



УДК 663.674

<https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-3-40>

К ВОПРОСУ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛАКТОЗЫ В МОРОЖЕНОМ ПРИ НАЛИЧИИ ДРУГИХ САХАРОВ И ИХ ЗАМЕНТЕЛЕЙ*

Источник изображения: freerik.com

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Игорь Алексеевич Гурский, канд. техн. наук, младший научный сотрудник
E-mail: iixrug@yandex.ru

Антонина Анатольевна Творогова, д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе
E-mail: antvorogova@yandex.ru

Полина Борисовна Ситникова, канд. техн. наук, научный сотрудник
E-mail: sitnikova.p.b@gmail.com

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

Распространенными пороками структуры мороженого, вызываемыми кристаллизацией лактозы, являются «песчаность» и «мучнистость». Лактоза в мороженом находится в виде перенасыщенного раствора, поэтому при замене сахарозы на другие сахара и заменители следует принимать во внимание возможность кристаллизации лактозы, особенно при температуре близкой к минус 10 °С. Целью исследований являлось установление влияния сахаров, применяемых в производстве мороженого (сахарозы, фруктозы, трегалозы и глюкозы), и их композиций с другими заменителями на образование и рост кристаллов лактозы. При исследовании роста кристаллов лактозы использовали метод световой микроскопии, динамической вязкости – реологические методы. Выявлено, что форма кристаллов лактозы в сечении при наличии других сахаров представлена неровным ромбом, при невысоком их содержании (5 % и менее) – трапецией. В концентрированных модельных растворах сахарозы и композиции фруктозы и трегалозы через 1 мес. хранения размеры кристаллов лактозы были на 4–12 мкм меньше, чем в образцах с заменителями. Более мелкие кристаллы были сформированы в образцах с фруктозой-трегалозой-мальтодекстрином и с сахарозой-мальтитом-мальтодекстрином. Наименьший рост кристаллов наблюдался в образце с сахарозой-мальтитом-мальтодекстрином и составил 5 мкм, наибольший в образце без дополнительных сахаров – 18 мкм. В замороженных взбитых образцах в отсутствии стабилизаторов через 3 мес. хранения при использовании мальтодекстрина средний размер кристаллов лактозы составил 71 мкм, с сахарозой-мальтитом-мальтодекстрином – 74 мкм. Наименьший размер кристаллов (41 мкм) был выявлен в образце при содержании 14 % фруктозы и трегалозы. Замена сахарозы сухими веществами финикового сиропа – фруктозой, глюкозой и инулином вызвала кристаллизацию лактозы, несмотря на значительное увеличение вязкости (в 2,6 раза). Таким образом, исследования показали, что сахара (сахароза, композиция фруктозы и трегалозы) при принятом в производстве мороженого содержании ингибируют кристаллизацию лактозы. При замене сахарозы на сахара природного происхождения, в частности финикового сиропа, и заменители сахарозы по массе и сухому веществу следует обращать внимание на присутствие нутриентов, инициирующих кристаллизацию лактозы.

Ключевые слова: перенасыщенный раствор, сахароза, фруктоза, трегалоза, глюкоза, форма кристаллов лактозы

Для цитирования: Гурский, И. А. К вопросу кристаллизации лактозы в мороженом при наличии других сахаров и подсластителей / И. А. Гурский, А. А. Творогова, П. Б. Ситникова // Молочная промышленность. 2025. № 3. С. 73–80. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-3-40>

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

ВВЕДЕНИЕ

Кристаллизация лактозы в мороженом в процессе хранения влияет на органолептические свойства продукта, вызывая пороки структуры «мучнистость» и «песчанность». Эти пороки возникают не только при несоответствующих температурах производства и / или хранения, но и при высокой степени перенасыщения раствора, в присутствии добавок и примесей и зависят от формы кристаллов [1]. В последнее время с целью снижения содержания сахарозы стали производить мороженое с измененным углеводным составом, в котором сладость сахарозы восполняют веществами с более высоким индексом сладости, а в качестве дополнительных источников сухих веществ используют трегалозу, пищевые волокна (инулин и др.) и продукты переработки крахмала. Введение новых компонентов в рецептуру мороженого в дальнейшем может повлиять на кристаллизацию лактозы.

В традиционных разновидностях мороженого содержится два основных сахара – сахароза и лактоза. Несмотря на то что растворимость сахарозы существенно снижается при охлаждении смеси [2], она не образует крупные кристаллы, что может быть связано с ингибированием ее кристаллизации входящей в состав продукта лактозой, что отмечали в своей работе R. Jawad et al. [3].

Наиболее подверженным к кристаллизации сахаром в мороженом является лактоза. Основными ее источниками в мороженом являются молочные компоненты (цельное, сгущенное или сухое молоко). В готовом продукте ее содержится от 4,2 до 7,7 % в зависимости от содержания СОМО [4], рекомендуемый уровень которого, согласно исследованиям зарубежных авторов, составляет 8–15 % [5, 6]. Более высокое содержание СОМО неизбежно приведет к кристаллизации лактозы и снижению органолептических свойств продукта. Предельное значение СОМО регламентируют с учетом вероятности появления порока «органолептически ощутимые кристаллы лактозы». Порок «мучнистость» проявляется в мороженом при наличии кристаллов лактозы размером более 10 мкм, «песчанность» – более 20 мкм.

Лактоза, содержащаяся в молочной части продукта, представлена в виде двух форм: α -лактоза и β -лактоза [7]. Указанные формы характеризуются различиями в физических и химических свойствах, в частности, в температуре плавления, плотности и растворимости, которая является наиболее

значимым фактором в процессе кристаллизации [8]. Лактоза образует твердые кристаллы низкой гигроскопичности, крупные и медленно растворимые. Наиболее распространенные формы кристаллов лактозы – призма, томагавк и пирамида – при этом форма зависит от перенасыщения раствора [9].

Наиболее распространенные механизмы кристаллизации лактозы в мороженом – изогидрический и вымораживание, которые проявляются при снижении температуры. Кристаллизация лактозы происходит в перенасыщенной фазе мороженого, которая образуется при вымораживании воды на этапах фризерования и закаливания. Данный процесс двухэтапный, состоящий из зарождения и роста зародыша. Интенсивность роста зародышей зависит от температуры хранения [10], вязкости незамороженной фазы [11], присутствия кристаллизирующих веществ [11], скорости замораживания [12], использования стабилизаторов [12], а их образование – от перенасыщения раствора [8].

В своей работе Y. D. Livney et al. [10], проведя серию опытов, установили, что наиболее низкое значение индукционного периода образования кристаллов лактозы наблюдается при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Через 120 ч хранения при этой температуре размеры кристаллов составляли от менее 1 до 20 мкм. Различия в размерах кристаллов лактозы свидетельствуют о длительном процессе нуклеации, а не одновременном образовании ядер. Большой индукционный период образования кристаллов лактозы при температурах ниже или выше $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, установленный автором, был обусловлен уровнем перенасыщения лактозы. При понижении температуры происходящее перенасыщение приводило к более быстрому образованию центров кристаллизации, но более медленному их росту из-за существенного увеличения вязкости, вызванного приближением системы к состоянию стеклования. Также о влиянии вязкости на рост кристаллов, как лактозы, так и других веществ сообщалось в работах T. A. Nickerson [11], N. S. Trasi et al. [13], Z. Sha et al. [14], что связывают с изменением интенсивности движения молекул через границу раздела кристалл-жидкость, выражаемой через коэффициент диффузии. Отмеченное влияние используемых стабилизаторов [12] на кристаллизацию лактозы может быть связано с увеличением вязкости, а также высокой влагоудерживающей способностью гелеобразователей при их применении. Также в работе T. A. Nickerson [12] была приведена информация по влиянию скорости замораживания

и закаливания на кристаллизацию лактозы. Наиболее быстро кристаллы развивались при низкой температуре фризирования и быстром закаливании, а медленнее при высокой температуре фризирования и медленном закаливании. Влияние температуры обусловлено фазами растворов. При быстром замораживании образуется большое количество центров кристаллизации при переходе раствора в лабильную зону. При этом более длительное замораживание может приводить к формированию крупных кристаллов из-за более длительного периода нахождения раствора в метастабильной зоне.

Т. А. Nickerson [11] установил, что даже при минимальном содержании СОМО в мороженом лактозы достаточно для ее кристаллизации. Следовательно, одним из определяющих факторов роста крупных кристаллов лактозы является присутствие кристаллизующих веществ, к которым могут быть отнесены внесенная затравка, повышенное количество α -формы лактозы в результате мутаротации и входящие в состав рецептур другие низкомолекулярные вещества.

Таким образом, учитывая растущую тенденцию к производству мороженого со сниженным содержанием сахарозы или без ее использования, **целью исследований** являлось установление влияния сахаров, применяемых в производстве мороженого (сахарозы, фруктозы, трегалозы и глюкозы), и их композиций с другими заменителями на образование и рост кристаллов лактозы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили:

- модельные концентрированные растворы (табл. 1), концентрация лактозы в водной части которых соответствовала ее значению в перенасыщенных растворах. Растворы после смешивания компонентов выдерживали при температуре 83 ± 2 °С до растворения всех компонентов и хранили при температуре 4 ± 2 °С;
- приближенные по составу к обезжиренному мороженому образцы замороженного продукта (табл. 2) с сахарами, подсластителями и заменителями сахарозы, но без добавления стабилизаторов, а также мороженое с содержанием молочного жира 12 % с полной заменой сахара на финиковый сироп. Смеси для замороженного продукта

после смешивания компонентов выдерживали при температуре 83 ± 2 °С, охлаждали до температуры 4 ± 2 °С и фризировали до достижения температуры не выше минус $5,3 \pm 0,3$ °С. Готовые образцы хранили при температуре минус $10 \pm 0,5$ °С.

Микроскопические исследования кристаллов лактозы проводили с использованием микроскопа CX41RF при увеличении в 400 раз. Полученные снимки обрабатывали в программе ImageScope M. Динамическую вязкость смесей для мороженого пломбир определяли с помощью вискозиметра Brookfield DV II+ Pro при температуре $(4 \pm 0,5)$ °С, показатель консистенции «условная твердость» – на текстомном анализаторе Brookfield LFRA.

Качественный и количественный состав сахаров в финиковом сиропе определяли методом жидкостной хроматографии (хроматограф «Хроматэк-Кристалл ВЭЖХ2014»).

Таблица 1. Состав модельных растворов

Компоненты	Количество компонентов в 100 г образца, г					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Сухое обезжиренное молоко (лактозы 54,2 %)	55,0	33,0	33,0	33,0	33,0	33,0
Сахароза	–	41,0	–	14,0	–	–
Фруктоза	–	–	22,0	–	22,0	–
Трегалоza	–	–	8,0	–	–	–
Мальтит	–	–	–	14,0	–	–
Мальтодекстрин	–	–	11,0	13,0	19,0	20,4
Инулин	–	–	–	–	–	20,4
Стевиозид	–	–	–	–	–	0,2
Вода	45,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0

Таблица 2. Состав замороженных образцов продуктов

Компоненты	Количество компонентов в 1000 г образца, г					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Сухое обезжиренное молоко	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4	33,0
Сахароза	–	140,0	–	50,0	–	–
Фруктоза	–	–	80,0	–	80,0	–
Трегалоza	–	–	60,0	–	–	–
Мальтит	–	–	–	50,0	–	–
Мальтодекстрин	140,0	–	–	40,0	60,0	20,4
Вода	600,0	600,0	600,0	600,0	600,0	20,4
Стевиозид	–	–	–	–	–	0,2
Вода	45,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование состояния лактозы в перенасыщенных растворах. На основании состава модельных образцов (табл. 1) следует, что лактоза присутствует в растворе в виде перенасыщенного раствора, поскольку насыщение раствора достигается при ее концентрации 9–12 % (табл. 3).

В состоянии перенасыщения раствора достаточно незначительного воздействия физических или химических факторов для выпадения вещества из раствора. Применительно к возможной кристаллизации лактозы такими факторами являются колебания температуры, наличие любых частиц (затравок), изменение массы растворителя (воды). На состояние перенасыщения лактозы может влиять и то, что значительная часть свободной воды образует растворы с более растворимыми сахарами (сахарозой, лактозой и трегалозой).

Оценку морфологии и динамики роста кристаллов лактозы проводили через 1, 2, 3 и 24 ч, 7 суток и 1 мес. Микрофотографии растворов через 24 ч хранения представлены на рисунке 1.

Достигнутое перенасыщение при использовании сахарозы, фруктозы и трегалозы (образцы № 2–5) способствовало формированию кристаллов лактозы в одной из наиболее распространенных форм в сечении – неровного ромба. Такая форма кристаллов через 24 ч хранения подтвердила ранее полученные сведения о влиянии перенасыщенности раствора на морфологию кристаллов лактозы. В отсутствие других сахаров в образце № 1 доминировали кристаллы лактозы с формой трапеции в сечении. В образце № 6, содержащем один сахар – лактозу, выявлены ее кристаллы смешанной формы (трапеции и ромба). Таким образом, видно, что увеличение концентрации сахаров в растворе (образцы № 2–5) приводит к формированию кристаллов лактозы в наиболее выраженной в сечении форме неровного ромба.

Таблица 3. Концентрация сахаров в модельных растворах

Сахара	Массовая доля сахаров в растворах, %					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Лактоза	30,0	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7
Сахароза	–	40,9	–	14,4	–	–
Фруктоза	–	–	21,8	–	21,8	–
Трегалоза	–	–	8,2	–	–	–
Общая концентрация сахаров в водной части продукта						
	38,5	55,0	49,8	39,6	45,1	26,9

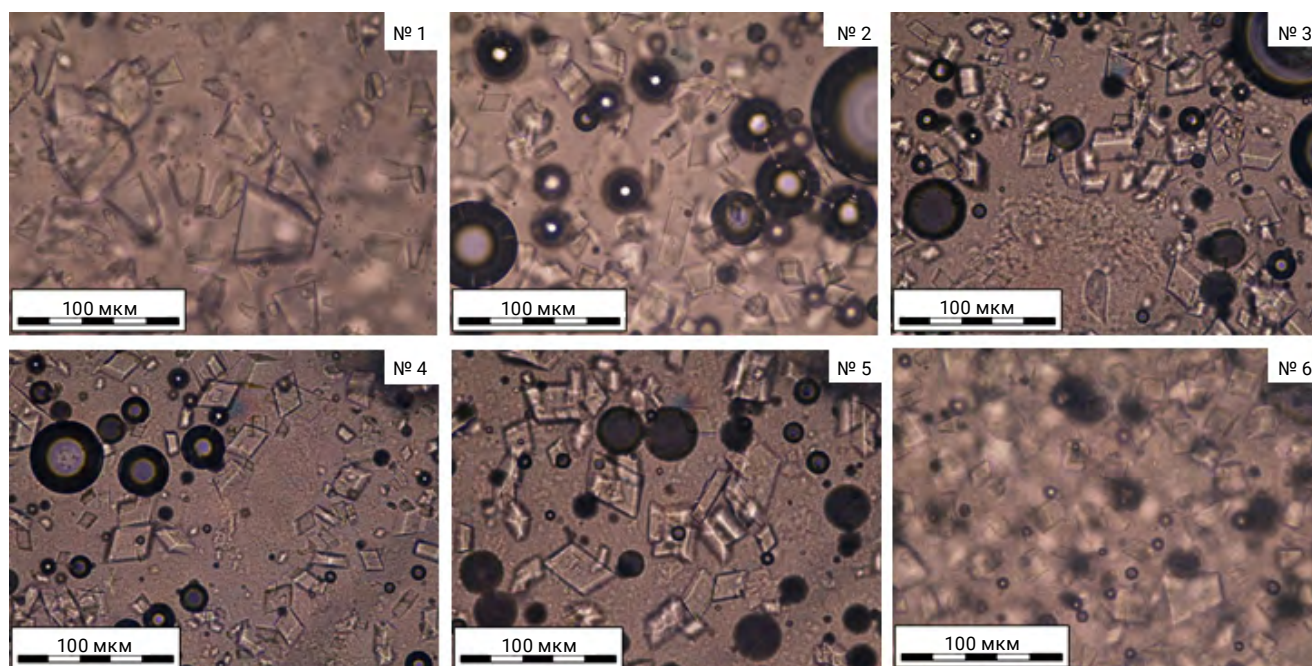


Рисунок 1. Микрофотографии кристаллов лактозы через 24 ч хранения

Для оценки темпов роста кристаллов определяли их размеры. Полученные результаты приведены в таблице 4.

Наибольший рост кристаллов лактозы за 1 мес. наблюдался в растворе № 1, в котором отсутствовали низкомолекулярные вещества, влияющие на рост кристаллов лактозы, что вызвало увеличение их размера на 18 мкм. Этот процесс характеризует метастабильное состояние лактозы. Наименьший рост среднего размера кристаллов (5 мкм) выявлен в растворах № 4 (в присутствии сахарозы) и № 6 (с использованием инулина). При этом на конец хранения размер кристаллов в образце № 4 был наименьшим, а в образце № 6 через 1 ч хранения – наибольшим. Динамика кристаллов лактозы в образце № 4 подтверждает данные о способности сахарозы поддерживать метастабильное состояние растворов лактозы. Образование крупных кристаллов лактозы после замораживания и их медленный дальнейший рост в образце № 6 обусловлены влиянием инулина.

Исследование состояния лактозы при критической температуре кристаллизации. Как это отмечено ранее, в наибольшей степени кристаллизация лактозы происходит при температуре мороженого, близкой к минус 10 °С, что послужило основанием для выбора этого режима для хранения замороженного продукта. Особенностью состава образцов являлось отсутствие стабилизаторов, ингибирующих рост кристаллов лактозы. Определение кристаллов лактозы в образцах взбитого мороженого продукта с указанным в таблице 2 составом проводили после 3 мес. хранения. Результаты представлены на рисунках 2 и 3.

Форма кристаллов, представленных на рисунке 2, отличается от полученной при кристаллизации лактозы в растворах, не подвергнутых взбиванию и замораживанию (рис. 1). Форма сечения в виде трапеции и неровного ромба выражена в меньшей степени, возможно не только из-за различий

Таблица 4. Средний размер кристаллов лактозы в процессе хранения модельных образцов

Продолжительность хранения	Образцы					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
1 ч	9,5 ± 1,6	11,9 ± 0,8	8,9 ± 2,0	9,5 ± 0,6	9,4 ± 1,5	17,4 ± 1,3
2 ч	12,9 ± 1,1	15,1 ± 0,5	14,1 ± 1,7	13,4 ± 0,8	14,1 ± 1,2	16,8 ± 1,3
3 ч	12,4 ± 1,3	16,6 ± 0,1	14,9 ± 0,2	14,9 ± 1,8	16,7 ± 0,8	18,9 ± 0,5
24 ч	17,2 ± 0,7	19,0 ± 0,5	16,1 ± 0,6	16,1 ± 1,5	25,3 ± 0,9	16,6 ± 0,7
7 суток	22,2 ± 2,7	22,6 ± 1,1	17,5 ± 0,7	15,8 ± 0,3	23,4 ± 3,2	18,5 ± 0,9
1 мес.	27,4 ± 1,9	22,3 ± 3,3	16,5 ± 0,5	15,1 ± 0,9	19,5 ± 0,7	22,1 ± 0,9

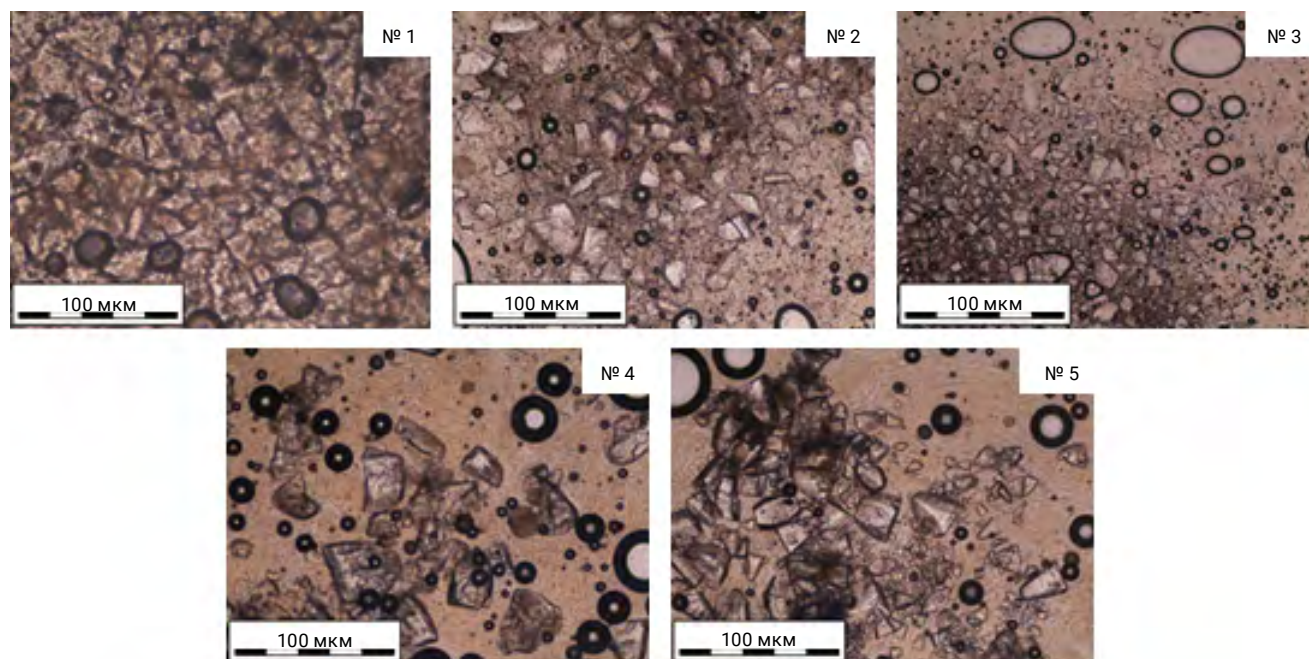


Рисунок 2. Микрофотографии лактозы в мороженом



Источник изображения: freerik.com

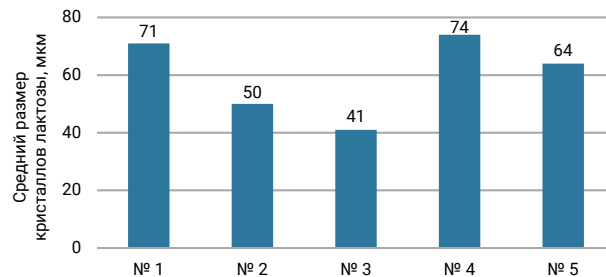


Рисунок 3. Средний размер кристаллов лактозы

в модификации кристаллов лактозы в растворе и в замороженном продукте, но и вследствие влияния термомеханического воздействия во фризере. Средний размер кристаллов лактозы превышал порог их органолептической осцутимости (10 мкм), что в значительной степени обусловлено отсутствием стабилизаторов.

Через 3 мес. наименьший размер кристаллов был установлен в образце № 3 (с фруктозой и трегалозой) и № 2 с традиционным содержанием сахарозы (14 %). Суммарное содержание фруктозы и трегалозы соответствовало содержанию сахарозы. Следовательно, эти сахара и сахароза при содержании 14 % ингибируют рост кристаллов льда. При меньшем содержании сахарозы в образце № 4 (5 %) такой эффект отсутствовал. Наибольшие размеры кристаллов выявлены в образцах № 4 и № 1 без использования сахарозы. Подобные различия в дисперсности кристаллов лактозы вызваны качественным и количественным содержанием сахаров, ингибирующих перекристаллизацию лактозы.

Кристаллизация лактозы в мороженом в присутствии фруктозы и глюкозы. Важно знать состояние лактозы в мороженом в присутствии глюкозы, применяемой в мороженом одновременно с сахарозой с целью достижения мягкой консистенции в крупнофасованном мороженом. Такие варианты довольно широко воспроизводятся в промышленных условиях, характеризуются стабильным состоянием лактозы. При замене сахарозы на лактозу по сладости и частично по сухому веществу вследствие более высокой сладости фруктозы происходит снижение количества применяемых сахаров, поэтому выпадения кристаллов лактозы не отмечается. Однако при полной замене сахарозы на сахара природного происхождения, в частности натуральных сиропов, возможно одновременное внесение фруктозы и глюкозы, в связи с этим интерес представляли исследования состояния лактозы в присутствии фруктозы и глюкозы одновременно.

При проведении экспериментальных исследований в мороженом пломбир с содержанием жира 12 % для полной замены сахарозы по сладости и сухому веществу использовали финиковый сироп, содержащий сухих веществ $55,7 \pm 2,2$ %, в том числе более половины составляла фруктоза (рис. 4). Полезные свойства этого продукта хорошо изучены [15].

Технологически значимые показатели качества мороженого пломбир с финиковым сиропом в сравнении с контрольным образцом, содержащим 14 % сахарозы, приведены в таблице 5.

Применение финикового сиропа вместо сахара привело к заметному повышению динамической вязкости смеси (почти в 2,6 раза), что, вероятно, обусловлено дополнительным введением в продукт с финиковым сиропом пищевых волокон и белков. Не вызвало, в отличие от случая использования других заменителей сахара, заметного возрастания показателя «условная твердость» готового продукта и не оказало отрицательного влияния на дисперсность структурных элементов, что положительно.

Отмечая положительное влияние финикового сиропа на реологические свойства мороженого пломбир, обращено внимание на массовое выпадение кристаллов лактозы (рис. 5). Следовательно, при замене сахарозы в мороженом пломбир

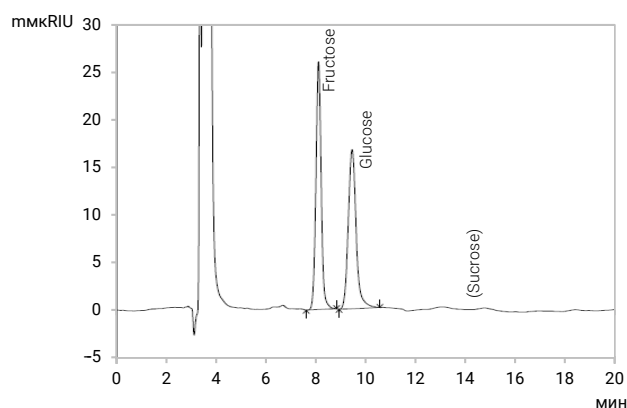


Рисунок 4. Хроматограмма сахаров в финиковом сиропе

на сахара финикового сиропа (фруктозу и глюкозу) в присутствии пищевых волокон, известных способностью образовывать гель-частицы, которые могут инициировать образование кристаллов [16].

Из данных рисунка видно, что кристаллы лактозы в мороженом в большей степени характеризуются в сечении формой неровного ромба или четырехугольника, характерной для ее перенасыщенных растворов в присутствии других сахаров.

ВЫВОДЫ

Исследование влияния присутствия сахаров и их заменителей на возможность кристаллизации лактозы в перенасыщенных ее растворах показало, что наименьшие кристаллы лактозы формируются в образцах с традиционным содержанием сахарозы (14 %) или при ее замене на фруктозу и трегалозу (8 и 6 %) соответственно. Динамика образования и роста кристаллов лактозы в присутствии указанного содержания сахарозы и композиции фруктозы и трегалозы свидетельствует об их ингибирующей способности. Присутствие фруктозы и глюкозы в составе финикового сиропа, содержащего дополнительно инулин, инициирует кристаллизацию лактозы из перенасыщенных растворов. В отсутствии сахаров в растворах лактозы формируются кристаллы преимущественно в сечении в виде тра-

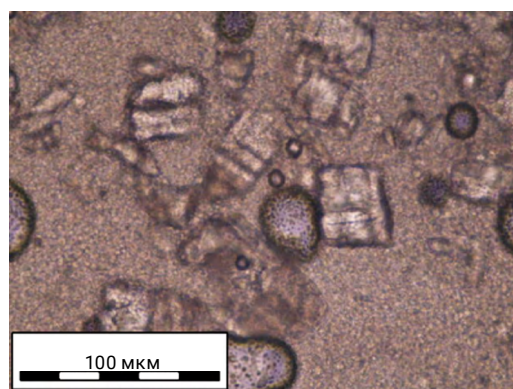


Рисунок 5. Внешний вид кристаллов лактозы в мороженом пломбир с финиковым сиропом

Таблица 5. Реологические и микроструктурные показатели качества мороженого пломбир с финиковым сиропом

Наименование показателей	Значение показателей в образцах мороженого	
	контрольном	с финиковым сиропом
Динамическая вязкость смесей после созревания, мПа·с	680 ± 9	1747 ± 108
Условная твердость, Н	$9,7 \pm 1,2$	$8,3 \pm 0,9$
Средний размер воздушных пузырьков через 3 мес. хранения, мкм	$43,3 \pm 1,5$	$42,1 \pm 2,2$
Средний размер кристаллов льда через 3 мес. хранения, мкм	$26,2 \pm 0,9$	$28,8 \pm 0,6$

пеции, при наличии сахаров – неровного ромба. Использование ингредиентов, применяемых в качестве заменителей сахарозы – подсластителя мальтита и мальтодекстрина, в отсутствие сахаров не оказало положительного влияния на динамику роста

кристаллов лактозы в мороженом. Результаты исследований показали на необходимость учета влияния на состояния лактозы в мороженом и замороженных десертах качественного и количественного состава сахаров и их заменителей. ■

Поступила в редакцию: 26.02.2025
Принята в печать: 12.05.2025

LACTOSE CRYSTALLIZATION IN ICE-CREAM WITH ALTERNATIVE SUGARS AND SUGAR SUBSTITUTES

Igor A. Gursky, Antonina A. Tvorogova, Polina B. Sitnikova

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

ORIGINAL ARTICLE

Grittiness and mealiness are the most common defects of ice-cream structure. As a rule, they are caused by lactose crystallization and recrystallization. In ice-cream, lactose is an oversaturated solution, and its potential crystallization should be considered when replacing sugar with alternatives and substitutes. In this case, crystallization is likely to occur at -10°C . The article describes the effect of sucrose, fructose, trehalose, glucose, and their compositions with other substitutes on lactose crystals in ice-cream. The methods of light microscopy, dynamic viscosity, and rheology made it possible to study lactose crystals in dynamics. In cross-section, a lactose crystal was an uneven rhombus in the presence of alternative sugars and a trapezoid at $\leq 5\%$ sugar content. In the concentrated model solutions of sucrose and a fructose+trehalose, lactose crystals were $4\text{--}12\ \mu\text{m}$ smaller after 1 month of storage than in the samples with substitutes. Smaller crystals developed in the samples with fructose+trehalose+maltodextrin and with sucrose+maltitol+maltodextrin. The smallest crystals were observed in the sample with sucrose-maltitol+maltodextrin ($\leq 5\ \mu\text{m}$) while the largest crystals ($\leq 18\ \mu\text{m}$) developed in the sample without additional sugars. In the frozen whipped samples without stabilizers, the average lactose crystals grew as big as $71\ \mu\text{m}$ after 3 months of storage with maltodextrin and $74\ \mu\text{m}$ in the samples with sucrose+maltitol+maltodextrin. The smallest crystal size ($41\ \mu\text{m}$) was found in the sample with 14% fructose and trehalose. When sucrose was replaced with date-syrup fructose, glucose, or inulin, they triggered lactose crystallization, despite a major increase in viscosity (2.6 times). Sugars (sucrose and fructose+trehalose) in standard amounts inhibited lactose crystallization. When designing new ice-cream formulations, food engineers should keep it in mind that alternative natural sugars, e.g., date syrup, and other sucrose substitutes contain nutrients that may initiate lactose crystallization.

Keywords: oversaturated solution, sucrose, fructose, trehalose, glucose, shape of lactose crystal

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nishinaga, T. Handbook of Crystal Growth: Fundamentals / T. Nishinaga. – Elsevier, 2015. – 1214 p.
2. Hagen, N. The rainbow beam experiment: Direct visualization of dipole scattering and optical rotatory dispersion / N. Hagen, T. Tadokoro // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. San Diego, CA, 2019. 111320E. <https://doi.org/10.1117/12.2526479>
3. Jawad, R. Crystallisation of freeze-dried sucrose in model mixtures that represent the amorphous sugar matrices present in confectionery / R. Jawad [et al.] // Food & function. 2018. Vol. 9(9). P. 4621–4634. <https://doi.org/10.1039/C8FO00729B>
4. Webb, B. The Manufacture of Low-Lactose Skim Milk for Use in Ice Cream / B. Webb, O. E. Williams // Journal of Dairy Science. 1934. Vol. 17. P. 103–114. <https://doi.org/10.1039/C8FO00729B>
5. Syed, Q. A. Effects of different ingredients on texture of ice cream / Q. A. Syed [et al.] // Journal of Nutritional Health & Food Engineering. 2018. Vol. 8(6). P. 422–435. <https://doi.org/10.15406/jnhfe.2018.08.00305>
6. Ademosun, A. O. Glycemic properties of soursop-based ice cream enriched with moringa leaf powder / A. O. Ademosun // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9(2). P. 207–214. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-207-214>
7. Portnoy, M. Lactose: Use, measurement, and expression of results / M. Portnoy, D. M. Barbano // Journal of Dairy Science. 2021. Vol. 104 (7). P. 8314–8325. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18706>
8. Wong, S. Y. Crystallization in Lactose Refining-A Review / S. Y. Wong, R. W. Hartel // Journal of Food Science. 2014. Vol. 79(3). P. R257–R272. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12349>
9. Goulart, D. B. Principles of lactose crystallization and rheology of milk protein concentrate / D. B. Goulart // The Research, Society and Development. 2021. Vol. 10(15). e577101523028. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23028>
10. Livney, Y. D. Influence of temperature on crystallization of lactose in ice-cream / Y. D. Livney, D. P. Donhowe, R. W. Hartel // International Journal of Food Science & Technology. 1995. Vol. 30(3). P. 311–320. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb01380.x>
11. Nickerson, T. A. Lactose Crystallization in Ice Cream. II. Factors affecting Rate and Quantity / T. A. Nickerson // Journal of Dairy Science. 1956. Vol. 39. P. 1342–1350. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(56\)94858-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(56)94858-5)
12. Nickerson, T. A. Lactose Crystallization in Ice Cream. IV. Factors Responsible for Reduced Incidence of Sandiness / T. A. Nickerson // Journal of Dairy Science. 1962. Vol. 45. P. 354–359. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(56\)94858-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(56)94858-5)
13. Trasi, N. S. Factors influencing crystal growth rates from undercooled liquids of pharmaceutical compounds / N. S. Trasi [et al.] // The journal of physical chemistry. B. 2014. Vol. 118(33). P. 9974–9982. <https://doi.org/10.1021/jp504450h>
14. Sha, Z. Purification by crystallization from solutions of various viscosities / Z. Sha [et al.] // Journal of Crystal Growth. 1999. Vol. 198. P. 692–696. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)01025-2](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)01025-2)
15. Резниченко, И. Ю. Потенциал продуктов переработки фиников как биологически ценного сырья в индустрии питания / И. Ю. Резниченко, Т. А. Мирошина // Вестник КрасГАУ. 2024. № 10(211). С. 180–191. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-10-180-191>
16. Akbari, M. The effect of inulin on the physicochemical properties and sensory attributes of low-fat ice cream / M. Akbari [et al.] // International Dairy Journal. 2016. Vol. 57. P. 52–55. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.02.040>