2020 Т. 50 № 3 / Техника и технология пищевых производств / Food Processing: Techniques and Technology
ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-450-459
УДК 637.674:57.089

Оригинальная статья
http://fptt.ru/

Влияние трегалозы на дисперсность кристаллов льда и консистенцию низкожирного мороженого

А. В. Ландиховская, А. А. Творогова*, Н. В. Казакова, И. А. Гурский

Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности,
127422, Россия, г. Москва, ул. Костякова, 12

**e-mail: antvorogova@yandex.ru*

Дата поступления в редакцию: 28.05.2020
Дата принятия в печать: 24.07.2020

© А. В. Ландиховская, А. А. Творогова, Н. В. Казакова, И. А. Гурский, 2020

Аннотация.
Введение. Целью проводимого исследования являлось установление влияния полной и частичной замены сахарозы трегалозой на дисперсность кристаллов льда в мороженом с низкой массовой долей жира и сухих веществ.
Объекты и методы исследования. Мороженое с массовой долей жира 3 % с полной заменой сахарозы (15,5 %) и частичной (7,5 % и 3 %) и контрольный образец с массовой долей сахарозы 15,5 %. Использованы современные методы исследований для контроля консистенции по показателю «динамическая вязкость» – ротационной вискозиметрии и микроструктурные для определения дисперсности кристаллов льда и воздушной фазы.
Результаты и их обсуждение. Экспериментально подтверждено, что использование трегалозы в количестве 3,0 %, 7,5 % и 15,5 % с целью замены сахарозы приводит к заметному повышению дисперсности кристаллов льда и ее сохранению в процессе хранения продукта. При этом значительная часть кристаллов льда через 3 месяца хранения в образцах мороженого с трегалозой характеризуется размером не более 45 мкм при пороге органолептической ощутимости не более 50 мкм, в контрольном образце (15,5 % сахарозы) – не более 60 мкм. Экспериментально определено влияние трегалозы на консистенцию мороженого по показателям: динамическая вязкость, взбитость и дисперсность воздушной фазы. Результаты исследований показали, что при внесении 15,5 % трегалозы динамическая вязкость смеси для мороженого увеличивается в 1,2 раза по сравнению с образцом, содержащим сахарозу в той же концентрации. Показано, что применение трегалозы способствует сохранению дисперсности воздушной фазы при хранении, определяемой по показателю «средний диаметр воздушных пузырьков». Через 3 месяца максимальная дисперсность отмечена в образце № 1 с 15,5 % трегалозы, что на 17 % выше, чем в контрольном образце с массовой долей сахарозы 15,5 %.
Выводы. Проведенные исследования показывают целесообразность замены сахарозы на трегалозу в производстве мороженого функциональной направленности (с низким содержанием жира и сахарозы).

Ключевые слова. Готовые продукты питания, сахароза, трегалоза, динамическая вязкость, дисперсность, кристаллы льда, пузырьки

Для цитирования: Влияние трегалозы на дисперсность кристаллов льда и консистенцию низкожирного мороженого / А. В. Ландиховская, А. А. Творогова, Н. В. Казакова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50, № 3. – С. 450–459. DOI: https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-450-459.

Original article
Available online at http://fptt.ru/eng

The Effect of Trehalose on Dispersion of Ice Crystals and Consistency of Low-Fat Ice Cream

Anna V. Landikhovskaya, Antonina A. Tvorogova*, Natalia V. Kazakova, Igor A. Gursky

All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry,
12, Kostyakova Str., Moscow, 127422, Russia

**e-mail: antvorogova@yandex.ru*

Received: May 28, 2020
Accepted: July 24, 2020

© A.V. Landikhovskaya, A.A. Tvorogova, N.V. Kazakova, I.A. Gursky, 2020

Abstract.
Introduction. The research objective was to establish the effect of the complete and partial replacement of sucrose by trehalose on the dispersion of ice crystals in ice cream with a low mass fraction of fat and solids.

Study objects and methods. The present research featured three test samples of ice cream with a 3% mass fraction of fat: one with a complete replacement of sucrose (15.5%) and two with a partial replacement of 7.5% and 3%. In the control sample, the mass fraction of sucrose was 15.5%. To control the dynamic viscosity indicator of consistency, the research employed such an advanced method as rotational viscometry. Microstructure methods were used to determine the dispersion of ice crystals and the air phase.
Results and discussion. The usage of trehalose in the production of low-fat ice cream in the amounts of 3.0%, 7.5%, and 15% increased the dispersion of ice crystals and preserved it during storage. After three months of storage, most ice crystals in the test ice cream samples had a size of ≤ 45 μm with an organoleptic sensibility of ≤ 50 μm, while in the control sample (15.5% of sucrose) it did not exceed 60 μm. The experiment determined the effect of trehalose on the consistency of ice cream according to the following indicators: dynamic viscosity, overrun, and dispersion of the air phase. 15.5% of trehalose increased the dynamic viscosity of ice cream mix by 1.2 times as compared to the sample with the same concentration of sucrose. According to the average diameter of air bubbles, trehalose helped to preserve the dispersion of the air phase during storage. After three months, Sample 1 with 15.5% of trehalose demonstrated the maximum dispersion, which was 17% higher than in the control sample with a sucrose mass fraction of 15.5%.
Conclusion. The complete (15.5%) and partial (3% and 7.5%) sucrose replacement by trehalose in low-fat ice cream increased the dispersion of ice crystals and improved its consistency. Unlike the sample with 15.5% of sucrose, samples with trehalose had smaller ice crystals, which remained the same after three months. The trehalose samples had a better dynamic viscosity and air saturation. The research requires a further study of dispersion of ice crystals after 12 months of storage.

Keywords. Finished food products, sucrose, trehalose, dynamic viscosity, dispersion, ice crystals, air bubbles

For citation: Landikhovskaya AV, Tvorogova AA, Kazakova NV, Gursky IA. The Effect of Trehalose on Dispersion of Ice Crystals and Consistency of Low-Fat Ice Cream. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(3):450–459. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-450-459.

Введение

Политика в области здорового питания направлена на производство продуктов с заданным (полезным для здоровья) химическим составом с целью восполнения недостающих макро- и микронутриентов [1]. Современные тенденции в области развития рынка продуктов для здорового питания характеризуются увеличением спроса на данный вид продукции, происходит расширение уже имеющегося ассортимента. Производители стараются выносить информацию об отличительных признаках продукции на этикетку [2].

Рынок мороженого в настоящее время в значительной степени представлен мороженым пломбир, имеющим высокое содержание жира (не менее 12 %) и сахарозы (не менее 14 %).

Снижение массовой доли жира в мороженом – один из способов уменьшения калорийности продукта. Тем не менее изменение массовой доли жира влияет на качество конечного продукта: восприятие сладости и ощущение кристаллов льда в продукте [3]. В настоящее время для повышения ощущения жирности в низкожирном мороженом в качестве дополнительных компонентов используют мальтодекстрины, инулин и полидекстрозу [4].

Сахара оказывают влияние на состояние структуры мороженого и его вкусовые достоинства. Их способность снижать температуру замерзания раствора и влиять на долю вымороженной воды обеспечивает контроль над соотношением температуры и твердости. Наиболее распространенным подсластителем является сахароза, но в последнее время существуют тенденции к ее замене на другие сахарозаменители. При этом важно учитывать влияние углеводов на качество конечного продукта [5]. Одним из таких углеводов является трегалоза.

Подсластители влияют не только на вкус мороженого, но также оказывают влияние на другие характеристики: снижение криоскопической температуры, рост кристаллов льда, осмотическая сила раствора, способность вступать в реакции (например, с первичными аминами) и на динамическую вязкость растворов [6]. В качестве заменителя сахарозы или совместного использования интерес представляет трегалоза, имеющая одинаковую с ней молекулярную массу. Трегалоза и сахароза являются дисахаридами с одинаковой химической формулой $C_{12}H_{22}O_{11}$, но с различным геометрическим строением [7].

Трегалоза – это углевод, дисахарид, состоящий из двух остатков α-D-глюкозопиранозила и α-D-глюкозопиранозида, связанных между собой гликозидными связями. Была впервые описана в научных работах в начале XIX века. Считалось, что она присутствует в спорынье ржи. Однако позже выяснилось, что она распространена в разных организмах. В основном трегалоза изучена в клетках дрожжей. Трегалоза является одним из самых неактивных и стабильных сахаров в природе. Две глюкозные группы соединены через 1,1 атома углерода двух глюкозопиранозных колец, поэтому это полностью невосстанавливающийся сахар. Кислородная связь гликозида, соединенных в два гексозных кольца, имеет низкую энергетическую связь (< 1 ккал/моль), которая делает дисахаридную структуру стабильной. Для сравнения, другой невосстанавливающийся дисахарид, сахароза, характеризуется высокоэнергетической связью (более 27 ккал/моль). При этом, несмотря на стабильность

сахарозы как чистого вещества, в присутствии химически реактивных аминогрупп белков она легко расщепляется до глюкозы и фруктозы, которые являются восстанавливающими моносахарами [8].

Природная активность трегалозы, а также одобрение пищевой и фармацевтической промышленности позволяют использовать ее с целью контроля подвижности воды [9]. Трегалоза отличается от других дисахаридов большим количеством экваториальных гидроксильных групп. Это приводит к сильным взаимодействиям с водой в растворе и относительной легкости, с которой она может включить себя в кластер воды. Сахароза, напротив, плохо интегрируется в кластер воды, создавая более крупную структуру по сравнению с трегалозой.

Несмотря на то, что молекулы сахарозы и трегалозы имеют сходную молекулярную структуру, есть несколько важных различий в их свойствах взаимодействия с водой: растворимость, вязкость и температура стеклования [10]. Сахароза имеет высокую растворимость в воде: в 1 г воды растворяется 2,14 г сахарозы. В таком же количестве воды можно растворить только 1,1 г трегалозы [11].

В работе C. Olsson и J. Swenson была изучена структура водных растворов дисахаридов с помощью нейтронной и рентгеновской дифракции в сочетании с эмпирическим моделированием уточнения структуры потенциала [7]. Результаты показали, что отличий между этими дисахаридами немного, но трегалоза больше нарушает структуру воды.

Сахароза и трегалоза используются в качестве стабилизирующих агентов для различных целей хранения. Но трегалозу лучше использовать для хранения в биологических целях [12].

В работе A. P. Whelan с соавторами исследовалось влияние трегалозы на стеклование и рост кристаллов льда в смесях для мороженого с массовой долей жира 10 % [13]. Содержание сахарозы и трегалозы было 0, 3, 6, 9, 12 и 15 % соответственно. В сумме оба дисахарида всегда давали 15 % с шагом 3 %. Авторы отмечают, что температура стеклования (T_g) в смесях мороженого возрастала с увеличением концентрации трегалозы. T_g (в средней точке) увеличилась на 4,5 °С: в смеси мороженого с содержанием сахарозы 15 % она составляла –46,4 ± 1,0 °С, а в смеси с таким же количеством трегалозы температура стеклования была –42 ± 0,2 °С. В остальных смесях T_g варьировалась от –45,4 °С до –43,5 °С со снижением сахарозы и возрастанием количества трегалозы. Авторы отмечают, что трегалоза не показала существенных различий в ингибировании скорости роста кристаллов льда в мороженом при ее внесении в количестве 15 % в сравнении с сахарозой, используемой на том же уровне. Скорость роста кристаллов льда после циклов колебания температуры в этих образцах мороженого была на уровне 160 %. При этом авторы акцентировали внимание на том, что если образец с количеством трегалозы 15 % убрать из цепочки сравнения, то с увеличением массовой доли трегалозы (3–12 %) наблюдается тенденция к снижению скорости ростов кристаллов льда (P = 0,094). Она изменяется от 153 до 141 %.

Популярность трегалозы растет в связи с тем, что она имеет низкую сладость, по сравнению с сахарозой, но при этом оставляет длительное послевкусие сладости, может подавлять горечь и улучшать вкус пищи [14].

Трегалозу исследуют во многих отраслях пищевой промышленности: в мясной отрасли, при производстве лиофилизированной пшеничной закваски и для хранения замороженных креветок [15–17].

Мороженое с низким содержанием жира 3 % характеризуется массовой долей сухих веществ 29,5 %, остальное приходится на долю воды. Известно, что кристаллы льда более склонны к росту и рекристаллизации, когда в продукте высокое содержание водной фазы [18]. Для предотвращения быстрого роста кристаллов льда существует необходимость в применении компонентов, позволяющих ингибировать их рост и обладающих водосвязывающей способностью.

Анализ литературных данных показал, что трегалоза является хорошей альтернативой для полной или частичной замены сахарозы. Область применения трегалозы при производстве мороженого с низким содержанием жира не до конца изучена. Интерес представляет изменение дисперсности кристаллов льда в мороженом с использованием трегалозы в процессе хранения, а также ее влияние на консистенцию мороженого.

Целью исследований является определение влияния на дисперсность кристаллов льда и консистенцию в низкожирном мороженом полной и частичной замены сахарозы трегалозой.

Объекты и методы исследования

Изучаемые образцы мороженого были выработаны на экспериментальном стенде ВНИХИ в лаборатории технологии мороженого в соответствии с традиционной схемой его производства.

При изготовлении образцов использовали следующее сырье: молоко сухое обезжиренное по ГОСТ 33629-2015, масло сливочное с массовой долей жира 72,5 % по ГОСТ 32261-2013, сахар белый по ГОСТ 33222-2015, эффективный комплексный стабилизатор-эмульгатор, подсластитель стевиозид (Е960). Трегалоза (Китай) предоставлена компанией ООО «Торгснаб».

Для определения динамической вязкости смеси мороженого пользовались методом ротационной вискозиметрии с использованием вискозиметра Brookfield DV-II+Pro (США), подключенного к компьютеру, с предварительно установленной

программой обработки данных Rheocalc V3.1-1 (США). Для достижения необходимой температуры измерения (4,0 ± 0,5 °С) применялась водяная баня.

Взбитость мороженого определяли в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 31457-2012.

Исследование состояния кристаллов льда в мороженом проводилось с помощью микроскопа Olympus CX41RF (Япония) со встроенной камерой и программируемым управлением. Полученные фотографии обрабатывались с использованием программного обеспечения ImageScope (Россия) [19]. Все измерения были выполнены в 3-х кратной повторности.

На основании полученных экспериментальных данных были построены кривые распределения, характеризующие дисперсность кристаллов льда в процессе хранения.

С помощью Microsoft Office Excel рассчитывались количественные доли линейных размеров кристаллов льда с шагом 5 мкм ($0 > X \geq 5$, $5 < X \leq 10$, $10 < X \leq 15$ и т. д.). Затем выстраивалась «точечная диаграмма с маркерами», где на оси абсцисс откладывались линейные размеры кристаллов льда, а на оси ординат – количественная доля этих кристаллов, принадлежащая данному интервалу. По полученным точкам на графике строилась линия тренда для выявления тенденций изменения количества кристаллов льда в зависимости от их размеров. В случае анализа дисперсности кристаллов льда используется полиноминальная линия тренда, поскольку она характеризует перемены возрастания и убывания количества кристаллов льда различных размеров.

Дисперность воздушной фазы определялась при помощи микроскопа Olympus CX41RF (Япония) со встроенной фотокамерой и программой ImageScope (Россия). Отбор проб осуществлялся у образцов с температурой не выше –18 °С. Исследование проводилось при температуре окружающей среды. Диаметр воздушных пузырьков определялся в режиме «ручное измерение». Полученные данные обсчитывались в Excel с помощью встроенной функции «СРГЕОМ».

Образцы мороженого хранились при отрицательной температуре –20 ± 2 °С без существенных температурных колебаний.

Результаты и их обсуждение

Обоснование композиционного состава. На первой стадии исследования обоснован композиционный состав мороженого:

– установлена минимально допустимая массовая доля сухих веществ для молочного мороженого с целью получения достоверных данных о влиянии трегалозы на структуру продукта (дисперсность кристаллов льда);

– выбор массовой доли жира определен исходя из необходимости производства продукции с низким содержанием жира в соответствии с направлением государственной политики в области питания и возможности вынесения данной информации на этикетку;

– массовая доля СОМО выбрана с целью сохранения молочного вкуса, а также для обеспечения сухих веществ молока в мороженом на уровне 40 % как для молочно-составного продукта;

– содержание трегалозы в количестве 15,5 % выбрано из возможности производства мороженого без сахарозы, а 7,5 % и 3 % – с целью установления влияния массовой доли трегалозы на дисперсность кристаллов льда;

– массовая доля стабилизатора-эмульгатора в количестве 0,62 % максимальна для данной разновидности мороженого. Кроме того, в состав комплексной стабилизационной системы входит эффективный эмульгатор, оказывающий влияние на дисперсность воздушной фазы. В качестве стабилизаторов использовали набор гидроколлоидов, действие которых направлено на улучшение термоустойчивости продукта, поскольку снижение размеров кристаллов льда сказывается на данном показателе.

Химический состав опытных образцов мороженого представлен в таблице 1.

Образцы мороженого отличаются между собой количеством вносимой трегалозы. В качестве контрольного образца использовали образец с содержанием сахарозы 15,5 %. Поскольку сладость трегалозы составляет 45 % от сладости сахарозы, то в образцах (№ 1–3) использовался подсластитель стевиозид из расчета, что его сладость выше в 300 раз. Конечная сладость опытных образцов соответствовала контролю.

Таблица 1. Химический состав мороженого

Table 1. Chemical composition of ice cream

	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Контроль
Массовая доля сухих веществ, в %, не менее, в т. ч.:	29,5	29,5	29,5	29,5
Молочного жира, %, не менее	3,0	3,0	3,0	3,0
СОМО, %, не менее	10,5	10,5	10,5	10,5
Сахарозы, %, не менее	–	8,0	12,5	15,5
Трегалозы, %, не менее	15,5	7,5	3,0	–
Стабилизатора-эмульгатора, %, не менее	0,62	0,62	0,62	0,62

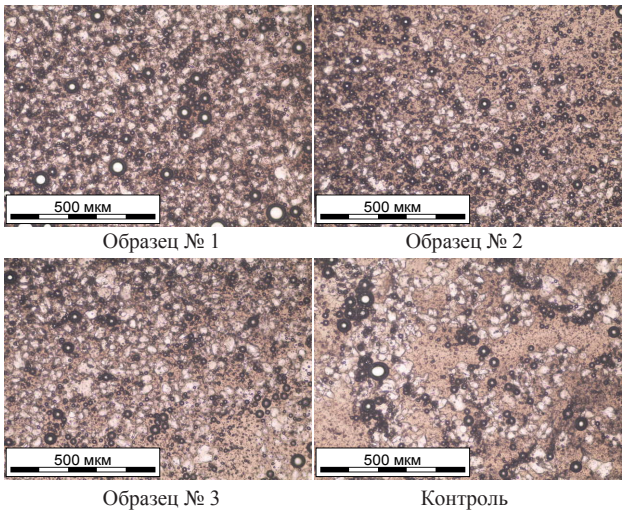

Рисунок 1. Микрофотографии кристаллов льда после закаливания

Figure 1. Micrographs of ice crystals after hardening

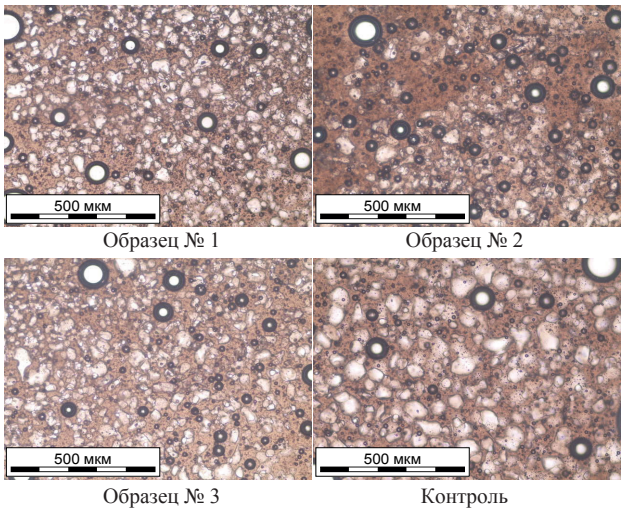

Рисунок 2. Микрофотографии кристаллов льда через 3 месяца хранения

Figure 2. Micrographs of ice crystals after 3 months of storage

Добавление трегалозы на стадии приготовления смеси не требует дополнительной подготовки. Рекомендовано вносить на стадии смешивания сухих компонентов.

Исследование дисперсности кристаллов льда. Дисперсность кристаллов льда в образцах исследовали после закаливания и в течение 3 месяцев хранения (контрольные точки – 1 мес и 3 мес) при температуре –20 ± 2 °С.

После закаливания мороженого была проведена органолептическая оценка образцов. Отмечено, что контроль обладает сладким вкусом по сравнению с опытными образцами. Все образцы, в состав которых входит трегалоза, имеют мелкокристаллическую структуру. Это подтверждается микрофотографиями кристаллов льда в мороженом (рис. 1, 2).

При визуальной оценке фотографий через 3 месяца хранения очевидно, что в мороженом с сахарозой кристаллы значительно крупнее, чем в образцах с трегалозой.

На рисунках 3–5 представлены кривые распределения кристаллов льда по размерам после закаливания через 1 и 3 месяца хранения.

Данные рисунков 3 и 4 свидетельствуют о том, что в течение 1 месяца хранения не происходит изменений в размерах кристаллов льда. Средние размеры кристаллов льда в образце № 1 увеличиваются с 19 до 20 мкм, в образце № 3 с 20 до 21 мкм, а в образцах № 2 и № 4 сохраняют стабильность на уровне 18 и 23 мкм соответственно.

Как следует из данных, приведенных на рисунке 5, использование трегалозы в рецептурах мороженого приводит к увеличению дисперсности кристаллов льда. Пик дифференциальной кривой распределения кристаллов льда по размерам через 3 месяца хранения со значения 35 мкм в контрольном образце смещается влево на значения 15 и 18 мкм в образцах с трегалозой. В образцах с трегалозой значительная часть кристаллов льда характеризуется размером – не более 45 мкм при пороге органолептической ощутимости не более 50 мкм, в контрольном образце не более

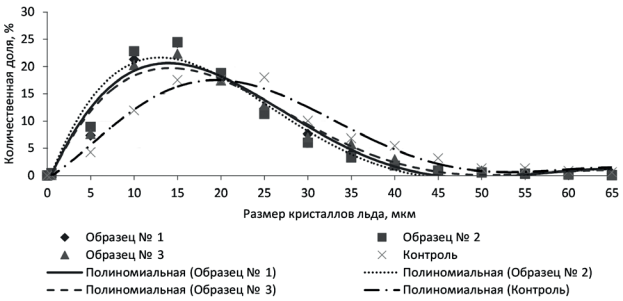

Рисунок 3. Кривые распределения кристаллов льда после закаливания мороженого

Figure 3. Distribution curves of ice crystals after ice cream hardening

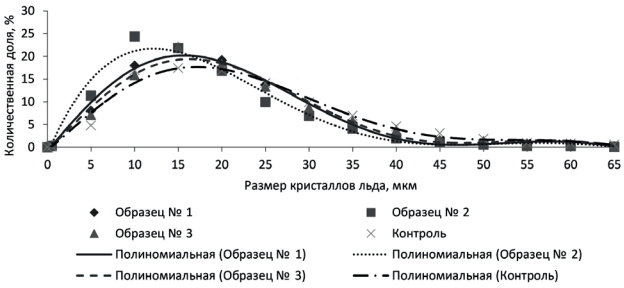

Рисунок 4. Кривые распределения кристаллов льда через 1 месяц хранения мороженого

Figure 4. Curves of ice crystal distribution after 1 month of ice cream storage

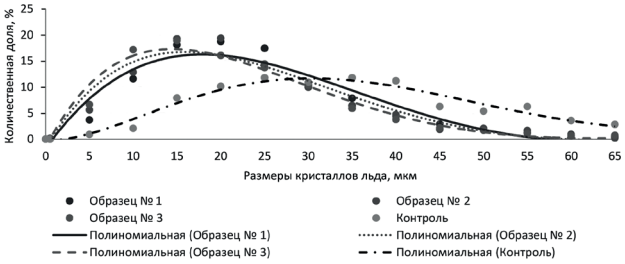

Рисунок 5. Кривые распределения кристаллов льда через 3 месяца хранения мороженого

Figure 5. Distribution curves of ice crystals after 3 months of ice cream storage

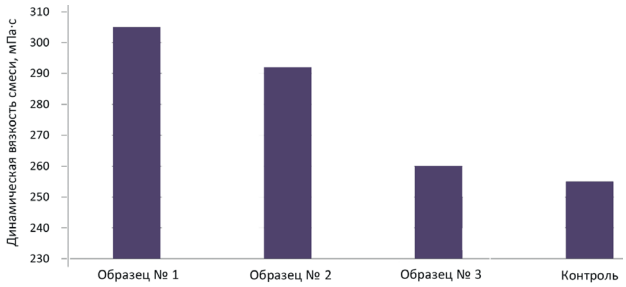

Рисунок 6. Динамическая вязкость смеси в образцах после охлаждения

Figure 6. Dynamic viscosity of the mix in the samples after cooling

Таблица 2. Количественная доля кристаллов льда размером не более 50 мкм

Table 2. Quantitative fraction of ice crystals of ≤ 50 microns in size

Этап исследования	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Контроль
после закаливания	99,0	99,0	98,0	96,0
через 3 месяца хранения	97,0	97,0	96,0	78,0

60 мкм. Следует отметить, что при массовой доле трегалозы 3, 7,5 и 15,5 % дисперсность кристаллов льда не отличается. Отмечается незначительно выраженная тенденция снижения дисперсности кристаллов льда при увеличении массовой доли трегалозы в мороженом. Это также подтверждается измерениями средних размеров кристаллов льда: контроль – 37 мкм, образец № 1 – 24 мкм, образец № 2 – 23 мкм, образец № 3 – 22 мкм.

В таблице 2 представлена количественная доля (%) кристаллов льда размером до 50 мкм в образцах в процессе хранения.

Исследование влияния трегалозы на консистенцию продукта. Учитывая положительное влияние трегалозы на дисперсность кристаллов льда, исследовали ее влияние на взаимосвязанный показатель – консистенцию.

К показателям, оказывающим влияние на консистенцию мороженого, относятся эффективная динамическая вязкость смеси, взбитость мороженого при выгрузке его из фризера и дисперсность воздушной фазы.

На рисунке 6 представлены показатели динамической вязкости смеси после приготовления и охлаждения до температуры созревания 4 ± 2 °С при градиенте сдвига на срез 0,83 $с^{-1}$.

Полученные данные свидетельствуют о тенденции увеличения динамической вязкости при использовании трегалозы для полной и частичной замены сахарозы. По мере увеличения количества вносимой трегалозы и уменьшения массовой доли сахарозы вязкость смеси для мороженого увеличивается. В образце № 3 (3 % трегалозы) значение показателя вязкости на уровне этого показателя в контрольном образце (15,5 % сахарозы). В образцах № 2 (7,5 % трегалозы) и № 1 (15,5 % трегалозы) вязкость увеличивается в 1,1 и 1,2 раза соответственно по сравнению с контрольным образцом.

Поскольку молекулярная масса трегалозы и сахарозы находится на одном уровне, то замена одного компонента другим не вносит изменений в технологические режимы работы оборудования при фризеровании. Мороженое выгружалось при температуре от –5,2 до –5,5 °С. Взбитость мороженого после фризерования в образце № 1 составила 118 %, в № 2 – 92,5 %, в № 3 – 68 % и в контроле – 94 %. При изготовлении мороженого использовался фризер периодического действия без принудительной подачи воздуха под давлением, как и во фризерах непрерывного действия. Следует отметить, что в

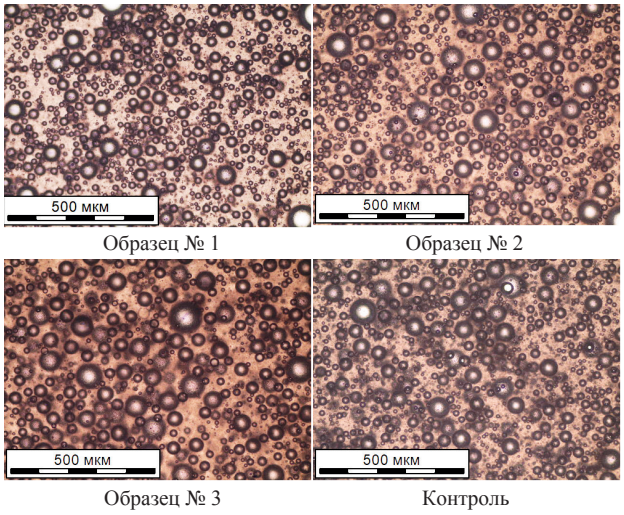

Рисунок 7. Микрофотографии состояния воздушной фазы в мороженом после закаливания

Figure 7. Micrographs of the air phase in ice cream after hardening

Таблица 3. Количественная доля воздушных пузырьков размером не более 50 мкм

Table 3. Quantitative fraction of air bubbles of ≤ 50 microns in size

Этап исследования	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Контроль
после закаливания	99,0	98,0	94,0	96,0
через 3 месяца хранения	93,0	86,0	88,0	77,0

образцах только с одним дисахаридом взбитость выше, чем при их совместном использовании. В образце, где соотношение трегалозы и сахарозы 1:1, взбитость выше в 1,4 раза, чем в образце с содержанием трегалозы 3 % и сахарозы 12,5 %. При выгрузке из фризера мороженое только с трегалозой более плотное и менее пластичное при фасовании.

Способность к насыщению воздухом упала в образце № 3. Можно предположить, что композиция трегалозы (3 %) и сахарозы (12,5 %) оказывает отрицательное воздействие на способность снижать поверхностное натяжение на границе раздела фаз «воздух-плазма». Это привело к потере системой способности к насыщению воздухом.

Помимо динамической вязкости и взбитости, на консистенцию мороженого оказывает влияние дисперсность воздушной фазы. Насыщение воздухом происходит на стадии фризерования продукта, как и первичное зарождение кристаллов льда. Поэтому можно говорить о взаимосвязи этих процессов.

На рисунке 7 приведены микрофотографии воздушных пузырьков после закаливания образцов.

Как видно на фотографиях, наиболее крупные пузырьки в образце № 3. Это также подтверждается измерением среднего диаметра воздушных пузырьков. В образцах № 1 и № 2 он составил 15 мкм, в образце № 3 – 21 мкм, в контроле – 16 мкм. Стоит отметить, что через 3 месяца хранения средний диаметр в образцах № 1 и № 2 увеличился в 1,4 и 1,7 раза соответственно, в образце № 3 – 1,3 раза, в контроле – в 1,9 раза. Таким образом, по дисперсности воздушной фазы наиболее стабилен образец № 3. Это обусловлено его наименьшей взбитостью.

В таблице 3 представлена количественная доля (%) воздушных пузырьков размером до 50 мкм в течение 3 месяцев хранения

Следует отметить, что через 3 месяца хранения максимальная дисперсность воздушной фазы отмечена в образце № 1 с 15,5 % трегалозы, а наименьшая дисперсность у контрольного образца. Различия между ними составили 17 %. В образцах с частичной заменой сахарозы на трегалозу дисперсность воздушной фазы не отличается. Расхождения между ними на уровне 2 %.

Стоит отметить, что мелкие кристаллы льда в процессе хранения оказывают меньшее воздействие на дисперсность воздушной фазы.

Таким образом, внесение в мороженое трегалозы в количестве 15,5 %, 7 % и 3 % положительно сказывается на дисперсности воздушной фазы.

Выводы

В результате исследования влияния полной и частичной замены сахарозы трегалозой с целью повышения дисперсности кристаллов льда в мороженом с низкой массовой долей жира и сухих веществ установлено:

– использование трегалозы в количестве не менее, чем 3 % для замены сахарозы приводит к заметному повышению дисперсности кристаллов льда и ее сохранению в процессе хранения продукта. Значительная часть кристаллов льда характеризуется размером – не более 45 мкм при пороге органолептической ощутимости не более 50 мкм;

– замена сахарозы на трегалозу оказывает положительное влияние на консистенцию мороженого: по сравнению с показателями контрольного образца в образце с массовой долей трегалозы 15,5 % динамическая вязкость выше в 1,2 раза, содержание воздушных пузырьков размером менее 50 мкм увеличилось почти на 20 %.

Проведенные исследования показывают целесообразность полной или частичной замены сахарозы на трегалозу в производстве мороженого функциональной направленности (с низким содержанием жира и сахарозы).

Критерии авторства

А. В. Ландиховская – обзор литературы, проведение и обработка результатов экспериментальных исследований. А. А. Творогова – постановка и научное руководство исследованиями. Н. В. Казакова – методология экспериментальных исследований. И. А. Гурский – микроструктурные исследования кристаллов льда.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Выражаем благодарность компании ООО «Торгснаб» за предоставленную трегалозу для проведения исследования.

Contribution

A.V. Landikhovskaya reviewed scientific sources, conducted the experimental studies, and processed the results. A.A. Tvorogova acted as scientific advisor, defined the research objectives, and stated the problem. N.V. Kazakova developed the experimental research methodology. I.A. Gursky performed the microstructural studies of ice crystals.

Conflict of interest

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

Acknowledgments

We would like to express our sincere gratitude to LLC Torgsnab for the trehalose provided for the study.

Список литературы

1. Обеспеченность населения России микронутриентами и возможности ее коррекции. Состояние проблемы / В. М. Коденцева, О. А. Вржесинская, Д. В. Рисник [и др.] // Вопросы питания. – 2017. – Т. 86, № 4. – С. 113–124.

2. Сандракова, И. В. Исследование потребителей продуктов здорового питания / И. В. Сандракова, И. Ю. Резниченко // Практический маркетинг. – 2019. – Т. 274, № 12. – С. 22–27.

3. O'Sullivan, M. G. Reduced-fat products and challenges / M. G. O'Sullivan // Salt, fat and sugar reduction / M. G. O'Sullivan. – Woodhead Publishing, 2020. – P. 63–96. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819741-7.00003-1.

4. Совершенствование композиционного состава и структуры молочного мороженого / А. А. Творогова, Т. В. Коновалова, А. В. Ландиховская [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2018. – Т. 48, № 2. – С. 109–116. DOI: https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-2-109-116.

5. Ice cream: uses and method of manufacture / S. S. Deosarkar, C. D. Khedkar, S. D. Kalyankar [et al.] // Encyclopedia of food and health / B. Caballero, P. M. Finglas, F. Toldra. – Academic Press, 2016. – P. 391–397. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00384-6.

6. Hartel, R. W. *A 100-Year Review*: Milestones in the development of frozen desserts / R. W. Hartel, S. A. Rankin, R. L. Bradley // Journal of Dairy Science. – 2017. – Vol. 100, № 12. – P. 10014–10025. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2017-13278.

7. Olsson, C. Structural comparison between sucrose and trehalose in aqueous solution / C. Olsson, J. Swenson // Journal of Physical Chemistry B. – 2020. – Vol. 124, № 15. – P. 3074–3082. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.9b09701.

8. Ohtake, S. Trehalose: current use and future applications / S. Ohtake, Y. J. Wang // Journal of Pharmaceutical Sciences. – 2011. – Vol. 100, № 6. – P. 2020–2053. DOI: https://doi.org/10.1002/jps.22458.

9. Water mobility in the dehydration of crystalline trehalose / F. Sussich, C. E. Skopec, J. W. Brady [et al.] // Food Chemistry. – 2010. – Vol. 122, № 2. – P. 388–393. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.08.014.

10. Soukoulis, C. Contribution of thermal, rheological and physical measurements to the determination of sensorially perceived quality of ice cream containing bulk sweeteners / C. Soukoulis, E. Rontogianni, C. Tzia // Journal of Food Engineering. – 2010. – Vol. 100, № 4. – P. 634–641. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.05.012.

11. Lammert, A. M. Water activity and solubility of trehalose / A. M. Lammert, S. J. Schmidt, G. A. Day // Food Chemistry. – 1998. – Vol. 61, № 1–2. – P. 139–144. DOI: https://doi.org/10.1016/S0308-8146(97)00132-5.

12. Liu, J. Protective mechanisms of α,α-trehalose revealed by molecular dynamics simulations / J. Liu, C. Chen, W. Li // Molecular Simulation. – 2017. – Vol. 44, № 2. – P. 100–109 DOI: https://doi.org/10.1080/08927022.2017.1342126.

13. Effect of trehalose on the glass transition and ice crystal growth in ice cream / A. P. Whelan, A. Regand, C. Vega [et al.] // International Journal of Food Science and Technology. – 2008. – Vol. 43, № 3. – P. 510–516. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01484.x.

14. Walmagh, M. Trehalose analogues: Latest insights in properties and biocatalytic production / M. Walmagh, R. Zhao, T. Desmet // International Journal of Molecular Sciences. – 2015. – Vol. 16, № 6. – P. 13729–13745. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms160613729.

15. Кудряшов, Л. С. Применение фосфатов и трегалозы при производстве колбас из PSE свинины / Л. С. Кудряшов, О. А. Кудряшова // Индустрия питания. – 2017. – Т. 2, № 1. – С. 38–44.

16. Trehalose as a cryoprotectant in freeze-dried wheat sourdough production / R. F. Stefanello, A. A. R. Machado, C. Pasqualin Cavalheiro [et al.] // LWT – Food Science and Technology. – 2018. – Vol. 89. – P. 510–517. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.011.

17. Insights into ice-growth inhibition by trehalose and alginate oligosaccharides in peeled Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during frozen storage / B. Zhang, H.-J. Cao, H.-M. Lin [et el.] // Food Chemistry. – 2019. – Vol. 278. – P. 482–490. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.087.

18. Goff, H. D. The structure and properties of ice cream and frozen desserts / H. D. Goff // Encyclopedia of food chemistry / L. Melton, F. Shahidi, P. Varelis. – Elsevier, 2019. – P. 47–54. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21703-4.

19. Sitnikova, P. B. Physical changes in the structure of ice cream and frozen fruit desserts during storage / P. B. Sitnikova, A. A. Tvorogova // Food Systems. – 2019. – Vol. 2, № 2. – P. 31–35. DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-2-31-35.

References

1. Kodentsova VM, Vrzhesinskaya OA, Risnik DV, Nikityuk DB, Tutelyan VA. Micronutrient status of population of the russian federation and possibility of its correction. State of the problem. Problems of Nutrition. 2017;86(4):113–124. (In Russ.).

2. Sandrakova IV, Reznichenko IYu. Health food consumers research. Practical Marketing. 2019;274(12):22–27.

3. O'Sullivan MG. Reduced-fat products and challenges. In: O'Sullivan MG, editor. Salt, fat and sugar reduction. Woodhead Publishing; 2020. pp. 63–96. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819741-7.00003-1.

4. Tvorogova AA, Shobanova TV, Landikhovskaya AV, Zakirova RR. Milk ice cream composition and structure improvement. Food Processing: Techniques and Technology. 2018;48(2):109–116. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-2-109-116.

5. Deosarkar SS, Khedkar CD, Kalyankar SD, Sarode AR. Ice cream: uses and method of manufacture. In: Caballero B, Finglas PM, Toldra F, editors. Encyclopedia of food and health. Academic Press; 2016. pp. 391–397. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00384-6.

6. Hartel RW, Rankin SA, Bradley RL. *A 100-Year Review*: Milestones in the development of frozen desserts. Journal of Dairy Science. 2017;100(12):10014–10025. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2017-13278.

7. Olsson C, Swenson J. Structural comparison between sucrose and trehalose in aqueous solution. Journal of Physical Chemistry B. 2020;124(15):3074–3082. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.9b09701.

8. Ohtake S, Wang YJ. Trehalose: current use and future applications. Journal of Pharmaceutical Sciences. 2011;100(6):2020–2053. DOI: https://doi.org/10.1002/jps.22458.

9. Sussich F, Skopec CE, Brady JW, Cesàro A. Water mobility in the dehydration of crystalline trehalose. Food Chemistry. 2010;122(2):388–393. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.08.014.

10. Soukoulis C, Rontogianni E, Tzia C. Contribution of thermal, rheological and physical measurements to the determination of sensorially perceived quality of ice cream containing bulk sweeteners. Journal of Food Engineering. 2010;100(4):634–641. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.05.012.

11. Lammert AM, Schmidt SJ, Day GA. Water activity and solubility of trehalose. Food Chemistry. 1998;61(1–2):139–144. DOI: https://doi.org/10.1016/S0308-8146(97)00132-5.

12. Liu J, Chen C, Li W. Protective mechanisms of α,α-trehalose revealed by molecular dynamics simulations. Molecular Simulation. 2017;44(2):100–109 DOI: https://doi.org/10.1080/08927022.2017.1342126.

13. Whelan AP, Regand A, Vega C, Kerry JP, Goff HD. Effect of trehalose on the glass transition and ice crystal growth in ice cream. International Journal of Food Science and Technology. 2008;43(3):510–516. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01484.x.

14. Walmagh M, Zhao R, Desmet T. Trehalose analogues: Latest insights in properties and biocatalytic production. International Journal of Molecular Sciences. 2015;16(6):13729–13745. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms160613729.

15. Kudryashov LS, Kudryashova OA. The phosphate and trehalose use in the sausages production from PSE pork. Food Industry. 2017;2(1):38–44. (In Russ.).

16. Stefanello RF, Machado AAR, Pasqualin Cavalheiro C, Bartholomei Santos ML, Nabeshima EH, Copetti MV, et al. Trehalose as a cryoprotectant in freeze-dried wheat sourdough production. LWT – Food Science and Technology. 2018;89:510–517. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.011.

17. Zhang B, Cao H-J, Lin H-M, Deng S-G, Wu H. Insights into ice-growth inhibition by trehalose and alginate oligosaccharides in peeled Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during frozen storage. Food Chemistry. 2019;278:482–490. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.087.

18. Goff HD. The structure and properties of ice cream and frozen desserts. In: Melton L, Shahidi F, Varelis P, editors. Encyclopedia of food chemistry. Elsevier; 2019. pp. 47–54. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21703-4.

19. Sitnikova PB, Tvorogova AA. Physical changes in the structure of ice cream and frozen fruit desserts during storage. Food Systems. 2019;2(2):31–35. DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-2-31-35.

Сведения об авторах

Ландиховская Анна Валентиновна
аспирант, младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности, 127422, Россия, г. Москва, ул. Костякова, 12, тел.: +7 (495) 610-83-85, e-mail: anna.landih@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-5881-2309

Творогова Антонина Анатольевна
д-р техн. наук, заместитель директора, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности, 127422, Россия, г. Москва, ул. Костякова, 12, тел.: +7 (495) 610-83-85, e-mail: antvorogova@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-7293-9162

Information about the authors

Anna V. Landikhovskaya
Postgraduate Student, Junior Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry, 12, Kostyakova Str., Moscow, 127422, Russia, phone: +7 (495) 610-83-85, e-mail: anna.landih@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-5881-2309

Antonina A. Tvorogova
Dr.Sci.(Eng.), Deputy Director, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry, 12, Kostyakova Str., Moscow, 127422, Russia, phone: +7 (495) 610-83-85, e-mail: antvorogova@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-7293-9162

Казакова Наталия Владимировна
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности, 127422, Россия, г. Москва, ул. Костякова, 12, тел.: +7 (495) 610-83-85, e-mail: kazakova-n-v@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2963-6294

Гурский Игорь Алексеевич
инженер-исследователь, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности, 127422, Россия, г. Москва, ул. Костякова, 12, тел.: +7 (495) 610-83-85, e-mail: lixrug@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-8177-3472

Natalia V. Kazakova
Cand.Sci.(Eng.), Leading Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry, 12, Kostyakova Str., Moscow, 127422, Russia, phone: +7 (495) 610-83-85, e-mail: kazakova-n-v@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2963-6294

Igor A. Gursky
Research Engineer, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry, 12, Kostyakova Str., Moscow, 127422, Russia, phone: +7 (495) 610-83-85, e-mail: lixrug@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-8177-3472