

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2599>
<https://elibrary.ru/MKODYV>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Роль коллагена в формировании микроструктуры и реологических свойств плавленого сыра



О. Н. Мусина*^{ID}, Е. М. Нагорных^{ID}

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова^{ROR}, Барнаул, Россия

Поступила в редакцию: 31.05.2025

Принята после рецензирования: 04.07.2025

Принята к публикации: 05.08.2025

*О. Н. Мусина: musinaolga@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-4938-8136>

Е. М. Нагорных: <https://orcid.org/0000-0003-3051-1381>

© О. Н. Мусина, Е. М. Нагорных, 2025



Аннотация.

Гидролизированный коллаген может стать перспективным многофункциональным модификатором структуры плавленых сыров, обеспечивая формирование гибридной казеин-коллагеновой матрицы и коллоидную стабилизацию жировой эмульсии. Цель работы заключалась в установлении влияния включения гидролизованного коллагена в состав плавленого пастообразного сыра на его микроструктуру и реологические свойства.

Объект исследования – плавленый пастообразный сыр с добавлением 3,1 % гидролизованного коллагена. Для сравнения использовался контрольный образец без коллагена. Микроструктура оценивалась с помощью оптической микроскопии и анализа изображений в Fiji ImageJ2. Реологические свойства определялись на приборе фирмы «Реокон» с использованием ножевидного индентора.

Включение 3,1 % гидролизованного коллагена в рецептуру плавленых пастообразных сыров способствовало улучшению их структурно-механических свойств. Добавление гидролизованного коллагена приводило к уплотнению белковой матрицы и стабилизации жировой эмульсии, что проявлялось в уменьшении среднего размера жировых глобул с 26,5 до 14,8 мкм, отсутствии их коалесценции и кластеризации, снижении на 20 % пористости беловой матрицы и повышении однородности распределения водной фазы. Введение гидролизованного коллагена в рецептуру приводило к увеличению адгезии и вязкости плавленого сыра на 40 %, но не обеспечивало прочностных свойств, вязкие свойства преобладали над упругими, сыр сохранял пластичность.

Гидролизированный коллаген рекомендован к использованию в составе плавленых сыров, требующих высокой адгезии и пластичности (пастообразные сыры, сыры для соусов). Применение гидролизованного коллагена не рекомендуется для сыров, в которых важна высокая структурная прочность (ломтевые сыры, колбасный сыр). Полученные результаты открывают перспективы для дальнейшей оптимизации текстуры плавленых пастообразных сыров.

Ключевые слова. Плавленый сыр, пищевая система, белковая матрица, жировые глобулы, вязкость, адгезия, прочность, плавление, структурно-механические свойства

Для цитирования: Мусина О. Н., Нагорных Е. М. Роль коллагена в формировании микроструктуры и реологических свойств плавленого сыра. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 3. С. 659–672. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2599>

Effect of Collagen on Microstructural and Rheological Properties of Cheese Spreads



Olga N. Musina*^{ORCID}, Elena M. Nagornyh^{ORCID}

Polzunov Altai State Technical University^{ORCID}, Barnaul, Russia

Received: 31.05.2025
Revised: 04.07.2025
Accepted: 05.08.2025

*Olga N. Musina: musinaolga@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-4938-8136>
Elena M. Nagornyh: <https://orcid.org/0000-0003-3051-1381>

© O.N. Musina, E.M. Nagornyh, 2025



Abstract.

Hydrolyzed collagen modifies the structure of cheese spreads: it develops a hybrid casein-collagen matrix and stabilizes the fat emulsion. This research featured the effect of hydrolyzed collagen on the microstructure and rheology of cheese spreads.

The study involved experimental cheese spread with 3.1% hydrolyzed collagen and a collagen-free control sample. The method of optical microscopy and image analysis (Fiji ImageJ2) made it possible to study the microstructure. The rheological profile was investigated on an experimental Reokon tensile strength tester with a knife indenter.

Hydrolyzed collagen improved the structural and mechanical properties of the finished product. As the protein matrix grew more compact and the fat emulsion became more stable, the average size of fat globules dropped from 26.5 to 14.8 μm without coagulating or clustering. In addition, the porosity of the protein matrix reduced by 20% while the aqueous phase distribution became more homogeneous. Hydrolyzed collagen improved the adhesion and viscosity properties of the experimental cheese spread by 40% but not its tensile strength. As a result, viscosity prevailed over elasticity, and the experimental cheese spread retained its plasticity.

Hydrolyzed collagen proved to be an effective component in the formulation of cheese spreads that require high adhesion and plasticity. However, it is likely to spoil the targeted structural properties of smoked or sliced cheeses. The results open up new prospects for further optimization of the texture of domestic cheese spreads.

Keywords. Cheese spread, food system, protein matrix, fat globules, viscosity, adhesion, tensile strength, melting, structural and mechanical properties

For citation: Musina ON, Nagornyh EM. Effect of Collagen on Microstructural and Rheological Properties of Cheese Spreads. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(3):659–672. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2599>

Введение

Плавленные сыры представляют собой сложные многокомпонентные системы, получаемые путем термической обработки сырья с добавлением солей-плавителей. Их уникальные свойства – пластичность, однородность и устойчивость к расслоению – обусловлены взаимодействием белковой матрицы, жировой фазы и водной среды [1, 2]. Акцент в пищевой промышленности сместился на разработку продуктов с улучшенными характеристиками, в том числе за счет использования новых видов сырья [3–6], не обошел этот тренд и плавленные сыры [7, 8]. Модификация рецептур плавленных сыров, направленная на достижение ожидаемых реологических свойств продукции, является актуальной научно-технической задачей, требующей глубокого понимания физико-химических взаимодействий между компонентами смеси для плавления [9, 10].

Микроструктура плавленных сыров формируется на основе казеиновой сети, стабильность которой

обеспечивается солями-плавителями, способствующими формированию гомогенного геля [11, 12]. Жировые глобулы, диспергированные в белковой матрице, влияют на текстуру: уменьшение их размера коррелирует с повышением гладкости и устойчивости эмульсии [13, 14]. Реологические свойства таких систем описываются моделями вязкоупругопластичного поведения, где ключевыми параметрами являются предел текучести, адгезия и вязкость [10, 15]. Размер жировых глобул в плавленом сыре важен для предотвращения коалесценции и улучшения стабильности продукта [16, 17]. Для пастообразных сыров одним из важных аспектов качества является отсутствие синерезиса (отделение влаги, вызванное неоднородностью белковой матрицы) [18, 19]. Современные исследования направлены на поиск ингредиентов, способных усиливать водосвязывающую способность продукта и моделировать его структуру. Так, использование полисахаридов, например каррагинанов, показало эффективность в моделировании реологических

свойств сыров, в том числе плавленых, однако их влияние на вкусовые характеристики продукции неоднозначно [20–22].

Одним из перспективных видов сырья, нового для технологии плавленых сыров, является гидролизированный коллаген (ГК). Гидролизированный коллаген, получаемый ферментативным или кислотным расщеплением нативного коллагена, обладает уникальными технологическими свойствами: высокой гидрофильностью, эмульгирующей способностью и совместимостью с белковыми системами [23, 24]. Его пептиды, богатые пролином и глицином, способны взаимодействовать с казеином, что открывает перспективы для совершенствования традиционных пищевых продуктов [25].

Современные работы демонстрируют большой потенциал гидролизованного коллагена в модификации пищевых систем. Например, da Mata Rigoto *et al.* [26] установили, что добавление гидролизованного коллагена в состав пробиотического молочного напитка позволяет повысить вязкость смеси в требуемых пределах за счет формирования белковой сети, продукт демонстрировал псевдопластичное поведение. В эмульсионных системах ГК действует как стабилизатор, снижая межфазное натяжение [27]. Это подтверждается данными исследования [28], где показано, что включение коллагеновых пептидов в майонез позволило снизить массовую долю жира в продукте до 40 % (против 67 % в традиционном майонезе) при одновременном увеличении стабильности эмульсии, адгезии и эластичности. Включение коллагена в состав мясных полуфабрикатов положительно влияет на их влагоудерживающую способность, что отражается на сенсорных свойствах продукта; коллагеновые пептиды могут быть перспективным ингредиентом для замены жира в рецептуре сосисок [29]. Добавление гидролизованного коллагена в мороженое повышает стабильность эмульсии, поэтому рекомендуется рассмотреть его использование в качестве заменителя жиров в составе этого продукта [30].

В контексте молочных продуктов важнейшим направлением исследований является установление влияния гидролизованного коллагена на реологические свойства продукции. Помимо улучшения текстуры и стабильности пищевых продуктов, ГК обладает значительной способностью связывать влагу (при некоторых видах обработки водосвязывающая способность коллагенсодержащего сырья достигает $22,20 \pm 0,31$ %), что может представлять интерес для контроля активности воды в сырах [31, 32].

При включении ГК в состав сметаны пептиды коллагена формируют сетчатые структуры между белками молока, образуя перемычки и включения жировых глобул, сметанный продукт характеризуется вязкопластическим течением и быстрой релаксацией [33]. Однако возможность применения гидролизованного коллагена в плавленых сырах практически не изучена.

Большинство исследований сосредоточено на жидких молочных продуктах, тогда как данные о влиянии ГК на казеиновые гели и жировую фазу сыров весьма ограничены.

Несмотря на растущий интерес к использованию новых, потенциально перспективных ингредиентов, в том числе коллагена, в традиционных молочных продуктах механизмы взаимодействия ГК с компонентами плавленых сыров остаются нераскрытыми. В частности, отсутствуют данные о том, как коллагеновые пептиды влияют на микроструктуру и реологические свойства плавленых сыров.

Проведенный обзор литературы показал, что гидролизированный коллаген обладает значительным потенциалом для модификации структуры пищевых систем. Тем не менее, его применение в плавленых сырах требует детального изучения, позволяющего в дальнейшем оптимизировать рецептуры и прогнозировать свойства продукции. Настоящее исследование вносит вклад в решение этого вопроса, предлагая новые данные о роли ГК в стабилизации эмульсий и укреплении белковых матриц.

Актуальность исследования отвечает также современному запросу на натуральность, когда потребитель ожидает видеть в составе продукта добавки, способные не только модифицировать микроструктуру и реологические свойства плавленых сыров, но и улучшить его состав. Использование гидролизованного коллагена соответствует трендам на продукты с добавленной ценностью, в частности за счет биоактивных пептидов коллагена, улучшающих здоровье кожи и суставов [34, 35].

Цель данной работы – установление влияния включения гидролизованного коллагена в состав плавленого пастообразного сыра на его микроструктуру и реологические свойства.

В рамках настоящего исследования проверялась гипотеза о том, что ГК, обладая гидрофильными и эмульгирующими свойствами, способен существенно модифицировать микроструктуру плавленого пастообразного сыра и изменять его реологические свойства за счет взаимодействия с казеиновыми мицеллами и жировыми глобулами. В отличие от исследований по коллагену в молочных напитках акцент сделан на вязкоупругие свойства системы, что актуально для категорий сыров с высокой пластичностью.

Для достижения цели исследования решались следующие задачи:

- оценить воздействие ГК на микроструктуру плавленого сыра (средний размер жировых глобул и его вариабельность, плотность белковой матрицы, однородность структуры сыра);
- оценить воздействие ГК на реологические характеристики плавленого сыра (вязкость, адгезия, прочность);
- предложить возможные механизмы выявленных закономерностей взаимодействия ГК с компонентами сырной смеси.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – плавленый пастообразный сыр, обогащенный гидролизированным коллагеном (ГК).

Состав контрольного и опытного образцов сыра приведен в таблице 1. Диапазон дозировок внесения ГК был определен в предварительных экспериментах методом математического моделирования органолептических показателей, соответствующих контрольному образцу плавленого пастообразного сыра, и составил 3,0–3,5 %. Математическое моделирование проведено путем реализации полного факторного эксперимента с центральной, осевыми и дополнительными точками; тип модели – полиномиальная регрессия второй степени; значимость коэффициентов модели определена по *t*-тестам. Адекватность модели подтверждена тестами Шапиро-Уилка и Левена: 94 % изменчивости отклика объясняется моделью регрессии. Органолептические показатели образцов плавленого сыра оценены по ГОСТ 33630-2015.

Гидролизированный коллаген получен по ТУ 10.89.19-003-0160057957-2021 (ООО «СМТ-Групп», Россия). Образцы плавленых сыров вырабатывались на приборе Термомикс TM5 (Vorwerk International & Co. KmG, Швейцария) путем измельчения, смешивания и плавления подготовленного сырья с использованием солей-плавителей. Соли-плавители подобраны с учетом получения пластичной консистенции в плавленом сыре и активной кислотности от 6,20 до 5,80: выбор ортофосфата натрия осуществляли по ГОСТу 31725-2012; пирофосфат натрия – ГОСТ Р 55054-2012; трифосфат натрия – ГОСТ 31638-2012; полифосфат натрия согласно ГОСТу 31686-2012.

При исследовании микроструктуры образцов плавленого сыра задействованы две модели микроскопов. Исследования проводились в проходящем свете согласно методу светлого поля. Для получения микро-

фотографий с увеличением до 1270х использовали микроскоп Микромед-1, вариант 2-20 (Ningbo Sheng Heng Optics & Electronics Ltd., Китай) с бинокулярной визуальной насадкой того же производителя. Визуальная насадка микроскопа работала совместно с камерой (видеоокулярном) ToupCam UCMOS03100KPA (ToupTek Photonics Co., Ltd, Китай), адаптером-переходником ToupTek FMA050 0.50X (ToupTek Photonics Co., Ltd, Китай), 15’’ монитором LG FLATRON L1510S (LG Electronics, Южная Корея) и программным обеспечением ToupView (ToupTek Photonics Co., Ltd, Китай). Для получения микрофотографий с увеличением до 3384х использовали микроскоп Альтами БИО 1 (ООО «Альтами», Россия) с видеокамерой Альтами UCMOS05100KPA-U-NA-N-C-SQ-NA (ООО «Альтами», Россия), адаптером-переходником 0.5-C/23 0.50X (ООО «Альтами», Россия), 19’’ монитором SAMSUNG S19C200 (Samsung Group, Южная Корея) и программным обеспечением Altami Studio (ООО «Альтами», Россия).

Для приготовления микроскопического препарата образцы пастообразного плавленого сыра наносились тонким слоем на предметные стекла, далее наносили водный раствор метиленового синего, затем накрывали образец покровным стеклом. При использовании метода оптической микроскопии глубина резкости ограничена, поэтому для каждого образца анализировались 5 случайно выбранных полей зрения на каждом увеличении, чтобы избежать ошибок из-за локальной неоднородности. Перед проведением микроскопии образцы хранились при 4 ± 1 °C не более 2 дней после изготовления.

Для инструментального анализа данных, полученных с микроскопов, использовали пакет обработки изображений Fiji ImageJ2, с помощью которого производили оценку размеров жировых глобул в образцах

Таблица 1. Рецепт плавленого пастообразного сыра (на тонну)

Table 1. Formulation for processed cheese spread (1 ton)

Наименование сырья	Масса, кг	
	Контрольный образец	Опытный образец
Сыр сычужный полутвердый с массовой долей сухого вещества 56 %, жира в сухом веществе 45 %	360,1	329,1
Творог с массовой долей сухого вещества 25 %, жира 5 %	102,0	102,0
Масло крестьянское сладко-сливочное с массовой долей сухого вещества 75 %, жира 72,5 %	284,1	284,1
Сливки с массовой долей сухого вещества 41 %, жира 35 %	61,2	61,2
Сухое обезжиренное молоко с массовой долей сухого вещества 96 %	21,8	21,8
Соль пищевая	1,0	1,0
Соль-плавитель	20,4	20,4
Лимонная кислота	1,0	1,0
Гидролизированный коллаген	0	31,0
Вода питьевая	168,4	168,4
Всего	1020,0	1020,0
Выход	1000,0	1000,0

плавленого сыра и строили гистограммы распределения. Измерения жировых глобул проводились с шагом 50 мкм по сетке 3×3 в центре поле зрения, при измерении исключались краевые эффекты. Для детектирования контуров глобул использовались возможности Fiji ImageJ2 (пороговое значение яркости > 200 на шкале 0–255).

Оценку однородности белковой матрицы в образцах плавленого сыра осуществляли с помощью инструмента Interactive 3D Surface Plot пакета Fiji ImageJ2, позволяющего создать из двухмерных микрофотографий образцов 3d-график поверхности, где каждая точка имеет координаты x, y (как и в 2D-изображении), а z – отражает яркость точки на исходной 2D-фотографии (интерпретируется как высота для графика). Инструмент поддерживает в том числе непрямоугольные выборки. Непрямоугольное изображение масштабировалось до квадратного с использованием выборки методом *k*-ближайших соседей (*k*-nearest neighbors). Поверхности строились на основе преобразования Фурье.

Исследование реологических свойств образцов сыра проведено в «Сибирском НИИ сыроделия» на приборе фирмы «Реокон» (Россия), разработанном профессором А. А. Майоровым, по утвержденной методике. Принцип действия прибора основан на измерении предела прочности образца плавленого сыра при погружении индентора. Детальное описание прибора фирмы «Реокон», его внешний вид и вид индентора приведены в исследовании [36]. Методика основана на измерении напряжения сдвига (усилия нагружения на инденторе, отражающего сопротивление деформации) при погружении индентора в образец плавленого сыра на заданную глубину при заданной скорости. Использован индентор ножевого типа, изготовленный из нержавеющей стали (лезвие 40×5 мм, угол наклона 90°), что обеспечивало контакт площадью 0,0002 м². Режим реологических исследований: глубина погружения индентора 0–50 мм, скорость погружения 10 мм/с, температура образцов и окружающей среды 20 ± 1 °С.

Результаты и их обсуждение

Микроструктура плавленных сыров характеризуется специфическими особенностями. Белковая матрица образует сетчатую структуру, жир распределен в виде капель. Равномерное распределение мелких жировых глобул в образце будет указывать на хорошую устойчивость эмульсии и стабильность продукта.

Для визуализации крупных структур сыра, таких как жировые глобулы и белковая матрица, хорошо подходит оптическая микроскопия. После проведения серии экспериментов получен массив данных. На рисунке 1 приведены образцы типичных микрофотографий сыра.

Благодаря низкой молекулярной массе короткие пептиды гидролизованного коллагена (ГК) легко взаи-

модействуют с другими компонентами сыра. В контрольном образце сыра (рис. 1а, с, е) белковая матрица имела видимые разрывы и неравномерности, периодически видны участки с низкой связностью. В образце плавленого сыра с коллагеном (рис. 1b, d, f) белковая матрица более плотная и непрерывная. Короткие пептиды гидролизованного коллагена могут встраиваться в структуру казеиновой матрицы, образуя дополнительные поперечные связи, что визуально отмечено как усиление сетчатой структуры белковой матрицы. В структуре опытного образца сыра отчетливо наблюдались более мелкие пустоты, по сравнению с контрольным образцом.

Жировые глобулы в контрольном образце (рис. 1а, с, е) крупные (12–97 мкм) и неравномерно распределены, отмечаются признаки коалесценции (крупные жировые капли сгруппированы в кластеры). В образце сыра с коллагеном (рис. 1b, d, f) жировые глобулы мельче (6–29 мкм) и равномерно распределены в белковой матрице, слипание капель жира единичное.

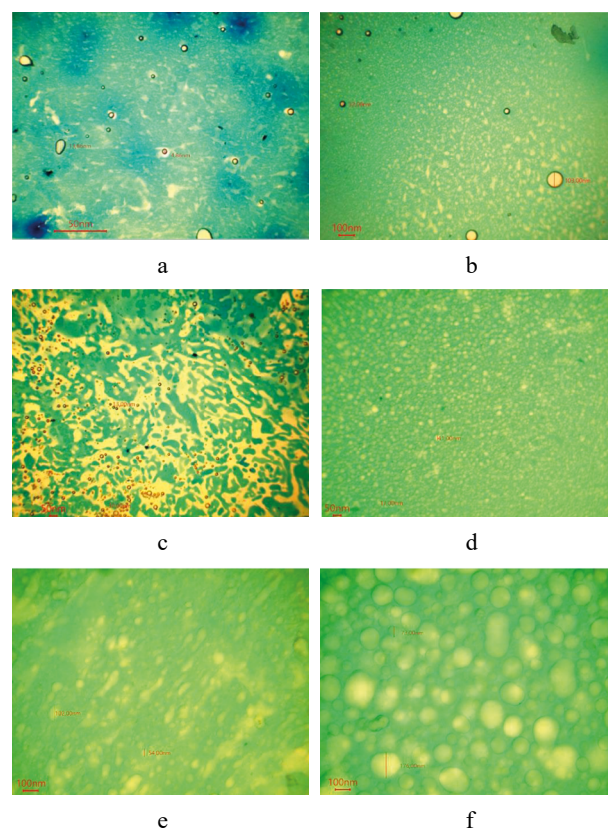


Рисунок 1. Плавленый сыр: а – без наполнителей (контроль) и б – с коллагеном (увеличение ×127); с – без наполнителей (контроль) и d – с коллагеном (увеличение ×318); е – без наполнителей (контроль) и f – с коллагеном (увеличение ×1,270)

Figure 1. Cheese spread: а – control and b – with collagen (magnification ×127); с – control and d – with collagen (magnification ×318); е – control and f – with collagen (magnification ×1,270)

Коллаген усилил стабильность эмульсии за счет укрепления белковой матрицы. Укрепленная белковая матрица лучше удерживает жировые глобулы, не позволяя им сливаться даже при механических воздействиях, например перемешивании. Мелкие жировые глобулы обеспечивают более гладкую и однородную текстуру, что особенно важно для пастообразных сыров. Гидролизированный коллаген не оказывает прямого влияния на жир в продукте, но за счет укрепления белковой матрицы и предотвращения коалесценции жировых глобул способствует сохранению мелкодисперсной жировой фазы и может косвенно стабилизировать эмульсию. Сыр с меньшими жировыми глобулами будет лучше плавиться и распределяться, например, в соусах или при нагревании.

В пищевых эмульсиях, включая плавленые сыры, стабильность системы зависит от размера жировых капель. Мелкие глобулы (5,0–20,0 мкм) менее склонны к коалесценции из-за большей площади поверхности и электростатического отталкивания. Они формируют более однородную структуру, что улучшает текстуру и срок годности сыров. Крупные глобулы (> 20,0 мкм) легче сливаются, что приводит к расслоению эмульсии (отделение жира или воды). Этот принцип универсален для многих эмульгированных продуктов, включая майонез, мороженое и плавленый сыр. При размере глобул менее 20,0 мкм уменьшается скорость всплытия жира (по закону Стокса), повышается устойчивость к окислению (меньшая площадь контакта с кислородом). Есть отличия и в органолептических свойствах: глобулы размером менее 20,0 мкм не ощущаются языком как «зернистые», что важно для гладкой текстуры пастообразных сыров. В исследованиях плавленых сыров оптимальный размер жировых глобул для стабильной эмульсии обычно находится в диапазоне 5,0–20,0 мкм. Наш результат (средний размер жировых глобул в опытном образце составляет 14,8 мкм) попадает в этот диапазон, что подтверждает эффективность гидролизованного коллагена как функционально-технологического компонента.

В контрольном образце (рис. 1а, с, е) наблюдались пустоты и каналы, где отделилась влага (признаки синерезиса). В опытном образце пустот меньше и более равномерное распределение водной фазы, структура выглядит более связной. ГК обладает высокой способностью связывать воду благодаря наличию гидро-

фильных групп в своей структуре. Гидролизированный коллаген связывает воду, снижая подвижность жировых глобул и замедляя их перемещение и слипание. Таким образом, подтверждена гипотеза о том, что ГК повышает водосвязывающую способность образца.

На микрофотографиях образца с коллагеном (рис. 1b, d, f) наблюдалось на 20 % меньше пустот и уменьшение среднего размера жировых глобул на 44 % (с 26,5 мкм до 14,8 мкм), что свидетельствует о том, что гидролизированный коллаген укрепил белковую матрицу, создал физический барьер, препятствующий коалесценции жировых капель, стабилизировал эмульсию, а также улучшил структурно-механические характеристики плавленого сыра.

Выявленные особенности микроструктуры плавленого сыра, обобщенные в таблице 2, отражаются на его свойствах. Поскольку в опытном образце жировые глобулы мельче, пустот меньше, а белковая матрица плотнее – сыр с коллагеном будет более пластичным, что согласуется с результатами наших исследований реологических свойств образцов.

Гистограммы распределения размеров жировых глобул для обоих образцов приведены на рисунке 2. Визуализация помогает определить форму распределения (нормальная, бимодальная, асимметричная и т. д.), а также подтвердить влияние коллагена на структуру сыра.

Визуальный анализ гистограмм позволяет сделать вывод, что в контрольном образце сыра (рис. 2а) распределение правостороннее с длинным «хвостом» в сторону крупных глобул (до 97 мкм), есть отдельные выбросы (жировые глобулы размером > 50 мкм). В образце плавленого пастообразного сыра с гидролизированным коллагеном (рис. 2b) распределение близко к нормальному с пиком на 11–15 мкм, диапазон сужен по сравнению с контрольным образцом (6–29 мкм), выбросы отсутствуют.

Важно также обратить внимание на разницу в диапазонах размеров. В контрольном образце (рис. 2а) размеры варьируются от 12 до 97 мкм, в опытном (рис. 2b) – от 6 до 29 мкм. Это указывает на то, что добавление коллагена может способствовать более однородной структуре глобул. Однако в виде утверждения эта гипотеза является дискуссионной: для ее подтверждения (или опровержения) необходимо установить, насколько статистически значимы эти различия.

Таблица 2. Типичные изменения в структуре плавленого пастообразного сыра при добавлении гидролизованного коллагена

Table 2. Effect of hydrolyzed collagen on cheese spread structure

Параметр	Контрольный образец	Опытный образец
Жировые глобулы	Крупные, неравномерные, Средний размер – 26,5 мкм	Мелкие, равномерные, Средний размер – 14,8 мкм
Белковая матрица	С разрывами, неравномерная	Плотная, непрерывная
Водная фаза	Пустоты, трещины	Минимум пустот

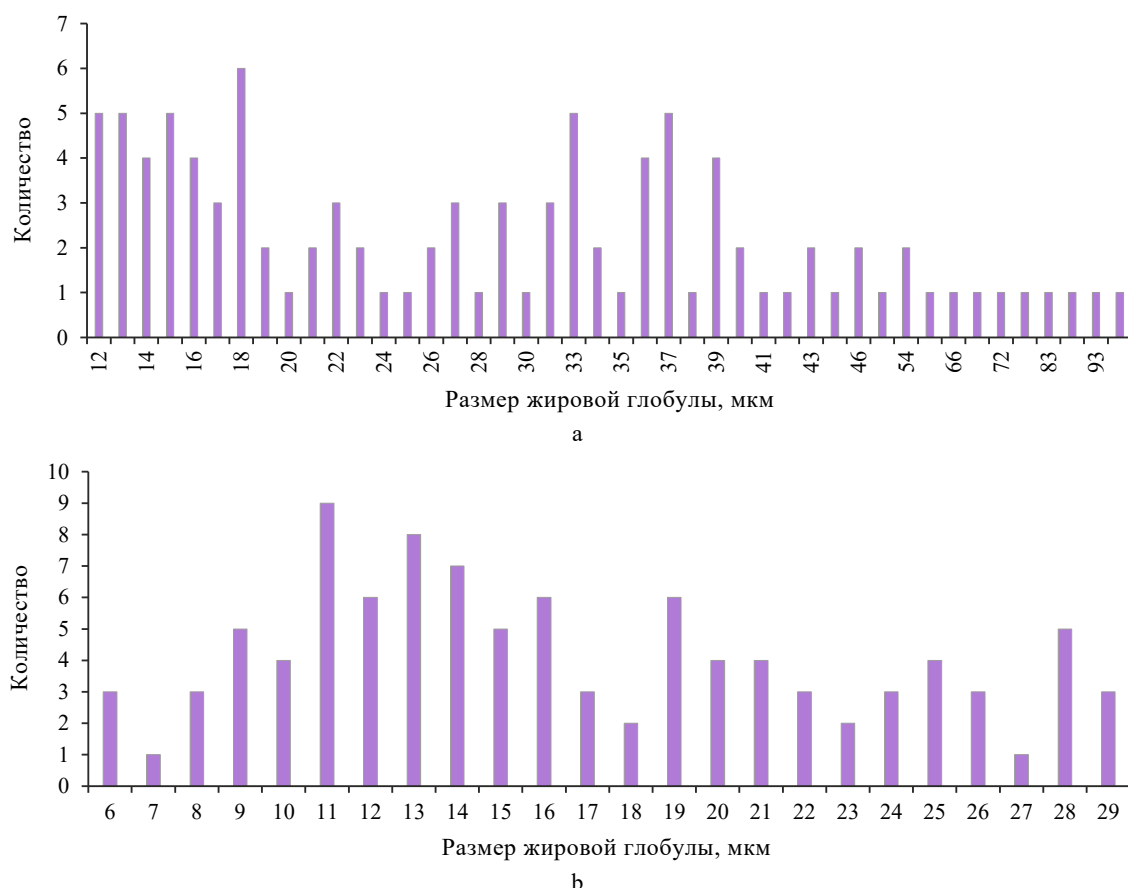


Рисунок 2. Гистограммы распределения размеров жировых глобул в образцах плавленого пастообразного сыра: а – без наполнителей (контроль); б – с коллагеном

Figure 2. Fat globule size: a – control; b – experimental sample with collagen

Для обоих образцов рассчитаны основные статистические показатели (табл. 3), что поможет понять центральные тенденции и разброс данных. Средний размер глобул показывает, есть ли значимое различие между контрольным и опытным образцами, медиана дает представление о типичном размере жировых глобул в образцах, а стандартное отклонение – о вариативности размеров глобул.

В опытном образце средний размер жировых глобул снизился на ~ 44 % (с 26,5 до 14,8 мкм). Стандартное отклонение уменьшилось в 3 раза, что указывает на большую однородность размеров. Узкий диапазон (6–29 мкм) и отсутствие статистических выбросов в распределении размеров жировых глобул в опытном образце являются признаком положительного влияния ГК на структуру продукта.

Для достоверных выводов о влиянии гидролизованного коллагена на структуру плавленых сыров необходимо дать оценку статистической значимости различий в размере жировых глобул контрольного и опытного образцов. С целью кросс-валидации расчетов использовали оба теста (параметрический и непараметрический).

Проведена проверка выполнения условий для применения параметрических тестов (t -критерий Стьюдента предполагает нормальность распределения и равенство дисперсий). Для контрольного образца проверка нормальности распределения (тест Шапиро-Уилка) показала, что распределение ненормальное (асимметричное) с выбросами (p -value < 0,05). В опытном образце нормальность распределения не отвергается (p -value > 0,05). Так как одно из распределений ненормальное (у контрольного образца нарушено условие нормальности), параметрический t -критерий может быть ненадежен. Однако, поскольку выборка большая ($N = 100$), t -критерий можно применять с осторожностью, либо использовать непараметрические тесты (U -критерий Манна-Уитни). Проверка равенства дисперсий (тест Левена) показала, что дисперсии не равны (p -value < 0,001), поэтому используем t -критерий Уэлча, не предполагающий равенства дисперсий. Размеры выборок N равны (по 100 жировых глобул в каждой), что положительно сказывается на мощностях тестов. Для рассчитанных величин t -критерия Уэлча ($t = 6,07$) и его степени свободы ($df \approx 118$), p -значение < 0,0001, то есть средние размеры жировых глобул в контроль-

Таблица 3. Основные статистические показатели размера жировых глобул образцов плавленого сыра

Table 3. Fat globule size in cheese spreads

Показатель	Контрольный образец	Опытный образец
Диапазон, мкм	12–97	6–29
Средний размер, мкм	26,47	14,81
Медиана, мкм	22	12
Стандартное отклонение, мкм	18,2	6,1

Таблица 4. Статистическая оценка значимости различий в размере жировых глобул

Table 4. Significant differences in fat globule size

Показатель	Значение
Параметрический тест (<i>t</i> -критерий Уэлча)	
<i>t</i> -статистика	6,07
Степени свободы (df)	117,6
<i>p</i> -value	< 0,0001
Размер эффекта (d Коэна)	0,86 (d > 0,8; большой)
Непараметрический тест (U-критерий Манна-Уитни)	
U-статистика	400
<i>p</i> -value	< 0,0001
Однофакторный анализ (ANOVA)	
<i>F</i> -статистика	36,89
<i>p</i> -value	< 0,0001

ном и опытном образцах сыров статистически значимо различаются ($p < 0,05$). Дополнительно рассчитан размер эффекта по критерию Коэна, который показывает, насколько велико различие между выборками: $d = 0,86$.

Проведен непараметрический тест Манна-Уитни (U-тест). Сначала объединили данные контрольной и опытной выборок в один список и ранжировали все значения от наименьшего к наибольшему. Минимальное из значений U-статистики использовался для сравнения с критическим значением. Для размера выборок, равного 100, при $\alpha = 0,05$ критическое значение $U_{\text{крит}} \approx 3960$. Поскольку в нашем случае $U < U_{\text{крит}}$ ($U = 400 < 3960$), различия значимы.

Однофакторный анализ (ANOVA) также подтвердил статистическую значимость различий ($p < 0,0001$), что согласуется с *t*-критерием.

В таблице 4 приведены результаты статистической оценки значимости различий размера жировых глобул в плавленом сыре с ГК и без него. Гипотеза H_0 (отсутствие различий между группами) отвергается во всех тестах (табл. 4). Как параметрические, так и непараметрические тесты подтвердили, что различия между группами статистически значимы ($p < 0,05$), размер эффекта указывает на практическую значимость различий. Тесты подтвердили, что добавление гидролизованного коллагена значительно влияет на размер жировых глобул в плавленом сыре, существенно уменьшая их средний размер ($p < 0,0001$). Размер эффекта ($d = 0,86$) классифицируется как большой по критериям Коэна, что согласуется с гипотезой о стабилизирующем действии коллагена.

Таким образом, гипотеза о том, что гидролизированный коллаген в плавленом сыре действует как эмульгатор, предотвращая коалесценцию жировых глобул, подтвердилась статистическими данными. Добавление ГК приводит к значительному уменьшению диаметра жировых глобул (на 44 % по сравнению с контрольным образцом) и выравниванию их размеров, что позволяет прогнозировать улучшение текстуры и стабильности плавленого сыра.

На следующем этапе исследований провели оценку однородности белковой матрицы в образцах плавленого сыра (рис. 3). Проведение 3D-поверхностного анализа позволит дать более полную характеристику структурно-функциональных изменений, вызванных введением ГК, и подтвердить данные о его роли в формировании свойств плавленого пастообразного сыра. В контексте микроструктуры сыра высокие пики коррелируют с плотными участками белковой матрицы образцов, низкие области – поры, водная фаза или жировые глобулы, градиент цвета (от синего к белому) показывают изменение высоты (интенсивности).

В контрольном образце (рис. 3а) наблюдается неоднородная поверхность: высокие пики (белковые агрегаты) чередуются с глубокими впадинами, крупные впадины указывают на высокую пористость образца, низкая плотность пиков свидетельствует о слабом поперечном сшивании белковой матрицы. В образце плавленого пастообразного сыра с коллагеном (рис. 3б) наблюдается более гладкая поверхность: уменьшение перепадов высоты за счет уплотнения белковой матрицы, мелкие впадины указывают на снижение

пористости, а высокая плотность пиков является признаком усиления белковой матрицы.

Впервые установлено, что включение гидролизованного коллагена в состав плавленого пастообразного сыра индуцирует ряд структурно-функциональных изменений в его микроструктуре. Они обусловлены физико-химическими взаимодействиями между коллагеновыми пептидами и остальными компонентами рецептуры, в основе которых, вероятно, лежат механизмы, описанные далее.

В основе модификации белковой матрицы лежат полимерно-коллоидные взаимодействия. Плавленый сыр представляет собой полимерный аморфный гель на основе казеина, формирование гомогенной структуры которого обеспечивают соли-плавители. ГК, состоящий из низкомолекулярных пептидов, интегрируется в эту белковую матрицу через ионные и гидрофобные взаимодействия и водородные связи, формируя гибридную биополимерную сеть.

Гидрофобные участки пептидов гидролизованного коллагена взаимодействуют с κ - и α -казеином, усиливая прочность белковой матрицы. Отрицательно заряженные карбоксильные группы ГК вступают в ион-дипольное взаимодействие с положительно заряженными аминогруппами лизина казеина, особенно в присутствии солей-плавителей, регулирующих ионную силу. Гидроксильные группы гидроксипролина в ГК формируют водородные связи с карбонильными группами казеина, повышая прочность белковой матрицы. В комплексе эти взаимодействия приводят к увеличению степени прочности поперечных связей белковой матрицы, что подтверждается снижением среднего размера пор на микрофотографиях, соответствующим, таким образом, модели Флори-Хаггинса для растворов полимеров с ограниченной подвижностью. Эти выводы согласуются с полученными авторами данными реологического анализа образцов.

Жировая фаза плавленого сыра – это эмульсия типа «масло в воде», где жировые глобулы (триглицериды молочного жира) диспергированы в белковой матрице. Гидролизированный коллаген влияет на их стабильность несколькими путями:

1. Через уменьшение межфазного натяжения (амфифильные пептиды ГК, содержащие гидрофильный гидроксипролин и гидрофобный глицин, адсорбируются на поверхности жировых глобул, снижая энергию Гиббса на границе раздела фаз, что способствует формированию более мелких глобул, в нашем случае средний диаметр снижается с 26,5 мкм до 14,8 мкм);

2. Посредством электростатической и стерической стабилизации (анионные пептиды гидролизованного коллагена образуют защитный слой вокруг глобул, предотвращая коалесценцию по механизму DLVO (Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека) за счет увеличения энергетического барьера между каплями);

3. Через усиление вязкоупругих свойств белковой матрицы (укрепленная матрица ограничивает подвижность жировых глобул, подавляя их ортокинетическую агрегацию).

Водная фаза в плавленом сыре также претерпевает модификацию. Гидролизированный коллаген проявляет выраженную гидрофильность благодаря высокому содержанию полярных аминокислот (например гидроксипролин). Это приводит к связыванию свободной воды и равномерному распределению влаги. Пептиды гидролизованного коллагена (группы -ОН гидроксипролина и -COOH глутаминовой кислоты) формируют гидратные оболочки вокруг своих гидрофильных групп, что снижает активность воды и уменьшает подвижность водной фазы. Гидратированные пептиды ГК интегрируются в казеиновую сеть, формируя биополимерные комплексы, которые равномерно распределяют воду в белковой матрице и способствуют ее иммобилизации. На микрофотографиях

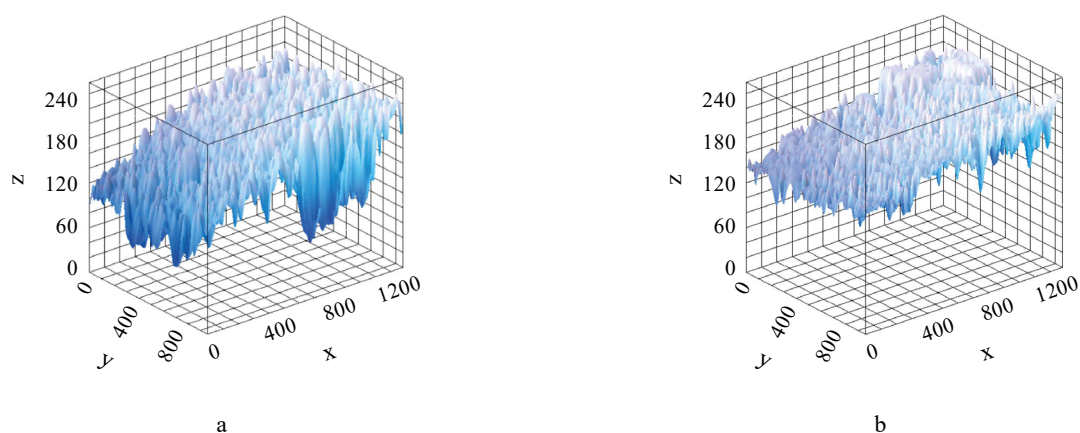


Рисунок 3. Оценка однородной белковой матрицы в образцах плавленого пастообразного сыра: а – без наполнителей (контроль); б – с коллагеном (опыт)

Figure 3. Homogeneous protein matrix: a – control; b – experimental sample with collagen

это проявляется как уменьшение макропор и отсутствие зон локальной дегидратации.

Одним из ключевых параметров, влияющих на потребительские характеристики плавленых сыров, являются реологические свойства: вязкость, адгезия, упругость и прочность. Включение ГК в рецептуру пищевых систем отражается на их гидратационных свойствах и может оказывать значительное влияние на реологическое поведение конечного продукта.

Образец с коллагеном в значительно большей степени обладает вязкостными и адгезионными свойствами по сравнению с контрольным образцом, что визуально выражается в большей степени налипания на индентор.

На рисунке 4 представлены графики, отображающие величину сопротивления деформации (напряжение сдвига), которое оказывает плавленый сыр погружаемому в него индентору. Напряжение сдвига сначала минимально, затем увеличивается с глубиной, достигает максимума, а после наблюдается тенденция

к стабилизации. Такое поведение типично для пластичных материалов: сначала деформируются упруго, затем – пластически.

Образец сыра с коллагеном в значительно большей степени обладает вязкостными и адгезионными свойствами по сравнению с контрольным образцом. Анализ данных (рис. 4а) наглядно подтверждает увеличение вязкости в опытном образце сыра по сравнению с контрольным, включение ГК в рецептуру сыра увеличивает сопротивление деформации. Зависимость напряжения сдвига от глубины погружения имеет нелинейный характер, что соответствует неньютоновскому поведению.

На кривых отчетливо видно отсутствие пиков предела прочности как в момент начала эксперимента (соприкосновения поверхности сыра с индентором), так и на протяжении всего хода эксперимента при погружении прямого горизонтального индентора в образцы плавленого сыра на глубину до 50 мм со скоростью 10 мм/с. Нарастание напряжения сдвига шло

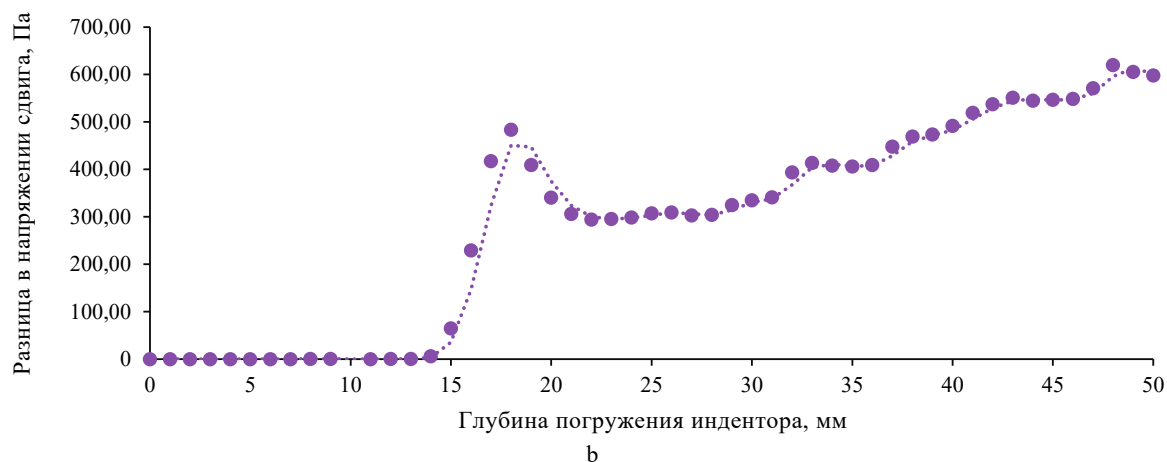
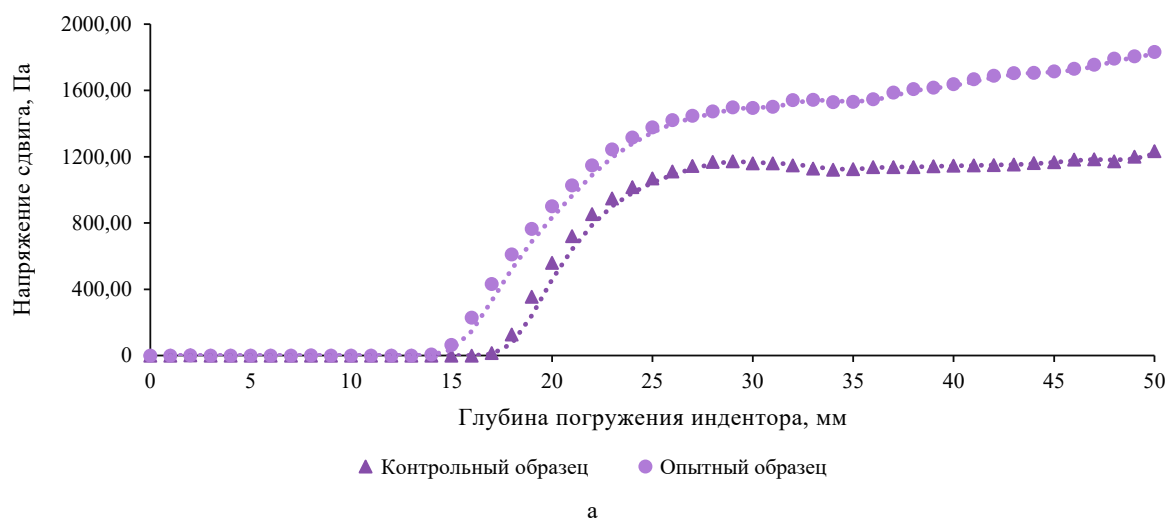


Рисунок 4. Реограммы плавленого пастообразного сыра: а – зависимость напряжения сдвига от глубины погружения индентора; б – различия между образцами

Figure 4. Rheograms of cheese spread samples: а – effect of indenter immersion on shear stress; б – differences across samples

достаточно плавно, резкого падения после превышения предела прочности в образцах не наблюдалось. В контрольном образце плавленого сыра напряжение сдвига плавно росло до $\sim 1234,00$ Па, затем стабилизировалось. Отсутствие явно выраженных пиков указывает на пластичное поведение.

В опытном образце максимальное напряжение сдвига достигало $\sim 1833,00$ Па, рост сопротивления деформации более выражен, отмечалась высокая адгезия: налипание на индентор. На глубине 50 мм среднее напряжение сдвига для контрольного образца составило $1234,31 \pm 152,88$ Па, а для опытного – $1832,60 \pm 186,69$ Па. Сопротивление деформации для образца сыра с коллагеном составило 1832,60 Па, что на 48 % выше контроля (1234,31 Па).

Сопротивление погружению индентора в исследуемые образцы по мере продвижения менялось в зависимости от степени структурообразования в сырах. Анализ скорости изменения напряжения сдвига показал, что в контрольном образце средняя скорость изменения напряжения сдвига составила $\sim 24,50$ Па/мм (равномерное нарастание напряжения сдвига), минимальная скорость 0,49 Па/мм (локальное разупрочнение), в опытном образце средняя скорость изменения напряжения сдвига $\sim 34,30$ Па/мм, отмечаются локальные аномалии (65,17 Па/мм на глубине 15–20 мм), связанные с усилением структурирования. Таким образом, влияние ГК выразилось в возрастании средней скорости изменения напряжения сдвига, вязкость в опытном образце возросла на 40 % по сравнению с контролем.

Рисунок 4b позволяет количественно оценить различия – максимальная разница в напряжении сдвига на инденторе составляет $\sim 588,00$ Па, средняя разница между образцами $\sim 392,00$ Па.

При соблюдении условий значимость отличий средних двух групп (контроль, опыт) можно оценить по t -критерию Стьюдента. Нормальность распределения подтверждена с использованием критерия Шапиро-Уилка. Однако, поскольку по критерию Левена равенство дисперсий не подтвердилось ($p < 0,05$) и условия для t -критерия Стьюдента не соблюдены, для сравнения групп применен t -критерий Уэлча. Получено значение $p = 0,024$. Так как $p < 0,05$, нулевая гипотеза о равенстве средних отвергается, разница в 392,00 Па между образцами не случайна и статистически значима.

С целью кросс-валидации расчетов при нарушении условия гомоскедастичности дополнительно проведен дисперсионный анализ (ANOVA) с поправкой Уэлча для оценки значимости различий и внутригрупповой вариабельности между контрольным и опытным образцами (по тесту Шапиро-Уилка распределения нормальны, по критерию Левена дисперсии неравны). Контрольный образец: среднее напряжение сдвига – 1234,31 Па, стандартное отклонение – 152,88 Па. Опытный образец: среднее напряжение сдвига 1832,60 Па, стандартное отклонение 186,69 Па.

Результаты показали, что F -статистика равна 43,21, p -value $< 0,001$, что указывает на статистически значимые различия между группами. Коэффициент вариации для контрольного образца составил 12,3 % (152,88 Па), для опытного – 10,2 % (186,69 Па), что указывает на более высокую дисперсию в группе с коллагеном. Межгрупповая вариабельность – 598,29 Па (48 % от среднего значения контрольного образца). И параметрический тест по t -критерию Уэлча, и однофакторный анализ (ANOVA) подтвердили статистическую значимость различий в реологических свойствах образцов.

Внесение гидролизованного коллагена в смесь для плавления увеличило вязкость сыра, но практически не обеспечило прочностных свойств – характерных пиков предела прочности в экспериментальном образце не наблюдалось. Коллаген конкурирует с казеином за Ca^{2+} -связи, что снижает эффективность образования ковалентных сшивок, вместо этого формируются водородные связи с гидрофобными участками коллагена, что объясняет вязкостное, а не упругое поведение системы. Можно сделать вывод, что вязкие свойства преобладают над упругими, сыр остается пластичным, что хорошо для пастообразных продуктов. Хотя пластичность сохраняется, вязкость увеличивается, что способствует улучшению удержания формы при нагреве (является положительным эффектом для горячих блюд с сыром).

Отмечено неньютоновское поведение образцов: напряжение сдвига растет нелинейно с глубиной погружения индентора. Реологическое поведение образцов плавленого сыра с ГК хорошо описывает модель Сиско, которая позволяет охарактеризовать нелинейное поведение материалов, когда при низких скоростях деформации доминирует вязкость, а при высоких – упругость.

Предположительно, в основе выявленных закономерностей лежат следующие основные механизмы:

- гидратация пептидов коллагена $\rightarrow$ рост вязкости за счет связывания воды;
- адсорбция на жировых глобулах $\rightarrow$ усиление адгезии;
- отсутствие ковалентных сшивок $\rightarrow$ сохранение низкой прочности.

Гидролизированный коллаген взаимодействует с белково-липидной матрицей плавленого сыра. Полярные группы ($-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$) глицина и аланина формируют гидратные оболочки вокруг пептидов коллагена, увеличивая общую гидратационную емкость пищевой системы, что приводит к снижению подвижности свободной воды в сырной массе и росту вязкости в опытном образце сыра. Пролин нарушает упорядоченность казеиновых мицелл, следовательно увеличивает площадь контакта между белковыми фазами и водой, усиливая вязкоупругие свойства. Коллагеновые пептиды, благодаря наличию гидрофильных участков, адсорбируются на поверхности жировых глобул, формируя межфазные слои. Это усиливает адгезию между жировой и водной фазами (визуально проявляется в налипании массы на индентор). Коллаген конкурирует с казеином за участки гидратации, что вызывает

частичную дестабилизацию белковой сети. Это объясняет отсутствие роста прочности, несмотря на увеличение вязкости. Схематично модель взаимодействия можно представить как: казеин- Ca^{2+} -казеин + коллаген $\rightarrow$ казеин-коллаген (водородные связи) + Ca^{2+} (слабые ионные связи). Такие связи менее устойчивы к деформации, чем кальций-опосредованные сшивки казеина, они снижают предел прочности.

Увеличение вязкости опытного образца связано с формированием псевдосетки за счет водородных связей между коллагеном и казеином и с повышением плотности жировой фазы из-за адсорбции коллагена на глобулах. Классический предел прочности в сырах возникает при разрушении ковалентных сшивок в белковой сетке. В нашем случае коллаген не образует таких связей, что регистрируется как плавный рост напряжения сдвига и отсутствие влияния на предел прочности. Отсутствие пиков предела прочности свидетельствует о том, что коллаген в сырной массе не формирует жесткую белковую матрицу. Это критично для пастообразных сыров, где пластичность – ключевой параметр.

Гидролизированный коллаген рекомендован к использованию в составе плавленых сыров, требующих высокой адгезии и пластичности (например пастообразные сыры, сыры для соусов). Использование ГК не рекомендовано в сырах, где важна высокая структурная прочность (например ломтевые сыры, колбасный сыр). Полученные результаты открывают перспективы для дальнейшей оптимизации текстуры плавленых пастообразных сыров.

Выводы

Включение 3,1 % гидролизованного коллагена (ГК) в рецептуру способствует улучшению структурно-механических свойств плавленых пастообразных сыров. Добавление ГК в состав плавленого сыра приводит к уплотнению белковой матрицы и стабилизации жировой эмульсии за счет полимерно-коллоидных взаимодействий между коллагеновыми пептидами и казеином, что проявляется в уменьшении размера жировых глобул на 44 %, отсутствии их коалесценции и кластеризации, снижении на 20 % пористости беловой матрицы и повышении однородности распределения водной фазы. Введение ГК в рецептуру приводит к увеличению адгезии и вязкости плавленого сыра на 40 %. Это указывает на формирование псевдосетки, но не обеспечивает прочностных свойств, что связано с отсутствием ковалентных сшивок. Вязкие свойства преобладают над упругими, благодаря чему сыр сохраняет пластичность, которая является положительным качеством для пастообразных продуктов.

Гидролизированный коллаген действует как многофункциональный модификатор структуры плавленого пастообразного сыра, обеспечивая формирование гибридной казеин-коллагеновой матрицы с повышенной прочностью поперечных связей, коллоидную стабилизацию жировой эмульсии через механизмы Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека, а также через контроль активности воды за счет гидратации пептидов. Эти изменения коррелируют с улучшением микроструктурных и реологических характеристик плавленого сыра, что подтверждается данными микроскопии, статистическим анализом и изучением теоретических механизмов стабилизации эмульсий.

ГК рекомендован к использованию в составе плавленых сыров, требующих высокой адгезии и пластичности (пастообразные сыры, сыры для соусов). Для сыров, в которых важна высокая структурная прочность (ломтевые сыры, колбасный сыр), использование гидролизованного коллагена не рекомендуется.

Критерии авторства

Все авторы внесли равный вклад в исследование и несут равную ответственность за информацию, опубликованную в данной статье.

Конфликт интересов

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

Благодарности

Выражаем благодарность д-ру техн. наук, профессору А. А. Майорову («Сибирский НИИ сыроделия» ФГБНУ ФАНЦА) за организацию реологических исследований образцов плавленого сыра.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility 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.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to A.A. Mayorov, Doctor of Technical Sciences, Siberian Research Institute of Cheese Production, Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnology, Barnaul, for assisting in the rheological research.

Список литературы / References

1. Gunasekaran S, Ak MM, Everett DW. Cheese Rheology and Texture. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press; 2025. 502 p. <https://doi.org/10.1201/9781003298243>

2. Šantová K, Salek RN, Kůrová V, Mizera A, Lapčíková B, *et al.* Potassium-based emulsifying salts in processed cheese: A rheological, textural, tribological, and thermal approach. *Journal of Dairy Science*. 2024;107(10):7704–7717. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24939>
3. Тутельян В. А., Мусина О. Н., Балыхин М. Г., Щетинин М. П., Никитюк Д. Б. Цифровая нутрициология: применение информационных технологий при разработке и совершенствовании пищевых продуктов. Москва, Барнаул: Азбука; 2020. 378 с. [Tutelian VA, Musina ON, Balykhin MG, Shchetinin MP, Nikityuk DB. Digital nutrition: Information technology in developing and improving food products. Moscow, Barnaul: Azbuka; 2020. 378 p. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/CPPPPOW>
4. Musina O, Putnik P, Koubaa M, Barba FJ, Greiner R, *et al.* Application of modern computer algebra systems in food formulations and development: A case study. *Trends in Food Science & Technology*. 2017;64:48–59. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.011>
5. Drewnowski A, Detzel P, Klassen-Wigger P. Perspective: Achieving sustainable healthy diets through formulation and processing of foods. *Current Developments in Nutrition*. 2022;6(6):nzac089. <https://doi.org/10.1093/cdn/nzac089>
6. Santiago-López L, García-Romo JS, Hernández-Mendoza A, Vallejo-Córdoba B, González-Córdova AF. Insights into health-promoting components in cheese beyond bioactive peptides. *ACS Food Science & Technology*. 2024;4(3):537–548. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.3c00516>
7. Fernandes J, Gomes S, Reboredo FH, Pintado ME, Amaral O, *et al.* Clean label approaches in cheese production: Where are we? *Foods*. 2025;14(5):805. <https://doi.org/10.3390/foods14050805>
8. Solhi P, Azadmard-Damirchi S, Hesari J, Hamishehkar H. Production of the processed cheese containing tomato powder and evaluation of its rheological, chemical and sensory characteristics. *Journal of Food Science and Technology*. 2020;57(6):2198–2205. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04256-1>
9. El-Aidie S, Mabrouk A, Abd-Elgawad AR, El-Garhi H-EM. Physicochemical, textural and organoleptic properties of functional processed cheese manufactured from ultrafiltered milk. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2023;51:102798. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102798>
10. Kratochvílová A, Salek RN, Vašina M, Lorencová E, Kůrová V, *et al.* The impact of different hydrocolloids on the viscoelastic properties and microstructure of processed cheese manufactured without emulsifying salts in relation to storage time. *Foods*. 2022;11(22):3605. <https://doi.org/10.3390/foods11223605>
11. Fu W, Yano H. Exploring melting behaviours of different cheese products by structural characteristics and rheological properties. *International Journal of Dairy Technology*. 2022;75(4):874–881. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12895>
12. Kůrová V, Salek RN, Černíková M, Lorencová E, Zalešáková L, *et al.* Furcellaran as a substitute for emulsifying salts in processed cheese spread and the resultant storage changes. *International Journal of Dairy Technology*. 2022;75(3):679–689. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12871>
13. Asaduzzaman M, Haque E, Haque MA, Mahomud MS, Alam MR. Emulsification potential of milk fat globule membrane material microfiltrated from buttermilk whey. *International Food Research Journal*. 2023;30(2):334–342. <https://doi.org/10.47836/ifrj.30.2.05>
14. Wang C, Qiao X, Gao Z, Jiang L, Mu Z. Advancement on milk fat globule membrane: Separation, identification, and functional properties. *Frontiers in Nutrition*. 2022;8:807284. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.807284>
15. Schädle C, Büttner A. Impact of fat replacers on the rheological, tribological, and aroma release properties of reduced-fat model emulsion systems and processed cheese. *Lebensmittelchemie*. 2023;77(S2):S2-024–S2-025. <https://doi.org/10.1002/lemi.202352206>
16. Truong T, Bhandari B. Role of differentiated-size milk fat globules on the physical functionality of dairy-fat structured products. In: Truong T, Lopez C, Bhandari B, Prakash S, editors. *Dairy Fat Products and Functionality*. Cham: Springer; 2020. P. 327–354. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41661-4_14
17. Vollmer AH, Kieferle I, Youssef NN, Kulozik U. Mechanisms of structure formation underlying the creaming reaction in a processed cheese model system as revealed by light and transmission electron microscopy. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(9):9505–9520. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-20080>
18. Lee SK, Klostermeyer H, Schrader K, Buchheim W. Rheological properties and microstructure of model processed cheese containing low molecular weight emulsifiers. *Nahrung*. 1996;40(4):189–194. <https://doi.org/10.1002/food.19960400406>
19. Mulsow BB, Jaros D, Rohm H. Processed cheese and cheese analogues. In: Tamime A, editor. *Structure of Dairy Products*. Oxford: Blackwell; 2007. P. 180–200. <https://doi.org/10.1002/9780470995921.ch8>
20. Błaszak B, Gozdecka G, Shyichuk A. Carrageenan as a functional additive in the production of cheese and cheese-like products. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*. 2018;17(2):107–116. <https://doi.org/10.17306/J.AFS.0550>
21. Makshakova ON, Zuev YF. Interaction-induced structural transformations in polysaccharide and protein-polysaccharide gels as functional basis for novel soft-matter: A case of carrageenans. *Gels*. 2022;8(5):287. <https://doi.org/10.3390/gels8050287>
22. Ahmad S, Butt MS, Pasha I, Sameen A. Quality of processed cheddar cheese as a function of emulsifying salt replaced by κ-carrageenan. *International Journal of Food Properties*. 2016;19(8):1874–1883. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1085396>

23. Voroshilin RA, Kurbanova MG, Ostapova EV, Makhambetov EM, Petrov AN. Effect of gelatin drying methods on its amphiphilicity. *Foods and Raw Materials*. 2022;10(2):252–261. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-534>
24. Voroshilin RA. Technology of enzymatic-acid hydrolysis of bone raw material in production of gelatine. *Theory and Practice of Meat Processing*. 2021;6(3):279–284. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2021-6-3-279-284>
25. León-López A, Morales-Peñaloza A, Martínez-Juárez VM, Vargas-Torres A, Zeugolis DI, et al. Hydrolyzed collagen-sources and applications. *Molecules*. 2019;24(22):4031. <https://doi.org/10.3390/molecules24224031>
26. da Mata Rigoto J, Ribeiro THS, Stevanato N, Sampaio AR, Ruiz SP, et al. Effect of açai pulp, cheese whey, and hydrolysate collagen on the characteristics of dairy beverages containing probiotic bacteria. *Journal of Food Process Engineering*. 2019;42:e12953. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12953>
27. de Castro Santana R, Sato ACK, da Cunha RL. Emulsions stabilized by heat-treated collagen fibers. *Food Hydrocolloids*. 2012;26(1):73–81. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.006>
28. Javad Ataie M, Seyed PHS, Seyed HJ. Gelatin from bones of bighead carp as a fat replacer on physicochemical and sensory properties of low-fat mayonnaise. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2019;8(4):979–983. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2019.8.4.979-983>
29. Hjelm L, Mielby LA, Gregersen S, Eggers N, Bertram HC. Partial substitution of fat with rye bran fibre in Frankfurter sausages – Bridging technological and sensory attributes through inclusion of collagenous protein. *LWT*. 2019;101:607–617. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.055>
30. Tang Z, Yang S, Li W, Chang J. Fat replacers in frozen desserts: functions, challenges, and strategies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025;24(3):e70191. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70191>
31. Biswal S, Agmon N. Collagen structured hydration. *Biomolecules*. 2023;13(12):1744. <https://doi.org/10.3390/biom13121744>
32. Гиро Т. М., Зубов С. С., Яшин А. В., Гиро А. В., Преображенски В. А. Биомодификация коллагенсодержащих субпродуктов методом ферментативного гидролиза. *Техника и технология пищевых производств*. 2019. Т. 49. № 2. С. 262–269. [Giro TM, Zybov SS, Yashin AV, Giro AV, Preobrazhensky VA. Biomodification of collagen-containing by-products by enzymatic hydrolysis. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019;49(2):262–269. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-262-269>
33. Гинзбург М. А., Дунченко Н. И. Влияние вида коллагена на структурно-механические свойства сметанных продуктов. *Молочная промышленность*. 2023. № 4. С. 25–27. [Ginzburg MA, Dunchenko NI. Influence of the type of collagen on the structural and mechanical properties of sour cream products. *Dairy industry*. 2023;(4):25–27. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2023-04-25-27>
34. Al Hajj W, Salla M, Krayem M, Khaled S, Hassan HF, et al. Hydrolyzed collagen: Exploring its applications in the food and beverage industries and assessing its impact on human health – A comprehensive review. *Heliyon*. 2024;10(16):e36433. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36433>
35. Soutelino MEM, da Silva Rocha R, de Oliveira BCR, Mársico ET, de Oliveira Silva AC. Technological aspects and health effects of hydrolyzed collagen and application in dairy products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024;64(18):6120–6128. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2163974>
36. Мусина О. Н., Нагорных Е. М. Влияние коллагена на структурно-механические характеристики плавленого сыра. *Ползуновский вестник*. 2023. № 2. С. 112–118. [Musina ON, Nagornyh EM. Investigation of the possibility of using hydrolyzed collagen in processed cheese technology. *Polzunovskiy vestnik*. 2023;(2):112–118. (In Russ.)] <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.014>