

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2623>
<https://elibrary.ru/QQWOUUG>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Электронно-микроскопические и реологические исследования структуры концентрированного молочного продукта с сахаром и сахарозаменителем



С. А. Куренков^{1,*}, Л. А. Куренкова¹,
И. Т. Смыков², А. И. Гнездилова¹

¹ Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина^{ROR}, Вологда, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия^{ROR}, Углич, Россия

Поступила в редакцию: 22.10.2025

Принята после рецензирования: 19.12.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

*e-mail: kurenkovser.35@yandex.ru

© С. А. Куренков, Л. А. Куренкова, И. Т. Смыков,
А. И. Гнездилова, 2026



Аннотация.

При проектировании новых видов молочных консервов, основное внимание исследователей направлено на эмпирическую разработку рецептов без глубокого анализа механизмов межмолекулярного взаимодействия сахарозаменителя с мицеллами казеина. Как следствие, отсутствует глубокое понимание процессов структурирования. В работе исследовалась структура концентрированного молочного продукта с сахаром и низкокалорийным сахарозаменителем – аллюлозой. Электронно-микроскопические и реологические исследования структуры разрабатываемого концентрированного молочного продукта позволили расширить информацию о его структурно-механических свойствах.

Объектами исследования послужили образцы концентрированного молочного продукта с сахаром и аллюлозой (с 40 и 60 % заменой сахарозы на аллюлозу), свежеработанные и после хранения в течение 14 месяцев. Проведены электронно-микроскопические и реологические исследования структуры, а также определены физико-химические и органолептические показатели качества продукта. В работе применялись стандартные методы.

Электронно-микроскопические исследования морфометрических признаков структур, образуемых мицеллами казеина в продукте, показали, что замена 40 % сахарозы на аллюлозу не оказывала заметного влияния на морфометрические признаки структур. Замена 60 % сахарозы на аллюлозу приводила к деструкции мицелл казеина, образованию вокруг них сахаридной капсулы и формированию плотных агрегатов, что сказывалось на органолептических и физико-химических показателях качества. Наблюдалась излишняя текучесть продукта, обусловленная снижением вязкости на 27 %.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что в разработанном концентрированном молочном продукте доля замены сахарозы на аллюлозу не должна превышать 40 %.

Ключевые слова. Молочный продукт, аллюлоза, сахароза, казеин, качество, хранение

Финансирование. Работа выполнена на базе ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина», в т. ч. на базовой кафедре, находящейся во Всероссийском научно-исследовательском институте маслоделия и сыроделия – филиале ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова».

Для цитирования: Куренков С. А., Куренкова Л. А., Смыков И. Т., Гнездилова А. И. Электронно-микроскопические и реологические исследования структуры концентрированного молочного продукта с сахаром и сахарозаменителем. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1. С. 72–85. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2623>

Sugar vs. Sugar Substitutes in Condensed Dairy Products: Electron Microscopy and Rheology

Sergey S. Kurenkov^{1,*}, Lyudmila A. Kurenkova¹,
Igor T. Smykov², Anna I. Gnezdilova¹

¹ Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin^{ROR}, Vologda, Russia

² All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheese Making^{ROR}, Uglich, Russia

Received: 22.10.2025

Revised: 19.12.2025

Accepted: 13.01.2026

*e-mail: kurenkovser.35@yandex.ru

© S.S. Kurenkov, L.A. Kurenkova, I.T. Smykov, A.I. Gnezdilova, 2026



Abstract.

Publications on functional condensed dairy foods focus on the formulation without considering the intermolecular interaction between a particular sweetener and casein micelles. Consequently, the structuring processes remain largely understudied. Electron microscopy and rheological studies may provide important data about the structure and mechanics of this interaction. This article introduces a comparative structural analysis of a condensed dairy product with sugar and its low-calorie substitute allulose.

The research included fresh and 14-month-old original product with sugar and its experimental samples where sucrose was substituted with 40 and 60% allulose. The structural analysis involved the methods of electron microscopy and rheology. The physicochemical parameters and sensory profile were studied using standard methods.

The electron-microscopic studies of the structures formed by casein micelles showed that 40% allulose had no effect on their morphometry. However, replacing 60% sucrose with allulose destroyed casein micelles, encapsulating them with saccharide and forming dense aggregates, which spoiled the sensory and physicochemical quality of the final product. The excessive fluidity of the product was due to a 27% decrease in viscosity. In this study, replacing more than 40% of conventional sweetener with allulose damaged the quality of the functional condensed dairy product.

Keywords. Dairy products, allulose, sucrose, casein, quality, storage

Funding. The research was conducted on the premises of the Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin and its department located at the All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheese Making – Branch of V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS.

For citation: Kurenkov SS, Kurenkova LA, Smykov IT, Gnezdilova AI. Sugar vs. Sugar Substitutes in Condensed Dairy Products: Electron Microscopy and Rheology. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):72–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2623>

Введение

В условиях глобальной эпидемии ожирения и сахарного диабета проблема сокращения потребления добавленных сахаров приобретает первостепенное значение. Несмотря на это, продукты с высоким содержанием сахарозы, например сгущенное молоко с сахаром (содержание сахарозы – 43,5 %), остаются популярными у потребителя в силу сложившихся вкусовых предпочтений. Данное противоречие обуславливает необходимость поиска научно обоснованных подходов к снижению калорийности традиционных продуктов питания, в частности за счет применения сахарозаменителей, способных имитировать сенсорные и технологические свойства сахарозы.

С целью снижения калорийности традиционного сгущенного молока с сахаром предложено заменить в его составе часть сахарозы на аллюлозу (патент РФ № 2807725 С1).

Аллюлоза (D-психоза) – редкий моносахарид (изомер фруктозы), который обладает сладким вкусом (~ 70 % сладости сахарозы), но почти не содержит калорий (~ 0,2–0,4 ккал/г) и не повышает уровень глюкозы в крови (гликемический индекс ≈ 1). Аллюлоза является эффективной низкокалорийной заменой сахара и поэтому пригодна для получения продуктов с пониженной энергетической ценностью. Аллюлоза не влияет на уровень инсулина, что обеспечивает безопасность питания для диабетиков. Ее высокие антиоксидантные и антигликационные свойства способствуют замедлению образования некоторых опасных соединений (например акриламида) [1–7].

Аллюлоза обладает высокими технологическими свойствами: стабилизирует текстуру и влагоудерживающую способность продуктов, участвует в реакциях Майяра (придает золотистую корочку выпечке), снижает точку замерзания и взаимодействует с казеином,

предотвращая избыточную агрегацию белков. Исследования по термостабильности и технологическим свойствам показали, что аллюлоза не разлагается при пастеризации (72–85 °С) и стерилизации (121 °С). В то же время использование аллюлозы имеет свои ограничения и проблемы: широкое применение в пищевой промышленности сдерживается сложностью и высокой себестоимостью производственного процесса. Основным методом получения аллюлозы – ферментативная биоконверсия субстратов, богатых фруктозой, прежде всего фруктозы и инулина [8–13].

Ключевым технологическим вызовом является низкий выход целевого продукта. Процесс эпимеризации D-фруктозы в D-психозу катализируется ферментом D-тагатозо-3-эпимеразой (D-TE), который отличается невысокой стабильностью и специфичностью [12–14]. Выход аллюлозы в большинстве промышленных процессов не превышает 30–35 % от массы исходного субстрата, что напрямую влияет на ее высокую рыночную стоимость. Дополнительные расходы связаны с этапами очистки и выделения аллюлозы из реакционной смеси. Эти этапы требуют использования дорогостоящих методов хроматографии для отделения целевого продукта от непрореагировавшей фруктозы и других моносахаридов [14–18].

Географически промышленный синтез аллюлозы в настоящее время сосредоточен в нескольких странах, обладающих развитыми биотехнологиями: Республика Корея, Япония, США и Китай. Китай активно развивает собственные биотехнологические производства. Ряд китайских компаний освоили промышленный выпуск аллюлозы, что способствует постепенному снижению ее стоимости.

Таким образом, хотя технологические барьеры делают процесс получения аллюлозы сложным и затратным, ее производство уже вышло за рамки лабораторных исследований и реализовано в промышленных масштабах в ряде технологически развитых стран. Это позволяет говорить о формировании глобальной рыночной цепочки. Кроме того, аллюлоза уже нашла применение в пищевой промышленности [19–23].

С учетом способа внесения сахарозы в виде сиропа в традиционную технологию производства сгущенного молока с сахаром исследованы свойства водных растворов аллюлозы [24, 25].

Предварительно установлено, что аллюлозу целесообразно применять в качестве альтернативы сахарозе в технологии консервированных молочных продуктов с сахаром. В ходе анализа уровня техники не было обнаружено данных об исследовании аллюлозы в этом направлении, что подтверждает актуальность работы. Возможность использования нового вещества в рецептуре продукта оценивается по совокупности органолептических, физико-химических и микробиологических показателей. Однако для сгущенных молочных продуктов с сахаром особую роль играет рассмотрение структурных свойств как с точки зрения реологии,

так и с точки зрения формирования микроструктуры. Анализ доступных информационных источников показывает, что основное внимание исследователей и производителей направлено на эмпирическую разработку рецептур продуктов без учета характера взаимодействия новых компонентов с мицеллами казеина. Как следствие, отсутствует глубокое понимание процессов структурирования в таких продуктах и структурных изменений в процессе длительного хранения. Совокупное проведение электронно-микроскопического и реологического анализа, положенное в основу моделирования технологических процессов, позволит целенаправленно регулировать структурно-механические характеристики конечного продукта, обеспечивая его стабильно высокое качество.

Цель исследования – комплексно изучить механизмы взаимодействия мицеллярных структур казеина с сахарозой и аллюлозой в концентрированном молочном продукте (КМП) и оценить влияние замены сахарозы на аллюлозу на стабильность продукта в процессе длительного хранения.

Задачами работы являлись:

- проведение сравнительного электронно-микроскопического анализа для установления влияния типа подсластителя (сахароза / аллюлоза) и его концентрации на морфогенез казеиновых структур;
- выявление возможных расхождений между формой и размерами структурных элементов в образцах с различными концентрациями аллюлозы;
- установление возможных различий между формой и размерами структурных элементов в образцах концентрированного молочного продукта с сахаром и аллюлозой в процессе длительного хранения продукта;
- исследование реологического поведения и определение реологических параметров (вязкости, предельного динамического напряжения сдвига) разрабатываемых образцов концентрированных молочных продуктов;
- исследование комплекса физико-химических и органолептических характеристик КМП с сахарозаменителем сахароза+аллюлоза с целью установления корреляционных связей между параметрами качества и сенсорным восприятием готового продукта.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования послужили образцы концентрированного молочного продукта, рецептура которых предусматривала различное соотношение сахарозы и ее заменителя – аллюлозы. При выборе доли замены сахарозы на аллюлозу в рамках предварительных исследований рассмотрен диапазон от 0 до 100 %: 30, 40, 50, 60 и 100 %. Основными критериями при выборе доли замены были максимальная близость органолептических, физико-химических и микробиологических показателей полученных образцов к традиционному продукту, выработанному в соответствии ГОСТ, и максимальное сокращение его калорийности.

На основании полученных результатов органолептической оценки установлено, что наибольшая степень сенсорной близости к контрольному образцу характерна для образцов с долей замещения сахарозы аллюлозой 30 и 40 %. При этом образец с 30 % замещением не показал значимых отличий от контроля. В образце с содержанием аллюлозы 50 % выявлен слабо выраженный атипичный привкус, а также наблюдался кремовый оттенок. Несмотря на выявленные отклонения, сенсоральное восприятие данного образца не было охарактеризовано как негативное. Указанный образец обладал приемлемыми органолептическими свойствами, однако его сенсорный профиль не позволял провести прямую идентификацию с традиционным сгущенным молоком с сахаром.

Последующее увеличение концентрации аллюлозы приводило к появлению слабого горьковатого привкуса (при 60 % замещении), интенсивность которого коррелировала с ростом доли аллюлозы, достигая отчетливого горького вкуса при полной (100 %) замене сахарозы.

Образцы характеризовались однородной окраской по всей массе. Однако, начиная с уровня замещения 50 %, наблюдалась прогрессирующая динамика изменения цвета от кремового (50 %) до светло-коричневого (100 %), что, вероятно, связано с реакцией меланоидинообразования. Таким образом, с учетом результатов предварительной оценки органолептических свойств образцов для дальнейших исследований выбраны образцы, содержащие 40 и 60 % аллюлозы. Образец с заменой 40 % сахарозы на аллюлозу выбран как наиболее соответствующий предварительной цели исследования, а образец с заменой 60 % использован для изучения механизма изменений, происходящих при увеличении доли замены сахарозы на аллюлозу.

Состав и идентификация опытных образцов представлены в таблице 1.

Для приготовления опытных образцов использовано сырье, соответствующее требованиям действующих стандартов: сухое обезжиренное молоко (ГОСТ Р 52791-2007), питьевая вода высшей категории (ГОСТ Р 51232-98), молочный жир (ГОСТ 33632-2015), сахар-песок (ГОСТ 33222-2015) и аллюлоза (по документации производителя).

Методика приготовления опытных образцов включала несколько последовательных технологических стадий. На первом этапе проводили восстановление сухого обезжиренного молока в питьевой воде, нагретой до 40–50 °С, с последующей фильтрацией для удаления возможных нерастворимых включений. Далее в восстановленную молочную основу вносили расчетные количества сахарозы и аллюлозы согласно рецептурам (табл. 1) и перемешивали до достижения гомогенной структуры и полной гидратации компонентов. После этого подготовленную смесь подвергали мгновенной пастеризации в режиме 93–97 °С без выдержки.

На заключительном этапе пастеризованный продукт охлаждали до температуры массовой кристаллизации (31–37 °С) молочного сахара, после чего вносили затравку в количестве 0,02 % от массы смеси, в качестве которой использовали мелкокристаллическую β -лактозу. Процесс кристаллизации завершали постепенным охлаждением продукта до финальной температуры 20 °С.

Сравнительному анализу подвергли шесть образцов, разделенных на две группы: три свежеприготовленных и три после 14-месячного хранения. Проведен комплекс исследований – электронно-микроскопических, физико-химических, реологических, а также органолептических. Условные обозначения образцов в зависимости от доли замены сахарозы на аллюлозу показаны в таблице 2.

Характеристика физико-химических свойств разработанного продукта выполнена с применением комплекса стандартизированных и инструментальных методик.

Массовую долю сухих веществ определяли рефрактометрическим методом на рефрактометре RL-3

Таблица 1. Компонентный состав концентрированного молочного продукта при различной степени замещения сахарозы аллюлозой, кг/100 кг

Table 1. Composition of condensed dairy samples with different shares of allulose, kg/100 kg

Компонент	Доля замены сахарозы на аллюлозу, %		
	0	40	60
Сухое обезжиренное молоко	230,0	230,0	230,0
Жир молочный	86,7	86,7	86,7
Сахар	435,0	261,0	174,0
Вода	248,1	248,1	248,1
Аллюлоза	–	174,0	261,0
Лактоза	0,2	0,2	0,2
ИТОГО	1000,0	1000,0	1000,0

Таблица 2. Условные обозначения образцов концентрированного молочного продукта

Table 2. Conventional designations for different samples of condensed dairy product

Доля замены сахарозы на сахарозаменитель (аллюлозу), %	Свежеработанные, обозначение	После хранения 14 месяцев, обозначение
	0 (контроль)	К_0
40	40_0	40_1
60	60_0	60_1

(PZO, Польша) согласно ГОСТ 31774-2012. Средний линейный размер кристаллов измеряли с помощью микроскопа OLYMPUS CX31 при увеличении в 500 раз в комплекте с цифровой камерой TourCam U3CMO S18000KPA и программным обеспечением TourView (Olympus, Япония). Оценку гранулометрического состава осуществляли из выборки 100 кристаллов (ГОСТ 29245-91). Вязкость устанавливали с использованием вискозиметра Гепплера с падающим шариком (ГОСТ 27709-2015). Активную кислотность определяли потенциометрическим методом (ГОСТ 32892-2014), активность воды – на анализаторе HygroPalm (HP23-Aw, Rotronic, Япония). Оценка органолептических показателей осуществлялась по ГОСТ 28283-2015. Микробиологическую безопасность определяли согласно ГОСТ 10444.12-2013 и ГОСТ 32901-2014.

Опыты проводили в трехкратной повторности. Математическую обработку результатов осуществляли с помощью пакета прикладных программ Microsoft Office 2021.

Исследование ультратонкой структуры образцов выполняли на электронном микроскопе EM-410 (Philips, Нидерланды). Ключевым этапом пробоподготовки была процедура контрастирования солями тяжелых металлов, которая обеспечивала селективное осаждение электронно-плотного материала на поверхностях биополимеров.

Пробоподготовка образцов для электронно-микроскопического анализа проводилась в соответствии со стандартизированным протоколом. На первом этапе исходный образец концентрированного молочного продукта (независимо от наличия или отсутствия в его рецептуре аллюлозы) подвергали разведению в дистиллированной воде в массовом соотношении 1:100 с целью получения стабильной коллоидной системы, обеспечивающей последующее получение репрезентативных электронных микрофотографий без артефактов агрегации.

Полученную суспензию наносили капельным методом на медные сетки Mesh-400, предварительно покрытые специальной пленкой. Для стабилизации ультратонкой структуры проводили химическую фиксацию глутаровым альдегидом в течение 30 мин. Далее выполняли контрастирование 2 % водным раствором уранил-ацетата с последующей отмывкой дистиллятом для удаления избытка реактива. После полного высушивания при комнатной температуре подготовленные препараты размещали в держателе микроскопа.

Электронно-микроскопическое исследование проводили в стандартном режиме работы прибора: ускоряющее напряжение 80 кВ, ток электронного пучка 12 мкА. Визуализацию осуществляли при стандартном увеличении $\times 14000$ и $\times 46000$, что обеспечивало необходимое разрешение для идентификации структурных элементов мицеллярного комплекса.

Определение реологических характеристик опытных образцов проводили на ротационном вискози-

метре Реотест 2 (Rheotest Medingen GmbH, Германия). Использовали принцип работы прибора, основанный на регистрации крутящего момента при заданной постоянной скорости вращения рабочего органа. Измерения осуществляли при строго контролируемой температуре $20,0 \pm 0,5$ °С, поддерживаемой системой термостатирования с жидкостным контуром. Применяли цилиндрическую измерительную систему S-S2, обеспечивающую ламинарный режим сдвига в исследуемом материале. Для получения полной реологической характеристики задавали ступенчатый режим изменения скорости сдвига в диапазоне $0,1-100,0$ с⁻¹. Установившееся значение напряжения сдвига регистрировали при каждой скорости.

Методика измерений основывалась на регистрации напряжения сдвига, возникающего в исследуемом материале при деформации. Для проведения эксперимента отбирали навеску продукта массой 30,0 г и помещали в стандартный измерительный цилиндр. При установке цилиндра на ротор обеспечивали точную соосность геометрии измерительной системы и равномерное распределение образца в рабочем зазоре для исключения краевых эффектов.

Экспериментальные исследования проводили при десяти последовательно возрастающих градациях крутящего момента. Показания снимали с логометрического индикатора после установления стабильного значения сигнала на каждой ступени нагружения. Между измерениями выдерживали временной интервал 60 с для релаксации механических напряжений в образце.

Для получения воспроизводимых результатов каждое измерение проводили в трехкратной повторности. Полученные данные фиксировали в протоколе исследования с указанием температуры и влажности окружающей среды. Рассчитывали средние арифметические значения и стандартное отклонение для каждой точки измерения.

Напряжение сдвига определяли по формуле (1):

$$\tau = z \times \alpha \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига, Па; z – константа ротора, 10^{-1} /деление шкалы; α – отсчитываемое значение шкалы на индикаторном приборе (логометре), деление шкалы.

Эффективную вязкость, мПа·с, определяли по формуле (2):

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \times 100 \quad (2)$$

где γ – скорость сдвига, с⁻¹.

Определение реологических свойств концентрированных молочных продуктов с комбинированным подсластителем (сахароза+аллюлоза) проводили с использованием специализированной дифференциальной измерительно-информационной системы (ИИС). Конструктивное исполнение установки предусматривает

возможность параллельных исследований в двух ячейках с синхронным контролем комплекса параметров.

Рабочую ячейку и ячейку сравнения оснащали высокоточными сенсорами для мониторинга температуры и модуля упругости в реальном времени. Интегрированные в систему датчики реологических характеристик предварительно калибровали на реогониометре Вайссенберга, обеспечивая метрологическую прослеживаемость измерений динамической вязкости.

В качестве стандартного вещества для калибровочных процедур и дифференциальных исследований использовали глицерин марки «ЧДА», соответствующий требованиям ГОСТ 6259-75. Перед началом измерений проводили валидацию методики с использованием стандартных образцов контрольных сред. Установку подготавливали к работе согласно регламенту, включающему прогрев системы, проверку нулевых показаний и тестовые измерения на эталонных жидкостях.

Для каждого опытного образца выполняли серию из 5–7 последовательных измерений с варьированием скорости деформации в диапазоне 0,1–100,0 с⁻¹. Полученные данные статистически обрабатывали с определением средних значений и доверительных интервалов при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Результаты и их обсуждение

В рамках экспериментальной программы проведен сравнительный электронно-микроскопический анализ трансформации микроstructures концентрированных молочных систем с комбинированным подсластителем. Исследование включало комплексную оценку морфометрических параметров мицеллярных образований казеина, пространственной организации белково-углеводного комплекса и выявление специфических структурных паттернов, формирующихся при введении аллюлозы в рецептурную композицию.

Особое внимание уделено динамике структурных перестроек в процессе длительного хранения про-

дукта и идентификации признаков синергетического взаимодействия молочных компонентов с сахарозо-аллюлозной смесью.

На рисунке 1 представлены результаты электронно-микроскопического исследования ультраструктуры концентрированного молочного продукта (КМП) с сахарозой, выполненные при стандартном увеличении $\times 14000$. Выбор данного диапазона увеличения обусловлен возможностью одновременной визуализации как макромолекулярной организации белково-углеводного комплекса, так и тонких структурных взаимодействий на межмолекулярном уровне.

На микрофотографиях (рис. 1а, 2а) демонстрируется нативная структура свежеприготовленных образцов, характеризующаяся равномерным распределением казеиновых мицелл в межкристаллическом пространстве. На рисунках 1б, 2б представлены результаты мониторинга трансформации микроstructures после 14 месяцев хранения, отражающие динамику реорганизации белково-углеводного комплекса.

На рисунке 2 показаны электронные микрофотографии ультратонких срезов образцов контрольного КМП с сахарозой, полученные при стандартном увеличении $\times 46000$. Данный уровень разрешения позволяет визуализировать морфологию и пространственную организацию казеиновых мицелл, составляющих основу белковой матрицы продукта.

В свежеработанном образце концентрированного молочного продукта наблюдалось большое количество зародышей кристаллизации (нуклеусов) лактозы. Однако после длительного хранения экспериментального продукта нуклеусы практически не наблюдались, что противоречит общепринятым представлениям о динамике кристаллизации в молочных консервах. Состояние мицелл казеина в исследуемых образцах претерпело определенные изменения. Если в свежеработанном образце мицеллы преимущественно дистанцированы, то после хранения мицеллы образуют достаточно плотные агрегаты.

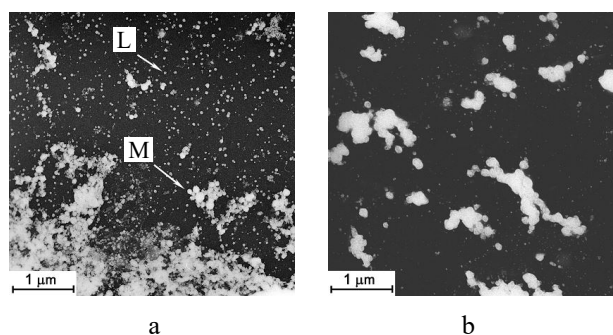


Рисунок 1. Мицеллы казеина (М) и нуклеусы лактозы (L) в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – K_0; б – K_1 (при увеличении $\times 14000$)

Figure 1. Casein micelles (M) and lactose nuclei (L) in condensed dairy samples with sugar: а – K_0; б – K_1, low magnification

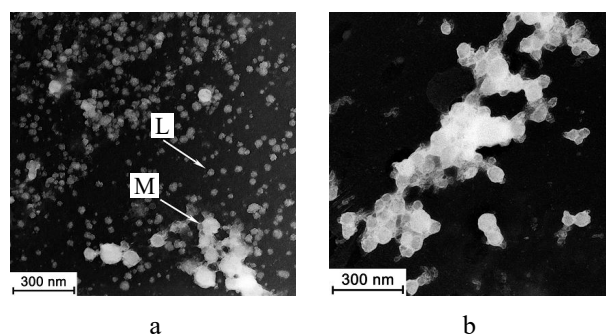


Рисунок 2. Мицеллы казеина (М) и нуклеусы лактозы (L) в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – K_0; б – K_1 (при увеличении $\times 46000$)

Figure 2. Casein micelles (M) and lactose nuclei (L) in condensed dairy samples with sugar: а – K_0; б – K_1, high magnification

На фотографии зародышей кристаллизации лактозы, полученной при большом увеличении (рис. 3), видно, что зародыш состоит из еще более мелких нуклеусов.

На рисунках 4 и 5 приведены фотографии образцов концентрированного молочного продукта с сахаром с 40 % заменой сахарозы на аллюлозу до и после длительного хранения, полученные при различных увеличениях. При сравнении полученных изображений с фотографиями образцов без аллюлозы изменения

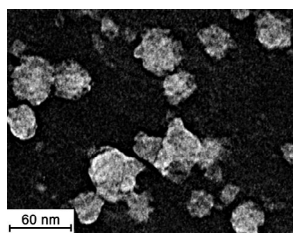


Рисунок 3. Нуклеусы лактозы в образце K_0 (при увеличении $\times 46000$)

Figure 3. Lactose nuclei in sample K_0, high magnification

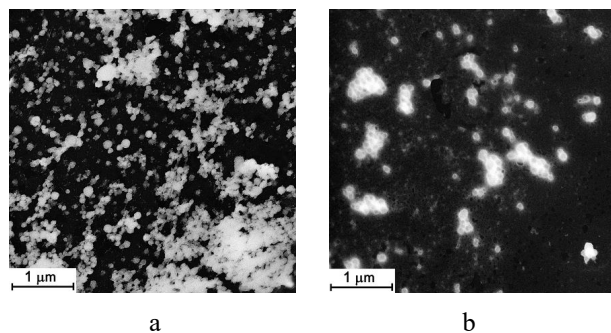


Рисунок 4. Мицеллы казеина в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – 40_0; б – 40_1 (при увеличении $\times 14000$)

Figure 4. Casein micelles in condensed dairy samples with sugar: a – 40_0; b – 40_1, low magnification

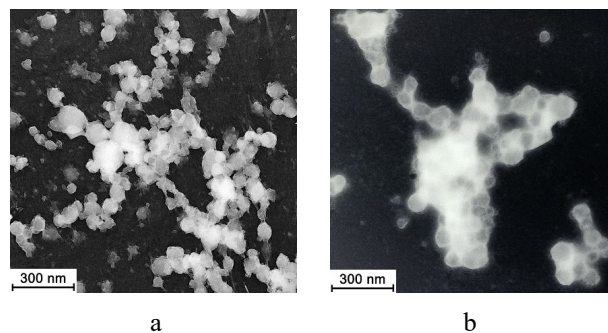


Рисунок 5. Мицеллы казеина в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – 40_0; б – 40_1 (при увеличении $\times 46000$)

Figure 5. Casein micelles in condensed dairy samples with sugar: a – 40_0; b – 40_1, high magnification

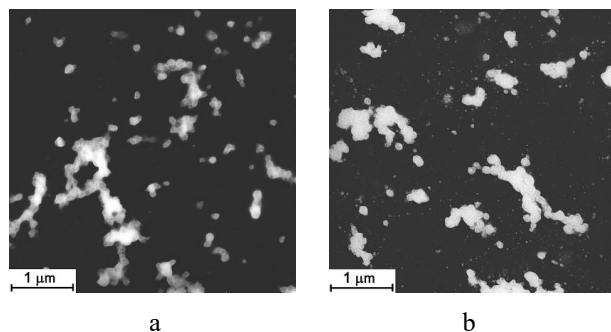


Рисунок 6. Мицеллы казеина в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – 60_0; б – 60_1 (при увеличении $\times 14000$)

Figure 6. Casein micelles in condensed dairy samples with sugar: a – 60_0; b – 60_1, low magnification

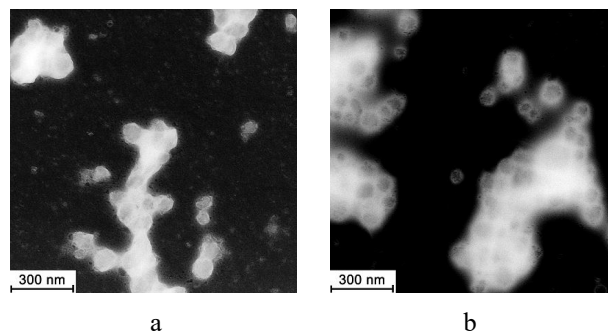


Рисунок 7. Мицеллы казеина в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – 60_0; б – 60_1 (при увеличении $\times 46000$)

Figure 7. Casein micelles in condensed dairy samples with sugar: a – 60_0; b – 60_1, high magnification

в микроструктуре как свежеработанного образца, так и длительно хранившегося незначительны. В этом случае также наблюдается исчезновение нуклеусов лактозы после хранения и образование агрегатов мицелл.

На рисунках 6 и 7 представлены микрофотографии образцов КМП с 60 % заменой сахарозы на аллюлозу, демонстрирующие структурные трансформации до и после продолжительного хранения при различных увеличениях. Проведенный анализ выявил существенные структурные отклонения в сравнении с контрольными образцами без аллюлозы и вариантами с 40 % заменой сахарозы на аллюлозу.

В свежеприготовленном образце наблюдалось значительное сокращение количества центров кристаллизации лактозы, а также выраженная склонность казеиновых мицелл к образованию мелкодисперсных агрегатов. В процессе длительного хранения данные процессы усиливались: происходило укрупнение и уплотнение мицеллярных агрегатов с формированием вокруг них выраженной сахаридной капсулы.

Таким образом, введение повышенных доз аллюлозы (60 % замена) индуцирует дестабилизацию казеи-

новых мицелл, что проявляется в виде глубоких структурных изменений при длительном хранении. Наблюдаемая трансформация структуры объясняет ухудшение реологических и органолептических характеристик готового продукта при превышении оптимального уровня замены сахарозы.

На рисунке 8 приведены изображения мицелл казеина в свежеработанном образце и образце после длительного хранения. В свежеработанном образце мицелла имела хорошо выраженную форму, близкую к сферической, тогда как после хранения вокруг мицеллы образовывалась сахаридная капсула, сама мицелла разрушалась, теряла свои нативные свойства и, по-видимому, взаимодействовала с капсулой.

Результаты электронно-микроскопических исследований подтверждаются комплексом физико-химических и органолептических характеристик качества концентрированного молочного продукта с комбинированным сахарозаменителем (сахароза + аллюлоза) (табл. 3).

Установлена корреляционная зависимость между степенью структурных преобразований, выявленных

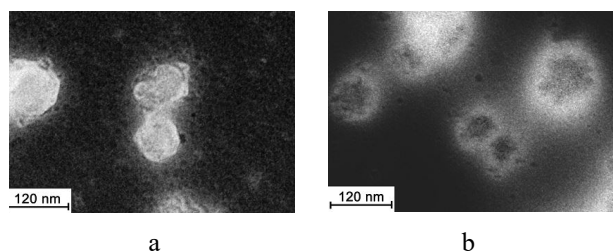


Рисунок 8. Мицеллы казеина в концентрированном молочном продукте с сахаром: а – 60_0; б – 60_1 (при увеличении $\times 46000$)

Figure 8. Casein micelles in condensed dairy samples with sugar: a – 60_0; b – 60_1, high magnification

при микроскопировании, и изменением ключевых показателей качества. В частности, образцы с выраженной деструкцией белка и образованием плотных агрегатов демонстрировали статистически значимое отклонение по вязкости, активной кислотности и сенсорным характеристикам.

Проведенный корреляционный анализ показал, что структурные изменения, индуцированные введением аллюлозы, определяли сохранность потребительских свойств продукта в процессе хранения. Нарушение пространственной организации мицеллярного комплекса казеина при превышении 40 % порога замены сахарозы напрямую коррелировало с ухудшением таких органолептических параметров, как консистенция, однородность и вкусовой профиль.

В течение всего срока хранения физико-химические параметры концентрированных молочных систем с комбинированным подсластителем сохраняли соответствие установленным нормативным требованиям. Проведенный мониторинг основных показателей подтвердил стабильность продукта в рамках, регламентированных ГОСТ 31688-2012.

В процессе хранения образцов концентрированного молочного продукта массовая доля сухих веществ не изменялась. Нарастание вязкости как контрольного, так и рабочих образцов происходило практически с одинаковой интенсивностью.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что свежеработанные образцы с частичной заменой сахарозы на аллюлозу имели практически одинаковую вязкость по сравнению с контролем. Тем не менее по завершении 14-месячного периода хранения в рабочих образцах наблюдалось снижение вязкости. Наиболее выраженное уменьшение вязкости наблюдалось в образце с 60 % заменой сахарозы на аллюлозу – его показатели заметно уступали контрольному образцу, не содержащему аллюлозу.

Таблица 3. Физико-химические показатели образцов концентрированного молочного продукта 8,5 % жирности с частичной заменой сахарозы на аллюлозу в процессе хранения

Table 3. Condensed dairy product (8.5% fat) with partial replacement of sucrose with allulose: Physicochemical properties during storage

Показатель	Доля замены сахарозы на аллюлозу, %		
	0 (контроль)	40	60
Свежеработанные			
Массовая доля сухих веществ, %	74,0 ± 0,1	74,0 ± 0,1	74,0 ± 0,1
Средний линейный размер кристаллов лактозы, мкм	2,65 ± 0,05	2,58 ± 0,05	2,48 ± 0,05
pH	6,31 ± 0,05	6,42 ± 0,05	6,35 ± 0,05
Вязкость, Па·с	3,04 ± 0,02	3,03 ± 0,02	3,01 ± 0,02
Активность воды, a_w	0,813 ± 0,005	0,765 ± 0,005	0,749 ± 0,005
После 14 месяцев хранения			
Массовая доля сухих веществ, %	74,0 ± 0,1	74,0 ± 0,1	74,0 ± 0,1
Средний линейный размер кристаллов лактозы, мкм	5,06 ± 0,08	4,64 ± 0,08	4,34 ± 0,08
pH	6,62 ± 0,05	6,44 ± 0,05	6,41 ± 0,05
Вязкость, Па·с	5,37 ± 0,03	4,39 ± 0,03	4,06 ± 0,03
Активность воды, a_w	0,849 ± 0,005	0,798 ± 0,005	0,790 ± 0,005

Данные электронно-микроскопических исследований подтвердили существенные трансформации микроструктуры образца с 60 % заменой. При сравнении с двумя контрольными группами – образцами без аллюлозы и образцами с 40 % заменой сахарозы – выявлены отчетливые морфологические различия. Эти структурные изменения, скорее всего, обуславливают снижение вязкости в долгосрочном периоде хранения.

Визуальные подтверждения структурных преобразований представлены на микрофотографиях (рис. 6 и 7), где наглядно прослеживаются:

- изменение характера распределения компонентов в матрице продукта;
- отличия в размере и форме структурных элементов;
- особенности межфазных границ в образцах с различной степенью замены сахарозы.

В свежеработанных образцах показатель вязкости практически не отличался от контроля. Кроме того, следует отметить положительное влияние аллюлозы на активность воды в продукте, а также на замедление скорости роста кристаллов лактозы при хранении и отсутствие влияния на pH среды. Полученные данные подтверждаются результатами сенсорной оценки (табл. 4).

Наличие горьковатого привкуса в образце с заменой сахарозы на аллюлозу является ограничивающим фактором для последующего увеличения массовой доли аллюлозы в составе продукта.

Одним из критических факторов, лимитирующих сохранение качества концентрированных молочных продуктов в процессе хранения, выступает развитие резистентной микрофлоры. Несмотря на то что создание высокого осмотического давления в данной продукции обеспечивает ингибирование жизнедеятельности большинства микроорганизмов, отдельные их представители проявляют толерантность к таким условиям. Среди них особую значимость представляют осмоотолерантные дрожжи и ксерофильные плесневые грибы, способные развиваться в средах с пониженной водной активностью.

Особую группу риска составляют протеолитические микроорганизмы, метаболическая активность которых инициирует процессы гидролитического расщепления липидов с последующим образованием низкомолекулярных жирных кислот. Данные биохимические трансформации обуславливают развитие органолептических дефектов, в частности прогоркания продукта, что существенно снижает его потребительские свойства при длительном хранении.

Систематизированы результаты мониторинга ключевых микробиологических параметров, характеризующих санитарно-гигиеническое состояние опытных образцов в процессе хранения (табл. 5). Данные включают динамику в процессе хранения основных групп микроорганизмов, представляющих потенциальную опасность для стабильности молочных консервов.

Полученные результаты позволяют провести комплексную оценку микробиологической стабильности разработанных рецептур в сравнении с нормативными требованиями. Особое внимание уделено выявлению корреляционных зависимостей между степенью замены сахарозы на аллюлозу и динамикой развития специфической микрофлоры, что имеет принципиальное значение для прогнозирования сроков годности модифицированных продуктов.

Проведенные исследования демонстрируют хорошие показатели микробиологической безопасности всех опытных образцов в течение установленного срока хранения, что подтверждает технологическую состоятельность разработанных рецептур и соответствие готовой продукции действующим санитарно-гигиеническим нормативам.

В рамках комплексного анализа потребительских свойств разработанных продуктов выполнен расчет их пищевой и энергетической ценности (табл. 6). Объектами исследования послужили опытные образцы, в которых сахароза частично замещалась аллюлозой – в двух вариантах дозировки: 40 и 60 % от исходного содержания сахара. Для корректной интерпретации результатов параллельно проведен аналогичный расчет для контрольного образца, не содержащего аллюлозу.

Таблица 4. Результаты комплексной органолептической оценки концентрированных молочных продуктов с вариативным содержанием сахарозы и аллюлозы

Table 4. Comprehensive sensory evaluation of condensed dairy samples with variable sucrose and allulose

Показатель	Доля замены сахарозы на аллюлозу, %	
	0 (контроль)	40
Вкус и запах	Сладкий, чистый, с выраженным вкусом пастеризованного молока, без каких-либо посторонних привкусов и запахов	Сладкий, чистый, с выраженным вкусом пастеризованного молока, с горьковатым привкусом
Консистенция	Однородная по всей массе, в меру вязкая, без наличия органолептически ощутимых кристаллов лактозы	Однородная по всей массе, излишне текучая, без наличия органолептически ощутимых кристаллов лактозы
Цвет	Белый с кремовым оттенком, равномерный по всей массе	Белый с кремовым оттенком, равномерный по всей массе

Таблица 5. Результаты микробиологического мониторинга опытных образцов концентрированных молочных продуктов

Table 5. Microbiological tests of experimental samples of condensed dairy samples

Доля замены сахарозы на аллюлозу, %	Количество мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов, КОЕ/см ³ (г), не более	БГКП (колиформы), масса продукта, в которой не допускаются, см ³ (г)	Протеолитические микроорганизмы, КОЕ/см ³ (г)	Дрожжи и плесени, КОЕ/см ³ (г)
Свежевыработанные образцы				
0 (контроль)	2,0×10 ⁴	1,0	–	–
40	2,0×10 ⁴	1,0	–	–
60	2,0×10 ⁴	1,0	–	–
Образцы после 14 месяцев хранения				
0 (контроль)	2,0×10 ⁴	1,0	–	–
40	2,0×10 ⁴	1,0	–	–
60	2,0×10 ⁴	1,0	–	–

Таблица 6. Расчетные показатели пищевой и энергетической ценности концентрированного молочного продукта после частичной замены сахарозы на аллюлозу (варианты 40 и 60 %)

Table 6. Nutritional and energy profiles of condensed dairy samples with 40 and 60% allulose, calculated values

Показатель	Доля замены сахарозы на аллюлозу, %		
	0 (контроль)	40	60
Белки, г	8,9	8,9	8,9
Жиры, г	8,5	8,5	8,5
Углеводы, г, в т. ч.	56,0	56,0	56,0
сахароза, г	56,0	33,6	22,4
аллюлоза, г	0	22,4	33,6
Калорийность, ккал	328,9	261,6	238,8
Энергетическая ценность, кДж	1380,1	1099,0	955,8

Включение аллюлозы в рецептуру концентрированного молочного продукта в качестве заменителя сахарозы приводит к статистически значимому снижению энергетической ценности конечного продукта. Проведенный анализ демонстрирует наличие выраженной дозозависимой корреляции между степенью замещения и уменьшением калорийности: при 40 % замене сахарозы наблюдалось снижение энергетической ценности на 20 %, тогда как при 60 % замещении – на 30 %.

Установленная закономерность обусловлена спецификой метаболизма аллюлозы, которая характеризуется пониженной энергетической ценностью по сравнению с традиционной сахарозой.

Это позволяет рекомендовать аллюлозу в качестве подсластителя для людей, страдающих диабетом, избыточным весом и ожирением. Увеличение доли замены сахарозы на аллюлозу способствует более интенсивному снижению энергетической ценности, однако приведенные выше данные по изменению микроструктуры продукта и его органолептических характеристик накладывают некоторые ограничения, и поэтому рекомендуется доля замены – не превышающая 40 %.

Результаты электронно-микроскопических исследований, а также физико-химические и органолептические показатели качества концентрированного

молочного продукта с сахаром и аллюлозой согласуются с данными по оценке реологических характеристик образцов.

Анализ реологического поведения концентрированных молочных систем требует комплексного изучения фундаментальных характеристик течения, среди которых ключевое значение имеют зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости деформации.

На рисунке 9 представлены реограммы течения свежеприготовленных образцов, отражающие функциональную взаимосвязь между касательным напряжением и скоростью сдвига.

Реологические характеристики свежеприготовленных образцов концентрированного молочного продукта – контрольного, с 40 и 60 % замещением сахарозы аллюлозой – демонстрировали выраженную степенную зависимость между напряжением сдвига и скоростью деформации. Полученные реологические кривые соответствуют классической модели псевдопластичного течения, характерной для структурированных дисперсных систем пищевого назначения.

Подтверждением этому служит характер аналитических зависимостей, приведенных в таблице 7, соответствующих по виду уравнению течения для псевдопластических жидкостей. Для контрольного образца

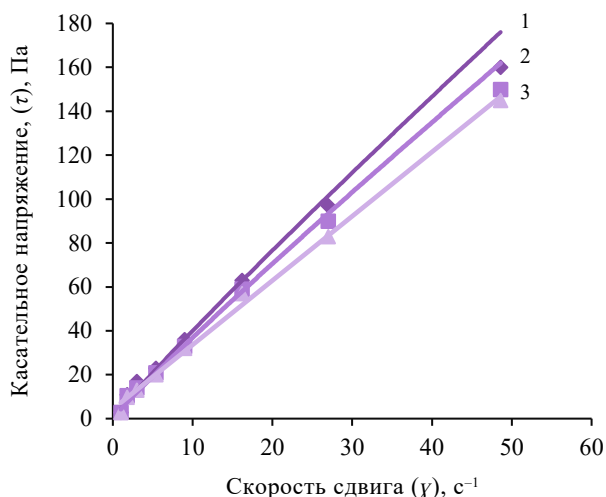


Рисунок 9. Реологические профили свежеработанных концентрированных молочных продуктов с различной долей замены сахарозы на аллюлозу: 1 – 0% (контроль); 2 – 40%; 3 – 60%

Figure 9. Rheological profiles of fresh condensed dairy samples with different allulose shares: 1 – 0% (control); 2 – 40%; and 3 – 60%

Таблица 7. Уравнения зависимости касательного напряжения от скорости сдвига в свежеработанных образцах продукта с различной долей замены сахара на аллюлозу

Table 7. Effect of shear rate on shear stress in fresh condensed dairy samples with different allulose shares: Equations for dependence

Доля замены, %	Уравнение зависимости	Коэффициент детерминации
0 (контроль)	$\tau = 4,6202\gamma^{0,9373}$	$R^2 = 0,9978$
40	$\tau = 4,284\gamma^{0,9352}$	$R^2 = 0,9984$
60	$\tau = 3,9773\gamma^{0,9344}$	$R^2 = 0,9978$

показатель степени приближался к единице, и зависимость носила практически прямолинейный характер.

Через 14 месяцев хранения (рис. 10) все кривые также подчинялись представленной выше закономерности.

Анализ графических зависимостей, представленных на рисунке 10, подтверждает их адекватное математическое описание в рамках степенной реологической модели. Аппроксимация экспериментальных кривых осуществлялась с высокими значениями коэффициента корреляции, находящимися в диапазоне 0,992–0,998, что свидетельствует о статистически достоверном соответствии выбранной математической модели реальным реологическим свойствам исследуемых систем (табл. 8).

Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига представлены на рисунках 11–12.

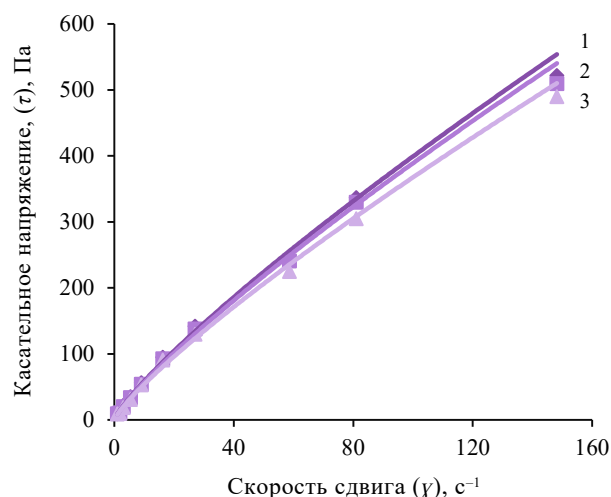


Рисунок 10. Реологические профили концентрированных молочных продуктов с различной долей замены сахарозы на аллюлозу после 14 месяцев хранения: 1 – 0% (контроль); 2 – 40%; 3 – 60%

Figure 10. Rheological profiles of condensed dairy samples with different allulose shares after 14 months of storage: 1 – 0% (control); 2 – 40%; and 3 – 60%

Таблица 8. Уравнения зависимости касательного напряжения от скорости сдвига в образцах консервированного молочного продукта после 14 месяцев хранения

Table 8. Effect of shear rate on shear stress in condensed dairy samples with different allulose shares after 14 months of storage: Equations for dependence

Доля замены, %	Уравнение зависимости	Коэффициент детерминации
0 (контроль)	$\tau = 8,6193 \times \gamma \times 0,8328$	$R^2 = 0,9981$
40	$\tau = 8,2857 \times \gamma \times 0,8358$	$R^2 = 0,9979$
60	$\tau = 7,8905 \times \gamma \times 0,8341$	$R^2 = 0,9987$

Для описания зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига было использовано степенное уравнение (3):

$$\eta_{\text{эф}} = k \times \gamma^m \quad (3)$$

где $\eta_{\text{эф}}$ – эффективная вязкость, Па·с; γ – частота деформирования, с^{-1} ; k – коэффициент консистенции, значение которого соответствует величине динамической вязкости при $\gamma = 1 \text{ с}^{-1}$; m – темп разрушения структуры.

В таблицах 9 и 10 приведены аналитические зависимости. Показатель степени в реологических уравнениях, моделирующих зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига, является ключевым индикатором структурной прочности концентрированных молочных продуктов с сахаром, в т. ч. с сахаром и аллюлозой. Его численное значение количественно отражает

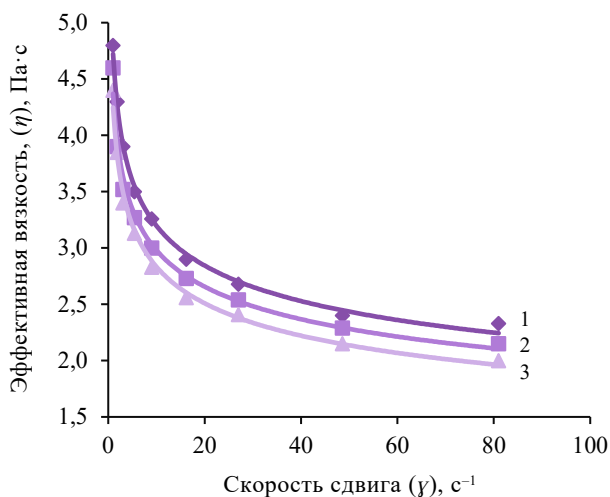


Рисунок 11. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для свежеработанных образцов с различной долей замены сахарозы на аллюлозу: 1 – 0 % (контроль); 2 – 40 %; 3 – 60 %

Figure 11. Effect of shear rate on effective viscosity in fresh condensed dairy samples with different allulose shares: 1 – 0% (control); 2 – 40%; and 3 – 60%

Таблица 9. Уравнения зависимости эффективной вязкости (η) от скорости сдвига (γ) в свежеработанных образцах консервированного молочного продукта

Table 9. Effect of shear rate (γ) on effective viscosity (η) in fresh condensed dairy samples with different allulose shares: Equations of dependence

Доля замены, %	Уравнение зависимости	Коэффициент детерминации
0 (контроль)	$\eta = 4,7218\gamma^{-0,169}$	$R^2 = 0,9965$
40	$\eta = 4,3686\gamma^{-0,166}$	$R^2 = 0,9857$
60	$\eta = 4,2468\gamma^{-0,17}$	$R^2 = 0,9923$

степень отклонения реологического поведения от ньютоновской модели, что интерпретируется как интенсивность деструкции внутренней каркасной структуры под механическим воздействием. Проведенный анализ установил четкую тенденцию: темп разрушения структуры находится в прямой зависимости от массовой доли аллюлозы в продукте. При этом реологические свойства демонстрируют выраженную временную зависимость: в свежеприготовленных образцах структурный каркас проявляет большую устойчивость к сдвиговым деформациям по сравнению с образцами после 14-месячного хранения. Наиболее значительное изменение структурной прочности отмечалось для композиций с 60 % замещением сахарозы, где разрушения структуры достигали максимума. Данный реологический вывод находится в полном соответствии с результатами электронной микроскопии.

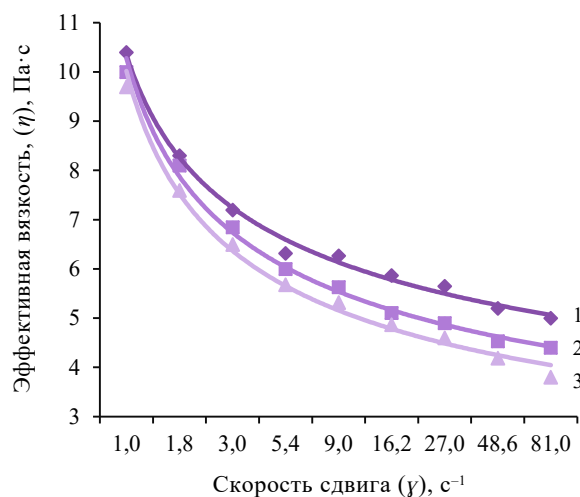


Рисунок 12. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига в образцах консервированного молочного продукта с сахаром и аллюлозой после 14 месяцев хранения: 1 – 0 % (контроль); 2 – 40 %; 3 – 60 %

Figure 12. Effect of shear rate on effective viscosity in condensed dairy samples with different allulose shares after 14 months of storage: 1 – 0% (control); 2 – 40%; and 3 – 60%

Таблица 10. Уравнения зависимости эффективной вязкости (η) от скорости сдвига (γ) в образцах консервированного молочного продукта после 14 месяцев хранения

Table 10. Effect of shear rate (γ) on effective viscosity (η) in condensed dairy samples with different allulose shares after 14 months of storage: Equations of dependence

Доля замены, %	Уравнение зависимости	Коэффициент детерминации
0 (контроль)	$\eta = 10,354\gamma^{-0,325}$	$R^2 = 0,9941$
40	$\eta = 10,279\gamma^{-0,384}$	$R^2 = 0,9945$
60	$\eta = 10,019\gamma^{-0,413}$	$R^2 = 0,9927$

Выводы

Проведенное электронно-микроскопическое исследование показало, что влияние аллюлозы на морфометрические признаки структур, образуемых мицеллами казеина в концентрированном молочном продукте, носит разнонаправленный характер и напрямую зависит от процента замены ею сахарозы. Замена 40 % сахарозы не оказывала существенного влияния на структуру казеиновых мицелл как в свежеработанных, так и в хранившихся образцах, оставляя их морфологию сопоставимой с контрольным продуктом без замены. В то же время более высокая доля замены – 60 % – приводила к значительным структурным изменениям: наблюдались деструкция мицелл казеина, образование вокруг них сахаридной капсулы и формирование плотных агрегатов, что может негативно сказаться на органолептических и технологических свойствах продукта.

Установлена четкая количественная граница замены сахарозы на аллюлозу. Превышение этого порога ведет к получению продукта, не соответствующего предъявляемым требованиям. Данные электронно-микроскопического анализа подтверждаются результатами реологических, физико-химических и органолептических исследований. Для обеспечения высокого качества разработанного концентрированного молочного продукта доля замены сахарозы на аллюлозу не должна превышать 40 %.

Критерии авторства

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциальных конфликтов интересов в отношении исследования, авторства и / или публикации данной статьи.

Contribution

All authors contributed equally to the study and are equally responsible for the information published in this article.

Conflict of interest

The authors declared no potential conflict of interest regarding the research, authorship, and/or publication of this article.

Список литературы / References

1. Xia Y, Cheng Q, Mu W, Hu X, Sun Z, et al. Research advances of *D*-allulose: An overview of physiological functions, enzymatic biotransformation technologies, and production processes. *Foods*. 2021;10(9):2186. <https://doi.org/10.3390/foods10092186>
2. Van Laar ADE, Grootaert C, Van Camp J. Rare mono- and disaccharides as healthy alternative for traditional sugars and sweeteners? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021;61(5):713–741. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1743966>
3. Mu W, Zhang W, Feng Y, Jiang B, Zhou L. Recent advances on applications and biotechnological production of *D*-psicose. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2012;94:1461–1467. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4093-1>
4. Петров С. М., Подгорнова Н. М., Тужилкин В. И. Моносахарид аллюлоза как здоровая альтернатива традиционным сахарам и подсластителям. *Сахар*. 2023. № 3. С. 36–41. [Petrov SM, Podgornova NM, Tuzhilkin VI. Monosaccharide allulose as healthy alternative to traditional sugars and sweeteners. *Sahar*. 2023;(3):36–41. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2023-3-36-41>
5. Jiang S, Xiao W, Zhu X, Yang P, Zheng Z, et al. Review on *D*-Allulose: *In vivo* metabolism, catalytic mechanism, engineering strain construction, bio-production technology. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020;8:00026. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00026>
6. Adolphus K, Van den Abbeele P, Poppe J, Deyaert S, Baudot A, et al. *D*-Allulose and erythritol increase butyrate production and impact the gut microbiota in healthy adults and adults with type-2 diabetes *ex vivo*. *Beneficial Microbes*. 2025;16(5):573–591. <https://doi.org/10.1163/18762891-bja00071>
7. Zhao Y, Duan X, Zhang J, Ding Y, Liu Q. Advances in the bioproduction of *D*-allulose: A comprehensive review of current status and future prospects. *Food Research International*. 2025;202:115767. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.115767>
8. Hu M, Li M, Jiang B, Zhang T. Bioproduction of *D*-allulose: Properties, applications, purification, and future perspectives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021;20(6):6012–6026. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12859>
9. Zhang W, Chen D, Chen J, Xu W, Chen Q, et al. *D*-allulose, a versatile rare sugar: Recent biotechnological advances and challenges. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023;63(22):5661–5679. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2023091>
10. Xie X, Li C, Ban X, Yang H, Li Z. *D*-allulose 3-epimerase for low-calorie *D*-allulose synthesis: Microbial production, characterization, and applications. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2025;45(2):353–372. <https://doi.org/10.1080/07388551.2024.2368517>
11. Chen Z, Gao X-D, Li Z. Recent advances regarding the physiological functions and biosynthesis of *D*-allulose. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:881037. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.881037>
12. Li W, Zhu Y, Jiang X, Zhang W, Guang C, et al. One-pot production of *D*-allulose from inulin by a novel identified thermostable exoinulinase from *Aspergillus piperis* and *Dorea* sp. *D*-allulose 3-epimerase. *Process Biochemistry*. 2020;99:87–95. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.08.021>
13. Zhang Y, Zhou Z, Luan H, Zhang X, Liu M, et al. Advances in the biosynthesis of *D*-allulose. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2024;40:375. <https://doi.org/10.1007/s11274-024-04166-w>
14. Tan JH, Chen A, Bi J, Lim YH, Wong FT, et al. The engineering, expression, and immobilization of epimerases for *D*-allulose production. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(16):12703. <https://doi.org/10.3390/ijms241612703>
15. Li Z, Feng L, Chen Z, Hu Y, Fei K, et al. Efficient enzymatic synthesis of *D*-allulose using a novel *D*-allulose-3-epimerase from *Caballeronia insecticola*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023;103(1):339–348. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12147>

16. Laksmi FA, Nirwantono R, Nuryana I, Agustriana E. Expression and characterization of thermostable *D*-allulose 3-epimerase from *Arthrobacter psychrolactophilus* (Ap DAEase) with potential catalytic activity for bioconversion of *D*-allulose from *D*-fructose. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;214:426–438. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.117>
17. Li Z, Hu Y, Yu C, Fei K, Shen L, *et al.* Semi-rational engineering of *D*-allulose 3-epimerase for simultaneously improving the catalytic activity and thermostability based on *D*-allulose biosensor. *Biotechnology Journal*. 2024;19(8):2400280. <https://doi.org/10.1002/biot.202400280>
18. Hu M, Li M, Jiang B, Zhang T. Bioproduction of *D*-allulose: Properties, applications, purification, and future perspectives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021;20(6):6012–6026. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12859>
19. Sun Y, Hayakawa S, Ogawa M, Fukada K, Izumori K. Influence of a rare sugar, *D*-psicose, on the physicochemical and functional properties of an aerated food system containing egg albumen. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2008;56(12):4789–4796. <https://doi.org/10.1021/jf800050d>
20. Woodbury TJ, Mauer LJ. Investigation of oligosaccharides and allulose as sucrose replacers in low-moisture wire-cut cookies. *Food Research International*. 2024;192:114844. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114844>
21. Men Y, Zhu P, Zhu Y, Zeng Y, Yang J, *et al.* The development of low-calorie sugar and functional jujube food using biological transformation and fermentation coupling technology. *Food Science & Nutrition*. 2019;7(4):1302–1310. <https://doi.org/10.1002/fsn3.963>
22. Xie X, Yu L, Lin Q, Huang D. Low-calorie *D*-allulose as a sucrose alternative modulates the physicochemical properties and volatile profile of sponge cake. *Journal of Food Science*. 2024;89(10):6296–6307. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17340>
23. Liu F, Chen S, Pan F, Zhao Z, Liu M, *et al.* Establishment of the biotransformation of *D*-allulose and *D*-allose systems in full-red jujube monosaccharides. *Plants*. 2023;12(17):3084. <https://doi.org/10.3390/plants12173084>
24. Куренков С. А., Куренкова Л. А., Гнездилова А. И. Исследование физико-химических свойств альтернативного сахарозаменителя для производства консервированных молочных продуктов с сахаром. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2024. № 5–6. С. 21–26. [Kurenkov SA, Kurenkova LA, Gnezdilova AI. Study of physicochemical properties of an alternative sugar substitute for the production of canned dairy products with sugar. *Izvestiya vuzov. Food Technology*. 2024;(5–6):21–26. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.5-6.3>
25. Куренкова Л. А., Куренков С. А. Изучение возможности замены сахарозы альтернативным осмотически деятельным веществом в технологии концентрированных молочных консервов с сахаром. *Молочнохозяйственный вестник*. 2023. № 4. С. 189–198. [Kurenkova LA, Kurenkov SA. Study of the possibility of replacing sucrose with an alternative osmotically active substance in the technology of concentrated canned milk with sugar. *Molochnokhozayistvenny Vestnik*. 2023;(4):189–198. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/PJXDLW>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Куренков Сергей Алексеевич / Sergey A. Kurenkov ORCID 0000-0003-3889-4559; eLIBRARY SPIN 3198-1470
Куренкова Людмила Александровна / Lyudmila A. Kurenkova ORCID 0000-0003-1684-1245; eLIBRARY SPIN 2091-1856
Смыков Игорь Тимофеевич / Igor T. Smykov ORCID 0000-0002-5663-3662; eLIBRARY SPIN 6530-5689
Гнездилова Анна Ивановна / Anna I. Gnezdilova ORCID 0000-0001-5484-8291; eLIBRARY SPIN 4828-1392