

# ИНКАПСУЛИРОВАННАЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНАЯ ДОБАВКА НА ОСНОВЕ БИОПОЛИМЕРНЫХ ГЕЛЕЙ

**ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ****Дмитрий Олегович Каплан**, аспирант

E-mail: do.kaplan2124@omgau.org

**Наталья Борисовна Гаврилова**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии

E-mail: nb.gavrilova@omgau.org

Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, г. Омск

Создание и производство инновационных продуктов питания массового и специализированного назначения динамично развиваются, что влечет за собой необходимость поиска эффективных форм доставки биологически активных веществ в организм. Цель исследования – разработка инновационной биологически активной добавки на основе биополимерных гелей. В исследовании использовались современные методы пищевой биотехнологии, аналитической химии и компьютерного моделирования. Методика инкапсуляции включала стадии предварительной подготовки активных компонентов, формирования гелевой матрицы и последующей стабилизации полученной композиции. Разработана биополимерная система для инкапсуляции алкалоида берберина. Установлено, что биополимерный гель обеспечивает высокую устойчивость к воздействию кислотной среды и формирует пролонгированное высвобождение активного вещества, при котором более 80 % берберина высвобождается в фазу моделируемой кишечной среды. Это подтверждает эффективность технологии и перспективность разработанной системы для использования в продуктах массового потребления и специализированного питания.

**Ключевые слова:** инкапсуляция, биологически активная добавка, биополимерный гель, специализированное питание**Для цитирования:** Каплан, Д. О. Инкапсулированная биологически активная добавка на основе биополимерных гелей / Д. О. Каплан, Н. Б. Гаврилова // Молочная промышленность. 2025. № 6. С. 49–54. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-6-64>

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с указом президента РФ<sup>1</sup>, направленным на обеспечение продовольственной безопасности страны, требуется внедрение комплексной системы организации питания, ориентированной на обеспечение здорового и безопасного рациона для всех граждан. Кроме того, в условиях растущей распространенности сахарного диабета и необходимости соблюдения строгих диетических рекомендаций, специализированные продукты питания приобретают ключевое значение [1–6]. Они должны соответствовать строгому регламенту по содержанию макро- и микронутриентов, обеспечивать оптимальное поступление биологически активных веществ (БАВ), способствующих поддержанию метаболического контроля и улучшению качества жизни пациентов [7, 8].

Одним из перспективных направлений повышения эффективности специализированных продуктов является инкапсуляция БАВ в биополимерные гели,

что позволяет обеспечить защиту данных веществ от деградации в желудочно-кишечном тракте и их контролируемое высвобождение в организме [9–13]. Инкапсуляция помогает защищать БАВ от воздействия внешних факторов в процессе хранения, тем самым обеспечивая их качество и безопасность<sup>2</sup> [14–17]. Данные обстоятельства обуславливают актуальность реализуемого направления исследований.

В настоящее время в биотехнологии разработаны и применяются различные методы инкапсуляции (экструзия, эмульгирование, коацервация, осаждение) [18].

Экструзия – данный метод подразумевает смешивание БАВ с полимером, после чего полученная смесь проходит через экструдер и охлаждается, впоследствии образуются микрокапсулы.

Эмульгирование – метод создания эмульсии из двух несмешивающихся фаз с использованием

<sup>1</sup> Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации».<sup>2</sup> Корж, А. П. Новые технологии и продукты для поддержания здорового микробиома / А. П. Корж, Ю. Г. Базарнова // Переработка молока. 2021. № 5. С. 14–19. <https://doi.org/10.33465/2222-5455-2021-5-14-18>; <https://elibrary.ru/tapiwl>



Источник изображения: freepik.com

эмulsionатора. Уменьшение поверхностного натяжения способствует формированию микрокапсул.

Коацервация – метод предполагает взаимодействие двух полиэлектролитов с противоположными зарядами в водной среде, что позволяет создать частицы, покрытые капсулирующим агентом, обволакивающим БАВ.

Осаждение – метод инкапсуляции, основанный на осаждении полимера на поверхности капсулируемого вещества путем замены растворителя. Данный метод используется для инкапсуляции труднорастворимых и не растворимых в воде соединений [18].

В таблице представлена характеристика основных методов инкапсуляции БАВ в пищевых системах.

Перечисленные методы инкапсуляции БАВ являются хорошо изученными и имеют практический потенциал. Разрабатываются и другие методы инкапсуляции, такие как микро- и нанофлюидика, электрораспыление, сверхкритическая микрокапсуляция, ультразвуковая инкапсуляция. Данные методы находятся на стадии исследования и не имеют широкого распространения.

**Целью исследования** являлась разработка инновационной биологически активной добавки на основе биополимерных гелей. В рамках данной работы проведен обзор современных исследований в области инкапсуляции биологически активных веществ для выбора оптимальных биополимерных систем; разработана методика инкапсуляции с учетом физико-химических свойств активных компонентов и матрицы геля; изучены такие характеристики полученной биологически активной добавки, как стабильность и вязкость.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными объектами исследования являлись:

- полисахарид  $\beta$ -глюкан ячменя (BeGlu, Россия);
- экстракт алкалоида берберина (ООО «Простые решения», Россия).

В исследовании использовались современные методы пищевой биотехнологии, аналитической химии и компьютерного моделирования. Методика инкапсуляции включала стадии предварительной подготовки активных компонентов, формирования гелевой матрицы и последующей стабилизации полученной композиции.

**Таблица. Характеристика основных методов инкапсуляции биологически активных веществ**

Метод инкапсуляции	Размер частиц, мкм	Преимущества	Недостатки
Экструзия	0,2–2000	Процесс протекает при относительно низких температурах	Низкая производительность. Органолептическая специфика применения в пищевых продуктах
Эмульгирование	0,09–0,17	Высокая степень растворимости БАВ. Кинетическая стабильность. Защита от повторного слияния	Чувствительность к факторам окружающей среды. Необходима высокая концентрация ПАВ
Коацервация	10–800	Возможность использования активного вещества как в твердом, так и в жидким состоянии. Термостойкость получаемых капсул. Высокая концентрация БАВ в производимых капсулах	Высокая степень сложности метода. Необходимы точные и постоянные показатели pH и температуры. Возможное слипание капсул. Остаточное количество растворителей и коацервирующих агентов
Осаждение	0,5–50	Высокая степень перехода БАВ в капсулу. Регулируемая скорость высвобождения. Возможность создания капсул с двойной оболочкой	Необходимы равные объемы воды и раствора полимера для полного формирования капсул. Подбор состава осадителя влияет на капсулирование БАВ



Источник изображения: freepik.com

Физико-химические свойства инкапсулированной БАД оценивались с применением методов динамической вискозиметрии и капиллярного электротрофореза. Для изучения стабильности гелевой матрицы использовался метод моделирования переваривания в желудочном и кишечном соках.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для разработки инкапсулированных форм биологически активных добавок выбран метод осаждения, основанный на взаимодействии алкалоида берберина с раствором полисахарида  $\beta$ -глюкана. Этот подход позволяет синтезировать гелеобразные структуры, эффективно инкапсулирующие молекулы алкалоида, обеспечивая их пролонгированное высвобождение и биодоступность. Метод осаждения характеризуется высокой степенью воспроизводимости и простотой реализации, что делает его привлекательным для промышленного применения. Одним из ключевых преимуществ данной технологии является отсутствие использования органических растворителей, что значительно снижает экологическую нагрузку и увеличивает безопасность процедуры.

Начальным этапом эксперимента была подготовка биополимерного раствора посредством растворения полисахарида  $\beta$ -глюкана в деионизированной воде при температуре 40 °C в соотношении 2:1. После этого осуществлялось тщательное перемешивание и поддержание температуры на указанном уровне до достижения гомогенной эмульсии. Далее полученную эмульсию  $\beta$ -глюкана помещали в раствор хлорида кальция с концентрацией 0,012 моль/л на 20 мин, до образования гелевых частиц. Полученные гелевые частицы поместили в 1 % экстракт алкалоида берберина на 30 мин, что инициировало процесс осаждения и инкапсуляцию молекул алкалоида в биополимерную матрицу, затем помещали в раствор хлорида кальция на 20 мин и промывали деионизированной водой.

Завершающим этапом являлась контролируемая стадия охлаждения до температуры 15–20 °C, что способствовало укреплению биополимерного слоя гелевых частиц. Диаграмма вискозиметрии разрабатываемых биополимерных частиц представлена на рисунке 1.

Анализ данных, представленных на рисунке 1, показывает, что вязкость значительно возрастает при понижении температуры из-за изменения структуры

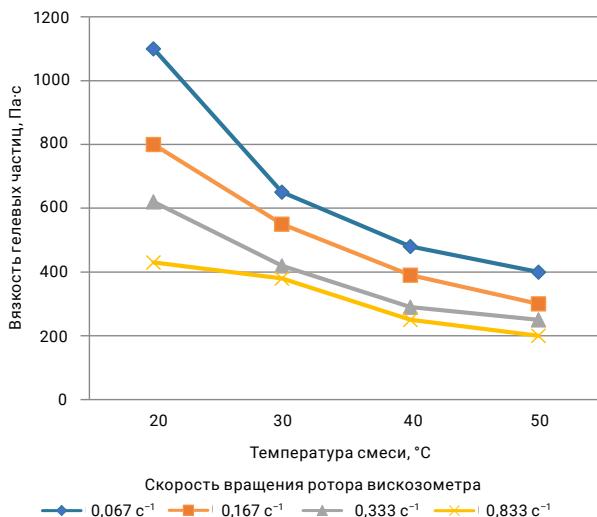


Рисунок 1. Исследование влияния температуры раствора на вязкость гелевых частиц при различных скоростях вращения ротора вискозиметра

гелеобразующего компонента. При температурах 40–50 °C вязкость меняется несущественно для всех скоростей, но использование температур выше 50 °C не рекомендуется из-за изменения структуры гелевых частиц. Установлена оптимальная температура для применения раствора – 40 °C.

При исследовании стабильности и степени высвобождения инкапсулированных гелевых частиц использовалась имитация переваривания в желудочном и кишечном соках. Имитированный желудочный сок: раствор хлорида натрия с концентрацией 2 % в дистиллированной воде, 1 моль/л соляной кислоты, пепсин в концентрации 3600 U/мл, температура 37 °C. Образцы выдерживали на водяной бане при непрерывном перемешивании в течение

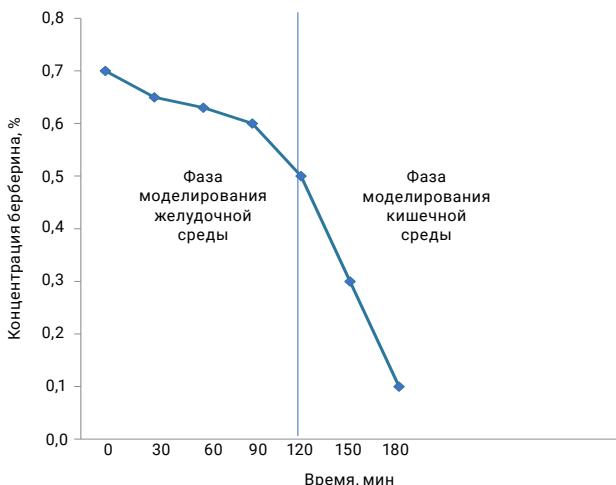


Рисунок 2. Электрофорограмма высвобождения инкапсулированного алкалоида берберина в смоделированных условиях ЖКТ

120 мин. Имитированный кишечный сок: раствор одноосновного фосфата калия с концентрацией 0,68 %, раствор солей желчных кислот с концентрацией 0,1 %, раствор панкреатина с концентрацией 0,4 %, 0,5 моль/л гидроксида натрия, температура 37 °C. Образцы выдерживали на водяной бане при непрерывном перемешивании в течение 120 мин.

С помощью капиллярного электрофореза была исследована кинетика высвобождения инкапсулированного алкалоида берберина из частиц геля под действием электрического поля в кварцевом капилляре и в фосфатном электролите. Эксперимент проводился при длине волны 254 нм и напряжении 25 кВ.

Визуализация процесса высвобождения берберина в желудочно-кишечном тракте осуществлялась в течение 120 мин. Результаты электрофорограммы представлены на рисунке 2.

Из данных рисунка 2 видно, что более 80 % активного вещества было высвобождено в фазе моделирования кишечной среды, что свидетельствует о высокой биодоступности активного вещества алкалоида берберина при инкапсулировании в биополимерную матрицу, состоящую из  $\beta$ -глюкана.

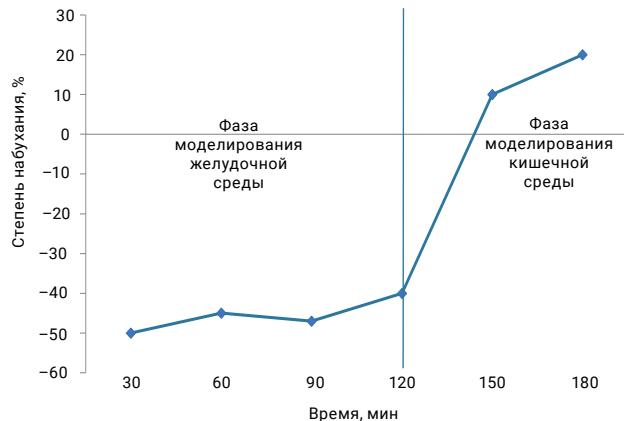
Степень увеличения объема инкапсулированных частиц геля в процессе ферментативного гидролиза вычислялась по следующей формуле (1):

$$S = 100 \times \frac{d_f - d_i}{d_i} \quad (1)$$

где  $S$  – степень увеличения гелевых частиц, %;  $d_f$  – диаметр гелевой частицы после увеличения объема, мкм;  $d_i$  – диаметр гелевой частицы до увеличения объема, мкм.

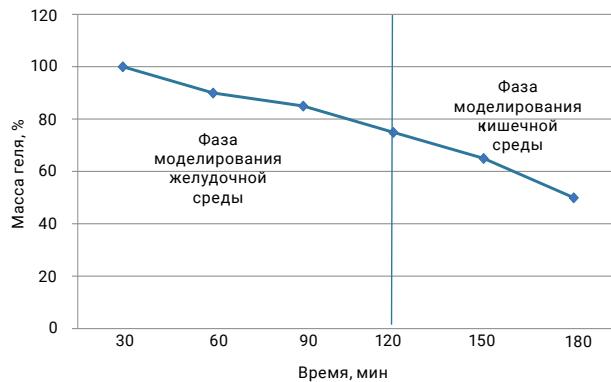
Степень набухания разработанных инкапсулированных гелевых частиц в смоделированных условиях ЖКТ изображена на рисунке 3. В результате исследования выявлено снижение размера частиц на 20 % от исходного числа в условиях  $pH < 2$ , данный результат достигается благодаря многослойной структуре гелевой частицы, наблюдается высокая устойчивость инкапсулированной биологически активной добавки к воздействию кислотной среды.

Из данных рисунка 3 можно видеть, что диффузия активного вещества из гелевых частиц менее выражена, это подтверждает высокую степень инкапсуляции и прочность гелевых частиц.



**Рисунок 3. Степень набухания разработанных инкапсулированных гелевых частиц в симулированных условиях ЖКТ**

Источник изображения: freepik.com



**Рисунок 4. Деградация исследуемого геля в симулированных условиях ЖКТ**

Исследование деградации геля проводили в условиях моделирования желудочно-кишечной среды. Гель помещался в пробирки с заранее подготовленными растворами, моделирующими желудочную и кишечную среды, пробирки нагревались до температуры 37 °C, эксперимент длился в течение 180 мин. По истечении 120 мин в исследуемый образец с моделирующим раствором кишечной среды внесен фермент  $\beta$ -глюканаза «Брюзайм БГЛ» в концентрации 24 ЕЕ/мл, продолжительность ферментативного гидролиза 60 мин. Уменьшение массы геля  $M$  (%) рассчитывали по формуле (2):

$$M = \frac{N_t}{N_0} \times 100 \quad (2)$$

где  $N_t$  – масса геля в момент времени  $t$ , г/моль;  $N_0$  – изначальная масса геля, г/моль.

Результаты деградации исследуемого геля в симулированных условиях ЖКТ представлены на рисунке 4.

Анализируя результаты (рис. 4), можно отметить, что в ходе проведения эксперимента исследуемый образец геля в симулированных условиях ЖКТ и под действием гидролитического фермента  $\beta$ -глюканаза утратил 50 % от своей первоначальной массы. Это свидетельствует о том, что полученный биополимерный гель, состоящий из полисахарида  $\beta$ -глюкана, имеет двухслойную структуру и защищает инкапсулированное биологически активное вещество от воздействия желудочной кислоты.

## ВЫВОДЫ

Для инкапсуляции биологически активных веществ в рамках исследования была выбрана оптимальная биополимерная система, состоящая из полисахарида  $\beta$ -глюкана. В результате анализа преимуществ и недо-

стиков способов инкапсуляции в качестве основного метода выбран способ осаждения, на основании этого разработана методика с учетом физико-химических свойств активных компонентов алкалоида берберина и матрицы геля биополимера полисахарида  $\beta$ -глюкана. На основании экспериментальных данных и их матема-

тического анализа изучены характеристики полученной биологически активной добавки, а именно стабильность и вязкость. Проведены исследования по изучению степени набухания разработанной инкапсулированной БАД, степени высвобождения БАВ, исследована степень деградации разработанного биополимерного геля. ■

Поступила в редакцию: 23.05.2025  
Принята в печать: 20.11.2025

## BIOPOLYMER GEL ENCAPSULATION OF BIOACTIVE ADDITIVES

Dmitry O. Kaplan, Natalia B. Gavrilova

Omsk State Agrarian University, Omsk

### ORIGINAL ARTICLE

The rapidly developing mass-market of functional foods needs new delivery methods for biologically active substances. This article describes an innovative dietary biopolymer-based food capsule. The methodology involved modern food biotechnology methods, analytical chemistry, and computer modelling. The encapsulation procedure started with preparing the bioactive components followed by gel matrix formation and stabilization. The biopolymer system demonstrated good prospects for encapsulating alkaloids, e.g., berberine, in an intestinal simulation *in vitro*. The biopolymer gel proved resistant to acidic environments and provided a prolonged release of the active substance, releasing over 80% of the encapsulated berberine. This effective technology can be recommended for commercial production of functional foods.

**Keywords:** encapsulation, biologically active additive, biopolymer gel, specialized nutrition

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гаврилова, Н. Б. Высокотехнологичное производство пищевых продуктов специализированного (спортивного) и здорового питания: монография / Н. Б. Гаврилова [и др.]. – Омск: Изд-во Омского ГАУ, 2021. – 219 с.
- Гаврилова, Н. Б. Комплексное использование пробиотиков и метабиотиков в биотехнологии продуктов функционального назначения / Н. Б. Гаврилова [и др.] // Молочная промышленность. 2022. № 11. С. 23–25. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2022-11-23-25>; <https://elibrary.ru/bkqqjy>
- Литвяк, В. В. Нанотехнологии в пищевой промышленности / В. В. Литвяк, А. А. Копыльцов, В. В. Ананских // Пищевая промышленность. 2020. № 12. С. 14–19. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10137>; <https://elibrary.ru/tjxxab>
- Чернопольская, Н. Л. Научно-практические аспекты биотехнологии специализированной пищевой продукции на молочной основе с использованием иммобилизации заквасочных (пробиотических) культур: монография / Н. Л. Чернопольская, Н. Б. Гаврилова. – Омск: Изд-во ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2019. – 351 с.
- Коновалов, С. А. Использование растительного сырья для разработки биотехнологии пищевой добавки содержащей природные БАВ / С. А. Коновалов, Н. Б. Гаврилова // Новейшие достижения в области медицины, здравоохранения и здоровьесберегающих технологий: Сборник материалов I Международного конгресса. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2022. <https://doi.org/10.21603/-1-IC-60>; <https://elibrary.ru/orpqa>
- Курбанова, М. Г. Белковые гидролизаты с биологически активными пептидами / М. Г. Курбанова, И. С. Разумникова, А. Ю. Просеков // Молочная промышленность. 2010. № 9. С. 70–71. <https://elibrary.ru/mvpfzb>
- Козлова, О. В. Методы экстракции иммуномодуляторов растительного происхождения / О. В. Козлова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53, № 4. С. 680–688. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2468>; <https://elibrary.ru/ewlvjy>
- Просеков, А. Ю. Потребительская геномика: роль в персонализации питания / А. Ю. Просеков [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 54, № 2. С. 400–415. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2582>; <https://elibrary.ru/ggxujc>
- Тутельян, В. А. Цифровая нутрициология: применение информационных технологий при разработке и совершенствовании пищевых продуктов: монография / В. А. Тутельян [и др.]. – М.: Азбука, 2020. – 378 с.
- Тутельян, В. А. Пищевые ингредиенты в продуктах питания: от науки к технологиям: монография / В. А. Тутельян [и др.]. – М.: РОСБИОТЕХ, 2021. – 664 с.
- Зимняков, В. М. Производство и переработка молока и мяса в России / В. М. Зимняков. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – 219 с.
- Ковалева, О. А. Ресурсосберегающие технологии получения биосовместимых компонентов пищевых систем: монография / О. А. Ковалева [и др.]. – Орел: ОрелГАУ, 2021. – 160 с.
- Ковалева, О. А. Полисахаридные лекарственные фитобиотики в пищевых продуктах биостимуляторах физиологических процессов: монография / О. А. Ковалева [и др.]. – Орел: ОрелГАУ, 2021. – 164 с.
- Коденцова, В. М. Обогащение молочной продукции недостающими в рационе россиян пищевыми веществами / В. М. Коденцова, Д. В. Рисник // Молочная промышленность. 2023. № 5. С. 74–77. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2023-5-7>; <https://elibrary.ru/uajryw>
- Коростелева, М. М. Принципы обогащения пищевых продуктов функциональными ингредиентами / М. М. Коростелева, Е. Ю. Агаркова // Молочная промышленность. 2020. № 11. С. 6–8. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-11-6-8>; <https://elibrary.ru/nbuuifi>
- Буянова, И. В. Концентрированные биопродукты функционального назначения / И. В. Буянова, О. Г. Альтшулер, Ч. Г. Куулар // Молочная промышленность. 2021. № 12. – С. 30–33. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2021-12-30-32>; <https://elibrary.ru/ejqhhj>
- Сычева, О. В. Продовольственная безопасность страны – путь к здоровому питанию: монография / О. В. Сычева. – Ставрополь: СтГАУ, 2024. –120 с.
- Bobrysheva, T. N. Encapsulated polyphenols in functional food production / T. N. Bobrysheva [et al.] // Foods and Raw Materials. 2025. Vol. 13(1). P. 18–34. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-1-620>; <https://elibrary.ru/brdwcu>