

Влияние резистентного крахмала красной чечевицы на показатели качества йогурта низкой жирности

И.А. Алмуса, О.Е. Бакуменко

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
г. Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: В современной пищевой биотехнологии резистентный крахмал III типа (RS3) рассматривается как многофункциональный ингредиент, способный одновременно выполнять роль пребиотика, текстуратора и стабилизатора в кисломолочных продуктах. Однако до настоящего времени основное внимание исследователей было сосредоточено на обогащении йогуртов бобовой мукой или крупкой, что приводило к ряду технологических ограничений: снижению вязкости, ускорению постацидификации, появлению постороннего мучнистого привкуса и ухудшению потребительских свойств. Использование же изолированного RS3, особенно полученного из нетрадиционных источников (красная чечевица) и модифицированного комбинированным физическим методом (СВЧ с ретроградацией), в низкожировых йогуртах системно не изучалось. Эта лакуна оставляет открытым вопрос о том, позволяет ли целенаправленное введение очищенного модифицированного крахмала нивелировать недостатки, характерные для бобовых добавок, и одновременно улучшить технологические показатели продукта.

Цель: Оценить влияние разных концентраций RS3 (0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 %) на изменение pH и сенсорные характеристики йогурта с 1,5 % жира в течение 21 суток хранения при 4–5 °С.

Материалы и методы: Йогурт готовили с использованием закваски (*Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* и *Streptococcus thermophilus*) по стандартной технологии. Активную кислотность измеряли потенциометрически на 1, 7, 14 и 21-е сутки. Органолептическую оценку проводили по 20-балльной шкале. Данные обрабатывали двухфакторным ANOVA с тестом Тьюки ($p < 0,05$).

Результаты: Во всех образцах pH закономерно снижался, но на 21-е сутки образец с 2,0 % RS3 показал достоверно более высокое значение pH ($3,05 \pm 0,01$) по сравнению с контролем ($2,95 \pm 0,05$), тогда как при 1,0–1,5 % RS3 значения pH (около 2,91) были сопоставимы с контролем. Это подтверждает, что RS3 замедляет постацидификацию, в отличие от добавок, которые, как сообщалось ранее, ускоряли закисление. Лучшие органолептические оценки (18,5–19,1 балла из 20) получили образцы с 1,0 % и 1,5 % RS3; при 2,0 % RS3 появился мучнистый привкус. Контрольный образец к концу хранения имел более низкие сенсорные баллы и выраженную кислинку.

Выводы: Добавление RS3 из красной чечевицы в низкожировой йогурт замедляет постацидификацию на поздних сроках хранения при максимальной изученной концентрации (2,0 %) и улучшает его органолептические характеристики. Оптимальными концентрациями, обеспечивающими баланс между стабильностью pH и вкусом, являются 1,0–1,5 %. Полученные результаты обосновывают целесообразность использования изолированного СВЧ-модифицированного RS3 в качестве натурального функционального ингредиента для молочной промышленности.

Ключевые слова: резистентный крахмал; красная чечевица; низкожировой йогурт; активная кислотность; органолептические свойства

Корреспонденция:

Олеся Евгеньевна Бакуменко
E-mail: oebakumenko@mgupp.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 03.12.2025

Принята: 15.03.2026

Опубликована: 30.03.2026

Copyright: © 2026 Авторы



Для цитирования: Алмуса, И.А., & Бакуменко, О.Е. (2026). Влияние резистентного крахмала красной чечевицы на показатели качества йогурта низкой жирности. *FOOD METAENGINEERING*, 4(1), 57–71. <https://doi.org/10.37442/fme.2026.1.98>

Effect of Red Lentil Resistant Starch on the Quality Indicators of Low-Fat Yogurt

Israa A. Almousa, Olesya E. Bakumenko

Russian Biotechnological University
(ROSBIOTECH), Moscow
Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: In modern food biotechnology, type III resistant starch (RS3) is regarded as a multifunctional ingredient capable of simultaneously acting as a prebiotic, texturizer, and stabilizer in fermented dairy products. However, to date, research efforts have primarily focused on fortifying yogurts with legume flours or grits, which has led to several technological limitations: reduced viscosity, accelerated post-acidification, the development of an off-putting starchy or beany taste, and diminished consumer acceptability. The use of isolated RS3, particularly derived from non-traditional sources (red lentil) and modified using a combined physical method (microwave treatment followed by retrogradation), has not been systematically studied in low-fat yogurts. This gap leaves an open question as to whether the targeted addition of purified modified starch can mitigate the drawbacks inherent in legume-based supplements while simultaneously improving the technological parameters of the final product.

Purpose: To evaluate the effect of varying RS3 concentrations (0.5, 1.0, 1.5, and 2.0%) on pH dynamics and sensory characteristics of yogurt with 1.5 % fat content over 21 days of storage at 4–5 °C.

Materials and Methods: Yogurt was prepared using a standard starter culture (*Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus*) following conventional technology. Active acidity (pH) was measured potentiometrically on days 1, 7, 14, and 21. Organoleptic evaluation was performed using a 20-point scale. Data were processed using two-way analysis of variance (ANOVA) with Tukey's post-hoc test ($p < 0.05$).

Results: In all samples, pH decreased progressively over storage time; however, on day 21, the sample with 2.0% RS3 exhibited a significantly higher pH value (3.05 ± 0.01) compared to the control (2.95 ± 0.05), whereas pH values at 1.0–1.5 % RS3 (approximately 2.91) were comparable to the control. This confirms that RS3 retards post-acidification, in contrast to whole legume additives, which, as previously reported, accelerated acidification. The highest organoleptic scores (18.5–19.1 out of 20) were obtained for samples with 1.0% and 1.5 % RS3; at 2.0 % RS3, a starchy off-taste became perceptible. The control sample exhibited lower sensory scores and a pronounced acidic taste by the end of storage.

Conclusion: The incorporation of red lentil-derived RS3 into low-fat yogurt retards post-acidification during extended storage at the highest concentration studied (2.0 %) and improves its organoleptic properties. The optimal concentrations that provide a balance between pH stability and sensory acceptability are 1.0–1.5 %. These findings substantiate the feasibility of using isolated microwave-modified RS3 as a natural functional ingredient in the dairy industry.

Keywords: resistant starch; red lentil; low-fat yogurt; active acidity; organoleptic properties

Correspondence:

Olesya E. Bakumenko
E-mail: oebakumenko@mgupp.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 03.12.2025

Accepted: 15.03.2026

Published: 30.03.2026

Copyright: © 2026 The Authors



To cite: Almousa, I.A., & Bakumenko, O.E. (2026). Effect of red lentil resistant starch on the quality indicators of low-fat yogurt. *FOOD METAENGINEERING*, 4(1), 57–71. <https://doi.org/10.37442/fme.2026.1.98>

ВВЕДЕНИЕ

Резистентный крахмал (resistant starch, RS) представляет собой класс пищевых волокон, устойчивых к гидролизу ферментами тонкого кишечника и ферментируемых микрофлорой толстой кишки с образованием короткоцепочечных жирных кислот, что обуславливает его физиологические эффекты, включая снижение постпрандиальной гликемии и улучшение липидного профиля (Raigond et al., 2015; Chen et al., 2024; Obadi & Xu, 2024; Das et al., 2024; Yan et al., 2024). Среди пяти известных типов RS наибольший технологический интерес для молочной промышленности представляет RS3 (ретроградируемый крахмал, resistant starch type 3), образующий устойчивые к нагреванию и кислотам кристаллические структуры и обладающий нейтральным вкусом и светлой окраской, что позволяет вводить его в рецептуры без выраженного ухудшения сенсорных характеристик (Tharanathan, 2002; Raigond et al., 2017; Si et al., 2024; Liu et al., 2025). Его формирование происходит при охлаждении крахмала после термической обработки, в ходе которого амилопектин кристаллизуется в устойчивую к ферментативному гидролизу форму (Ratnayake & Jackson, 2008; Haralampu, 2000; Baptista et al., 2024; Su et al., 2025). Этим объясняется растущий интерес к RS3 как функциональному ингредиенту для продуктов, технология которых осложняется снижением жирности.

Низкожировые йогурты являются востребованной, но технологически сложной категорией продуктов. Уменьшение содержания жира сопровождается ухудшением текстуры, падением вязкости, усилением синергиза и изменением органолептических характеристик при хранении. Одной из ключевых проблем выступает постацидификация, при которой продолжающееся снижение pH ухудшает качество продукта. Введение резистентного крахмала в рецептуры кисломолочных продуктов рассматривается как технологический приём, позволяющий одновременно повысить содержание пищевых волокон и улучшить структурно-механические характеристики продукта (Charalampopoulos et al., 2002; Sanz et al., 2008; Arp et al., 2022; Borah et al., 2024). Вместе с тем влияние RS на кислотность ферментированных молочных продуктов неоднозначно и зависит, в частности, от типа крахмала: при использовании разных RS наблюдали как снижение, так и повышение кислотности (He et al., 2019). Дополнительной причиной расхождений может быть форма и происхождение вносимого крахмала, чему уделялось меньше внимания.

Резистентный крахмал вводили в йогурт неоднократно, однако очищенный RS3 из красной чечевицы среди использованных ингредиентов не встречается. Из бобовых культур в йогурт чаще всего вносили цельную муку, в том числе чечевичную (Zare et al., 2011; Benmeziane et al., 2021). Однако мука представляет собой многокомпонентную систему, в которой наряду с крахмалом присутствуют белки, некрахмальные полисахариды и низкомолекулярные углеводы, что не позволяет отнести наблюдаемые эффекты непосредственно к резистентному крахмалу. В тех случаях, когда применяли изолированные крахмалы, они имели небобовое происхождение и не являлись ретроградируемым RS3, например, крахмал маниоки (Mwizerwa et al., 2017) или набор крахмалов в обезжиренном йогурте (Saleh et al., 2020); реже использовали необработанные или смешанные ингредиенты, такие как мякоть зелёного банана (Costa et al., 2017) или крахмал водяного ореха с инулином и фруктоолигосахаридами (Borah et al., 2024). Поэтому собственное действие RS3 из красной чечевицы можно корректно оценить только на очищенном препарате, выделенном из подходящего растительного сырья.

Перспективным источником изолированного RS3 является красная чечевица (*Lens culinaris*), относящаяся к бобовым культурам с повышенным содержанием амилозы и способностью формировать резистентные фракции крахмала, сохраняющиеся даже после термической обработки (Zhao et al., 2024; Lin et al., 2025). Замедленный гидролиз крахмала и способность сохранять стабильную структуру делают это сырьё пригодным для производства RS3, устойчивого к кислотам и нагреванию, что особенно важно при его применении в молочных продуктах (Nasrin & Anal, 2014; Raigond et al., 2017; Farooq & Yu, 2024; Su et al., 2025; Syeda et al., 2025). Дополнительная физическая модификация, а именно СВЧ-обработка с последующей ретроградацией, позволяет интенсифицировать кристаллизацию амилопектина и повысить выход резистентной фракции (Farooq & Yu, 2024; Su et al., 2025). Однако эффект именно такого типа RS3 из данного источника в низкожировом йогурте ранее не изучался.

Настоящее исследование направлено на восполнение этого пробела. Его цель: установить влияние различных концентраций изолированного СВЧ-модифицированного RS3 из красной чечевицы (0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 масс. %) на динамику активной кислотности (pH) и органолептические показатели низкожирового йогурта (1,5 %) в процессе 21-суточного холодильного хранения, что-

бы определить оптимальную дозировку и обосновать применение такого крахмала в качестве натурального функционального ингредиента в молочной промышленности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обоснование дизайна

Диапазон концентраций RS3 0,5–2,0 масс.% с шагом 0,5 % выбран в соответствии с данными исследований (Saleh et al., 2020; Borah et al., 2024), согласно которым технологические эффекты RS в кисломолочных продуктах проявляются именно в этом интервале, тогда как более высокие дозировки сопровождаются появлением мучнистого привкуса и избыточной вязкостью. В качестве матрицы использован йогурт с массовой долей жира 1,5 %, поскольку именно в таких системах действие резистентного крахмала как заменителя жира проявляется наиболее заметно (Azari-Anpar et al., 2017), что повышает чувствительность оценки. Срок хранения 21 суток при температуре 4–5 °C соответствует стандартному циклу обращения подобных продуктов, а измерение pH на 1, 7, 14 и 21-е сутки обеспечивает дискретность, достаточную для выявления статистически значимых различий между образцами (Aryana et al., 2015; Kocer & Ünal, 2018).

Объекты и материалы

Объектом исследования служил низкожировой йогурт, обогащённый резистентным крахмалом III типа (RS3) из красной чечевицы; в качестве контроля использовали йогурт того же состава без RS3. Основным сырьём было промышленно пастеризованное коровье молоко с массовой долей жира 1,5 % (белок 2,9 г, углеводы 4,9 г на 100 г). Заквасочной культурой служила закваска прямого внесения «Мартин» (ТУ 18.89.1-09-008-001978-2023; ФГАНУ «ВНИМИ», Россия), содержащая *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* и *Streptococcus thermophilus*. Дополнительным ингредиентом был препарат RS3 из красной чечевицы (*Lens culinaris*), получение которого описано ниже.

Получение и характеристика RS3

RS3 выделяли из муки красной чечевицы (300 г) с последующей физической модификацией, включающей СВЧ-обработку и ретроградацию. Муку суспендировали в дистиллированной воде (750 см³) и интенсивно

перемешивали стеклянной палочкой в течение 60 мин, затем центрифугировали для отделения крахмальных гранул при 7000×g в течение 20 мин при комнатной температуре 22 ± 2 °C. Супернатант сливали, верхний белковый слой осадка дважды снимали. Для дополнительного удаления белка осадок ресуспендировали, доводили pH до 9,5 ед. раствором NaOH (0,5 M), выдерживали 60 мин, затем фильтровали через нейлоновое сито (60 мкм) и трёхкратно через фильтровальную бумагу. Осадок нейтрализовали раствором HCl (0,5 M) до pH 7,0 ± 0,2, трёхкратно промывали водой и трёхкратно этанолом. Выделенный крахмал сушили при 40 ± 2 °C в течение 8 ч до влажности 10 ± 0,5 %. Навеску крахмала массой 3,0 ± 0,2 г увлажняли до 20 ± 0,5 %, выдерживали 15 мин, распределяли тонким слоем толщиной 2,0 ± 0,5 мм на стеклянной пластине и обрабатывали в СВЧ-поле мощностью 460 Вт в течение 60 с. Образцы охлаждали и выдерживали при 4 ± 1 °C в течение 48 ч для ретроградации, повторно сушили при 40 ± 2 °C в течение 8–10 ч и измельчали до порошка с просеиванием через сито 500 мкм. Содержание RS3 в препарате, определённое ферментативным методом (Englyst et al., 1996), составило 58 %.

Приготовление йогурта

Молоко (массовая доля жира 1,5 %) нагревали при 85–90 °C в течение 3 мин и охлаждали до 42 ± 1 °C. Препарат RS3 вносили после термообработки в количестве, обеспечивающем содержание RS3 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 масс.% по массе молочной смеси (в пересчёте на массу вносимого препарата). Вносили закваску прямого внесения 2,5 ± 0,2 % по массе молочной смеси и сквашивали при 42 ± 1 °C до достижения pH ≈ 4,6 и плотного сгустка. Образцы охлаждали до 4 ± 1 °C, выдерживали 24 часа для стабилизации структуры и хранили при 4–5 °C в течение 21 суток. Контролем служил йогурт, приготовленный аналогично, без RS3. За 1-е сутки хранения принимали образцы после 24-часовой стабилизации.

Определение активной кислотности (pH)

Активную кислотность определяли как водородный показатель (pH) при 25 ± 2 °C на pH-метре FE28-Standard (Mettler Toledo) по методике Sert et al. (2017). Прибор калибровали по трём точкам (pH 4,01; 7,00; 10,01) при 25 ± 1 °C. Измерения выполняли на 1, 7, 14 и 21-е сутки хранения.

Микробиологические показатели

Определяли бактерии группы кишечных палочек (ГОСТ 32901-2014), *Escherichia coli* (ГОСТ 30726-2001), *Salmonella* spp. (ГОСТ ISO 6785-2015), *Staphylococcus aureus* (ГОСТ 30347-2016), дрожжи и плесневые грибы (ГОСТ 33566-2015). Количество молочнокислых бактерий (*L. bulgaricus* и *S. thermophilus*) определяли по ГОСТ ISO 7889-2015.

Органолептический анализ

Органолептическую оценку проводили по ГОСТ ISO 4121-2016 и ГОСТ ISO 5492-2014; характеристики йогурта описывали согласно ГОСТ 31981-2013 и ТР ТС 033/2013. В оценке участвовала комиссия из 10 проинструктированных дегустаторов без медицинских противопоказаний к молочным продуктам. Образцы кодировали и подавали в случайном порядке при нейтральном освещении и температуре 20–22 °С. Оценивали внешний вид (0–5 баллов), вкус и запах (0–10 баллов) и консистенцию (0–5 баллов); суммарная оценка достигала 20 баллов. Помимо количественной оценки по шкалам, дегустаторы фиксировали свободные словесные описания выявленных оттенков вкуса, запаха и консистенции для качественной характеристики образцов. Продукт относили к категориям: отличный (18–20 баллов), хороший (15–17), удовлетворительный (12–14), неудовлетворительный (менее 12). Все участники дали добровольное информированное согласие на участие в органолептической оценке. Исследование не требовало одобрения этического комитета, так как не являлось клиническим испытанием.

Статистический анализ

Данные обрабатывали в GraphPad Prism 8.0 (GraphPad Software, США). Значения активной кислотности анализировали двухфакторным дисперсионным анализом; факторами служили массовая доля RS3 в молочной смеси (0; 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 %) и продолжительность хранения (1, 7, 14 и 21-е сутки). Суммарные органолептические оценки анализировали двухфакторным дисперсионным анализом с повторными измерениями: каждый дегустатор оценивал все образцы на 1-е и 21-е сутки хранения. Средний темп снижения pH ($\Delta\text{pH}/\text{сут}$) сравнивали однофакторным дисперсионным анализом (one-way ANOVA). Для сравнения численности молочнокислых бактерий между контрольным образцом и образцом с 1,5 масс.% RS3 на 21-е сутки применяли непарный

t-критерий Стьюдента. Эксперименты выполняли в трёх технических повторностях ($n = 3$ для физико-химических и микробиологических показателей; $n = 10$ проинструктированных дегустаторов для сенсорной оценки). Результаты представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение ($M \pm SD$). При $p < 0,05$ для многофакторных сравнений проводили апостериорные попарные сравнения по критерию Тьюки (Tukey HSD). Различия считали значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние RS3 на активную кислотность (pH) йогурта

Активная кислотность служит интегральным показателем глубины молочнокислого брожения и постацидификации, и её динамику рассматривали в зависимости от концентрации RS3 и продолжительности хранения (Таблица 1).

Таблица 1

Изменение pH йогурта с добавлением RS3 в процессе хранения

Table 1

Changes in the pH of Yogurt Supplemented with RS3 during Storage

Образец (количество RS3)	Период хранения, сут	pH, ед. pH
Контроль (0 %)	1	4,36 $\pm$ 0,03
	7	4,12 $\pm$ 0,03
	14	3,53 $\pm$ 0,02
	21	2,95 $\pm$ 0,05
Образец 1 (0,5 %)	1	4,39 $\pm$ 0,01
	7	4,08 $\pm$ 0,01
	14	3,51 $\pm$ 0,01
	21	2,86 $\pm$ 0,01
Образец 2 (1,0 %)	1	4,43 $\pm$ 0,02
	7	4,11 $\pm$ 0,03
	14	3,68 $\pm$ 0,02
	21	2,91 $\pm$ 0,03
Образец 3 (1,5 %)	1	4,44 $\pm$ 0,01
	7	3,91 $\pm$ 0,07
	14	3,70 $\pm$ 0,01
	21	2,91 $\pm$ 0,07
Образец 4 (2,0 %)	1	4,48 $\pm$ 0,01
	7	4,13 $\pm$ 0,03
	14	3,75 $\pm$ 0,01
	21	3,05 $\pm$ 0,01

На протяжении 21 суток pH монотонно снижался во всех образцах (Рисунок 1), что отражает непрерывную постацидификацию. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа продолжительность хранения оказала доминирующее влияние на снижение pH ($F(3, 40) = 1842$; $p < 0,001$); главный эффект концентрации RS3 был незначим ($F(4, 40) = 2,1$; $p = 0,12$); взаимодействие факторов значимо ($F(12, 40) = 6,8$; $p < 0,001$). Уже на 1-е сутки начальный pH возрастал с дозой добавки, от $4,36 \pm 0,03$ в контроле до $4,48 \pm 0,01$ при 2,0 масс. % RS3, что согласуется с физико-химическим вкладом сухих веществ крахмала и сокращением доли сбраживаемого субстрата.

Расхождение траекторий подкисления развивалось постепенно. До 7-х суток значения образцов перекрывались в диапазоне 3,91–4,13 ед. pH, однако к 14-м суткам обозначилось дозозависимое ранжирование: в контроле и при 0,5 масс. % RS3 pH опускался до 3,51–3,53, тогда как при 1,0–2,0 масс. % удерживался на уровне 3,68–3,75. Повышенные дозы замедляли накопление кислот в средней фазе хранения, не изменяя его суммарного итога:

средний темп снижения pH составил $0,0705 \pm 0,004$ ед./сут. в контроле и 0,071–0,077 ед./сут. в опытных образцах, а однофакторный дисперсионный анализ не выявил межгрупповых различий ($p = 0,21$). В исследованном диапазоне RS3 влиял, следовательно, на распределение подкисления во времени, а не на его глубину.

К 21-м суткам это влияние сохранялось только при максимальной концентрации. Образец 4 (2,0 %) имел наиболее высокий pH ($3,05 \pm 0,01$), при 1,0 и 1,5 масс. % RS3 значения сближались с контролем (около 2,91 против 2,95 ед. pH), а при 0,5 масс. % RS3 были несколько ниже ($2,86 \pm 0,01$ ед. pH). Различие между образцом 4 (2,0%) и контролем является статистически значимым по критерию Тьюки ($p < 0,05$) и указывает, что заметное ослабление поздней постацидификации достигается лишь при наибольшей дозе RS3.

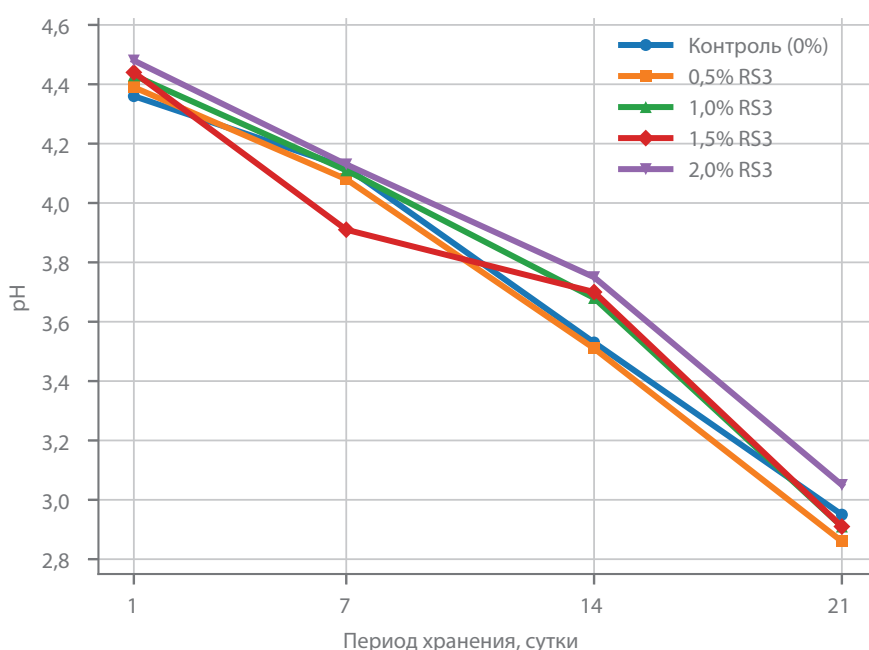
Поскольку pH не определяет восприятие продукта однозначно, далее рассматривали органолептические показатели.

Рисунок 1

Динамика изменения pH йогуртов с различным содержанием RS3 в процессе хранения

Figure 1

Changes in pH of yogurt supplemented with different concentrations of RS3 during 21 days of storage



Влияние RS3 на органолептические показатели йогурта

Органолептическая приемлемость является одним из основных критериев качества йогурта, и её оценивали по внешнему виду, вкусу и запаху, консистенции и их суммарной органолептической оценке в начале и в конце хранения (Таблица 2). Двухфакторный дисперсионный анализ выявил значимое влияние концентрации RS3 ($F(4, 36) = 17,2; p < 0,001$) и взаимодействия факторов ($F(4, 36) = 4,9; p < 0,01$) на суммарную органолептическую оценку, тогда как влияние времени хранения было статистически незначимым ($F(1, 9) = 0,03; p = 0,87$).

Образцы разошлись по характеру изменения органолептических показателей при хранении. При 0,5–1,5 масс. % RS3 суммарная оценка возрастала (с 17,6 до 18,1; с 18,1 до 18,5 и с 18,7 до 19,1 балла соответственно), тогда как в контроле и при 2,0 масс. % RS3 снижалась (с 17,4 до 16,4 и с 17,3 до 17,0 балла). Наивысшие оценки на всём протяжении хранения принадлежали образцу 3 (1,5 %) (19,1 балла к 21-м суткам).

Изменения отдельных органолептических показателей в целом соответствовали динамике суммарной оценки. Внешний вид сохранялся при 0,5–1,5 масс. % RS3, но ухудшался в контроле и наиболее заметно при 2,0 масс. % RS3 (до 4,2 балла), что объясняется изменением структуры продукта и появлением признаков отделения сыворотки.

Вкус и запах достигали максимума при 1,0 и 1,5 масс. % RS3 и к концу хранения усиливались (до 9,4 и 9,6 балла), а в контроле и при 2,0 масс. % RS3 ослабевали (до 8,0 и 8,3 балла); снижение оценок в контроле обусловлено усилением кислого вкуса в результате постацидификации, причём восприятие кислотности зависит не только от pH, но и от консистенции и вкусоароматического профиля. Консистенция оставалась устойчивой и улучшалась при 0,5–1,5 масс. % RS3, достигая максимума у образца 3 (1,5 %) (4,8 балла), что отражает загущающее и структурирующее действие RS3.

Рисунок 2 сводит эти изменения воедино и показывает, что к 21-м суткам суммарная оценка растёт при 1,0 и 1,5 масс. % RS3 и падает в контроле и при 2,0 масс. % RS3, локализуя оптимум в области промежуточных доз. Снижение при 2,0 масс. % RS3 связано с потерей однородности структуры и появлением мучнистости при избыточном внесении добавки.

Для выявления статистически значимых различий между образцами по суммарной органолептической оценке (0–20 баллов) использовали критерий Тьюки (HSD — честная значимая разность Тьюки) при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Сравнение проводили отдельно для 1-х и 21-х суток хранения.

На 1-е сутки хранения критическое значение HSD составило 1,08 балла. Установлено, что образец с 1,5 масс. % RS3 достоверно превосходил контроль (разность 1,3 балла),

Таблица 2

Органолептические показатели йогуртов

Table 2

Sensory Characteristics of Yogurts

Образец (количество RS3)	Период хранения, сут.	Органолептическая оценка, балл			
		Внешний вид (0–5)	Вкус и запах (0–10)	Консистенция (0–5)	Сумма (0–20)
Контроль (0 %)	1	4,8 ± 0,3	8,5 ± 0,15	4,1 ± 0,43	17,4 ± 0,56
	21	4,6 ± 0,6	8,0 ± 0,21	3,8 ± 0,6	16,4 ± 0,91
Образец 1 (0,5 %)	1	4,8 ± 0,3	8,5 ± 0,32	4,3 ± 0,83	17,6 ± 0,95
	21	4,8 ± 0,5	8,8 ± 0,27	4,5 ± 0,42	18,1 ± 0,74
Образец 2 (1,0 %)	1	4,7 ± 0,3	9,0 ± 0,62	4,4 ± 0,62	18,1 ± 0,93
	21	4,6 ± 0,1	9,4 ± 0,43	4,5 ± 0,52	18,5 ± 0,69
Образец 3 (1,5 %)	1	4,7 ± 0,5	9,5 ± 0,12	4,5 ± 0,52	18,7 ± 0,76
	21	4,7 ± 0,5	9,6 ± 0,51	4,8 ± 0,34	19,1 ± 0,82
Образец 4 (2,0 %)	1	4,5 ± 0,3	8,4 ± 0,73	4,4 ± 0,56	17,3 ± 0,98
	21	4,2 ± 0,8	8,3 ± 0,54	4,5 ± 0,28	17,0 ± 0,97

Примечание. Суммарная оценка и стандартное отклонение рассчитаны как среднее арифметическое суммы баллов и квадратичная сумма стандартных отклонений отдельных показателей соответственно согласно правилу сложения погрешностей независимых величин.

Note. The overall score and standard deviation were calculated as the arithmetic mean of the sum of the scores and the quadratic sum (root sum of squares) of the standard deviations of the individual indicators, respectively, according to the error propagation rule for independent variables.

И.А. Алмуса, О.Е. Бакуменко

Рисунок 2

Сравнение между 1-ми и 21-ми сутками хранения по суммарной оценке органолептических показателей йогурта

Figure 2

Comparison between the 1st and 21st Days of Storage Based on the Total Sensory Evaluation of Yogurt

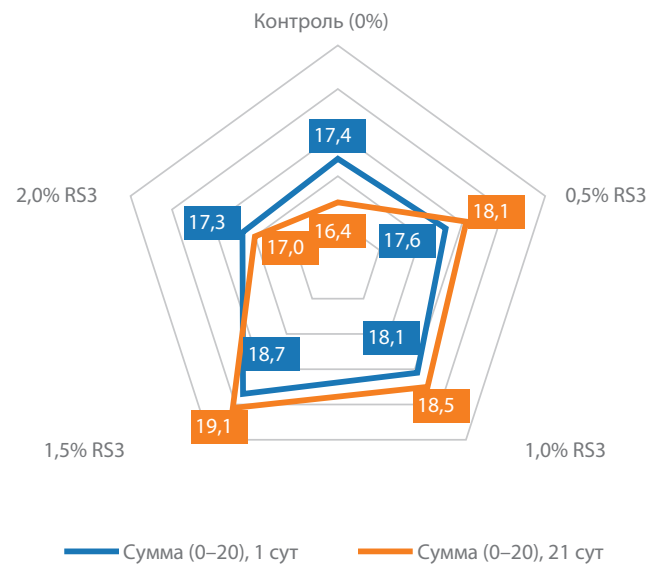


Таблица 3

Микробиологические показатели йогуртов

Table 3

Microbiological Characteristics of Yogurts

Группа микроорганизмов	Норма (ТР ТС 033/2013)	Срок хранения, сут	Контроль(без RS3)	Образец 3 (с 1,5 масс. % RS3)
Молочнокислые бактерии (<i>L. bulgaricus</i> , <i>S. thermophilus</i>), КОЕ/г	$\geq 1 \times 10^7$	1	$(2,5 \pm 0,3) \times 10^8$	$(2,8 \pm 0,3) \times 10^8$
		14	$(1,2 \pm 0,1) \times 10^8$	$(1,5 \pm 0,2) \times 10^8$
		21	$(8,0 \pm 0,8) \times 10^6$	$(95,0 \pm 9,5) \times 10^6^*$
БГКП (колиформы)	Не допускаются в 0,1 г	14–21	Не обнаружены	Не обнаружены
Патогенные микроорганизмы, в т.ч. <i>Salmonella</i>	Не допускаются в 25 г	14–21	Не обнаружены	Не обнаружены
Дрожжи, КОЕ/г	≤ 50	14	22 ± 3	16 ± 2
		21	42 ± 4	28 ± 3
Плесневые грибы, КОЕ/г	≤ 10	14	< 10	< 10
		21	8 ± 1	5 ± 1

Примечание.

* – различия между контролем и образцом с 1,5 масс. % RS3 на 21-е сутки статистически значимы ($p < 0,001$, t-критерий Стьюдента, $n = 3$).

Продукт относится к категории «кисломолочные продукты со сроком годности более 72 часов».

Все результаты представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение ($M \pm SD$) для трёх параллельных определений ($n = 3$).

Note.

* — differences between the control and the sample containing 1.5 % RS3 on day 21 were statistically significant ($p < 0.001$, Student's *t*-test, $n = 3$).

The product falls within the category of "fermented milk products with a shelf life exceeding 72 h."

All results are presented as the mean $\pm$ standard deviation ($M \pm SD$) of triplicate determinations ($n = 3$).

образец с 0,5 масс. % RS3 (разность 1,1 балла) и образец с 2,0 масс. % RS3 (разность 1,4 балла). Различия между остальными парами образцов на 1-е сутки не достигли статистической значимости ($p > 0,05$).

На 21-е сутки хранения критическое значение HSD составило 1,06 балла. Выявлены следующие значимые различия:

Образцы с 0,5 масс. %, 1,0 масс. % и 1,5 масс. % RS3 достоверно превосходили контроль (разности составили 1,7, 2,1 и 2,7 балла соответственно).

Образец с 2,0 масс. % RS3 показал достоверно более низкие оценки по сравнению с образцами, содержащими 0,5 масс. % RS3 (разность 1,1 балла), 1,0 масс. % RS3 (разность 1,5 балла) и 1,5 масс. % RS3 (разность 2,1 балла).

Разница между контролем и образцом с 2,0 масс. % RS3, а также между образцами с 0,5 масс. % и 1,0 масс. %, 0,5 масс. % и 1,5 масс. %, 1,0 масс. % и 1,5 масс. % RS3 оказалась статистически незначимой ($p > 0,05$).

Завершающим условием пригодности продукта к хранению служит микробиологическая безопасность.

Микробиологические показатели

Микробиологический контроль проведён для контрольного образца и образца с 1,5 % RS3, выбранного как оптимальный по результатам предыдущих этапов (Таблица 3).

Бактерии группы кишечных палочек не обнаружены в 0,1 г, патогенные микроорганизмы, включая *Salmonella*, отсутствовали в 25 г. Контрольный образец и образец с 1,5 % RS3 соответствовали требованиям ТР ТС 033/2013 по показателям патогенной и санитарно-показательной микрофлоры. Содержание дрожжей и плесневых грибов в обоих образцах не превышало нормативных значений (дрожжи ≤ 50 КОЕ/г, плесени ≤ 10 КОЕ/г) на протяжении всего срока хранения: на 21-е сутки содержание дрожжей составило 42 ± 4 КОЕ/г в контроле и 28 ± 3 КОЕ/г в образце с 1,5 % RS3. Различий между группами по этим показателям не обнаружено, что подтверждает: внесение крахмала после СВЧ-обработки (460 Вт, 60 с) не вызвало контаминации и не способствовало развитию посторонней микрофлоры при хранении.

В первые 14 суток различий по численности молочнокислых бактерий между группами не отмечено. Однако к 21-м суткам в контрольном образце их количество снизилось ниже норматива — до $(8,0 \pm 0,8) \times 10^6$ КОЕ/г, тогда как в образце с 1,5 масс. % RS3 осталось на высоком уровне — $(95,0 \pm 9,5) \times 10^6$ КОЕ/г. Различия статистически значимы ($p < 0,001$, *t*-критерий Стьюдента, $n = 3$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные характеризуют резистентный крахмал III типа (RS3) как ингредиент, действующий на качество низкожирового йогурта одновременно на нескольких уровнях: на кинетике подкисления, на сенсорных свойствах и на восприятии текстуры. В отличие от большинства предшествующих работ, в которых в йогурт вносили либо цельную бобовую муку (Zare et al., 2011; Benmeziiane et al., 2021), либо изолированные крахмалы небобового происхождения и иные многокомпонентные ингредиенты (Mwizerwa et al., 2017; Saleh et al., 2020; Costa et al., 2017; Borah et al., 2024), здесь использован очищенный СВЧ-модифицированный RS3 из красной чечевицы. Такой подход позволил свести к минимуму вклад некрахмальных компонентов муки (белков, некрахмальных полисахаридов и низкомолекулярных сахаров) и отнести наблюдаемые эффекты непосредственно к резистентному крахмалу.

Активная кислотность и постацидификация

Из двух изученных факторов решающее влияние на активную кислотность оказала продолжительность хранения, что отражает продолжающуюся метаболиче-

скую активность заквасочной микрофлоры. Внесение RS3 в дозировках до 2,0 масс. % не меняло общего хода кислотообразования: средний темп снижения pH в опытных образцах ($0,071\text{--}0,077$ ед./сут.) не отличался от контроля ($0,0705 \pm 0,004$ ед./сут.; однофакторный ANOVA, $p = 0,21$). Этот результат согласуется с данными He et al. (2019), показавших на кукурузном крахмале, что RS не изменяет времени достижения геля-точки и метаболизма заквасочных бактерий при сквашивании, поскольку не служит для них доступным субстратом. Сохранение нормального хода ферментации подтверждается и работами, в которых резистентный крахмал и иные пребиотические компоненты не подавляли жизнеспособность и кислотообразующую активность заквасок (Aryana et al., 2015; Kocer & Ünal, 2018; Alkhatib et al., 2024). С технологической точки зрения отсутствие угнетения стартовой активности заквасок является необходимым условием промышленного применения ингредиента.

Вместе с тем апостериорный критерий Тьюки выявил дозозависимый эффект на завершающем этапе хранения. На 21-е сутки pH образца с 2,0 масс. % RS3 ($3,05 \pm 0,01$) превышал значения контроля ($2,95 \pm 0,05$) и образца с 0,5 масс. % ($2,86 \pm 0,01$) при $p < 0,05$, тогда как при 1,0 и 1,5 масс. % (около 2,91) значимых отличий от контроля не было. Ослабление поздней постацидификации проявляется, следовательно, лишь при наибольшей дозе (2,0 масс. % RS3), где различие с контролем достигает статистической значимости ($p < 0,05$ по критерию Тьюки), тогда как при умеренных концентрациях (1,0 и 1,5 масс. % RS3) кислотность остаётся на уровне контроля. Это указывает на то, что заметное замедление накопления кислоты в конце срока хранения достигается только при максимальной изученной концентрации RS3.

Предлагаемый механизм связан не с буферными свойствами крахмала, которыми он не обладает, а со структурной перестройкой геля: формированием более плотной крахмально-белковой матрицы, ограничивающей диффузию субстратов и метаболитов и снижающей метаболическую активность микрофлоры на поздних сроках. Это толкование остаётся гипотетическим, поскольку текстуру и микроструктуру в настоящей работе инструментально не измеряли; однако оно согласуется с прямыми микроструктурными наблюдениями уплотнения геля при внесении крахмала в обезжиренные молочные системы (He et al., 2019; Lobato-Calleros et al.,

2014; Cota-López et al., 2023; You et al., 2024). Устойчивость самого RS3 к кислотам и нагреванию определяется его ретроградирующей кристаллической структурой (Haralampu, 2000; Ratnayake & Jackson, 2008), а применённая СВЧ-обработка с последующей ретроградацией повышает выход резистентной фракции (Farooq & Yu, 2024; Su et al., 2025).

Органолептические показатели и восприятие текстуры

Двухфакторный дисперсионный анализ с повторными измерениями по фактору времени показал, что на суммарную органолептическую оценку йогурта значимо влияли массовая доля RS3 в молочной смеси ($F(4, 36) = 17,2$; $p < 0,001$) и сочетание этих двух факторов ($F(4, 36) = 4,9$; $p < 0,01$), тогда как влияние продолжительности хранения при 4–5 °C было статистически незначимым ($F(1, 9) = 0,03$; $p = 0,87$).

Значимость сочетания факторов имеет прямое содержательное истолкование: прибавка к оценке, которую даёт RS3, не остаётся постоянной, а увеличивается по мере хранения. Преимущество образца с 1,5 масс. % RS3 над контрольным составило 1,3 балла на 1-е сутки и 2,7 балла на 21-е.

К концу хранения наиболее высокие суммарные оценки получили образцы с 1,0 и 1,5 масс. % RS3, соответственно 18,5 и 19,1 балла из 20; за три недели их оценки не снизились. Образец с 2,0 масс. % RS3 преимущественно перед контрольным не имел: разность в 0,6 балла не достигла критического значения критерия Тьюки, составившего 1,06 балла.

Образцы с 1,0 и 1,5 масс. % RS3 имели к 21-м суткам практически ту же активную кислотность, что и контрольный (2,91 против 2,95 ед. pH), но получили заметно более высокие оценки вкуса и запаха (9,4 и 9,6 против 8,0 балла). Кислотность, измеренная потенциометрически, и кислотность, воспринимаемая при дегустации, в данном случае разошлись. Наиболее вероятная причина состоит в изменении реологических свойств продукта: более вязкая гелевая структура замедляет высвобождение органических кислот в полости рта, вследствие чего при неизменном pH вкус воспринимается как менее кислый.

Такое объяснение согласуется с результатами работ, в которых внесение резистентного и ретроградирующего крахмала повышало вязкость йогурта и снижало

синерезис по данным инструментальных измерений, улучшая при этом текстуру и приемлемость продукта (Cota-López et al., 2023; He et al., 2019; Lee & Kang, 2024; Rashid et al., 2024; Saleh et al., 2020; You et al., 2024). Та же зависимость установлена для молочных десертов, обогащённых резистентным крахмалом (Ares et al., 2012; Homayouni et al., 2008; Lobato-Calleros et al., 2014).

Оценки консистенции подтверждают ту же тенденцию: при 0,5–1,5 масс. % RS3 они за время хранения возросли и достигли максимума в 4,8 балла у образца с 1,5 масс. % на 21-е сутки. Это соответствует функции RS3 как загустителя и структурообразователя. Границу полученного вывода следует, однако, обозначить прямо: изменение текстуры установлено по органолептическому восприятию, тогда как вязкость, предел текучести и синерезис в настоящей работе не измеряли, поэтому предложенное реологическое объяснение остаётся гипотезой.

Оптимальная концентрация

Сопоставление физико-химических и сенсорных данных показывает нелинейный, дозозависимый характер действия RS3. Образец 2,0 масс. % обеспечивал наилучшую стабилизацию pH, но проигрывал в приемлемости из-за избыточной вязкости и мучнистого привкуса, типичного для высоких дозировок крахмалистых добавок. Контроль, напротив, демонстрировал наиболее глубокое подкисление и заметное ухудшение сенсорных свойств к концу хранения. Оптимальный баланс технологических и потребительских свойств достигается при 1,0–1,5 масс. % RS3, что попадает в диапазон эффективных дозировок крахмала в обезжиренных кисломолочных продуктах и согласуется с появлением сенсорных дефектов при его превышении (Saleh et al., 2020; Borah et al., 2024).

Микробиологическая безопасность

По микробиологическим показателям патогенной и санитарно-показательной микрофлоры все образцы, включая контроль и обогащённые RS3, соответствовали требованиям ТР ТС 033/2013 на 21-е сутки хранения. Однако при оценке численности заквасочных микроорганизмов выявлено принципиальное различие: в контрольном образце их количество снизилось ниже нормативного уровня ($8,0 \times 10^6$ КОЕ/г), тогда как в образце с 1,5 масс. % RS3 сохранилось на высоком уровне ($95,0 \times 10^6$ КОЕ/г, $p < 0,001$). Предварительная СВЧ-об-

работка крахмала обеспечила микробиологическую чистоту вносимого ингредиента и не способствовала развитию посторонней микрофлоры. Это согласуется с представлением о том, что резистентный крахмал как пребиотическое волокно не ухудшает санитарно-гигиенических показателей ферментированных продуктов. Сохранение высокой численности молочнокислых бактерий в образце с 1,5 % RS3, по-видимому, обусловлено не снижением кислотного стресса, а физико-химической защитой: формированием более плотной крахмально-белковой матрицы, которая создаёт микрозоны, благоприятные для выживания клеток, что расширяет функциональный потенциал продукта (Homayouni et al., 2008; Kocer & Ünal, 2018; Alkhatib et al., 2024; Chen et al., 2024; Yan et al., 2024). Пригодность красной чечевицы как источника RS3 определяется высоким содержанием амилозы и способностью её крахмала формировать устойчивые резистентные фракции (Nasrin & Anal, 2014; Lin et al., 2025; Zhao et al., 2024; Syeda et al., 2025).

Практическая значимость

Внесение RS3 из красной чечевицы в количестве 1,0–1,5 масс. % позволяет одновременно улучшить воспринимаемую текстуру низкожирового йогурта, ослабить позднюю постацидификацию и смягчить восприятие кислотности без химических стабилизаторов, сохраняя высокие потребительские свойства на протяжении не менее трёх недель хранения. Это создаёт основу для разработки обогащённых пищевыми волокнами функциональных кисломолочных продуктов с пониженной жирностью.

Ограничения исследования

Результаты следует рассматривать с учётом ряда ограничений. Кислотность оценивали только по pH, без титруемой кислотности, что не позволяет полностью разграничить изменение в образовании органических кислот и сдвиги ионного равновесия в матрице. Содержание сухих веществ контроля и опытных образцов не выравнивали, поэтому часть наблюдаемых эффектов на pH и текстуру может быть связана с приростом сухих веществ, а не только с резистентным крахмалом. Сенсорную оценку проводила комиссия ограниченного объёма ($n = 10$), прошедшая только базовый инструктаж по работе с балльными шкалами без отбора по сенсорной чувствительности, что снижает мощность критериев, хотя выявленные различия достигли значимости.

Наконец, работа выполнена в пределах технических повторностей ($n = 3$) для одной лабораторной партии и 21-суточного срока, без проведения независимых повторностей на уровне производственных партий, что ограничивает перенос выводов на промышленный масштаб. Эти ограничения определяют направления дальнейших исследований с инструментальным контролем текстуры и синереза, определением титруемой кислотности и учётом нескольких производственных партий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

RS3 из красной чечевицы в дозировках до 2,0 масс. % не изменял общей скорости подкисления низкожирового йогурта ($p = 0,21$), что свидетельствует о сохранении нормальной активности заквасочных культур. При этом к концу хранения проявился дозозависимый эффект: на 21-е сутки статистически значимо более высокий pH, чем у контроля, удерживал только образец с 2,0 масс. % RS3, тогда как при 1,0 и 1,5 масс. % значения оставались на уровне контроля. Таким образом, RS3 влияет не на глубину, а на распределение подкисления во времени и ослабляет позднюю постацидификацию лишь при наибольшей концентрации. Наиболее вероятное объяснение связано со структурным уплотнением геля, ограничивающим диффузию субстратов и метаболитов, однако оно требует подтверждения инструментальными измерениями текстуры.

Органолептическая оценка определила оптимальный диапазон концентраций 1,0–1,5 масс. %, при котором на 21-е сутки достигались наивысшие суммарные баллы (18,5 и 19,1 из 20) при улучшенной консистенции, гармоничном вкусе и без мучнистого привкуса, свойственного избыточным дозировкам крахмала. Расхождение между низким pH и высокой приемлемостью образцов с RS3, по-видимому, обусловлено реологической модификацией продукта, при которой более вязкая гелевая структура смягчает восприятие кислого вкуса; это предположение также нуждается в инструментальной проверке.

По микробиологическим показателям все образцы, включая контроль, соответствовали требованиям безопасности на 21-е сутки хранения, а предварительная СВЧ-обработка обеспечила чистоту вносимого крахмала.

На основании совокупности данных в производстве низкожирового йогурта целесообразно применять RS3

из красной чечевицы в концентрации 1,0–1,5 масс.%, что улучшает органолептические показатели и ослабляет позднюю постацидификацию без химических стабилизаторов, сохраняя высокое качество продукта в течение по меньшей мере 21 суток. Полученные результаты создают основу для разработки обогащённых пищевыми волокнами функциональных кисломолочных продуктов с пониженной жирностью; их промышленное подтверждение требует испытаний на независимых производственных партиях и при более длительном хранении.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Исраа Алхамуд Алмуса: проведение исследования; подготовка черновика рукописи.

Олеся Евгеньевна Бакуменко: концептуализация; создание рукописи и ее редактирование; научное руководство исследованием.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Israa Alhamod Almusa: research; manuscript drafting.

Olesya Evgenievna Bakumenko: conceptualization; manuscript creation and editing; research supervision.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Alkhatib, R., Barakova, N. V., Gunkova, P. I., Baskovtseva, A. S., Grinvald, S. A., & Pluzhnikova, D. V. (2024). The influence of resistant starch production methods on the viability of lactobacilli. *Scientific Journal of ITMO University. Series "Processes and Food Production Equipment"*, 17(3), 18–25. (In Russ.)
<https://doi.org/10.17586/2310-1164-2024-17-3-18-25>
- Ares, F., Arrarte, E., De León, T., Ares, G., & Gámbaro, A. (2012). Development of functional milk desserts enriched with resistant starch based on consumers' perception. *Food Science and Technology International*, 18(5), 465–475.
<https://doi.org/10.1177/1082013211428221>
- Arp, C. G., Correa, M. J., & Ferrero, C. (2022). Resistant starch. In S. M. Jafari, A. Rashidinejad, & J. Simal-Gandara (Eds.), *Handbook of food bioactive ingredients* (pp. 1–23). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81404-5_34-1
- Aryana, K., Greenway, F., Dhurandhar, N., Tulley, R., Finley, J., Keenan, M., Martin, R., Pelkman, C., Olson, D., & Zheng, J. (2015). A resistant-starch enriched yogurt: Fermentability, sensory characteristics, and a pilot study in children. *F1000Research*, 4, 139. <https://doi.org/10.12688/f1000research.6451.1>
- Azari-Anpar, M., Khomeiri, M., Ghafouri-Oskuei, H., & Aghajani, N. (2017). Response surface optimization of low-fat ice cream production by using resistant starch and maltodextrin as a fat replacing agent. *Journal of Food Science and Technology*, 54(5), 1175–1183. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2492-0>
- Baptista, N. T., Dessalles, R., Illner, A. K., Ville, P., Ribet, L., Anton, P. M., & Durand-Dubief, M. (2024). Harnessing the power of resistant starch: A narrative review of its health impact and processing challenges. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1369950. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1369950>
- Benmeziane, F., Raigar, R. K., Ayat, N. E.-H., Aoufi, D., Djermoune-Arkoub, L., & Chala, A. (2021). Lentil (*Lens culinaris*) flour addition to yogurt: Impact on physicochemical, microbiological and sensory attributes during refrigeration storage and microstructure changes. *LWT — Food Science and Technology*, 140, 110793.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110793>
- Borah, S., Kakoty, T., Borah, P. K., Mahnot, N. K., Seth, D., Patra, F., & Duary, R. K. (2024). Optimization of water chestnut (*Trapa bispinosa*) starch, fructo-oligosaccharide and inulin concentrations for low-fat flavoured yogurt consisting of a probiotic *Lactocaseibacillus rhamnosus* strain. *Sustainable Food Technology*, 2(3), 837–848.
<https://doi.org/10.1039/d4fb00101j>
- Charalampopoulos, D., Wang, R., Pandiella, S. S., & Webb, C. (2002). Application of cereals and cereal components in functional foods: A review. *International Journal of Food Microbiology*, 79(1–2), 131–141.
[https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(02\)00187-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00187-3)
- Chen, Z., Liang, N., Zhang, H., Li, H., Guo, J., Zhang, Y., Chen, Y., Wang, Y., & Shi, N. (2024). Resistant starch and the gut microbiome: Exploring beneficial interactions and dietary impacts. *Food Chemistry: X*, 21, 101118.
<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101118>

- Costa, E. L. D., Alencar, N. M. M., Rullo, B. G. D. S., & Taralo, R. L. (2017). Effect of green banana pulp on physicochemical and sensory properties of probiotic yoghurt. *Food Science and Technology*, 37(3), 363–368. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.11116>
- Cota-López, R., Velazquez, G., Mendez-Montecalvo, G., Perez-Ramirez, I. F., Murua-Pagola, B., Espinoza-Mellado, R., & Hernandez-Gama, R. (2023). Effect of adding high concentrations of retrograded starch with different amylose content on the physicochemical properties and sensory attributes of Greek-style yogurt. *International Journal of Biological Macromolecules*, 241, 124501. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124501>
- Das, M., Santra, S., Chakraborty, M., Rajan, N., Sarvanabhupathy, S., Biswas, P., & Banerjee, R. (2024). Resistant starch: Insights into better health and metabolism. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 59, 103275. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103275>
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., Hudson, G. J., & Cummings, J. H. (1996). Measurement of resistant starch in vitro and in vivo. *British Journal of Nutrition*, 75(5), 749–755. <https://doi.org/10.1079/bjn19960178>
- Farooq, M. A., & Yu, J. (2024). Recent advances in physical processing techniques to enhance the resistant starch content in foods: A review. *Foods*, 13(17), 2770. <https://doi.org/10.3390/foods13172770>
- Haralampu, S. G. (2000). Resistant starch — A review of the physical properties and biological impact of RS3. *Carbohydrate Polymers*, 41(3), 285–292. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(99\)00147-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(99)00147-2)
- He, J., Han, Y., Liu, M., Wang, Y., Yang, Y., & Yang, X. (2019). Effect of two types of resistant starches on the quality of yogurt. *Journal of Dairy Science*, 102(5), 3956–3964. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15562>
- Homayouni, A., Azizi, A., Ehsani, M. R., Yarmand, M. S., & Razavi, S. H. (2008). Effect of microencapsulation and resistant starch on the probiotic survival and sensory properties of synbiotic ice cream. *Food Chemistry*, 111(1), 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.03.036>
- Kocer, E., & Ünal, G. (2018). Effects of different prebiotics on viability under in vitro gastrointestinal conditions and sensory properties of fermented milk. *Italian Journal of Food Science*, 30(3), 550–566. <https://doi.org/10.14674/IJFS-1165>
- Lee, I., & Kang, T. (2024). Heat-moisture-treated rice starches with different amylose and moisture contents as stabilizers for nonfat yogurt. *Food Chemistry*, 436, 137746. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137746>
- Lin, R., Zhou, H., Wang, S., Ma, Z., Wang, C., Shen, Q., & Zhao, Q. (2025). Lentil starch: Effect of the amylose content on structural, physicochemical, and digestibility characteristics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 148009. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.148009>
- Liu, Q., Xia, Z., Guan, H., Jiao, A., Ge, S., Wang, D., Yu, Y., & Jin, Z. (2025). A review on the comparison of preparation, structure and properties of two types of resistant starch type III formed from long- and short-chain amylose. *Trends in Food Science & Technology*, 105388. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105388>
- Lobato-Calleros, C., Ramírez-Santiago, C., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2014). Impact of native and chemically modified starches addition as fat replacers in the viscoelasticity of reduced-fat stirred yogurt. *Journal of Food Engineering*, 131, 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.01.019>
- Mwizerwa, H., Abong, G. O., Okoth, M. W., Ongol, M. P., Onyango, C., & Pushparajah, T. (2017). Effect of resistant cassava starch on quality parameters and sensory attributes of yoghurt. *African Journal of Food Science*, 11(8), 250–259. <https://doi.org/10.5897/AJFS2017.1606>
- Nasrin, T. A., & Anal, A. K. (2014). Resistant starch III from culled banana and its functional properties in fish oil emulsion. *Food Hydrocolloids*, 35(1), 403–409. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.06.020>
- Obadi, M., & Xu, B. (2024). A review of the effects of physical processing techniques on the characteristics of legume starches and their application in low-glycemic index foods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 279, 135124. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135124>
- Raigond, P., Dutt, S., & Singh, B. (2017). Resistant starch in food. In J.-M. Mérillon & K. G. Ramawat (Eds.), *Bioactive molecules in food* (pp. 1–31). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54528-8_30-1
- Raigond, P., Ezekiel, R., & Raigond, B. (2015). Resistant starch in food: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(10), 1968–1978. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6966>

- Rashid, R. S. A., Mohamed, A. M. D., Yenn, T. W., Nair, S., & Muhammad, S. K. S. (2024). Physicochemical properties and sensory evaluation of sago resistant starch yogurt drink. *AIP Conference Proceedings*, 2923(1), 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0196287>
- Ratnayake, W. S., & Jackson, D. S. (2008). Thermal behavior of resistant starches RS2, RS3, and RS4. *Journal of Food Science*, 73(6), C356–C366. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00846.x>
- Saleh, A., Mohamed, A. A., Alamri, M. S., Hussain, S., Qasem, A. A., & Ibraheem, M. A. (2020). Effect of different starches on the rheological, sensory and storage attributes of non-fat set yogurt. *Foods*, 9(1), 61. <https://doi.org/10.3390/foods9010061>
- Sanz, T., Salvador, A., & Fiszman, S. M. (2008). Resistant starch (RS) in battered fried products: Functionality and high-fibre benefit. *Food Hydrocolloids*, 22(4), 543–549. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.01.009>
- Sert, D., Mercan, E., & Dertli, E. (2017). Characterization of lactic acid bacteria from yogurt-like product fermented with pine cone and determination of their role on physicochemical, textural and microbiological properties of the product. *LWT — Food Science and Technology*, 78, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.023>
- Si, H., Xie, F., Yang, R., Gu, W., Wu, S., Zhang, J., Zhang, Y., & Qiao, Y. (2024). Recent developments in enzymatic preparation, physicochemical properties, bioactivity, and application of resistant starch type III from staple food grains. *International Journal of Biological Macromolecules*, 279, 135521. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135521>
- Su, Q., Sun, L., Chen, L., Wang, X., Liu, K., & Gong, K. (2025). The influence of different drying methods on the molecular structure and digestive resistance of type 3 resistant starch (RS3). *Food Chemistry*, 474, 142971. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.142971>
- Syeda, N., Ali, T. M., & Shaikh, M. (2025). Impact of phosphorylation on techno-functional, rheological, and digestibility characteristics of split red lentil starch. *Legume Science*, 7(3), e70039. <https://doi.org/10.1002/leg3.70039>
- Tharanathan, R. N. (2002). Food-derived carbohydrates: Structural complexity and functional diversity. *Critical Reviews in Biotechnology*, 22(1), 65–84. <https://doi.org/10.1080/07388550290789469>
- Yan, Q., Wang, W., Fan, Z., Li, B., Wei, Y., Yu, R., Pan, T., Wang, N., Lu, W., & Fang, Z. (2024). Gut microbes mediate prebiotic-like effects of resistant starch. *Food Bioscience*, 61, 104627. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104627>
- You, M., Peng, Z., Jiang, Y., Yao, C., Yang, B., Ban, Q., & Cheng, J. (2024). The properties of the rice resistant starch processing and its application in skimmed yogurt. *International Journal of Biological Macromolecules*, 265, 131087. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131087>
- Zare, F., Boye, J. I., Orsat, V., Champagne, C., & Simpson, B. K. (2011). Microbial, physical and sensory properties of yogurt supplemented with lentil flour. *Food Research International*, 44(8), 2482–2488. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.01.002>
- Zhao, M., Lu, C., Hu, X., & Ma, Z. (2024). Evolution of multi-scale structure and microbiota metabolism of lentil resistant starch during the dynamic fermentation in vitro. *Food Chemistry*, 461, 140914. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140914>

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПЕРЕЧЕНЬ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

1. ГОСТ 32901-2014. (2016). Молоко и молочная продукция. Методы микробиологического анализа.
2. ГОСТ 30726-2001. (2002). Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий вида *Escherichia coli*.
3. ГОСТ ISO 6785-2015. (2016). Молоко и молочная продукция. Обнаружение *Salmonella* spp.
4. ГОСТ 30347-2016. (2017). Молоко и молочная продукция. Методы определения *Staphylococcus aureus*.
5. ГОСТ 33566-2015. (2016). Молоко и молочная продукция. Определение дрожжей и плесневых грибов.
6. ГОСТ ISO 7889-2015. (2017). Йогурт. Подсчет характерных микроорганизмов. Методика подсчета колоний микроорганизмов после инкубации при температуре 37 °С.
7. ГОСТ ISO 4121-2016. (2017). Органолептический анализ. Руководящие указания по применению шкал количественных характеристик.
8. ГОСТ ISO 5492-2014. (2016). Органолептический анализ. Словарь.
9. ГОСТ 31981-2013. (2014). Йогурты. Общие технические условия.
10. ТР ТС 033/2013. (2013). О безопасности молока и молочной продукции. Технический регламент Таможенного союза. Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 09.10.2013 № 67.

ОБ АВТОРАХ

Исраа Алхамуд Алмуса, аспирант, Российский биотехнологический университет, г. Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1728-4340>, SPIN-код: 4485-6350, e-mail: israaalmousa67@gmail.com.

Олеся Евгеньевна Бакуменко, доктор технических наук, Российский биотехнологический университет, г. Москва, Россия, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9532-6131>, Scopus ID: 30367526600, Researcher ID: E-5727-2018, SPIN-код: 3397-0471, oebakumenko@mgupp.ru

ABOUT THE AUTHORS

Israa Alhamud Almousa, PhD Student, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1728-4340>, SPIN: 4485-6350, israaalmousa67@gmail.com

Olesya Evgenievna Bakumenko, Doctor of Technical Sciences, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, Russia, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9532-6131>, Scopus ID: 30367526600, Researcher ID: E-5727-2018, SPIN: 3397-0471, oebakumenko@mgupp.ru