

# ВЛИЯНИЕ МАССОВОЙ ДОЛИ СТАБИЛИЗАТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА МОРОЖЕНОГО ЭКОНОМКЛАССА\*

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

**Анна Валентиновна Ландиховская**, канд. техн. наук, научный сотрудник

E-mail: anna.landih@yandex.ru

**Антонина Анатольевна Творогова**, д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе

E-mail: antvorgogova@yandex.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, г. Москва

В настоящее время в составе стабилизационных систем для мороженого по экономическим аспектам доминируют композиции гуаровой камеди, карбоксиметилцеллюлозы и каррагинана при высоком содержании эмульгатора (не менее 70 %). При этом существует вероятность отрицательного влияния снижения доли гидроколлоидов на состояние консистенции и структуры готового продукта, поскольку рекомендации остаются постоянными – 0,5 % для сливочного мороженого. Целью исследования являлось установление влияния массовой доли стабилизаторов (0,135, 0,2 и 0,235 %) на показатели качества сливочного мороженого при одном и том же содержании эмульгатора (0,3 %). Использованы современные реологические, микроструктурные и термостатические методы исследований. Установлено, что по мере увеличения содержания стабилизаторов значения динамической вязкости смесей по сравнению с показателями образца со сниженной массовой долей стабилизаторов увеличились в 1,5 и 2,1 раза. Увеличение динамической вязкости привело к повышению механического воздействия на продукт в процессе фризерования и увеличению числа агломератов жировых частиц. Кроме того, при увеличении содержания стабилизаторов в мороженом снизились значения показателей, характеризующих консистенцию: условная вязкость, адгезионная сила и липкость, что благоприятно. Содержание стабилизаторов не оказалось заметного влияния на сохранение их стабильности в процессе хранения. Увеличение доли стабилизаторов вследствие повышения вязкости и доли агломерированного жира способствовало улучшению показателя «термоустойчивость». Таким образом, исследования показали, что массовая доля стабилизаторов в составе стабилизационной системы при доминирующем использовании гуаровой камеди и карбоксиметилцеллюлозы натриевой соли должна быть не менее 0,2 %.

**Ключевые слова:** сливочное мороженое, гуаровая камедь, карбоксиметилцеллюлоза, вязкость, условная твердость, дисперсность структурных элементов

**Для цитирования:** Ландиховская, А. В. Влияние массовой доли стабилизаторов на показатели качества мороженого экономкласса / А. В. Ландиховская, А. А. Творогова // Молочная промышленность. 2025. № 4. С. 63–69. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-4-50>

## ВВЕДЕНИЕ

Мороженое представляет собой сложную систему, состоящую из кристаллов льда, воздушных пузырьков, жировых частиц, включая агломерированные, и непрерывной незамерзающей плазмы с растворенными в ней белками, солями и сахарами [1, 2]. Чаще всего в мороженом содержится 30 % льда, 50 % воздуха, 5 % жира и 15 % плазмы [3]. Основными сырьевыми источниками традиционного мороженого являются молочные продукты: молоко, масло, сгущенное цельное, сухое цельное или обезжиренное молоко. Обязательными компонентами в производстве мороженого являются стабилизаторы и эмульгаторы, влияющие на сенсорное восприятие мороженого, а также на его структуру в процессе хранения. Жир играет важную роль в формировании структуры продукта, а также оказывает влияние на его органолептические свойства [4].

Эмульгаторы необходимы для стабилизации эмульсий путем абсорбции на границе раздела масла-вода. Они снижают поверхностное натяжение, благодаря чему жидкость остается однородной и функциональной в течение длительного времени. При выборе эмульгатора обращают внимание на их гидрофильно-липофильный баланс, шкала которого варьируется от 0 до 20. Поверхностно-активные вещества с гидрофильно-липофильным балансом от 3,5 до 6 оптимальны для эмульсий по типу «вода-масло», для эмульсий «масло-вода» – от 8 до 18. Кроме того, эффективным является комбинирование эмульгаторов с различным уровнем гидрофильно-липофильного баланса [5].

Полисахариды, такие как камеди рожкового дерева, тары, каррагинаны, гуаровая, ксантановая, целлюлозная (карбоксиметилцеллюлоза),

\*Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по Государственному заданию ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН



используются в производстве мороженого для предотвращения рекристаллизации льда, повышения вязкости смеси, а также предотвращения усадки мороженого в процессе хранения. Эмульгаторы используют для повышения способности смесей к насыщению воздухом благодаря их влиянию на процесс дестабилизации жировой фазы в процессе замораживания во фризере, что положительно влияет на скорость таяния мороженого и текстуру продукта [6]. На степень дестабилизации жира влияет не только количество внесенного эмульгатора, но и его тип. Эмульгаторы вытесняют белки с поверхности жирового шарика, в результате чего оболочка повреждается и происходит коалесценция жировых капель [7].

Свойства всех гидроколлоидов отличаются между собой. Это необходимо учитывать в связи с ростом производства мороженого так называемого экономкласса (со сниженными затратами на производство). Кроме того, существуют определенные трудности в приобретении эффективного гидроколлоида камеди рожкового дерева. В связи с этим наиболее применяемыми гидроколлоидами в составе стабилизационных систем стали гуаровая камедь, карбоксиметилцеллюлоза натриевая соль и каррагинан.

Гуаровая камедь – природный полисахарид, относится к неионным биополимерам, широко используется в пищевой промышленности в качестве загустителя [8]. Она не растворяется в жирах, спиртах, эфирах, кетонах, при этом обладает высокой растворимостью в воде. Скорость взаимодействия с молекулами воды и вязкость гуаровой камеди зависят от физико-химических параметров [9]. Гуаровая камедь при низких концентрациях обладает довольно высокой вязкостью, может «образовывать водородные связи с молекулами воды» [10].

Целлюлоза является самым распространенным полисахаридом, из которого изготавливают синтетические производные, в том числе хорошо растворимую карбоксиметилцеллюлозу натриевую соль [11]. В производстве мороженого карбоксиметилцеллюлоза, как и все гидроколлоиды, используется для повышения вязкости продуктов. Кроме того, ее способность растворяться в холодной воде и высокая влагоудерживающая способность позволяют варьировать свойства продукта. При использовании карбоксиметилцеллюлозы необходимо интенсивное перемешивание для предотвращения образования комков и агломерации частиц [12].

Каррагинаны производят из красных водорослей, они представляют собой сульфатированные галактаны. В зависимости от вязкоупругих свойств полисахаридов при взаимодействии с водой выделяются гели каппа-каррагинана (прочные, но хрупкие), гели йота-каррагинана (обладают меньшей эластичностью) и негелеообразующий лямбда-каррагинан [13, 14]. Каппа-каррагинан растворим в воде, образует двойные спирали при охлаждении горячего раствора из-за образования водородных связей и термообратимые гели [15].

**Целью работы** было изучение показателей качества сливочного мороженого при различном содержании стабилизаторов для продукции экономкласса и одинаковом содержании эмульгатора с умеренным деэмульгирующим эффектом.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследовали образцы традиционного сливочного мороженого с массовой долей молочного жира 10 %, СОМО 10 %, сахарозы 14 % и различным соотношением эмульгаторов и стабилизаторов. Образец № 1 – сливочное мороженое со сниженной массовой долей стабилизаторов (0,135 %), образец № 2 – с оптимальной массовой долей стабилизаторов (0,2 %), образец № 3 – с увеличенной (0,235 %). Содержание эмульгатора во всех образцах одинаковое – 0,3 %. Общее количество стабилизационной системы в образцах мороженого следующее: № 1 – 4,5 г/кг, № 2 – 5,0 г/кг и № 3 – 5,5 г/кг.

Для производства образцов мороженого использовали следующее сырье: масло сливочное «Традиционное» с массовой долей жира 82,5 % (ГОСТ 32261-2013, АО «ЗМК», Россия), молоко сухое обезжиренное (ГОСТ Р 52791-2007, ЗАО «Учебно-опытный молочный завод», Россия). В качестве эмульгатора использовали моно- и диглицериды жирных кислот (Е471) (ZTCC GMS 90, Китай), стабилизаторы – гуаровая камедь (Е412) (RICOL-RG-255, Индия), карбоксиметилцеллюлоза (Е466) (Китай) и каппа-каррагинан (Е407) (BLK1120, Китай).

Сливочное мороженое изготавливали по традиционной технологии, согласно ТТИ ГОСТ 31457-2012, включая все стадии технологического процесса: смещивание сухих и жидких компонентов, пастеризация, фильтрование, гомогенизация, охлаждение, созревание, фризерование и закаливание.



Источник изображения: freepik.com

Показатели динамической вязкости смеси устанавливали на вискозиметре DV-II+ PRO с ПО Rheocalc V3 1-1 (Brookfield, США) при поддержании постоянной температуры смеси на уровне  $4 \pm 0,5$  °C. Показатели твердости определяли на текстурометре LFRA Texture Analyzer с ПО TexturePro Lite v1.1 (Brookfield, США), перед проведением исследования образцы мороженого хранились при температуре  $-20 \pm 2$  °C. Тесты на скорость плавления образцов проводили в термостате ТС-1/80 СПУ (Россия) при постоянной температуре  $20 \pm 1,5$  °C, первую точку снимали через 60 мин, а затем каждые 10 мин до общего времени термостатирования 120 мин. Дисперность воздушной и жировой фазы, кристаллов льда фиксировали на микроскопе CX-41 (Olympus, Япония) с применением программного обеспечения ImageScope M (Россия), для сохранения кристаллов льда при температуре  $-18$  °C использовали системы пельтье PE 120 (Linkam, Великобритания).

Обработку данных и построение графиков проводили с использованием программ Microsoft Excel, Past 4.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В современных стабилизационных системах для мороженого, как правило, на долю эмульгатора приходится 70 % от общего количества используемых пищевых добавок, а на долю стабилизаторов (гидроколлоидов) – только 30 %. При нормах применения стабилизационных систем в мороженом – 0,65 % для молочного, 0,5 % для сливочного и 0,4 % для пломбира, содержание стабилизаторов в продукте составит 0,195, 0,15 и 0,12 %, соответственно.

Однако такого количества гидроколлоидов в составе комплексной пищевой добавки для достижения необходимого уровня динамической вязкости бывает недостаточно, что может быть причиной ухудшения качества сливочного мороженого в процессе хранения (усадка, рост кристаллов льда, снижение дисперсности воздушной фазы).

В связи с этим интерес представляют исследования показателей качества сливочного мороженого со сниженным (образец № 1), оптимальным, способствующим получению желаемой консистенции традиционного сливочного мороженого (образец № 2), и повышенным (образец № 3). Количество вносимого эмульгатора в образцах практически не отличалось. Состав мороженого и стабилизационных систем характерен для продукции экономкласса (с содержанием жира менее 12 %, изготавляемой с использованием сливочного масла и молочных консервов, характеризуемой взбитостью не менее 90 %).

Состав вносимых в образцы мороженого стабилизационных систем представлен в таблице 1.

Во всех образцах сливочного мороженого с массовой долей молочного жира 10 % были изучены показатели консистенции (вязкость, условная твердость,

**Таблица 1. Характеристика состава стабилизационных систем в образцах мороженого**

Наименование пищевой добавки	Образец		
	№ 1	№ 2	№ 3
Эмульгатор (E471), г/кг	3,15	3,0	3,15
Стабилизаторы (E412, E466, E 407), г/кг	1,35	2,0	2,35
Соотношение эмульгатор/стабилизаторы	70/30	60/40	43/57

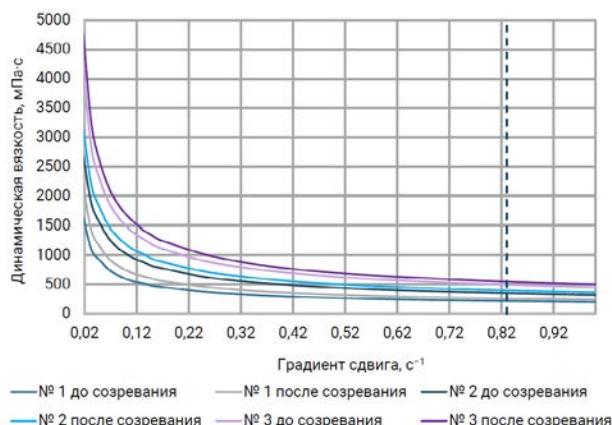
адгезионная сила и условная клейкость), термоустойчивость и дисперсность структурных элементов (воздушная фаза, кристаллы льда и жировая фаза).

На рисунке 1 представлены данные о показателях динамической вязкости до и после созревания смесей сливочного мороженого при разных градиентах сдвига.

Установлено, что во всех образцах мороженого произошло различное нарастание динамической вязкости смеси после процесса созревания, несмотря на одинаковое содержание эмульгатора: в образце № 1 – на 19 %, № 2 – на 13 % и № 3 – на 10 %. Это связано с увеличением доли карбоксиметилцеллюлозы в составе стабилизационных систем в образцах № 2 и № 3 и известным фактом понижения ее водосвязывающей способности в процессе созревания смеси.

Как и следовало ожидать, повышение содержания гидроколлоидов привело к увеличению вязкости смесей для мороженого. При градиенте сдвига на срез 0,83 с<sup>-1</sup>, близкому по значению к возникающему при перемешивании смеси в емкости для хранения, динамическая вязкость образца № 1 составила 259 мПа·с, № 2 – 396 мПа·с, № 3 – 546 мПа·с. Как видно, значения вязкости – образца № 1 (с пониженным содержанием стабилизаторов) отличаются от значений образцов № 2 и № 3 в 1,5 и 2,1 раза соответственно.

Более низкое содержание стабилизаторов в образце № 1, путем влияния на напряжение сдвига и количество агломерированного жира, сказалось на способности смеси к насыщению воздухом. При фризеровании смеси без принудительной подачи воздуха во фризер взбитость мороженого в образце № 1 составила 57 %, № 2 – 67 % и № 3 – 64 %.



**Рисунок 1. Динамическая вязкость смеси в образцах сливочного мороженого**

Изначальная вязкость смеси оказала влияние на реологические свойства мороженого, приведенные в таблице 2. Определено, что в образце с наибольшей вязкостью (№ 3) по сравнению с образцом с наименьшей вязкостью (№ 1) показатель «условная твердость» ниже почти в 1,5 раза, что положительно сказывается на консистенции мороженого.

Контрольный образец (№ 2) с оптимальным содержанием стабилизаторов характеризовался наименьшими значениями показателя «адгезионная сила» по сравнению с другими образцами, из чего следует, что его легче формовать на линиях экструзионного типа и выгружать из крупногабаритной упаковки.

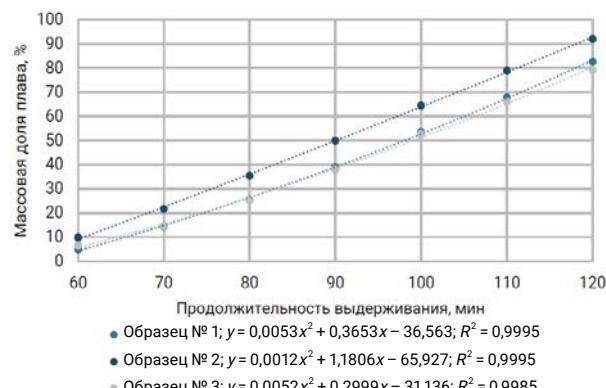
При исследовании термоустойчивости образцов установлено, что образцы № 1 и № 3 характеризовались лучшим значением этого показателя в связи с меньшей взбивостью и большей вязкостью. На рисунке 2 представлен график зависимости массовой доли плава от продолжительности выдерживания образцов в термостате.

Установлено, что через 60 мин термостатирования в образце № 1 образовалось 5 % плава, что в 2 раза меньше, чем у контрольного образца, в образце № 3 – 7 % плава.

**Таблица 2. Реологические характеристики образцов мороженого**

Показатель	Образцы		
	№ 1	№ 2	№ 3
Условная твердость, Н	8,98 ± 1,46 <sup>a</sup>	8,00 ± 1,61 <sup>a</sup>	6,01 ± 1,76
Адгезионная сила,  Н	0,40 ± 0,07	0,27 ± 0,03	0,32 ± 0,04
Условная клейкость,  Н·с	1,92 ± 0,31	1,37 ± 0,21 <sup>d</sup>	1,43 ± 0,21 <sup>d</sup>

Примечание: значения с одинаковой буквой в одной строке существенно не различаются ( $p > 0,05$ )



**Рисунок 2. График зависимости массовой доли плава от продолжительности выдерживания при температуре 20 ± 1,5 °C**

Источник изображения: freepik.com





Источник изображения: freepik.com

Состояние жировой фазы в сливочном мороженом представлено на микрофотографиях рисунка 3. Как видно на представленных микрофотографиях жировой фазы, большая вязкость

образцов № 2 и № 3 сказалась на количестве жировых глобул образовавшихся в образцах. Их количество в поле зрения возросло.

В процессе хранения были изучены изменения, происходящие в структуре продукта: дисперсности воздушной фазы и кристаллах льда (табл. 3).

В ходе проведенного исследования было установлено, что массовая доля стабилизатора оказывается на дисперсности структурных элементов в мороженом при хранении. В образцах № 2 и № 3 в течение 3 мес. хранения рост кристаллов льда не отмечен, что характеризует влияние вязкой среды на стабильность этих структурных элементов. В образце № 1 с изначально низкой вязкостью образовались более мелкие кристаллы льда, однако через 3 мес. хранения их средний размер увеличился на 11 %. Важно и то, что доля кристаллов льда размером до 70 мкм в образцах в течение 3 мес. хранения осталась без изменений, что свидетельствует о том, что рост кристаллов льда произошел, скорее всего, за счет плавления мелких кристаллов. Более высокая вязкость образца № 3 в незначительной степени способствовала снижению дисперсности воздушной фазы. Через 3 мес. средний размер воздушных пузырьков увеличился на 8 %, доля воздушных пузырьков до 50 мкм снизилась на 5 %.

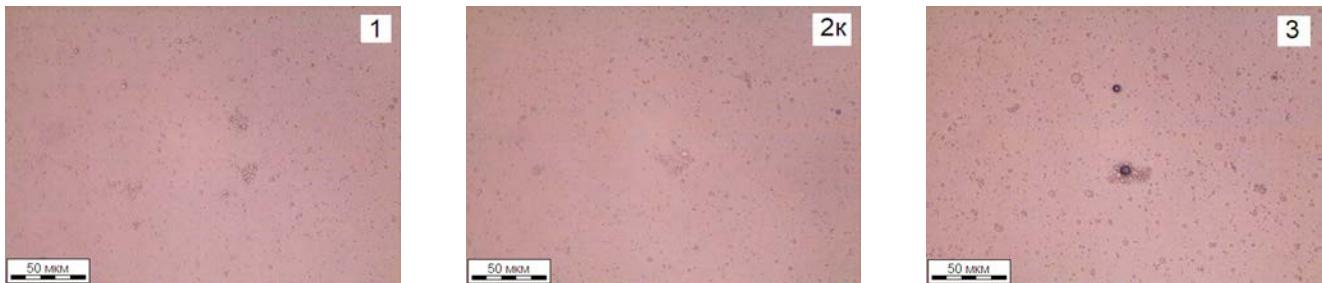


Рисунок 3. Микрофотографии жировой фазы в образцах сливочного мороженого

Таблица 3. Дисперсность воздушных пузырьков и кристаллов льда в образцах сливочного мороженого

Образец	Кристаллы льда			Пузырьки воздуха		
	Средний размер, мкм	Доля до 50 мкм, %	Доля до 70 мкм, %	Средний размер, мкм	Доля до 50 мкм, %	Доля до 70 мкм, %
<b>Закаливание</b>						
№ 1	27,3 ± 0,6	97	99	33,9 ± 3,4	84	97
№ 2	31,8 ± 0,7	93	98	30,2 ± 1,7	88	97
№ 3	27,9 ± 0,7	96	99	32,7 ± 0,9	85	95
<b>Через 3 мес. хранения</b>						
№ 1	30,4 ± 1,1	94	99	33,7 ± 1,1	83	96
№ 2	31,7 ± 1,5	93	98	31,1 ± 2,2	85	96
№ 3	27,6 ± 0,9	96	99	35,4 ± 1,1	80	92

## ВЫВОДЫ

Проведены исследования по определению влияния массовой доли 0,135 %, 0,2 % и 0,235 % широко применяемой в настоящее время композиции полисахаридов гуаровой камеди, карбоксиметилцеллюлозы и каррагинана в производстве сливочного мороженого экономкласса. Установлено, что несмотря на один и тот же качественный и количественный состав эмульгатора, в связи с изменением вязкости среды происходит изменение

показателей, характеризующих консистенцию и структуру мороженого. По мере повышения содержания стабилизаторов снижается значение показателей «условная твердость», «адгезионная сила» и «условная клейкость», что положительно. В процессе хранения повышается стабильность структурных элементов (кристаллов льда и воздушной фазы). Результаты исследований показали нецелесообразность использования композиции гидроколлоидов в количестве менее 0,2 %. ■

Поступила в редакцию: 10.03.2025  
Принята в печать: 16.06.2025

## EFFECT OF MASS FRACTION OF STABILIZERS ON QUALITY INDICATORS OF ECONOMY CLASS ICE-CREAM

Anna V. Landikhovskaya, Antonina A. Tvorogova

All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry – Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, Moscow

### ORIGINAL ARTICLE

Most commercial ice-cream stabilizing systems contain guar gum, carboxymethyl cellulose, and carrageenan with  $\leq 70$  % emulsifier. A lower share of hydrocolloids is likely to affect the consistency and structure of the finished product as creamy ice-cream simply cannot contain less than 0.5 % hydrocolloids. This research measured the correlation between the quality indicators of creamy ice-cream and three different mass fractions of stabilizers: reduced (Sample 1, 135 %), optimal (Sample 2, 0.2 %), and increased (Sample 3, 0.235 %). The content of emulsifier content remained the same (0.3 %). The experiments relied on advanced rheological, microstructural, and thermostatic research methods. As the content of stabilizers grew, the dynamic viscosity increased 1.5 and 2.1 times, compared to Sample 1. The high dynamic viscosity increased the mechanical impact on the product during freezing, as well as the number of agglomerates of fat particles. Larger contents of stabilizers reduced the conditional viscosity, adhesive force, and stickiness, which could be characterized as a positive effect. The content of stabilizers had no significant effect on the dispersion of ice crystals and air phase, but the increase in their proportion improved their stability during storage. As the increased viscosity and the share of agglomerated fat grew, the increasing proportion of stabilizers improved the thermal stability. The optimal mass fraction of stabilizers with guar gum and carboxymethyl cellulose of sodium salt should not go below 0.2 % in economy class ice-cream.

**Keywords:** creamy ice-cream, guar gum, carboxymethyl cellulose, viscosity, conventional hardness, dispersion of structural elements

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Творогова, А. А.** Мороженое в России и СССР: Теория. Практика. Развитие технологий / А. А. Творогова. – СПб: Профессия, 2021. – 249 с.
2. **Goff, H. D.** Formation and stabilization of structure in ice-cream and related products / H. D. Goff // Current Opinion in Colloid & Interface Science. 2002. Vol. 7(5-6). P. 432–437. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(02\)00076-6](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(02)00076-6)
3. **Kamińska-Dwórznicka, A.** The effects of selected stabilizers addition on physical properties and changes in crystal structure of whey ice cream / A. Kamińska-Dwórznicka [et al.] // LWT. 2022. Vol. 154. 112841. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112841>
4. **Lio, X.** Effect of fat aggregate size and percentage on the melting properties of ice cream / X. Lio [at al.] // Food Research International. 2022. Vol. 160. 111709. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111709>
5. **Blount, R. J. S.** Influence of Water Content and Emulsifiers on the Stability and Texture of Oleogel-Emulsions / R. J. S. Blount [at al.] // Applied Food research. 2025. Vol. 5(1). 100796. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100796>
6. **Voronin, G. L.** Freezing kinetics and microstructure of ice cream from high-pressure-jet processing of ice cream mix / G. L. Voronin [et al.] // Journal of Dairy Science. 2021. Vol. 104(3). P. 2843–2854. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19011>
7. **Liu, X.** Structural and functional differences between ice crystal-dominated and fat network-dominated ice cream / X. Liu [at al.] // Food Hydrocolloids. 2023. Vol. 138. 108466. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108466>
8. **Salehi, F.** Influence of organic acids on the viscosity and rheological behavior of guar gum solution / F. Salehi [at al.] // Results in Engineering. 2024. Vol. 22. 102307. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102307>
9. **Razi, S. M.** The effect of high hydrostatic pressure on the structure of whey proteins-guar gum mixture / S. M. Razi [at al.] // Heliyon. 2024. Vol. 10(1). e24140. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24140>
10. **Ren, Z.** Oil-in-water emulsions prepared using high-pressure homogenisation with *Dioscorea opposita* mucilage and food-grade polysaccharides: guar gum, xanthan gum, and pectin / Z. Ren [at al.] // LWT. 2022. Vol. 162. 113468. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113468>
11. **Junaid, P. M.** Polysaccharide-based hydrogels for microencapsulation of bioactive compounds: A review / P. M. Junaid [et al.] // Journal of Agriculture and Food Research. 2024. Vol. 15. 101038. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101038>
12. **Ćorković, I.** Carboxymethylcellulose hydrogels: Effect of its different amount on preservation of tart cherry anthocyanins and polyphenols / I. Ćorković [et al.] // Current Plant Biology. 2021. Vol. 28. 100222. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2021.100222>
13. **Hale, J.** Ice recrystallization inhibition activity of chemically defined carrageenans / J. Hale [et al.] // Food Hydrocolloids. 2024. Vol. 157. 110423. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110423>
14. **Hilliou, L.** From the seaweeds' carrageenan composition to the hybrid carrageenans' hydrogel elasticity: Identification of a relationship based on the content in iota-carrageenan / L. Hilliou [at al.] // Food Hydrocolloids. 2025. Vol. 162. 111007. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.111007>
15. **Regev-Yehishalom, O.** Synergistic kappa-carrageenan/konjac-glucomannan hydrogels for the tunable and controlled release of biomimetic nanoparticles / O. Regev-Yehishalom [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. 2025. Vol. 306(2). 141461. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141461>