

614.253.1.

Селиванова С.А. , Гарибова З.

*ФГБОУ ВО Пермский государственный медицинский университет им.
Е.А. Вагнера, г. Пермь, Россия;*

МИКРОИНКАПСУЛИРОВАННЫЕ ФОРМЫ МИКРОНУТРИЕНТОВ: ТЕХНОЛОГИИ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация: Микроинкапсулирование микронутриентов представляет собой современную технологию заключения биологически активных веществ в защитную оболочку с целью повышения их стабильности и биодоступности. В обзоре проанализированы современные подходы к микрокапсулированию витаминов и минеральных веществ, рассмотрены методы получения микрокапсул, материалы для формирования оболочек, а также оценена эффективность применения инкапсулированных форм в пищевой и фармацевтической промышленности. Особое внимание уделено защите чувствительных к окислению соединений, контролю высвобождения активных компонентов и повышению биодоступности микронутриентов. Представлены данные о применении липосомальных и полимерных форм железа, витаминов С и D, показавших преимущества перед традиционными формами при коррекции дефицитных состояний.

Ключевые слова: микроинкапсулирование, микронутриенты, биодоступность, витамины, минеральные вещества, липосомы, функциональные продукты

***Article title:**Microencapsulated Forms of Micronutrients: Technologies, Efficiency and Application Prospects*

***Annotation:**Microencapsulation of micronutrients is a modern technology of enclosing biologically active substances in a protective shell to increase their stability and bioavailability. The review analyzes modern approaches to the microencapsulation of vitamins and minerals, considers methods for obtaining microcapsules, materials for shell formation, and evaluates the effectiveness of*

encapsulated forms in the food and pharmaceutical industries. Special attention is paid to the protection of oxidation-sensitive compounds, control of the release of active components, and increase in the bioavailability of micronutrients. Data on the use of liposomal and polymer forms of iron, vitamins C and D, which have shown advantages over traditional forms in correcting deficiency states, are presented.

****Keywords:**** *microencapsulation, micronutrients, bioavailability, vitamins, minerals, liposomes, functional foods*

Введение

Одной из ключевых задач современной нутрициологии и фармацевтики является разработка эффективных способов доставки микронутриентов в организм. Решение этой задачи осложнено рядом факторов : многие витамины и минеральные вещества нестабильны при хранении, подвержены окислению, разрушаются под действием света и высокой температуры [1]. Помимо этого, ряд микронутриентов обладает низкой биодоступностью, неприятным вкусом или может вызывать раздражение желудочно-кишечного тракта [2]. Указанные проблемы возможно решить с помощью микроинкапсулирования – процесса заключения небольших количеств вещества в защитную оболочку из пленкообразующего материала [3].

Микрокапсулы представляют собой частицы размером от 1 до 500 микрометров, содержащие ядро из активного вещества, окруженное оболочкой [4]. Процесс микроинкапсулирования обеспечивает: защиту активных компонентов от воздействия внешних факторов, маскировку неприятного вкуса и запаха, контролируемое высвобождение вещества, повышение стабильности при хранении и переработке продукта [5]. Коденцова В.М и Жилинская Н. в исследовании 2025 года отмечают, что микроинкапсулирование витаминов и минеральных веществ повышает их сохранность в обогащенных пищевых продуктах в процессе производства и реализации [1].

В качестве материалов для формирования оболочек используются природные полимеры – желатин, альгинат натрия, пектин, хитозан, а также синтетические полимеры, в частности эудрагиты различных типов [6]. Выбор материала оболочки определяется свойствами инкапсулируемого вещества и требованиями к месту его высвобождения в желудочно-кишечном тракте. Так, применение кишечнорастворимых полимеров позволяет защитить вещество от воздействия кислой среды желудка и обеспечить его высвобождение в кишечнике [7].

Наиболее распространенными методами получения микрокапсул являются: распылительная сушка, коацервация (простая и комплексная), ионное гелеобразование, метод двойных эмульсий [8]. Каждый из методов имеет свои преимущества и ограничения. Распылительная сушка – экономически эффективный метод, позволяющий получать микрокапсулы в промышленных масштабах, однако при этом происходит термическое воздействие на инкапсулируемое вещество [9]. Метод коацервации обеспечивает высокую эффективность инкапсулирования и возможность получения частиц с контролируемым размером, но технология более сложная и затратная [10].

Ученые Ставропольского края в 2025 году разработали метод микрокапсулирования, позволяющий доставлять витамины, пробиотики и другие полезные вещества непосредственно в кишечник [11]. Используя хитозан – природный полисахарид из панцирей ракообразных – исследователи создали микрокапсулы размером 100–300 микрометров, обладающие выраженными антибактериальными свойствами и способностью защищать содержимое от порчи [11].

Особый интерес представляют липосомальные формы микронутриентов. Липосомы – это микроскопические везикулы, состоящие из фосфолипидных бислоев, которые могут включать как водорастворимые, так и жирорастворимые вещества [1, 12].

Исследования показали, что витамин D, аскорбат кальция и натрия в липосомальной форме абсорбируются быстрее по сравнению с обычными формами [1]. Прием натошак здоровыми добровольцами витаминов С и D в липосомальной форме приводил к достижению более высоких максимальных концентраций в плазме крови [1]. Однако трактовка этих результатов требует осторожности – более высокие уровни в плазме крови могут означать, что микронутриент не так быстро всасывается в ткани, в то время как более низкие уровни могут свидетельствовать о том, что перераспределение в ткани происходит быстрее [1].

Эффективность коррекции статуса железа в течение 4–12 недель по уровню гемоглобина липосомальными формами железа оказалась сопоставимой с эффективностью других форм этого микроэлемента [1]. Речь идет о пирофосфате железа в микроинкапсулированной форме, который демонстрирует улучшенную биодоступность при меньшем риске нежелательных явлений. Железодефицитная анемия остается одной из наиболее распространенных патологий у женщин репродуктивного возраста и беременных [12]. Традиционные соли железа часто вызывают побочные эффекты со стороны ЖКТ, что снижает приверженность лечению [12].

В фармацевтической промышленности микрокапсулирование применяется для создания препаратов с пролонгированным высвобождением активного вещества. Использование эудрагитов различных типов (RS, RL, L100) позволяет контролировать место и скорость высвобождения лекарственного вещества в ЖКТ [13]. Полковникова и Ковалева в обзоре 2021 года отмечают, что микрокапсулированные формы антибиотиков позволяют решить проблему резистентности микроорганизмов за счет целенаправленной доставки препарата к месту инфекции [14].

Для нерастворимых в воде соединений разработаны методы создания микрокапсул с двойными оболочками на основе двойных эмульсий типа вода-масло-вода [15]. Такой подход позволяет инкапсулировать жирорастворимые

витамины (А, D, E, К), полиненасыщенные жирные кислоты, эфирные масла. Внутренняя гидрофобная оболочка защищает липофильное ядро, а внешняя гидрофильная оболочка обеспечивает диспергирование в водной среде [15]. Использование комбинации полимеров различной природы (например, альгинат-хитозан) позволяет получать микрокапсулы с улучшенными свойствами [16].

Микроинкапсулирование активно используется для обогащения пищевых продуктов витаминами и минеральными веществами. Особенно актуально применение этой технологии для создания функциональных продуктов питания – продуктов, оказывающих положительное влияние на здоровье помимо базовой пищевой ценности [17]. Микрокапсулированные формы пробиотиков показывают повышенную выживаемость при прохождении через желудок и тонкий кишечник [18]. Это позволяет создавать эффективные функциональные продукты с пробиотическими свойствами.

Инкапсулирование биологически активных веществ растительного происхождения (полифенолов, каротиноидов, антоцианов) повышает их стабильность и биодоступность [19]. Микрокапсулированные формы эфирных масел применяются в пищевой промышленности в качестве ароматизаторов с контролируемым высвобождением [20].

Одним из перспективных направлений является создание микрокапсул с рН-чувствительным высвобождением, позволяющих доставлять активные вещества в определенные отделы ЖКТ [21]. Разрабатываются также микрокапсулы с термочувствительным высвобождением для использования в хлебобулочных изделиях – активное вещество высвобождается только при определенной температуре выпечки [22]. Это позволяет предотвратить разрушение чувствительных компонентов при термической обработке и обеспечить их сохранность в готовом продукте.

Несмотря на очевидные преимущества, технология микроинкапсулирования имеет ряд ограничений. Создание липосомальных форм микронутриентов –

сложные многостадийные технологии, требующие специального оборудования, контроля размеров и свойств, что удорожает и затрудняет масштабирование производства [1]. Не для всех типов микронутриентов подтверждены преимущества липосомальных форм для устранения недостаточности – требуются дополнительные исследования [1].

Неполное инкапсулирование может снизить эффективность биоактивных веществ, а сложность процессов инкапсулирования может препятствовать широкому внедрению [23]. Взаимодействие между инкапсулированными материалами и инкапсулирующими агентами также может влиять на высвобождение и биодоступность биоактивных веществ [23]. Необходимо учитывать, что более высокие уровни микронутриентов в плазме крови не всегда означают лучшую эффективность – важно оценивать конечные функциональные показатели [1].

Заключение

Технология микроинкапсулирования микронутриентов востребована в пищевой и фармацевтической промышленности для повышения стабильности, биодоступности и эффективности витаминов и минеральных веществ. Различные методы микрокапсулирования и материалы для формирования оболочек позволяют создавать системы с контролируемым высвобождением, защитой от неблагоприятных факторов и целенаправленной доставкой активных компонентов. Липосомальные формы железа и витаминов показали преимущества в фармакокинетических исследованиях, хотя для подтверждения клинических преимуществ требуются дополнительные исследования. Совершенствование методов и технологий микрокапсулирования, а также расширение исследований эффективности инкапсулированных форм микронутриентов будут способствовать созданию инновационных продуктов для коррекции дефицитных состояний и улучшения здоровья населения.

Список литературы

1. Коденцова В.М., Жилинская Н.В. Микроинкапсулированные (липосомальные) формы микронутриентов: сохранность и эффективность для коррекции дефицита // Вопросы питания. 2025. Т. 94. № 4. С. 39–50. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikroinkapsulirovannye-liposomalnye-formy-mikronutrientov-sohrannost-i-effektivnost-dlya-korreksii-defitsita> (дата обращения: 25.03.2026).
2. Муродова С.Г.К. Антиоксидантные свойства порошковых продуктов и их применение в пищевой промышленности // Universum: технические науки. 2024. № 9 (126). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/antioksidantnye-svoystva-poroshkovyh-produktov-i-ih-primenenie-v-pischevoy-promyshlennosti> (дата обращения: 25.03.2026).
3. Постраш Я.В., Хишова О.М. Микрокапсулирование в фармации – современное состояние и перспективы // Вестник фармации. 2010. № 3 (49). С. 71–81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikrokapsulirovanie-v-farmatsii-sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy> (дата обращения: 25.03.2026).
4. Бычкова Е.С., Син А.Д., Белякова Д.А., Котова Я.С., Ломовский И.О. Тенденции развития технологии микрокапсулирования // Пищевая промышленность. 2021. № 4. С. 36–41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-razvitiya-tehnologii-mikrokapsulirovaniya> (дата обращения: 25.03.2026).
5. Коваль К.П. Микрокапсулирование биологически активных веществ: технологии и перспективы // Вестник науки. 2025. № 2 (71). С. 154–161. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikrokapsulirovanie-biologicheski-aktivnyh-veschestv-tehnologii-i-perspektivy> (дата обращения: 25.03.2026).

6. Васюкова А.Т., Вейберов А.В., Смирнова Л.С., Суворов О.А., Бухтояров В.А., Бычков А.Л. Использование капсулированных ингредиентов в разработке пищевых продуктов с высокой биологической ценностью: систематический обзор // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84. № 3. С. 32–39. DOI: 10.20914/2310-1202-2022-3-32-39 (дата обращения: 25.03.2026).
7. Полковникова Ю.А., Ковалёва Н.А. Современные исследования в области микрокапсулирования (обзор) // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2021. Т. 10. № 2. С. 50–61. DOI: 10.33380/2305-2066-2021-10-2-50-61 (дата обращения: 25.03.2026).
8. Srivastava S., Pandey V.K., Dar A.H., Shams R., Dash K.K., Rafiq S.M., Zahoor I., Kumar S. Effect of microencapsulation techniques on the different properties of bioactives, vitamins and minerals // Food Science and Biotechnology. 2024. Vol. 33. № 14. P. 3181–3198. DOI: 10.1007/s10068-024-01666-1 (дата обращения: 25.03.2026).
9. Султанова М.Ж., Абдрахманов Х.А., Акжанов Н., Садуакас А.С., Нурыш А.Б. Экстракция околоплодника грецкого ореха и характеристика их фенольных соединений // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2022. № 3 (67). С. 233–242. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-27 (дата обращения: 25.03.2026).
10. Калиничева Н.Н. Функционально-технологические свойства мясных рубленых полуфабрикатов при внесении в рецептуру порошка плодов боярышника и калины // Биология в сельском хозяйстве. 2021. № 2 (31). С. 22–26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46196866> (дата обращения: 25.03.2026).

11. Ученые из Ставрополя разработали технологию для создания умной еды // РИА Новости. 13 января 2025. URL: <https://ria.ru/20250113/nauka-1993164726.html> (дата обращения: 25.03.2026).
12. Кононова И.Н., Карева Е.Н. Активный метаболит 4-го поколения фолиевой кислоты Quatrefolic® и микронизированное микроинкапсулированное железо Lipofer®: инновационные подходы в восполнении дефицита фолиевой кислоты и железа у женщин // РМЖ. Мать и дитя. 2022. Т. 5. № 1. С. 18–27. DOI: 10.32364/2618-8430-2022-5-1-18-27 (дата обращения: 25.03.2026).
13. Говядова И.А., Старкова А.В., Ковалева А.Е., Пьяникова Э.А. Разработка рецептуры и технологии производства бездрожжевого цельнозернового хлеба // Пищевая индустрия в современных условиях: тренды и инновации. Орел, 2023. С. 53–58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53746744> (дата обращения: 25.03.2026).
14. Kurek M.A., Ogrodowska D., Tańska M., Šeregelj V., Vulić J. Encapsulation efficiency of food bioactive ingredients during spray drying // Spray Drying for the Food Industry. Woodhead Publishing, 2024. P. 473–516. DOI: 10.1016/B978-0-12-819799-8.00008-9 (дата обращения: 25.03.2026).
15. Aktas H., Napiórkowska A., Szpicer A., Custodio-Mendoza J.A., Paraskevopoulou A., Pavlidou E., Kurek M.A. Microencapsulation of green tea polyphenols: Utilizing oat oil and starch-based double emulsions for improved delivery // International Journal of Biological Macromolecules. 2024. Art. 133295. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133295 (дата обращения: 25.03.2026).
16. Bińkowska W., Szpicer A., Wojtasik-Kalinowska I., Półtorak A. Innovative Methods of Encapsulation and Enrichment of Cereal-Based Pasta Products with Biofunctional Compounds // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. № 4. Art. 1442. DOI: 10.3390/app14041442 (дата обращения: 25.03.2026).

17. Bodbodak S., Nejatian M., Ghandehari Yazdi A.P., Kamali Rousta L., Rafiee Z., Jalali-Jivan M., Jafari S.M. Improving the thermal stability of natural bioactive ingredients via encapsulation technology // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024. Vol. 64. № 10. P. 2824–2846. DOI: 10.1080/10408398.2022.2127145 (дата обращения: 25.03.2026).
18. Coelho S.C., Giron A., Rocha F., Estevinho B.N. Electro sprayed B-complex vitamins/zein microparticles for drug sustained release and antioxidant applications // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2024. Vol. 99. № 1. P. 217–226. DOI: 10.1002/jctb.7526 (дата обращения: 25.03.2026).
19. El-Sayed S.M., El-Sayed H.S., Youssef A.M. Recent developments in encapsulation techniques for innovative and high-quality dairy products: Demands and challenges // *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*. 2024. Art. 100406. DOI: 10.1016/j.bcdf.2024.100406 (дата обращения: 25.03.2026).
20. Li X., Wang Y., Jiang Y., Liu C., Zhang W., Chen W., Bai W. Microencapsulation with fructooligosaccharides and whey protein enhances the antioxidant activity of anthocyanins and their ability to modulate gut microbiota in vitro // *Food Research International*. 2024. Vol. 181. Art. 114082. DOI: 10.1016/j.foodres.2024.114082 (дата обращения: 25.03.2026).
21. Lima N.G., Lima G.N., da Costa Abreu V.G., Lopes P.H.S., da Costa J.M.G. Effects of native oat starch on vitamin B12 microencapsulation: New perspectives on encapsulants // *Powder Technology*. 2024. Vol. 434. Art. 119325. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.119325 (дата обращения: 25.03.2026).