

Научная статья

УДК 579.67

DOI: 10.17586/2310-1164-2026-19-3-108-116

Сравнение эффективности методов экструзии и эмульгирования при двойном микрокапсулировании *Weizmannia coagulans* MPB-32301 с использованием полисахаридных матриц

Н.А. Пряхина*, Ю.П. Кузнецова, А.А. Толкачева, О.В. Зверева, А.С. Вострикова, О.С. Корнеева

Воронежский государственный университет инженерных технологий
Россия, Воронеж, *nekrasovaninelya@yandex.ru

Аннотация. Проводили сравнительное исследование двух методов инкапсуляции – экструзии и эмульгирования – для клеток ранее полученной культуры *W. coagulans*. Объектом изучения выбраны полисахариды, используемые для изготовления капсул: альгинат натрия; бактериальный гетерополисахарид альгинатного типа, синтезированный бактериями *Azotobacter chroococcum*; смесь указанных полисахаридов в соотношении 1:1. Для повышения прочности все типы изготовленных капсул покрыли вторым слоем – раствором хитозана. Морфологию капсул определяли с помощью оптического микроскопа; эффективность инкапсуляции исследовали методом посева содержимого капсул по Коху; жизнеспособность инкапсулированных клеток изучали при инкубировании в имитированных условиях желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) и последующем посеве по Коху. Определено, что капсулы, сформированные методом экструзии, по своим размерам превосходят частицы, полученные методом эмульгирования в 2,7; 9,6 и 25 раз в зависимости от типа матрицы. При оценке эффективности инкапсуляции максимальное значение ($0,117 \pm 0,002\%$) зафиксировали для образца ExAl. Проведена оценка выживаемости инкапсулированных клеток *W. coagulans* в разные типы капсул в имитированных *in vitro* условиях ЖКТ. Клетки бактерий, заключенные в капсулы, полученные методом экструзии, показали в целом более высокий процент выживаемости в агрессивной среде желудка в сравнении с клетками в эмульсионных капсулах: выживаемость в группе ExAl составила 25,40% против 0,52% в группе EmAl с разницей в 24,88 процентных пункта; выживаемость в группе ExGr составила 22,44% против 0,43% в группе EmGr с разницей в 22,01 процентных пункта; выживаемость в группе Ex(Al+Gr) составила 23,63% против 0,46% в группе Em(Al+Gr) с разницей в 23,17 процентных пункта. В моделируемых условиях кишечной среды все капсулы показали направленное высвобождение заключенных в них бактериальных клеток, о чем свидетельствовал активный рост культуры по истечении 42 ч инкубационного периода.

Ключевые слова: пищевая биотехнология; микрокапсулирование; метод экструзии; метод эмульгирования; альгинат натрия; бактериальный гетерополисахарид

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZGW-2024-0003)

Original article

Comparison of the efficiency of extrusion and emulsification methods for double microencapsulation of *Weizmannia coagulans* MPB-32301 using polysaccharide matrices

Nina A. Pryakhina*, Yuliya P. Kuznetsova, Olga V. Zvereva, Anna A. Tolkacheva,
Anastasia S. Vostrikova, Olga S. KorneevaVoronezh State University of Engineering Technologies
Voronezh, Russia, *nekrasovaninelya@yandex.ru

Abstract. A comparative study was conducted on two encapsulation methods – extrusion and emulsification – using cells from a previously established *W. coagulans* culture. The study focused on polysaccharides used to produce the capsules: sodium alginate; an alginate-type bacterial heteropolysaccharide synthesized by *Azotobacter chroococcum*; and a 1:1 mixture of these polysaccharides. To enhance structural integrity, all types of capsules were coated with a second layer consisting of a chitosan solution. Capsule morphology was examined using an optical microscope; encapsulation efficiency was assessed by plating the capsule contents (using the Koch plate method); and the viability of the encapsulated cells was evaluated by incubating them under simulated gastrointestinal tract (GIT) conditions, followed by plating via the Koch method. It was determined that capsules formed via extrusion were 2.7, 9.6, and 25 times larger than particles produced via emulsification, depending on the matrix type. In terms of encapsulation efficiency, the highest value ($0.117 \pm 0.002\%$) was recorded for the ExAl sample. Furthermore, the survival of *W. coagulans* cells encapsulated in the various types

of capsules was evaluated under *simulated in vitro* gastrointestinal conditions. Bacterial cells encapsulated via the extrusion method demonstrated, overall, a higher survival rate in the harsh environment of the stomach compared to those in emulsion-based capsules: the survival rate was 25.40% for the ExAl group versus 0.52% for the EmAl group (a difference of 24.88 percentage points); 22.44% for the ExGp group versus 0.43% for the EmGp group (a difference of 22.01 percentage points); and 23.63% for the Ex(Al+Gp) group versus 0.46% for the Em(Al+Gp) group (a difference of 23.17 percentage points). Under simulated intestinal conditions, all capsules exhibited targeted release of the encapsulated bacterial cells, as evidenced by active culture growth following a 42-hour incubation period.

Keywords: food biotechnology; microencapsulation; extrusion method; emulsification method; sodium alginate; bacterial heteropolysaccharide

Financial Support: The study was carried out as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FZGW-2024-0003)

Введение

В настоящее время актуальной задачей является разработка систем для адресной доставки пробиотических микроорганизмов в толстый отдел кишечника, поскольку ключевым препятствием для их широкого клинического применения остается низкая выживаемость бактерий при прохождении через агрессивную среду желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) [1]. Значительная часть пробиотических микроорганизмов гибнет уже на этапе транзита через верхние отделы пищеварительного тракта, так и не достигая кишечника в жизнеспособном состоянии, что существенно снижает их терапевтический потенциал. Рекомендованное значение жизнеспособных клеток пробиотиков составляет не менее 10^7 КОЕ/г или мл готового продукта [2].

Одним из перспективных подходов сохранения жизнеспособности пробиотиков для достижения ими целевого отдела кишечника является микрокапсуляция в полимерную матрицу [3], которая обеспечивает их изоляцию от неблагоприятных внешних факторов [2]. Особый акцент ученых направлен на метод двойного микрокапсулирования, предполагающий формирование двух защитных пленок. В исследованиях показано [1], что двойное покрытие, в сравнении с одинарным повышает выживаемость пробиотиков в 5–6 раз в условиях ЖКТ и при хранении. Ключевыми факторами, определяющими эффективность микрокапсулирования, является выбор метода инкапсуляции и типа полимерной матрицы.

В рамках данного исследования сравнивали два классических метода получения капсул: экструзии и эмульгирования. Метод экструзии прост и легкодоступен, обеспечивает высокую выживаемость бактерий и высокую эффективность инкапсуляции [4]. Он заключается в пропускании раствора пробиотика с полимером через иглу в раствор отвердителя, в результате чего получают капсулы достаточно крупного размера, порядка 2–5 мм. Однако, его трудно масштабировать из-за медленного образования микрокапсул и сложности создания высокопроизводительного оборудования для данного процесса [5]. Метод эмульгирования позволяет получить капсулы гораздо меньшего размера (25 мкм – 2 мм) путем смешивания суспензии полимера и пробиотика с масляной фазой для образования эмульсии, в ходе которой образуются гелевые капсулы. Преимуществами данного метода выступает высокая эффективность (более 95%), образование более плотных и мелких частиц, а также возможность крупномасштабного производства [6].

Размер и форма микрокапсул являются важными параметрами, поскольку влияют на сохранность их структуры при прохождении через ЖКТ [3]. Влияние крупного размера гранул на выживаемость инкапсулированных бактерий неоднозначно. С одной стороны, увеличение диаметра частиц сопровождается формированием более крупных пор в гидрогелевой матрице, что создает условия для свободной диффузии низкомолекулярных соединений (кислот, желчных солей) и последующей инактивации инкапсулированных клеток [4]. С другой стороны, увеличение диаметра частиц повышает их устойчивость к экстремальным факторам внешней среды [7].

В качестве защитного барьера от агрессивной среды используют полисахариды, белки и липиды [3]. Полисахариды имеют ряд преимуществ перед белками и липидами, в частности, они обладают хорошей термической стабильностью, сохраняют целостность при низких значениях pH, могут образовывать типичные гидрогели, совместимые с водными пищевыми системами. Полисахариды

отличаются разнообразием природных источников выделения: от наземных и морских растений до микроорганизмов [8]. Среди полисахаридов для микрокапсулирования часто используют альгинаты, которые получают из некоторых видов бурых водорослей (*Laminaria hyperborea*, *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus*) [9]. Альгинат, полученный из водорослей промышленным путем имеет ряд недостатков, в частности, может содержать фенольные соединения, белки, липиды и даже маннитол, которые потребуют дополнительных этапов очистки, таких как осаждение [10]. Наиболее безопасным и перспективным первым слоем при микрокапсулировании является альгинат, получаемый бактериальным синтезом, что связано с легкостью регуляции ферментационного процесса и возможностью получения молекул с различными характеристиками [11]. Основными поставщиками являются Китай, Южная Корея, Норвегия, Франция [12]. Альгинат, полученный из водорослей промышленным путем имеет ряд недостатков, в частности, может содержать фенольные соединения, белки, липиды и даже маннитол, которые потребуют дополнительных этапов очистки, таких как осаждение [7]. Для получения альгината хорошего качества необходимо строго соблюдать технологические параметры (температура, концентрация, время процесса), малейшие отклонения могут ухудшить свойства продукта [13]. Альгинат гигроскопичен, что может привести к его загустению при неправильных условиях хранения [14]. В качестве второго слоя выступает покрытие гелевой матрицы слоем хитозана, что увеличивает выживаемость пробиотиков не только в условиях ЖКТ [15, 16], но и при холодильном хранении капсул при температуре 4°C [17, 18]. Таким образом, поиск оптимального метода микрокапсулирования и обоснование выбора полимерной матрицы, обеспечивающих максимальную выживаемость пробиотиков в ЖКТ, является актуальной задачей, решение которой будет способствовать созданию более эффективных пробиотических продуктов. В работе использовали культуру *Weizmannia coagulans*, выделенную коллективом авторов из коровьего молока и депонированную с номером МРВ-32301 в научном музее кафедры биохимии и биотехнологии Воронежского государственного университета инженерных технологий. Выбор данной культуры обоснован ее ранее выявленными пробиотическими свойствами [12].

Цель исследования – сравнить методы экструзии и эмульгирования при получении капсул из коммерческого альгината и бактериального гетерополисахарида альгинатного типа, а также изучить жизнеспособность капсулированных в них пробиотических бактерий при прохождении через имитированную систему желудочно-кишечного тракта.

Объекты и методы исследования

Для инкапсуляции использовали культуру пробиотических бактерий *Weizmannia coagulans* МРВ-32301, ранее выделенную из молока здоровых коров [12]. Штамм бактерий *W. coagulans* культивировали в течение суток при температуре 37°C в стерильном 10%-м восстановленном молоке. Суспензию клеток капсулировали методами экструзии (Ex) и эмульгирования (Em).

В качестве первого слоя полисахаридной матрицы применяли три варианта полисахаридов: Al (2% раствор альгината натрия, Qingdao Nanshan Seaweed, Китай), Gr (2% раствор бактериального гетерополисахарида альгинатного типа, синтезированный бактериями *A. chroococcum*), Al+Gr (смесь 2% раствора альгината натрия и 2% раствора бактериального гетерополисахарида альгинатного типа в соотношении 1:1). Все типы капсул в качестве второго слоя были покрыты 1% раствором хитозана. Таким образом, комбинацией метода капсулирования и состава полисахаридной матрицы получили шесть типов капсул: ExAl, ExGr, Ex(Al+Gr), EmAl, EmGr, Em(Al+Gr).

Для капсулирования методом экструзии клеточную суспензию (титр не менее 10^9 КОЕ/мл) смешивали с раствором альгината натрия либо бактериального гетерополисахарида альгинатного типа, синтезированного бактериями *Azotobacter chroococcum* [7]. Полученную смесь, содержащую клетки в инкапсулирующих агентах, экструдировали через шприц (диаметр иглы 0,5 мм) в раствор хлорида кальция при постоянном перемешивании. Затем капсулы оставляли для затвердевания на 30 мин при температуре 4°C, после чего их извлекали из раствора хлорида кальция путем осаждения под действием силы тяжести.

Капсулирование методом эмульгирования и покрытие капсул хитозаном проводили ранее способом, описанным в [13].

Морфологию капсул определяли с помощью оптического микроскопа Альтами БИО 2 (Россия), оснащенного цифровой камерой (CMOS) и программным обеспечением Altami Studio в препарате «висячая капля». Расчет среднего диаметра гранул проводили путем измерения 30 образцов каждого типа капсул, отобранных методом случайной выборки.

Эффективность инкапсуляции определяли следующим образом: высвобождали инкапсулированные клетки механическим растиранием в стерильном физиологическом растворе с последующим посевом на агаризованную среду MRS методом Коха и подсчетом выросших колоний [14]. Расчет проводили по формуле

$$\text{ЭИ}(\%) = \frac{N}{N_0} \cdot 100,$$

где N – количество жизнеспособных инкапсулированных клеток, высвободившихся из капсул, КОЕ/мл;

N_0 – количество свободных клеток, добавленных в смесь с биополимером в процессе образования капсул, КОЕ/мл.

Оценку жизнеспособности капсул в условиях, имитирующих желудочно-кишечный тракт, осуществляли следующим образом. Кислую среду, моделирующую желудочный сок, готовили на основе физиологического раствора, доведенного раствором соляной кислоты до pH 2,0, с добавлением пепсина. Каждый тип полученных капсул помещали в приготовленный раствор и выдерживали при 37°C в течение 2 ч. По окончании инкубации капсулы собирали центрифугированием и переносили в раствор, имитирующий кишечный сок, приготовленный на основе фосфатного буфера с pH 7,2. Инкубацию проводили при 37°C в орбитальном шейкере в течение 42 ч.

Отобранные пробы высевали глубинным методом на агаризованную среду MRS методом Коха через 24 и 42 ч инкубации [14]. После выращивания подсчитывали количество колоний. Результаты выражали в КОЕ/мл.

Выживаемость в кислых условиях желудка вычисляли следующим образом:

$$\text{В}(\%) = \frac{N}{N_0} \cdot 100,$$

где N – количество жизнеспособных клеток после воздействия раствора, имитирующего желудочный сок, КОЕ/мл;

N_0 – количество жизнеспособных клеток до воздействия раствора, имитирующего желудочный сок, КОЕ/мл.

Полученные результаты были выражены как среднее значение $\pm$ стандартное отклонение. Дисперсионный анализ (ANOVA) выполняли с пост-тестом Тьюки, рассматривающим p -значение $< 0,05$ как статистически значимое, с использованием программного обеспечения Statistica 8.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA).

Результаты и их обсуждение

В исследовании оценивали влияние природы структурообразователей и технологии капсулирования на размер получаемых гранул. Капсулы ExAl и Ex(Al+Gp), сформированные методом экструзии, имели плотную структуру, гладкую поверхность, сферическую форму и сохраняли целостность при физическом воздействии. Капсулы ExGp, полученные тем же способом, напротив, отличались неправильной формой и легко разрушались. Капсулы EmAl, EmGp и Em(Al+Gp), приготовленные методом эмульгирования, характеризовались дефектами формы, неоднородной структурой, мягкой консистенцией и низкой механической прочностью (рисунок 1).

Сравнительная оценка показала, что экструзионные капсулы существенно превосходят эмульсионные, что коррелирует с данными других исследовательских групп (таблица 1) [6].

Таблица 1. Размеры капсул при различных методах экстракции

Table 1. Sizes of capsules produced by different encapsulation methods

Наименование капсул	Размер капсул, мм	
	метод экструзии (Ex)	метод эмульгирования (Em)
Al	4,18 $\pm$ 0,11	1,56 $\pm$ 0,11
Gp	3,76 $\pm$ 0,18	0,15 $\pm$ 0,09
Al+Gp	3,08 $\pm$ 0,13	0,32 $\pm$ 0,05

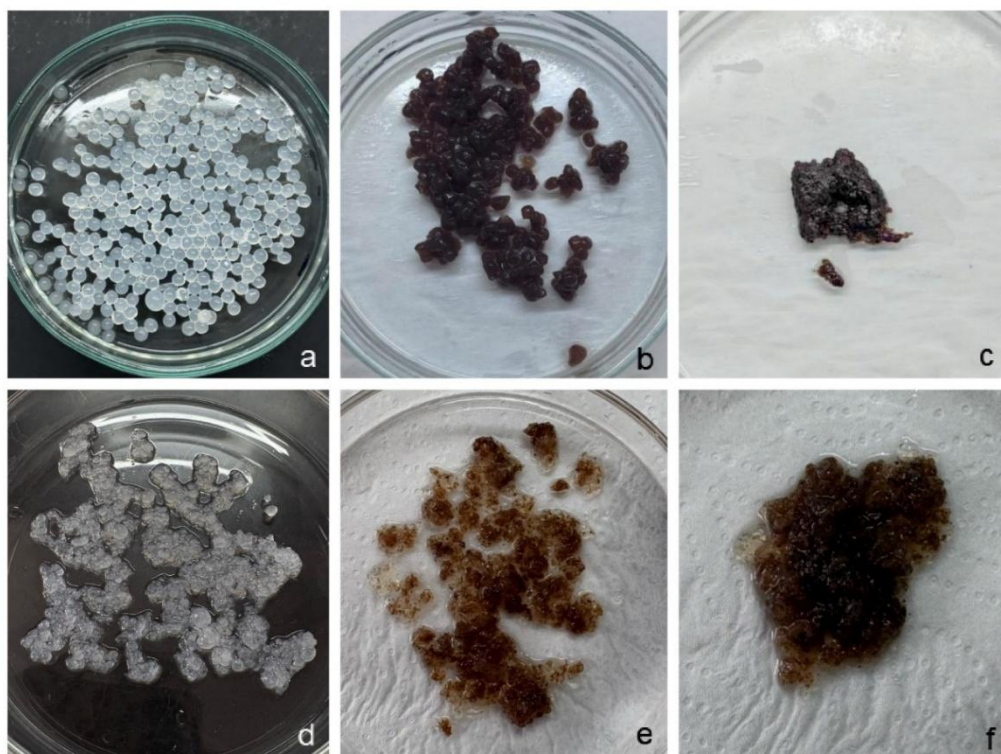


Рисунок 1 – Внешний вид полученных капсул: а – ExAl; б – Ex(Al+Gp); в – ExGp; д – EmAl; е – Em(Al+Gp); ф – EmGp
Figure 1. The obtained capsules: а – ExAl; б – Ex(Al+Gp); в – ExGp; д – EmAl; е – Em(Al+Gp), ф – EmGp

Установлено, что при обоих методах капсулирования максимальный размер гранул достигается при использовании альгината натрия (Al) в качестве полисахаридной матрицы. Введение других полисахаридов приводило к уменьшению диаметра получаемых капсул. Так, экструзионные капсулы из гетерополисахарида (Gp) и смеси гетерополисахарида и альгината (Gp+Al) меньше капсул из чистого альгината (Al) на 10 и 26,3% соответственно, а эмульсионные капсулы из гетерополисахарида (Gp) и смеси гетерополисахарида и альгината (Gp+Al) меньше капсул из чистого альгината (Al) на 90 и 80% соответственно. Метод формования также оказывает существенное влияние на геометрические параметры образцов. Так, диаметр экструзионных гранул превышал размер эмульсионных аналогичного состава: в 2,7 раза — для чистой альгинатной матрицы, в 25 раз — при введении гетерополисахарида, и в 9,6 раза — для их смеси.

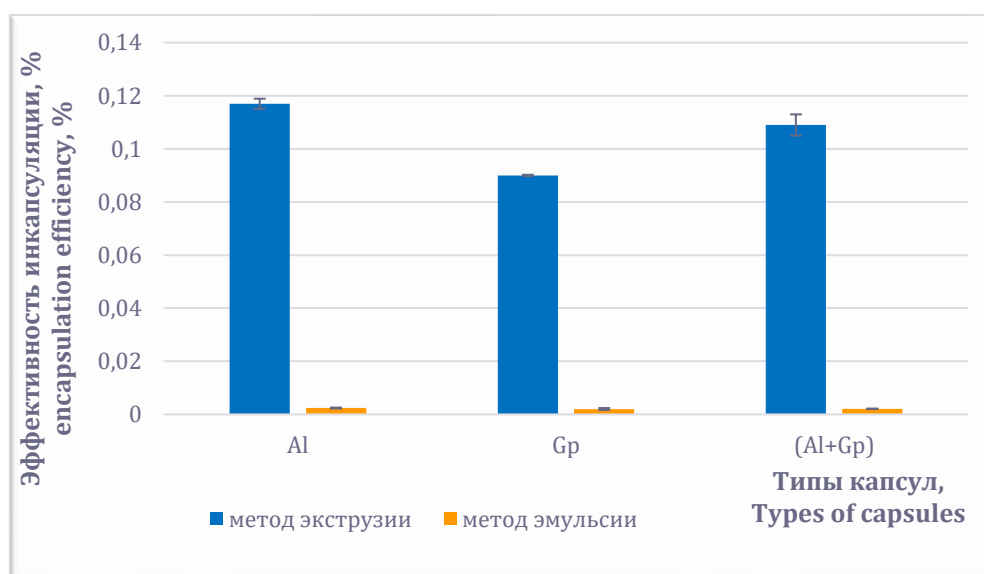


Рисунок 2. Эффективность капсулирования *W. coagulans* в полисахаридные матрицы методами экструзии и эмульгирования
Figure 2. Encapsulation efficiency of *W. coagulans* into polysaccharide matrices via extrusion and emulsification methods

Эффективность инкапсуляции – один из ключевых параметров процесса [6]: анализ данных выявил, что результативность инкапсуляции варьировала от $0,117 \pm 0,002$ до $0,0020 \pm 0,0001\%$ в зависимости от метода и вида используемых полисахаридов для инкапсуляции (рисунок 2).

Анализ представленных на диаграмме данных показал, что эффективность капсулирования для всех типов экструзионных гранул была выше, чем для полученных методом эмульгирования. Это полностью согласуется с известными результатами сравнительных исследований технологий микрокапсулирования [19]. Максимальное значение эффективности инкапсуляции зафиксировано для экструзионных альгинатных капсул – $0,117 \pm 0,002\%$. Данные результаты свидетельствуют об его оптимальной совместимости с пробиотическим штаммом *W. coagulans*. Наименьшие показатели эффективности капсулирования наблюдали при использовании бактериального гетерополисахарида альгинатного типа для изготовления капсул. Данные полисахариды отличаются тем, что часть остатков маннуроновой кислоты в них ацетилирована по положениям С-2 и С-3, тогда как водорослевый альгинат не содержит ацетильных групп [20]. Известно, что прочность гелей, образованных неацетилированными альгинатами, в 10 раз выше, чем ацетилированными, поскольку ацетильные группы ухудшают ионное сшивание [21]. Таким образом, низкий выход капсул может быть объяснен меньшей прочностью гелей, формируемых бактериальным гетерополисахаридом [22].

Одной из ключевых целей микрокапсулирования пробиотиков является их защита от агрессивных факторов желудочно-кишечного тракта, включая низкие значения pH желудочного сока, желчные кислоты и пищеварительные ферменты [9]. Для оценки жизнеспособности инкапсулированных клеток смоделировали *in vitro* условия желудочной среды. Как видно на рисунке 3, после двух часов инкубации в агрессивной среде выживаемость клеток *W. coagulans* снижается. При этом нанесение дополнительно хитозанового покрытия обеспечило гранулам защиту от жестких условий внешнего окружения. Ранее было неоднократно доказано, что хитозан вступает в электростатическое взаимодействие с альгинатами, повышая механическую прочность матриц и предотвращая их преждевременное разрушение [17].

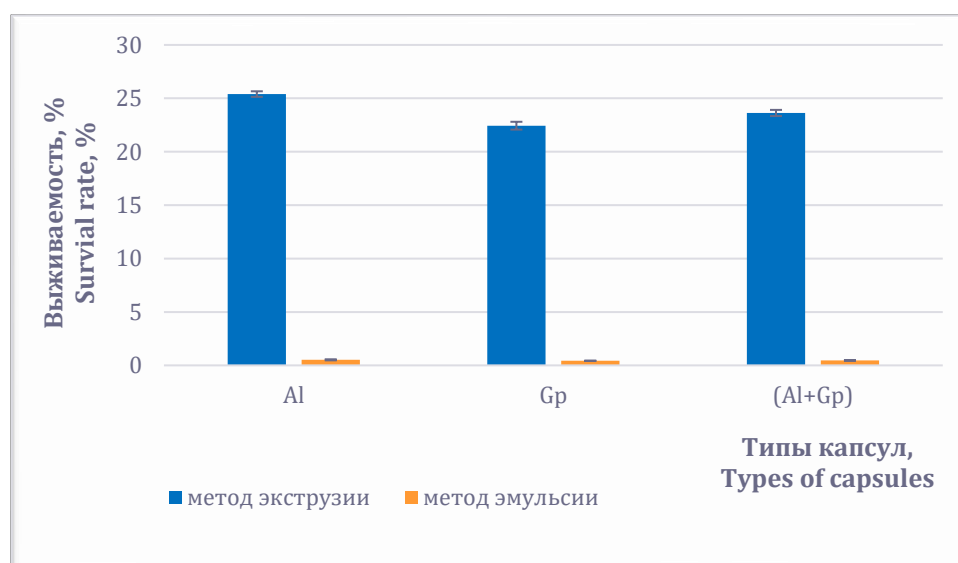


Рисунок 3 – Выживаемость инкапсулированных бактерий *W. coagulans* после двух часов инкубации в моделируемой желудочной среде

Figure 3. Survival rate of encapsulated *W. coagulans* cells after 2-h exposure to simulated gastric fluid

Согласно результатам анализа выживаемости, экструзионные капсулы обеспечили более высокую жизнеспособность клеток в сравнении с эмульсионными (рисунок 3) и составили: $25,40 \pm 0,26\%$ для ExAl, $22,44 \pm 0,37\%$ для ExGp и $23,63 \pm 0,28\%$ для Ex(Al+Gp). Установлено, что данные значения статистически значимо превышают ($p < 0,05$) выживаемость в капсулах, полученных методом эмульгирования, где аналогичные показатели составили: EmAl – $0,52 \pm 0,05\%$, EmGp – $0,43 \pm 0,02\%$ и Em(Al+Gp) – $0,46 \pm 0,02\%$. Согласно литературным данным [18], экструзионные капсулы значительно устойчивее к желудочной среде благодаря более толстым стенкам (150–200 мкм) в сравнении с эмульсионными (20–50 мкм). Из анализа результатов, представленных на диаграмме, видно, что капсулы типа Al демонстрировали

наивысший показатель выживаемости ($25,40 \pm 0,26\%$). Данный факт указывает на то, что альгинат натрия и хитозан образуют прочные структуры благодаря своей электростатической комплементарности, обусловленной противоположными зарядами полимеров [3].

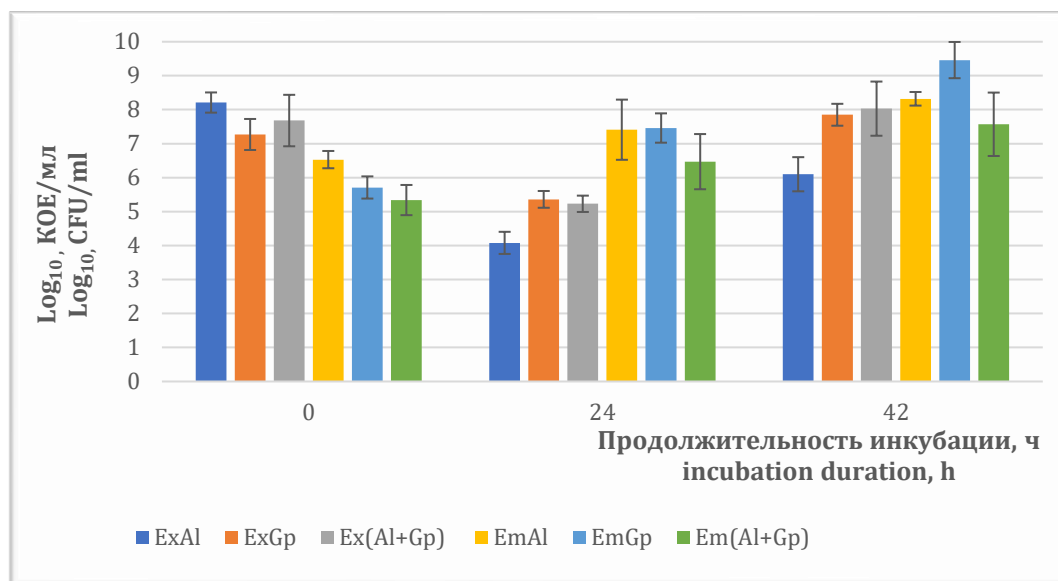


Рисунок 4. Кинетика жизнеспособности инкапсулированных клеток *W. coagulans* в модельной среде кишечника
Figure 4. Viability kinetics of encapsulated *W. coagulans* cells in a simulated intestinal environment

В ходе эксперимента *in vitro* были воссозданы условия, приближенные к условиям толстого кишечника с водородным показателем среды pH 7,2. При попадании капсул в слабощелочную среду происходит набухание защитного гидрогеля, увеличиваются размеры пор оболочек и отмечается контролируемое высвобождение капсулированных пробиотических клеток [23]. Его интенсивность зависит как от метода формирования частиц, так и от материала биополимера, используемого для покрытия (рисунок 4). Согласно полученным данным, образцы, сформированные методом эмульгирования, обеспечили большее число высвободившихся жизнеспособных клеток в сравнении с экструзионными капсулами. Так, через 24 ч lg КОЕ/мл высвободившихся клеток для матриц EmAl в сравнении с ExAl был выше на 3,3 lg; для капсул EmGp в сравнении с ExGp – на 2,1 lg; для Em(Al+Gp) в сравнении с Ex(Al+Gp) – на 1,2 lg. По прошествии 42 ч lg этот показатель для варианта EmAl в сравнении с ExAl был выше на 2,2 lg; для капсул EmGp в сравнении с ExGp – на 1,6 lg; для капсул Em(Al+Gp) в сравнении с Ex(Al+Gp) – ниже на 0,5 lg. Если говорить об интенсивности высвобождения клеток для каждого типа носителей, то КОЕ/мл высвободившихся клеток через 42 ч инкубации в сравнении с 24 ч возрос для всех исследуемых групп. Прирост составил: для капсул ExAl – 2,0 lg, для ExGp – 2,5 lg, для Ex(Al+Gp) – 2,8 lg, для EmAl – 0,9 lg, для EmGp – 2,0 lg, для Em(Al+Gp) – 1,1 lg. Из полученных данных можно заключить, что эмульсионные капсулы обеспечивают более интенсивное высвобождение клеток. Максимальную концентрацию числа высвободившихся клеток наблюдали в образцах EmGp, она составила $2,9 \cdot 10^9$ КОЕ/мл.

Заключение

Два технологических подхода – экструзии и эмульгирования – впервые системно сопоставлены на трех полисахаридных матрицах, включая бактериальный гетерополисахарид альгинатного типа, синтезированный *Azotobacter chroococcum*. Исходно предполагалось, что экструзионные капсулы будут крупнее и обеспечат лучшую защиту в желудке, а эмульсионные – большее число высвободившихся в условиях кишечника клеток, альгинат же превзойдет бактериальный гетерополисахарид по прочности. Гипотеза о преимуществе экструзии для желудочной защиты полностью подтвердилась: выживаемость клеток оказалась на 22,01–24,88 процентных пункта выше, чем в эмульсионных капсулах. Также оказалось верным предположение о более полном высвобождении клеток из эмульсионных носителей в поздние сроки для образцов EmAl и EmGp, в то время как для Em(Al+Gp) высвобождение через 42 ч

оказалось на $0,5 \lg$ ниже, чем для экструзионных аналогов, что ранее не описывалось. Максимальное высвобождение отмечено для капсул EmGr – $2,9 \cdot 10^9$ КОЕ/мл. Как и ожидалось, матрицы из бактериального гетерополисахарида уступают альгинатным по прочности и выходу, но смесь полисахаридов дает промежуточные значения, что открывает возможности замены импортного альгината на бактериальный гетерополисахарид, получаемый ферментацией, снижая зависимость от зарубежного сырья. Полученные данные подтверждают, что разработанные капсулы выполняют двойную функцию: обеспечивают надежную защиту клеток пробиотических бактерий от агрессивного воздействия желудочной среды и одновременно гарантируют их контролируемое высвобождение в целевом отделе кишечника с сохранением метаболической активности микроорганизмов. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию соотношения компонентов в смеси Al+Gr, изучение стабильности при хранении, проведение экспериментов *in vivo*, а также комбинирование с пребиотиками для создания синбиотических систем с усиленным пробиотическим эффектом.

Литература

1. Parsana Y., Yadav M., Kumar S. Microencapsulation in the chitosan-coated alginate-inulin matrix of *Limosilactobacillus reuteri* SW23 and *Lactobacillus salivarius* RBL50 and their characterization. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2023, V. 5, article 100285. DOI: 10.1016/j.carpta.2023.100285
2. Vijayaram S., Sinha R., Faggio C., Ringø E., Chou C.C. Biopolymer encapsulation for improved probiotic delivery: Advancements and challenges. *AIMS Microbiology*. 2024, V. 10, no. 4, pp. 986–1023. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109682
3. Rodrigues F.J., Cedran M.F., Bicas J.L., Sato H.H. Encapsulated probiotic cells: Relevant techniques, natural sources as encapsulating materials and food applications – A narrative review. *Food Research International*. 2020, V. 137, article 137. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109682
4. Jeznienė S., Bružaitė I., Šipailienė A. Application of biomacromolecules encapsulation systems for the long-term storage of *Lactobacillus plantarum* F1 and *Lactobacillus reuteri* 182. *Heliyon*. 2024, v. 10, no. 5, article 26566. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26566
5. Cite da Silva S.A., Batista L.D., Diniz D.S. Microencapsulation of probiotics by oil-in-water emulsification technique improves cell viability under different storage conditions. *Foods*. 2023, v. 12, no. 2, p. 252. DOI: 10.3390/foods12020252
6. Yun P., Devahastin S., Chiewchan N. Microstructures of encapsulates and their relations with encapsulation efficiency and controlled release of bioactive constituents: A review. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2021, V. 2, pp. 1768–1799. DOI: 10.1111/1541-4337.12701
7. Kistaubayeva A., Abdulzhanova M., Zhantlessova S., Savitskaya I., Karpenyuk T., Goncharova A., Sinyavskiy Y. The effect of encapsulating a prebiotic-based biopolymer delivery system for enhanced probiotic survival. *Polymers (Basel)*. 2023, V. 15, no. 7, article 1752. DOI: 10.3390/polym15071752
8. Puhari S.S.M., Yuvaraj S., Vasudevan V., Ramprasath T., Rajkumar P., Arunkumar K., Amutha C., Selvam G.S. Isolation and characterization of fucoidan from four brown algae and study of the cardioprotective effect of fucoidan from *Sargassum wightii* against high glucose-induced oxidative stress in H9c2 cardiomyoblast cells. *Journal of Food Biochemistry*. 2022, V. 46, no. 12, article 14412. DOI: 10.1111/jfbc.14412
9. Anjana K., Arunkumar K. Brown algae biomass for fucoxanthin, fucoidan and alginate; update review on structure, biosynthesis, biological activities and extraction valorisation. *Int J Biol Macromol*. 2024, V. 280, Pt. 2, article 135632. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135632
10. González F.L.A., Castillo R.V., Sánchez P.M., Medellín C.N.A. Fundamentals in applications of algae biomass: A review. *J Environ Manage*. 2023, V. 338, article 117830. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117830
11. Bonartseva G., Akulina E., Myshkina V., Voinova V., Makhina T., Bonartsev A. Alginate biosynthesis by *Azotobacter bacteria*. *Appl Biochem Microbiol*. 2017, V. 53, pp. 52–59. DOI: 10.1134/S0003683817010070
12. Сыромятников М.Ю., Шабунин С.В., Козликина А.С. и др. Анализ устойчивости и антагонистической активности пробиотических микроорганизмов, выделенных из молока и молозива коров // Ветеринарный фармакологический вестник. 2024. № 1. С. 109–120. DOI: 10.17238/issn2541-8203.2024.1.109
Syromyatnikov M.Yu., Shabunin S.V., Kozlikina A.S. et al. Stability analysis of the antagonistic activity of probiotic microorganisms isolated from milk and colostrum of cows. *Bulletin of Veterinary Pharmacology*. 2024, no. 1, pp. 109–120. DOI: 10.17238/issn2541-8203.2024.1.109 (In Russian)
13. Зверева О. В., Пряхина Н.А., Толкачева А.А. и др. Влияние различных полисахаридов на инкапсуляцию пробиотических штаммов *Weissella confusa* и *Weizmannia coagulans* и исследование их жизнеспособности в моделируемых условиях желудочно-кишечного тракта // Пищевая промышленность. 2026. № 4. С. 150–155. DOI: 10.52653/PPI.2026.4.4.027
Zvereva O.V., Pryakhina N.A., Tolkacheva A.A. et al. The effect of various polysaccharides on the encapsulation of probiotic strains of *Weissella confusa* and *Weizmannia coagulans*, and the study of their viability in simulated

- conditions of the gastrointestinal tract. *Food Industry*. 2026, no. 4, pp. 150–155. DOI: 10.52653/PPI.2026.4.4.027 (In Russian)
14. Satchanska G., Mustapha G., Ahad V., Ilin D., Doycheva A. *Lactobacilli count*, morphology analysis and biochemical identification of lactic acid bacteria isolate from top yogurt brands. *Acta Microbiologica Bulgarica*. 2017, V. 33, no. 2, pp. 79–86.
 15. Edo G.I., Mafe A.N., Razooqi N.F. Advances in bio-polymer coatings for probiotic microencapsulation: chitosan and beyond for enhanced stability and controlled release. *Designed Monomers and Polymers*. 2024, V. 28, no. 1, pp. 1–34. DOI: 10.1080/15685551.2024.2448122
 16. Iqbal R., Zahoor T., Huma N. In-vitro GIT Tolerance of Microencapsulated *Bifidobacterium bifidum* ATCC 35914 Using Polysaccharide-Protein Matrix. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2019, V. 11, no. 3, pp. 830–839. DOI: 10.1007/s12602-017-9384-5
 17. Oberoi K., Tolun A., Altintas Z., Sharma S. Effect of alginate-microencapsulated hydrogels on the survival of *Lactobacillus rhamnosus* under simulated gastrointestinal conditions. *Foods*. 2021, V. 10, no. 9, article 1999. DOI: 10.3390/foods10091999
 18. Bennacef C., Desobry S., Probst L., Desobry-Banon S. Alginate based core-shell capsules production through coextrusion methods: Recent applications. *Foods*. 2023, V. 12, no. 9, article 1788. DOI: 10.3390/foods12091788
 19. Fathi F., Saberi Riseh R., Khodaygan P., Hosseini S., Skorik Y. Microencapsulation of a *Pseudomonas* strain (VUPF506) in alginate-whey protein-carbon nanotubes and next-generation sequencing identification of this strain. *Polymers (Basel)*. 2021, V. 13, no. 23, article 4269. DOI: 10.3390/polym13234269
 20. Ponce B., Zamora-Quiroz A., González E., Andler R., Díaz-Barrera A. Advances in alginate biosynthesis: regulation and production in *Azotobacter vinelandii*. *Front Bioeng Biotechnol*. 2025, V. 13, article 1593893. DOI: 10.3389/fbioe.2025.1593893
 21. Fabich H., Vogt S., Sherick M., Seymour J., Brown J., Franklin M. Microbial and algal alginate gelation characterized by magnetic resonance. *Journal of Biotechnology*. 2012, V. 161, no. 3, p. 320–327. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2012.04.016
 22. Urtuvia V., Maturana N., Acevedo F., Peña C., Díaz-Barrera A. Bacterial alginate production: an overview of its biosynthesis and potential industrial production. *World J Microbiol Biotechnol*. 2017, V. 33, no. 11, article 198. DOI: 10.1007/s11274-017-2363-x
 23. Xu C., Ban Q., Wang W., Hou J., Jiang Z. Novel nano-encapsulated probiotic agents: encapsulate materials, delivery, and encapsulation systems. *Journal of Controlled Release*. 2022, V. 349, pp. 184–205. DOI: 10.1016/j.jconrel.2022.06.061

Информация об авторах

Нина Александровна Прякина – мл. науч. сотрудник лаборатории метагеномики и пищевых биотехнологий
Юлия Петровна Кузнецова – мл. науч. сотрудник лаборатории метагеномики и пищевых биотехнологий
Ольга Владимировна Зверева – ст. преподаватель кафедры биохимии и биотехнологии
Анна Александровна Толкачева – ст. преподаватель кафедры биохимии и биотехнологии
Анастасия Сергеевна Вострикова – мл. науч. сотрудник лаборатории метагеномики и пищевых биотехнологий
Корнеева Ольга Сергеевна – док. биол. наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности

Information about the authors

Nina A. Pryakhina, Junior Researcher, Laboratory of Metagenomics and Food Biotechnology
Yuliya P. Kuznetsova, Junior Researcher, Laboratory of Metagenomics and Food Biotechnology
Olga V. Zvereva, Senior lecturer, Department of Biochemistry and Biotechnology
Anna A. Tolkacheva, Senior lecturer, Department of Biochemistry and Biotechnology
Anastasia S. Vostrikova, Junior Researcher, Laboratory of Metagenomics and Food Biotechnology
Olga S. Korneeva, D. Sci. (Biol.), Professor, Vice-Rector for Research and Innovation

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

Статья поступила в редакцию 19.06.2026
Одобрена после рецензирования 17.08.2026
Принята к публикации 24.08.2026

The article was submitted 19.06.2026
Approved after reviewing 17.08.2026
Accepted for publication 24.08.2026