

¹ Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, г. Могилев, Беларусь

² Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Российская Федерация

³ ООО «Хэлси Фуд», г. Москва, Российская Федерация

⁴ Российский биотехнологический университет, г. Москва, Российская Федерация

Применение растительных эмульсионных гелей в технологии мягкой карамельной массы

В.А. Васькина¹, А.А. Быков², Е.С. Новожилова¹, С.А. Бутин³,
Е.Н. Молчанова⁴, А.Г. Чернобровина⁴

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Валентина Андреевна Васькина

E-mail: v.a.vaskina@inbox.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Васькина, В.А., Быков, А.А., Новожилова, Е.С., Бутин, С.А., Молчанова, Е.Н., & Чернобровина, А.Г. (2025). Применение растительных эмульсионных гелей в технологии мягкой карамельной массы. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(2), 166–184. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.648>

ПОСТУПИЛА: 13.12.2024

ПРИНЯТА: 15.06.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.06.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Актуальность разработки рецептур кондитерских изделий на растительной основе обусловлена необходимостью снижения содержания насыщенных жиров и отказа от компонентов животного происхождения. В условиях повышенного спроса на функциональные продукты питания особое внимание привлекают эмульсионные системы, способные заменить традиционные жиры, сохраняя дисперсную структуру и органолептические свойства продукта.

Цель: Разработка рецептуры мягкой карамельной массы с использованием эмульсионных гелей, содержащих подсолнечное масло, инкапсулированное в гидроколлоидные оболочки на основе изолята соевого белка и тройных полисахаридных комплексов.

Материалы и методы: В эксперименте использовались четыре варианта полисахаридных комплексов: (A+C+G), (A+C+P), (A+G+P), (C+G+P), где А – альгинат натрия, С – карбоксиметилцеллюлоза, G – гуммиарабик, P – пектин. Эмульсионные гели на основе БПС формировались с подсолнечным маслом и использовались в рецептуре карамели вместо молочного жира и белков. Оценка включала определение пенообразующей и эмульгирующей способности, гранулометрический анализ капель масла, измерение плотности и влажности, органолептическую оценку, рентгеновскую томографию, а также температурные и физико-химические параметры в процессе уваривания.

Результаты: Установлено, что наиболее эффективным по совокупности параметров являлся полисахаридный комплекс (A+G+P), формирующий дисперсии с радиусом масляных капель 1–2 мкм. Введённый эмульсионный гель обеспечил снижение времени уваривания на 25 % и стабильную структуру пенно-эмульсионного геля. Органолептическая оценка опытных образцов показала сопоставимые или лучшие показатели по сравнению с традиционной рецептурой. Микроструктурный анализ подтвердил равномерное распределение капель масла и отсутствие признаков коалесценции.

Выводы: Применение белково-полисахаридных эмульсионных гелей позволяет заменить молочные компоненты в рецептуре мягкой карамели, обеспечивая желаемые технологические свойства и открывая перспективы создания функциональных продуктов на растительной основе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

эмульсионные гели; инкапсуляция; белково-полисахаридный комплекс; растительное масло; соевый белок; мягкая карамель; гидроколлоиды; пищевая технология

Сокращения:

БПС – белок-полисахаридная смесь

ПНЖК – полиненасыщенные жирные кислоты

ИБС – изолят белка сои

A – альгинат натрия

C – натрий карбоксиметилцеллюлоза

G – гуммиарабик

P – пектин

Application of Plant-Based Emulsion Gels in Soft Caramel Technology

Valentina A. Vaskina¹, Alexander A. Bykov², Elena S. Novozhilova¹, Sergey A. Butin³, Elena N. Molchanova⁴, Antonina G. Chernobrovina⁴

¹ Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Mogilev, Belarus

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia

³ LLC Healthy Food, Moscow, Russia

⁴ Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH), Moscow, Russia

CORRESPONDENCE:

Valentina A. Vaskina

E-mail: v.a.vaskina@inbox.ru

FOR CITATIONS:

Vaskina V.A., Bykov A.A., Navazhylava A.S., Butin S.A., Molchanova E.N., & Chernobrovina A.G. (2025). Application of plant-based emulsion gels in soft caramel technology. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(2), 166–184. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.648>

RECEIVED: 13.12.2024

ACCEPTED: 15.06.2025

PUBLISHED: 31.06.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: The relevance of developing recipes for plant-based confectionery products is due to the need of reducing the content of saturated fats and eliminating animal-based components. In the context of increased demand for functional foods, special attention is drawn to emulsion systems that can replace traditional fats while maintaining the dispersed structure and organoleptic properties of the product.

Purpose: To develop a recipe for soft caramel mass using emulsion gels containing sunflower oil encapsulated in hydrocolloid shells based on soy protein isolate and triple polysaccharide complexes.

Materials and Methods: Four variants of polysaccharide complexes were used in the experiment: (A + C + G), (A + C + P), (A + G + P), (C + G + P), where A is sodium alginate, C is carboxymethyl cellulose, G is gum arabic, P is pectin. Emulsion gels based on BPS were formed with sunflower oil and used in the caramel recipe instead of milk fat and proteins. The evaluation included determination of foaming and emulsifying capacity, analysis of droplet size distribution, density and moisture measurement, organoleptic evaluation, X-ray tomography, as well as temperature and physicochemical parameters during the boiling process.

Results: It was found that the most effective in terms of the combination of parameters is the polysaccharide complex (A + G + P), forming dispersions with an oil droplet radius of 1–2 μm. The introduced emulsion gel ensured a 25% reduction in boiling time and a stable structure of the foam-emulsion gel. Organoleptic evaluation of the test samples showed comparable or better performance compared to the traditional recipe. Microstructural analysis confirmed a uniform distribution of oil droplets and the absence of signs of coalescence.

Conclusions: The use of protein-polysaccharide emulsion gels allows replacing dairy components in the recipe for soft caramel, providing the desired technological properties and opening the prospects for creating functional plant-based products.

KEYWORDS

emulsion gels; encapsulation; protein-polysaccharide complex; vegetable oil; soy protein; soft caramel; hydrocolloids; food technology

List of abbreviations:

PPM – protein-polysaccharide mixture

PUFA – polyunsaturated fatty acids

SPI – soy protein isolate

A – sodium alginate

C – carboxymethyl cellulose

G – gum arabic

P – pectin

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающий интерес потребителей к продуктам для здорового питания стимулирует ученых и производителей к созданию нового поколения кондитерских изделий с функциональными компонентами. Одной из стратегий получения такой продукции является замена в рецептурах компонентов животного происхождения на ингредиенты из растительного сырья, что позволит улучшить качество изделий, расширить их ассортимент, а также притягивать новых потребителей.

Наибольшим спросом у потребителей пользуются карамель, конфеты, печенье, торты и пирожные, содержащиеся в качестве начинки или полуфабриката мягкую карамельную массу, отличающуюся гелевой текстурой, мягким сливочным вкусом и нежным таянием в ротовой полости. В рецептуре мягкой карамели содержатся два тривиальных компонента: молочные продукты (масло сливочное или безводный молочный жир, молоко цельное сгущенное с сахаром, молоко цельное сухое) и сахаросодержащие (сахар, патока или кукурузный сироп), также в малом количестве вкусоароматические и красящие добавки (ванилин, соль, какао-продукты и др.).

Значимыми компонентами в мягкой карамельной массе являются белки молока и сливочное масло, которые определяют такие характеристики продукта, как тип дисперсной структуры, наличие или отсутствие в ней гелевой текстуры, так и позитивный вкус, аромат. При термообработке компонентов мягкой карамельной массы происходит видоизменение структуры белков молока, которые из глобулярного состояния разворачиваются, затем вытягиваются, а далее превращаются в длинные, гибкие и эластичные амилоидные фибриллы (Jansens et al. 2019), создающие оболочки на каплях жира, пузырьках воздуха, а также гелевую текстуру в сплошной среде (Chen et al., 2023). В итоге, в массе мягкой карамели создается дисперсная система «пена-эмульсионный гель», где сплошной средой является насыщенный «сахаро-паточно-молочный сироп», в который вмещаются две фазы: жидкая (капельки сливочного масла) и газовая (пузырьки воздуха). При охлаждении мягкой карамельной массы происходит образование гелевой текстуры в сплошной

среде, а капельки сливочного масла из жидкого состояния переходят в твердое, что упрочняет гелевую структуру массы (Weir et al., 2016).

Главным недостатком мягкой карамельной массы на основе молочных компонентов является формирование слабой гелевой текстуры в сплошной среде. Известно, что белки молока, состоящие из мицелл казеина (80%) и сывороточных белков (20%), относятся к амфифильным молекулам с высокой реакционной способностью, обеспечивающих пенообразование, эмульгирование и гелеобразование (Wang et al., 2019). Мицеллы казеина стабильны при термообработке. Сывороточные белки при нагревании до температуры 70–75 °С выпадают в осадок в результате денатурации с образованием индуцированных агрегатов (Guyomarc'h et al., 2021). Образование слабой гелевой текстуры в мягкой карамельной массе, вероятно, связано с деградацией сывороточных белков, принявших температурный сдвиг при получении молока цельного сгущенного с сахаром.

Еще одним недостатком мягкой карамельной массы является присутствие молочного жира, входящего в состав всех молочных ингредиентов рецептуры (молоко, сливочное масло) и являющегося источником насыщенных жирных кислот, включая транс-изомеры, образующиеся в организме жвачных животных. В составе липидов молока наибольшая доля приходится на высокоплавкие триацилглицериды, которые кристаллизуются при комнатной температуре и состоят из комбинации насыщенных и трансизомеров жирных кислот (Marangoni & Garti, 2011). При употреблении животных жиров в организм человека поступают насыщенные жирные кислоты и лишний холестерин, что порождает проблемы со здоровьем¹. По этой причине производители кондитерской продукции стремятся заменить в рецептурах жировой продукт жидким растительным маслом и ведут активный поиск альтернативных решений проблемы.

Максимальную популярность в технологии кондитерских изделий приобрел способ, позволяющий твердые жиры заменить жидким маслом, которое структурируется при содействии олеогелляторов, формирующих им термическое поведение, ме-

¹ World Health Organization. (2023). *Saturated fatty acid and trans-fatty acid intake for adults and children: WHO guideline*. World Health Organization.

ханическую прочность и реологию (da Silva et al., 2021; Malvano et al., 2024; Arshad et al., 2024; Wu et al., 2024; Yang, et al., 2025). Меньшую известность снискал способ получения эмульсионных гелей, в котором для структурирования жидкого масла применяются поверхностно-активные вещества (Kamer et al., 2024). В последнее время в технологии кондитерских изделий применяются бигели, гидрогели и гибридные гели, что выявляет новые возможности для улучшения текстуры, стабильности и вкусовых характеристик продукта (Almeida et al., 2024; Zhou et al., 2025; Banaś et al., 2024)

Выбор стенового материала (оболочки или покрытия капсулы) для проведения инкапсуляции масел является важной стадией, создающей защитный барьер. Наиболее часто для инкапсуляции масел выбирается стеновой материал, состоящий из белков, полисахаридов, а также их смесей (Delshadi et al., 2020). Так, в качестве животного сырья используется часто белки молока, а из растительных протеинов — гороха, риса, сои (Tang et al., 2017; 2019; Xie et al., 2023; Kamer et al., 2024). В качестве полисахаридов применяется агар, альгинаты, гуммиарабик, гуаровая и ксантановая камеди, каррагинан, метилцеллюлоза, пектин и др.

Из технической патентной литературы² известны способы получения мягкой карамели, в которых взамен молочного белка применяется преимущественно желатин, реже - сывороточный белок. Желатин выполняет функции студне- и пенообразователя, к которому часто добавляют лецитин как эмульгатор для улучшения структуры эмульсии, а также используют твёрдые высокоплавкие масла (сливочное, пальмовое, кокосовое и др.) и жиры

(кондитерский, кулинарный, маргарин). В указанных источниках описано, что набухание желатина или сывороточного белка часто проводится в пюре или водных растворах порошков из овощей, фруктов, ягод, растительных жмыхов, а также с добавлением полисахаридов (натрий-карбоксиметилцеллюлозы). При этом выявляются недостатки: применение компонентов животного происхождения, использование твёрдых жиров с высоким содержанием насыщенных жирных кислот и холестерина, а также фруктово-ягодных пюре и порошков, требующих особых условий хранения и подготовки к производству.

Учитывая выявленные технологические и физиологические ограничения традиционных рецептур, целью данного исследования является разработка мягкой карамельной массы с использованием инкапсулированного растительного масла в оболочках из белково-полисахаридного комплекса. Исследовательские вопросы: RQ1: Какой состав белково-полисахаридной смеси обеспечивает наилучшие характеристики для инкапсуляции подсолнечного масла в форме устойчивого эмульсионного геля? RQ2: Каким образом изменяется процесс термообработки мягкой карамельной массы при переходе от традиционной рецептуры к технологии с использованием растительного эмульсионного геля? RQ3: В чем заключаются различия в физико-химических и микроструктурных характеристиках мягкой карамели, приготовленной по традиционной и новой технологии?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Исследование выполнено в рамках лабораторного контролируемого эксперимента с использованием сравнительного подхода: контрольные образцы (традиционная рецептура) и опытные образцы, приготовленные с использованием различных белково-полисахаридных смесей. Оценка параметров производилась в трехкратной повторности. Экспериментальный план предусматривал поэтапное сравнение характеристик эмульсий, термопрофиля, сенсорных свойств и микроструктуры продуктов.

² Иванов, В. Н., Афанасьева, Г. А., Васильева, Н. Г., & Шарафутдинова, Р. А. (2008). *Состав и способ производства карамельной массы «Мягкая карамель»* (Патент № RU 2325070 C1). Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам; Иванов, В. Н. (2000). *Способ производства карамельной массы «Мягкая карамель»* (Патент № RU 2143821 C1). Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам; Кондратова, И. И., Бандюк, Т. В., Гершончик, К. Н., Вислоухова, С. Н., Числов, Н. Ф., & Матвейчик, И. А. (2014). *Способ производства мягкой карамели* (Патент № ВУ 17964 C1). Национальный центр интеллектуальной собственности; Фролова, Н. А., Верхотуров, В. В., Ульрих, Е. В., & Кирсанов, А. Д. (2024). *Способ получения кондитерского изделия типа «мягкой» карамели* (Патент № RU 2819685 C1). Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

Объекты и материалы

Объектами исследования были образцы мягкой карамельной массы, приготовленной из сахара белого, патоки, сгущенного молока, сливочного и подсолнечного масел, ванилина, изолята соевого белка (ИБС), альгината натрия (А), натрия карбоксиметилцеллюлозы (С), гуммиарабика (G) и яблочного пектина (P). Сырьё и пищевые добавки, приобретённые в торговых сетях, соответствовали требованиям действующей нормативно-технической документации.

Подготовка белково-полисахаридных смесей и эмульсионных гелей

В белково-полисахаридную смесь, состоящую из изолята соевого белка и тройной смеси полисахаридов, добавляли воду, помещали в термостат и выдерживали при температуре $90,0 \pm 2,0$ °С в течение 45–60 минут для набухания биополимеров. Набухшую смесь БПС загружали в сбивальную машину и взбивали в течение 7–10 минут до получения пенной массы, в которую вливали тонкой струйкой растительное масло для получения эмульсии. Соотношение раствора БПС и растительного масла — 2:1.

Приготовление карамельной массы

По традиционной технологии для получения мягкой карамельной массы сахаро-паточный сироп уваривают до влажности 9–11 %. Затем в него при перемешивании вводят сливочное масло и сгущенное молоко. Полученную смесь охлаждают до температуры 70–75 °С, добавляют вкусоароматические и красящие вещества. Рецептúra приведена в Таблице 1.

По новой технологии часть подготовленного раствора БПС (50 %) взбивали с растительным маслом миксером в течение 10 мин для получения капсулированного масла в эмульсии. Другую часть БПС смешивали с сахаром, нагревали до 90 °С до полного растворения кристаллов сахара, добавляли патоку и ванилин и выдерживают при температуре 90 °С в течение 20 мин. Затем в горячую смесь вносили эмульсию капсулированного масла, уваривали до температуры 110 °С и темперировали в течение 20–25 минут. Рецептúra мягкой карамели представлена в Таблице 2.

Таблица 1

Рецептура мягкой карамели по традиционной технологии

Table 1

Formulation of Soft Caramel Using Traditional Technology

Сырье	СВ, %	Расход сырья на 1 т мягкой карамели, кг	
		в натуре	в СВ
Сахар-песок	99,85	174,06	173,80
Патока	78,00	444,41	346,64
Молоко сгущенное	74,00	421,26	311,73
Масло сливочное	84,00	42,43	35,64
Ванилин	—	0,08	—
Итого	—	1082,24	867,81
Выход	86,0	1000,00	860,00

Таблица 2

Рецептура мягкой карамели с применением БПС на основе ИБС и тройной смеси полисахаридов (альгинат натрия, гуммиарабик, пектин)

Table 2

Formulation of Soft Caramel Using PPM Based on SPI and a Ternary Polysaccharide Blend (Sodium Alginate, Gum Arabic, Pectin)

Сырье	СВ	Расход сырья на 1 т мягкой карамели, кг	
		в натуре	в СВ
Сахар-песок	99,85	359,69	359,15
Патока	78,00	541,35	422,25
Растительное масло	100,00	71,45	71,45
Ванилин	99,80	0,08	—
Альгинат натрия	90,00	0,99	0,89
Гуммиарабик	90,00	3,00	2,70
Пектин	90,00	0,60	0,54
Изолят белка сои	95,00	11,40	10,83
Итого	—	988,56	867,81
Выход	86,00	1000,00	860,00

Методы оценки технологических свойств

Пенообразующая способность

В емкость загружали ИБС и полисахаридный комплекс, затем добавляли воду, закрывали плотной крышкой, ставили в термостат, предварительно разогретый до температуры 90 ± 2 °С на 45–60 минут для набухания гидроколлоидов. Набухшую смесь биополимеров взбивали с помощью миксера в течение 30 минут, поддерживая температуру

90 ± 2 °С. Контролем служил раствор ИБС без полисахаридов. Пенообразующую способность выражали как отношение высоты пены к высоте взятой жидкости, в %.

Эмульгирующая способность

Растворы БПС после набухания биополимеров взбивали в течение 7–10 мин для получения пенной массы, в которую тонкой струйкой вливали подсолнечное масло при соотношении 1:1. Полученную эмульсию центрифугировали в течение 5 мин (3000 мин^{-1}), эмульгирующую способность оценивали как процент эмульгированного слоя, оставшегося после центрифугирования.

Термофизические измерения в процессе уваривания

Изменение температуры в процессе уваривания мягкой карамельной массы изучали с помощью термопар (датчиков температуры), которые были установлены в емкости для варки так, чтобы их концы находились в зоне равномерного нагрева и контакта с карамельной массой. Сигналы от термопар регистрировались каждую минуту до достижения температуры, не изменяющейся в течение 15 минут.

Гранулометрический анализ капель масла

Гранулометрический анализ масляных капель в эмульсии анализировали с помощью оптической микроскопии в режиме светлого поля с использованием оптического микроскопа Nikon Eclipse E100. Для повышения точности исследования было проанализировано не менее 100–200 капель, расположенных в различных участках образца. Определение количества и размеров капель выполнялось с помощью программного обеспечения для анализа изображений [ImageJ].

Органолептическая оценка

Качество карамели оценивали в соответствии с требованиями ГОСТ 6477-2019 Карамель. Общие технические условия.

Органолептические свойства готовых изделий (вкус и запах, поверхность, цвет, форма, вид изломе) анализировали по ГОСТ 5897–90. Органолептическую оценку проводили по тридцатибалльной шкале с участием 10 дегустаторов с предварительным кодированием образцов трехзначными цифрами.

Оценка физико-химических свойств готового продукта

Массовую долю влаги определяли термогравиметрическим методом по ГОСТ 5900–2014 содержание редуцирующих веществ — по ГОСТ 5903–89.

Плотность мягкой карамельной массы анализировали объемно-весовым методом, взвешивая готовые изделия на технических весах и измеряя объем, вытесненный изделиями из тарированной емкости, заполненной сыпучим наполнителем.

Микроструктурный анализ (томография)

Срезы томографических изображений образцов карамельной массы были получены с помощью рентгеновского томографа Nanomex 180 и прикладного программного обеспечения Phoenix Datasx 2 Reconstruction от компании Volume Graphics, Германия. Для анализа полученных трехмерных изображений использовалось программное обеспечение VGStudio MAX 2.2.

Статистическая обработка

При обработке экспериментальных данных применялись статистические методы определения средних значений искомой величины из 3-х кратной повторности, стандартного отклонения и доверительного интервала при помощи программного пакета Microsoft Excel 2010.

Данные результатов органолептических оценок были подвергнуты однофакторному дисперсионному анализу (ANOVA). Значимые различия между средними значениями показателей образцов принимались с помощью теста наименьших значимых различий Фишера ($p < 0,05$).

Процедура исследования

В традиционную рецептуру мягкой карамели входят сливочное масло и сгущенное молоко, которые создают в продукте эмульсионную структуру. При замене сливочного масла необходимо для инкапсуляции растительного масла подобрать такой стеновой материал, который при термической обработке будет сохранять ПНЖК и качество мягкой карамели.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние полисахаридных комплексов на пенообразующую и эмульгирующую способности БПС

Проведены исследования поверхностно-активных свойств (пенообразующей и эмульгирующей способностей) белок-полисахаридных смесей (БПС), состоящих из соевого белка (ИБС) и полисахаридов (А, С, G, P), из которых сформированы трехкомпонентные смеси или комплексы: 1-(А+С+G); 2-(А+С+P); 3-(А+G+P) и 4-(С+G+P). Затем полисахаридные комплексы смешивали с соевым белком (ИБС) для получения четырех белок-полисахаридных смесей (БПС), которые далее использовали в качестве оболочек для инкапсуляции растительного масла и создания эмульсионных гелей. В ка-

честве контроля применяли раствор ИБС с концентрацией 6%.

Экспериментальные данные о влиянии полисахаридных комплексов в составе БПС на основе ИБС на их пенообразующую и эмульгирующую способности, представлены на Рисунках 1, 2.

Согласно Рисунка 1, пенообразующая способность Y_{\max} контроля составила 300%. Полисахаридные комплексы, входящие в состав БПС на основе ИБС, по степени снижения пенообразующей способности поставлены в ряд: 3-(А+G+P) > 1-(А+С+G) > 4-(С+G+P) > 2-(А+С+P), что приводит к понижению Y от величины $Y_{3-(A+G+P)} = 560\%$ до $Y_{1-(A+C+G)} = 500\%$, $Y_{4-(C+G+P)} = 400\%$, $Y_{2-(A+C+P)} = 300\%$ соответственно. Следует отметить, что полисахаридные комплексы 1 и 3 обеспечили пенообразующую способность 500% и 560% соответственно, что на 200% и 260% выше контрольного раствора ИБС (300%).

Рисунок 2 демонстрирует, что эмульгирующая способность контроля составила 100%. Полисахаридные комплексы, входящие в состав БПС на основе ИБС, по степени их влияния на эмульгирующую способность распределены в ряд: 1-(А+С+G) = 3-(А+G+P) > 4-(С+G+P) > 2-(А+С+P). Выявлено, что полисахаридные комплексы 1-(А+С+G) и 3-(А+G+P) в составе БПС на основе ИБС организовали эмульсии со 100%-й стойкостью, а комплексы 2-(А+С+P)

Рисунок 1

Влияние полисахаридных комплексов на пенообразующую способность БПС на основе ИБС, $n = 3$

Figure 1

The Influence of Polysaccharide Complexes on the Foaming Ability of PPM Based on SPI, $n = 3$

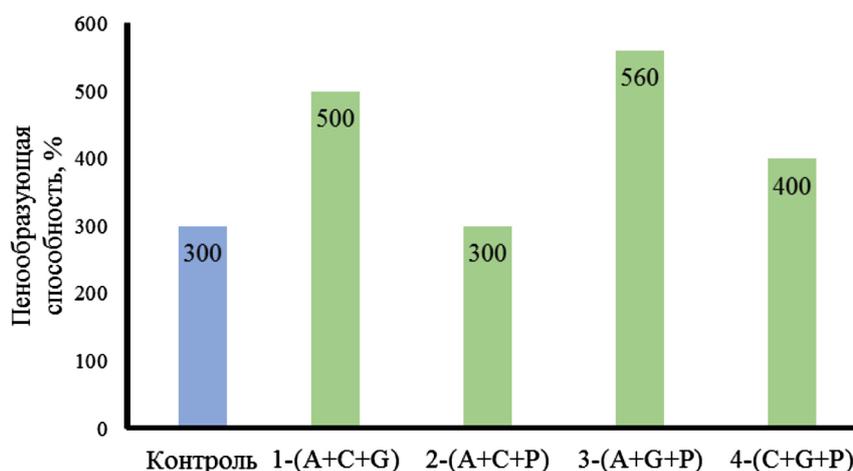
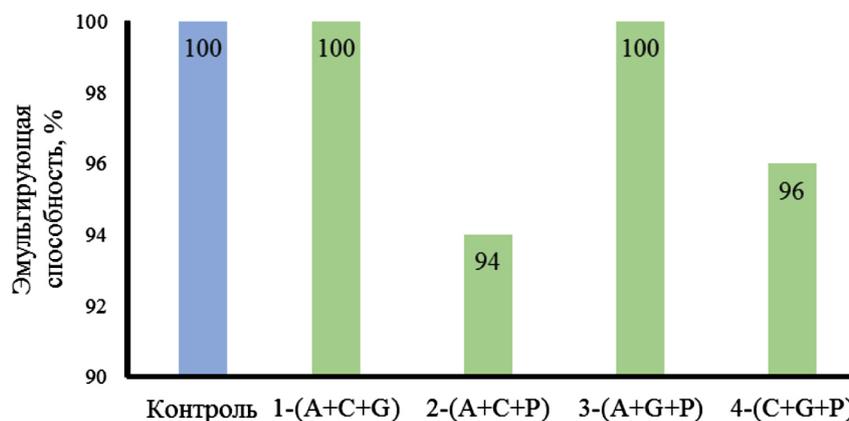


Рисунок 2

Влияние полисахаридных комплексов на эмульгирующие свойства БПС на основе ИБС, $n = 3$

Figure 2

The Influence of Polysaccharide Complexes on the Emulsifying Properties of SPI-Based PPM, $n = 3$



и 4-(C+G+P) — создали системы с 94–96% стойкостью. Потому появляется вопрос, как полисахаридные комплексы 1-(A+C+G) и 3-(A+G+P) в составе БПС воздействуют на гранулометрический состав капель масла в эмульсионных гелях.

Влияние полисахаридных комплексов, входящих в БПС, на гранулометрический анализ капель масла в полученных эмульсионных гелях

Проведены сравнительные исследования влияния полисахаридных комплексов 1-(A+C+G) и 3-(A+G+P) в составе БПС на основе ИБС на частотные распределения размеров капель масла в эмульсионных гелях, представленные на Рисунках 3 а, б, в, г.

Если применялся полисахаридный комплекс 1-(A+C+G) в составе БПС на основе ИБС (Рисунок 3а) для формирования оболочек на каплях масла, то созданный эмульсионный гель имел частотное распределение капель масла по размерам в пределах от 9 мкм до 56 мкм, при этом более 50% частиц имели радиус от 9 мкм до 15 мкм. Если использовали полисахаридный комплекс 3-(A+G+P) в составе БПС на основе ИБС (Рисунок 3б) для организации оболочек на каплях масла, то полученный эмульсионный гель обладал частотным распределением капель масла по размерам в пределах от 1 мкм до 6 мкм, при этом более 70% частиц

имели радиус от 1 мкм до 2 мкм. Таким образом, на размер капель масла в эмульсионном геле большее влияние оказывает состав полисахаридного комплекса, входящего в БПС. Сравнение двух полисахаридных комплексов 1-(A+C+G) и 3-(A+G+P) показало, что замена С на Р приводила к получению эмульсионного геля, в котором размер капель масла снижался в 9 раз. Кроме того, все полученные кривые частотного распределения размеров капель масла, представленные на Рисунках 3а и 3б, являются ниспадающими и не имеют явно выраженных пиков. Это обусловлено тем, что любой метод обнаружения капель масла и их радиус обладают ограничением, где частицы меньше некоторого предельного значения, обнаруженными и измеренными быть не могут.

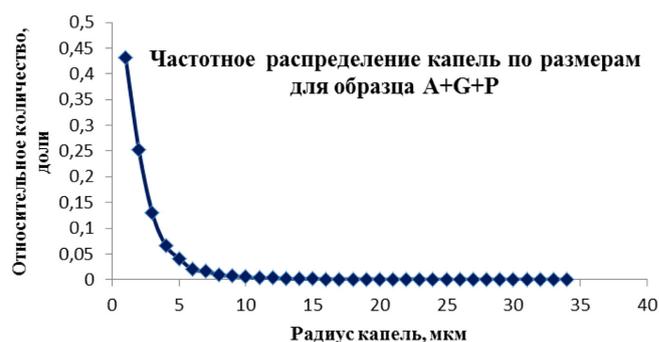
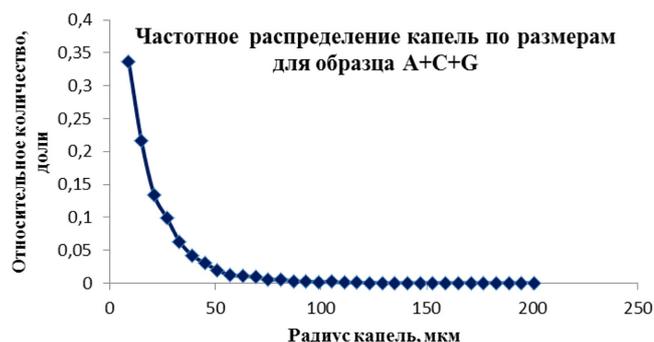
Для проведения дополнительного рассмотрения появилась необходимость анализа относительно распределения капель масла по занимаемому объему. Данная величина находится как произведение объема капли (пропорционально радиусу в кубе) на относительное количество. Результаты показаны на Рисунках 3в и 3г, на которых видно, что зависимости растущие, но резко обрывающиеся при некотором размере капель. Итак, в мягкой карамельной массе по новой технологии будет применяться эмульсионный гель, сформированный из подсолнечного масла в оболочках БПС на основе ИБС и с полисахаридным комплексом 3-(A+G+P).

Рисунок 3 а, б, в, г

Сравнительная характеристика частотного распределения капель масла по размерам в эмульсионных гелях, в которых для инкапсулирования масла использовали оболочки из БПС основе ИБС и с полисахаридными комплексами 1-(А+С+G) и 3-(А+G+P).

Figure 3 а, б, в, г

Comparative Characteristics of the Frequency Distribution of Oil Droplets by Size in Emulsion Gels Obtained by Encapsulating Oil in Shells Made of SPI-Based PPM and with Polysaccharide Complexes 1-(A+C+G) and 3-(A+G+P).

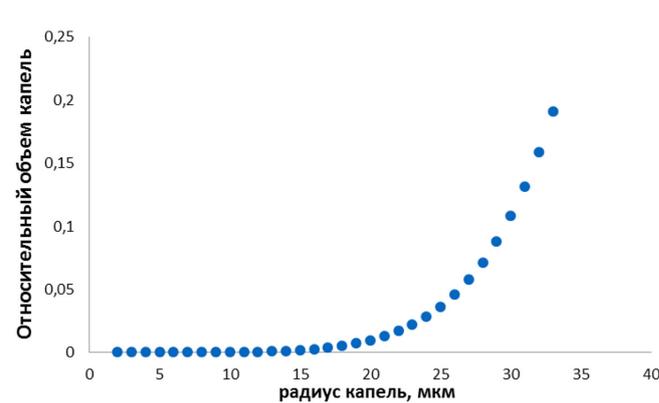
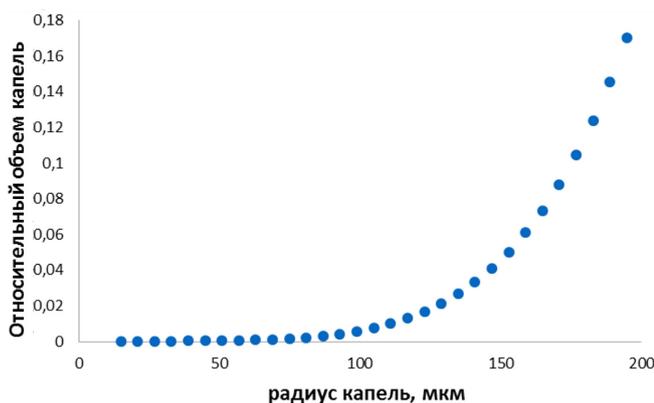


Примечание. 3а. Частотное распределение капель масла по размерам в эмульсионном геле, полученном при инкапсулировании масла в оболочки из БПС на основе ИБС и с полисахаридным комплексом 1-(А+С+G), $n = 3$

Примечание. 3б. Частотное распределение капель масла по размерам в эмульсионном геле, полученном при инкапсулировании масла в оболочки из БПС основе ИБС и с полисахаридным комплексом 3-(А+G+P), $n = 3$

Note. 3a. Frequency distribution of oil droplet sizes in the emulsion gel obtained by encapsulating oil in PPM-based shells using SPI and the polysaccharide complex 1-(A+C+G), $n = 3$.

Note. 3b. Frequency distribution of oil droplet sizes in the emulsion gel obtained by encapsulating oil in PPM-based shells using SPI and the polysaccharide complex 3-(A+G+P), $n = 3$.



Примечание. 3в. Зависимость распределения относительного объема капель масла по занимаемому объему в эмульсионном геле, полученном при инкапсулировании масла в оболочки из БПС основе ИБС и с полисахаридным комплексом 1-(А+С+G), $n = 3$

Примечание. 3 г. Зависимость распределения относительного объема капель масла по занимаемому объему в эмульсионном геле, полученном при инкапсулировании масла в оболочки из БПС основе ИБС и с полисахаридным комплексом 3-(А+G+P), $n = 3$

Note. 3с. Distribution of the relative volume of oil droplets by occupied volume in the emulsion gel obtained by encapsulating oil in PPM-based shells using SPI and the polysaccharide complex 1-(A+C+G), $n = 3$.

Note. 3д. Dependence of the distribution of the relative volume of oil droplets by occupied volume in the emulsion gel obtained by encapsulating oil in PPM-based shells using SPI and the polysaccharide complex 3-(A+G+P), $n = 3$.

Влияние замены молочных компонентов ингредиентами из растительного сырья в рецептуре мягкой карамели на процесс уваривания массы

Проведены исследования процесса термообработки мягких карамельных масс, приготовленных по традиционной и новой технологиям. Экспериментальные данные, иллюстрирующие изменения температуры, содержание сухих и редуцирующих

веществ в процессе термообработки в массах мягкой карамели, представлены на Рисунках 4а, б, с.

Температурные кривые масс мягкой карамели, приготовленных по традиционной и новой технологии, представлены на Рисунке 4а. Видно, что в течение первых 15 минут термообработки профили уравниваются и затем расходятся. В опытном образце наблюдали более быстрое достижение конечной температуры (119 °С за 30

Рисунок 4а

Температурные профили уваривания мягких карамельных масс, приготовленной по технологии: традиционной (1 – Контроль) и новой (2 – Опытный), $n = 3$

Figure 4a

Temperature Profile of Boiling a Mass of Soft Caramel Prepared Using Traditional (1 – Control) and new (2 – Experimental) Technology

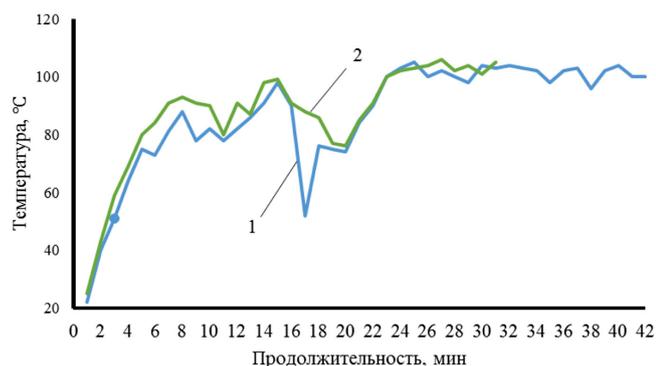


Рисунок 4б

Изменение содержания сухих веществ при уваривании мягких карамельных масс, приготовленной по технологии: традиционной (1 – Контроль) и новой (2 – Опытный), $n = 3$

Figure 4b

Changes in the Content of Dry Substances during Boiling of a Mass of Soft Caramel Prepared Using the Traditional (1 – Control) and New (2 – Experimental) Technology

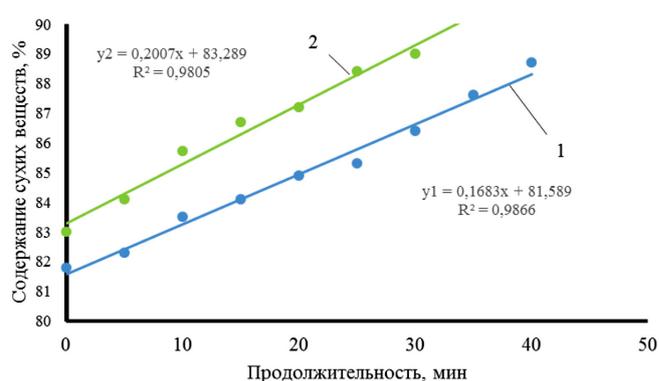
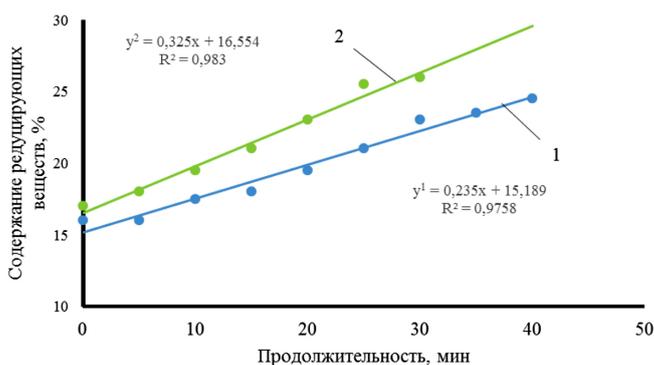


Рисунок 4с

Изменение содержания редуцирующих веществ при уваривании мягких карамельных масс, приготовленной по технологии: традиционной (1 – Контроль) и новой (2 – Опытный), $n = 3$

Figure 4c

Change in the Content of Reducing Substances during Boiling of a Mass of Soft Caramel Prepared Using the Traditional (1 – Control) and New (2 – Experimental) Technology



мин) по сравнению с контролем (119 °С за 40 мин). Эти данные показывают ускорение процесса уваривания при использовании эмульсионного геля. Кроме того, в мягкой карамельной массе, приготовленной по традиционной технологии, происходило изменение содержания сухих веществ с 82,0% до 89,0% (Рисунок 4б) и редуцирующих веществ с 16,0% до 26,0% (Рисунок 4с). Следует отметить, что в мягкой карамельной массе, приготовленной по новой технологии, отмечено нарастание скоростей, как изменения содержания сухих веществ на 19%, так и содержания редуцирующих веществ на 38%, по сравнению с традиционным способом. Это позволило установить продолжительность термообработки масс мягкой карамели, приготовленных по традиционной технологии в течение 40 мин, а по новой — за 30 мин.

Влияние рецептуры и технологии приготовления мягкой карамельной массы на показатели качества продукта

Показатели качества (плотность и влажность) мягкой карамельной массы, приготовленной по традиционной (контроль) и новой (опытный) технологии показаны на Рисунке 5 а, б.

Из данных Рисунка 5а следует, что мягкая карамельная масса по новой технологии с использованием эмульсионного геля (Опытный) обладала

более низкой плотностью (1,17 г/см³), по сравнению с контролем (1,20 г/см³). Массовая доля влаги в массах мягкой карамели (Рисунок 5б) как в контрольном образце, так и в примере с использованием эмульсионного геля (Опытный), соответствовали стандартному значению (10,5 ± 1,5%). Следует отметить, что введение эмульсионного геля в массу мягкой карамели по новой технологии не оказывало существенного влияния на показатели плотности и влажности.

Влияние рецептуры и технологии приготовления мягкой карамели на органолептическую оценку продукта

При изучении органолептических показателей (вкус, запах, поверхность, цвет) у контрольного образца мягкой карамельной массы наблюдали более шероховатую и интенсивно окрашенную поверхность с кристаллами сахара на поверхности. Масса мягкой карамели (Опытная), приготовленная по новой технологии и рецептуре, имела ровную и гладкую поверхность, равномерную пористость, приятный вкус и аромат.

Внешний вид образцов мягкой карамельной массы, приготовленных по традиционной (Контроль) и новой технологии (Опытный), представлены на Рисунке 6 а, б.

Рисунок 5

Изменение плотности (а) и влажности (б) образцов мягкой карамельной массы, приготовленных по технологии: традиционной (Контроль) и новой (Опытный), $n = 3$

Figure 5

Changes in Density (a) and Humidity (b) of Samples of Soft Caramel Mass Prepared Using Traditional (Control) and New (Experimental) Technology

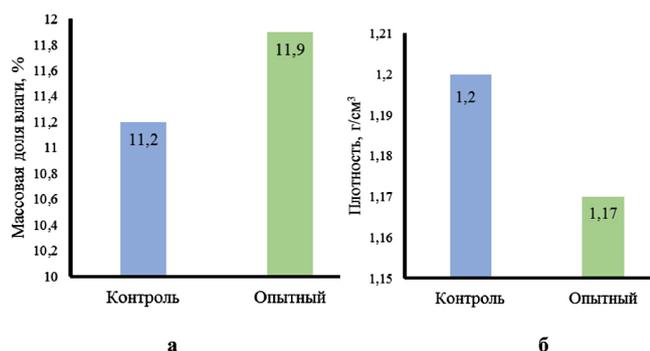


Рисунок 6 а, б

Внешний вид мягкой карамельной массы, приготовленной по технологиям: традиционной (Контроль) и новой (Опытный)

Figure 6 а, б

Appearance of Samples of Soft Caramel Mass Prepared Using Traditional (Control) and new (Experimental) Technology

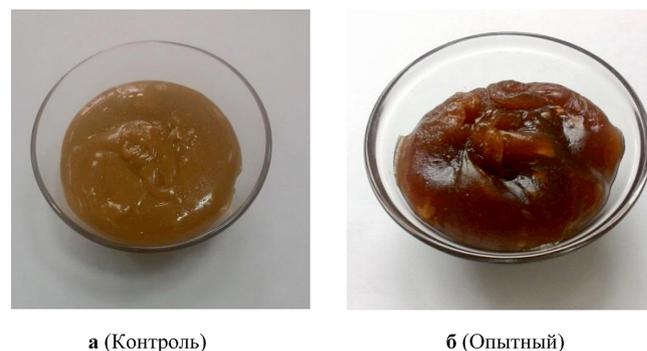


Таблица 3

Органолептическая оценка мягкой карамельной массы

Table 3

Organoleptic Evaluation of Soft Caramel Mass

Показатели качества изделия	Коэффициент значимости показателя	Число степеней качества	Оценка в баллах	Контроль	Опытный
Вкус	4	1–3	4–12	11,2 ± 1,0а	11,0 ± 1,4а
Запах	2	1–3	2–6	5,5 ± 0,6а	5,1 ± 0,6а
Консистенция	3	1–3	3–9	6,8 ± 0,8а	7,9 ± 0,9б
Поверхность, цвет	1	1–3	1–3	2,5 ± 0,5а	2,9 ± 0,3а
Суммарная оценка (Σ 10–30)				26,0	26,9

Примечание. Различные буквы в строке указывают на значительную разницу при $p < 0,05$.

Note. Different letters in the row indicate a significant difference at $p < 0.05$.

Результаты сенсорной оценки мягкой карамельной массы, приготовленной по технологии: традиционной (Контроль) и новой (Опытный), представлены в Таблице 3.

Органолептическая оценка показала, что образец мягкой карамельной массы по новой технологии (Опытный) был сравнимым с контрольным образцом, а по показателю «консистенция» получил более высокую суммарную оценку ($p < 0,05$).

Влияние рецептуры и технологии приготовления мягкой карамели на микроструктуру массы по данным томографии

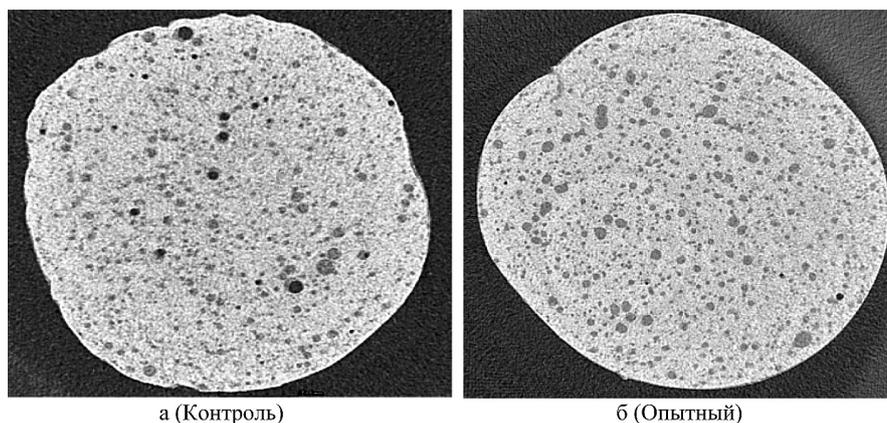
На Рисунках 7 а, б показаны срезы томографических изображений образцов карамели, полученные с помощью рентгеновского томографа Nanomex 180 и прикладного программного обеспечения Phoenix Datasx 2 Reconstruction от Volume Graphics, Герма-

Рисунок 7 а, б

Томографические снимки образцов мягкой карамельной массы, приготовленных по традиционной (Контроль) и новой (Опытный) технологиям.

Figure 7 а, б

Tomographic Image of Samples of Soft Caramel Prepared Using Traditional (Control) and New (Experimental) Technology.



ния. Для анализа полученных трехмерных изображений предназначено программное обеспечение VGStudio MAX 2.2.

При сравнении Рисунков 7а и 7б можно отметить, что образцы мягкой карамельной массы различаются по наблюдаемой объемной доле капель масла. Так, у контрольного образца мягкой карамели (на Рисунке 7а) объемная доля капель масла составила 14%, а у опытного образца (на Рисунке 7б) — 7,8%. Видно, что у образца мягкой карамели (Контроль) объемная доля капель масла заметно выше, чем у массы (Опытный) по новой технологии. Также на изображениях видно, что у образца мягкой карамели (Контроль) размеры капель более близки к монодисперсному распределению, чем у образца (Опытный). Капельки масла в структуре мягкой карамельной массы, приготовленной по новой технологии (Опытный), были распределены равномерно, имели более мелкие размеры капель и округлую форму. Благодаря такому расположению капель масла улучшается структура мягкой карамельной массы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование впервые показало возможность создания растительной мягкой карамели с использованием инкапсулированного подсолнечного масла в белково-полисахаридных гелях, обладающих стабильной пенно-эмульсионной структурой и улучшенными сенсорными характеристиками. Представленные результаты прямо отвечают на поставленные исследовательские вопросы, представляя рецептуры мягкой карамели с заменой животных жиров и белков на растительные компоненты, при сохранении технологической структуры продукта, его термической устойчивости и сенсорной приемлемости.

В данном исследовании для инкапсуляции подсолнечного масла применяли белок-полисахаридную смесь (БПС), включающую изолят белка сои (ИБС), который обладает хорошей способностью диффундировать и адсорбироваться на поверхностях пузырьков воздуха при пенообразовании или каплях масла в процессе эмульгирования, действуя,

таким образом, в качестве эффективного пенообразователя и эмульгатора. Именно эти свойства, активно обсуждаемые в последние годы в научной литературе (Zhang et al., 2015; Qin et al., 2022; Ma et al., 2022; Han et al., 2024; Hou, et al., 2024) и определяют потенциальное применение изолята белка сои в кондитерской отрасли. В составе БПС использовали не один полисахарид, а были созданы четыре трехкомпонентных полисахаридных комплекса: 1-(А+С+G); 2-(А+С+P); 3-(А+G+P) и 4-(С+G+P). В качестве растительного жира использовали подсолнечное масло, в составе которого, как известно, содержатся мононенасыщенная олеиновая кислота (61,0–69,8%) и полиненасыщенная линолевая кислота (21,9–28,0%). Линолевая и олеиновая жирные кислоты важны для организма, т.к. являются строительным материалом для клеточных мембран, участвуют в регуляции обменных процессов в организме³.

Вначале была изучена экспериментальная информация о поверхностно-активных свойствах БПС для создания оболочек на каплях подсолнечного масла. Пенообразующая способность Y_{max} изолята белка сои является физико-химической характеристикой, необходимой для понимания поведения белка при использовании его в качестве оболочек на каплях подсолнечного масла. Проведены исследования влияния тройных смесей полисахаридов на пенообразующую способность растворов изолята белка сои. Согласно Рисунку 1, пенообразующая способность Y_{max} раствора ИБС с концентрацией 6% составила 300% и является наименьшей. Введение смесей полисахаридов 1-(А+С+G) 2-(А+С+P), 3-(А+G+P) и 4-(С+G+P), в раствор изолята белка сои привело к увеличению Y_{max} от Y_2 -(А+С+P) = 300%, Y_4 -(С+G+P) = 400%, Y_1 -(А+С+G) = 500%, до величины Y_3 -(А+G+P) = 560% соответственно. При этом устойчивость пены повышалась, а оптимальное время взбивания БПС составляло 15–20 минут в зависимости от состава смесей полисахаридов. Исходя из полученных данных, можно отметить, что совместное введение трех различных полисахаридов (альгинат натрия, гуммиарабик, пектин) в раствор изолята соевого белка сопровождается синергетическим эффектом и приводит к повышению пенообразующей способности до 560%.

³ Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2010). *Fats and fatty acids in human nutrition: Report of an expert consultation* (FAO Food and Nutrition Paper No. 91). FAO. <http://www.fao.org/3/i1953e/i1953e.pdf>

Затем проведены исследования инкапсуляции подсолнечного масла оболочкой из БПС в водном растворе. На Рисунке 2 представлены показатели стойкости эмульсий. Так, эмульсии, приготовленные на основе смесей полисахаридов 1-(А+С+G) и 3-(А+G+P) продемонстрировали стойкость в 100%, которые после центрифугирования были не разрушены.

Далее проведены исследования влияния полисахаридных комплексов 1-(А+С+G) и 3-(А+G+P) в составе БПС на основе ИБС на гранулометрический состав капель масла по размерам в приготовленных эмульсионных гелях. На Рисунках 3 представлены данные частотного распределения капель масла по размерам в образованных эмульсионных гелях. В первом случае (Рисунок 3а), т.е. при использовании полисахаридного комплекса 1-(А+С+G) в составе БПС, более 50% капель масла имели радиус от 9 мкм до 15 мкм. Во втором случае (Рисунок 3б), при употреблении полисахаридного комплекса 3-(А+G+P) в составе БПС, более 70% капель масла имели радиус от 1 мкм до 2 мкм. Так, на гранулометрический состав капель масла в эмульсионном геле значительное влияние оказывает состав полисахаридного комплекса, входящего в БПС. Сравнение двух полисахаридных комплексов 1-(А+С+G) и 3-(А+G+P) показывает, что замена С на Р приводит к получению эмульсионного геля, в котором радиус капель масла снижался в 9 раз. Введение полисахаридного комплекса 3-(А+G+P) в раствор БПС на основе ИБС сопровождается синергетическим эффектом, способствующим повышению пенообразующей способности, увеличению развернутой поверхности пены для контакта с маслом, а также формированию более мелких капель масла в эмульсии за счёт замещения воздушной фазы масляной. В результате формируется эмульсионный гель с оптимальными структурно-вязкостными характеристиками. Аналогичные эффекты описаны в работе Nan et al. (2024), где комплексы пектина с растительным белком повышали стабильность эмульсии в условиях выпечки.

Замена сливочного масла в рецептуре мягкой карамели на подсолнечное масло влияла на продолжительность уваривания массы, что связано с различиями жирнокислотного состава этих жиров, а также с размерами их капель (McClements, 2015). В сливочном масле преобладают насыщенные жирные кислоты (50–65%), среди ко-

торых короткоцепочечные кислоты составляют 20–25%, при этом большие размеры капель масла (5–10 мкм) прогреваются дольше. В подсолнечном масле содержатся в основном ненасыщенные жирные кислоты (80–90%), при этом размеры капель масла (1–2 мкм) меньше и их больше по количеству, что усиливает, прогрев мягкой карамельной массы. Такая разница в составе жирных кислот определяет и отличия в теплофизических свойствах масел (McClements, 2015). Так, при нагревании как сливочного, так и подсолнечного масел понижаются их значения плотности и теплоемкости (Lara-Hernández et al., 2013), что обеспечивает повышение величины коэффициента теплопроводности, который характеризует скорость изменения температуры в массе мягкой карамели. Подсолнечное масло имеет меньшее значение теплоемкости, чем сливочное масло, что приводит к снижению продолжительности термообработки мягкой карамели по новой технологии — до 30 минут, в сравнении с контролем — 40 минут. Таким образом, сокращение продолжительности термообработки мягкой карамели может привести к увеличению производительности варочного оборудования на 25%.

Исследования структуры карамельной массы с помощью метода рентгеновской томографии показали значительное уменьшение объемной доли капель масла в мягкой карамели, изготовленной по новой технологии, по сравнению с традиционной. Отсюда следует, что применение белок-полисахаридных смесей на основе соевого белка и полисахаридов (альгинат натрия, гуммиарабик, пектин) позволяет при помощи доступного варочного оборудования получить мягкую карамель в виде мелкодисперсной эмульсии, обеспечивающей совокупность изменений физико-химических свойств: во-первых, более медленное движение капель масла в сплошной среде; во-вторых, увеличение относительного расстояния между каплями масла, что снижает возможность их коалесценции (слияния), в-третьих, уменьшение расслоения массы при вибрациях и транспортировке; в-четвертых, повышение срока хранения продукта без потери товарного внешнего вида.

Органолепическая оценка показала, что образцы мягкой карамели, изготовленные по новой технологии с использованием БПС, воспринимаются потребителями столь же положительно, как и из-

деляя по традиционной рецептуре. Соответственно, можно ожидать, что количество потребителей на новый продукт потенциально не снизится, а даже будет расти благодаря тем, кто следует рекомендациям медиков, стремится уменьшить потребление твердых жиров, а также относится к вегетарианцам.

В настоящей работе предлагается модель мягкой карамельной массы, разработанная по новой технологии, в которой основными структурообразующими компонентами являются инкапсулированные капли подсолнечного масла, заключенные в оболочки из биополимерной системы (БПС), состоящей из соевого белка и полисахаридов (альгинат натрия, гуммиарабик, пектин).. Вначале сухая смесь БПС смешивается с водой и проводится термообработка биополимеров при температуре $90 \pm 2,0$ °С, что приводит к видоизменению структуры соевого белка и полисахаридов, которые из глобулярного состояния разворачиваются в длинные, гибкие и эластичные фибриллы (Jansens et al., 2019). Затем раствор БПС делится на две части. Из первой половины БПС и подсолнечного масла готовится эмульсия инкапсулированного масла в оболочках из БПС или эмульсионный гель. Вторая половина БПС смешивается с сахаром и смесь уваривается, а образующиеся воздушные пузыри закутываются в оболочки, что формирует пенную массу. После этого в пенную массу добавляется эмульсионный гель и смесь перемешивается, что позволяет получить дисперсную систему «эмульсионный гель-пена» в мягкой карамели по новой технологии (Yiu et al., 2023). Одновременно на завершающей стадии термообработки мягкой карамели происходит реакция Майяра, которая оболочки на капельках масла спекает в прочные капсулы (Starowicz & Zieliński, 2019). Так, в мягкой карамельной массе по новой технологии используются только компоненты растительного происхождения. При этом в дисперсной системе «эмульсионный гель-пена» также происходят изменения в сплошной среде, где взамен «сахаро-паточно-молочного сиропа» появился «сахаро-паточно-БПС сироп», так и в жидкой фазе, где взамен «капель сливочного масла» — «капли подсолнечного масла».

Полученные результаты демонстрируют практическую состоятельность предложенного подхода к разработке мягкой карамельной массы на основе растительного сырья. Использование БПС из ИБС,

альгината натрия, гуммиарабика и пектина позволяет получить стабильную пенно-эмульсионную систему, сохраняющую термостабильность при уваривании, равномерность распределения масляных капель и положительные сенсорные характеристики. Сокращение времени технологической обработки и исключение насыщенных жиров указывают на высокую технологическую ценность рецептуры и улучшение пищевой ценности карамели. Вклад работы состоит в расширении применения растительных структурообразующих систем в кондитерских изделиях с многокомпонентной дисперсной структурой.

Ограничение исследования

Настоящее исследование ограничено использованием одного типа масла (подсолнечного) и одного источника белка (ИБС). Кроме того, не была проведена оценка окислительной стабильности, сроков хранения и влияния на органолептические показатели при длительной экспозиции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование было направлено на разработку рецептуры мягкой карамельной массы с использованием эмульсионных гелей на основе подсолнечного масла, инкапсулированного в белково-полисахаридные оболочки, содержащие изолят соевого белка, альгинат натрия, гуммиарабик и пектин. Экспериментальные результаты подтвердили возможность полного замещения молочного жира и белков в традиционной рецептуре за счет использования растительных ингредиентов без ухудшения ключевых технологических и сенсорных характеристик продукта. Было показано, что определенные комбинации полисахаридов в составе белково-полисахаридного комплекса существенно повышают пенообразующую и эмульгирующую способность, а также обеспечивают формирование стабильной пенно-эмульсионной структуры.

Гранулометрический анализ подтвердил возможность формирования в матрице карамели гомогенной дисперсии с каплями масла малого радиуса, что способствует снижению плотности и улучшению текстурных свойств готового изделия. Введе-

ние эмульсионного геля позволило также сократить продолжительность уваривания карамельной массы на 25 %, тем самым повысив эффективность термообработки. При этом опытные образцы мягкой карамели не уступали контрольным по органолептической оценке и демонстрировали равномерную пористость, гладкую поверхность и стабильную микроструктуру, что подтверждено данными рентгеновской томографии.

Полученные данные вносят вклад в развитие научно обоснованной технологии создания многокомпонентных дисперсных систем кондитерских изделий. Разработанная рецептура демонстрирует потенциал для использования в индустрии функциональных продуктов питания, ориентированных на снижение содержания насыщенных жиров и использование растительных компонентов без ущерба для потребительских свойств. В дальнейшем целесообразно провести оценку окислительной стабильности продукта, сроков хранения, а также масштабируемости технологии в условиях промышленного производства.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Васькина Валентина Андреевна: разработка концепции; научное руководство; написание рукописи — рецензирование и редактирование; курирование данных.

Быков Александр Андреевич: разработка методологии; проведение исследования; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Новожилова Елена Сергеевна: валидация результатов; формальный анализ; написание черновика рукописи; визуализация.

Бутин Сергей Анатольевич: проведение исследования; предоставление ресурсов.

Молчанова Елена Николаевна: разработка методологии; курирование данных; написание черновика рукописи; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Чернобровина Антонина Григорьевна: валидация результатов; проведение исследования; написание черновика рукописи; визуализация.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Valentina A. Vaskina: conceptualization; data curation; supervision; writing — review and editing.

Aleksander A. Bykov: methodology; investigation; writing — review and editing.

Alena S. Navazhylava: validation; formal analysis; writing — original draft preparation; visualization.

Sergey A. Butin: investigation; resources.

Elena N. Molchanova: methodology; data curation; writing — original draft preparation; writing — review and editing.

Antonina G. Chernobrovina: validation investigation; writing — original draft preparation; visualization.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Almeida, R. F., Aguiar Borges, L., Torres da Silva, T., Serafim Timóteo dos Santos, N., Gianasi, F., Augusto Caldas Batista, E., & Efraim, P. (2024). Chocolates, compounds and spreads: A review on the use of oleogels, hydrogels and hybrid gels to reduce saturated fat content. *Food Research International*, 178, 113986. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.113986>
- Banaś, K., Piwowar, A., & Harasym, J. (2024). Agar-rapeseed oil hydroleogels as solid fat substitute in short-bread cookies. *Food Hydrocolloids*, 151, 109889. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109889>
- Chen, Q., Dong, L., Li, Y., Liu, Y., Xia, Q., Sang, S., Wu, Z., Xiao, J., Liu, L., & Liu, L. (2023). Research advance of non-thermal processing technologies on ovalbumin properties: The gelation, foaming, emulsification, allergenicity, immunoregulation and its delivery

- system application. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(20), 7045–7066. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2179969>
- da Silva, T. L. T., Fernandes, G. D., & Arellano, D. B. (2021). Development of reduced saturated fat cookie fillings using multicomponent oleogels. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 98(11), 1069–1082. <https://doi.org/10.1002/aocs.12527>
- Delshadi, R., Bahrami, A., Tafti, A. G., Barba, F. J., & Williams, L. L. (2020). Micro and nano-encapsulation of vegetable and essential oils to develop functional food products with improved nutritional profiles. *Trends in Food Science & Technology*, 104, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.004>
- Guyomarc'h, F., Arvisenet, G., Bouhallab, S., Canon, F., Deutsch, S.-M., Drigon, V., Dupont, D., Famelart, M.-H., Garric, G., Guédon, E., Guyot, T., Hiolle, M., Jan, G., Le Loir, Y., Lechevalier, V., Nau, F., Pezennec, S., Thierry, A., Valence, F., & Gagnaire, V. (2021). Mixing milk, egg and plant resources to obtain safe and tasty foods with environmental and health benefits. *Trends in Food Science & Technology*, 108, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.010>
- Jansens, K. J. A., Rombouts, I., Grootaert, C., Brijs, K., Van Camp, J., Van der Meeren, P., Rousseau, F., Schymkowitz, J., & Delcour, J. A. (2019). Rational Design of amyloid-like fibrillary structures for tailoring food protein techno-functionality and their potential health implications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(1), 84–105. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12404>
- Han, L., Li, J., Jiang, Y., Lu, K., Yang, P., Jiang, L., Li, Y., & Qi, B. (2024). Changes in the structure and functional properties of soybean isolate protein: Effects of different modification methods. *Food Chemistry*, 432, 137214. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137214>
- Hou, G., Liu, Y., Zhang, L., Han, Y., Zhou, F., Zhang, Z., & Zhang, L. (2024). Soy protein isolate emulsion microgel particles for encapsulating oil. *Journal of Food Engineering*, 371, 111993. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.111993>
- Kamer, D. D. A. (2024). Synergistic formulation approach for developing pea protein and guar gum enriched olive oil-in-water emulsion gels as solid fat substitutes: Formulation optimization, characterization, and molecular simulation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 257, 128718. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128718>
- Lara-Hernández, G., Suaste-Gómez, E., Cruz-Orea, A., Mendoza-Alvarez, J. G., Sánchez-Sinécio, F., Valcárcel, J. P., & García-Quiroz, A. (2013). Thermal characterization of edible oils by using photopyroelectric technique. *International Journal of Thermophysics*, 34(5), 962–971. <https://doi.org/10.1007/s10765-013-1419-x>
- Ma, K. K., Greis, M., Lu, J., Nolden, A. A., McClements, D. J., & Kinchla, A. J. (2022). *Functional Performance of Plant Proteins*. *Foods*, 11(4), 594. <https://doi.org/10.3390/foods11040594>
- McClements, D. J. (2015). *Food emulsions: Principles, practices, and techniques* (3rd ed.). CRC Press.
- Malvano, F., Muccio, E., Galgano, F., Marra, F., & Albanese, D. (2024). Design of a high protein, no added sugar pistachio spread using oleogel as fat replacer. *LWT*, 198, 115993. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115993>
- Marangoni, A. G., & Garti, N. (Eds.). (2011). An overview of the past, present, and future of organogels. *Edible Oleogels* (pp. 1–17). AOCS Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-9830791-1-8.50004-8>
- Starowicz, M., & Zieliński, H. (2019). How maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products? *Food Reviews International*, 35(8), 707–725. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1600538>
- Tang, C.-H. (2017). Emulsifying properties of soy proteins: A critical review with emphasis on the role of conformational flexibility. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(12), 2636–2679. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1067594>
- Tang, C. (2019). Nanostructures of soy proteins for encapsulation of food bioactive ingredients. In S.M. Jafari (Ed.), *Biopolymer Nanostructures for Food Encapsulation Purposes* (pp. 247–285). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815663-6.00010-0>

- Yang, Y., Yu, J., Qian, S., & Zhu, F. (2025). Quantifying rheology and texture of chocolate products with oleogels using fractional calculus. *Journal of Food Engineering*, 387, 112321. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112321>
- Yiu, J. C. H., Kwok, K. C., & Chen, Z. Y. (2023). Formation and stabilization of plant-based foamed emulsions: Effect of protein–polysaccharide interactions and Maillard conjugation. *Food Chemistry*, 422, 136184. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136184>
- Qin, P., Wang, T., & Luo, Y. (2022). A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development. *Journal of Agriculture and Food Research*, 7, 100265. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100265>
- Xie, A., Zhao, S., Liu, Z., Yue, X., Shao, J., Li, M., & Li, Z. (2023). Polysaccharides, proteins, and their complex as microencapsulation carriers for delivery of probiotics: A review on carrier types and encapsulation techniques. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242, 124784. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124784>
- Wang, C., Killpatrick, A., Humphrey, A., & Guo, M. (2019). Whey protein functional properties and applications in food formulation. In M. Guo (Ed.), *Whey protein production, chemistry, functionality, and applications* (pp. 157–204). Portico. <https://doi.org/10.1002/9781119256052.ch7>
- Weir, S., Bromley, K. M., Lips, A., & Poon, W. C. K. (2016). Celebrating Soft Matter’s 10th Anniversary: Simplicity in complexity – Towards a soft matter physics of caramel. *Soft Matter*, 12(10), 2757–2765. <https://doi.org/10.1039/c5sm01797a>
- Wu, Y., Sun, S., Li, X., Li, X., Huang, Y., An, F., Huang, Q., & Song, H. (2024). Fabrication, characterization, and fat substitution application in chocolate spreads of methyl cellulose and xanthan gum foam-templated oleogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283, 137677. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137677>
- Zhang, R., Zhang, Z., Zhang, H., Decker, E. A., & McClements, D. J. (2015). Influence of emulsifier type on gastrointestinal fate of oil-in-water emulsions containing anionic dietary fiber (pectin). *Food Hydrocolloids*, 45, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.020>
- Zhou, M., Li, B., Wu, A., Li, J., Tang, J., Wang, Y., & Hu, Z. (2025). Gelatin-wax-based bigel system: Innovative research on a low-calorie fat substitute. *LWT*, 224, 117836. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117836>

ОБ АВТОРАХ

Васькина Валентина Андреевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии хлебопродуктов Белорусского государственного университета пищевых и химических технологий (212027, Республика Беларусь, Могилев, пр. Шмидта, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3157-9911>, SPIN-код: 3183-8537, v.a.vaskina@inbox.ru.

Быков Александр Андреевич, кандидат технических наук, доцент Центра образовательных программ Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института, (141701, Российская федерация, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4529-348X>, Scopus ID: 57201319420, Researcher ID: NXC-3031-2025, SPIN-код: 6318-7237, Aleks-Bykov@yandex.ru

Новожилова Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии хлебопродуктов Белорусского государственного университета пищевых и химических технологий (пр. 212027, Республика Беларусь Могилев, Шмидта, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4075-9970>, SPIN-код: 9954-1788, navazhylava@inbox.ru

Бутин Сергей Анатольевич, генеральный директор ООО «Хэлси Фуд» (143002, Российская Федерация, Московская область, г. Одинцово, ул. Акуловская, д. 2, стр. 3, комн. 22), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9723-0808>, butin88@inbox.ru

Молчанова Елена Николаевна, кандидат биологических наук, доцент, профессор кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса Российского биотехнологического университета (РОСБИОТЕХ), (125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0708-1694>, Scopus ID: 57222147554, Researcher ID: AAP-4903-2020, SPIN-код: 5376-5083, molchanova@mgupp.ru

Чернобровина Антонина Григорьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры химии и экотоксикологии Российского биотехнологического университета (РОСБИОТЕХ), (125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7233-3603>, Scopus ID: 57194444858, Researcher ID: F-8302-2018, SPIN-код: 2180-8015, chernobrovinaag@mgupp.ru

ABOUT THE AUTHORS

Valentina A. Vaskina – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Bread Products Technology, Belarusian State University of Food and Chemical Technologies (212029, Republic of Belarus, Mogilev, Schmidt Ave., 3). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3157-9911>, SPIN-код: 3183-8537, v.a.vaskina@inbox.ru.

Aleksander A. Bykov, Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of Moscow Institute of Physics and Technology (Moscow region, Dolgoprudny town, Institutskiy pereulok street, 9), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4529-348X>, Scopus ID: 57201319420, Researcher ID: NXC-3031-2025, SPIN-код: 6318-7237, Aleks-Bykov@yandex.ru.

Alena S. Navazhylava – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Bread Products Technology, Belarusian State University of Food and Chemical Technologies (3, Schmidt Ave., 212027, Mogilev, Republic of Belarus), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4075-9970>, SPIN-код: 9954-1788, navazhylava@inbox.ru

Sergey A. Butin, CEO of Healthy Food LLC (143002, Russian Federation, Moscow Region, Odintsovo, Akulovskaya St., 2, building 3, room 22), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9723-0808>, butin88@inbox.ru

Elena N. Molchanova – Cand. Sc. (Biology), Associate Professor, Professor of the Department of Food Industry, Hotel Business and Service, Russian Biotechnological University, (125080, Russian Federation, Moscow, Volokolamskoe sh. 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0708-1694>, Scopus ID: 57222147554, Researcher ID: AAP-4903-2020, SPIN-код: 5376-5083, molchanova@mgupp.ru

Antonina G. Chernobrovina – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of Chemistry and Ecotoxicology, Russian Biotechnology University (125080, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe sh., 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7233-3603>, Scopus ID: 57194444858, Researcher ID: F-8302-2018, SPIN-код: 2180-8015, chernobrovinaag@mgupp.ru