настоящий обзор дополняет эти положения конкретизацией применительно к антоцианам, показывая, какие именно

сочетания матриц оказываются наиболее результативными в условиях пищевых систем.

В то же время, в отличие от ряда предыдущих обзоров, ориентированных на широкие классы биоактивных соединений (McClements, 2017; Joye & McClements, 2014), результаты настоящей работы демонстрируют, что для антоцианов критическую роль играет не только состав матрицы, но и способ её формирования. Так, экструзия, широко рекомендуемая как универсальная технология (Kuo & Ma, 2001; Levic et al., 2014), в случае антоцианов оказывается ограниченной из-за крупного размера частиц и пористой структуры, способствующей ускоренной деградации пигментов. Напротив, лиофилизация и коацервация, несмотря на более высокую технологическую сложность, обеспечивают более стабильные системы, что подтверждается данными Madene et al. (2006) и Yuan et al. (2017).

Сопоставление отечественных и зарубежных исследований выявляет различия в исследовательских акцентах. В российских работах преобладают пектиновые, крахмальные и желатиновые матрицы, что соответствует сырьевой и регуляторной специфике, тогда как зарубежные исследования чаще используют хитозан, каррагинан и зеин, а также активно развивают направления двойной инкапсуляции и наноструктурированных гелевых систем (Fernandes et al., 2020; Huang et al., 2023). Подобная асимметрия подтверждает выводы Seisun и Zalesny (2021) о региональной дифференциации подходов к проектированию пищевых коллоидных систем.

С теоретической точки зрения полученные результаты поддерживают концепцию гелевых комплексов как адаптивных платформ доставки, сформулированную Wong et al. (2021), в которой ключевыми параметрами являются не отдельные свойства геля, а их системная совокупность: состав, структура, размер, биосовместимость и профиль высвобождения. В практическом контексте это означает, что разработка гелевых комплексов для антоцианов должна рассматриваться не как подбор отдельного гидроколлоида, а как многоэтапный процесс инженерного проектирования системы доставки.

Вместе с тем обзор выявил ряд методологических ограничений существующих исследований. Во-первых, большинство работ оценивают либо стабильность антоцианов, либо технологические параметры

гелей, но редко объединяют эти показатели с анализом биодоступности, что ранее отмечалось также Corstens et al. (2017) и Shahidi et al. (2020). Во-вторых, гелевые комплексы преимущественно исследуются в модельных системах, тогда как данные по их поведению в реальных пищевых матрицах остаются фрагментарными. В-третьих, вопросы масштабирования и экономической эффективности технологий практически не обсуждаются, несмотря на их ключевое значение для промышленного внедрения.

Таким образом, результаты настоящего обзора позволяют рассматривать гелевые комплексы для инкапсулирования антоцианов как перспективное, но ещё не полностью консолидированное направление пищевых технологий. Дальнейшие исследования должны быть ориентированы на интеграцию технологических, физиологических и регуляторных аспектов, что позволит перейти от лабораторных демонстраций эффективности к созданию воспроизводимых, промышленно применимых систем доставки натуральных пигментов.

Ограничения

Следует отметить ряд ограничений настоящего обзора, которые необходимо учитывать при интерпретации полученных результатов.

Во-первых, поисковая стратегия была ограничена публикациями, индексируемыми в базах РИНЦ, PubMed, ScienceDirect, Scopus и Google Scholar, а также русско- и англоязычными источниками. Это могло привести к неполному охвату исследований, опубликованных в региональных или специализированных базах данных, а также на других языках, что потенциально ограничивает репрезентативность картины предметного поля.

Во-вторых, в обзор были включены работы с высокой методологической и технологической гетерогенностью: различались типы гелевых комплексов, состав матриц, методы получения, источники антоцианов и критерии оценки эффективности. В связи с этим не проводилась формализованная оценка методологического качества отдельных исследований, а синтез данных носил преимущественно описательно-аналитический характер. Это ограничивает возможность прямого количественного сопоставления результатов между отдельными публикациями.

В-третьих, фокус обзора был сознательно ограничен системами для инкапсулирования антоцианов, что повышает глубину анализа для данного класса биоактивных соединений, но одновременно снижает переносимость выводов на другие полифенольные соединения и функциональные ингредиенты без дополнительных уточняющих исследований.

В-четвертых, большинство включенных работ основаны на *in vitro*-оценке стабильности, высвобождения и физико-химических свойств гелевых комплексов, тогда как данные по биодоступности, физиологическому эффекту и поведению систем в реальных пищевых матрицах представлены фрагментарно. Это ограничивает возможность экстраполяции лабораторных результатов на практику разработки функциональных продуктов.

В-пятых, обзор не включал отдельный анализ экономических и регуляторных аспектов масштабирования технологий (стоимость процессов, энергетические затраты, соответствие нормативным требованиям), что является важным фактором при переходе от экспериментальных разработок к промышленному внедрению.

Таким образом, настоящий обзор следует рассматривать как систематизированное картирование современного состояния исследований в области гелевых комплексов для инкапсулирования антоцианов, а не как окончательную количественную оценку эффективности отдельных технологических решений. Указанные ограничения не снижают научной ценности обзора, но определяют направления его дальнейшего расширения и углубления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный обзор российских и зарубежных исследований, посвященных гелевым комплексам для инкапсулирования функциональных пищевых ингредиентов (на примере антоцианов), показал, что поле находится на этапе перехода от единичных гидроколлоидных матриц к комбинированным биополимерным системам и более сложным технологиям формирования гелевых структур. С практической точки зрения совокупность выявленных решений подтверждает, что гелевые комплексы на основе пищевых гидроколлоидов являются одним из наиболее перспективных инструментов для

стабилизации натуральных растительных пигментов, интеграции антоцианов в реальные пищевые матрицы и проектирования продуктов функционального назначения без отказа от требований clean label¹ и безопасности. Дальнейшие исследования, на наш взгляд, должны быть сфокусированы на интеграции гелевых комплексов в реальные

технологические процессы (оценка масштабируемости и экономической эффективности), на сопряжении данных о структурных характеристиках и стабильности антоцианов с *in vivo*-показателями биодоступности, а также на комплексной оценке сенсорных свойств продуктов с инкапсулированными пигментами.

ЛИТЕРАТУРА

- Дейнека, В.И., Кульченко, Я.Ю., Блинова, И.П., Чулков, А.Н., & Дейнека, Л.А. (2018). Антоцианы листьев базилика: определение и получение сухих инкапсулированных форм. *Химия растительного сырья*, (1), 129–135. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018013296>
- 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.
- Кульченко, Я.Ю., Дейнека, В.И., Дейнека, Л.А., & Блинова, И.П. (2017). Получение разноцветных инкапсулированных форм антоцианов краснокочанной капусты методом лиофильной сушки. *Тонкие химические технологии*, 6(12), 32–38.
- Неповинных, Н.В., & Петрова, О.Н. (2025). Пищевые гидроколлоиды: классификация, функциональные свойства и применение. *Пищевые системы*, 1(8), 66–72. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-66-72>
- Сагитова, Г.Р., Середа, В.М., Данилова, А.И., Шульдайс, В.А., Ключева, Н.В., & Темерев, И.А. (2024). Диетотерапия функциональных расстройств пищеварения у детей первого года жизни: оценка клинической эффективности смеси, содержащей камедь бобов рожкового дерева. *Лечащий врач*, 9(27), 18–25. <https://doi.org/10.51793/OS.2024.27.9.002>
- Тешаев, Х.И., Бобокалонов, Д.Т., Джонмуродов, А.С., Мухидинов, З.К., Касымова, Г.Ф., & Лиу, Л.С. (2011). Пектин-зеиновые гели для инкапсулирования лекарственных средств и пищевых ингредиентов. *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*, 11(54), 97–100.
- Тихонов, С.Л., & Тихонова, Н.В. (2023). Инкапсуляция биопептида для обеспечения стабильности под действием пептидаз. *Научно-технический вестник: Технические системы в АПК*, 3(19), 10–14.
- Шатабаева, Э.О., Мун, Г.А., Шайхутдинов, Е.М., & Хуторянский, В.В. (2020). Желатин: источники, получение и применение в пищевой промышленности и биомедицине. *Вестник Казахского национального университета. Серия химическая*, 3(98), 28–46. <https://doi.org/10.15328/cb1112>
- Ağaçindüz, D., Özata-Uyar, G., Kocaadam-Bozkurt, B., Özturan-Şirin, A., Capasso, R., Al-Assaf, S., & Özoğul, F. (2023). A comprehensive review on food hydrocolloids as gut modulators in the food matrix and nutrition: The hydrocolloid-gut-health axis. *Food Hydrocolloids*, 145, Article 109068. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109068>
- Aguilera, B. Protein gels (2004). Yuda R.Y. (Ed.), *Proteins in food processing*. New York: Woodhead Publishing Limited and CRC Press.
- Anal, A.K., & Singh, H. (2007). Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery. *Trends in Food Science and Technology*, 5(18), 240–251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.01.004>

¹ *Clean label* — международный термин, обозначающий концепцию производства пищевых продуктов с минимальным количеством ингредиентов, без синтетических добавок, искусственных красителей, ароматизаторов и технологических модификаторов, с акцентом на натуральность состава, прозрачность маркировки и понятность для потребителя.

- Anandharamkrishnan, C. (2014). *Techniques for nanoencapsulation of food ingredients*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9387-7>
- Barbosa-Nuñez, J.A., Espinosa-Andrews, H., Cardona, A.A.V., & Haro-González, J.N. (2025). Polymer based encapsulation in food products: A comprehensive review of applications and advancements. *Journal of Future Foods*, 1(5), 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.01.003>
- BeMiller, J.N. (2019). *Carrageenans. Carbohydrate chemistry for food scientists* (3rd ed.). AACC International Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812069-9.00013-3>
- Bhattacharya, S., & Jena, R. (2007). Gelling behavior of defatted soybean flour dispersions due to microwave treatment: Textural, oscillatory, microstructural and sensory properties. *Journal of Food Engineering*, 4(78), 1305–1314. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.038>
- Bremond, N., Santanach-Carreras, E., Chu, L.Y., & Bibette, J. (2010). Formation of liquid-core capsules having a thin hydrogel membrane: Liquid pearls. *Soft Matter*, 6(11), 2484–2488. <https://doi.org/10.1039/b923783f>
- Cao, L., Lu, W., Mata, A., Nishinari, K., & Fang, Y. (2020). Egg-box model-based gelation of alginate and pectin: A review. *Carbohydrate Polymers*, 242, Article 116389. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116389>
- Cao, Y., & Mezzenga, R. (2020). Design principles of food gels. *Nature Food*, 1(2), 106–118. <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0009-x>
- Chen, Z., Wang, C., Gao, X., Chen, Y., Santhanam, R.K., & Wang, C. (2019). Interaction characterization of preheated soy protein isolate with cyanidin-3-O-glucoside and their effects on the stability of black soybean seed coat anthocyanins extracts. *Food Chemistry*, 271, 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.170>
- Chen, L., Yokoyama, W., Liang, R., & Zhong, F. (2020). Enzymatic degradation and bioaccessibility of protein encapsulated β -carotene nano-emulsions during in vitro gastro-intestinal digestion. *Food Hydrocolloids*, 100, Article 105177. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105177>
- Chen, X., Liang, R., Zhong, F., Ma, J., John, N.-A., Goff, H.D., & Yokoyama, W.H. (2021). Effect of high concentrated sucrose on the stability of OSA-starch-based beta-carotene microcapsules. *Food Hydrocolloids*, 113, Article 105472. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105472>
- Ching, S.H., Bansal, N., & Bhandari, B. (2017). Alginate gel particles—A review of production techniques and physical properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 6(57), 1133–1152. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.965773>
- Corstens, M.N., Berton-Carabin, C.C., Elichiry-Ortiz, P.T., Hol, K., Troost, F.J., Masclee, A.A.M., & Schroën, K. (2017). Emulsion-alginate beads designed to control in vitro intestinal lipolysis: Towards appetite control. *Journal of Functional Foods*, 34, 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.05.003>
- Dakia, P.A., Wathelet, B., & Paquot, M. (2007). Isolation and chemical evaluation of carob (*Ceratonia siliqua* L.) seed germ. *Food Chemistry*, 4(102), 1368–1374. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.059>
- Davarcı, F., Turan, D., Ozcelik, B., & Poncelet, D. (2017). The influence of solution viscosities and surface tension on calcium-alginate microbead formation using dripping technique. *Food Hydrocolloids*, 62, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.029>
- Déat-Lainé, E., Hoffart, V., Cardot, J.M., Subirade, M., & Beyssac, E. (2012). Development and in vitro characterization of insulin loaded whey protein and alginate microparticles. *International Journal of Pharmaceutics*, 1–2(439), 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2012.10.003>
- Đorđević, V., Balanč, B., Belščak-Cvitanović, A., Lević, S., Trifković, K., Kalušević, A., & Nedović, V. (2014). Trends in encapsulation technologies for delivery of food bioactive compounds. *Food Engineering Reviews*, 7. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9106-7>
- Du, Q., Zhou, L., Lyu, F., Liu, J., & Ding, Y. (2022). The complex of whey protein and pectin: Interactions, functional properties and applications in food colloidal systems – A review. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 210, Article 112253. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.112253>

- Eltayeb, I.B., Awad, A.I., Elderbi, M.A., & Shadad, S.A. (2004). Effect of gum arabic on the absorption of a single oral dose of amoxicillin in healthy Sudanese volunteers. *The Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 2(54), 577-578. <https://doi.org/10.1093/jac/dkh372>
- Enache, I.M., Vasile, A.M., Enachi, E., Barbu, V., Stanciuc, N., & Vizireanu, C. (2020). Co-microencapsulation of anthocyanins from black currant extract and lactic acid bacteria in biopolymeric matrices. *Molecules*, 25, 1700. <https://doi.org/10.3390/molecules25071700>
- Ergun, R., Guo, J., & Huebner-Keese, B. (2016). Cellulose. *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 694–702). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00127-6>
- Eskin, M., Ikeda, S., & Cui, S. (2007). Seed polysaccharide gums. Biliaderis C.G., Izydorczyk M.S. (Eds.), *Functional food carbohydrates* (pp. 127–165). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420003512.ch4>
- Feng, W., Yue, C., Wusigale, Yingzhou, Ni, & Liang, L. (2018). Preparation and characterization of emulsion-filled gel beads for the encapsulation and protection of resveratrol and α -tocopherol. *Food Research International*, 108, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.035>
- Fernandes, L., Pereira, E.L., do Céu Fidalgo, M., Gomes, A., & Ramalhosa, E. (2020). Physicochemical properties and microbial control of chestnuts (*Castanea sativa*) coated with whey protein isolate, chitosan and alginate during storage. *Scientia Horticulturae*, 263, Article 109105. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109105>
- Ferron, L., Milanese, C., Colombo, R., Pugliese, R., & Papetti, A. (2022). Selection and optimization of an innovative polysaccharide-based carrier to improve anthocyanins stability in purple corn cob extracts. *Antioxidants*, 11, 916. <https://doi.org/10.3390/antiox11050916>
- García-Ochoa, F., Santos, V.E., Casas, J.A., & Gómez, E. (2000). Xanthan gum: Production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*, 7(18), 549–579. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1)
- Goff, H.D., & Guo, Q. (2020). The role of hydrocolloids in the development of food structure. In N. Fotis, A. Spyropoulos, & I. Lazidis (Eds.), *Handbook of food structure development* (pp. 1–28). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781788016155-00001>
- Gómez-Mascaraque, L.G., Martínez-Sanz, M., Hogan, S.A., López-Rubio, A., & Brodkorb A. (2019). Nano- and microstructural evolution of alginate beads in simulated gastrointestinal fluids. Impact of M/G ratio, molecular weight and pH. *Carbohydrate Polymers*, 223, 1:223:115121. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115121>
- Gumus, C.E., Decker, E.A., & McClements, D.J. (2017). Formation and stability of ω -3 oil emulsion-based delivery systems using plant proteins as emulsifiers: Lentil, pea, and faba bean proteins. *Food Biophysics*, 2(12), 186–197. <https://doi.org/10.1007/s11483-017-9475-6>
- Günter, E.A., & Popeyko, O.V. (2016). Calcium pectinate gel beads obtained from callus cultures pectins as promising systems for colon-targeted drug delivery. *Carbohydrate Polymers*, 147, 490–499. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.026>
- Guo, L., Yokoyama, W., Chen, M., & Zhong, F. (2021). Konjac glucomannan molecular and rheological properties that delay gastric emptying and improve the regulation of appetite. *Food Hydrocolloids*, 120, Article 106894. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106894>
- Hamed, S.F., Hashim, A.F., Abdel Hamid, H.A., Abd-Elsalam, K.A., Golonka, I., Musiał, W., & El-Sherbiny, I.M. (2020). Edible alginate/chitosan-based nanocomposite microspheres as delivery vehicles of Omega-3 rich oils. *Carbohydrate Polymers*, 239, Article 116201. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116201>
- Hariyadi, D.M., & Islam, N. (2020). Current status of alginate in drug delivery. *Advances in Pharmacological and Pharmaceutical Sciences*, 6, Article 8886095. <https://doi.org/10.1155/2020/8886095>
- Huang, Y., Zhan, Y., Luo, G., Zeng, Y., McClements, D.J., & Hu, K. (2023). Curcumin encapsulated zein/caseinate-alginate nanoparticles: Release and antioxidant activity under *in vitro* simulated gastrointestinal digestion. *Current Research in Food Science*, 6, Article 100463. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100463>

- Hundre, S.Y., Karthik, P., & Anandharamakrishnan, C. (2016). Effect of whey protein isolate and β -cyclodextrin wall systems on stability of microencapsulated vanillin by spray-freeze drying method. *Food Chemistry*, 174, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.016>
- Ibrahim, S., Riahi, O., Said, S.M., Sabri, M.F.M., & Rozali, S. (2019). Biopolymers from crop plants. In *Reference module in materials science and materials engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11573-5>
- Joye, I.J., & McClements, D.J. (2014). Biopolymer-based nanoparticles and microparticles: Fabrication, characterization, and application. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 5(19), 417–427. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2014.07.002>
- Karimi, S., & Namazi, H. (2022). Magnetic alginate/glycodendrimer beads for efficient removal of tetracycline and amoxicillin from aqueous solutions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 205, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.066>
- Keppeler, S., Ellis, A., & Jacquier, J.C. (2009). Cross-linked carrageenan beads for controlled release delivery systems. *Carbohydrate Polymers*, 4(78), 973–977. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.029>
- Kharkar, P.M., Kiick, K.L., & Kloxin, A.M. (2013). Designing degradable hydrogels for orthogonal control of cell microenvironments. *Chemical Society Reviews*, 42(17), 7335–7372. <https://doi.org/10.1039/c3cs60040h>
- Kulig, D., Zimoch-Korzycka, A., Jarmoluk, A., & Marycz, K. (2016). Study on alginate–chitosan complex formed with different polymers ratio. *Polymers*, 8(5), 167. <https://doi.org/10.3390/polym8050167>
- Kuo, C.K., & Ma, P.X. (2001). Ionically crosslinked alginate hydrogels as scaffolds for tissue engineering: Part 1. Structure, gelation rate and mechanical properties. *Biomaterials*, 22, 511–521. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(00\)00201-5](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(00)00201-5)
- Kurbanov, G.F., Prichepa, A.O., & Sharova, N.Yu. (2024). Xanthan gum: secondary raw materials for biosynthesis, isolation and application. *Food Systems*, 4(7), 515–522. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-4-515-522>
- Kusherova, P.T., Yerzhanov, Y.B., Tleugalieva, Z.A., Khaldun, A., Aidarova, S.B., & Mohammad, A.B. (2024). Stability study of emulsions based on modified xanthan gum. *Complex Use of Mineral Resources*, 1(328), 42–49. <https://doi.org/10.31643/2024/6445.05>
- Larosa, C., Salerno, M., de Lima, J.S., Merijs Meri, R., da Silva, M.F., de Carvalho, L.B., & Converti, A. (2018). Characterisation of bare and tannase-loaded calcium alginate beads by microscopic, thermogravimetric, FTIR and XRD analyses. *International Journal of Biological Macromolecules*, 115, 900–906. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.138>
- Leela, J.K., & Sharma, G. (2000). Studies on xanthan production from *Xanthomonas campestris*. *Bioprocess Engineering*, 6(23), 687–689. <https://doi.org/10.1007/s004499900054>
- Lević, S., Nedović, V., Pajić Lijaković, I., Šolević Knudsen, T., Pavlović, V., Đorđević, V., & Rac, V. (2014). Characterization of sodium alginate/d-limonene emulsions and respective calcium alginate/d-limonene beads produced by electrostatic extrusion. *Food Hydrocolloids*, 45, 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.10.001>
- Li, Z., Behrens, A.M., Ginat, N., Tzeng, S.Y., Lu, X., Sivan, S., & Jaklenec, A. (2018). Biofilm-inspired encapsulation of probiotics for the treatment of complex infections. *Advanced Materials*, 30(51), 1–7. <https://doi.org/10.1002/adma.201803925>
- Li, D., Wei, Z., & Xue, C. (2021). Alginate-based delivery systems for food bioactive ingredients: An overview of recent advances and future trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 5345–5369. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12840>
- Li, H., Wang, T., Hu, Y., Wu, J., & Van der Meer, P. (2022). Designing delivery systems for functional ingredients by protein/polysaccharide interactions. *Trends in Food Science and Technology*, 119, 272–287. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.007>
- Lin, D., Kelly, A.L., & Miao, S. (2020). Preparation, structure-property relationships and applications of different emulsion gels: Bulk emulsion gels, emulsion gel particles, and fluid emulsion gels. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.024>

- Lin, D., Kelly, A.L., Maidannyk, V., & Miao, S. (2020). Effect of concentrations of alginate, soy protein isolate and sunflower oil on water loss, shrinkage, elastic and structural properties of alginate-based emulsion gel beads during gelation. *Food Hydrocolloids*, 108, Article 105998. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105998>
- Liu, L., Fishman, M.L., Hicks, K.B., Kende, M., & Ruthel, G. (2006). Pectin/Zein beads for potential colon-specific drug delivery: synthesis and in vitro evaluation. *Drug Delivery*, 6(13), 417–423. <https://doi.org/10.1080/10717540500394935>
- Lozano-Vazquez, G., Lobato-Calleros, C., Escalona-Buendia, H., Chavez, G., Alvarez-Ramirez, J., & Vernon-Carter, E.J.J. (2015). Effect of the weight ratio of alginate-modified tapioca starch on the physicochemical properties and release kinetics of chlorogenic acid containing beads. *Food Hydrocolloids*, 4(48), 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.02.032>
- Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., & Desobry, S. (2006). Flavour encapsulation and controlled release - A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 1(41), 1–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x>
- Maleki, G., Woltering, E.J., & Mozafari, M.R. (2022). Applications of chitosan-based carrier as an encapsulating agent in food industry. *Trends in Food Science and Technology*, 120, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.001>
- McClements, D.J. (2017). Recent progress in hydrogel delivery systems for improving nutraceutical bioavailability. *Food Hydrocolloids*, 68, 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.05.037>
- Milea, A.S., Vasile, A.M., Circiumaru, A., Dumitras, cu L., Barbu, V., Rapeanu, G., Bahrim, G.E., & Stanciuc, N. (2019). Valorizations of sweet cherries skins phytochemicals by extraction, microencapsulation and development of value-added food products. *Foods*, 8, 188. <https://doi.org/10.3390/foods8060188>
- Mitchell, J.R., & Hill, S.E. (2021). Starch. *Handbook of Hydrocolloids* (pp. 239–271). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820104-6.00027-9>
- Moser, P., Telis, V.R.N., de Andrade Neves, N., García-Romero, E., Gómez-Alonso, S., & Hermosín-Gutiérrez, I. (2017). Storage stability of phenolic compounds in powdered BRS Violeta grape juice microencapsulated with protein and maltodextrin blends. *Food Chemistry*, 214, 308–318. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.081>
- Nie, G., Zang, Y., Yue, W., Wang, M., Baride, A., Sigdel, A., & Janaswamy, S. (2021). Cellulose-based hydrogel beads: Preparation and characterization. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, Article 100074. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100074>
- Nordgård, C.T., & Draget, K.I. (2021). Alginates. G.O. Phillips, P.A. Williams (Eds.), *Handbook of hydrocolloids* (3rd ed., pp. 805–829). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820104-6.00007-3>
- Perumalla Venkata, R., & Subramanyam R. (2016). Evaluation of the deleterious health effects of consumption of repeatedly heated vegetable oil. *Toxicology Reports*, 3, 636–643. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2016.08.003>
- Piorkowski, D.T., & McClements, D.J. (2014). Beverage emulsions: Recent developments in formulation, production, and applications. *Food Hydrocolloids*, 42, 5–41. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.009>
- Puguan, J.M.C., Yu, X., & Kim, H. (2014). Characterization of structure, physico-chemical properties and diffusion behavior of Ca-Alginate gel beads prepared by different gelation methods. *Journal of Colloid and Interface Science*, 432, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.06.048>
- Rakhshaei, R., Namazi, H., Hamishehkar, H., & Rahimi, M. (2020). Graphene quantum dot cross-linked carboxymethyl cellulose nanocomposite hydrogel for pH-sensitive oral anticancer drug delivery with potential bioimaging properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 1121–1129. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.118>
- Redaelli, F., Sorbona, M., & Rossi, F. (2017). Synthesis and processing of hydrogels for medical applications. *Bioresorbable polymers for biomedical applications: From fundamentals to translational medicine*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100262-9.00010-0>

- Ribeiro, J.S., & Veloso, C.M. (2021). Microencapsulation of natural dyes with biopolymers for application in food: A review. *Food Hydrocolloids*, 112, Article 106374. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106374>
- Rodríguez, J., Martín, M.J., Ruiz, M.A., & Clares, B. (2016). Current encapsulation strategies for bioactive oils: From alimentary to pharmaceutical perspectives. *Food Research International*, 83, 41–59. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.032>
- Romo, I., Abugoch, L., & Tapia, C. (2020). Soluble complexes between chenopodins and alginate/chitosan: Intermolecular interactions and structural-physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*, 227, Article 115334. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115334>
- Saifullah, M., Shishir, I. M.R., Ferdowsi, R., Tanver Rahman, M.R., & Van Vuong, Q. (2019). Micro and nano encapsulation, retention and controlled release of flavor and aroma compounds: A critical review. *Trends in Food Science and Technology*, 86, 230–251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.030>
- Saqib, M.N., & Tanver Rahman, M.R. (2022). Phenolic acids. In J. Kour & G.A. Nayik (Eds.), *Nutraceuticals and health care* (pp. 303–316). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89779-2.00014-4>
- Saqib, M.N., Ahammed, S., Liu, F., & Zhong, F. (2022). Customization of liquid-core sodium alginate beads by molecular engineering. *Carbohydrate Polymers*, 284, Article 119047. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.119047>
- Saqib, M.N., Liu, F., Chen, M., Ahammed, S., Liu, X., & Zhong, F. (2022). Thermo-mechanical response of liquid-core beads as affected by alginate molecular structure. *Food Hydrocolloids*, 131, Article 107777. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107777>
- Schrieber R., & Herbert, G. (2007). Practical aspects. In *Gelatine Handbook* (1st ed., pp. 119–299). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527610969.ch3>
- Seisun, D., & Zalesny, N. (2021). Strides in food texture and hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*, 117, Article 106575. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106575>
- Shaddel, R., Hesari, J., Azadmard-Damirchi, S., Hamishehkar, H., Fathi-Achachlouei, B., & Huang, Q. (2017). Use of gelatin and gum Arabic for encapsulation of black raspberry anthocyanins by complex coacervation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 1800–1810. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.044>
- Sharma, M., Sharma, V., & Majumdar, D.K. (2014). Entrapment of α -amylase in agar beads for biocatalysis of macromolecular substrate. *International Scholarly Research Notices*, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/936129>
- Shahidi, F., Ambigaipalan, P., Abad, A., & Pegg, R.B. (2020). Food and bioactive encapsulation. Handbook of food preservation (pp. 529–596). Publisher Taylor & Francis Group, LLC. <https://doi.org/10.1201/9780429091483-38>
- Souza Simões, L., Madalena, D.A., Pinheiro, A.C., Teixeira, J.A., Vicente, A.A., & Ramos, Ó.L. (2017). Micro- and nano bio-based delivery systems for food applications: In vitro behavior. *Advances in Colloid and Interface Science*, 243, 23–45. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.02.010>
- Souza, A.C.P., Gurak, P.D., & Marczak, L.D.F. (2017). Maltodextrin, pectin and soy protein isolate as carrier agents in the encapsulation of anthocyanins-rich extract from jaboticaba pomace. *Food Bioprod Process*, 102, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.12.012>
- Stanciuc, N., Oancea, A.M., Aprodu, I., Turturica, M., Barbu, V., & Ionita, E. (2018). Investigations on binding mechanism of bioactives from elderberry (*Sambucus nigra* L.) by whey proteins for efficient microencapsulation. *Journal of Food Engineering*, 223, 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.019>
- Stanley, N.F. (2006). Agar. Food polysaccharides and their application (2nd ed., pp. 186–204). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420015164>
- Stribițaia, E., Krop, E.M., Lewin, R., Holmes, M., & Sarkar, A. (2020). Tribology and rheology of bead-layered hydrogels: Influence of bead size on sensory perception. *Food Hydrocolloids*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105692>

- Theocharidou, A., Mourtzinou, I., & Ritzoulis, C. (2022). The role of guar gum on sensory perception, on food function, and on the development of dysphagia supplements – A review. *Food Hydrocolloids for Health*, 2, Article 100053. <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2022.100053>
- Tortorella, S., Maturi, M., Vetri Buratti, V., Vozzolo, G., Locatelli, E., Sambri, L., & Comes Franchini, M. (2021). Zein as a versatile biopolymer: Different shapes for different biomedical applications. *RSC Advances*, 11(62), 39004–39026. <https://doi.org/10.1039/D1RA07424E>
- Vityazev, F.V., Khranova, D.S., Saveliev, N.Y., Ipatova, E.A., Burkov, A.A., Beloserev, V.S., & Popov, S.V. (2020). Pectin–glycerol gel beads: Preparation, characterization and swelling behavior. *Carbohydrate Polymers*, 238, Article 116166. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116166>
- Wong, S.K., Lawencia, D., Supramaniam, J., Goh, B.H., Manickam, S., Wong, T.W., & Tang, S.Y. (2021). In vitro digestion and swelling kinetics of thymoquinone-loaded pickering emulsions incorporated in alginate–chitosan hydrogel beads. *Frontiers in Nutrition*, 8, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.752207>
- Yermak, I.M., Gorbach, V.I., Karnakov, I.A., Davydova, V.N., Pimenova, E.A., Chistyulin, D.A., & Glazunov, V.P. (2021). Carrageenan gel beads for echinochrome inclusion: Influence of structural features of carrageenan. *Carbohydrate Polymers*, 272, Article 118479. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118479>
- Yuan, Y., Kong, Z.-Y., Sun, Y.-E., Zeng, Q.-Z., & Yang, X.-Q. (2017). Complex coacervation of soy protein with chitosan: Constructing antioxidant microcapsule for algal oil delivery. *LWT*, 75, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.045>
- Zang, Z., Chou, S., Geng, L., Si, X., Ding, Y., Lang, Y., Cui H., Gao N., Chen Y., Wang M., Xie X., Xue B., & Li B. (2021). Interactions of blueberry anthocyanins with whey protein isolate and bovine serum protein: Color stability, antioxidant activity, in vitro simulation, and protein functionality. *LWT*, 152, Article 112269. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112269>
- Zeeb, B., Saberi, A.H., Weiss, J., & McClements, D.J. (2015). Formation and characterization of filled hydrogel beads based on calcium alginate: Factors influencing nanoemulsion retention and release. *Food Hydrocolloids*, 50, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.02.041>

REFERENCES

- Deineka V.I., Kulchenko Ya.Yu., Blinova I.P., Culkov A.N., Deineka L.A. (2018). Anthocyanins of basil leaves: Determination and preparation of dried encapsulated forms. *Chemistry of Plant Raw Material*, (1), 129–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018013296>
- Ilyina, V.S., Sokolova, O.B., Shuvatova, E.D., Allokh, P., Melchakov, R.M., Lepeshkin, A.I., Aleksandrova, I.V., & Baranenko, D.A. (2023). Method for microencapsulation of oils containing polyunsaturated fatty acids for use in functional food products. *Polzunovskiy Vestnik*, (2), 7–14.
- Kulchenko, Ya.Yu., Deineka, V.I., Deineka, L.A., & Blinova, I.P. (2017). Obtaining red cabbage anthocyanin colored encapsulated forms by the method of freeze-drying. *Fine Chemical Technologies*, 6(12), 32–38. (In Russ.).
- Nepovinnikh, N.V., & Petrova, O.N. (2025). Food hydrocolloids: Classification, functional properties and applications. *Food Systems*, 1(8), 66–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-66-72>
- Sagitova, G.R., Sereda, V.M., Danilova, A.I., Shuldais, V.A., Klyueva, N.V., & Temerev, I.A. (2024). Diet therapy for functional digestive disorders in infants: evaluation of the clinical efficacy of a mixture containing carob bean gum. *General Practitioner*, 9(27), 18–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.51793/OS.2024.27.9.002>
- Teshayev, H.I., Bobokalonov, D.T., Jonmurodov, A.S., Mukhidinov, Z.K., Kasymova, G.F. & Liu, L.S. (2011). Pectin–zein gels for encapsulation of drugs and food ingredients. *ChemChemTech*, 11(54), 97–100. (In Russ.).
- Tikhonov, S.L., & Tikhonova, N.V. (2023). Encapsulation of a biopeptide to ensure stability under the action of peptidases. *Scientific and Technical Bulletin: Technical Systems in the Agro-Industrial Complex*, 3(19), 10–14. (In Russ.).

- Shatabayeva, E.O., Moon, G.A., Shaikhutdinov, E.M., & Khutoryansky, V.V. (2020). Gelatin: Sources, production, and application in the food industry and biomedicine. *Bulletin of the Kazakh National University. Chemical Series*, 3(98), 28–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.15328/cb1112>
- Ağagündüz, D., Özata-Uyar, G., Kocaadam-Bozkurt, B., Özturan-Şirin, A., Capasso, R., Al-Assaf, S., & Özoğul, F. (2023). A comprehensive review on food hydrocolloids as gut modulators in the food matrix and nutrition: The hydrocolloid-gut-health axis. *Food Hydrocolloids*, 145, Article 109068. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109068>
- Aguilera, B. Protein gels (2004). Yuda R.Y. (Ed.), *Proteins in food processing*. New York: Woodhead Publishing Limited and CRC Press.
- Anal, A.K., & Singh, H. (2007). Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery. *Trends in Food Science and Technology*, 5(18), 240–251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.01.004>
- Anandharamkrishnan, C. (2014). *Techniques for nanoencapsulation of food ingredients*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9387-7>
- Barbosa-Nuñez, J.A., Espinosa-Andrews, H., Cardona, A.A.V., & Haro-González, J.N. (2025). Polymer based encapsulation in food products: A comprehensive review of applications and advancements. *Journal of Future Foods*, 1(5), 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.01.003>
- BeMiller, J.N. (2019). Carrageenans. *Carbohydrate chemistry for food scientists* (3rd ed.). AACC International Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812069-9.00013-3>
- Bhattacharya, S., & Jena, R. (2007). Gelling behavior of defatted soybean flour dispersions due to microwave treatment: Textural, oscillatory, microstructural and sensory properties. *Journal of Food Engineering*, 4(78), 1305–1314. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.038>
- Bremond, N., Santanach-Carreras, E., Chu, L.Y., & Bibette, J. (2010). Formation of liquid-core capsules having a thin hydrogel membrane: Liquid pearls. *Soft Matter*, 6(11), 2484–2488. <https://doi.org/10.1039/b923783f>
- Cao, L., Lu, W., Mata, A., Nishinari, K., & Fang, Y. (2020). Egg-box model-based gelation of alginate and pectin: A review. *Carbohydrate Polymers*, 242, Article 116389. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116389>
- Cao, Y., & Mezzenga, R. (2020). Design principles of food gels. *Nature Food*, 1(2), 106–118. <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0009-x>
- Chen, Z., Wang, C., Gao, X., Chen, Y., Santhanam, R.K., & Wang, C. (2019). Interaction characterization of preheated soy protein isolate with cyanidin-3-O-glucoside and their effects on the stability of black soybean seed coat anthocyanins extracts. *Food Chemistry*, 271, 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.170>
- Chen, L., Yokoyama, W., Liang, R., & Zhong, F. (2020). Enzymatic degradation and bioaccessibility of protein encapsulated β -carotene nano-emulsions during in vitro gastro-intestinal digestion. *Food Hydrocolloids*, 100, Article 105177. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105177>
- Chen, X., Liang, R., Zhong, F., Ma, J., John, N.-A., Goff, H.D., & Yokoyama, W.H. (2021). Effect of high concentrated sucrose on the stability of OSA-starch-based beta-carotene microcapsules. *Food Hydrocolloids*, 113, Article 105472. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105472>
- Ching, S.H., Bansal, N., & Bhandari, B. (2017). Alginate gel particles—A review of production techniques and physical properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 6(57), 1133–1152. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.965773>
- Corstens, M.N., Berton-Carabin, C.C., Elichiry-Ortiz, P.T., Hol, K., Troost, F.J., Masclee, A.A.M., & Schroën, K. (2017). Emulsion-alginate beads designed to control in vitro intestinal lipolysis: Towards appetite control. *Journal of Functional Foods*, 34, 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.05.003>
- Dakia, P.A., Wathelet, B., & Paquot, M. (2007). Isolation and chemical evaluation of carob (*Ceratonia siliqua L.*) seed germ. *Food Chemistry*, 4(102), 1368–1374. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.059>
- Davarcı, F., Turan, D., Ozcelik, B., & Poncelet, D. (2017). The influence of solution viscosities and surface tension on calcium-alginate microbead formation using dripping technique. *Food Hydrocolloids*, 62, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.029>

- Déat-Lainé, E., Hoffart, V., Cardot, J.M., Subirade, M., & Beyssac, E. (2012). Development and in vitro characterization of insulin loaded whey protein and alginate microparticles. *International Journal of Pharmaceutics*, 1–2(439), 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2012.10.003>
- Đorđević, V., Balanč, B., Belščak-Cvitanović, A., Lević, S., Trifković, K., Kalušević, A., & Nedović, V. (2014). Trends in encapsulation technologies for delivery of food bioactive compounds. *Food Engineering Reviews*, 7. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9106-7>
- Du, Q., Zhou, L., Lyu, F., Liu, J., & Ding, Y. (2022). The complex of whey protein and pectin: Interactions, functional properties and applications in food colloidal systems – A review. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 210, Article 112253. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.112253>
- Eltayeb, I.B., Awad, A.I., Elderbi, M.A., & Shadad, S.A. (2004). Effect of gum arabic on the absorption of a single oral dose of amoxicillin in healthy Sudanese volunteers. *The Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 2(54), 577–578. <https://doi.org/10.1093/jac/dkh372>
- Enache, I.M., Vasile, A.M., Enachi, E., Barbu, V., Stanciuc, N., & Vizireanu, C. (2020). Co-microencapsulation of anthocyanins from black currant extract and lactic acid bacteria in biopolymeric matrices. *Molecules*, 25, 1700. <https://doi.org/10.3390/molecules25071700>
- Ergun, R., Guo, J., & Huebner-Keese, B. (2016). Cellulose. *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 694–702). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00127-6>
- Eskin, M., Ikeda, S., & Cui, S. (2007). Seed polysaccharide gums. Biliaderis C.G., Izydorczyk M.S. (Eds.), *Functional food carbohydrates* (pp. 127–165). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420003512.ch4>
- Feng, W., Yue, C., Wusigale, Yingzhou, Ni, & Liang, L. (2018). Preparation and characterization of emulsion-filled gel beads for the encapsulation and protection of resveratrol and α -tocopherol. *Food Research International*, 108, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.035>
- Fernandes, L., Pereira, E.L., do Céu Fidalgo, M., Gomes, A., & Ramalhosa, E. (2020). Physicochemical properties and microbial control of chestnuts (*Castanea sativa*) coated with whey protein isolate, chitosan and alginate during storage. *Scientia Horticulturae*, 263, Article 109105. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109105>
- Ferron, L., Milanese, C., Colombo, R., Pugliese, R., & Papetti, A. (2022). Selection and optimization of an innovative polysaccharide-based carrier to improve anthocyanins stability in purple corn cob extracts. *Antioxidants*, 11, 916. <https://doi.org/10.3390/antiox11050916>
- García-Ochoa, F., Santos, V.E., Casas, J.A., & Gómez, E. (2000). Xanthan gum: Production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*, 7(18), 549–579. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1)
- Goff, H.D., & Guo, Q. (2020). The role of hydrocolloids in the development of food structure. In N. Fotis, A. Spyropoulos, & I. Lazidis (Eds.), *Handbook of food structure development* (pp. 1–28). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781788016155-00001>
- Gómez-Mascaraque, L.G., Martínez-Sanz, M., Hogan, S.A., López-Rubio, A., & Brodkorb A. (2019). Nano- and microstructural evolution of alginate beads in simulated gastrointestinal fluids. Impact of M/G ratio, molecular weight and pH. *Carbohydrate Polymers*, 223, 1:223:115121. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115121>
- Gumus, C.E., Decker, E.A., & McClements, D.J. (2017). Formation and stability of ω -3 oil emulsion-based delivery systems using plant proteins as emulsifiers: Lentil, pea, and faba bean proteins. *Food Biophysics*, 2(12), 186–197. <https://doi.org/10.1007/s11483-017-9475-6>
- Günter, E.A., & Popeyko, O.V. (2016). Calcium pectinate gel beads obtained from callus cultures pectins as promising systems for colon-targeted drug delivery. *Carbohydrate Polymers*, 147, 490–499. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.026>
- Guo, L., Yokoyama, W., Chen, M., & Zhong, F. (2021). Konjac glucomannan molecular and rheological properties that delay gastric emptying and improve the regulation of appetite. *Food Hydrocolloids*, 120, Article 106894. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106894>
- Hamed, S.F., Hashim, A.F., Abdel Hamid, H.A., Abd-Elsalam, K.A., Golonka, I., Musiał, W., & El-Sherbiny, I.M. (2020). Edible alginate/chitosan-based nanocomposite microspheres

- as delivery vehicles of Omega-3 rich oils. *Carbohydrate Polymers*, 239, Article 116201. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116201>
- Hariyadi, D.M., & Islam, N. (2020). Current status of alginate in drug delivery. *Advances in Pharmacological and Pharmaceutical Sciences*, 6, Article 8886095. <https://doi.org/10.1155/2020/8886095>
- Huang, Y., Zhan, Y., Luo, G., Zeng, Y., McClements, D.J., & Hu, K. (2023). Curcumin encapsulated zein/caseinate-alginate nanoparticles: Release and antioxidant activity under *in vitro* simulated gastrointestinal digestion. *Current Research in Food Science*, 6, Article 100463. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100463>
- Hundre, S.Y., Karthik, P., & Anandharamakrishnan, C. (2016). Effect of whey protein isolate and β -cyclodextrin wall systems on stability of microencapsulated vanillin by spray-freeze drying method. *Food Chemistry*, 174, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.016>
- Ibrahim, S., Riahi, O., Said, S.M., Sabri, M.F.M., & Rozali, S. (2019). Biopolymers from crop plants. In *Reference module in materials science and materials engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11573-5>
- Joye, I.J., & McClements, D.J. (2014). Biopolymer-based nanoparticles and microparticles: Fabrication, characterization, and application. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 5(19), 417–427. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2014.07.002>
- Karimi, S., & Namazi, H. (2022). Magnetic alginate/glycodendrimer beads for efficient removal of tetracycline and amoxicillin from aqueous solutions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 205, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.066>
- Keppeler, S., Ellis, A., & Jacquier, J.C. (2009). Cross-linked carrageenan beads for controlled release delivery systems. *Carbohydrate Polymers*, 4(78), 973–977. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.029>
- Kharkar, P.M., Kiick, K.L., & Kloxin, A.M. (2013). Designing degradable hydrogels for orthogonal control of cell microenvironments. *Chemical Society Reviews*, 42(17), 7335–7372. <https://doi.org/10.1039/c3cs60040h>
- Kulig, D., Zimoch-Korzycka, A., Jarmoluk, A., & Marycz, K. (2016). Study on alginate–chitosan complex formed with different polymers ratio. *Polymers*, 8(5), 167. <https://doi.org/10.3390/polym8050167>
- Kuo, C.K., & Ma, P.X. (2001). Ionically crosslinked alginate hydrogels as scaffolds for tissue engineering: Part 1. Structure, gelation rate and mechanical properties. *Biomaterials*, 22, 511–521. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(00\)00201-5](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(00)00201-5)
- Kurbanov, G.F., Prichepa, A.O., & Sharova, N.Yu. (2024). Xanthan gum: secondary raw materials for biosynthesis, isolation and application. *Food Systems*, 4(7), 515–522. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-4-515-522>
- Kusherova, P.T., Yerzhanov, Y.B., Tleugalieva, Z.A., Khaldun, A., Aidarova, S.B., & Mohammad, A.B. (2024). Stability study of emulsions based on modified xanthan gum. *Complex Use of Mineral Resources*, 1(328), 42–49. <https://doi.org/10.31643/2024/6445.05>
- Larosa, C., Salerno, M., de Lima, J.S., Merijs Meri, R., da Silva, M.F., de Carvalho, L.B., & Converti, A. (2018). Characterisation of bare and tannase-loaded calcium alginate beads by microscopic, thermogravimetric, FTIR and XRD analyses. *International Journal of Biological Macromolecules*, 115, 900–906. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.138>
- Leela, J.K., & Sharma, G. (2000). Studies on xanthan production from *Xanthomonas campestris*. *Bioprocess Engineering*, 6(23), 687–689. <https://doi.org/10.1007/s004499900054>
- Lević, S., Nedović, V., Pajić Lijaković, I., Šolević Knudsen, T., Pavlović, V., Đorđević, V., & Rac, V. (2014). Characterization of sodium alginate/d-limonene emulsions and respective calcium alginate/d-limonene beads produced by electrostatic extrusion. *Food Hydrocolloids*, 45, 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.10.001>
- Li, Z., Behrens, A.M., Ginat, N., Tzeng, S.Y., Lu, X., Sivan, S., & Jaklenec, A. (2018). Biofilm-inspired encapsulation of probiotics for the treatment of complex infections. *Advanced Materials*, 30(51), 1–7. <https://doi.org/10.1002/adma.201803925>

- Li, D., Wei, Z., & Xue, C. (2021). Alginate-based delivery systems for food bioactive ingredients: An overview of recent advances and future trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 5345–5369. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12840>
- Li, H., Wang, T., Hu, Y., Wu, J., & Van der Meeren, P. (2022). Designing delivery systems for functional ingredients by protein/polysaccharide interactions. *Trends in Food Science and Technology*, 119, 272–287. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.007>
- Lin, D., Kelly, A.L., & Miao, S. (2020). Preparation, structure-property relationships and applications of different emulsion gels: Bulk emulsion gels, emulsion gel particles, and fluid emulsion gels. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.024>
- Lin, D., Kelly, A.L., Maidannyk, V., & Miao, S. (2020). Effect of concentrations of alginate, soy protein isolate and sunflower oil on water loss, shrinkage, elastic and structural properties of alginate-based emulsion gel beads during gelation. *Food Hydrocolloids*, 108, Article 105998. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105998>
- Liu, L., Fishman, M.L., Hicks, K.B., Kende, M., & Ruthel, G. (2006). Pectin/Zein beads for potential colon-specific drug delivery: Synthesis and in vitro evaluation. *Drug Delivery*, 6(13), 417–423. <https://doi.org/10.1080/10717540500394935>
- Lozano-Vazquez, G., Lobato-Calleros, C., Escalona-Buendia, H., Chavez, G., Alvarez-Ramirez, J., & Vernon-Carter, E.J.J. (2015). Effect of the weight ratio of alginate-modified tapioca starch on the physicochemical properties and release kinetics of chlorogenic acid containing beads. *Food Hydrocolloids*, 4(48), 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.02.032>
- Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., & Desobry, S. (2006). Flavour encapsulation and controlled release - A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 1(41), 1–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x>
- Maleki, G., Woltering, E.J., & Mozafari, M.R. (2022). Applications of chitosan-based carrier as an encapsulating agent in food industry. *Trends in Food Science and Technology*, 120, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.001>
- McClements, D.J. (2017). Recent progress in hydrogel delivery systems for improving nutraceutical bioavailability. *Food Hydrocolloids*, 68, 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.05.037>
- Milea, A.S., Vasile, A.M., Circiumaru, A., Dumitras, cu L., Barbu, V., Rapeanu, G., Bahrim, G.E., & Stanciuc, N. (2019). Valorizations of sweet cherries skins phytochemicals by extraction, microencapsulation and development of value-added food products. *Foods*, 8, 188. <https://doi.org/10.3390/foods8060188>
- Mitchell, J.R., & Hill, S.E. (2021). Starch. *Handbook of Hydrocolloids* (pp. 239–271). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820104-6.00027-9>
- Moser, P., Telis, V.R.N., de Andrade Neves, N., García-Romero, E., Gómez-Alonso, S., & Hermosín-Gutiérrez, I. (2017). Storage stability of phenolic compounds in powdered BRS Violeta grape juice microencapsulated with protein and maltodextrin blends. *Food Chemistry*, 214, 308–318. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.081>
- Nie, G., Zang, Y., Yue, W., Wang, M., Baride, A., Sigdel, A., & Janaswamy, S. (2021). Cellulose-based hydrogel beads: Preparation and characterization. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, Article 100074. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100074>
- Nordgård, C.T., & Draget, K.I. (2021). Alginates. G.O. Phillips, P.A. Williams (Eds.), *Handbook of hydrocolloids* (3rd ed., pp. 805–829). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820104-6.00007-3>
- Perumalla Venkata, R., & Subramanyam R. (2016). Evaluation of the deleterious health effects of consumption of repeatedly heated vegetable oil. *Toxicology Reports*, 3, 636–643. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2016.08.003>
- Piorkowski, D.T., & McClements, D.J. (2014). Beverage emulsions: Recent developments in formulation, production, and applications. *Food Hydrocolloids*, 42, 5–41. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.009>
- Puguan, J.M.C., Yu, X., & Kim, H. (2014). Characterization of structure, physico-chemical properties and diffusion behavior of Ca-Alginate gel beads prepared by different gelation methods. *Journal of Colloid and Interface Science*, 432, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.06.048>

- Rakhshaei, R., Namazi, H., Hamishehkar, H., & Rahimi, M. (2020). Graphene quantum dot cross-linked carboxymethyl cellulose nanocomposite hydrogel for pH-sensitive oral anticancer drug delivery with potential bioimaging properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 1121–1129. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.118>
- Redaelli, F., Sorbona, M., & Rossi, F. (2017). Synthesis and processing of hydrogels for medical applications. *Bioresorbable polymers for biomedical applications: From fundamentals to translational medicine*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100262-9.00010-0>
- Ribeiro, J.S., & Veloso, C.M. (2021). Microencapsulation of natural dyes with biopolymers for application in food: A review. *Food Hydrocolloids*, 112, Article 106374. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106374>
- Rodríguez, J., Martín, M.J., Ruiz, M.A., & Clares, B. (2016). Current encapsulation strategies for bioactive oils: From alimentary to pharmaceutical perspectives. *Food Research International*, 83, 41–59. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.032>
- Romo, I., Abugoch, L., & Tapia, C. (2020). Soluble complexes between chenopodins and alginate/chitosan: Intermolecular interactions and structural-physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*, 227, Article 115334. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115334>
- Saifullah, M., Shishir, I. M.R., Ferdowsi, R., Tanver Rahman, M.R., & Van Vuong, Q. (2019). Micro and nano encapsulation, retention and controlled release of flavor and aroma compounds: A critical review. *Trends in Food Science and Technology*, 86, 230–251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.030>
- Saqib, M.N., & Tanver Rahman, M.R. (2022). Phenolic acids. In J. Kour & G.A. Nayik (Eds.), *Nutraceuticals and health care* (pp. 303–316). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89779-2.00014-4>
- Saqib, M.N., Ahammed, S., Liu, F., & Zhong, F. (2022). Customization of liquid-core sodium alginate beads by molecular engineering. *Carbohydrate Polymers*, 284, Article 119047. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.119047>
- Saqib, M.N., Liu, F., Chen, M., Ahammed, S., Liu, X., & Zhong, F. (2022). Thermo-mechanical response of liquid-core beads as affected by alginate molecular structure. *Food Hydrocolloids*, 131, Article 107777. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107777>
- Schrieber R., & Herbert, G. (2007). Practical aspects. In *Gelatine Handbook* (1st ed., pp. 119–299). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527610969.ch3>
- Seisun, D., & Zalesny, N. (2021). Strides in food texture and hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*, 117, Article 106575. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106575>
- Shaddel, R., Hesari, J., Azadmard-Damirchi, S., Hamishehkar, H., Fathi-Achachlouei, B., & Huang, Q. (2017). Use of gelatin and gum Arabic for encapsulation of black raspberry anthocyanins by complex coacervation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 1800–1810. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.044>
- Sharma, M., Sharma, V., & Majumdar, D.K. (2014). Entrapment of α-amylase in agar beads for biocatalysis of macromolecular substrate. *International Scholarly Research Notices*, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/936129>
- Shahidi, F., Ambigaipalan, P., Abad, A., & Pegg, R.B. (2020). Food and bioactive encapsulation. *Handbook of food preservation* (pp. 529–596). Publisher Taylor & Francis Group, LLC. <https://doi.org/10.1201/9780429091483-38>
- Souza Simões, L., Madalena, D.A., Pinheiro, A.C., Teixeira, J.A., Vicente, A.A., & Ramos, Ó.L. (2017). Micro- and nano bio-based delivery systems for food applications: In vitro behavior. *Advances in Colloid and Interface Science*, 243, 23–45. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.02.010>
- Souza, A.C.P., Gurak, P.D., & Marczak, L.D.F. (2017). Maltodextrin, pectin and soy protein isolate as carrier agents in the encapsulation of anthocyanins-rich extract from jaboticaba pomace. *Food Bioprod Process*, 102, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.12.012>
- Stanciuc, N., Oancea, A.M., Aprodu, I., Turturica, M., Barbu, V., & Ionita, E. (2018). Investigations on binding mechanism of bioactives from elderberry (*Sambucus nigra* L.) by whey proteins for efficient microencapsulation. *Journal of Food Engineering*, 223, 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.019>

- Stanley, N.F. (2006). *Agar. Food polysaccharides and their application* (2nd ed., pp. 186–204). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420015164>
- Stribițaia, E., Krop, E.M., Lewin, R., Holmes, M., & Sarkar, A. (2020). Tribology and rheology of bead-layered hydrogels: Influence of bead size on sensory perception. *Food Hydrocolloids*, *104*. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105692>
- Theocharidou, A., Mourtzinou, I., & Ritzoulis, C. (2022). The role of guar gum on sensory perception, on food function, and on the development of dysphagia supplements – A review. *Food Hydrocolloids for Health*, *2*, Article 100053. <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2022.100053>
- Tortorella, S., Maturi, M., Vetri Buratti, V., Vozzolo, G., Locatelli, E., Sambri, L., & Comes Franchini, M. (2021). Zein as a versatile biopolymer: Different shapes for different biomedical applications. *RSC Advances*, *11*(62), 39004–39026. <https://doi.org/10.1039/D1RA07424E>
- Vityazev, F.V., Khramova, D.S., Saveliev, N.Y., Ipatova, E.A., Burkov, A.A., Belosero, V.S., & Popov, S.V. (2020). Pectin–glycerol gel beads: Preparation, characterization and swelling behavior. *Carbohydrate Polymers*, *238*, Article 116166. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116166>
- Wong, S.K., Lawencia, D., Supramaniam, J., Goh, B.H., Manickam, S., Wong, T.W., & Tang, S.Y. (2021). In vitro digestion and swelling kinetics of thymoquinone-loaded pickering emulsions incorporated in alginate-chitosan hydrogel beads. *Frontiers in Nutrition*, *8*, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.752207>
- Yermak, I.M., Gorbach, V.I., Karnakov, I.A., Davydova, V.N., Pimenova, E.A., Chistyulin, D.A., & Glazunov, V.P. (2021). Carrageenan gel beads for echinochrome inclusion: Influence of structural features of carrageenan. *Carbohydrate Polymers*, *272*, Article 118479. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118479>
- Yuan, Y., Kong, Z.-Y., Sun, Y.-E., Zeng, Q.-Z., & Yang, X.-Q. (2017). Complex coacervation of soy protein with chitosan: Constructing antioxidant microcapsule for algal oil delivery. *LWT*, *75*, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.045>
- Zang, Z., Chou, S., Geng, L., Si, X., Ding, Y., Lang, Y., Cui H., Gao N., Chen Y., Wang M., Xie X., Xue B., & Li B. (2021). Interactions of blueberry anthocyanins with whey protein isolate and bovine serum protein: Color stability, antioxidant activity, in vitro simulation, and protein functionality. *LWT*, *152*, Article 112269. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112269>
- Zeeb, B., Saberi, A.H., Weiss, J., & McClements, D.J. (2015). Formation and characterization of filled hydrogel beads based on calcium alginate: Factors influencing nanoemulsion retention and release. *Food Hydrocolloids*, *50*, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.02.041>

ОБ АВТОРЕ

Наталья Владимировна Неповинных, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии продуктов питания Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» (410012, Российская Федерация, Саратовская область, г. Саратов, проспект Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2923-9202>, Scopus ID: 56153157700, Researcher ID: O-9118-2017, SPIN-код: 6151-1233, nnepovinnykh@yandex.ru

ABOUT THE AUTHOR

Nataliia Vladimirovna Nepovinnykh, Doctor of Technical Science, Professor, Foodstuff Technology Department Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov (4, building 3 Peter Stolypin Ave., Saratov, Saratov Region, 410012, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2923-9202>, Scopus ID: 56153157700, Researcher ID: O-9118-2017, SPIN-код: 6151-1233, nnepovinnykh@yandex.ru