

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-171-180>



Поступила 29.01.2026

Поступила после рецензирования 22.04.2026

Принята в печать 24.04.2026

© Творогова А. А., Казакова Н. В., Ландиховская А. В.,
Ситникова П. Б., Ермоchenков Д. М., Ананьева Н. В., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

АСПЕКТЫ УСТАНОВЛЕНИЯ СРОКОВ ГОДНОСТИ И ПОРЧИ МОРОЖЕНОГО. ОБЗОР

Творогова А. А.*, Казакова Н. В., Ландиховская А. В., Ситникова П. Б.,
Ермоchenков Д. М., Ананьева Н. В.

Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

кристаллы льда,
воздушные пузырьки,
температура
стеклования,
окисление жировой
фазы, ускоренные
методы исследований,
температура
хранения,
антиоксидантная
активность

Цель исследований — анализ подходов к установлению сроков годности мороженого, причин появления и определения его пороков в процессе производства и хранения. Структурные элементы мороженого распределяются в незамерзающей концентрированной плазме и перемещаются в ней, что в процессе длительного хранения может приводить к сращиванию кристаллов и укрупнению воздушных пузырьков. Эти процессы и окислительные изменения жировой фазы признаны основными видами порчи мороженого в процессе хранения. Установлено, что в значительной степени происходит изменение дисперсности структурных элементов мороженого при многократных колебаниях температуры в процессе хранения. В связи с этим важно установить объективные сроки годности мороженого. С учетом резерва процесс исследований по нормированию сроков годности длительный, существует необходимость их прогнозирования и определения ускоренными методами. Для достоверного анализа структурных элементов необходимо применять методы неразрушающего контроля, такие как рамановская спектроскопия, синхротронная рентгеновская томография и криосканирующая электронная микроскопия. Важным условием длительного хранения мороженого без потери качества является достижение температуры стеклования, на которую влияют низкомолекулярные вещества в продукте и скорость замораживания. Для установления эффекта стеклования в пищевых продуктах широко применяют метод дифференциальной сканирующей калориметрии. Особой нестабильностью в процессе производства из-за резкого изменения давления при выходе мороженого из фризера характеризуются воздушные пузырьки. При температурах выше минус 18 °C нестабильность воздушных пузырьков проявляется в виде диспропорционирования, слипания и дренажа. При длительном хранении мороженого взаимосвязь между воздушными пузырьками приводила к образованию каналов, изучение которых методом оптической микроскопии невозможно. В наименьшей степени при производстве мороженого учитывается химический вид порчи — окисление жировой фазы. Ведутся исследования по объективной его оценке и обоснованию методов исследования. Рассматривается возможность применения общепринятых методов определения показателей окисления — перекисного и анизидинового чисел, их совместная оценка по значению TOTEX. Реже используют спектрофотометрический метод, позволяющий с помощью тиобарбитуровой кислоты определять количество малонового диальдегида. Анализ литературы указывает на недостаточное количество данных по показателям качества мороженого при хранении и на необходимость дополнительных исследований для получения обоснованных объективных данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию FGUS-2025-0003 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук.

Received 29.01.2026

Accepted in revised 22.04. 2026

Accepted for publication 24.04.2026

© Tvorogova A. A., Kazakova, N.V., Landikhovskaya A. V.,
Sitnikova, P. B., Ermochonkov, D. M., Ananyeva, N. V., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

ASPECTS OF ESTABLISHING THE SHELF LIFE AND SPOILAGE OF ICE CREAM. A REVIEW

Antonina A. Tvorogova*, Natalia V. Kazakova, Anna V. Landikhovskaya,
Polina B. Sitnikova, Dmitriy M. Ermochonkov, Natalia V. Ananyeva

All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry, Moscow, Russia

KEYWORDS:

ice crystals, air
bubbles, glass
transition temperature,
oxidation of
the fat phase,
accelerated methods
of investigation,
storage temperature,
antioxidant activity

ABSTRACT

The aim of this research is to analyze approaches to establishing ice cream shelf life and determining its defects and the causes of their occurrence during production and storage. Structural elements of ice cream are distributed and migrate within the non-freezing concentrated plasma, which can lead to crystal fusion and the enlargement of air bubbles during long-term storage. These processes, along with oxidative changes in the fat phase, are recognized as the main causes of ice cream spoilage during storage. It has been established that the dispersion of structural elements in ice cream significantly changes with repeated temperature fluctuations during storage. Therefore, it is important to establish objective shelf life for ice cream. Given the reserve, the research process for standardizing shelf life is lengthy, necessitating its prediction and determination using accelerated methods. Reliable analysis of structural elements requires the use of non-destructive testing methods such as Raman spectroscopy, synchrotron X-ray tomography, and cryoscanning electron microscopy. A key requirement for long-term storage of ice cream without loss of quality is achieving the glass transition temperature, which is influenced by the presence of low-molecular-weight substances in the product and the freezing rate. Differential scanning calorimetry is widely used to determine the glass transition in food products. Air bubbles are particularly unstable during the production process due to the abrupt pressure change when the ice cream exits the freezer. At temperatures above -18 °C, air bubble instability

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Творогова, А. А., Казакова, Н. В., Ландиховская, А. В., Ситникова, П. Б., Ермоchenков, Д. М., Ананьева, Н. В. (2026). Аспекты установления сроков годности и порчи мороженого. Обзор. *Пищевые системы*, 9(2), 171–180. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-171-180>

FOR CITATION: Tvorogova, A. A., Kazakova, N. V., Landikhovskaya, A. V., Sitnikova, P. B., Ermochonkov, D. M., Ananyeva, N. V. (2026). Aspects of establishing the shelf life and spoilage of ice cream. A review. *Food Systems*, 9(2), 171–180. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-171-180>

manifests itself as disproportionation, aggregation, and drainage. During long-term ice cream storage, the interaction between air bubbles led to the formation of channels, which cannot be studied using optical microscopy. The chemical type of spoilage (oxidation of the fat phase) is taken into account to a lesser degree in ice cream production. Research is underway to objectively assess this phenomenon and validate the research methods. The possibility of using generally accepted methods for determining oxidation indicators (peroxide and anisidine values) and their combined assessment using the TOTEX value is being considered. Less commonly used is the spectrophotometric method, which uses thiobarbituric acid to determine malondialdehyde levels. A review of the literature indicates a lack of data on ice cream quality parameters during storage and the need for further research to obtain reliable, objective data.

FUNDING: The article is prepared as part of the research under the State Assignment No. FGUS-2025-0003 of Gorbатов Federal State Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences.

1. Введение

Выраженная сезонность потребления и производства основного сырья для мороженого (молока и молочной продукции) вызывает необходимость его длительного хранения. В технологически развитых странах мороженое и родственные ему продукты производят и хранят в условиях единой холодильной цепи, важным условием функционирования которой является необходимость поддержания на всех этапах температуры не выше минус 18 °C [1,2].

При такой температуре доля вымороженной воды в мороженом составляет не менее 80 %, что позволяет считать этот продукт замороженным. Присутствие воды в замороженном виде препятствует протеканию химических, биохимических и микробиологических реакций [3]. Однако низкая температура, сохраняя безопасность продукта, в полной мере не предотвращает структурные изменения в нем.

Структурными элементами мороженого являются кристаллы льда, воздушные пузырьки и суспендированные частицы жира. Все структурные элементы распределяются в незамерзающей плазме, представляющей собой концентрированный раствор сахаров, солей, белков и гидроколлоидов в незамерзающей воде.

В монографии [4] отмечено, что все пищевые биологические объекты неизбежно подвергаются порче, перечислены основные виды порчи мороженого при хранении — рост кристаллов льда и лактозы и окисление жировой фазы. При этом рост кристаллов льда и лактозы относят к изменениям физической природы, окисление — химической. Кроме того, к физическим видам порчи следует отнести неизбежно происходящие изменения дисперсности воздушной фазы, принимая во внимание, что на долю этого структурного элемента в мороженом приходится наибольшая часть объема [2,5–7].

Сроки годности мороженого устанавливают не во всех странах мира. Большинство производителей стремятся как можно быстрее реализовать мороженое, не расходуя средства на обеспечение сохранности продукта.

В частности, Goff и соавторы [1] сообщают результаты опроса о продолжительности хранения мороженого в звеньях холодильной цепи: предприятие-изготовитель — 2 недели; авторефрижератор (транспортирование на оптовую базу) — 6 ч; оптовая база — 4 недели; авторефрижератор (транспортирование на предприятия розничной торговли) — 3 ч; предприятие розничной торговли — 1 неделя; бытовой холодильник потребителя — 1 неделя. Таким образом, с момента изготовления мороженого до его употребления в среднем проходит более 2 месяцев. В странах с большой территорией, в частности в России, принято указывать на упаковке более длительный срок (от 6 до 24 мес.). При установлении срока годности, рекомендуемого стандартом на производство традиционного мороженого (более 6 мес.), предприятие-изготовитель обязано обосновать его в соответствии с методическими указаниями¹. Однако в этом документе срок годности мороженого предусмотрено обосновывать, как для всей молочной продукции, без учета его специфики как структурированного и жиросодержащего продукта. Состояние структуры оценивается органолептически, а биодоступность жировой фазы к окислению — только по продуктам гидролиза жира и первичным продуктам окисления (кислотное и перекисное числа).

Процедура установления сроков годности в соответствии с методическими указаниями с учетом коэффициента резерва (1,2) довольно длительная, поэтому важной задачей является прогнозирование хранимостепоспособности мороженого. Кроме того, в методических указаниях не предусмотрено определение показателей, характеризующих основные виды порчи мороженого (наличие органолептически ощутимых кристаллов льда и окисление жировой фазы).

В связи с этим целью исследований являлся анализ подходов к установлению сроков годности мороженого, причин появления и определения его пороков в процессе производства и хранения.

2. Материалы и методы

Поиск научной литературы проводили с использованием поисковых систем Web of Science, Scopus и Google Scholar, с помощью научных электронных библиотек «КиберЛенинка» и eLIBRARY, а также открытых интернет-источников. Сбор данных осуществляли на русском и английском языках по ключевым фразам с оператором «и»: мороженое, срок годности, дисперсность кристаллов льда и воздушных пузырьков, температура стеклования, окисление жировой фазы, ускоренные методы исследований, температура хранения, оценка антиоксидантной активности. По поисковому запросу найдено более 550 источников.

В ходе работы проанализированы полные тексты статей, соответствующих критериям поиска. Статьи, не относящиеся к теме исследования, отклоняли после изучения названия и аннотации.

Критерии использования публикации:

1. Публикация создана в период 2010–2023 гг.;
2. Источник проиндексирован в Web of Science, Scopus и РИНЦ;
3. Возможно выборочное включение статей, опубликованных ранее 2010 г., в случае отсутствия новых источников по заданным критериям поиска.

Критерии исключения:

- ☐ работы, не относящиеся к теме исследования;
- ☐ отсутствие полных текстов публикаций.

3. Аспекты установления длительных сроков годности мороженого

Срок годности мороженого и родственных ему продуктов в значительной степени зависит от температуры хранения. Международный институт холода рекомендует хранить мороженое при температуре минус 12 °C в течение 1 мес., минус 18 °C — 6 мес., минус 22 °C — 24 мес. [3]. Корейские ученые [8] использовали ускоренное тестирование для определения срока годности путем оценки pH, микробиологических показателей и сенсорных характеристик мороженого, применяя так называемый кинетический подход. Согласно действующему в Корею законодательству, мороженое не имеет срока годности. Исследования ученых показали, что срок годности мороженого составлял 24,27 мес. при минус 18 °C, 2,29 мес. при минус 6 °C, 0,39 мес. при минус 1 °C и 0,15 мес. при 4 °C. Результаты этого исследования демонстрируют, что установленный срок годности также может способствовать эффективному управлению характеристиками мороженого в розничной сети. Такое исследование представляется не вполне корректным, поскольку в нем не учитываются критические показатели качества мороженого в процессе хранения и рассматривается состояние продукта в недопустимых температурных режимах.

Вууск с коллегами [9] уделили внимание качеству мороженого в процессе хранения при низких температурах, применяемых лишь на незначительном количестве предприятий. Исследование проведено с целью сокращения энергозатрат на хранение при нормируемом показателе минус 28,9 °C. Исследовали влияние температур хранения минус 45,6, минус 28,9, минус 26,1 и минус 23,3 °C на показатели качества так называемого коммерческого легкого и жирного мороженого со вкусом ванили при хранении в течение 1, 19,5 и 39 недель. Размер кристаллов льда заметно не различался при одной и той же температуре для легкого и жирного мороженого. Увеличение размера кристаллов льда наблюдали в диапазоне от 19,5 до 39 мкм при всех температурах хранения, кроме минус 45,6 °C. Исследователи пришли к выводу, что производители мороженого могут экономить электроэнергию, повышая температуру в морозильных камерах с минус 28,9 до минус 26,1 °C.

¹ Санитарно-эпидемиологическая оценка обоснования сроков годности и условий хранения пищевых продуктов. Методические указания. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004.

Также Вууск с коллегами [9] сообщают о нормируемом значении температуры хранения мороженого минус 28,9 °С, такой же уровень установлен и в ряде других стран [1]. При высоком содержании сухих веществ, включая низкомолекулярные, при температуре минус 28,9 °С можно достичь так называемого эффекта стеклования, оказывающего заметное влияние на срок годности мороженого [10].

Процесс стеклования является объектом изучения многих исследователей. Roos [11] отметил возможность образования при замораживании пищевых продуктов некристаллических структур и указал на необходимость разработки и практического использования диаграмм состояния растворенных веществ. Диаграммы состояния являются важными инструментами для отображения физического состояния и зависящих от времени свойств замороженных объектов при различной температуре хранения. На диаграммах отражают температуры стеклования и таяния льда, которые могут быть использованы для оценки явлений кристаллизации и перекристаллизации и их скорости в замороженных продуктах. Температуры выше температуры плавления льда вызывают ускорение порчи замороженных продуктов, особенно в результате колебаний температуры во время их реализации и хранения.

Предотвратить процесс укрупнения кристаллов льда можно только при хранении мороженого при температуре ниже температуры стеклования. В водных растворах в процессе стеклования не происходит упорядочения молекул воды в кристаллическую решетку из-за высокой вязкости и, как следствие, формирования аморфного состояния среды. Температура стеклования мороженого зависит от его состава, в значительной степени от содержания сахаров и других низкомолекулярных веществ и составляет минус (23–45) °С [4]. Следовательно, в мороженом с высоким содержанием сухих веществ в производственных условиях можно обеспечить режимы хранения, вызывающие стеклование незамерзающей плазмы.

Mahato с коллегами [12] обращает внимание на то, что процесс стеклования при интенсивном охлаждении происходит при достижении термодинамического неравновесия в связи со снижением подвижности молекул. Хранение в условиях стеклования может предотвратить снижение качества в результате замораживания. Авторы провели анализ факторов, оказывающих влияние на стеклование: вид растворенных веществ, включая углеводы, содержание воды, скорость замораживания и др. Рассмотрено влияние замораживания с помощью ультразвука, высокого давления, электрического и магнитного полей на процесс стеклования.

В замороженных йогуртах (кисломолочное мороженое с йогуртом) с олигофруктозой Muzammil [13] исследовал и обосновал процесс стеклования за счет применения глицерина — вещества с низкой молекулярной массой. Введение глицерина привело к увеличению скорости таяния и к значительному снижению температуры стеклования ($P < 0,05$). На основании результатов исследований автор сделал вывод о целесообразности использования олигофруктозы и глицерина для улучшения текстурных свойств замороженного йогурта.

Zhao с коллегами [14] в аналитическом обзоре отметили, что, согласно некоторым исследованиям, хранение замороженных продуктов при температуре ниже температуры стеклования (T_g), обеспечивает более высокое качество быстрозамороженных продуктов в процессе хранения вследствие снижения подвижности, а следовательно, и активности воды.

Для определения T_g многих пищевых продуктов широко применяют метод дифференциальной сканирующей калориметрии.

Современные подходы к установлению сроков годности мороженого требуют значительных временных затрат и не в полной мере отражают основные виды порчи этого продукта. В связи с этим большинство ученых уделили внимание вопросам сокращения продолжительности тестирования и повышения достоверности результатов исследований.

Zhang с соавторами [15] провели анализ принципов и возможностей применения методов рамановской спектроскопии (спектроскопия комбинационного рассеяния) для оценки структуры замороженных продуктов. Выбор этого метода основан на том, что рамановский эффект наблюдается в свете, рассеянном от образца, а не в спектре поглощения образцом света. Поэтому рамановская спектроскопия не требует специальной подготовки образца, нечувствительна к полосам поглощения и может применяться для исследования объектов различного агрегатного состояния (твердых, жидких и газообразных) через прозрачные материалы, в частности стекло. Использование метода дает возможность достоверной оценки состояния структурных элементов.

Интерес представляет работа [16], в которой исследователи обратили внимание на необходимость сохранения полезных свойств функциональных продуктов в процессе хранения на примере одного

из основных компонентов для мороженого — сухого молока, обогащенного белком, пищевым волокном и витаминами. Авторы провели исследование по ускоренному определению сроков годности этого продукта. Установлено, что при хранении сухого молока при температуре 25 °С в течение 2 мес. значение перекисного числа возросло почти в 1,5 раза, а активность липазы — почти в 2 раза. Изменениям подверглась и белковая составляющая продукта, в частности содержание свободных аминокислот возросло на 20,5%. Показана возможность разработки методики определения сроков годности для функциональных продуктов на молочной основе длительного хранения с применением метода ускоренного старения (ASLT) и математического моделирования.

4. Дисперсность кристаллов льда в процессе производства и хранения мороженого и способы изучения их дисперсности

Учитывая, что органолептически ощутимые кристаллы льда определяют один из основных видов порчи мороженого в процессе хранения, важно достоверно оценить дисперсность этого структурного элемента не только на этой стадии, но и в процессе производства.

Процесс замораживания в производстве мороженого включает три последовательные стадии. На первой стадии смесь частично замораживают в процессе фризирования до температуры минус 4–7 °С (образуется мягкое мороженое); затем проводят закалывание, понижая температуру продукта до минус 12–18 °С в скороморозильной камере, после чего осуществляют дозамораживание в морозильной камере до температуры не выше минус 18 °С, если она не была достигнута на этапе закалывания. Процесс изготовления мороженого заканчивается при достижении температуры минус 18 °С [2].

Процесс замораживания сопровождается образованием кристаллов льда. В зависимости от факторов инициирования выделяют первичное (гомогенное и гетерогенное) и вторичное кристаллообразование [5]. При переохлаждении водных растворов в процессе фризирования образуются первичные ядра. На их образование расходуется 30–50 % воды, находящейся в продукте. Если в растворе вещества, инициирующие нуклеацию, отсутствуют, то образование ядер кристаллов считается гомогенным, если присутствуют — гетерогенным [17]. В процессе закалывания кристаллизация оставшейся воды происходит на кристаллах льда, образованных в процессе фризирования. Это вторичная кристаллизация.

Рост кристаллов льда в мороженом происходит по различным причинам и наиболее заметен при значимых колебаниях температуры [18,19].

Кристаллы льда следует рассматривать как поликристаллические образования, поэтому их структура термодинамически нестабильна из-за изменения местоположения молекул. В связи с этим сразу после образования начинается перекристаллизация кристаллов, но без изменения их массы. В работе [2] показано, что изначально кристаллы имеют форму усеченной пирамиды, которая в процессе хранения мороженого скругляется. Величина острого угла при нижнем основании пирамиды заметно увеличивается. При исследовании показателя «угол кривизны» в замороженных десертах с кокосовым маслом 10%-ной жирности показано, что доля углов кривизны менее 60 °С через 7 мес. хранения уменьшилась практически в 3 раза.

В процессе хранения мороженого происходит не только скругление кристаллов льда, но и увеличение их размеров за счет присоединения мелких кристаллов льда из-за их более низкой способности связывать воду в незамерзающей водной фазе.

Практически все исследователи рассматривали мороженое как трехмерную структуру, состоящую из взаимосвязанных воздушной и ледяной фаз и среды — незамерзающего водного раствора солей, белков и гидроколлоидов [2, 20–22].

Учитывая значимость качественного и количественного состава льда в мороженом, большинство авторов уделяют значительное внимание вопросам образования и динамике кристаллов льда в процессе хранения. В частности, в обзоре [23] Ja с коллегами изложили теории зародышеобразования и роста кристаллов льда, рассмотрели аспекты контроля этого процесса. Представлен обзор процессов тепло- и массообмена, взаимосвязи между ростом кристаллов льда и факторами теплопередачи. Отмечено влияние на дисперсность кристаллов льда быстрого замораживания в условиях криогенных температур. Показана неизбежность влияния колебаний температуры, особенно многократных, на морфологию и дисперсность кристаллов льда. Отмечено влияние ингибиторов роста льда (белков-антифризов, полисахаридов и фенолов) и агентов, инициирующих нуклеацию. Эти компоненты адсорбируются на поверхности кристалла и препятствуют проникновению молекул воды в кристаллическую решетку. При этом обращено

внимание на необходимость разработки новых технологий замораживания и хранения мороженого, обеспечивающих высокую дисперсность кристаллов льда.

Giudici с коллегами [24] посвятили свое исследование математическому моделированию кинетики образования кристаллов льда в производственных условиях. Понижение температуры при замораживании фиксировали с помощью компьютеризированной беспроводной системы. Для определения начальной точки замерзания использован алгоритм распознавания экспериментальных кривых охлаждения. Для калибровки всего температурно-временного профиля учитывали теоретическую точку замерзания. Принимая во внимание, что рост кристаллов происходил неравномерно (более медленно в начале и конце процесса замораживания), для описания кинетики образования кристаллов льда применена модифицированная функция Гомперца. Производный анализ функции Гомперца позволил определить физические маркеры динамического образования зародышей во времени в зависимости от температуры, скорости роста кристаллов льда и степени насыщения смеси воздухом. В многомерном анализе состав продукта и параметры замораживания использовали в качестве входных переменных. Построение прогнозных моделей базировалось на численном анализе кривой охлаждения.

Bahram-Parvar [25] обратил внимание на методы, применяемые для изучения структурных элементов мороженого. В статье обсуждается потенциал разрушающих и неразрушающих методов при определении качества и характеристик мороженого и аналогичных продуктов. Подчеркнута необходимость разработки новых методов для совершенствования оценки характеристик мороженого и осуществления онлайн-тестирования продукта.

Rockett с коллегами [26] для количественной оценки кристаллов льда в мороженом использовали неразрушающий метод — рентгеновскую томографию фазовых изменений. Синхротронную рентгенографию образцов мороженого проводили в месте их нахождения (*in situ*) с использованием встроенной фазово-контрастной томографии. Томограф был размещен в специально построенной холодильной камере с точно контролируемым изменением температуры образца. Размер и распределение кристаллов льда и воздушных ячеек во время запрограммированного температурного цикла определяли с помощью 3D-количественной оценки.

Группа ученых во главе с Guo [27], используя рентгеновскую томографию, смогла подтвердить взаимосвязь между воздушной и ледяной фазами и незамерзающим водным раствором солей, сахаров и белков (плазмой), рассматривая систему как трехмерную. Используя синхротронную рентгеновскую томографию и криосканирующую электронную микроскопию, ученые исследовали состояние микроструктуры мороженого во времени и при колебаниях температуры. Это стало возможным благодаря достижениям в области синхротронной томографии, в частности использованию специальной криостадии; совершенствованию линейного фазового контраста и алгоритма обработки изображений для восстановления и шумоподавления. Исследовано влияние 0, 7 и 14 термических циклов в интервале температур от минус 15 до минус 5 °C на микроструктуру мороженого. Результаты показали, что колебания температуры мороженого вызывают укрупнение как воздушных ячеек, так и кристаллов льда. Рост кристаллов льда практически прекратился после 7 термических циклов. В это время они достигли размеров расстояний между воздушными ячейками. Процесс укрупнения воздушных пузырьков сопровождался образованием каналов. Исследователи пришли к выводу, что объемная томография в большей степени позволяет установить трехмерную морфологию и взаимосвязь фаз в мороженом, чем криосканирующая электронная микроскопия. Эти исследования позволили сделать вывод также о роли воздушных ячеек в ограничении роста кристаллов льда.

Sharqawy и соавторы [21] исследовали влияние колебаний температуры внутри двух встроенных морозильных камер разного размера при нормальных условиях эксплуатации и при размораживании. При этом использовано численное моделирование с применением модели теплообмена с переменными граничными условиями. Данные показали, что время размораживания и величина повышения температуры в процессе размораживания значительно зависят от размера морозильной камеры и характеристик холодильной установки.

Masselot с коллегами [28] использовали рентгеновское томографическое изображение фазовых изменений при изучении кристаллов льда в сорбетах. Размеры микроструктурных элементов определены с разрешением 9 мкм после термостатирования при постоянной температуре, близкой к температуре выгрузки продукта из фризера (минус 6 °C). Подтверждено, что йодид натрия усиливает контраст между незамороженным концентрированным раствором

и льдом. В результате исследований получена воспроизводимая количественная оценка размеров и объемных долей кристаллов льда и пузырьков воздуха. Данные о кристаллах льда соответствовали результатам визуализации криосканирующей электронной микроскопии. Кристаллы льда составляли приблизительно 50% объема продукта, а их средний размер достигал 60 мкм, тогда как на долю пузырьков воздуха приходилось около 6% объема, что характеризует невысокий уровень взбитости продукта. Установлено, что рентгеновская микротомография, оснащенная термостатируемым боксом, является наиболее подходящим методом для анализа микроструктуры замороженных десертов.

Olahanmia с коллегами [29] также обосновали преимущества изучения дисперсности структурных элементов неразрушающими рентгеновскими методами. Рентгеновская микрокомпьютерная томография позволяет визуализировать внутренние микроструктуры материалов посредством создания объемных 3D-данных в различных пространственных масштабах. Малоугловое рассеяние рентгеновских лучей является эффективным неразрушающим методом, используемым для микро- или наноструктурного анализа сухих или частично гидратированных материалов, гелей и растворов. Оно применяется для изучения размера, распределения, формы и молекулярной ориентации частиц, а также структуры материала.

5. Состояние воздушной фазы в процессе производства и хранения мороженого

Изменение дисперсности воздушной фазы в процессе хранения не так ощутимо при органолептической оценке, как изменение размеров кристаллов льда, но может отразиться на состоянии структуры и вызвать порок «усадка порции». При этом сокращается расстояния между кристаллами льда и происходит их сращивание [1–3]. В связи с этим исследование состояния воздушной фазы вызывает научный и практический интерес. Определение дисперсности воздушной фазы сопряжено с необходимостью учета изменчивости пузырьков воздуха в процессе исследования. В связи с этим неслучайно в различных источниках [1,2] указывается средний достигаемый диаметр воздушных пузырьков в мороженом 40–60 мкм. В последних публикациях исследований с использованием современной техники микроскопирования и метода электронного обучения, а также обработки значительного количества объектов (не менее 200) ученые сообщают, что средний размер воздушных пузырьков не превышает 35 мкм, нередко и 20–25 мкм.

Обращает на себя внимание факт соизмеримости размеров кристаллов льда и воздушных пузырьков [2]. При этом информация об иницировании воздушными пузырьками образования кристаллов льда отсутствует.

В 2002 г. Chang и Hartel уделили особое внимание проблеме изучения состояния воздушной фазы, полученные результаты изложены в трех исследованиях [30–32]. В работе [30] наблюдали за состоянием воздушных пузырьков в мороженом, предварительно закаленном при температуре минус 28 °C, при хранении в течение 4 мес. при минус 15 °C. При температурах выше минус 18 °C наблюдали три основных механизма нестабильности воздушных пузырьков: диспропорционирование, слипание и дренаж. По мере снижения температуры хранения скорость изменения дисперсности воздушных пузырьков уменьшалась. Диспропорционирование воздушных пузырьков подавлялось введением эмульгаторов или стабилизаторов. При длительном хранении мороженого взаимосвязь между воздушными пузырьками приводила к активному образованию каналов. Однако метод оптической микроскопии невозможно применять для наблюдения за поведением каналов, поскольку истинная структура воздушных пузырьков в мороженом в этих условиях не сохраняется.

В исследовании [31] распределение воздушных пузырьков по размерам в мороженом определяли с помощью сканирующей электронной микроскопии и оптической световой микроскопии после фризирования при температуре минус 6 °C. Оба метода дали сопоставимые результаты. Средний размер воздушных пузырьков в мороженом при использовании оптической микроскопии составил 20,2 мкм, а при сканирующей микроскопии — 19,6 мкм. При последующем хранении при температуре минус 15 °C после закалывания средний размер этих структурных элементов увеличился до 40,0 мкм.

В работе [32] исследовали различные факторы, оказывающие влияние на дисперсность воздушной фазы мороженого. Установлено, что средний размер воздушных пузырьков снижается в процессе замораживания при одновременном насыщении смеси воздухом по мере повышения исходной вязкости смеси и при использовании стабилизатора. Содержание жира и эмульгатора не повлияло на размер воздушных пузырьков.

Dario и другие исследователи [33] с помощью низкотемпературной микроскопии изучали дисперсность воздушной фазы сорбета на выходе из фризера. Исследовано влияние температуры испарения охлаждающей жидкости и степени насыщения сорбета воздухом. При понижении температуры охлаждающей жидкости повышалась дисперсность воздушной фазы, однако увеличение взбитости продукта не оказало заметного влияния на этот показатель.

Влияние скорости вращения мешалки в устройстве периодического действия (мороженице) и состояния жировых частиц на средний диаметр воздушных пузырьков исследовал Masuda с коллегами [34]. Целью исследований являлось установление кинетики этих структурных элементов в процессе замораживания. При этом учитывали, что высокая скорость вращения мешалки предотвращает локальное замораживание и нежелательное затвердевание продукта в соответствии с критерием Рейнольдса. Установлена зависимость среднего размера воздушных пузырьков от скорости сдвига, обусловленной вращением мешалки. Повышение скорости сдвига приводило к плавному уменьшению размера пузырьков воздуха. Однако на более поздней стадии замораживания зафиксировано нежелательное увеличение размера пузырьков вследствие увеличения частоты их столкновений. Отмечено, что агрегация жировых шариков происходила сразу после начала замораживания водной фазы. Кроме того, увеличение скорости сдвига способствовало дестабилизации жира и, следовательно, повышению степени его агрегации, оцениваемой по распределению жировых шариков по размерам. При всех скоростях сдвига начальное увеличение скорости агрегации сопровождалось дальнейшим ее снижением, что может быть объяснено разрушением агрегатов. Исследователи сделали вывод о существенном влиянии скорости вращения мешалки на кинетику пузырьков воздуха и жировых шариков во время замораживания и необходимости учета этих процессов для определения технологических параметров, таких как время замораживания и скорость перемешивания. Такие данные необходимы при проектировании конструкции фризеров для производства мороженого. Хотя это исследование проводили с использованием оборудования емкостного типа, кинетика изменения размеров воздушных пузырьков и жировых шариков может быть применена при проектировании процесса с использованием оборудования непрерывного действия.

Eisner с другими исследователями [35] посвятили свою работу изучению способов повышения дисперсности воздушных пузырьков и влияния этого показателя на консистенцию мороженого. В частности, в качестве фактора повышения дисперсности воздушной фазы в промышленных условиях рассмотрено механическое воздействие на продукт на второй стадии фризирования после насыщения его воздухом на первой стадии. Дополнительное замораживание на второй стадии с достижением температуры не выше минус 12 °C привело к повышению нагрузки на продукт в связи с увеличением доли вымороженной воды, по мнению авторов, в 2–3 раза. По результатам исследований, максимальный средний диаметр воздушных пузырьков уменьшился с 52 до 19 мкм. Кроме воздушных пузырьков при повышенной механической нагрузке изменяется жировая фаза. Высокие усилия сдвига вызывают формирование активной сети агломерированных жировых шариков, стабилизирующих воздушную фазу. Эти структурные изменения оказывают значительное влияние на показатели качества мороженого, связанные с состоянием воздушной фазы, что подтверждается значениями термостатических характеристик.

VanWees с коллегами [36] обратили внимание на порок мороженого «усадка порции», обусловленный состоянием воздушной фазы при хранении. Несмотря на то, что усадка — это известный дефект замороженных десертов, его механизмы постоянно изучаются. Установленными причинами этого порока структуры являются низкое содержание белка и сухих веществ, излишнее насыщение продукта воздухом, условия хранения, включая колебания температуры и давления окружающей среды. Авторы предложили рассматривать усадку как процесс разрушения замороженной пены, обусловленный дестабилизацией диспергированной воздушной фазы. При этом рекомендуют учитывать состав и физические свойства поверхности раздела, а также кинетическую стабильность воздушных пузырьков в замороженной матрице. Кроме того, важно принимать во внимание влияние технологически функциональных ингредиентов и методы обработки, которые оптимизируют образование и стабилизацию замороженной пены.

Эти же авторы [37] определили зависимость дисперсности воздушной фазы от состояния кристаллов льда и жировых частиц. Установлено, что с увеличением степени насыщения замороженных продуктов воздухом размеры воздушных пузырьков и кристаллов

льда снижаются, а степень дестабилизации жира повышается. Авторы убедились во взаимном влиянии состояния воздушной, жировой и ледяной фаз на термо- и формоустойчивость готового продукта.

Ранее Sofjan с соавторами [38] пришли к такому же выводу при исследовании технологически значимых показателей качества мороженого со взбитостью 80, 100 и 120 %. Аналогичные показатели взбитости мороженого часто устанавливают в продукте так называемого эконом- и премиум-класса. При исследовании мороженого, фасованного в контейнеры, при хранении в условиях температуры минус 10 °C установлено, что средний размер воздушных пузырьков первоначально увеличивается во время замораживания, затем уменьшается на ранних стадиях хранения и увеличивается до больших размеров при более длительном (до 3 мес.) хранении. В готовом продукте размер воздушных пузырьков был меньше при более высокой взбитости. Авторы предположили, что это вызвано влиянием высоких напряжений сдвига во время производства. Мороженое с наименьшей взбитостью (80 %) было тверже, чем мороженое со взбитостью 120 %, но таяло быстрее. При исследовании состояния воздушной фазы на предметном столике микроскопа авторы пришли к выводу, что более низкая температура хранения (минус 20 °C) ограничивала подвижность и растворимость воздушных пузырьков в сыворотке (плазме), так что диспропорционирование было подавлено, происходила коалесценция воздушных пузырьков, находящихся в непосредственной близости. При высокой температуре хранения (минус 6 или минус 10 °C) диспропорционирование и коалесценция усиливались из-за более высокой подвижности незамороженной сывороточной фазы. Более высокая взбитость, по мнению авторов, приводила к увеличению стабильности воздушных пузырьков во время хранения.

Таким образом, согласно результатам исследований, установлено влияние процесса фризирования на дисперсность воздушной фазы, что сказывается на состоянии этого структурного элемента в процессе хранения. Исследования подтверждают целесообразность рассмотрения состояния воздушной фазы в совокупности с состоянием жировой фазы. Установлено, что с увеличением степени насыщения замороженных продуктов воздухом размеры воздушных пузырьков снижаются, а степень дестабилизации жира повышается. Однако снижение дисперсности воздушной фазы происходит не только в процессе хранения, но и на стадии выхода мороженого из фризера.

6. Исследование окислительной порчи липидов при хранении мороженого

6.1. Окислительная стабильность липидов в мороженом, обогащенном полиненасыщенными жирными кислотами

С точки зрения технологических аспектов производства и пищевой ценности мороженого предпочтение отдается применению жиросодержащих продуктов с различной степенью насыщенности триглицеридов. Для производства рационально использовать насыщенные жиры, а с позиций здорового питания — ненасыщенные жиры, характеризующиеся высокой способностью к окислению.

Проблема окисления липидов стала особенно актуальной в связи с развитием тенденции здорового питания, одним из направлений которого стало стремление к употреблению продуктов с ненасыщенными жирными кислотами. Ни с соавторами отмечает пользу ненасыщенных жирных кислот, отсутствие способности организма человека их синтезировать и чувствительность к окислению [39]. Продукты окисления жиров снижают качество (в связи с образованием посторонних привкусов и неприятных запахов) и биологическую ценность пищи (из-за потери незаменимых жирных кислот и окисления белков и витаминов). В связи с этим необходимы мониторинг процесса окисления жиров и контроль качества продукции в процессе хранения. При этом особое внимание уделяется методам исследования, используемым в пищевой промышленности.

Биологическая ценность полиненасыщенных жирных кислот, в частности омега-3, обусловлена положительным влиянием на организм человека и на его физическую активность [40]. Важным источником омега-3 кислот является льняное масло [41–43].

Влияние обогащения мороженого омега-3 жирной кислотой, в частности α-линоленовой кислотой льняного масла, вносимого в виде микрокапсул в количестве 3, 4 и 5 %, исследовал Gowda и др. [41]. Для нивелирования привкуса льняного масла использовали ароматизаторы (ваниль, сливочное виски и клубника). Данные показали, что количество свободных жирных кислот значительно увеличилось в течение первых 15 дней во всех образцах, а затем оставалось постоянным. Содержание перекиси и тиобарбитуровой кислоты повышалось в течение времени с 30-го по 45-й день;

затем снижалось с последующим постепенным увеличением к 120 дню. Профиль жирных кислот показал снижение содержания α -линоленовой кислоты в обогащенном мороженом на 18,74–21,38 % через 120 дней. В порции свежеприготовленного мороженого функциональной направленности массой 100 г было обеспечено около 45 % суточной нормы α -линоленовой кислоты (1,4 г в день). Содержание этой кислоты снизилось на 35,37–36,56 % в конце хранения, т.е. через 120 дней. Сделан вывод, что жирнокислотный состав мороженого был устойчив к окислению на протяжении всего периода хранения, и его можно было успешно обогащать льняным маслом в количестве до 4 % (по массе).

Согласно данным других исследователей, допустимый уровень применения льняного масла для замены молочного жира составляет 2,5 % [42]. Установлено, что добавление льняного масла не оказало влияния на физико-химические свойства мороженого. Однако оно повлияло на консистенцию (мороженое стало менее кремообразным). Газохроматографический анализ показал, что содержание жирных кислот при хранении несколько уменьшилось, что свидетельствует об изменениях, происходящих в жировой фазе продукта.

Льняное масло в качестве источника омега-3 кислот использовали в мороженом с дополнительным введением витамина Е и без него для частичной замены молочного жира (1,5, 2,5, 5,0 и 7,5 %) [43]. В двух сериях опытов установлено, что термоустойчивость мороженого снижалась при увеличении содержания льняного масла, а способность к насыщению воздухом и вязкость смеси возрастали. Отмечено, что содержание перекисей и свободных жирных кислот меньше в образцах с витамином Е.

Для обогащения мороженого в качестве источника омега-3 жирных кислот также использовано масло чиа [44]. Исследователи исходили из того, что семена чиа (*Salvia hispanica* L.) являются источником полиненасыщенных омега-3 жирных кислот, улучшающих работу сердца, печени и обладающих гипотензивной, противоаллергической и противодиабетической активностью. Концентрация омега-3 жирных кислот в масле чиа была повышена путем его фракционирования и получения легкоплавкой олеиновой фракции. В результате исследования определено влияние олеиновой фракции масла чиа в различных концентрациях на содержание омега-3 жирных кислот, окислительную стабильность и органолептические характеристики мороженого с заменой 5, 10, 15 и 20 % молочного жира. Образцы анализировали через 0, 30 и 60 дней хранения. Определяли профиль жирных кислот, общее содержание фенолов, общее количество флавоноидов, свободных жирных кислот, перекисное и анизидиновое числа и сенсорные характеристики образцов мороженого. Установлено, что концентрация α -линоленовой, эйкозапентаеновой, докозапентаеновой и докозагексаеновой кислот в экспериментальном образце составила 13,24, 0,58, 0,42 и 0,31 % соответственно, а активность 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила в отношении свободных радикалов — в 13 раз больше, чем в контрольном образце. После 60 дней хранения в образце 4 наблюдалось самое высокое содержание перекиси — 1,84 мэкв O_2 /кг, что значительно меньше допустимого предела — 10 мэкв O_2 /кг. Оценка вкуса через 30 дней хранения существенной разницы между образцами не показала. Таким образом, установлено, что дополнительное введение олеиновой фракции масла чиа повысило содержание омега-3 жирных кислот и улучшило антиоксидантные свойства мороженого.

Существует опыт применения в качестве источника омега жирных кислот рыбы, хотя исследователи понимали возможность сенсорного невосприятия такого рода десерта у потребителей [45]. С помощью компьютерных программ в качестве оптимального варианта было выбрано мороженое с содержанием 2,5 % рыбьего жира. Экспериментальный и контрольный образцы были стабильны, характеризовались схожими сенсорными показателями после изготовления и через 4 мес. хранения. Сенсорные характеристики и окислительная стабильность по показателям «содержание свободных жирных кислот» (FFA), «перекисное число», «анизидиновое число» и «общий уровень окисления жиров» (ТОТОХ) контрольного и обогащенного образцов были изучены в течение 4 мес. хранения при температуре минус 18 °С. Содержание перекисей (0,21–0,51 мэкв O_2 /кг), значение анизидинового числа (4,61–8,12) и ТОТОХ (5,14–8,75) в контрольных и обогащенных образцах, по мнению авторов, были в пределах допустимых уровней, указывающих на стабильность прототипов при хранении в мороженом виде. При этом значение анизидинового числа в 1,5–2 раза превышало уровень показателя в свежем жире (не более 3). Согласно результатам, исследователи сделали вывод, что пищевая ценность мороженого может быть повышена за счет обогащения рыбьим жиром, содержащим жирные кислоты группы омега-3, при условии контроля окислительной стабильности липидов.

Для предотвращения процесса окисления используют ингредиенты с антиоксидантными свойствами, в частности масло семян масличной моринги и ликопин [46–48].

В работе [46] исследовали возможность повышения стабильности жировой фазы к окислению в мороженом путем применения перэтерифицированного масла семян масличной моринги, известного стабильным состоянием липидов. Особенностью масла являлась высокая температура плавления (35,6 °С) при значительном количестве ненасыщенных жирных кислот. В мороженом с массовой долей жира 10 % часть жира заменяли перэтерифицированным маслом масличной моринги в количестве 10, 20 и 30 %. Содержание олеиновой кислоты увеличилось с 26,55 до 31,69, 36,94 и 42,15 % в соответствии с уровнем замены. Добавление в мороженое перэтерифицированного масла моринги ингибировало процесс автоокисления в течение 3 мес. хранения ($P < 0,05$). Потеря олеиновой и линолевой кислот в свежем и хранящемся в течение 3 мес. контроле и образце с заменой 20 % жира на масло моринги составила 26,55, 24,15, 26,39 % и 1,93, 1,24, 1,79 % соответственно. Перекисное число хранящегося в течение 3 мес. контроля и образца с максимальной заменой жира на масло моринги составило 1,12 и 0,39 мэкв O_2 /кг соответственно.

Стабильность жировой фазы к окислению может быть повышена при использовании сливочного масла с антиоксидантами. Использование в производстве сливочного масла ликопина — антиоксиданта каротиноидного происхождения — рассмотрено в работе [47]. Установлено, что количество перекисей и свободных жирных кислот в контрольных образцах по сравнению с продуктами, обогащенными ликопином, значительно выше. Авторы объясняют это тем, что ликопин как антиоксидант замедляет появление неприятного привкуса и изменение цвета сливочного масла и мороженого, поскольку он прерывает цепочку свободных радикалов, участвующих в автоокислении. Заметное отличие сенсорных показателей в образцах отмечено на 4-м месяце хранения.

Установлена антиоксидантная активность сока сахарного тростника [48]. В мороженое добавляли 20, 40 и 60 % сока сахарного тростника. Содержание сахарозы во всех вариантах составляло 13 %. Активность 2, 2-дифенил-1-пикрилгидразила (вещества, способного поглощать свободные радикалы) в образцах мороженого увеличивалась по сравнению с контролем в 2,9, 6,6 и 9,8 раза. Установлено, что добавление в мороженое сока сахарного тростника в количестве 20 и 40 % ингибировало окисление ненасыщенных жирных кислот в процессе хранения в течение 180 дней, не влияя на органолептические характеристики.

Известно исследование по использованию в качестве антиоксидантов и ароматизаторов в мороженом эфирных масел тимьяна, базилика и майорана. Их состав исследован методом газовой хроматографии, определена антиоксидантная активность [49]. Установлено, что эфирное масло базилика имеет самую высокую восстанавливающую способность, а эфирное масло майорана — более высокую антиоксидантную способность. Эфирное масло базилика показало значительное увеличение активности поглощения H_2O_2 по сравнению с другими протестированными эфирными маслами. Незначительные различия наблюдали в физико-химических свойствах мороженого с эфирными маслами по сравнению с контрольным образцом. Сделан вывод, что эфирные масла базилика, майорана и тимьяна обладают антиоксидантным действием и могут использоваться в качестве натуральных антиоксидантов и ароматизаторов.

Учитывая актуальность применения антиоксидантов в пищевой отрасли, большое внимание уделяется объективной оценке их эффективности. Frankel и Meyer [50], а также Li [51] с коллегами достоверно оценили ситуацию с исследованием активности антиоксидантов в пищевой отрасли. В работе [50] отметили, что активность антиоксидантов в продуктах питания и биологических системах зависит от множества факторов, в том числе от коллоидных свойств субстратов, условий и стадий окисления, а также от локализации антиоксидантов в различных фазах. Поэтому при тестировании природных антиоксидантов *in vitro* важно учитывать состав системы, тип окисляемого субстрата, способ ускорения окисления, методы оценки окисления и способы количественной оценки антиоксидантной активности. Эффективность антиоксидантов также определяется гетерогенностью и гетерофазной природой системы, типом липидного субстрата, включая его физико-химическое состояние и степень ненасыщенности, типами инициаторов, в частности переходных металлов, другими компонентами и их возможным взаимодействием. По этой причине не может быть быстрого способа определения антиоксидантной активности. Каждую оценку следует проводить при различных условиях окисления, используя несколько методов для количественного определения различных продуктов окисления.

Большинство природных антиоксидантов и фитохимикатов многофункциональны, что требует измерения более чем одного свойства, относящегося либо к пищевым продуктам, либо к биологическим системам. В связи с этим существует острая необходимость в стандартизации вопросов тестирования антиоксидантов. Для получения информации о химических изменениях, которая может быть напрямую связана с окислительной порчей продуктов питания и биологических систем, следует использовать несколько наиболее специфических методов. В работе [51] дополнительно отмечено, что для получения достоверных результатов следует применять несколько тест-систем. Важно на государственном уровне обеспечить научную основу для будущих исследований по скринингу антиоксидантов в продуктах питания и системах организма.

6.2. Изыскание достоверных методов исследования окислительной способности липидов в мороженом

Методы оценки окисления липидов подробно рассмотрены в обзоре [52]. В статье сравниваются методы, используемые для оценки окисления липидов и антиоксидантной способности пищевых продуктов. Разработанные методы оценки окисления липидов основаны на прямом или косвенном измерении продуцируемых веществ первичного или вторичного окисления. Перекисные показатели и методы конъюгированного диена определяют первичные продукты окисления липидов и обычно используются для растительных масел и продуктов с высоким содержанием жира. Вещества, реагирующие с 2-тиобарбитуровой кислотой, и хроматографические методы используются для определения вторичных продуктов окисления и подходят для мяса и мясopодуктов. Флуорометрический и сенсорный анализы являются косвенными методами. Антиоксидантная способность добавок определяется косвенно с использованием методов оценки окисления липидов, упомянутых ранее, или непосредственно на основе активности антиоксидантных соединений по предотвращению образования свободных радикалов. В каждом методе оценки окисления липидов и антиоксидантной способности применяются разные подходы, и один метод не может быть использован для всех пищевых продуктов. Следовательно, выбор надлежащих методов для конкретных пищевых продуктов важен для точной оценки окисления липидов или антиоксидантной способности.

Необходимость нормирования допустимой степени окисления жира в мягком и закаленном мороженом обоснована в работе [53]. Авторы пользовались спектрофотометрическим способом, позволяющим с помощью тиобарбитуровой кислоты определять количество малонового диальдегида. В результате химической реакции между этими веществами образуется аддукт розового цвета. Его количество определяют при длине волны 535 нм. В этом исследовании сообщается о предполагаемом расходе малонового диальдегида 4,251 мкг/кг. Несмотря на противоречивые литературные данные о целесообразности применения этого метода, он нашел наиболее широкое распространение.

Практика исследования малонового альдегида отражена и в более ранних работах Окафор и его коллег [54]. Они обнаружили малоновый диальдегид во всех исследованных образцах мороженого в количестве от $1,79 \pm 0,13$ до $9,11 \pm 2,67$ мкг/мл.

Однако Papastergiadis с коллегами [55] высказали мнение о неприменимости метода, предполагающего наличие малонового альдегида, для количественной оценки окислительной порчи жира в мороженом. В этом исследовании количество аддукта, получаемого при взаимодействии извлеченного из продуктов малонового альдегида и тиобарбитуровой кислоты, определяли спектрофотометрически при длине волны 532 нм. Однако параллельное исследование аддукта методом высокоскоростной жидкостной хроматографии в сочетании с флуоресцентным детектированием показало, что спектрофотометрический метод показывает завышенные результаты по содержанию малонового альдегида. Авторы высказали мнение, что причиной завышенных значений является влияние не только вторичных, но и других продуктов окисления липидов.

Метод ускоренного определения перекисей в маслах и жиродержащих продуктах изложен в статье [56]. Этот метод позволяет быстро оценить перекисное окисление липидов колориметрическим способом без нагревания и сложных инструментальных процедур. При длине волны 500 нм можно установить содержание перекисей, синтезирующихся при окислении липидов, определяя количество пигмента, образующегося под действием пиридоксина из 5-сульфосалициловой кислоты и Fe^{3+} (образуется из Fe^{2+} при наличии перекисей). Реактив содержал 70 % (по объему) Fe^{2+} (4 ммоль/л), 5-суль-

фосалициловой кислоты (40 ммоль/л) и пиридоксина (18 ммоль/л). Предел количественного определения Fe^{3+} составляет 0,087 ммоль/л с приемлемой воспроизводимостью. Предложенный ускоренный метод позволил получить результаты, характеризуемые линейной корреляцией как с традиционным методом с использованием тиобарбитуровой кислоты ($R^2 = 0,9999$), так и с методом феррицианидного тиоцианата ($R^2 = 0,9675$).

Жирнокислотный состав молочного жира непостоянен и зависит от ряда факторов. Gonzalez и др. [57] уделили внимание изменению значения перекисного числа в процессе хранения мороженого с модифицированным составом жировой фазы с доминированием ненасыщенных жирных кислот — линолевой и олеиновой. Важно, что три образца молочного жира (высокоолеиновый, высоколинолевый и контрольный) получены путем модификации рационов питания коров голштинской породы. Мороженое и сливочное масло получены из молочного жира от коров в каждой диетической группе. Изначально все жиродержащее молочное сырье характеризовалось значением перекисного числа, типичного для свежего молочного жира. В процессе хранения мороженого значение перекисного числа варьировало в диапазоне от 2,91 до 4,12 мэкв/кг. Однако авторы предостерегают, что низкое содержание перекиси, особенно после нескольких месяцев хранения, не означает, что окисления не произошло. Количество перекисей увеличилось ($P > 0,05$) после 2 мес. хранения продукта. На начальных этапах их количество увеличилось медленно, но в конце индукционного периода концентрация перекиси быстро возрастала, а затем снижалась. Такую динамику наблюдали при измерении содержания перекиси на поздних стадиях хранения (от 3 до 9 мес.) для всех образцов. Наибольшее значение перекисного числа достигнуто в образце с доминированием линолевой жирной кислоты (> 15 мэкв/кг масла). По мнению некоторых авторов, содержание перекиси в свежих жирах должно составлять менее 1 мэкв/кг масла. При этом уровне в молочном жире не ощущается постороннего привкуса. После очистки и хранения в маслах и жирах допустимо содержание перекиси 10 мэкв/кг масла до появления неприятных привкусов. Пороговое значение содержания перекиси, соответствующее появлению неприятного привкуса, составляет от 20 до 50 мэкв/кг масла. Согласно данным Международной федерации молочных продуктов, стандартное содержание перекиси в молочном жире составляет 0,2 мэкв O_2 /кг жира. Авторами отмечено, что изменение степени ненасыщенности молочного жира может повлиять на характеристики плавления и скорость окисления, что приведет к проблемам с качеством молочных продуктов.

Shiota и др. [58] исследовали фотоокисление молочного жира в количестве 14,25 % в мороженом, приготовленном из 7 источников жира различного состава. Проводили сенсорную оценку на наличие окисленного привкуса и мониторинг образования гидропероксида. Установлен широкий диапазон окислительной устойчивости к воздействию света, а вкусовые ощущения были связаны с содержанием перекиси (коэффициент корреляции 0,795). На фотоокислительную стабильность жира мороженого в основном повлияли содержание рибофлавина и восприимчивость масла к фотоокислению. Вклад этих факторов в соответствии с моделью множественной регрессии составил 53,7 и 17,6 % соответственно. Фотоокислительная стабильность масляной фракции повышалась с увеличением соотношения гомологов токоферола γ -токоферола/ α -токоферола (коэффициент корреляции 0,846). Кроме того, на фотоокислительную стабильность мороженого влияло количество свободного жира.

В работе [59] приводятся данные по жирнокислотному составу и способности к окислению жира в мороженом с содержанием жира 13 %, изготовленном из молока коров и буйволиц. Установлено, что содержание триглицеридов от C_{26} до C_{36} было значительно выше в мороженом из молока буйволиц, чем в мороженом из коровьего молока. Содержание ненасыщенных жирных кислот в образцах мороженого из коровьего и буйволиного молока составило 24,4 и 29,9 % соответственно. Общая антиоксидантная способность мороженого из молока буйволиц была на 18 % выше, чем в мороженом из коровьего молока. Возможно, это связано с более высоким содержанием витаминов А и Е в молоке буйволиц. Мороженое из молока буйволиц характеризовалось более низким содержанием перекиси и более высокой окислительной стабильностью по сравнению с коровьим молоком. Индукционный период жира мороженого из коровьего и буйволиного молока составил 8,55 и 10,79 ч без каких-либо различий во вкусовых свойствах обоих видов мороженого.

В работе [60] исследовали влияние легкоплавких фракций молочного жира на его окислительную стабильность в мороженом. Сливки фракционировали при трех различных температурах (25, 15 и 10 °C).

Фракции по отдельности добавляли в мороженое, в качестве контроля использовали мороженое с немодифицированным молочным жиром. Мороженое хранили при температуре минус 18 °C в течение 6 мес. и отбирали пробы каждые 30 дней. Фракционирование вызывало значительные изменения в жирнокислотном составе всех фракций. В легкоплавких фракциях была повышена концентрация короткоцепочечных и длинноцепочечных ненасыщенных жирных кислот. Перекисное число при использовании фракции молочного жира, выделенной при 10 °C, увеличилось с 0,23 до 3,95 мэкв/кг, анизидиновое число — с 3,87 до 8,04. Следует отметить, что в этом исследовании использовали молочный жир из сырья длительного хранения, поскольку значение анизидинового числа было более 3. Но все же авторы сделали вывод о том, что с учетом результатов органолептической оценки в состав мороженого можно добавлять молочный жир с низкой температурой плавления, чтобы повысить его пищевую ценность при условии хранения продукта не более 2 мес. при температуре не выше минус 18 °C.

Методы определения жирнокислотного состава мороженого постоянно совершенствуются. В статье [61] предложено использовать разработанный исследователями метод определения бутиловых эфиров жирных кислот, при котором извлеченные свободные жирные кислоты преобразуются в бутиловые эфиры перед газовой хроматографией с плазменно-ионизационным детектированием. Метод всесторонне протестирован для определения линейности (20–700 мг/л; $R^2 > 0,9964$), пределов обнаружения (5–8 мг/л), пределов количественного определения (15–20 мг/л), точности (1,6–5,4% относительной погрешности), межсуточной воспроизводимости (4,4–5,3% относительного стандартного отклонения) и внутрисуточной воспроизводимости (0,9–5,6% относительного стандартного отклонения) для каждой отдельной свободной жирной кислоты. Всего проанализировано 17 образцов молочных продуктов, в том числе мороженого, различающихся по составу, содержанию жира и степени липолиза. Этот метод сравнили с методом прямого впрыскивания в колонку и методом метиловых эфиров жирных кислот. Выявлены преимущества предложенного метода, в частности более высокая точность определения содержания короткоцепочечных свободных жирных кислот в связи с отсутствием поглощения их в колонке или разрушением.

Метод определения метиловых эфиров для определения подлинности и содержания молочного жира используется и в России, в частности в ГОСТ 31663-2012², [62]. Кроме определения свободных жирных кислот в молочной продукции важно проводить количественную оценку содержания свободного жира. Его наличие может быть нежелательным или необходимым в определенных количествах, как в мороженом.

Этой проблеме было уделено внимание в статье [63], посвященной разработке нового метода определения свободного жира в эмульсиях, основанного на способности жирорастворимого красителя окрашивать системы «вода в масле». По величине поглощения света определяли изменение концентрации красителя, что позволило рассчитать количество неэмульгированного жира. Перед использованием краситель вводили в кукурузное масло. Отсутствие вероятности проникновения красителя в жировую фазу эмульсии «масло в воде» определяли на модельных образцах, в которых жировая фаза была стабилизирована поверхностно-активными веществами. С помощью этого метода количественно оценена дестабилизация молочного жира в мороженом после замораживания. Содержание свободного жира в мороженом особенно важно учитывать при хранении в виду его биодоступности.

² «Масла растительные и жиры животные. Определение методом газовой хроматографии массовой доли метиловых эфиров жирных кислот». М.: Стандартинформ, 2019. — 8 с.

В последние годы возрастает интерес к ускоренным методам определения окислительной стабильности жировой фазы в пищевой продукции [64,65], в России разработаны ГОСТ 31758-2012³ и ГОСТ 34815-2021⁴.

Tsao с коллегами [64] с помощью OXITEST провели анализ окислительной стабильности жира 10 образцов масла, выделенного прессом из семян масличных культур. Образцы масла в количестве 5 г подвергали воздействию кислорода под давлением 800 кПа. Реакция автоокисления масел в системе ускоренного тестирования следовала кинетике Аррениуса нулевого порядка ($R^2 > 0,99$). Срок годности отжатых масел при температуре 25 °C оценен путем экстраполяции в диапазоне 105–1089 дней. Полученные сроки годности значительно коррелировали со значениями логарифмического периода индукции ($r > 0,81$, $p < 0,05$) и с содержанием ненасыщенных жирных кислот ($r < \text{минус } 0,69$, $p < 0,05$), но не со значениями йодного и кислотного чисел или точкой дымления. Диаграммы рассеяния между сроками годности и содержанием ненасыщенных жирных кислот предполагают, что исследуемые масла можно сгруппировать по двум кривым линейной регрессии ($r > 0,98$, $p < 0,05$). Авторами разработаны прогностические уравнения с использованием множественной линейной регрессии с предикторными переменными «содержание ненасыщенных жирных кислот» и потенциально влияющим фактором — содержанием токоферола ($r > 0,88$, $p < 0,05$). Результаты исследований этих авторов показали корреляцию содержания ненасыщенных жирных кислот со сроками годности масел семян по оценке OXITEST. По результатам исследований, сделан вывод о целесообразности применения полученных уравнений для прогнозирования срока годности масел, выделенных прессованием и хранящихся в темных условиях, на основе профиля жирных кислот.

7. Выводы

При необходимости длительного хранения мороженого и замороженных десертов следует контролировать состояние и дисперсность кристаллов льда и воздушной фазы, наличие продуктов первичного и вторичного окисления. Принимая во внимание, что оценка сроков годности мороженого требует длительного времени, исследователи считают важной задачей разработку прогностических методов их установления, а также достоверных методов исследования показателей качества, определяющих хранимостепособность готового продукта. Для исследования структуры мороженого целесообразно применять методы неразрушающего контроля, в частности рамановскую спектроскопию, синхротронную рентгеновскую томографию и криосканирующую электронную микроскопию. Особенно важно использование методов неразрушающего контроля для изучения состояния воздушной фазы, характеризующейся наибольшей изменчивостью в процессе хранения. Получение достоверных знаний о состоянии воздушной фазы позволило развить теоретические аспекты взаимовлияния ледяной и воздушной фаз в мороженом. Важным фактором сохранения показателей качества мороженого является создание условий его хранения с достижением эффекта стеклования. Требуют совершенствования методы исследования окислительных процессов при хранении мороженого, в частности прогностические методы устойчивости к окислению жира. Необходимо создание банка данных по жирнокислотному составу мороженого различного периода хранения в связи с появившимися данными по изменению содержания жирных кислот (масляной, олеиновой и линолевой) в процессе хранения.

³ ГОСТ 34815-2021 «Продукты пищевые. Ускоренный тест на окисление с использованием окислительного испытательного реактора». М.: Российский институт стандартизации, 2022. — 12 с.

⁴ ГОСТ 31758-2012 (ISO 6886:2006) «Жиры и масла животные и растительные. Определение устойчивости к окислению (ускоренное испытание на окисление)». М.: Стандартинформ, 2019. — 12 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Goff, H. D. Hartel, R.W., Rankin, S.A. (2025). *Ice Cream*. Springer Cham, 2025. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-77872-8>
- Творогова, А. А. (2021). Мороженое в России и СССР: Теория. Практика. Развитие технологий. СПб.: ИД «Профессия», 2021. [Tvorogova, A. A. (2021). *Ice cream in Russia and the USSR: Theory. Practice. Development of technologies*. St. Petersburg: Publishing house "Profession", 2021. (In Russian)]
- IIR (2006). *Recommendations for the Processing and Handling of Frozen Foods*. International Institute of Refrigeration. Paris, France: IIR, 2006.
- Steele, R. (2004). *Understanding and Measuring the Shelf-Life of Food*. Woodhead Publishing, 2004.
- McKenna, B. M. (2003). *Texture in Food: Volume 1: Semi-Solid Foods*. CRC Press, 2003.
- Sitnikova, P. B., Tvorogova, A. A. (2019). Physical changes in the structure of ice cream and frozen fruit desserts during storage. *Food Systems*, 2(2), 31–35. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-2-31-35>
- Tvorogova, A. A., Kazakova, N. V., Shobanova, T. V., Belozеров, G. A. (August 24–30, 2019). *Control of the process of structure formation of "premium" class ice cream using monostabilizers*. 25th IIR international congress of refrigeration "Refrigeration science and technology", Montreal, Quebec, Canada, 2019.
- Park, J.-M., Koh, J.-H., Kim, J.-M. (2018). Predicting shelf-life of ice cream by accelerated conditions. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 38(6), 1216–1225. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2018.e55>
- Buyck, J. R., Baer, R. J., Choi, J. (2011). Effect of storage temperature on quality of light and full-fat ice cream. *Journal of Dairy Science*, 94(5), 2213–2219. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3897>

10. Ситникова, П. Б., Творогова, А. А. (2019). Практическое применение эффекта стеклования при хранении замороженных сахаросодержащих продуктов: аналитический обзор. *Холодильная техника*, 108(2), 41–46. [Sitnikova, P. B., Tvorogova, A. A. (2019). Practical use of the effect of glass transition during storage of frozen sugar-containing products: An analytical review. *Refrigeration Technology*, 108(2), 41–46. (In Russian)]
11. Roos, Y. H. (2021). Glass transition and re-crystallization phenomena of frozen materials and their effect on frozen food quality. *Foods*, 10(2), Article 447. <https://doi.org/10.3390/foods10020447>
12. Mahato, S. Z., Zhu, Z., Sun, D.-W. (2019). Glass transitions as affected by food compositions and by conventional and novel freezing technologies: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 94, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.09.010>
13. Muzammil, H. S., Junaid, M., Sameen, A., Syed, Q. A., Shukat, R., Aadil, R. M. (2022). Assessment of oligofructose and glycerol supplementation on glass transition temperature and quality of frozen yogurt. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11), Article e16747. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16947>
14. Zhao, J.-H., Kumar, P. K., Sablani, S. S. (2022). Glass transitions in frozen systems as influenced by molecular weight of food components. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(6), 4683–4715. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13034>
15. Zhang, W., Ma, J., Sun, D.-W. (2021). Raman spectroscopic techniques for detecting structure and quality of frozen foods: Principles and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(16), 2623–2639. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1828814>
16. Юрова, Е. Ю., Кобзева, Т. В., Фильчакова, С. А. (2021). Особенности разработки экспресс-методов определения сроков годности функциональных продуктов на молочной основе длительного хранения. *Пищевая промышленность*, 3, 36–39. [Yurova, E. Yu., Kobzeva, T. V., Filchakova, S. A. (2021). The peculiarity of the development of express methods for determining the shelf life of functional milk-based products for long-term storage. *Food Industry*, 3, 36–39. (In Russian)] <https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-5-0026>
17. Mullin, J. W. (1993). *Crystallization*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
18. Белозеров, Г. А., Творогова, А. А., Корешков, В. Н., Стефановский, В. М., Хохлова, Л. М., Гаврилычев, В. С. (2016). Влияние циклических колебаний температуры на дисперсность кристаллов льда в мороженом при хранении. *Холодильная техника*, 105(5), 46–49. [Belozеров, G. A., Tvorogova, A. A., Koreshkov, V. N., Stefanovsky, V. M., Khokhlova, L. M., Gavrilchev, V. S. (2016). An effect of cyclic temperature fluctuations on dispersion of ice crystals in ice cream during storage. *Refrigeration Technology*, 105(5), 46–49. (In Russian)] <https://doi.org/10.17816/RF99101>
19. Mo, J., Groot, R. D., McCartney, G., Guo, E., Bent, J., van Dalen, G. et al (2019). Ice crystal coarsening in ice cream during cooling: A comparison of theory and experiment. *Crystals*, 9(6), Article 321. <https://doi.org/10.3390/cryst9060321>
20. Pinzer, B. R., Medebach, A., Limbach H. J., Dubois, C., Stamparoni, M., Schneebeli, M. (2012). 3D-characterization of three-phase systems using X-ray tomography: Tracking the microstructural evolution in ice cream. *Soft Matter*, 8(17), 4584–4594. <https://doi.org/10.1039/C2SM00054B>
21. Sharqawy, M. H., Goff, H. D. (2022). Effect of temperature variation on ice cream recrystallization during freezer defrost cycles. *Journal of Food Engineering*, 335, Article 111188. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111188>
22. Mo, J., Guo, E., McCartney, D. G., Eastwood, D. S., Bent, J., Van Dalen, G. et al (2018). Time-resolved tomographic quantification of the microstructural evolution of ice cream. *Materials*, 11(10), Article 2031. <https://doi.org/10.3390/ma11102031>
23. Jia, G., Chen, Y., Sun, A., Orlin, V. (2016). Control of ice crystal nucleation and growth during the food freezing process. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(3), 2433–2454. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12950>
24. Giudici, P., Baiano, A., Chiari, P., De Vero, L., Ghanbarzadeh, B., Falcone, P. M. (2021). Modeling of freezing process in the batch production of ice. *Foods*, 10(2), Article 334. <https://doi.org/10.3390/foods10020334>
25. Bahram-Parvar, M. (2015). A review of modern instrumental techniques for measurements of ice cream characteristics. *Food Chemistry*, 188, 625–631. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.017>
26. Rockett, P., Karagadde, S., Guo, E., Bent, J., Hazekamp, J., Kingsley, M. et al. (June 21–26, 2015). A 4-D dataset for validation of crystal growth in a complex three-phase material, ice cream. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, MCWASP XIV: International Conference on Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes. Awaji island, Hyogo, Japan, 2015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/84/1/012076>
27. Guo, E., Zeng, G., Kazantsev, D., Rockett, P., Bent, J., Kirkland, M. et al. (2017). Synchrotron X-ray tomographic quantification of microstructural evolution in ice cream — a multi-phase soft solid. *RSC Advances*, 7(25), 15561–15573. <https://doi.org/10.1039/C7RA00642J>
28. Masselot, V., Bosc, V., Benkhelifa, H. (2021). Analyzing the microstructure of a fresh sorbet with X-ray micro-computed tomography: Sampling, acquisition, and image processing. *Journal of Food Engineering*, 292, Article 110347. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110347>
29. Olakanmia, S., Karunakaran, C., Jayas, D. (2022). Applications of X-ray micro-computed tomography and small-angle X-ray scattering techniques in food systems: A concise review. *Journal of Food Engineering*, 342, Article 111355. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111355>
30. Chang, Y., Hartel, R. W. (2002). Stability of air cells in ice cream during hardening and storage. *Journal of Food Engineering*, 55(1), 59–70. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00242-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00242-4)
31. Chang, Y., Hartel, R. W. (2002). Measurement of air cell distributions in dairy foams. *International Dairy Journal*, 12(5), 463–472. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(01\)00171-6](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(01)00171-6)
32. Chang, Y., Hartel, R. W. (2002). Development of air cells in a batch ice cream freezer. *Journal of Food Engineering*, 55(1), 71–78. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00243-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00243-6)
33. Parra, O. D. H., Ndoye, F.-T., Benkhelifa, H., Flick, D., Alvarez, G. (2018). Effect of process parameters on ice crystals and air bubbles size distributions of sorbets in a scraped surface heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 92, 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.02.013>
34. Masuda, H., Sawano, M., Iyota, H., Shimoyamada, M. (2023). Kinetics of size change in air bubble and fat globule during ice cream freezing process. *Journal of Food Process Engineering*, 46, Article e14420. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14420>
35. Eisner, M., Wildmoser, H., Windhab, E. J. (2005). Air cell microstructuring in a high viscous ice cream matrix. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 263(1–3), 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.12.017>
36. VanWees, S. R., Rankin, S. A., Hartel, R. W. (2022). Shrinkage in frozen desserts. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(1), 780–808. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12888>
37. VanWees, S. R., Rankin, S. A., Hartel, R. W. (2020). The microstructural, melting, rheological, and sensorial properties of high-overrun frozen desserts. *Texture Studies*, 51(1), 92–100. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12461>
38. Sofjan, R. P., Hartel, R. W. (2004). Effects of overrun on structural and physical characteristics of ice cream. *International Dairy Journal*, 14(3), 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2003.08.005>
39. Hu, M., Jacobsen, C. (2016). *Oxidative Stability and Shelf Life of Foods Containing Oils and Fats*. Elsevier, 2016.
40. Tiryaki-Sönmez, G., Schoenfeld, B., Vatansever-Ozen, S. (2011). Omega-3 fatty acids and exercise: A review of their combined effects on body composition and physical performance. *Biomedical Human Kinetics*, 3, 23–29. <https://doi.org/10.2478/v10101-011-0007-4>
41. Gowda, A., Sharma, V., Goyal, A., Singh, A. K., Arora, S. (2018). Process optimization and oxidative stability of omega-3 ice cream fortified with flaxseed oil microcapsules. *Journal of Food Science and Technology*, 55(5), 1705–1715. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3083-4>
42. Lim, C. W., Norziah, M. H., Lu, H. F. (2010). Effect of flaxseed oil towards physicochemical and sensory characteristic of reduced fat ice creams and its stability in ice creams upon storage. *International Food Research Journal*, 17, 393–403.
43. Aladwani, Y., Badawi, S. K. (2018). Effect of using flaxseed oil source of omega-3 acids as a partial replacement for milk fat in the chemical and physical properties in ice cream. *Mesopotamia Journal of Agriculture*, 46(1), 213–224. <https://doi.org/10.33899/magri/2018/161432>
44. Ullah, R., Nadeem, M., Imran, M. (2017). Omega-3 fatty acids and oxidative stability of ice cream supplemented with olein fraction of chia (*Salvia hispanica* L.) oil. *Lipids in Health and Disease*, 16(1), Article 34. <https://doi.org/10.1186/S12944-017-420-y>
45. Shaviklo, A. R., Seyed-Nejad, S. R., Mahdavi Adeli, H. R. (2020). Determination of optimum level of omega 3 fish oil plus vitamin E and their effects on oxidative and sensory shelf stability in a traditional Persian ice cream formulation using a computer-aided statistical programme. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 19(1), 151–166. <https://doi.org/10.22092/IJFS/2019/119720>
46. Nadeem, M., Ullah, R., Ullah, A. (2016). Improvement of the physical and oxidative stability characteristics of ice cream through interesterified moringa oleifer oil. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research Series B: Biological Sciences*, 59(1), 38–43. <https://doi.org/10.52763/PJSIR.BIOL.SCI.59.1.2016.38.43>
47. Kaur, D., Wani, A. A., Singh, D. P., Sogi, D. (2011). Shelf life enhancement of butter, ice-cream, and mayonnaise by addition of lycopene. *International Journal of Food Properties*, 14(6), 1217–1231. <https://doi.org/10.1080/10942911003637335>
48. Ullah, R., Nadeem, M., Ayaz, M., Tayyab, M., Imran, M., Sajid, R. (2015). Antioxidant characteristics of ice cream supplemented with sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) juice. *Food Science and Biotechnology*, 24(4), 1227–1232. <https://doi.org/10.1007/s10068-015-0157-1>
49. Khaled, M. A., Ashoush, I. S., El Batawy, O. (2013). Comparative evaluation of three essential oils as functional antioxidants and natural flavoring agents in ice cream. *World Applied Sciences Journal*, 23(2), 159–166. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013>
50. Frankel, E. N., Meyer, A. S. (2000). The problems of using one-dimensional methods to evaluate multifunctional food and biological antioxidants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(13), 1925–1941. [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(200010\)80:13<1925::aid-jsfa714>3.0.co;2-4](https://doi.org/10.1002/1097-0010(200010)80:13<1925::aid-jsfa714>3.0.co;2-4)
51. Li, Y., Si, D., Sabier, M., Liu, J., Si, J., Zhang, X. (2023). Guideline for screening antioxidant against lipid-peroxidation by spectrophotomete. *Efood*, 4(2), Article e80. <https://doi.org/10.1002/efd2.80>
52. Abeyratne, E. D. N. S., Nam, K., Ahn, D. U. (2021). Analytical methods for lipid oxidation and antioxidant capacity in food systems. *Antioxidants*, 10(10), Article 1587. <https://doi.org/10.3390/antiox10101587>
53. Sadighara, P., Shahbazi, R., Zirak, M. R., Mohamadi, S., Karami, L., Zomorodian, N. et al. (2022). The content and dietary exposure of Malondialdehyde in industrial and traditional ice cream fats. *Journal of Food Safety and Hygiene*, 8(1), 25–31. <https://doi.org/10.18502/jfsh.v8i1.9958>
54. Okafor, P. N., Nwosu, O., Chukwu, J., Agbayi, J., Maduagwu, E. N. (2007). Occurrence of malondialdehyde and N-nitrosamines and their precursors in some Nigerian ice creams, yogurts, meat and fish species. *African Journal of Biochemistry Research*, 1, 1–5. <https://doi.org/10.5897/AJBR.9000177>
55. Papastergiadis, A., Mubiru, E., Van Langenhove H., De Meulenaer, B. (2012). Meulenaer malondialdehyde measurement in oxidized foods: Evaluation of the spectrophotometric thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) test in various foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(38), 9589–9594. <https://doi.org/10.1021/jf302451c>
56. Chen, J., Cai, D., Zhang, Y. (2016). Rapid determination of lipid peroxidation using a novel pyridoxamine-participating ferrous oxidation-sulfosalicylic acid spectrophotometric method. *Food Chemistry*, 211, 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.106>
57. Gonzalez, S., Duncan, S. E., O'Keefe, S. F., Sumner, S. S., Herbein, J. H. (2003). Oxidation and textural characteristics of butter and ice cream with modified fatty acid profiles. *Journal of Dairy Science*, 86(1), 70–77. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73585-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73585-1)

58. Shiota, M., Ikeda, N., Konishi, H., Yoshioka, T. (2006). Photooxidative stability of ice cream prepared from milk fat. *Food Science*, 67(3), 1200–1207. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb09477.x>
59. Khan, I. T., Nadeem, M., Ullah, R., Imran, M. (2022). Triglyceride, fatty acid profile, antioxidant characteristics, vitamins, lipid oxidation and induction period of ice cream produced from cow and Buffalo Milk. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(1), Article 17278. <https://doi.org/10.1111/jfpp.17278>
60. Nadeem, M., Situ, C., Abdullah, M. (2015). Effect of olein fractions of milk fat on oxidative stability of ice cream. *International Journal of Food Properties*, 18(4), 735–745. <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.814666>
61. Mannion, D., Furey, A., Kieran, N., Kilcawley, K. N. (2018). Development and validation of a novel free fatty acid butyl ester gas chromatography method for the determination of free fatty acids in dairy products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(1), 499–506. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05462>
62. Жижин, Н. А. (2020). Применение метода «быстрой» газовой хроматографии для регулярного анализа жирных кислот в молоке и молочных продуктах. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 82(1), 164–168. [Zhizhin, N. A. (2020). Application of the “fast” gas chromatography method for routine analysis of fatty acids in milk and dairy products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 82(1), 164–168. (In Russian)] <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-1-164-168>
63. Palanuwech, J., Potineni, R., Roberts, R. F., Coupland, J. N. (2003). A method to determine free fat in emulsions. *Food Hydrocolloids*, 17(1), 55–62. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(02\)00035-8](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(02)00035-8)
64. Tsao, C.-H., Chang, C.-W., Ho, Y.-C., Chuang, Y.-K., Lee, W.-J. (2021). Application of OXITEST for prediction of shelf-lives of selected cold-pressed oils. *Frontiers in Nutrition*, 8, Article 763524. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.763524>
65. Гурьева К. Б., Солдатова С. Ю. (2023). Исследования периода индукции мясных консервов на приборе OXITEST. *Бюллетень науки и практики*, 9(9), 205–211. [Guryeva K. B., Soldatova S. Yu. (2023). Research of the induction period of canned meat on the OXITEST device. *Bulletin of Science and Practice*, 9(9), 205–211. (In Russian)] <https://doi.org/10.33619/2414-2948/94/22>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Творогова Антонина Анатольевна — доктор технических наук, доцент, заместитель директора, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 E-mail: a.tvorogova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7293-9162 * автор для контактов	Antonina A. Tvorogova , Doctor of Technical Sciences, Docent, Deputy Director, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostykov str., Moscow, 127422, Russia E-mail: a.tvorogova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7293-9162 * corresponding author
Казакова Наталия Владимировна — кандидат технических наук, ведущий инженер, лаборатория технологии мороженого, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 E-mail: n.kazakova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2963-6294	Natalia V. Kazakova , Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer, Laboratory of Ice Cream Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostyakova str., 127422, Moscow, Russia E-mail: n.kazakova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2963-6294
Ландиговская Анна Валентиновна — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория технологии мороженого, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 E-mail: a.landihovskaya@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5881-2309	Anna V. Landikhovskaya , Candidate of technical sciences, Researcher, Laboratory of Ice Cream Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostykov str., Moscow, 127422, Russia E-mail: a.landihovskaya@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5881-2309
Ситникова Полина Борисовна — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория технологии мороженого, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 E-mail: p.sitnikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4098-9146	Polina B. Sitnikova , Candidate of Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Ice Cream Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostyakova str., 127422, Moscow, Russia E-mail: p.sitnikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4098-9146
Ермоchenков Дмитрий Максимович — инженер, лаборатория технологии мороженого, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 E-mail: d.ermochenkova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2668-3123	Dmitriy M. Ermochenkov , Engineer, Laboratory of Ice Cream Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostykov str., Moscow, 127422, Russia E-mail: d.ermochenkova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2668-3123
Ананьева Наталья Валентиновна — кандидат технических наук, инженер, отдел научно-технической информации, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 E-mail: moloprom@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6113-9207	Natalia V. Ananyeva , Candidate of Technical Sciences, Engineer, Department of Scientific and Technical Information, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostykov str., Moscow, 127422, Russia E-mail: moloprom@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6113-9207
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest