

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2441>
<https://elibrary.ru/VWLLFL>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Влияние ультразвукового воздействия на свойства йота-каррагинана и гуаровой камеди



К. Н. Нициевская^{ID}, С. В. Станкевич^{ID}, Е. В. Бородай*^{ID}

Сибирский федеральный научный центр агроботехнологий Российской академии наук,
Краснообск, Россия

Поступила в редакцию: 06.09.2022
Принята после рецензирования: 29.01.2023
Принята к публикации: 07.02.2023

*Е. В. Бородай: borodajelena@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-4350-085X>
К. Н. Нициевская: <https://orcid.org/0000-0002-7302-106X>
С. В. Станкевич: <https://orcid.org/0000-0002-5157-2004>

© К. Н. Нициевская, С. В. Станкевич, Е. В. Бородай, 2023



Аннотация.

Применение гидроколлоидов в пищевой промышленности позволяет создавать низкокалорийные продукты с сохранением структурных характеристик традиционных аналогов. С целью моделирования вязкости текстуры и стабилизации пищевых систем также применяют электрофизические методы. Влияние ультразвукового воздействия на стабилизацию пищевой системы в состоянии геля не изучено. Целью исследования являлось изучение влияния обработки гидроколлоидов (полисахаридов) ультразвуком для дальнейшего использования при производстве пищевых продуктов (мясных и рыбных студней, желе, мармелада, пастилы, зефира, желе, пудингов, мороженого и т. д.) со стабильной текстурой. Объектами исследования являлись образцы коллоидных систем на основе пищевого гидроколлоида (йота-каррагинана или гуаровой камеди) и очищенной воды в соотношении 1:100. Образцы подвергались ультразвуковому воздействию при различном диапазоне времени и рН. Стандартными методами определяли вязкость, активную кислотность, температуру и прозрачность (коэффициент пропускания, Т, %) полученных коллоидных систем. Для анализа органолептических свойств применяли дескрипторно-профильный метод.

Изучили поведение гидроколлоидов под воздействием ультразвука при разных значениях рН среды (3,9, 7,0 и 9,0). Коллоидная система с йота-каррагинаном имела следующие показатели: вязкость при нейтральном рН – 47,6 мПа·с, при кислом рН – 45,7 мПа·с, при щелочном рН – 22,3 мПа·с. Вязкость гидроколлоидной системы с гуаровой камедью зависела от рН среды: в нейтральной среде снижалась в процессе обработки с 119,0 до 64,8 мПа·с, в кислой – не менялась и была в пределах $3,5 \pm 0,2$ мПа·с, в щелочной – незначительно увеличилась и составила 6,52 мПа·с. Максимальная температура коллоидной системы составила 46,5 °С в нейтральной среде.

При исследовании влияния ультразвука на свойства гидроколлоидов система с йота-каррагинаном показала лучший результат при кислотности среды в пределах 3,9–6,0 е.д. для получения текучей гелеобразной структуры. В качестве желирующего агента для получения продукции рекомендовано применение йота-каррагинана после воздействия ультразвука. Вязкость продукта с гуаровой камедью при использовании ультразвука будет снижаться, а необходимая структура не будет достигнута.

Ключевые слова. Пищевые системы, ультразвук, гидроколлоиды, полисахариды, структурообразователи, стабильность структуры, кислотность, вязкость

Для цитирования: Нициевская К. Н., Станкевич С. В., Бородай Е. В. Влияние ультразвукового воздействия на свойства йота-каррагинана и гуаровой камеди // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 2. С. 357–367.
<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2441>

Ultrasound Treatment of Iota-Carrageenan and Guar Gum



Kseniya N. Nitsievskaya^{ORCID}, Svetlana V. Stankevich^{ORCID},
Elena V. Boroday*^{ORCID}

Siberian Federal Scientific Center of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences,
Krasnoobsk, Russia

Received: 06.09.2022

Revised: 29.01.2023

Accepted: 07.02.2023

*Elena V. Boroday: borodajelena@yandex.ru,

<https://orcid.org/0000-0003-4350-085X>

Kseniya N. Nitsievskaya: <https://orcid.org/0000-0002-7302-106X>

Svetlana V. Stankevich: <https://orcid.org/0000-0002-5157-2004>

© K.N. Nitsievskaya, S.V. Stankevich, E.V. Boroday, 2023



Abstract.

Hydrocolloids make it possible to produce low-calorie analogues of traditional foods that maintain the original structural properties. Electrophysical methods control viscosity and stabilize food systems. However, the stabilizing effect of ultrasonic treatment on gel remains understudied. The research featured the effect of ultrasonic treatment on hydrocolloids (polysaccharides) used in meat or fish jelly, marmalades, marshmallows, puddings, ice cream, etc.

The study involved samples of colloidal systems based on iota-carrageenan or guar gum and purified water (1:100). The samples underwent ultrasonic treatment at various time and pH ranges. The viscosity, active acidity, temperature, and transparency (transmission coefficient, T, %) of the obtained colloidal systems were determined using standard methods, while the sensory profile was defined by the descriptor-profile method.

Hydrocolloids were subjected to ultrasound at pH 3.9, 7.0, and 9.0. The colloidal viscosity of the iota-carrageenan sample was 47.6 mPa·s at neutral pH, 45.7 mPa·s at acidic pH, and 22.3 mPa·s at alkaline pH. The viscosity of the hydrocolloid system with guar gum depended on the pH of the medium: it decreased during processing from 119.0 to 64.8 mPa·s in the neutral medium but remained the same (3.5 ± 0.2 mPa·s) in the acid medium and reached 6.52 mPa·s in the alkaline medium. The maximum temperature of the colloidal system was 46.5°C in a neutral medium.

The system with iota-carrageenan showed the best result at medium acidity in the range of 3.9–6.0 units and produced a fluid gel-like structure. Sonicated iota-carrageenan could be recommended as a gelling agent. Guar gum viscosity, on the contrary, lost its viscosity and failed to produce the desired structure.

Keywords. Food systems, ultrasound, hydrocolloids, polysaccharides, thickeners, structure's stability, acidity, viscosity

For citation: Nitsievskaya KN, Stankevich SV, Boroday EV. Ultrasound Treatment of Iota-Carrageenan and Guar Gum. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(2):357–367. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2441>

Введение

В различных отраслях промышленности используются гидроколлоиды, к которым относят полисахариды и протеины. На производстве их применяют в качестве загустителей и студнеобразователей водных растворов, стабилизаторов пен, эмульсий и суспензий, регуляторов аромата и пр. [1–6].

Гидроколлоиды представляют собой группу пищевых ингредиентов, которые с 1978 г. определены в отдельную категорию. Основанием для этого являются общие свойства, проявляемые для создания пищевой системы. Роль гидроколлоидов в пищевых системах сводится не только к выполнению технологических функций. Гидроколлоиды являются физиологически функциональными ингредиентами (пищевыми волокнами), которые способствуют снижению уровня холестерина в крови и помогают нор-

мальному функционированию кишечника, проявляя пребиотический эффект или другие позитивные для здоровья человека свойства [7, 8].

Благодаря свойствам гидроколлоидов стало возможным создание низкокалорийных продуктов, сохраняющих органолептические характеристики традиционных аналогов. Традиционно желированные десерты производятся с использованием пищевого желатина, молока или сливок, сахара и ванилина. Для вегетарианцев и потребителей халяльных и кошерных продуктов проблема замены желатина на пищевые гидроколлоиды существует уже много лет [8–10]. Интерес к этой проблеме возрос по всему миру из-за появления вируса губчатой энцефалопатии крупного рогатого скота [12].

Гидроколлоиды широко используются при изготовлении многих продуктов питания с целью

улучшения их качественных характеристик и срока годности. Одним из основных свойств гидроколлоидов является их способность к студнеобразованию. Гидроколлоиды образуют гели путем физических связей их полимерных цепей посредством соединения водорода, гидрофобной ассоциации и катионного сшивания. Именно из-за этого гидроколлоидные гели часто называют «физическими гелями» [13–15]. Механизм и получающиеся в результате надмолекулярные структуры, формирующие макроскопическим образом систему и стабильную сеть желированного изделия, важны для полисахаридно-белковых систем [16, 17].

Новые технологии делают возможным производство ионных, неионных и амфотерных гуаровых продуктов, которые при растворении в воде образуют прозрачные растворы даже при степени замещения 0,1 [18].

Источником гуаровой камеди служат гуаровые бобы. По химическому составу гуара подобна камеди рожкового дерева (пищевая добавка E410). Гуаровая камедь является полимерным соединением, содержащим остатки галактозы, а также обладает жесткостью и повышенной эластичностью, хорошо растворима в воде. Благодаря этим свойствам гуаровая камедь является эффективным эмульгатором и стабилизатором. При циклах замораживания и разморозки продуктов гуаровая камедь отличается хорошей устойчивостью, а также замедляет возникновение кристаллов льда, образуя структурированный гель.

Камеди являются сложными высокомолекулярными углеводами, не входящими в состав клеточной оболочки растений. В кишечнике они способны связывать соли тяжелых металлов и холестерина. Согласно данным ботанико-фармакогностического словаря камеди – это продукты, выделяющиеся из надрезов и трещин растений или получаемые в результате их промышленной переработки, а также препараты на основе полисахаридов, продуцируемых некоторыми видами микроорганизмов [19, 20].

Химический состав камедей не однороден: они относятся к гетерополисахаридам (гексозаны, пентазаны и полиурониды). Гуаровая камедь хорошо диспергирует и набухает в холодной и горячей воде с образованием вязких коллоидных растворов. Высокая растворимость гуара объясняется наличием в составе молекул часто чередующихся участков с боковыми цепями [21].

К гидроколлоидам также относятся сульфатированные полисахариды – это галактаны, в частности каррагинаны, которые не имеют аналогов среди других растительных полисахаридов и содержатся в красных морских водорослях [22]. Основой этих полимеров является галактоза, различаются они пропорциональным соотношением и местом расположения этерифицированных сульфатных групп,

а также количеством 3,6-ангидрогалактозы. Различия в составе и особенности конфигурационного строения приводят к наличию целого ряда разных реологических свойств, которые используются в разнообразных продуктах [23, 24].

Каррагинаны могут выступать в роли вязких загустителей и гелеобразователей, образующих термообратимые гели, текстура которых варьируется от мягкой и эластичной до жесткой и хрупкой. Данные гидроколлоиды обладают способностью вступать в синергические взаимодействия с камедями, что ведет к дальнейшему изменению текстуры геля. Специфическое взаимодействие каррагинанов широко используется для стабилизации молочных продуктов [25, 26].

Каррагинаны растворяются только в горячей воде (70–80 °С), а также в растворе с натрием, но в таких растворах они не образуют гелей. После растворения и последующего охлаждения каррагинаны дают твердые термообратимые гели с высокой прочностью студня (около 1000 гр/см² при концентрации раствора 1,5 %, t = 20 °С) [27]. Точка гелеобразования равна 35–50 °С, но зависит от концентрации и присутствия катионов (ионов калия, натрия, кальция, аммония). Концентрация этих катионов определяет силу геля и может воздействовать на величину этого параметра. Кроме того, прочные твердые гели каррагинана проявляют синерезис, который может быть уменьшен при добавлении других фракций каррагинана. Например, йота-каррагинан, который образует менее прочные гели, чем каппа, но более эластичные. Эти гели термообратимы и не проявляют синерезис. Более того, растворы йота-каррагинана обладают тиксотропными свойствами, которые проявляются в разжижении при интенсивном встряхивании или перемешивании гелей, паст, суспензий и других систем с коагуляционной дисперсной структурой и их загущении (отвердевании) после прекращения механического воздействия. Это уникальное свойство дает возможность растворам йота-каррагинана противостоять воздействиям на физическую структуру и возвращаться к первоначальному значению вязкости даже после повторения механического воздействия снова и до получения необходимого конечного продукта. По этой причине йота-каррагинан используется в качестве стабилизатора суспензий. Также йота-каррагинан проявляет хорошую стабильность при последовательных циклах замораживание – оттаивание [28, 29].

Гидроколлоиды добавляются для формирования системы с целью моделирования вязкости текстуры и стабилизации пищевых дисперсных систем в целом. Однако набирает популярность использование электрофизических методов воздействия в качестве вида технологической обработки. Влияние ультразвука на вязкость и кислотность системы отдельных гидроколлоидов не изучено [30, 31].

Современная пищевая промышленность постоянно стремится к поиску и созданию качественных и безопасных продуктов. Плюсами воздействия ультразвука как метода технологической обработки являются низкая стоимость и экологический характер с различной областью применения. Например, для гомогенизации [32].

Целью данного исследования являлась обработка гидроколлоидов различной природы воздействием ультразвука в присутствии водного растворителя различного диапазона pH для дальнейшего использования при получении пищевой продукции.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования выступали образуемые системы с гидроколлоидами, представляющие собой полисахариды растительного происхождения – индивидуально.

Для изготовления изучаемых систем были использованы следующие коммерческие образцы пищевых гидроколлоидов:

- йота-каррагинан (Molecularmeal, Россия) – пищевая добавка E407;
- гуаровая камедь (Мастер Слим, Россия) – пищевая добавка E412.

В качестве среды для растворения (растворителя) изучаемых полисахаридов и уменьшения погрешности исследований применяли очищенную воду в диапазоне pH 3,9–9,0 при температуре $20,0 \pm 2,0$ °C. Кислотность водной среды регулировали с использо-

ванием 0,1N раствора соляной кислоты до pH = 3,9 и 0,1N гидроокиси натрия до pH = 9,0.

При ультразвуковой обработке гидроколлоидов готовили навески весом в 4 г и растворителя (400 мл), которые помещали в ультразвуковую систему марки QUICK218-35D (Россия). Ультразвук применяли в непрерывном режиме с частотой 40 кГц и мощностью 60 Вт в условиях постепенного нагрева образцов при температуре $55,0 \pm 2,0$ °C в течение 30 мин. Пробы отбирали через равные промежутки времени в интервале 5 мин, начиная с 10 мин обработки.

Для дальнейших исследований использовали кодировку образцов с гуаровой камедью и йота-каррагинаном, представленную в таблице 1.

Сначала изучали вязкость и активную кислотность без применения ультразвука, а затем оценивали влияние ультразвуковой обработки на изменение параметров. Активную кислотность pH определяли ионометрическим методом с использованием pH-метра марки Нитрон (Россия), который был откалиброван по стандартным показателям буфера pH с погрешностью измерений $\pm 0,05$ е.д. Измерения проводили в диапазоне температуры $t = 21,0 \pm 1,0$ °C. Температуру замеряли термометром Testo 905-T1 (Германия) с погрешностью измерений $\pm 0,5$ °C. Проводили исследования для установления термообратимых свойств полученных коллоидных систем. Коллоидные системы подвергали охлаждению до температуры $t = 4,0 \pm 0,5$ °C в течение 12 ч. Далее проводили анализ вязкости

Таблица 1. Кодировка образцов гидроколлоидных систем с гуаровой камедью и йота-каррагинаном

Table 1. Hydrocolloid systems with guar gum and iota-carrageenan: sample coding

Код образца	Водная среда с гуаровой камедью	Код образца	Водная среда с йота-каррагинаном
pH = 7,0			
К.0	Без обработки ультразвуком	Й-К.0	Без обработки ультразвуком
К.10	Обработка ультразвуком 10 мин	Й-К.10	Обработка ультразвуком 10 мин
К.15	Обработка ультразвуком 15 мин	Й-К.15	Обработка ультразвуком 15 мин
К.20	Обработка ультразвуком 20 мин	Й-К.20	Обработка ультразвуком 20 мин
К.25	Обработка ультразвуком 25 мин	Й-К.25	Обработка ультразвуком 25 мин
К.30	Обработка ультразвуком 30 мин	Й-К.30	Обработка ультразвуком 30 мин
pH = 3,9			
К.К.0	Без обработки ультразвуком	Й-К.К.0	Без обработки ультразвуком
К.К.10	Обработка ультразвуком 10 мин	Й-К.К.10	Обработка ультразвуком 10 мин
К.К.15	Обработка ультразвуком 15 мин	Й-К.К.15	Обработка ультразвуком 15 мин
К.К.20	Обработка ультразвуком 20 мин	Й-К.К.20	Обработка ультразвуком 20 мин
К.К.25	Обработка ультразвуком 25 мин	Й-К.К.25	Обработка ультразвуком 25 мин
К.К.30	Обработка ультразвуком 30 мин	Й-К.К.30	Обработка ультразвуком 30 мин
pH = 9,0			
К.Щ.0	Без обработки ультразвуком	Й-К.Щ.0	Без обработки ультразвуком
К.Щ.10	Обработка ультразвуком 10 мин	Й-К.Щ.10	Обработка ультразвуком 10 мин
К.Щ.15	Обработка ультразвуком 15 мин	Й-К.Щ.15	Обработка ультразвуком 15 мин
К.Щ.20	Обработка ультразвуком 20 мин	Й-К.Щ.20	Обработка ультразвуком 20 мин
К.Щ.25	Обработка ультразвуком 25 мин	Й-К.Щ.25	Обработка ультразвуком 25 мин
К.Щ.30	Обработка ультразвуком 30 мин	Й-К.Щ.30	Обработка ультразвуком 30 мин

(мПа·с) на вибровискозиметре серии SV-1A (Япония), откалиброванном по методике исследований с погрешностью измерений $\pm 0,3$ мПа·с. Математическую обработку данных с использованием регрессионного анализа проводили с помощью программы Statistica 12.

Прозрачность образцов проверяли посредством измерения коэффициента пропускания (Т, %) с использованием спектрометрии с помощью прибора КФК-2 при длине волны 540 нм в кювете со слоем толщиной 10 мм (выбор данной длины волны объясняется чувствительностью к свету человеческим глазом в зеленой части спектра). В качестве эталонного раствора использовали очищенную воду.

Для органолептического анализа применяли дескрипторно-профильный метод при сравнении образцов между собой с учетом стандартной терминологии и методик по ГОСТ ISO 5492-2014, ГОСТ ISO 6658-2016, ГОСТ ISO 8587-2015, ГОСТ ISO 8586-2015, ГОСТ ISO 11036-2017 и ГОСТ ISO 13299-2015.

Результаты и их обсуждение

Исследование водных сред с полисахаридами первоначально проводили без обработки ультразвуковыми воздействиями. Полученные данные были приняты как контрольные для дальнейшего исследования кинетики обработки. Коллоидные системы ведут себя как неньютоновская жидкость, вязкость которой зависит от напряжения сдвига, температуры и ультразвука.

Растворение гидроколлоидов проводили в различных водных средах при разном диапазоне pH и температуре $20,0 \pm 2,0$ °С. Повышенная вязкость наблюдалась в контрольном образце с гуаровой камедью при использовании нейтральной pH.

В качестве контрольного образца были получены гидроколлоидные системы:

1. С нейтральной pH (7,0):

- водная среда с йота-каррагинаном (Й-К.0) имела вид прозрачной жидкости без осадка, текстура жидкая, запах отсутствует, pH = 7,88 (t = 22,5 °С), вязкость 7,88 мПа·с (t = 16,7 °С), T = 98,0 %;
- водная среда с гуаровой камедью (К.0) имела вид белой непрозрачной жидкости со взвесью пузырьков

воздуха, текстура плотная, запах сладковатый, pH = 6,24 (t = 20,0 °С), вязкость 119,0 мПа·с (t = 16,8 °С), T = 7,0 %;

2. С кислой pH (3,9):

– водная среда с йота-каррагинаном (Й-К.К.10–Й-К.К.30) имела вид прозрачной жидкости без осадка, текстура жидкая, запах отсутствует, pH = 7,44 (t = 29,4 °С), вязкость 27,2 мПа·с (t = 12,3 °С), T = 97,0 %;

– водная среда с гуаровой камедью (К.К.10–К.К.30) имела вид белой непрозрачной жидкости со взвесью пузырьков воздуха, текстура плотная, запах сладковатый, pH = 5,36 (t = 28,8 °С), вязкость 3,16 мПа·с (t = 12,0 °С), T = 8,0 %;

3. С щелочной pH (9,0):

– водная среда с йота-каррагинаном (Й-К.Щ.10–Й-К.Щ.30) имела вид прозрачной жидкости без осадка, текстура жидкая, запах отсутствует, pH = 9,01 (t = 29,7 °С), вязкость 8,29 мПа·с (t = 13,0 °С), T = 97,0 %;

– водная среда с гуаровой камедью (К.Щ.10–К.Щ.30) имела вид белой непрозрачной жидкости со взвесью пузырьков воздуха, текстура плотная, запах сладковатый, pH = 7,46 (t = 29,3 °С), вязкость 6,40 мПа·с (t = 14,3 °С), T = 8,5 %.

Дальнейшие исследования включали обработку исследуемых гидроколлоидных систем под влиянием ультразвукового оборудования в среде с нейтральной pH (табл. 2).

При анализе системы йота-каррагинана с нейтральной pH наблюдали постепенное повышение температуры в процессе ультразвуковой обработки. Кислотность находилась в пределах диапазона щелочной среды и равнялась $8 \pm 0,05$ е.д., пенообразование не наблюдалось. Результаты регрессионного анализа зависимости активной кислотности от продолжительности обработки имели вид уравнения (1):

$$y = 0,13x + 7,91, R^2 = 0,75 \quad (1)$$

Водная среда имела вид прозрачной жидкости без осадка, текстура при температуре обработки t = 31,2–46,5 °С. Коэффициент пропускания (Т, %) снижался при обработке. При дальнейшем охлаждении

Таблица 2. Результаты измерения параметров водной среды с йота-каррагинаном с нейтральной pH (pH = 7,0) при $P \leq 0,95$

Table 2. Parameters of aqueous iota-carrageenan with neutral pH (pH = 7.0) at $P \leq 0.95$

Наименование показателя	Наименование образцов				
	Й-К.10	Й-К.15	Й-К.20	Й-К.25	Й-К.30
Коэффициент пропускания, %	98,0	96,0	96,0	95,5	95,5
t, °С	31,2	35,2	38,5	41,4	46,5
pH, е.д.	8,18	8,53	8,52	8,55	8,58
Вязкость, мПа·с	43,8	50,7	49,0	48,3	47,6

до температуры $t = 4,0 \pm 0,5$ °С продукт приобретал гелеобразную устойчивую структуру с вязкостью 49,0 мПа·с. Было отмечено увеличение данного показателя при продолжительности обработки до 15 мин, затем система теряла вязкость в 3,1 е.д. с учетом погрешности измерений аппарата 0,3 мПа·с. Результаты регрессионного анализа зависимости вязкости от продолжительности обработки имели вид уравнения (2):

$$y = 6,01x + 20,17, R^2 = 0,50 \quad (2)$$

Аналогичные исследования проводились с водной средой с гуаровой камедью при рН = 7,0. Данные сведены в таблицу 3.

Система с гуаровой камедью при анализе контрольного образца и ее дальнейшее изменение под действием ультразвука в водной среде с нейтральной рН представлена в виде изменения показателя «вязкость» и органолептических характеристик. Растворение гуаровой камеди в воде при температуре 55 °С было невозможно, а при температуре 25 °С требовало больше времени для суспендирования в сравнении с йота-каррагинаном. Изначально система с исследуемым полисахаридом имела вид плотного геля. При воздействии ультразвука отметили изменение цвета с белого до светло-белого, потерю текстурой плотности и образование комковатости в коллоидной системе. Исследования коэффициента пропускания указывают на повышение показателя с увеличением обработки, что меняет водную среду. Результаты регрессионного анализа зависимости активной кислотности от продолжительности обработки имели вид уравнения (3):

$$y = -0,033x + 6,29, R^2 = 0,88 \quad (3)$$

Описательная характеристика подтверждена исследованиями вязкости продукта, а именно ее снижением до 64,8 мПа·с, т. е. на 30,5 % при рН 6,10 е.д. Уравнение регрессии имело вид (4):

$$y = -10,22x + 119,92, R^2 = 0,89 \quad (4)$$

Дальнейшие исследования включали обработку исследуемых систем под влиянием ультразвукового

оборудования в кислой среде с применением йота-каррагинана (табл. 4) и гуаровой камеди (табл. 5).

Обработка йота-каррагинана в кислой среде началась с образования сгустков в системе. При воздействии ультразвука система приобрела однородную текстуру.

При анализе системы в кислой среде с йота-каррагинаном наблюдали увеличение температуры при продолжительности обработки. Изменения рН находились в пределах диапазона щелочной среды и составили $8,00 \pm 0,05$ е.д., что аналогично при разведении в нейтральной среде рН. Результаты регрессионного анализа зависимости активной кислотности от продолжительности обработки имели вид уравнения (5):

$$y = 0,24x + 7,35, R^2 = 0,86 \quad (5)$$

Гидроколлоидная система имела вид прозрачной жидкости без осадка, при температуре обработки $t = 46,5 \pm 1,0$ °С. При дальнейшем охлаждении до температуры $t = 4,0 \pm 0,5$ °С исследуемый продукт приобретал структуру с коэффициентом пропускания от 96,5 до 94,5 % и вязкостью $45,7 \pm 0,3$ мПа·с при достижении максимально заявленной обработки в течение 30 мин. Уравнение регрессии имело вид (6):

$$y = 3,25x + 26,71, R^2 = 0,89 \quad (6)$$

В процессе ультразвуковой обработки водной среды с гуаровой камедью температура увеличивалась до 45,9 °С, рН находилась в пределах диапазона 5,7 е.д. (с учетом погрешности 0,05), пенообразование не наблюдалось. Уравнение регрессии имело вид (7):

$$y = 0,043x + 5,50, R^2 = 0,50 \quad (7)$$

Система имела вид непрозрачной жидкости, плохо растворимой в используемой среде с образованием сгустка, при температуре обработки $t = 45,9$ °С. Изменился коэффициент пропускания: с 12,0 до 29,0 %. При дальнейшем охлаждении до температуры $t = 4,0 \pm 0,5$ °С продукт сохранил

Таблица 3. Результаты измерения параметров водной среды с гуаровой камедью с нейтральной рН (рН = 7,0) при $P \leq 0,95$

Table 3. Parameters of aqueous guar gum with neutral pH (pH = 7.0) at $P \leq 0.95$

Наименование показателя	Наименование образцов				
	К.10	К.15	К.20	К.25	К.30
Коэффициент пропускания, %	11,0	15,0	16,0	16,0	16,5
t, °С	27,3	36,0	45,5	52,0	52,5
рН, е.д.	6,24	6,21	6,12	6,12	6,10
Вязкость, мПа·с	93,2	83,7	78,0	66,2	64,8

Таблица 4. Результаты измерения параметров водной среды с йота-каррагинаном с кислой рН (рН = 3,9) при $P \leq 0,95$

Table 4. Parameters of aqueous iota-carrageenan with acidic pH (pH = 3.9) at $P \leq 0.95$

Наименование показателя	Наименование образцов				
	Й-К.К.10	Й-К.К.15	Й-К.К.20	Й-К.К.25	Й-К.К.30
Коэффициент пропускания, %	96,5	96,0	96,0	96,0	94,5
t, °C	39,4	42,2	44,9	44,7	45,6
рН, е.д.	7,74	8,35	8,49	8,54	8,62
Вязкость, мПа·с	34,5	39,5	40,3	41,3	45,7

Таблица 5. Результаты измерения параметров водной среды с гуаровой камедью с кислой рН (рН = 3,9) при $P \leq 0,95$

Table 5. Parameters of aqueous guar gum with acidic pH (pH = 3.9) at $P \leq 0.95$

Наименование показателя	Наименование образцов				
	К.К.10	К.К.15	К.К.20	К.К.25	К.К.30
Коэффициент пропускания, %	12,0	12,5	18,0	29,0	29,0
t, °C	40,8	42,3	44,1	44,9	45,9
рН, е.д.	5,72	5,74	5,73	5,70	5,71
Вязкость, мПа·с	3,44	3,47	3,67	3,67	3,73

Таблица 6. Результаты измерения параметров водной среды с йота-каррагинаном с щелочной рН (рН = 9,0) при $P \leq 0,95$

Table 6. Parameters of aqueous iota-carrageenan with alkaline pH (pH = 9.0) at $P \leq 0.95$

Наименование показателя	Наименование образцов				
	Й-К.Щ.10	Й-К.Щ.15	Й-К.Щ.20	Й-К.Щ.25	Й-К.Щ.30
Коэффициент пропускания, %	97,0	95,0	95,0	95,0	95,0
t, °C	38,8	40,1	40,4	43,0	42,4
рН, е.д.	9,02	8,98	8,90	8,96	8,88
Вязкость, мПа·с	15,3	17,4	17,0	19,4	22,3

Таблица 7. Результаты измерения параметров водной среды с гуаровой камедью с щелочной рН (рН = 9,0) при $P \leq 0,95$

Table 7. Parameters of aqueous guar gum with alkaline pH (pH = 9.0) at $P \leq 0.95$

Наименование показателя	Наименование образцов				
	К.Щ.10	К.Щ.15	К.Щ.20	К.Щ.25	К.Щ.30
Коэффициент пропускания, %	9,0	10,0	10,0	11,5	11,5
t, °C	37,4	40,1	41,3	42,6	44,0
рН, е.д.	7,37	7,23	7,12	7,13	7,12
Вязкость, мПа·с	6,40	6,15	6,15	6,66	6,15

структуру с вязкостью 3,5 мПа·с (с учетом погрешности измерений аппарата 0,3 мПа·с). Уравнение регрессии имело вид (8):

$$y = 0,11x + 3,15, R^2 = 0,88 \quad (8)$$

Дальнейшие исследования включали обработку исследуемых водных систем под влиянием ультразвукового воздействия в щелочной среде с применением йота-каррагинана (табл. 6) и гуаровой камеди (табл. 7).

При обработке ультразвуком йота-каррагинана в щелочной среде отмечено образование сгустков в системе, она приобрела однородную текстуру.

При повышении температуры в процессе обработки системы в щелочной среде с использованием йота-каррагинана рН находилась в пределах диапазона щелочной среды и составила 8,8 е.д., пенообразование не наблюдалось (9):

$$y = -0,025x + 9,04, R^2 = 0,68 \quad (9)$$

Гидроколлоидная система имела вид прозрачной жидкости без осадка, при температуре обработки $t = 42,4 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициент пропускания имел незначительные изменения. При дальнейшем охлаждении до температуры $t = 4,0 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ продукт приобретал устойчивую структуру с вязкостью $22,3 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ (с учетом погрешности измерений аппарата $0,3 \text{ мПа}\cdot\text{с}$). Уравнение регрессии имело вид (10):

$$y = 2,34x + 8,42, R^2 = 0,86 \quad (10)$$

Повышение температуры в процессе ультразвуковой обработки водной системы с гуаровой камедью увеличивалось до $44,0 \text{ }^\circ\text{C}$, рН находилась в пределах щелочного диапазона $7,3 \pm 0,2 \text{ е.д.}$ (с учетом погрешности $0,05$). Уравнение регрессии имело вид (11):

$$y = -0,073x + 7,49, R^2 = 0,8626 \quad (11)$$

При дальнейшем охлаждении до температуры $t = 4,0 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ продукт сохранял структуру, что отражено в исследовании вязкости – $6,5 \pm 0,2 \text{ мПа}\cdot\text{с}$

(с учетом погрешности измерений аппарата $0,3 \text{ мПа}\cdot\text{с}$). Уравнение регрессии имело вид (12):

$$y = -0,04x + 6,32, R^2 = 0,50 \quad (12)$$

Гидроколлоидная система имела вид прозрачной жидкости, плохо растворимой в используемой среде с образованием плотного сгустка, при температуре обработки $t = 44,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вышеприведенные результаты исследований дополнены показателями изменений органолептических свойств. Исследования проведены с применением дескрипторно-профильного метода. Образцы хранили в течение 12 ч при температуре $t = 4,0 \pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Полученные профилограммы представлены на рисунках 1 и 2.

Гидроколлоидные системы с йота-каррагинаном при рН = 7,0 (образцы Й-К.0–Й-К.30), рН = 3,9 (образцы Й-К.К.10–Й-К.К.30) и рН = 3,9 (образцы Й-К.Щ.10–Й-К.Щ.30) имели безвкусный флейвор и прозрачный цвет. Образцы Й-К.0–Й-К.30 и Й-К.К.10–Й-К.К.30 характеризовались эластичной и однородной текстурой (3 балла). У образцов Й-К.Щ.10–Й-К.Щ.30 однородность текстуры оценили в 4 балла.

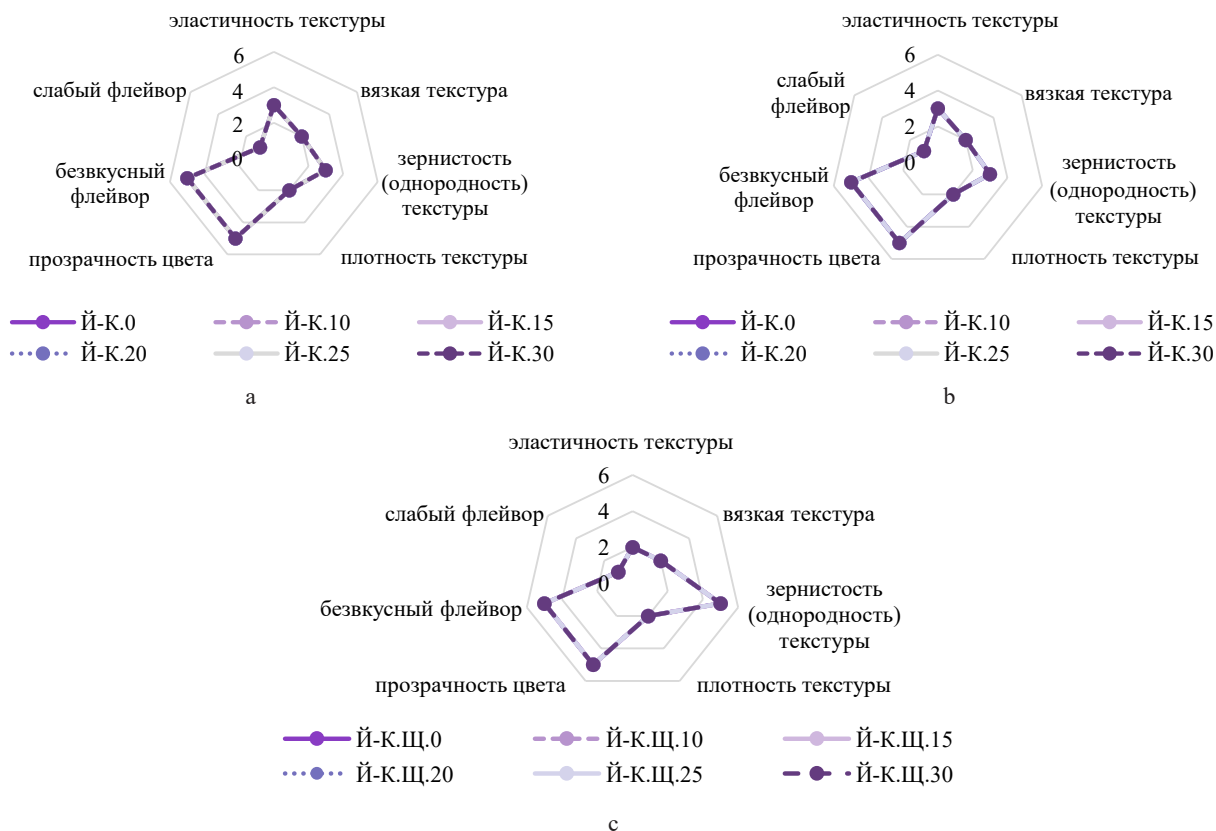


Рисунок 1. Сенсорные профилограммы водной системы с йота-каррагинаном: а – в нейтральной среде (рН = 7,0); б – в кислой среде (рН = 3,9); с – в щелочной среде (рН = 9,0), $P \leq 0,95$

Figure 1. Sensory profiles of aqueous iota-carrageenan: a – neutral pH 7.0; b – acidic pH 3.9; c – alkaline pH 9.0, $P \leq 0.95$

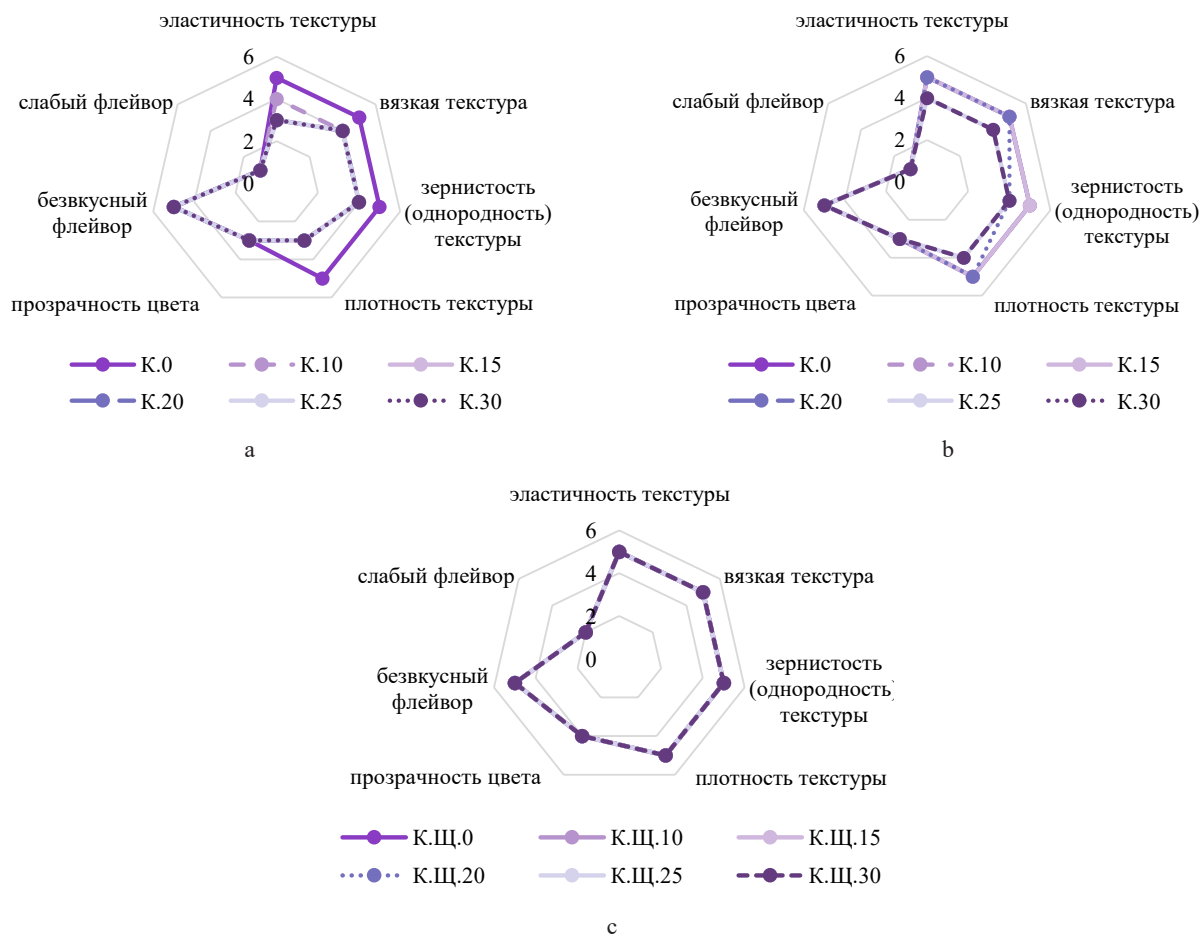


Рисунок 2. Сенсорные профилограммы водной среды с гуаровой камедью: а – в нейтральной среде (рН = 7,0); б – в кислой среде (рН = 3,9); с – в щелочной среде (рН = 9,0), $P \leq 0,95$

Figure 2. Sensory profiles of aqueous guar gum: a – neutral pH 7.0; b – acidic pH 3.9; c – alkaline pH 9.0, $P \leq 0.95$

Гидроколлоидные системы с гуаровой камедью при рН = 7,0 (образцы К.0–К.30) и рН = 3,9 (образцы К.К.0–К.К.30) имели вид эластичной, вязкой, однородной и плотной текстуры, снижающейся при увеличении продолжительности обработки. Вкус и запах образцов описывался как «безвкусный». Система с гуаровой камедью при рН = 9,0 (образцы К.Щ.0–К.Щ.30) имела вид эластичной, вязкой, однородной и плотной текстуры, не снижающейся при увеличении продолжительности обработки.

Выводы

В результате исследований ультразвуковая обработка гидроколлоидов (полисахаридов) йота-каррагинана и гуаровой камеди в присутствии водного экстрагента различного диапазона рН показала, что водная среда с йота-каррагинаном, в отличие от рН среды, имела разный диапазон вязкости. В нейтральной среде вязкость была равна 47,6 мПа·с (при равномерном увеличении до 20 мин

обработки), в кислой – 45,7 мПа·с, в щелочной – 22,3 мПа·с. Диапазон рН водных сред в процессе ультразвуковой обработки находился в пределах 8 е.д. Максимальная температура среды составляла 46,5 °С в нейтральной среде.

Вязкость гидроколлоидной системы с гуаровой камедью, в отличие от рН среды, в нейтральной среде снижалась в процессе обработки с 119,0 до 64,8 мПа·с, в кислой – осталась неизменной и была в пределах $3,5 \pm 0,2$ мПа·с, в щелочной – немного увеличивалась и составила 6,52 мПа·с. Диапазон рН водных сред в процессе ультразвуковой обработки находился в пределах для нейтральной и кислой среды – $6,0 \pm 0,5$ е.д., для щелочной – 7,4 е.д. Максимальная температура системы составляла 52,5 °С в нейтральной среде.

Согласно установленным данным йота-каррагинан в качестве желирующего агента при использовании ультразвуковых воздействий можно применять для получения продукции с рН в пределах 3,9–6,0 е.д. в создании текучей гелеобразной

структуры продуктов. Гидроколлоидная система с гуаровой камедью, в случае совмещения обработки с ультразвуковыми воздействиями, показала, что вязкость продукта снижается либо находится в низких пределах, поэтому для применения в производстве не рекомендуется.

Критерии авторства

К. Н. Нициевская руководила работой. Все авторы принимали участие в исследованиях и обработке данных, написании текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

K.N. Nitsievskaya supervised the research. All the authors took equal part in the research, data processing, and writing.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

References/Список литературы

1. Donchenko LV, Sokol NV, Krasnoselova EA. Food chemistry. Hydrocolloids. Moscow: Urait; 2018. 180 p. (In Russ.). [Донченко Л. В., Сокол Н. В., Красноселова Е. А. Пищевая химия. Гидроколлоиды. М.: Юрайт, 2018. 180 с.]. <https://elibrary.ru/ZGNSXR>
2. Ivleva AR, Kanarskaya ZA. The use of polysaccharides as hydrocolloids in foods. Bulletin of Kazan Technological University. 2014;17(14):418–422. (In Russ.). [Ивлева А. Р., Канарская З. А. Применение полисахаридов в качестве гидроколлоидов в пищевых продуктах // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 14. С. 418–422.]. <https://elibrary.ru/STIBUX>
3. Mi H, Li Y, Wang C, Yi S, Li X, Li J. The interaction of starch-gums and their effect on gel properties and protein conformation of silver carp surimi. Food Hydrocolloids. 2021;112. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106290>
4. Kim H, Hwang H-I, Song K-W, Lee J. Sensory and rheological characteristics of thickened liquids differing concentrations of a xanthan gum-based thickener. Journal of Texture Studies. 2017;48(6):571–585. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12268>
5. Mirzaei M, Alimi M, Shokoohi S, Golchoobi L. Synergistic interactions between konjac-mannan and xanthan/tragacanth gums in tomato ketchup: Physical, rheological, and textural properties. Journal of Texture Studies. 2018;49(6):586–594. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12359>
6. Faheid SMM, Rizk IRS, Kishk YFM, Ragab GH, Mostafa S. Carboxymethyl cellulose and psyllium husk in gluten-free pasta. Foods and Raw Materials. 2022;10(2):329–339. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-540>
7. Nepovninikh NV, Petrova ON, Belova NM, Yeganehzad S. Physico-chemical and texture properties of gelatin-free jelly desserts. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(1):43–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-43-49>
8. Shishkin AA. Ecology and epidemiology of prion infection. Some aspects of prevention. International Student Scientific Bulletin. 2018;(5). [Шишкин А. А. Экология и эпидемиология прионной инфекции. Некоторые аспекты профилактики // Международный студенческий научный вестник. 2018. № 5.]. <https://elibrary.ru/UZQNKU>
9. Istihal theory in Islamic and scientific perspective in food industry [Internet]. [cited 2022 Aug 19]. Available from: <https://www.halalcertificationturkey.com/2015/01/28/gelatin-transformation-istihala-in-science-and-fiqh>
10. Gilsenan PM, Ross-Murphy SB. Rheological characterisation of gelatins from mammalian and marine sources. Food Hydrocolloids. 2000;14(3):191–195. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(99\)00050-8](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(99)00050-8)
11. Iakubova OS, Bekesheva AA. Scientific substantiation of physical properties of fish gelatin. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. 2018;(3):132–140. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2017-3-132-140>
12. Fagioli L, Pavoni L, Logrippo S, Pelucchini C, Rampoldi L, Cespi M, et al. Linear viscoelastic properties of selected polysaccharide gums as function of concentration, pH, and temperature. Journal of Food Science. 2019;84(1):65–72. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14407>
13. Habibi H, Khosravi-Darani K. Effective Variables on production and structure of xanthan gum and its food applications: A review. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2017;10:130–140. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.02.013>
14. Alba K, MacNaughtan W, Laws AP, Foster TJ, Campbell GM, Kontogiorgos V. Fractionation and characterisation of dietary fibre from blackcurrant pomace. Food Hydrocolloids. 2018;81:398–408. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.023>
15. Kurganova EV, Arseneva TP. Selection of the stabilizer type and dose for fermented frozen sherbet. Journal of International Academy of Refrigeration. 2017;(3):10–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.21047/1606-4313-2017-16-3-10-15>
16. Cui H, Yang M, Shi C, Li C, Lin L. Application of xanthan-gum-based edible coating incorporated with *Litsea cubeba* essential oil nanoliposomes in salmon preservation. Foods. 2022;11(11). <https://doi.org/10.3390/foods11111535>

17. Dzionek A, Wojcieszynska D, Guzik U. Use of xanthan gum for whole cell immobilization and its impact in bioremediation – A review. *Bioresource Technology*. 2022;351. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126918>
18. Santos JC, Coêlho DF, Tambourgi EB, da Silva GF, Souza RR. Production of xanthan gum by *Xanthomonas campestris* CCT 13951 submerged fermentation on hydrolysed agroindustrial by-products. 2021. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-158198%2FV1>
19. Berninger T, Dietz N, González López Ó. Water-soluble polymers in agriculture: xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics. *Microbial Biotechnology*. 2021;14(5):1881–1896. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13867>
20. Akhmedov OR, Sohbnazarova KhA, Shomurotov ShA. Biologically active compounds based on modified xanthan gum. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2017;(3):227–231. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017031729>
21. Mukhanova MA, Iakubova OS, Bekesheva AA, Aizatulina NR. Guar comparative characteristics and prospects of their use for sauces gelation. *Food Industry*. 2021;6(3):58–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-3-7>
22. Basiri S. Applications of microbial exopolysaccharides in the food industry. *Avicenna Journal of Medical Biochemistry*. 2021;9(2):107–120. <https://doi.org/10.34172/ajmb.2021.16>
23. Rana S, Upadhyay LSB. Microbial exopolysaccharides: Synthesis pathways, types and their commercial applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020;157:577–583. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.084>
24. Moustafa M, Abu-Saied MA, Taha TH, Elnouby M, El Desouky EA, Alamri S, *et al.* Preparation and characterization of super-absorbing gel formulated from κ -carrageenan – potato peel starch blended polymers. *Polymers*. 2021;13(24). <https://doi.org/10.3390/polym13244308>
25. Liu B, Zhu S, Zhong F, Yokoyama W, Huang D, Li Y. Modulating storage stability of binary gel by adjusting the ratios of starch and kappa-carrageenan. *Carbohydrate Polymers*. 2021;268. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118264>
26. Abdillah AA, Lin H-H, Charles AL. Development of halochromic indicator film based on arrowroot starch/iota-carrageenan using Kyoho skin extract to monitor shrimp freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;211:316–327. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.076>
27. Marín-Peñalver D, Alemán A, Montero MP, Gómez-Guillén MD. Entrapment of natural compounds in spray-dried and heat-dried iota-carrageenan matrices as functional ingredients in *surimi* gels. *Food and Function*. 2021;12(5):2137–2147. <https://doi.org/10.1039/D0FO02922J>
28. Fransiska D, Utomo BSB, Darmawan M, Gozali D, Iqbal MN. Physicochemical characterization of kappa-iota carrageenan gel with papain enzyme. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1943. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1943/1/012175>
29. Praseptiangga D, Rahmawati A, Manuhara GJ, Khasanah LU, Utami R. Effects of plasticizer and cinnamon essential oil incorporation on mechanical and water barrier properties of semirefined iota-carrageenan-based edible film. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;828. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/828/1/012034>
30. Campo VL, Kawano DF, da Silva DB, Carvalho I. Carrageenans: Biological properties, chemical modifications and structural analysis – A review. *Carbohydrate Polymers*. 2009;77(2):167–180. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.01.020>
31. Carrillo-Lopez LM, Alarcon-Rojo AD, Luna-Rodriguez L, Reyes-Villagrana R. Modification of food systems by ultrasound. *Journal of Food Quality*. 2017;2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5794931>
32. Tsuglenok NV. Electrophysical methods of seed treatment. *Issues of Science and Education*. 2019;68(21):46–59. (In Russ.). [Цугленок Н. В. Анализ эффективного использования электрофизических методов обработки семян // Вопросы науки и образования. 2019. Т. 68. № 21. С. 46–59.]. <https://elibrary.ru/AFGBPR>
33. Zipaev DV, Kozhukhov AN, Tulina AA. Hopped lemonade production technology. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2020;(1):97–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2020-19-1-97-102>