

<https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i1.s295>

Влияние резистентного крахмала красной чечевицы на реологические свойства низкожирового йогурта

И. Алхамуд Алмуса, О. Е. Бакуменко

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

Корреспонденция:

Бакуменко Олеся Евгеньевна,
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
125080, Россия, г. Москва,
Волоколамское шоссе, 11
E-mail: oebakumenko@mgurp.ru

Конфликт интересов:

авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 30.12.2025

Поступила после

рецензирования: 26.02.2026

Принята: 30.03.2026

Copyright: © 2026 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Йогурт с пониженным содержанием жира характеризуется неудовлетворительными реологическими и текстурными свойствами, что обусловлено удалением жирового компонента. Резистентный крахмал, выделенный из красной чечевицы, — многофункциональный ингредиент, способен улучшить структуру и стабильность молочных продуктов, а также оказать благотворное влияние на функционирование организма за счет пребиотических свойств.

Цель. Изучить влияние резистентного крахмала, полученного из красной чечевицы, на реологические свойства низкожирового йогурта и определить его оптимальную концентрацию для улучшения текстуры продукта.

Материалы и методы. В образцы низкожирового йогурта вводили резистентный крахмал, выделенный из красной чечевицы, в концентрации от 0,5 до 2,0 %. Реологические показатели йогурта (динамическую вязкость, коэффициент синерезиса и водоудерживающую способность) определяли с использованием реометра. Степень синерезиса в йогурте оценивали путем анализа когезионной прочности и устойчивости к водоотделению. Объем отделившейся сыворотки измеряли в процессе хранения продукта при постоянной температуре и рассчитывали процент отделения сыворотки.

Результаты. Добавление в состав низкожирового йогурта резистентного крахмала привело к изменениям реологических свойств продукта, степень выраженности которых зависела от концентрации введенной добавки. Полученные данные показали, что добавление резистентного крахмала повышает водоудерживающую способность йогурта и снижает синерезис. Оптимальное влияние на вязкость и, соответственно, на консистенцию йогурта наблюдалось при концентрации резистентного крахмала 1,0–1,5 %. Увеличение дозировки до 2,0 % обеспечивало наибольшую водоудерживающую способность, однако сопровождалось снижением вязкости. Кроме того, резистентный крахмал оказывал положительное влияние на текстурные показатели (твердость и когезионность), приближая консистенцию продукта к йогуртам с более высоким содержанием жира.

Выводы. Резистентный крахмал, полученный из красной чечевицы, демонстрирует высокий прикладной потенциал в качестве функционального ингредиента для улучшения свойств низкожирового йогурта. Его использование способствует повышению вязкости, укреплению гелевой структуры, а также улучшает устойчивость продукта к синерезису. Данный компонент может рассматриваться как перспективный для разработки функциональных молочных продуктов с пониженным содержанием жира. При этом необходимо оптимизировать его концентрацию во избежание возможного негативного влияния на органолептические характеристики продуктов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

резистентный крахмал, красная чечевица, низкожировой йогурт, реологические свойства, синерезис, текстура



Для цитирования: Алхамуд Алмуса, И., & Бакуменко, О. Е., (2026). Влияние резистентного крахмала красной чечевицы на реологические свойства низкожирового йогурта. *Health, Food & Biotechnology*, 8(1), 60–70. <https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i1.s295>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i1.s295>

Effect of Resistant Starch Red Lentils on the Rheological Properties of Low-Fat Yogurt

Israa Alhamud Almousa, Olesya E. Bakumenko

Russian Biotechnological University
(BIOTECH University), Moscow, Russia

Correspondence:

Olesya E. Bakumenko,
Russian Biotechnology University
(BIOTECH University),
125080, Russia, Moscow,
Vokolamskoe shosse, 11
E-mail: oebakumenko@mgupp.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 30.12.2025

Received in revised form: 26.02.2026

Accepted: 30.03.2026

Copyright: © 2025 The Authors

ABSTRACT

Introduction. Low-fat yogurt is often characterized by reduced textural and rheological properties due to the removal of fat. Resistant starch derived from red lentils is a multifunctional ingredient capable of improving the structure and stability of dairy products, while also providing additional health benefits owing to its prebiotic properties.

Objective. To evaluate the effect of adding resistant starch RS3 isolated from red lentils on the rheological, textural, and syneretic properties of fat-free yogurt and to determine its optimal concentration for improving product quality.

Materials and Methods. Samples of low-fat yogurt were prepared with the addition of resistant starch at concentrations of 0.5–2.0 %. Rheological parameters (viscosity, syneresis index, and water-holding capacity) were determined using a rheometer. Syneretic stability was assessed by evaluating cohesive stability and resistance to water separation. The volume of separated whey was measured after a specified storage period at a constant temperature, and the percentage of separation was calculated.

Results. The addition of resistant starch RS3 resulted in pronounced concentration-dependent changes in yogurt properties. The data showed that RS3 incorporation enhanced the water-holding capacity of yogurt and reduced whey separation. The optimal effect on viscosity and sensory-related properties was observed at RS3 concentrations of 1–1.5 %, whereas the addition of 2 % provided the highest water-holding capacity but could be accompanied by a reduction in viscosity. Furthermore, RS3 supplementation influenced textural parameters (hardness and cohesiveness), bringing the consistency characteristics closer to those of yogurts with higher fat content.

Conclusions. Resistant starch RS3 obtained from red lentils demonstrates high applied potential as a functional ingredient for improving the properties of fat-free yogurt. Its use contributes to increased viscosity, strengthening of the gel structure, and enhanced resistance to syneresis. This component may be considered promising for the development of functional low-fat dairy products; however, optimization of its concentration is necessary to avoid possible adverse effects on organoleptic characteristics.

KEYWORDS

resistant starch; red lentils; low-fat yogurt; rheological properties; syneresis; texture



To cite: Alhamud Almousa, I., & Bakumenko, O. E., (2025). Effect of resistant starch red lentil on the rheological properties of low-fat yogurt. *Health, Food & Biotechnology*, 8(1), 60–70. <https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i1.s299>

ВВЕДЕНИЕ

Йогурт является одним из наиболее широко потребляемых ферментированных молочных продуктов в мире благодаря высокой пищевой ценности, хорошей усвояемости и выраженным функциональным свойствам, положительно влияющим на здоровье человека (Dickinson, 2003). В условиях растущего интереса потребителей к здоровому питанию и, следовательно, снижения доли жиров в рационе особой популярностью стали пользоваться низкожировые и обезжиренные продукты. Однако удаление жира из рецептуры йогурта, как правило, сопровождается ухудшением его структурно-механических и органолептических характеристик, включая снижение вязкости, увеличение синерезиса (отделения сыворотки) и потерю характерной кремообразной консистенции (Wirathilake et al., 2014).

Для компенсации этих технологических недостатков в производстве низкожировых и/или обезжиренных йогуртов применяют различные структурообразователи и стабилизаторы, например, каррагинан, желатин, ксантановую камедь, модифицированные крахмалы и др. Эти компоненты способствуют повышению вязкости, улучшению текстуры и снижению отделения сыворотки, обеспечивая стабильность продукта в процессе хранения (Himatyar, 2012; Lal et al., 2006; Nguyen et al., 2017; Tamime & Robinson, 2007).

Среди указанных ингредиентов крахмал и его производные занимают одно из ведущих мест благодаря доступности, функциональности и способности эффективно формировать текстуру молочных продуктов (Keet et al., 2013; Rezaei et al., 2015).

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Резистентный крахмал (Resistant Starch, RS) представляет собой фракцию крахмала, не расщепляемую ферментами тонкого кишечника, но ферментируемую в толстом кишечнике полезной микрофлорой, вследствие чего он проявляет свойства, характерные для пищевых волокон (Karunarathna & Wick, 2020). В зависимости от происхождения и способа образования резистентный крахмал подразделяется на пять типов (RS1–RS5), среди которых особый интерес представляет резистентный крахмал типа III (RS3). Данный тип образуется в результате термической обработки крахмала с последующим охлаждением, вызывающим ретроградацию амилозных цепей и формирование термостабильной кристаллической структуры, устойчивой к гидролизу.

Резистентный крахмал вызывает большой интерес благодаря двум аспектам: потенциальной пользе для здоровья, реализуемой через механизмы, сходные с дей-

ствием растворимых пищевых волокон, и выраженным функциональным свойствам. RS улучшает липидный профиль крови, модулирует состав микробиоты и нормализует функции желудочно-кишечного тракта. Помимо значительных преимуществ для здоровья, важным достоинством RS является его минимальное влияние на сенсорные характеристики продуктов по сравнению с традиционными источниками клетчатки (зерновые культуры, отруби, фрукты). Многие нативные крахмалы при клейстеризации образуют слабые и нежелательные гели, которые подвержены деградации под влиянием температуры, влажности и продолжительности хранения (Islam et al., 2022). Кроме того, RS играет важную роль в снижении постпрандиальной гликемии, ингибировании синтеза глюкозы и липидов, повышении толерантности к глюкозе и чувствительности к инсулину, а также в усилении деградации липидов, что опосредованно способствует росту разнообразия и численности полезной микробиоты толстой кишки, а также увеличению продукции короткоцепочечных жирных кислот. Включение RS в пищевые продукты существенно повышает их пищевую ценность без ухудшения качества, что открывает новые возможности для создания функциональных продуктов питания (Zhang et al., 2023).

Многочисленные исследования подтверждают перспективность применения RS3 в технологии йогуртов с пониженным содержанием жира. Так, He et al. (2019) показали, что добавление RS3 из физически модифицированного кукурузного крахмала приводит к увеличению вязкости йогурта, снижению титруемой кислотности и повышению жизнеспособности пробиотических микроорганизмов. Jia et al. (2022) установили, что RS3, полученный методом СВЧ-обработки, существенно улучшает реологические свойства йогурта за счет формирования пространственной сети между молекулами крахмала и белками молока, что выражается в повышении модуля упругости и вязкости. Mwiszerwa et al. (2017) продемонстрировали, что добавление 1,0 % RS3 из маниоки увеличивает вязкость йогурта до 2721,5 мПа·с и снижает синерезис до 22,25 % без ухудшения сенсорных характеристик.

Аналогичные результаты были получены Saleh et al. (2020), они показали, что введение 1,0 % резистентного крахмала в обезжиренный йогурт уменьшает отделение сыворотки и повышает твердость гелевой структуры. Nikitina et al. (2019) также отметили увеличение вязкости и улучшение структурной целостности йогурта при использовании ферментативно модифицированного картофельного крахмала. В совокупности эти данные свидетельствуют о высокой эффективности резистентного крахмала, выделенного из различных источников (кукурузы, картофеля, маниоки), в качестве природного заменителя жира в низкожировых йогуртах без негативного влияния на вкусовые характеристики.

Помимо технологических свойств, резистентный крахмал обладает выраженными физиологическими преимуществами. В процессе его ферментации в толстом кишечнике образуются короткоцепочечные жирные кислоты (уксусная, пропионовая и масляная), способствующие поддержанию здоровья кишечника, улучшению минерального обмена, снижению уровня холестерина и повышению чувствительности к инсулину (Karunaratna & Wick, 2020). В этом контексте особый интерес представляют семена бобовых культур как перспективные источники RS3 благодаря высокому содержанию амилозы. Красная чечевица характеризуется способностью образовывать значительные количества резистентного крахмала при термической обработке и последующем охлаждении (Xu et al., 2020). Резистентный крахмал, выделенный из красной чечевицы, отличается высокой степенью кристалличности и устойчивой двойной спиральной структурой, что делает его особенно перспективным для использования в технологии функциональных молочных продуктов с пониженным содержанием жира.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект

В качестве объекта исследования был выбран йогурт с пониженным содержанием жира, обогащенный резистентным крахмалом типа III (RS3), выделенным из красной чечевицы. Контрольный образец представлял собой йогурт аналогичного состава без добавления резистентного крахмала.

Материалы

Сырьем для получения резистентного крахмала служила красная тарельчатая чечевица (торговая марка «Мистраль»), соответствующая требованиям российского стандарта ГОСТ 7066-77.

Получение резистентного крахмала RS3. Подготовленные зерна чечевицы измельчали на лабораторной мельнице для получения муки, после чего её просеивали через сито с диаметром отверстий 0,5 мм для формирования однородной фракции. Экстракция крахмала осуществлялась в несколько этапов: суспендирование муки в дистиллированной воде в течение одного часа; центрифугирование для удаления белка; щелочная обработка гидроксидом натрия (0,5 М) для растворения остаточного белка; фильтрация для удаления пищевых волокон и некрахмальных частиц; кислотная обработка соляной кислотой (0,5 М); сушка при температуре $+40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Li et al., 2019). В извлеченном крахмале определяли содержание исходного резистентного крахмала, которое со-

ставляло $36,6\% \pm 0,5\%$, что соответствует первому типу резистентного крахмала по методу Энглиста (Englyst et al., 1995). Для увеличения содержания резистентного крахмала его подвергли физической модификации с помощью микроволновой обработки. С этой целью резистентный крахмал увлажняли до $20\% \pm 0,5\%$, выдерживали в течение 15 мин, а затем нагревали в микроволновой печи при мощности 460 Вт в течение 60 с. После этого образцы охлаждали и хранили при температуре $+4,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 48 часов для стимулирования процесса ретроградации. После ретроградации продукт повторно высушивали при температуре $+40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и измельчали в порошок. Полученный продукт содержал около 58 % резистентного крахмала третьего типа (RS3) и был использован в качестве добавки в йогурт.

Основой для йогурта служило коровье молоко со следующими показателями (на 100 см³): массовая доля жира – 1,5 %, белки – 2,9 г, углеводы – 4,9 г.

Стартовая закваска для йогурта содержала культуры *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* и *Streptococcus thermophilus*.

Оборудование

Для проведения экспериментов использовали ротационный вискозиметр *Brookfield DV-II+ Pro* со шпинделем № 63, лабораторную центрифугу ОПН-8 (модель ОПН-8-УХЛ4.2), термостат электрический суховоздушный ТС-80, холодильную камеру «Индезит», а также стандартное лабораторное оборудование для приготовления и хранения йогурта.

Методы исследования

Определение реологических свойств

Реологические характеристики йогурта определяли методом ротационной вискозиметрии. Измерения проводили при температуре $+20,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на вискозиметре *Brookfield DV-II+ Pro* при скорости вращения шпинделя 100 об/мин. Динамическую вязкость выражали в сантипуазах (сП).

Определение синерезиса

Синерезис йогуртовых сгустков определяли по количеству сыворотки, отделившейся при фильтровании 5,0 г предварительно разрушенного сгустка через бумажный фильтр в течение 5 ч при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Процент синерезиса рассчитывали по методике, описанной Hong, Song, Kwon и Kim (2020).

Определение водоудерживающей способности (ВУС)

Водоудерживающую способность йогурта определяли методом центрифугирования. Образцы после охлаждения до $+4,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ центрифугировали в течение 10 мин при скорости 3000 об/мин и температуре $20,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отделившуюся сыворотку удаляли и взвешивали.

Процедура эксперимента

Приготовление йогурта. Низкожировой йогурт готовили общепринятым методом. Молочную основу пастеризовали при температуре $+85,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин, затем охлаждали до $+42,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В охлажденное молоко вносили стартовую закваску в количестве 2,5 (мас. %) и резистентный крахмал, выделенный из красной чечевицы методом СВЧ-обработки (содержание RS3 в 100 г красной чечевице составило 58,769 %).

Концентрацию RS3 варьировали от 0,5 до 2,0 % с шагом 0,5. Ферментацию проводили при температуре $+42,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до формирования плотного сгустка, после чего образцы охлаждали до $+4,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдерживали в течение 24 ч для стабилизации структуры.

Расчет показателей

Синерезис (%) рассчитывали по формуле (1):

$$\text{Синерезис} = \frac{\text{количество отделившейся сыворотки}}{\text{начальная масса образца}} \times 100. \quad (1)$$

Водоудерживающую способность определяли по формуле (2):

$$\text{ВУС} = \frac{\text{количество удержанной сыворотки}}{\text{начальная масса образца}} \times 100. \quad (2)$$

Анализ данных

Эксперименты проводили в трех независимых повторностях. Для статистической обработки данных применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Статистическую значимость различий принимали при достижении уровня $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследования изучали, как внесение резистентного крахмала (RS3) влияет на синерезис низкожирового йогурта. Образцы йогурта хранили при температуре $+4,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение всего периода наблю-

дения (с периодическим мониторингом показателей на 1-е, 7-е, 14-е и 21-е сутки хранения).

В Таблице 1 представлены результаты, отражающие влияние различных концентраций резистентного крахмала на синерезис йогурта (%) в указанные периоды хранения. В качестве контрольного образца использовали йогурт без добавления резистентного крахмала.

Таблица 1

Влияние различных концентраций резистентного крахмала на синерезис йогурта в различные периоды хранения

Table 1

Effect of Various Concentrations of Resistant Starch on Yogurt Syneresis During Different Storage Periods

Образец (количество RS3)	Период хранения, сутки	Синерезис, %
Контроль (0 %)	1-е	33,26 ± 0,3
	7-е	27,6 ± 0,6
	14-е	30,0 ± 2,5
	21-е	29,4 ± 0,46
Образец 1 (0,5 %)	1-е	31,18 ± 2,8
	7-е	29,07 ± 0,8
	14-е	27,4 ± 1,7
	21-е	24,4 ± 0,4
Образец 2 (1,0 %)	1-е	30,66 ± 0,58
	7-е	27,1 ± 0,3
	14-е	29,0 ± 0,5
	21-е	26,9 ± 1,29
Образец 3 (1,5 %)	1-е	27,64 ± 0,7
	7-е	28,8 ± 0,6
	14-е	27,1 ± 0,6
	21-е	24,0 ± 3,5
Образец 4 (2 %)	1-е	26,52 ± 4,3
	7-е	27,5 ± 1,6
	14-е	24,1 ± 1,2
	21-е	22,6 ± 4,13

Результаты исследований показали, что добавление резистентного крахмала оказывает выраженное влияние на способность продукта удерживать сыворотку в процессе хранения. Так, добавление RS3 привело к снижению синерезиса по сравнению с контрольным образцом, что свидетельствует об улучшении структурно-механических свойств геля и повышении его стабильности.

В 1-е сутки хранения с увеличением концентрации RS3 показатель синерезиса снижался: от 33,26 до 26,52 %, что указывает на то, что уже на начальной стадии хранения RS3 способствует уменьшению отделения сыворотки. Такой эффект можно объяснить способностью

частиц RS3 связывать воду и функционировать как структура-наполнитель, укрепляющая белково-полисахаридную матрицу йогурта.

На 7-е сутки в образце йогурта с содержанием RS3 1,5 % наблюдалось незначительное увеличение синерезиса. По-видимому, это связано с перераспределением влаги внутри геля и временной перестройкой белковой матрицы. Во всех других образцах сохранялась тенденция к незначительному снижению синерезиса, подтверждая стабилизирующую роль крахмала.

На 14-е сутки в контрольном образце наблюдалось небольшое увеличение синерезиса (до 30 %), что является типичным для йогурта при длительном хранении вследствие усадки геля и экспрессии сыворотки. В то же время образцы йогурта, содержащие RS3, демонстрировали либо стабильность синерезиса, например, при содержании RS3 1,5 %, либо тенденцию к снижению, например, в образце с содержанием RS3 2,0 %. Полученные данные свидетельствуют о том, что присутствие RS3 в составе йогурта снижает интенсивность структурного разрушения геля на поздних сроках хранения.

К 21-м суткам хранения различия между образцами йогурта стали наиболее выраженными. Так, синерезис в контрольном образце был максимальным (29,4 %), тогда как в образцах, содержащих RS3, наблюдается тенденция к снижению показателя синерезиса (от 26,9 до 22,6 %). Таким образом, чем выше концентрация RS3 в образцах йогурта, тем лучше удерживается влага и снижается процесс отделения сыворотки в конце срока годности продукта. Вероятный механизм заключается в увеличении доли связанной воды и уплотнении пространственной структуры геля, что ограничивает миграцию влаги.

В целом полученные результаты позволяют заключить, что введение резистентного крахмала эффективно снижает синерезис йогурта, повышая его способность удерживать сыворотку и стабилизируя текстуру в процессе хранения. Наиболее выраженное улучшение наблюдалось при концентрации RS3 от 1,5 до 2,0 %, что свидетельствует о перспективах промышленного применения этого ингредиента в производстве низкожирового йогурта с высокими реологическими свойствами.

На следующем этапе исследования изучали влияние различных концентраций резистентного крахмала (RS3) на водоудерживающую способность (ВУС) низкожирового йогурта.

В Таблице 2 приведены результаты, отражающие воздействие различных концентраций RS3 на ВУС йогурта (%) в различные периоды хранения продукта (1–21-е сутки). В качестве контрольного образца использовали йогурт без добавления резистентного крахмала.

Таблица 2

Влияние различных концентраций резистентного крахмала на ВУС йогурта в различные периоды хранения

Table 2

Effect of Various Concentrations of Resistant Starch on the Water-Holding Capacity of Yogurt During Various Storage Periods

Образец (количество RS3)	Период хранения, сутки	ВУС, %
Контроль (0 %)	1-е	48,1 ± 2,1
	7-е	47,6 ± 0,1
	14-е	44,6 ± 1,7
	21-е	50,1 ± 0,9
Образец 1 (0,5 %)	1-е	46,3 ± 0,6
	7-е	45,7 ± 0,8
	14-е	45,0 ± 1,9
	21-е	48,5 ± 0,8
Образец 2 (1,0 %)	1-е	49,7 ± 2,5
	7-е	47,1 ± 0,7
	14-е	47,6 ± 0,1
	21-е	46,5 ± 0,9
Образец 3 (1,5 %)	1-е	50,01 ± 0,4
	7-е	47,3 ± 0,9
	14-е	47,4 ± 1,1
	21-е	45,3 ± 1,1
Образец 4 (2,0 %)	1-е	51,6 ± 0,2
	7-е	51,3 ± 0,9
	14-е	43,5 ± 1,1
	21-е	53,3 ± 2,0

Динамика ВУС в образцах йогурта с различными концентрациями RS3 показала, что данный ингредиент оказывает разностороннее влияние на способность продукта удерживать воду в процессе хранения. В целом включение RS3 в состав йогурта обеспечило увеличение ВУС по сравнению с контрольным образцом, особенно на ранних и поздних этапах хранения, что соответствует механизму действия крахмальных структур, способных связывать и удерживать значительное количество воды.

В 1-е сутки наблюдалось повышение показателя ВУС в зависимости от концентрации RS3. Этот эффект может быть обусловлен способностью RS3 к гидратации и участием его частиц в формировании более плотной гелевой матрицы, в которой часть воды находится в связанном состоянии. Таким образом, уже на начальном этапе хранения резистентный крахмал способствует улучшению водоудерживающих свойств йогурта.

На 7-е сутки большинство образцов демонстрировали умеренное снижение ВУС, что является типичным для

йогурта вследствие начальной усадки белковой матрицы. Однако образец, содержащий 2,0 % RS3, сохранил высокую способность удерживать воду (51,3 %), что превышает данный показатель у других образцов. Вероятно, такая концентрация RS3 обеспечивает стабилизацию структуры продукта и препятствует чрезмерной потере влаги в продукте.

На 14-е сутки в контрольном образце наблюдалось закономерное снижение ВУС до 44,6 %, связанное с прогрессирующей усадкой геля и перераспределением влаги. В других образцах эти изменения были менее выраженными. При содержании RS3 1,0 % и 1,5 % показатели ВУС были относительно стабильны (47,6 % и 47,4 % соответственно), что свидетельствует о том, что повышение концентрации RS3 снижает скорость деградации структуры геля и способствует удержанию влаги при длительном хранении.

К 21-м суткам хранения различия между образцами стали отчетливыми. Так, контрольный образец показал умеренный рост ВУС (до 50,1 %), что может быть связано с уплотнением структуры и повторным связыванием части влаги. Наиболее высоким значением ВУС обладал образец с RS3 2,0 % (53,3 %), что подтверждает его высокую способность удерживать воду на поздних стадиях хранения. Значения ВУС для других образцов с RS3 0,5–1,5 % оставались в пределах 48,5–45,3 %, что выше или сопоставимо с контрольным образцом.

Таким образом, включение резистентного крахмала в состав низкожирового йогурта положительно повлияло на водоудерживающую способность, особенно при концентрации 2,0 %. В данных образцах наблюдались самые высокие значения ВУС как в начале, так и в конце срока хранения. Механизм этого процесса связан с высокой гидратационной способностью RS3, его участием в формировании пространственной структуры продукта и увеличением доли связанной влаги.

На следующем этапе анализировали влияние различных концентраций резистентного крахмала (RS3) на показатель динамической вязкости (ДВ) низкожирового йогурта.

В Таблице 3 приведены результаты, отражающие влияние различных концентраций RS3 на ДВ йогурта (сП) в различные периоды хранения продукта (1–21-е сутки). В качестве контрольного образца использовали образец йогурта без добавления резистентного крахмала.

Анализ ДВ образцов йогурта с различными концентрациями RS3 выявил выраженную зависимость этого показателя от количества вносимой добавки и стадии хранения. В отличие от практически линейного увеличения ВУС при повышении концентрации RS3 изменение

Таблица 3

Влияние различных концентраций резистентного крахмала на ДВ йогурта в различные периоды хранения

Table 3

Effect of Various Concentrations of Resistant Starch on the Active Substance Content of Yogurt at Various Storage Periods

Образец (количество RS3)	Период хранения, сутки	ДВ, сП
Контроль (0 %)	1-е	2,55 ± 0,05
	7-е	2,45 ± 0,2
	14-е	2,23 ± 0,06
	21-е	2,29 ± 0,2
Образец 1 (0,5 %)	1-е	2,40 ± 0,1
	7-е	2,66 ± 0,1
	14-е	2,62 ± 0,08
	21-е	2,66 ± 0,3
Образец 2 (1,0 %)	1-е	2,78 ± 0,02
	7-е	2,76 ± 0,1
	14-е	2,63 ± 0,1
	21-е	2,50 ± 0,04
Образец 3 (1,5 %)	1-е	2,63 ± 0,09
	7-е	3,21 ± 0,2
	14-е	2,72 ± 0,1
	21-е	2,68 ± 0,1
Образец 4 (2,0 %)	1-е	2,48 ± 0,4
	7-е	2,32 ± 0,3
	14-е	2,21 ± 0,18
	21-е	2,14 ± 0,2

ДВ носило нелинейный характер, что указывает на существование оптимального диапазона концентраций, при которых достигается наибольшее структурное усиление геля.

В 1-е сутки хранения значения ДВ во всех образцах находились в пределах, близких к контрольным. Однако образец с содержанием RS3 1 % показал наиболее высокую ДВ (2,78 сП ± 0,02 сП), что свидетельствует об усилении структурирования белково-полисахаридной матрицы. В то же время образец с RS3 2,0 % демонстрировал, напротив, более низкое значение ДВ (2,48 сП ± 0,4 сП), что указывает на возможный порог концентрации, превышение которого приводит к снижению эффективности структурирования.

На 7-е сутки хранения йогурта проявилось максимальное влияние добавки RS3. Так, в образце с содержанием RS3 1,5 % было достигнуто максимальное значение ДВ (3,21 сП ± 0,2 сП), что существенно превышало показатель контрольного образца (2,45 сП ± 0,2 сП). Образцы, содержащие 0,5 % и 1,0 % RS3 также сохраняли высокую

ДВ, а при концентрации RS3 2,0 % наблюдалось снижение ДВ ($2,32 \text{ сП} \pm 0,3 \text{ сП}$), что предполагает формирование разобщенных крахмальных доменов, ослабляющих непрерывность белковой цепи.

На 14-е сутки ДВ образцов с содержанием RS3 0,5 % и 1,5 % оставалась устойчиво повышенной (2,62 и 2,72 сП соответственно), в то время как контрольный образец и образец, содержащий 2,0 % RS3, демонстрировали минимальные значения ДВ (2,23 и 2,21 сП соответственно). Это подтверждает стабилизирующую роль промежуточных концентраций RS3, замедляющих деградацию белковой матрицы.

На 21-е сутки значения ДВ образцов с содержанием RS3 0,5 % и 1,5 % удерживались в относительно узком диапазоне (2,50 и 2,68 сП соответственно), тогда как вязкость контрольного образца и образца с 2%-м содержанием RS3 оставалась ниже (2,29 и 2,14 сП соответственно). Данный результат согласуется с гипотезой о фазовом разделении белковой молекулы при высокой концентрации RS3, приводящей к уменьшению макроскопического сопротивления сдвигу.

Для подтверждения достоверности экспериментальных данных была проведена статистическая обработка показателей образцов низкожирового йогурта с добавлением различных концентраций резистентного крахмала красной чечевицы, включая синерезис, водоудерживающую способность и динамическую вязкость.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа показали, что добавление RS3 оказывает статистически значимое влияние на синерезис йогурта по сравнению с контрольным образцом ($p < 0,05$) на всех этапах хранения. Наиболее выраженные различия были зафиксированы между контрольным образцом и образцами йогурта, содержащими 1,5 % и 2,0 % RS3, особенно на 14-е и 21-е сутки хранения. Это свидетельствует о достоверном снижении отделения сыворотки при увеличении концентрации RS3.

Повышение ВУС наблюдалось в образцах йогурта с содержанием 1,0 % и 2,0 % RS3 по сравнению с контрольным образцом, особенно на 1-е и 21-е сутки хранения. При этом образец, содержащий 2,0 % RS3, демонстрировал наибольшие значения ВУС, различия с контрольным образцом были статистически значимыми ($p < 0,05$), что подтверждает усиление способности геля удерживать воду при повышенных концентрациях RS3.

Анализ ДВ йогурта показал, что концентрация резистентного крахмала RS3 оказывает статистически значимое влияние на данный показатель ($p < 0,05$), однако этот эффект носит нелинейный характер. Достоверное увеличение ДВ по сравнению с контрольным образцом

наблюдалось в образцах йогурта, содержащих 1,0 % и 1,5 % RS3, особенно на 7-е сутки хранения продукта. В то же время различия между контрольным образцом и образцом, содержащим 2,0 % RS3 были статистически недостоверными либо характеризовались тенденцией к снижению ДВ, что указывает на существование оптимального диапазона концентраций RS3 для повышения реологических свойств.

Таким образом, результаты однофакторного дисперсионного анализа подтверждают, что добавление резистентного крахмала красной чечевицы статистически значимо влияет на синерезис, водоудерживающую способность и динамическую вязкость низкожирового йогурта ($p < 0,05$). Наиболее выраженный положительный эффект по совокупности показателей наблюдается при концентрациях RS3 1,0 % и 1,5 %, тогда как концентрация 2,0 % обеспечивает максимальное снижение синерезиса и повышение водоудерживающей способности, но не сопровождается достоверным увеличением динамической вязкости.

Полученные данные свидетельствуют о нелинейной зависимости между концентрацией резистентного крахмала (RS3) и реологическими свойствами низкожирового йогурта. Образцы, содержащие 2,0 % RS3, продемонстрировали наиболее низкие показатели синерезиса и максимальную водоудерживающую способность на протяжении всего периода хранения (Таблицы 1, 2). Однако при этой же концентрации наблюдалось снижение динамической вязкости по сравнению с образцами, содержащими 1,0–1,5 % RS3 (Таблица 3). Такое снижение вязкости, вероятно, связано с эффектом фазового разделения: при высоком содержании полисахарида частицы крахмала могут образовывать локальные скопления, нарушающие целостность белковой сети и снижающие макроскопическое сопротивление сдвигу (Jia et al., 2022).

Выбор оптимальной концентрации RS3 1,0–1,5 % основывался на принципе баланса между технологическими и сенсорными характеристиками продукта. Хотя добавление RS3 2,0 % максимально подавляет синерезис, чрезмерное увеличение доли структурообразователя может приводить к формированию излишне плотной, «резинистой» или «мучнистой» текстуры, что негативно воспринимается потребителями (Saleh et al., 2020). В то же время вязкость и сопряженные с ней параметры (твердость, когезионность) напрямую коррелируют с ощущением «кремообразности» (creamy mouthfeel) — ключевой характеристикой, утрачиваемой при снижении жирности продукта (Hussain et al., 2022).

Полученные результаты согласуются с исследованиями других авторов. Так, *Rashid et al.* (2024) при изучении напитков на основе йогурта с добавлением резистентного

крахмала из саго отметили, что улучшение вязкости положительно сказывалось на органолептической оценке. Saleh et al. (2020) также показали, что умеренные концентрации резистентного крахмала (1,0 %) позволяют достичь наилучшего сочетания реологических и сенсорных свойств в нежирном йогурте.

Таким образом, концентрация RS3 1,0–1,5 % является оптимальной, поскольку она обеспечивает статистически значимое снижение синерезиса по сравнению с контрольным образцом ($p < 0,05$) и одновременно приводит к максимальному увеличению вязкости, что приближает консистенцию продукта к традиционному йогурту с нормальным содержанием жира.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что введение резистентного крахмала, выделенного из красной чечевицы, улучшает водоудерживающую способность и синерезис низкожирного йогурта. Для достижения лучших текстурных и, соответственно, реологических показателей йогурта оптимальным диапазоном концентраций RS3 является 1,0–1,5 %. При этом частицы RS3 равномерно интегрируются в белковую матрицу, усиливая межмолекулярные взаимодействия и повышая сопротивление деформации. Формируется композитная структура, в которой крахмал действует как эффективный «наполнитель».

ЛИТЕРАТУРА

- Огнева, О. А., & Забашта, Н. Н. (2020). Стандартизация и экспертиза молока и молочных продуктов: методические рекомендации. КубГАУ.
- Dickinson, E. (2003). Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocolloids*, 17(1), 25–39.
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., & Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46(Suppl 2), S33–S50.
- He, J., Han, Y., Liu, M., Wang, Y., Yang, Y., & Yang, X. (2019). Effect of 2 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>
- Hematyar, N. (2012). Effect of gums on yoghurt characteristics. *World Applied Sciences Journal*, 20. <https://doi.org/10.5829/idosi.was.2012.20.05.2353>.
- Hussain, S., Mohamed, A. A., Alamri, M. S., Saleh, A., Ibraheem, M. A., Abdo qasem, A. A., Shamlan, G., & Ababtain, I. A. (2021). Rheological, textural, and sensory properties of non-fat yogurt containing cress (*Lepidium sativum*) seed gum and various starches. *Food Science and Technology*, 42, e30121
- Islam, F., Noman, M., Afzaal, M., Saeed, F., Shabana, A., Zubair, M. W., Zahra, S.M., Hussain, M., Ateeq, H., & Awuchi, C. G. (2022). Synthesis and food applications of resistant starch-based nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8729258>
- Jia, S., Zhao, H., Tao, H., Yu, B., Liu, P., & Cui, B. (2022). Influence of corn resistant starches type III on the rheology, structure, and viable counts of set yogurt. *International Journal of Biological Macromolecules*, 203, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.027>

Показано, что введение в рецептуру низкожирового йогурта RS3 2,0 % целесообразно применять для повышения водоудерживающей способности йогурта. При этом улучшается структура йогурта и снижается вязкость.

Дальнейшие исследования, связанные с изменением микроструктуры и сенсорных показателей низкожирового йогурта при добавлении резистентного крахмала позволят осуществить практическое внедрение данного ингредиента в рецептуры кисломолочных продуктов и расширить ассортимент функциональных продуктов.

ВКЛАД АВТОРОВ

Алхамуд Алмуса И.: проведение исследования, подготовка черновика рукописи

Бакуменко О. Е.: концептуализация, создание рукописи и её редактирование, научное руководство исследованием

AUTHORS' CONTRIBUTION

Alkhamoud Almusa I.: investigation, writing – original draft

Bakumenko O. E.: conceptualization, writing – review & editing, supervision

- Karunaratna, S., & Wickramasinghe, I. (2020). Health benefits and functional properties of resistant starch: A review. *Journal of Food Science and Nutrition Research*, 3(2), 143–156. <https://doi.org/10.26502/jfsnr.2642-11000045>.
- Kett, A. P., Chaurin V., Fitzsimons S. M., Morris E. R., O'Mahony J. A., Fenelon M. A. (2013). Influence of milk proteins on the pasting behaviour and microstructural characteristics of waxy maize starch. *Food Hydrocolloids*, 30(2), 661–671. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.08.002>
- Lal, S. N. D., O'Connor, C. J., & Eyres, L. (2006). Application of emulsifiers/stabilizers in dairy products of high rheology. *Advances in Colloid and Interface Science*, 123–126, 433–437. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.05.009>
- Li, L., Yuan, T. Z., Setia, R., Raja, R. B., Zhang, B., & Ai, Y. (2019). Characteristics of pea, lentil and faba bean starches isolated from air-classified flours in comparison with commercial starches. *Food Chemistry*, 276, 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.064>
- 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. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 5(3) <http://dx.doi.org/10.12944/CRNFSJ.5.3.21>
- Nguyen, P. T. M., Kravchuk, O., Bhandari, B., & Prakash, S. (2017). Effect of different hydrocolloids on texture, rheology, tribology and sensory perception of texture and mouthfeel of low-fat pot-set yoghurt. *Food Hydrocolloids*, 72, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.05.035>
- Nikitina, E., Riyanto, R. A., Vafina, A., Yurtaeva, T., Tsyganov, M., & Ezhkova, G. (2019). Effect of fermented modified potato starches on low-fat yogurt. *Journal of Food and Nutrition Research*, 7(7), 549–555. <https://doi.org/10.12691/jfnr-7-7-10>
- Rashid, R. S. A., Mohamed, A. M. D., Yenn, T. W., Nair, S., & Muhammad, S. K. S. (2024). Physicochemical properties & sensory evaluation of sago resistant starch Yogurt drink. In *AIP Conference Proceedings* (292(1), 030002). AIP Publishing LLC.
- Rezaei, R., Khomeiri, M., Kashaninejad, M., Mazaheri-Tehrani, M., & Aalami, M. (2015). Effect of resistant starch and ageing conditions on the physicochemical properties of frozen soy yoghurt. *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 8164–8171.
- 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.
- Tamime A. Y., Robinson R. K. (2007). *Yoghurt: Science and Technology*. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Elsevier: 35–41.
- Weerathilake, W. A. D. V., Rasika, D. M. D., Ruwanmali, J. K. U., & Munasinghe, M. A. D. D. (2014). The evolution, processing, varieties and health benefits of yoghurt. *International Journal of Scientific and Research Publications*, (4), 1–10.
- Xu, J., Ma, Z., Li, X., Liu, L., & Hu, X. (2020). A more pronounced effect of type III resistant starch vs. type II resistant starch on ameliorating hyperlipidemia in high fat diet-fed mice is associated with its supramolecular structural characteristics. *Food & Function*, 11(3), 1982–1995.
- Zhang, Z., & Bao, J. (2023) Recent advances in modification approaches, health benefits, and food applications of resistant starch. *Starch Stärke*, 2023 Sep;75(9–10):2100141. <https://doi.org/10.1002/star.202100141>

REFERENCE

- Dickinson, E. (2003). Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocolloids*, 17(1), 25–39.
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., & Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46(Suppl 2), S33–S50.
- He, J., Han, Y., Liu, M., Wang, Y., Yang, Y., & Yang, X. (2019). Effect of 2 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>
- Hematyar, N. (2012). Effect of gums on yoghurt characteristics. *World Applied Sciences Journal*, 20. <https://doi.org/10.5829/idosi.was.2012.20.05.2353>.
- Hussain, S., Mohamed, A. A., Alamri, M. S., Saleh, A., Ibraheem, M. A., Abdo qasem, A. A., Shamlan, G., & Ababtain, I. A. (2021). Rheological, textural, and sensory properties of non-fat yogurt containing cress (*Lepidium sativum*) seed gum and various starches. *Food Science and Technology*, 42, e30121

- Islam, F., Noman, M., Afzaal, M., Saeed, F., Shabana, A., Zubair, M. W., Zahra, S.M., Hussain, M., Ateeq, H., & Awuchi, C. G. (2022). Synthesis and food applications of resistant starch-based nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8729258>
- Jia, S., Zhao, H., Tao, H., Yu, B., Liu, P., & Cui, B. (2022). Influence of corn resistant starches type III on the rheology, structure, and viable counts of set yogurt. *International Journal of Biological Macromolecules*, 203, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.027>
- Karunarathna, S., & Wickramasinghe, I. (2020). Health benefits and functional properties of resistant starch: A review. *Journal of Food Science and Nutrition Research*, 3(2), 143–156. <https://doi.org/10.26502/jfsnr.2642-11000045>.
- Kett, A. P., Chaurin V., Fitzsimons S. M., Morris E. R., O'Mahony J. A., Fenelon M. A. (2013). Influence of milk proteins on the pasting behaviour and microstructural characteristics of waxy maize starch. *Food Hydrocolloids*, 30(2), 661–671. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.08.002>
- Lal, S. N. D., O'Connor, C. J., & Eyres, L. (2006). Application of emulsifiers/stabilizers in dairy products of high rheology. *Advances in Colloid and Interface Science*, 123–126, 433–437. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.05.009>
- Li, L., Yuan, T. Z., Setia, R., Raja, R. B., Zhang, B., & Ai, Y. (2019). Characteristics of pea, lentil and faba bean starches isolated from air-classified flours in comparison with commercial starches. *Food Chemistry*, 276, 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.064>
- 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. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 5(3) <http://dx.doi.org/10.12944/CRNFSJ.5.3.21>
- Nguyen, P. T. M., Kravchuk, O., Bhandari, B., & Prakash, S. (2017). Effect of different hydrocolloids on texture, rheology, tribology and sensory perception of texture and mouthfeel of low-fat pot-set yoghurt. *Food Hydrocolloids*, 72, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.05.035>
- Nikitina, E., Riyanto, R. A., Vafina, A., Yurtaeva, T., Tsyganov, M., & Ezhkova, G. (2019). Effect of fermented modified potato starches on low-fat yogurt. *Journal of Food and Nutrition Research*, 7(7), 549–555. <https://doi.org/10.12691/jfnr-7-7-10>
- Ogneva, O. A., & Zabashta, N. N. (2020). Standardization and Examination of Milk and Dairy Products: Methodological Recommendations. KubGAU (Kuban State Agrarian University). (In Russ.)
- Rashid, R. S. A., Mohamed, A. M. D., Yenn, T. W., Nair, S., & Muhammad, S. K. S. (2024). Physicochemical properties & sensory evaluation of sago resistant starch Yogurt drink. In *AIP Conference Proceedings* (292(1), 030002). AIP Publishing LLC.
- Rezaei, R., Khomeiri, M., Kashaninejad, M., Mazaheri-Tehrani, M., & Aalami, M. (2015). Effect of resistant starch and ageing conditions on the physicochemical properties of frozen soy yoghurt. *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 8164–8171.
- 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.
- Tamime A. Y., Robinson R. K. (2007). *Yoghurt: Science and Technology*. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Elsevier: 35–41.
- Weerathilake, W. A. D. V., Rasika, D. M. D., Ruwanmali, J. K. U., & Munasinghe, M. A. D. D. (2014). The evolution, processing, varieties and health benefits of yoghurt. *International Journal of Scientific and Research Publications*, (4), 1–10.
- Xu, J., Ma, Z., Li, X., Liu, L., & Hu, X. (2020). A more pronounced effect of type III resistant starch vs. type II resistant starch on ameliorating hyperlipidemia in high fat diet-fed mice is associated with its supramolecular structural characteristics. *Food & Function*, 11(3), 1982–1995.
- Zhang, Z., & Bao, J. (2023) Recent advances in modification approaches, health benefits, and food applications of resistant starch. *Starch Stärke*, 2023 Sep;75(9–10):2100141. <https://doi.org/10.1002/star.202100141>