








Исследование влияния свободных и инкапсулированных клеток пробиотического штамма *Weizmannia coagulans* на свойства пробиотического кисломолочного продукта и оценка их выживаемости в имитированных условиях ЖКТ








Анна А. Толкачева	¹	anna-biotech@yandex.ru	 0000-0003-0725-6482
Нина А. Пряхина	¹	nekrasovaninelya@yandex.ru	 0000-0003-0434-3839
Ольга В. Зверева	¹	bond.vrn15@yandex.ru	 0000-0002-7051-9858
Екатерина В. Богданова	¹	ek-v-b@yandex.ru	 0000-0001-5053-2273
Юлия П. Кузнецова	¹	teplovamart@mail.ru	 0009-0001-6701-3039
Михаил Ю. Сыромятников	¹	mihan.vrn@mail.ru	 0000-0001-9028-0613
Ольга С. Корнеева	¹	korneeva-olgas@yandex.ru	 0000-0002-2863-0771

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Создание пробиотических кисломолочных продуктов, дополнительно обогащенных пробиотиками, способных сохранять свою жизнеспособность при хранении готового продукта и в агрессивных условиях желудочно-кишечного тракта (ЖКТ), является актуальной задачей. В ходе данного исследования методом эмульсии были изготовлены капсулы из альгината, пектина, к-каррагинана, дополнительно покрытые хитозаном, с включенными в них клетками пробиотического штамма *Weizmannia coagulans*. Были приготовлены образцы пробиотического кисломолочного продукта с клетками *W. coagulans* в свободной и капсулированной форме и проанализированы физико-химические, микробиологические и сенсорные характеристики готового продукта. При проверке жизнеспособности капсул в готовом продукте, в имитированных условиях ЖКТ было установлено, что капсулированные клетки показали высокую степень выживаемости в сравнении со свободными. Для капсул из смеси альгинат-пектин (А-П) она составила $9,92 \text{ Log}_{10} \text{ КОЕ/мл}$, для капсул из смеси альгинат-пектин-каррагинан (А-П-К) $10,33 \text{ Log}_{10} \text{ КОЕ/мл}$, выживаемость свободных клеток упала до значения $2,17 \text{ Log}_{10} \text{ КОЕ/мл}$. Капсулированные и свободные клетки пробиотика при хранении кисломолочного продукта оказали значительное влияние на различные характеристики готового продукта. Наблюдалась тенденция к повышению титруемой кислотности, к снижению вязкости и увеличению синерезиса. Жизнеспособность свободных клеток пробиотика в течение 21го дня хранения снизилась на $7,13 \text{ Log}_{10} \text{ КОЕ/мл}$, тогда как выживаемость капсулированных клеток упала всего на $1,35 \text{ Log}_{10} \text{ КОЕ/мл}$ для А-П капсул и на $2,92 \text{ Log}_{10} \text{ КОЕ/мл}$ для А-П-К капсул. Внесение свободных и капсулированных клеток незначительно повлияло на сенсорные характеристики готового продукта по истечении всего срока хранения. Результаты показали, что инкапсуляция пробиотиков значительно повышает выживаемость бактерий как в готовом продукте при хранении, так и в имитированных условиях ЖКТ.

Ключевые слова: инкапсуляция, пробиотики, кисломолочный продукт, альгинат натрия, пектин, каррагинан, хитозан, реологические характеристики, сенсорные характеристики, имитированные условия ЖКТ.

A study of the effect of free and encapsulated cells of the probiotic strain *Weizmannia coagulans* on the properties of a probiotic fermented milk product and an assessment of their survival under simulated gastrointestinal conditions

Anna A. Tolkacheva	¹	anna-biotech@yandex.ru	 0000-0003-0725-6482
Nina A. Pryakhina	¹	nekrasovaninelya@yandex.ru	 0000-0003-0434-3839
Olga V. Zvereva	¹	bond.vrn15@yandex.ru	 0000-0002-7051-9858
Ekaterina V. Bogdanova	¹	ek-v-b@yandex.ru	 0000-0001-5053-2273
Yulia P. Kuznetsova	¹	teplovamart@mail.ru	 0009-0001-6701-3039
Mikhail Y. Syromyatnikov	¹	mihan.vrn@mail.ru	 0000-0001-9028-0613
Olga S. Korneeva		korneeva-olgas@yandex.ru	 0000-0002-2863-0771

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Для цитирования

Толкачева А.А., Пряхина Н.А., Зверева О.В., Богданова Е.В., Кузнецова Ю.П., Сыромятников М.Ю., Корнеева О.С. Исследование влияния свободных и инкапсулированных клеток пробиотического штамма *Weizmannia coagulans* на свойства пробиотического кисломолочного продукта и оценка их выживаемости в имитированных условиях ЖКТ // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 139–148. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-139-148

For citation

Tolkacheva A.A., Pryakhina N.A., Zvereva O.V., Bogdanova E.V., Kuznetsova Yu.P., Syromyatnikov M.Yu., Korneeva O.S. A study of the effect of free and encapsulated cells of the probiotic strain *Weizmannia coagulans* on the properties of a probiotic fermented milk product and an assessment of their survival under simulated gastrointestinal conditions. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 139–148. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-139-148

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Abstract. The creation of probiotic fermented milk products, additionally enriched with probiotics, capable of maintaining their viability during storage of the finished product and under the harsh conditions of the gastrointestinal tract (GIT) is a pressing issue. In this study, capsules of alginate, pectin, and κ -carrageenan, additionally coated with chitosan, were produced using an emulsion method, encapsulating cells of the probiotic strain *Weizmannia coagulans*. Samples of the probiotic fermented milk product containing free and encapsulated *W. coagulans* cells were prepared, and the physicochemical, microbiological, and sensory characteristics of the finished product were analyzed. When testing the viability of the capsules in the finished product under simulated GIT conditions, it was found that encapsulated cells demonstrated a high survival rate compared to free cells. For capsules made of an alginate-pectin mixture (A-P), it was $9.92 \text{ Log}_{10} \text{ CFU/ml}$, for capsules made of an alginate-pectin-carrageenan mixture (A-P-C), $10.33 \text{ Log}_{10} \text{ CFU/ml}$, the viability of free cells dropped to $2.17 \text{ Log}_{10} \text{ CFU/ml}$. Encapsulated and free probiotic cells during storage of a fermented milk product had a significant impact on various characteristics of the finished product. A tendency towards an increase in titratable acidity, a decrease in viscosity, and an increase in syneresis was observed. The viability of free probiotic cells during 21 days of storage decreased by $7.13 \text{ Log}_{10} \text{ CFU/ml}$, while the viability of encapsulated cells dropped by only $1.35 \text{ Log}_{10} \text{ CFU/ml}$ for A-P capsules and by $2.92 \text{ Log}_{10} \text{ CFU/ml}$ for A-P-C capsules. The addition of free and encapsulated cells had little effect on the sensory characteristics of the finished product at the end of its shelf life. The results showed that probiotic encapsulation significantly increased bacterial survival both in the finished product during storage and under simulated gastrointestinal conditions.

Keywords: encapsulation, probiotics, fermented milk product, sodium alginate, pectin, carrageenan, chitosan, rheological characteristics, sensory characteristics, simulated gastrointestinal conditions.

Введение

В связи с повсеместным распространением культуры здорового образа жизни, а также повышением потребительской грамотности в вопросах нутрициологии, наблюдается повышенный интерес к функциональным пищевым продуктам, обладающим доказанным положительным воздействием на здоровье человека. Особое место в этой категории занимают пробиотические кисломолочные продукты, содержащие живые культуры пробиотических микроорганизмов. Пробиотики способны корректировать нарушения кишечного микробиома, возникшие из-за приема антибиотиков, стресса или неправильного питания, могут снижать уровень холестерина, поддерживать иммунитет организма и улучшать усвоение минералов [1]. Для эффективной работы пробиотиков, их жизнеспособность в потребляемом продукте должна быть не ниже 10^7 КОЕ на миллилитр или грамм потребляемого продукта [2]. Сохранность пробиотических культур в кисломолочных продуктах зависит от множества факторов: условий производства продукта, обработки и хранения [3]. При этом жизнеспособность пробиотических штаммов при прохождении через агрессивную среду желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) имеет принципиальное значение, поскольку именно этот фактор определяет их оздоровительный эффект [4].

Существуют различные методы доставки пробиотиков непосредственно в отдел толстого кишечника, где должно происходить их дальнейшее размножение [5]. Технология инкапсулирования в последнее время привлекает все больше внимания. Заключение клеток в различные матрицы-носители помогает преодолеть кислотные условия желудка и сохранить жизнеспособность клеток [6]. На эффективность инкапсуляции влияет множество факторов: метод, условия инкапсулирования, используемые носители, а также сам вид пробиотических бактерий [7]. Эмульсионный метод

позволяет получить микрокапсулы достаточного мелкого размера, при этом выживаемость микроорганизмов составляет более 80%, легко масштабируется и, следовательно, подходит для применения в промышленности [8].

Биоматериал, используемый в качестве матрицы-носителя, должен обладать способностью к гелеобразованию, быть нетоксичным, экономичным и доступным. Данными свойствами обладают следующие биоматериалы: альгинат натрия, пектин и κ -каррагинан [9–12]. Многочисленными научными исследованиями доказана высокая эффективность инкапсуляции и хорошая выживаемость пробиотических бактерий при использовании данных биоматериалов [13]. Наличие второго слоя биоматериала при изготовлении капсул влияет на эффективность доставки капсул до нужного отдела кишечника, где должно происходить высвобождение клеток пробиотиков. В качестве второго слоя часто используется хитозан [14]. Молекулы хитозана имеют положительный заряд, тогда как полисахариды первого слоя капсул обладают отрицательным зарядом, что повышает прочность капсул [15].

При выборе пробиотической культуры для технологии инкапсуляции ключевыми факторами являются выживаемость в процессе капсулирования и доказанная эффективность штамма. В предыдущем исследовании нашей научной группой были подробно изучены пробиотические свойства штамма *W. coagulans*, относящегося к семейству *Bacillaceae* [16].

Пробиотические кисломолочные продукты обладают целым комплексом полезных свойств для здоровья человека и представляют собой ценный функциональный продукт питания [17]. Данный продукт популярен и может содержать в своем составе большое количество полезных микроорганизмов. Дополнительное обогащение кисломолочного продукта пробиотиками может оказывать влияние на его сенсорные и физико-химические показатели [18]. В процессе хранения и ферментации pH кисломолочного

продукта может снижаться, что может негативно влиять на бактерии-пробиотики, находящиеся в виде свободных клеток. Свободные клетки также не могут противостоять жестким условиям ЖКТ и погибают [19]. В связи с чем, актуальной задачей является создание кисломолочных продуктов с дополнительным обогащением инкапсулированными клетками пробиотических микроорганизмов, которые благодаря защитному биополимеру, будут эффективно доставляться в толстый кишечник человека. Основные задачи данного исследования включают изготовление капсул с двойным слоем с использованием различных доступных полисахаридов, обогащение ими кисломолочного продукта и оценку их выживаемости в условиях хранения готового продукта и в имитированных условиях ЖКТ, оценку некоторых физико-химических, сенсорных и реологических показателей обогащенного кисломолочного продукта.

Материалы и методы

В работе использовали пробиотическую культуру *Weizmannia coagulans* и обычную культуру, традиционно применяемую в заквасках для кисломолочных продуктов, *Streptococcus thermophilus*. Обе культуры выделены коллективом авторов из природных источников и депонированы в научном музее кафедры биохимии и биотехнологии ФГБОУ ВО ВГУИТ.

Для изготовления капсул использовали альгинат натрия (Qingdao Nanshan Seaweed, Китай), низкоэтерифицированный амидированный пектин (НЭА), к-каррагинан (ООО Вектор, Россия), хитозан (Sigma-Aldrich, США), хлорид кальция (CDH, Индия), Твин 80 (Ленреактив, Россия), подсолнечное масло. Для производства кисломолочного продукта использовали восстановленное обезжиренное стерилизованное молоко. Для культивирования микроорганизмов использовали MRS агар и агар *Streptococcus Thermophilus Isolation* (Himedia, Индия).

Культивирование пробиотической культуры *W. coagulans* проводили в течение 24 ч при 37° С в предварительно отстерилизованном 10% восстановленном молоке. Начальную концентрацию клеток *W. coagulans* до инкапсуляции устанавливали путем глубинного посева на агаризованную среду MRS.

Изготовление капсул с пробиотической культурой *W. coagulans* проводили по ранее описанной методике методом эмульсии, использовали различные сочетания полисахаридов: альгината натрия, пектина и к-каррагинана, дополнительно покрывали вторым слоем хитозана [20]. Капсулы были лиофилизированы и использованы для приготовления пробиотического кисломолочного продукта (Таблица 1).

Таблица 1.

Состав капсул с культурой *W. coagulans*

Table 1.

Composition of the obtained capsules

Капсулы Capsules	Состав капсул/capsule composition			
	1 слой капсул 1 layer of capsules			2 слой капсул 2 layer of capsules
	Компонент 1	Компонент 2	Компонент 3	Компонент
А-П	2% альгинат натрия	3% пектин	-	1% хитозан
А-П-К	2% альгинат натрия	3% пектин	2% к-каррагинан	1% хитозан

Кисломолочный продукт производили согласно способу, описанному Головач [21]. Обезжиренное восстановленное молоко стерилизовали при температуре 121 °С в течение 11 минут, охлаждали до 45 °С. Каждый образец инокулировали культурой *S. thermophilus* (1% по объёму). Пробиотический кисломолочный продукт производили путем добавления свободных клеток или инкапсулированных культуры *W. coagulans*. Было приготовлено четыре различных образца:

1. Контроль. Кисломолочный продукт, содержащий 1% по объёму инокулята *S. thermophilus*. (свS контроль)

2. Кисломолочный продукт, содержащий 1% по объёму инокулята *S. thermophilus*, и 0,5% по объёму свободных клеток *W. coagulans*. (свS+свW)

3. Кисломолочный продукт, содержащий 1% по объёму инокулята *S. thermophilus*,

0,5% по объёму клеток *W. coagulans* инкапсулированных в А-П. (свS+кW+А-П)

4. Кисломолочный продукт, содержащий 1% по объёму инокулята *S. thermophilus*, 0,5% по объёму клеток *W. coagulans* инкапсулированных в А-П-К. (свS+кW+А-П-К)свS, свW – свободные клетки культур *S. thermophilus*, *W. Coagulans* кW – капсулированные клетки культуры *W. coagulans*

Все партии разливали в колбы и инкубировали при температуре 42–45 °С на протяжении 6 ч до образования сгустков. Затем часть колб анализировали, остальные хранили в течение 21 дня при 4 °С ± 1.

Для имитации условий ЖКТ сока использовали физиологический раствор. Его кислотность корректировали до значения pH 2,0 с помощью 0,01 М раствора HCl. Полученный раствор стерилизовали в течение 15 минут

при 121 °С. В стерильный раствор дополнительно вносили желудочный фермент пепсин концентрацией 15 мг/л. Отбирали по 1 мл каждого образца полученного кисломолочного продукта и вносили в раствор, имитирующий условия желудка, инкубировали в течении 2 часов при 37 °С. Полученные пробы высевали на среде MRS глубинным способом и культивировали при 37 °С. Подсчет клеток проводили через 42 часа, результаты выражали в Log₁₀ КОЕ/мл.

Сенсорный анализ пробиотических кисломолочных продуктов проводили по ГОСТ 31981–2013 «Йогурты. Общие технические условия» [22].

Количественный учет пробиотических микроорганизмов в кисломолочном продукте при хранении проводили по методике, описанной Frakolaki et al. [18]. Образцы отбирали и анализировали из каждой партии через несколько промежутков времени после производства: 0, 7, 14, 21 день. Образцы кисломолочного продукта разбавляли до 100 мл физиологическим раствором, смешивали в гомогенизаторе и глубинно высевали на MRS агар, инкубировали при 37 °С (45 °С для учета *S. thermophilus*) в течение 48 часов. После инкубации проводили подсчет жизнеспособных пробиотических клеток, с последующим пересчетом на логарифмическое значение колониеобразующих единиц на 1 мл продукта (Log₁₀ КОЕ/мл).

Титруемую кислотность определяли по ГОСТ 31976–2012 [23].

Вязкость определяли с помощью вискозиметра AND A&D Company Limited (Япония) в 50 мл образца кисломолочного продукта при комнатной температуре.

Синерезис определяли методом центрифугирования, описанным Головач [24]. Степень синерезиса рассчитывали по формуле (1):

$$CC = \frac{V_c}{V_{np}} \times 100, \quad (1)$$

где CC – степень синерезиса, %; V_c – объем, выделившейся при центрифугировании сыворотки, мл; V_{np} – объем пробы в центрифужной пробирке, мл.

Все эксперименты были выполнены в трёх повторностях (n = 3). Полученные результаты были выражены как среднее значение ± стандартное отклонение. Дисперсионный анализ (ANOVA) был выполнен с пост-тестом Тьюки, различия считались статистически значимыми при p<0,05, и с использованием программного обеспечения Statistica 8.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA).

Результаты и обсуждение

1. Оценка жизнеспособности инкапсулированных и свободных клеток в имитированных условиях ЖКТ

Для достижения желаемого эффекта от пробиотиков очень важна жизнеспособность клеток в условиях ЖКТ [25]. Как видно из рисунка 1, спустя 2 часа инкубации в растворе, имитирующем условия желудка, наблюдалось снижение жизнеспособности свободных клеток с 13,13 до значения 2,17 Log₁₀ КОЕ/мл, в то же время инкапсулированные клетки показали высокую выживаемость в этих условиях. Образцы пробиотического кисломолочного продукта с использованием инкапсулированных клеток показали незначительное снижение числа жизнеспособных клеток: на 1,17 логарифмических единиц образец свS+кW+A-П, и на 1,74 логарифмических единицы образец свS+кW+A-П-К. Сравнение количества жизнеспособных свободных и инкапсулированных клеток *W. coagulans* показало значительное различие (p<0,05), что говорит о влиянии капсуляции на выживаемость пробиотических бактерий. Полученные результаты коррелируют с ранее полученными зарубежными данными [26].

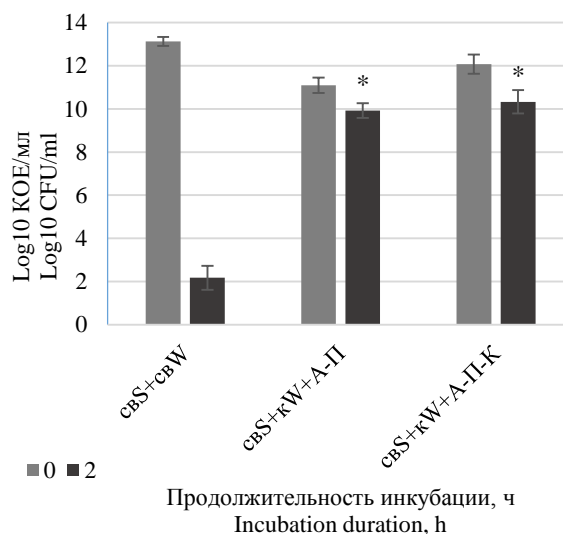


Рисунок 1. Жизнеспособность инкапсулированных и свободных клеток *W. coagulans* в разных образцах пробиотических кисломолочных продуктов после двух часов воздействия условий, имитирующих желудок. * – статистически значимые результаты по отношению к образцу кисломолочного продукта свS+свW (p<0,05)

Figure 1. Viability of encapsulated and free *W. coagulans* cells in different probiotic fermented milk product samples after two hours of exposure to artificial conditions simulating the stomach. * – statistically significant results in relation to the fermented milk product sample freeS+freeW (p<0.05)

2 Сенсорный анализ образцов пробиотического кисломолочного продукта.

Сенсорный анализ образцов кисломолочного продукта, содержащих свободные и инкапсулированные клетки *W. coagulans* проводился сразу после приготовления образцов и спустя 21 сутки хранения при 4 °С. Результаты представлены в таблице 2. Все образцы полученных кисломолочных продуктов сразу после приготовления были молочно-белого цвета, имели достаточно однородную консистенцию

и обладали приятным кисломолочным вкусом и запахом. По истечении 21 дня хранения в образце свS+кW+A-П, содержащем капсулы из смеси альгината и пектина, вкус приобрел сладковатый оттенок. Вкус образца свS+кW+A-П-К с капсулами из альгината пектина и каррагинана стал кисловатым. Изменений остальных показателей отмечено не было. Схожие результаты получили и другие исследователи Kailasapathy и Pour [27, 28].

Таблица 2.

Органолептическая характеристика кисломолочных продуктов

Table 2.

Organoleptic characteristics of fermented milk product

Показатель Indicator	Образец Sample							
	готовый				21 день			
	свS (контроль)	свS+свW	свS+кW+A-П	свS+кW+A-П-К	свS (контроль)	свS+свW	свS+кW+A-П	свS+кW+A-П-К
Внешний вид и консистенция Appearance and consistency	Однородная, с ненарушенным сгустком, с незначительным отделением сыворотки Homogeneous, with an intact clot, with slight separation of serum				Однородная, с ненарушенным сгустком, с незначительным отделением сыворотки Homogeneous, with an intact clot, with slight separation of serum			
Вкус и запах Taste and smell	Чистый, приятный, кисло-молочный	Чистый, кисло-молочный	Чистый, приятный, кисло-молочный	Чистый, приятный, кисло-молочный	Запах приятный, вкус кисло-молочный	Запах и вкус кисло-молочный	Запах кисло-молочный, вкус кисло-молочный и немного сладковатый	Запах приятный, кисло-молочный, вкус кисловатый
Цвет Color	Однородный, молочно-белый Homogeneous, milky white				Однородный, молочно-белый Homogeneous, milky white			

3 Оценка числа жизнеспособных клеток в кисломолочном продукте при хранении

На протяжении всего процесса хранения происходит изменение ряда физико-химических показателей кисломолочного продукта. Заквасочная культура для кисломолочного продукта *S. thermophilus* даже при охлаждении может продуцировать молочную кислоту вследствие ферментации лактозы, что приводит к снижению pH или к увеличению титруемой кислотности [29]. Как видно из рисунка 2, титруемая кислотность всех образцов кисломолочного продукта возрастает в течение 21 дня хранения и находится в пределах 92–110 °Т и отвечает нормам ГОСТ 31981–2013. Повышение кислотности кисломолочного продукта оказывает влияние на жизнеспособность клеток пробиотиков, это видно на рисунке 3.

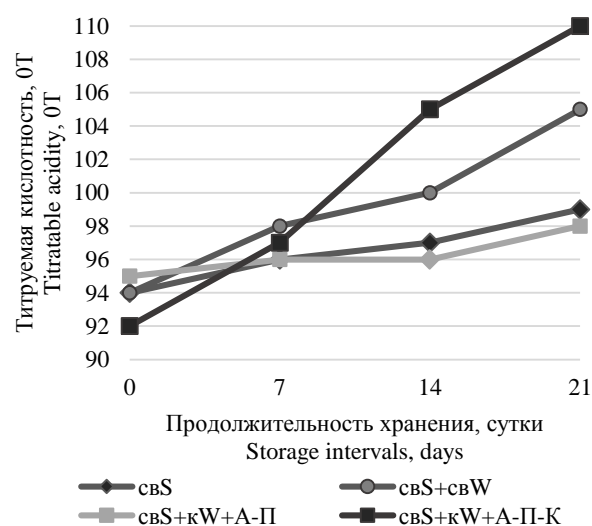


Рисунок 2. Динамика титруемой кислотности образцов кисломолочного продукта в течение 21 дня хранения при 4 °С

Figure 2. Titratable acidity of fermented milk product samples during 21 days of storage at 4 °C

Свободные клетки *W. coagulans* показали более быстрое снижение жизнеспособности до значения 6,10 Log₁₀ КОЕ/мл. Напротив, кисломолочные продукты с капсулированными клетками показали лучшее сохранение числа жизнеспособных клеток, которое к 21 дню хранения составило 9,74 (свS+кW+A-П) и 9,15 (свS+кW+A-П-К) Log₁₀ КОЕ/мл. Повышенная сохранность инкапсулированных культур объясняется тем, что матрица-носитель эффективно защищает клетки от вредного действия кислотности кисломолочного продукта и окислительных процессов [30]. Данные о жизнеспособности свободных и капсулированных клеток культуры *W. coagulans* в других литературных источниках на сегодняшний день отсутствуют.

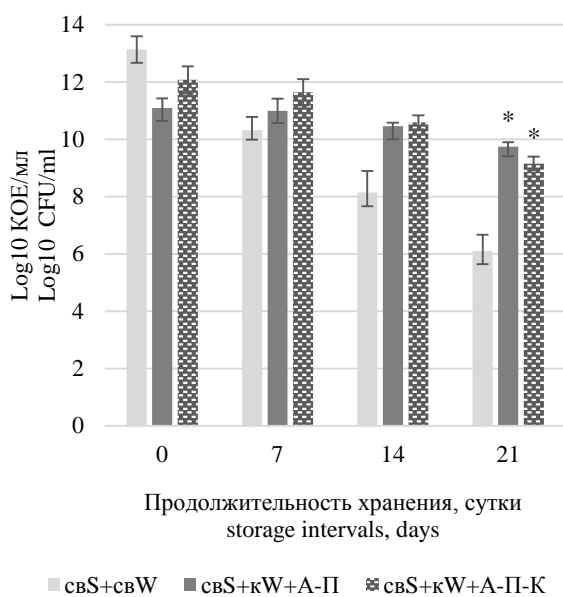


Рисунок 3. Жизнеспособность свободных и инкапсулированных клеток *W. coagulans* в кисломолочном продукте в течение периода хранения (0, 7, 14, 21 день). * – статистически значимый результат по отношению к свободным неинкапсулированным клеткам ($p < 0,05$)

Figure 3. Viability of free and encapsulated *W. coagulans* cells in fermented milk product during storage intervals (0, 7, 14, 21 days). * – statistically significant result in relation to free non-encapsulated cells ($p < 0.05$)

4 Влияние добавления свободных и капсулированных клеток *W. coagulans* на реологические характеристики кисломолочного продукта.

К реологическим характеристикам кисломолочного продукта относят вязкость и синерезис, именно эти показатели определяют консистенцию готового продукта [31]. Вязкость влияет на стабильность и вкус кисломолочного

продукта [32]. Во всех образцах приготовленного кисломолочного продукта наблюдалось снижение вязкости. Наиболее высокая вязкость наблюдалась в контрольном образце, содержащем только свободные клетки *S. thermophilus*, предположительно это связано с выработкой экзополисахаридов (ЭПС), хотя данный показатель не измерялся в данном исследовании. В образце с добавлением свободных клеток *W. coagulans* наблюдалось наименьшее значение вязкости кисломолочного продукта за счет образования кислот, влияющих на структуру образца (рисунок 4).

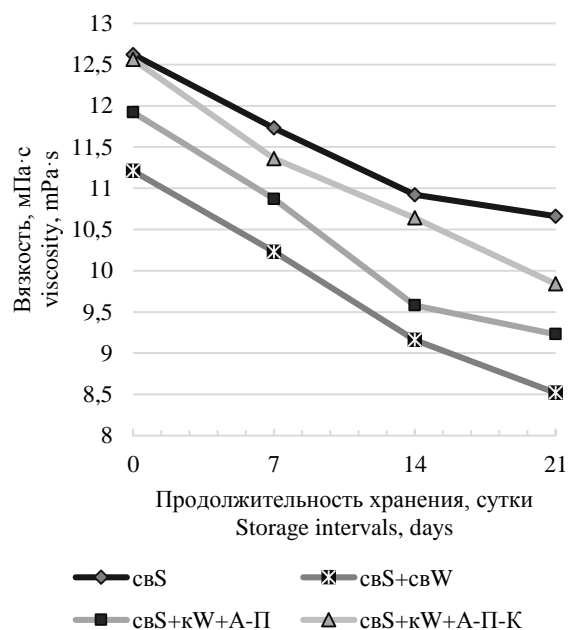


Рисунок 4. Вязкость образцов пробиотического кисломолочного продукта в течение периода хранения (0, 7, 14, 21 день)

Figure 4. Viscosity of probiotic yogurt samples during storage intervals (0, 7, 14, 21 days)

Было установлено, что во всех образцах кисломолочного продукта отмечалось увеличение синерезиса к концу срока хранения (рисунок 5). Высокие показатели синерезиса, вероятно, обусловлены ростом кислотности в результате метаболической активности культуры *S. thermophilus* во время хранения. Наибольшие значения синерезиса наблюдались в образце (свS+свW), это может быть связано с преобразованием твердых веществ кисломолочного продукта в различные метаболиты обоими видами бактерий. Роиш с соавторами также сообщали о более высоких значениях синерезиса в образцах, содержащих свободные клетки в сравнении с капсулированными [28].

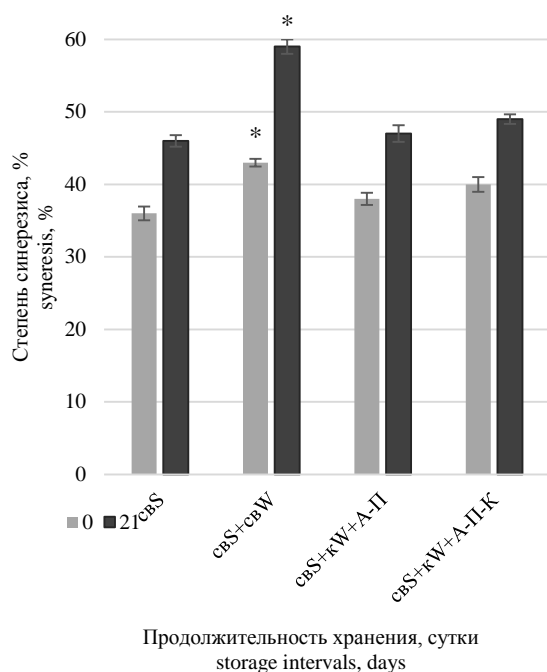


Рисунок 5. Степень синерезиса образцов пробиотического кисломолочного продукта в течение периода хранения (0, 7, 14, 21 день). * – статистически значимый результат по отношению к образцам svS, svS+κW+A-Π, svS+κW+A-Π-K ($p<0,05$)

Figure 5. Syneresis of probiotic yogurt samples during storage intervals (0, 7, 14, 21 days). * – statistically significant result in relation to samples svS, svS+κW+A-P, svS+κW+A-P-K ($p<0.05$)

Заключение

В ходе исследования было установлено, что капсулированные клетки пробиотической культуры *W. coagulans*, содержащиеся в кисломолочном продукте, показали высокую выживаемость в имитированных условиях ЖКТ в сравнении со свободными клетками. Жизнеспособность пробиотических капсулированных клеток образцов svS+κW+A-Π и svS+κW+A-Π-K в ходе хранения на протяжении 21 дня снижалась незначительно в сравнении с образцом, содержащим свободные клетки пробиотика, которые оказались более восприимчивы к снижению кислотности кисломолочного продукта. Добавление как капсулированных, так и свободных клеток пробиотика значительно не повлияло на сенсорные показатели готового продукта как сразу после приготовления, так и на конец срока хранения. Добавление капсулированных клеток в сравнении со свободными оказывало значительное влияние на реологические свойства и текстурные характеристики готового кисломолочного продукта. Настоящее исследование может быть полезным для молочной промышленности и поможет сохранить выживаемость пробиотиков на высоком уровне как в готовом продукте, так и после попадания в ЖКТ.

Благодарность

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

Литература

- 1 Binda S., Hill C., Johansen E. et al. Criteria to qualify microorganisms as "probiotic" in foods and dietary supplements // *Frontiers in Microbiology*. 2020. V. 11. P. 1662. doi: 10.3389/fmicb.2020.01662
- 2 Health and nutritional properties of probiotics in food including powder milk with live lactic acid bacteria: report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation (Córdoba, Argentina, 1-4 October 2001). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001. 56 p.
- 3 Younas S., Murtaza M.A., Manzoor M.S. et al. Effect of probiotic incorporation on physicochemical attributes of yogurt during storage and influence on cholesterol assimilation // *Journal of Food Science*. 2024. V. 89. № 2. P. 1243–1251. doi: 10.1111/1750-3841.16898
- 4 Cichońska P., Kowalska E., Ziarno M. The Survival of Psychobiotics in Fermented Food and the Gastrointestinal Tract: A Review // *Microorganisms*. 2023. V. 11. № 4. P. 996. doi: 10.3390/microorganisms11040996
- 5 Li C., Wang Z.X., Xiao H., Wu F.G. Intestinal delivery of probiotics: materials, strategies, and applications // *Advanced Materials*. 2024. V. 36. № 32. P. e2310174. doi: 10.1002/adma.202310174
- 6 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 – narrative review // *Food Research International*. 2020. V. 137. P. 109682. doi: 10.1016/j.foodres.2020.109682
- 7 Pupa P., Apiwatsiri P., Sirichokchatchawan W. et al. The efficacy of three double-microencapsulation methods for preservation of probiotic bacteria // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. P. 13753. doi: 10.1038/s41598-021-93263-z
- 8 Yoha K.S., Nida S., Dutta S. et al. Targeted delivery of probiotics: perspectives on research and commercialization // *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2022. V. 14. № 1. P. 15–48. doi: 10.1007/s12602-021-09791-7
- 9 Xie A., Zhao S., Liu Z. et al. Polysaccharides, proteins, and their complex as microencapsulation carriers for delivery of probiotics: A review on carrier types and encapsulation techniques // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. V. 242. P. 124784. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124784
- 10 Mala T., Anal A.K. Protection and controlled gastrointestinal release of bromelain by encapsulating in pectin-resistant starch-based hydrogel beads // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021. V. 9. P. 757176. doi: 10.3389/fbioe.2021.757176
- 11 Frakolaki G., Giannou V., Tzia C. Encapsulation of *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* through emulsification coupled with external gelation for the development of synbiotic systems // *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2023. V. 15. № 5. P. 1424–1435. doi: 10.1007/s12602-022-09993-7

- 12 Beldarrain-Iznaga T., Villalobos-Carvajal R., Sevillano-Armesto E., Leiva-Vega J. Functional properties of *Lactobacillus casei* C24 improved by microencapsulation using multilayer double emulsion // *Food Research International*. 2021. V. 141. P. 110136. doi: 10.1016/j.foodres.2021.110136
- 13 Pech-Canul Á., Ortega D., García-Triana A. et al. A brief review of edible coating materials for the microencapsulation of probiotics // *Coatings*. 2020. V. 10. № 3. P. 197. doi: 10.3390/coatings10030197
- 14 Drozdowska M., Piasna-Słupecka E., Such A. et al. Design and in vitro activity of furcellaran/chitosan multilayer microcapsules for the delivery of glutathione and empty model multilayer microcapsules based on polysaccharides // *Materials*. 2024. V. 17. № 9. P. 2047. doi: 10.3390/ma17092047
- 15 Ta L.P., Bujna E., Antal O. et al. Effects of various polysaccharides (alginate, carrageenan, gums, chitosan) and their combination with prebiotic saccharides (resistant starch, lactosucrose, lactulose) on the encapsulation of probiotic bacteria *Lactobacillus casei* 01 strain // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. V. 183. P. 1136–1144. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.04.170
- 16 Сыромятников М.Ю., Шабунин С.В., Козликина А.С. Анализ устойчивости и антагонистической активности пробиотических микроорганизмов, выделенных из молока и молозива коров // *Ветеринарный фармакологический вестник*. 2024. № 1 (26). С. 109–120. doi: 10.17238/issn2541-8203.2024.1.109
- 17 Pyo Y., Kwon K.H., Jung Y.J. Probiotic functions in fermented foods: anti-viral, immunomodulatory, and anti-cancer benefits // *Foods*. 2024. V. 13. № 15. P. 2386. doi: 10.3390/foods13152386
- 18 Frakolaki G., Kekes T., Lympaki F. et al. Use of encapsulated *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* through extrusion or emulsification for the production of probiotic yogurt // *Journal of Food Process Engineering*. 2021. V. 45. № 4. P. e13792. doi: 10.1111/jfpe.13792
- 19 Zhang Y., Zhao M., Li Y. et al. Potential probiotic properties and complete genome analysis of *Limosilactobacillus reuteri* LRA7 from dogs // *Microorganisms*. 2024. V. 12. № 9. P. 1811. doi: 10.3390/microorganisms12091811
- 20 Mandal S., Hati S. Microencapsulation of bacterial cells by emulsion technique for probiotic application // *Cell Microencapsulation: Methods and Protocols (Methods in Molecular Biology, vol. 1479)* / Ed. by E. Opara. New York: Humana Press, 2017. P. 283–294. doi: 10.1007/978-1-4939-6364-5_22
- 21 Головач О.С., Бабицкая М.А., Жабанос Н.К., Фурик Н.Н. Оценка реологических характеристик образцов молока, сквашенного штаммами-продуцентами экзополисахаридов (ЭПС) *Streptococcus salivarius* ssp. *thermophilus*, при различных температурах // *Наука, питание и здоровье: сборник научных трудов XVIII Международной научно-практической конференции (Минск, 2 октября 2020 г.)* / Под общ. ред. З.В. Ловкиса. Минск: Издательский дом «Белорусская наука», 2020. С. 23–27.
- 22 ГОСТ 31981-2013. Продукты кисломолочные. Йогурты. Общие технические условия. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 14 с.
- 23 ГОСТ 31976-2012. Продукты кисломолочные. Метод определения титруемой кислотности. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартинформ, 2013. 8 с.
- 24 Головач О.С., Бабицкая М.А., Жабанос Н.К., Пыжик И.П. Оценка реологических характеристик и уровня синтеза экзополисахаридов (ЭПС) консорциумами *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* при различных температурных режимах ферментации молока // *Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья*. 2020. № 14. С. 58–67. doi: 10.47612/2220-8755-2019-14-58-67
- 25 Alli S.R., Gorbovskaia I., Liu J.C.W. et al. The gut microbiome in depression and potential benefit of prebiotics, probiotics and synbiotics: a systematic review of clinical trials and observational studies // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. V. 23. № 9. P. 4494. doi: 10.3390/ijms23094494
- 26 Suwanangul S., Jaichakan P., Narkprasom N. Innovative insights for establishing a synbiotic relationship with *Bacillus coagulans*: viability, bioactivity, and in vitro-simulated gastrointestinal digestion // *Foods*. 2023. V. 12. № 19. P. 3692. doi: 10.3390/foods12193692
- 27 Kailasapathy K. Survival of free and encapsulated probiotic bacteria and their effect on the sensory properties of yoghurt // *LWT – Food Science and Technology*. 2006. V. 39. № 10. P. 1221–1227. doi: 10.1016/j.lwt.2005.07.013
- 28 Pour H., Marhamatizadeh M., Fattahi H. Encapsulation of different types of probiotic bacteria within conventional/multilayer emulsion and its effect on the properties of probiotic yogurt // *Journal of Food Quality*. 2022. V. 2022. P. 7923899. doi: 10.1155/2022/7923899
- 29 Rezaei K. Effect of refrigerated storage temperature on the viability of probiotic micro-organisms in yogurt // *International Journal of Dairy Technology*. 2007. V. 60. № 2. P. 123–128. doi: 10.1111/j.1471-0307.2007.00311.x
- 30 Afzaal M., Khan A.U., Saeed F. et al. Functional exploration of free and encapsulated probiotic bacteria in yogurt and simulated gastrointestinal conditions // *Food Science & Nutrition*. 2019. V. 7. № 12. P. 3931–3940. doi: 10.1002/fsn3.1254
- 31 Soni R., Jain N.K., Shah V. et al. Development of probiotic yogurt: effect of strain combination on nutritional, rheological, organoleptic and probiotic properties // *Journal of Food Science and Technology*. 2020. V. 57. № 6. P. 2038–2050. doi: 10.1007/s13197-020-04238-3
- 32 Rivera J.A., Matheus A.O. Yogurt making by using probiotics (*Bifidobacterium* spp. and *Lactobacillus acidophilus*) and Inulin // *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*. 2019. V. 26. P. 223–242.

References


- 1 Binda S., Hill C., Johansen E., Obis D., Pot B., Sanders M.E., Tremblay A., Ouwehand A.C. Criteria to qualify microorganisms as "probiotic" in foods and dietary supplements. *Frontiers in Microbiology*. 2020. vol. 11. p. 1662. doi: 10.3389/fmicb.2020.01662
- 2 FAO/WHO. Health and nutritional properties of Probiotics in food including powder milk with live lactic acid bacteria. Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation on Evaluation of Health and Nutritional Properties of Probiotics in Food including Powder Milk with Live Lactic Acid Bacteria. Córdoba, Argentina: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001.

- 3 Younas S., Murtaza M.A., Manzoor M.S., Arqam U., Ali Z., Hafiz I., Anees Ur Rehman M., Imran M. Effect of probiotic incorporation on physicochemical attributes of yogurt during storage and influence on cholesterol assimilation. *Journal of Food Science*. 2024. vol. 89. no. 2. pp. 1243–1251. doi: 10.1111/1750-3841.16898
- 4 Cichońska P., Kowalska E., Ziarno M. The Survival of Psychobiotics in Fermented Food and the Gastrointestinal Tract: A Review. *Microorganisms*. 2023. vol. 11. no. 4. p. 996. doi: 10.3390/microorganisms11040996
- 5 Li C., Wang Z.X., Xiao H., Wu F.G. Intestinal delivery of probiotics: materials, strategies, and applications. *Advanced Materials*. 2024. vol. 36. no. 32. p. e2310174. doi: 10.1002/adma.202310174
- 6 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 – narrative review. *Food Research International*. 2020. vol. 137. p. 109682. doi: 10.1016/j.foodres.2020.109682
- 7 Pupa P., Apiwatsiri P., Sirichokchatchawan W., Pirarat N., Muangsin N., Shah A.A., Prapasarakul N. The efficacy of three double-microencapsulation methods for preservation of probiotic bacteria. *Scientific Reports*. 2021. vol. 11. no. 1. p. 13753. doi: 10.1038/s41598-021-93263-z
- 8 Yoha K.S., Nida S., Dutta S., Moses J.A., Anandharamakrishnan C. Targeted delivery of probiotics: perspectives on research and commercialization. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2022. vol. 14. no. 1. pp. 15–48. doi: 10.1007/s12602-021-09791-7
- 9 Xie A., Zhao S., Liu Z., Yue X., Shao J., Li M., Li Z. Polysaccharides, proteins, and their complex as microencapsulation carriers for delivery of probiotics: A review on carrier types and encapsulation techniques. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. vol. 242. no. 1. p. 124784. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124784
- 10 Mala T., Anal A.K. Protection and controlled gastrointestinal release of bromelain by encapsulating in pectin-resistant starch-based hydrogel beads. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021. vol. 9. p. 757176. doi: 10.3389/fbioe.2021.757176
- 11 Frakolaki G., Giannou V., Tzia C. Encapsulation of *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* through emulsification coupled with external gelation for the development of synbiotic systems. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2023. vol. 15. no. 5. pp. 1424–1435. doi: 10.1007/s12602-022-09993-7
- 12 Beldarrain-Iznaga T., Villalobos-Carvajal R., Sevillano-Armesto E., Leiva-Vega J. Functional properties of *Lactobacillus casei* C24 improved by microencapsulation using multilayer double emulsion. *Food Research International*. 2021. vol. 141. p. 110136. doi: 10.1016/j.foodres.2021.110136
- 13 Pech-Canul Á., Ortega D., García-Triana A., González-Silva N., Solis O., Rosa L. A brief review of edible coating materials for the microencapsulation of probiotics. *Coatings*. 2020. vol. 10. no. 3. p. 197. doi: 10.3390/coatings10030197
- 14 Drozdowska M., Piasna-Słupecka E., Such A., Dziadek K., Krzyściak P., Kruk T., Duraczynska D., Morawska-Tota M., Jamróz E. Design and in vitro activity of furcellaran/chitosan multilayer microcapsules for the delivery of glutathione and empty model multilayer microcapsules based on polysaccharides. *Materials*. 2024. vol. 17. no. 9. p. 2047. doi: 10.3390/ma17092047
- 15 Ta L.P., Bujna E., Antal O., Ladányi M., Juhász R., Szécsi A., Kun S., Sudheer S., Gupta V.K., Nguyen Q.D. Effects of various polysaccharides (alginate, carrageenan, gums, chitosan) and their combination with prebiotic saccharides (resistant starch, lactosucrose, lactulose) on the encapsulation of probiotic bacteria *Lactobacillus casei* 01 strain. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. vol. 183. pp. 1136–1144. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.04.170
- 16 Syromyatnikov M.Yu., Shabunin S.V., Kozlikina A.S. et al. Analysis of stability and antagonistic activity of probiotic microorganisms isolated from cow's milk and colostrum. *Veterinary Pharmacological Bulletin*. 2024. no. 1. doi: 10.17238/issn2541-8203.2024.1.109 (in Russian)
- 17 Pyo Y., Kwon K.H., Jung Y.J. Probiotic functions in fermented foods: anti-viral, immunomodulatory, and anti-cancer benefits. *Foods*. 2024. vol. 13. no. 15. p. 2386. doi: 10.3390/foods13152386
- 18 Frakolaki G., Kekes T., Lympaki F., Giannou V., Tzia C. Use of encapsulated *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* through extrusion or emulsification for the production of probiotic yogurt. *Journal of Food Process Engineering*. 2021. vol. 44. no. 12. p. e13792. doi: 10.1111/jfpe.13792
- 19 Zhang Y., Zhao M., Li Y., Liang S., Li X., Wu Y., Li G. Potential probiotic properties and complete genome analysis of *Limosilactobacillus reuteri* LRA7 from dogs. *Microorganisms*. 2024. vol. 12. no. 9. p. 1811. doi: 10.3390/microorganisms12091811
- 20 Mandal S., Hati S. Microencapsulation of bacterial cells by emulsion technique for probiotic application. *Cell Microencapsulation. Methods in Molecular Biology*. vol. 1479. Ed. by E. Opara. New York: Humana Press, 2017. pp. 299–313. doi: 10.1007/978-1-4939-6364-5_22
- 21 Golovach O.S., Babitskaya M.A., Zhabanos N.K., Furik N.N. Evaluation of rheological characteristics of milk samples fermented with exopolysaccharide-producing strains of *Streptococcus salivarius* ssp. *Thermophilus* at various temperatures. *Science, Nutrition and Health: collection of scientific papers of the XVIII International Scientific and Practical Conference (Minsk, October 02, 2020)*. Ed. by Z.V. Lovkis. Minsk: Publishing House "Belarusian Science", 2020. pp. 23–27. (in Russian)
- 22 State Standard 31981-2013. Yogurts. General Specifications. Moscow: Standartinform, 2014. (in Russian)
- 23 State Standard 31976-2012. Yogurts and yogurt products. Potentiometric method for determining titratable acidity. Moscow: Standartinform, 2013. (in Russian)
- 24 Golovach O.S., Babitskaya M.A., Zhabanos N.K., Pyzhik I.P. Evaluation of rheological characteristics and level of exopolysaccharide synthesis by consortia of *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* at different milk fermentation temperature regimes. *Actual Issues of Meat and Milk Raw Material Processing*. 2020. no. 14. pp. 58–67. doi: 10.47612/2220-8755-2019-14-58-67 (in Russian)
- 25 Alli S.R., Gorbovskaia I., Liu J.C.W., Kolla N.J., Brown L., Müller D.J. The gut microbiome in depression and potential benefit of prebiotics, probiotics and synbiotics: a systematic review of clinical trials and observational studies. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. vol. 23. no. 9. p. 4494. doi: 10.3390/ijms23094494
- 26 Suwanangul S., Jaichakan P., Narkprasom N. Innovative insights for establishing a synbiotic relationship with *Bacillus coagulans*: viability, bioactivity, and in vitro-simulated gastrointestinal digestion. *Foods*. 2023. vol. 12. no. 19. p. 3692. doi: 10.3390/foods12193692


- 27 Kailasapathy K. Survival of free and encapsulated probiotic bacteria and their effect on the sensory properties of yoghurt. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*. 2006. vol. 39. no. 10. pp. 1221–1227. doi: 10.1016/j.lwt.2005.07.013
- 28 Pour H., Marhamatizadeh M., Fattahi H. Encapsulation of different types of probiotic bacteria within conventional/multilayer emulsion and its effect on the properties of probiotic yogurt. *Journal of Food Quality*. 2022. vol. 2022. p. 7923899. doi: 10.1155/2022/7923899
- 29 Rezaei K. Effect of refrigerated storage temperature on the viability of probiotic micro-organisms in yogurt. *International Journal of Dairy Technology*. 2007. vol. 60. no. 2. pp. 123–128. doi: 10.1111/j.1471-0307.2007.00320.x
- 30 Afzaal M., Khan A.U., Saeed F., Ahmed A., Ahmad M.H., Maan A.A., Tufail T., Anjum F.M., Hussain S. Functional exploration of free and encapsulated probiotic bacteria in yogurt and simulated gastrointestinal conditions. *Food Science & Nutrition*. 2019. vol. 7. no. 12. pp. 3931–3940. doi: 10.1002/fsn3.1254
- 31 Soni R., Jain N.K., Shah V., Soni J., Suthar D., Gohel P. Development of probiotic yogurt: effect of strain combination on nutritional, rheological, organoleptic and probiotic properties. *Journal of Food Science and Technology*. 2020. vol. 57. no. 6. pp. 2038–2050. doi: 10.1007/s13197-020-04238-3
- 32 Rivera J.A., Matheus A.O. Yogurt making by using probiotics (*Bifidobacterium* spp. and *Lactobacillus acidophilus*) and Inulin. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*. 2019. vol. 26. no. 1. pp. 223–242. doi: 10.4314/rf.v26i1

Сведения об авторах


Анна А. Толкачева старший преподаватель, кафедра биохимии и биотехнологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, anna-biotech@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0725-6482>


Нина А. Прякина младший научный сотрудник, лаборатория метагеномики и пищевых биотехнологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, nekrasovaninelya@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0434-3839>


Ольга В. Зверева старший преподаватель, кафедра биохимии и биотехнологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, bond.vrn15@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7051-9858>


Екатерина В. Богданова д.т.н., профессор, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ek-v-b@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5053-2273>


Юлия П. Кузнецова младший научный сотрудник, лаборатория метагеномики и пищевых биотехнологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, teplovamart@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0001-6701-3039>

Михаил Ю. Сыромятников к.б.н., ведущий научный сотрудник, лаборатория метагеномики и пищевых биотехнологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mihan.vrn@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9028-0613>

Ольга С. Корнеева д.б.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, korneeva-olgas@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2863-0771>

Вклад авторов


Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors


Anna A. Tolkacheva senior lecturer, Laboratory of Metagenomics and Food Biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, anna-biotech@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0725-6482>


Nina A. Pryakhina junior researcher, Laboratory of Metagenomics and Food Biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, nekrasovaninelya@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0434-3839>


Olga V. Zvereva Senior lecturer, Department of Biochemistry and Biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, bond.vrn15@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7051-9858>


Ekaterina V. Bogdanova Dr Sci. (Tech.), Professor, Department of Technology of Animal Products, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ek-v-b@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5053-2273>


Yulia P. Kuznetsova Junior researcher, Laboratory of Metagenomics and Food Biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, teplovamart@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0001-6701-3039>

Mikhail Y. Syromyatnikov PhD (Biol.), Leading Researcher, Laboratory of Metagenomics and Food Biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mihan.vrn@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9028-0613>

Olga S. Korneeva Dr Sci. (Biol.), Professor Vice-Rector for Research and Innovation, Voronezh State University of Engineering Technologies, 19 Revolution Av., Voronezh, 394036, Russia, korneeva-olgas@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2863-0771>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 10/11/2025	После редакции 26/11/2025	Принята в печать 17/12/2025
Received 10/11/2025	Accepted in revised 26/11/2025	Accepted 17/12/2025