На правах рукописи

Ландиховская Анна Валентиновна

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МОЛОЧНОГО МОРОЖЕНОГО С ФРУКТОЗОЙ И ТРЕГАЛОЗОЙ

05.18.04 – технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодильных производств

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена во Всероссийском научно-исследовательском институте холодильной промышленности – филиал Федерального научного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова»

Научный руководитель: доктор технических наук
Творогова Антонина Анатольевна

Официальные оппоненты: **Семёнов Геннадий Вячеславович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств», лаборатория композитных материалов Центра коллективного пользования "Перспективные упаковочные решения и технологии рециклинга", старший научный сотрудник

Агаркова Евгения Юрьевна
кандидат технических наук,
ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности», лаборатория технологии молочно-белковых концентратов, пищевых добавок и производства продуктов на их основе, заведующая лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»

Защита состоится «31» мая 2022 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 006.021.02 при ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН по адресу:
109316, г. Москва, ул. Талалихина, 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН www.vniimp.ru
Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник А. Н. Захаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года предусматривает меры по повышению качества жизни населения за счет питания, способствующего профилактике заболеваний и увеличению продолжительности жизни. К таким мерам относятся ограничения калорийности дневного рациона питания и потребления продуктов с высоким гликемическим индексом, в том числе содержащих сахарозу, для лиц, поддерживающих здоровый образ жизни, или с диабетом второго типа и ожирением.

В настоящее время наибольшей популярностью пользуется мороженое с массовыми долями жира 12-15 % и сахарозы не менее 14 %, поскольку имеющиеся разновидности продукта с низкой массовой долей жира и без сахарозы характеризуются неудовлетворительными потребительскими свойствами – плотной консистенцией и органолептически ощутимыми кристаллами льда. Это вызвано тем, что замена сахарозы, составляющей около 50 % сухих веществ продукта, производится в основном полиолами и интенсивными подсластителями. Низкий спрос на такую продукцию вызван также и тем, что в соответствии с ТР ТС 033/2013 из-за отсутствия сахаров (за исключением лактозы) в количестве не менее 14,5 % она не маркируется как «молочное мороженое». Кроме того, в соответствии с ТР ТС 022/2011 при использовании полиолов существует необходимость информировать потребителей об их слабительном действии соответствующей записью на упаковке.

Учитывая недостатки имеющегося мороженого с низкой массовой долей жира и без сахарозы, существует необходимость разработки такого продукта с измененным нутриентным составом для достижения высоких органолептических показателей.

Таким образом, разработка технологии молочного мороженого с массовой долей жира не выше 3% с фруктозой и трегалозой является актуальной и перспективной задачей.

Степень разработанности темы. Большой вклад в развитие основ технологии мороженого и замороженных десертов внесли отечественные и зарубежные ученые: Оленев Ю. А., Творогова А. А., Фильчакова Н. Н., Arbuckle W. S., Goff H. D., Hartel R. W., Sommer H. H.

Цель и задачи исследований.

Целью исследования является аргументирование и разработка нутриентного состава и принципов формирования структуры молочного мороженого без сахарозы для создания научно обоснованной технологии.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение аналитического обзора законодательной и нормативной базы, научной и специализированной технической литературы по вопросам производства пищевых продуктов функциональной направленности, мороженого, в частности, для обоснования цели и задач исследования.
2. Экспериментальное обоснование качественного и количественного состава гидроколлоидов и эмульгаторов для создания комплексной стабилизационной системы для мороженого с низким содержанием жира.
3. Обоснование массовой доли сухих веществ в молочном мороженом с фруктозой и трегалозой без органолептически ощутимых кристаллов льда.
4. Разработка композиции фруктозы и трегалозы для замены сахарозы по сладости и по сухому веществу.
5. Определение влияния колебаний температуры на дисперсность структурных элементов молочного мороженого.
6. Обоснование стадий и параметров процесса производства молочного мороженого с фруктозой и трегалозой.
7. Разработка технологии и технической документации по производству молочного мороженого с фруктозой и трегалозой для внедрения их на действующих предприятиях отрасли.

Научная новизна. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден нутриентный и ингредиентный состав мороженого с низким содержанием жира без сахарозы, включающий: композицию сахаров (фруктозы и трегалозы) и пищевых волокон с синергетическими криопротекторными свойствами, эффективных стабилизаторов и эмульгаторов с высокой поверхностной активностью на границе раздела воздушной фазы.

Экспериментально обоснованы принципы стабилизации структуры низкожирного молочного мороженого с фруктозой и трегалозой, базирующиеся на требованиях к химическим, реологическим и микроструктурным показателям исходной смеси и готового продукта.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретически и экспериментально обоснованы состав и принципы стабилизации структуры молочного мороженого с низкой массовой долей жира с фруктозой и трегалозой.

Разработаны технология и техническая документация по производству мороженого:

- ТУ и ТИ ТУ 10.52.10-016-19811926-2019 «Мороженое молочное без сахарозы. Технические условия».
- ТУ и ТИ ТУ 10.52.10-023-19811926-2021 «Мороженое молочное, сливочное и пломбир без сахарозы. Технические условия».

Подана заявка на патент (№ 2020134223).

Технология молочного мороженого с фруктозой и трегалозой освоена на 2 предприятиях отрасли: АО «Новокузнецкий хладокомбинат» и ИП «Пашин» (Фабрика мороженого «Давайс»).

Методология и методы исследования. Основу методологии составляют общепринятые и специальные методы исследования показателей качества мороженого и замороженных десертов.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое и экспериментальное обоснование нутриентного состава молочного мороженого с фруктозой и трегалозой;
- результаты экспериментальных исследований синергетических криопротекторных свойств композиции сахаров и пищевых волокон, подтверждающие их положительное влияние на нуклеацию и дисперсность кристаллов льда в мороженом в процессе производства, хранения и колебаний температуры.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных данных подтверждается проведением экспериментов в трех-пятикратной повторности. Использовалось современное оборудование, применялась статистическая обработка результатов исследований с доверительной вероятностью 0,95.

Основные результаты работы были представлены и обсуждены на российских и международных конференциях: «Развитие пищевой и перерабатывающей промышленности России: кадры и наука», г. Москва, 2017; «Пищевые системы: теория, методология, практика», г. Москва, 2017; «Новые подходы к разработке технологий производства и переработки сельскохозяйственной продукции», г. Волгоград, 2018; «Интенсификация пищевых производств: от идеи к практике». Красково, 2018; «Фундаментальные и прикладные аспекты нутрициологии и диетологии. Лечебное, профилактическое и спортивное питание», г. Москва, 2018; «Инновационные технологии обработки и хранения сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов», г. Москва, 2020; «Актуальные задачи производства мороженого в современных условиях», г. Москва, 2020; «Современные пищевые тенденции глазами молодых ученых: перспективы, инновации и прогрессивные технологии», г. Санкт-Петербург, 2021.

Публикации. По материалам выполненных исследований опубликовано 16 печатных работ, в том числе 6 статей в журналах, рекомендуемых ВАК РФ, 2 – в журналах, индексируемых международными базами Scopus и Web of Science.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, обзора научно-технической литературы, описания методов и объектов исследований, представления и обсуждения полученных результатов, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 133 страницах, содержит 43 рисунка, 29 таблиц и 5 приложений. Список цитируемой литературы включает 129 наименований работ российских и зарубежных исследователей.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, поставлены цели и задачи исследования, аргументирована научная новизна и практическая значимость полученных экспериментальных данных.

В первой главе приведены результаты аналитического обзора научной литературы и нормативно-технической документации по производству и декларированию продуктов функциональной направленности в России и за рубежом. Обобщены данные по состоянию структуры мороженого различного состава. Рассмотрено влияние основных нутриентов мороженого (жира и углеводов) на формирование его структуры и органолептических показателей. Обоснована целесообразность совершенствования подходов к формированию структуры в производстве мороженого с низкой массовой долей жира с высокой дисперсностью кристаллов льда. Обращено внимание на возможность снижения гликемического индекса мороженого за счёт изменения углеводного состава. Рассмотрены основные свойства гидроколлоидов и эмульгаторов, применяемых при разработке комплексных стабилизационных систем. Определена возможность применения трегалозы как нутриента, оказывающего влияние на формирование кристаллов льда в мороженом и их дисперсность в процессе хранения. Проведенный анализ позволил определить цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе приведены сведения об организации работы, о выборе объектов и методах исследований. Схема проведения экспериментальных работ представлена на рисунке 1.

Объектами исследований были: мороженое с массовой долей жира не более 3% и 1% и смеси для их производства; компоненты для восполнения сухих веществ в мороженом: инулин, полидекстроза, продукты переработки крахмала: мальтодекстрины с различным ДЭ; сухой глюкозный сироп; фруктоза и трегалоза; концентрат сывороточных белков; гидроколлоиды (КМЦ, КТ, КРД и КРГ) и эмульгаторы (Е 475, моно- и диглицериды жирных кислот и МГД).

При проведении экспериментов использовали следующие методы анализа изучаемых объектов исследования:

- микроструктурные – определение дисперсности кристаллов льда (1) и воздушной фазы (2) в мороженом с использованием светового микроскопа фирмы «Olympus CX 41» со встроенной фотокамерой, термо- крио- столика марки «PE 120», и программного обеспечения ImageScope для определения размеров кристаллов льда и диаметров воздушных пузырьков;
- структурно-механические – определение показателей динамической вязкости смеси с помощью реотеста Brookfield DV-II+Pro (3); твердости мороженого на анализаторе текстуры Brookfield LFRA Texture Analyzer (4);
- термостатирования для определения устойчивости к температурным воздействиям: термоустойчивость (5) и формоустойчивость (6) по методикам, разработанным во ВНИХИ;

- теплофизических исследований мороженого: определение криоскопической температуры на осмометре-криоскопе (7); криоскопической температуры и доли вымороженной влаги расчетным способом (8); температуры стеклования методом ДСК (9);
- стандартные: определение массовой доли жира по ГОСТ 5867-90 (10); массовой доли сухих веществ по ГОСТ Р 54668-2011 (11); температуры по ГОСТ 31457-2012 (12); взбитости по ГОСТ 31457-2012 (13);
- сенсорные: определение органолептических показателей по методике ВНИХИ (14);
- расчетные: определение гликемического индекса (15), пищевой и энергетической ценности в соответствии с методикой, приведенной в ТТИ ГОСТ 34457-2012 (16).

Статистическая обработка полученных данных и построение графиков проводилась с использованием компьютерных программ: «Microsoft Excel 2019», «Mathcad 15», «Past».

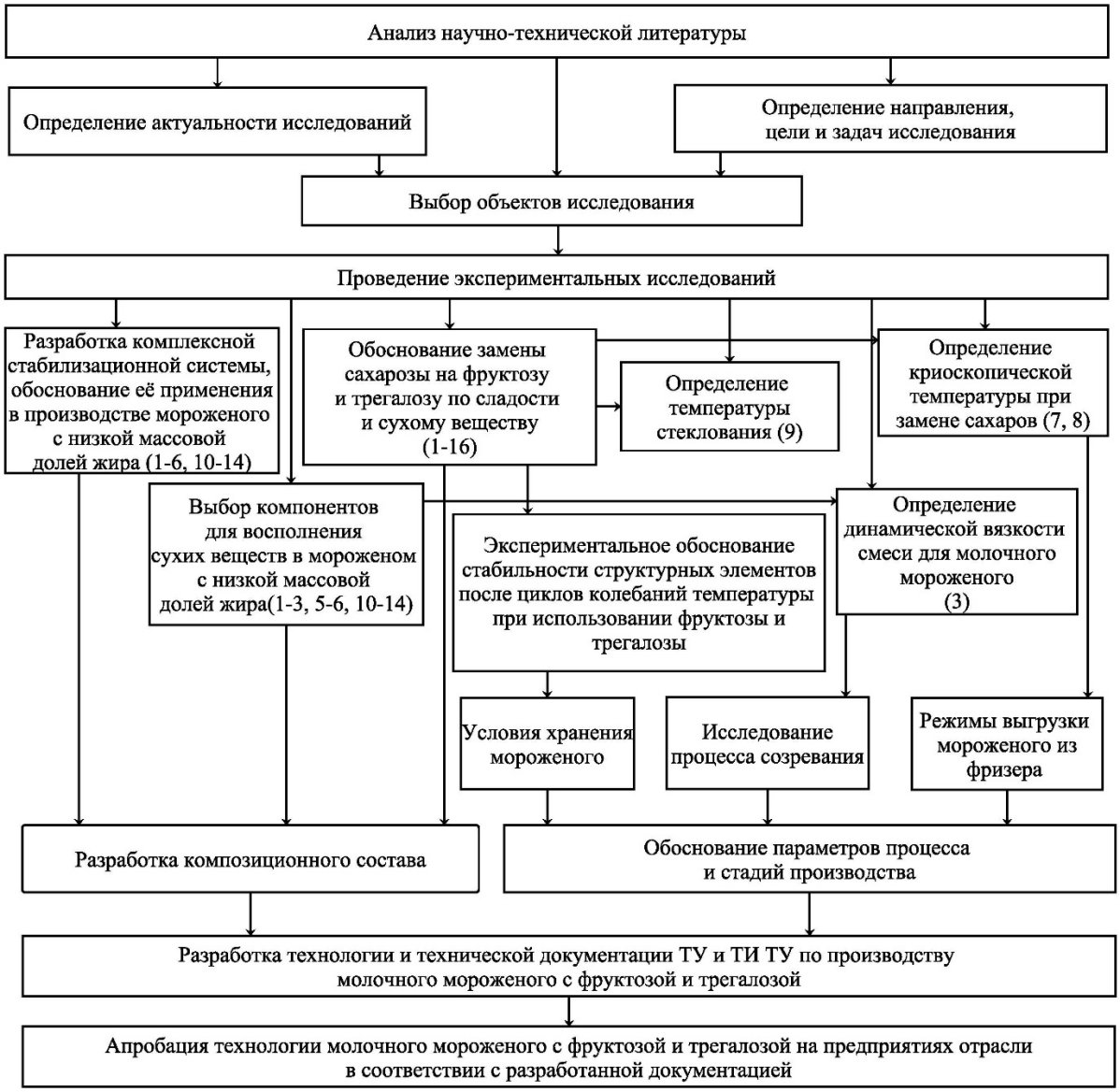


Рисунок 1. Схема проведения экспериментальных работ

Глава 3. Экспериментальная часть

В основу работы положена гипотеза о возможном синергетическом взаимодействии композиции фруктозы, трегалозы и пищевых волокон, как криопротекторов, положительно влияющих на нуклеацию, дисперсность кристаллов льда в процессе их образования во фризере и при хранении мороженого, в том числе при колебаниях температуры.

В разделе ***«Разработка композиционного состава стабилизационной системы для мороженого с низким содержанием жира»*** приведены результаты исследований по созданию синергетических композиций эмульгаторов и стабилизаторов. Оценку эффективности стабилизаторов проводили по показателю «динамическая вязкость растворов» с учетом их основной функциональной роли – влияние на вязкость. На основании опыта использования стабилизационных систем, уже применяемых на предприятиях отрасли, за эталон динамической вязкости было принято ее значение для смесей для сливочного мороженого 200-250 мПа·с. Исследовали вязкость растворов стабилизаторов при температуре (4±2) °С после приготовления и после замораживания (рисунок 2).

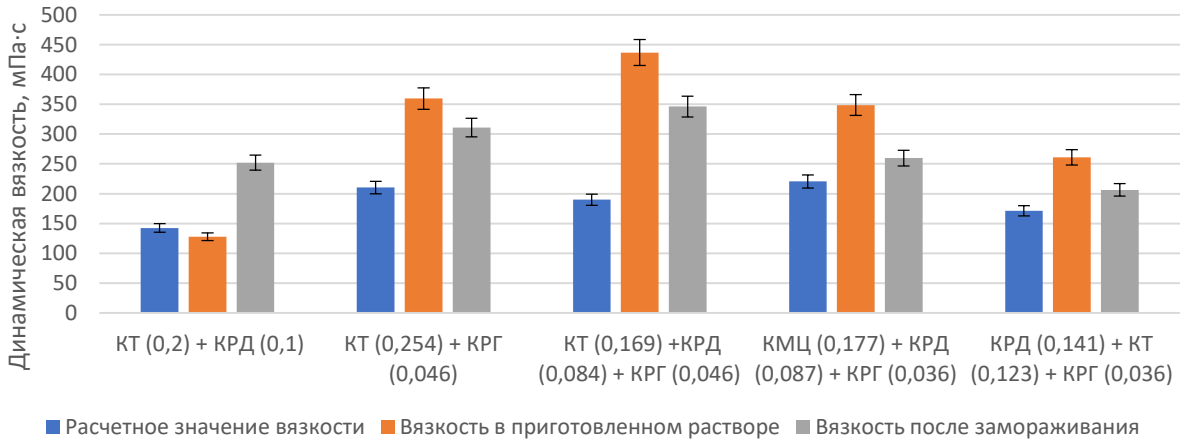


Рисунок 2. Показатели динамической вязкости в растворах гидроколлоидов

По данным рисунка 2 следует, что необходимый уровень динамической вязкости достигается во всех растворах, кроме 1. Учитывая высокую вязкость растворов (свыше 300 мПа·с) композиций гидроколлоидов с преобладанием КТ и КМЦ, для дальнейшего исследования была отобрана композиция гидроколлоидов КРД + КТ + КРГ с учетом оптимальной вязкости раствора (260 мПа·с). Преимущественное использование КРД, способствующей образованию мелких кристаллов льда, важно для мороженого с низким содержанием жира. Камедь тары является эффективным загустителем, а каррагинан поддерживает стабильность белковой фазы при наличии полисахаридов (стабилизаторов).

Благодаря эмульгатору в мороженом с низким содержанием жира происходит стабилизация воздушной фазы, что положительно влияет на структуру в целом. При обосновании состава стабилизационной системы

исходили из того, что в мороженом с низким содержанием жира необходимо высокое содержание эмульгатора (не менее 70 %), а остальные 30% в системе должны составлять стабилизаторы.

В качестве эмульгаторов исследовали эфиры полиглицерина и жирных кислот – Е475 (образец Э1), моно- и диглицериды жирных кислот - Е471 (Э2), моноглицериды дистиллированные (Э3), композиции: Е475 с моно- и диглицеридами (Э4) и Е 475 с дистиллированными моноглицеридами (Э5) в соотношении 1:1.

Эмульгатор Е475 в мороженом с низким содержанием жира был использован впервые, поскольку он дополнительно выполняет функцию стабилизатора, что необходимо для данной разновидности мороженого.

Эффективность эмульгаторов косвенно оценивали по показателю «термоустойчивость». Для исследований на первой стадии использовали сливочное мороженое, в котором присутствие эмульгаторов и их эффективность проявляется более заметно. Термоустойчивость мороженого в значительной степени зависит от содержания деэмульгированного жира, величина которого определяет эффективность эмульгаторов (рисунок 3).

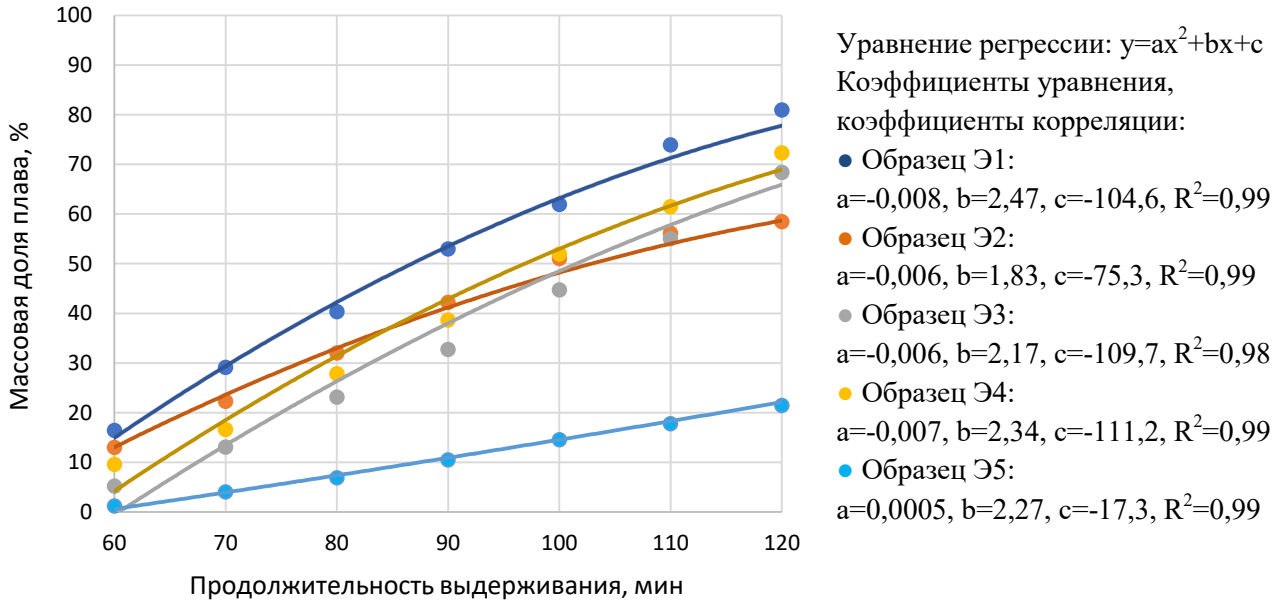


Рисунок 3 – Зависимость массовой доли плава от продолжительности выдерживания образцов с различным составом эмульгаторов

В соответствии с данными, приведенными на рисунке 3, наименьшее количество плава, образуется при использовании стабилизационной системы с композицией эмульгаторов Е475 и МГД (образец Э5). В частности, через 60 мин выдерживания при температуре (20±0,5)℃ в образце Э5 плава обнаружено не было, а в образце с моно- и диглицеридами доля плава составила 17 %.

При апробировании стабилизационной системы в молочном мороженом без сахарозы для восполнения сухих веществ использовали полидекстрозу. Образцы №1 и №2 отличались между собой за счет входящего в состав образца №1 мальтодекстрина в количестве 1,9 %. В качестве контроля было

изготовлено молочное мороженое с используемой в промышленности стабилизационной системой «Люксайс 3670». Исследование динамической вязкости и взбитости молочного мороженого без сахарозы показало на технологическую функциональность синергетической композиции эмульгаторов и стабилизаторов.

Мороженое без сахарозы значительно превосходило контрольный образец (3К) по устойчивости к таянию (рисунок 4). Массовая доля плава в образцах №1 и №2 через 60 мин. термостатирования была меньше, чем в контрольном образце соответственно в 4,1 и 2,9 раза.

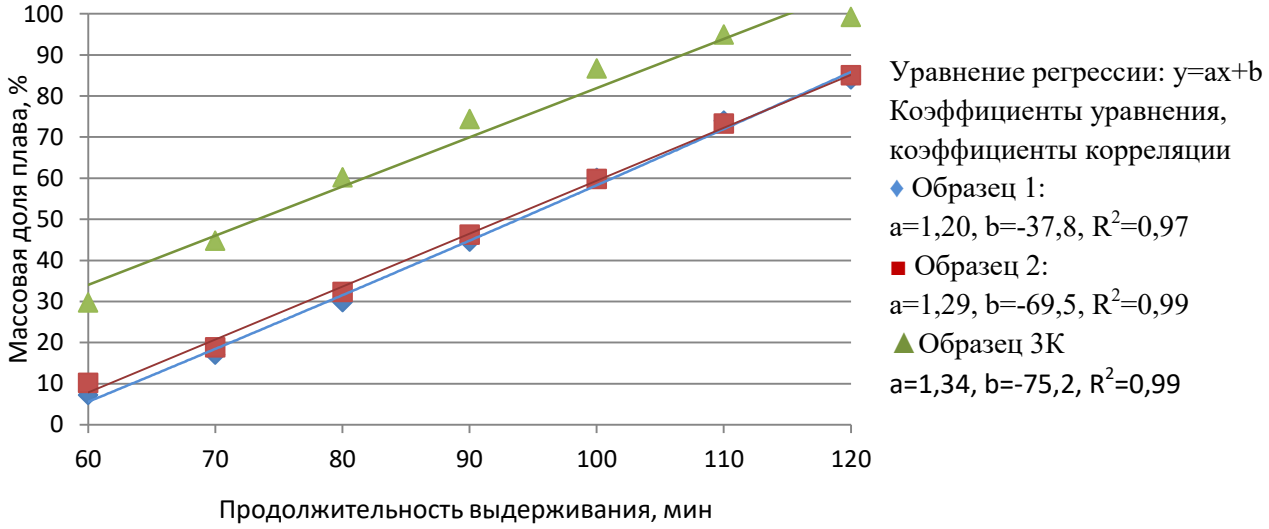


Рисунок 4 – Зависимость массовой доли плава от продолжительности выдерживания молочного мороженого без сахарозы и контрольного образца

Таким образом, результаты исследований показывают, что синергетическая композиция эмульгаторов и стабилизаторов наиболее эффективна в молочном мороженом без сахарозы по сравнению со стабилизационной системой контроля.

Обоснование композиционного состава мороженого с низким содержанием жира с фруктозой и трегалозой

Выбор массовой доли жира в мороженом обусловлен требованиями к этому показателю в продуктах с низкой массовой жира – не более 3 %.

Компоненты для восполнения сухих веществ подбирали с учетом способности к гелеобразованию и сенсорному увеличению ощущения жирности готового продукта. При подборе ингредиентов для замены сахарозы учитывали их гликемический индекс и способность к взаимодействию с водой.

Характерным пороком традиционного молочного мороженого является образование крупных кристаллов льда, поэтому исследовали их размер и морфологию в растворах 14% концентрации сахаров, полиолов, полидекстрозы и инулина. Исследования показали, что в растворах этих компонентов по сравнению с водой образуются более мелкие кристаллы льда.

Учитывая, что содержание сухих веществ в мороженом на уровне не менее 32% является необходимым условием для формирования структуры

продукта с высокой дисперсностью кристаллов льда, на первом этапе работы выбирали эффективные компоненты для восполнения сухого вещества в мороженом с низкой массовой долей жира. С этой целью использовали: полидекстрозу (обр. №5), инулин (обр. №6), мальтодекстрины с ДЭ 18 и ДЭ 12 (обр. №7 и №8) и сухой глюкозный сироп (обр. №9).

При обработке значений динамической вязкости в образцах молочного мороженого с помощью дисперсионного анализа (one-way ANOVA) удалось установить, что значения данного показателя до и после созревания смеси в рамках каждого образца не имеют статистически значимых отличий (P>0,05). Анализируя данный факт, можно предположить, что для образцов с низкой массовой долей жира (не выше 3%) стадия созревания в технологическом процессе не требуется, что актуально в летний сезон на предприятиях отрасли для увеличения их производительности.

Особое внимание при хранении образцов с низким содержанием жира, с учетом высокой вероятности образования крупных кристаллов льда, уделялось исследованию их дисперсности в процессе хранения в течение 6 мес. (рисунок 5).

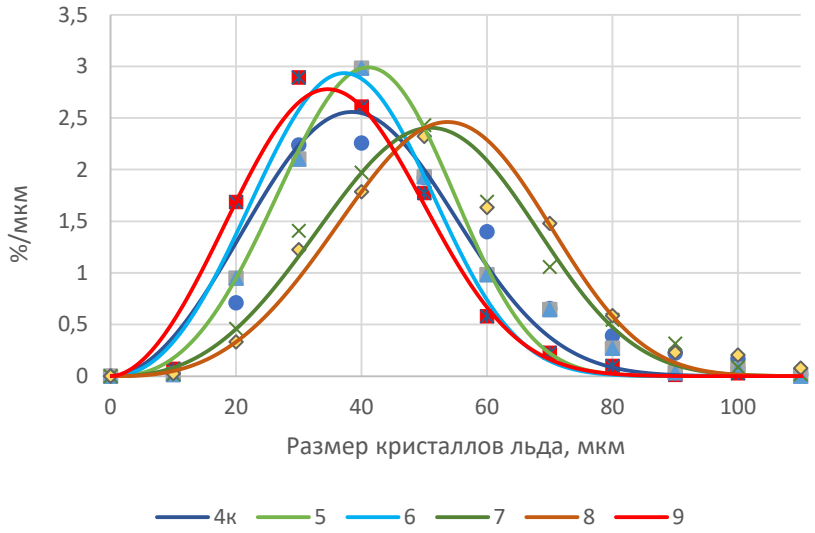


Рисунок 5 - Кривые распределения кристаллов льда в образцах через 6 мес. хранения.

В образцах с инулином и сухим глюкозным сиропом отмечен наименьший размер кристаллов льда при высокой доле кристаллов размером до 50 мкм. Образец с полидекстрозой по данному показателю соответствовал контролю.

При проведении органолептической оценки дегустаторы отметили, что в образцах молочного мороженого с полидекстрозой и инулином создаётся сенсорное ощущение более высокого содержания жира (на уровне сливочного мороженого).

По результатам исследований установлено, что наиболее приемлемыми компонентами для увеличения общего содержания сухих веществ в мороженом с массовой долей жира 3% являются инулин, полидекстроза и сухой глюкозный

сироп. Мальтодекстрины с целью повышения сухих веществ в мороженом можно использовать при условии хранения продукта не более 3 месяцев. Использование инулина в количестве 3% позволяет информировать потребителя о том, что продукт является источником пищевых волокон.

Второй этап работы заключался в обосновании замены сахарозы на композицию фруктозы и трегалозы. Решение о совместном использовании фруктозы и трегалозы принято исходя из возможности восполнения этими сахарами сахарозы по массовой доле сухих веществ и сладости без внесения дополнительных ингредиентов. Новизна технического решения отражена в заявке на патент «Мороженое без сахарозы с низким содержанием жира» (№ 2020134223). Принимали во внимание, что сладость у трегалозы составляет 0,45 от сладости сахарозы, а у фруктозы в 1,75 раза выше. В мороженом с массовой долей жира 3 % обычно используется 15,5 % сахарозы. 8,0 % фруктозы обеспечивает уровень сладости, свойственной 14 % сахарозы, а 7,5 % трегалозы – 3,3%. Таким образом, использование композиции фруктозы и трегалозы позволяет заменить сахарозу полностью по сладости и сухому веществу.

Гликемический индекс молочного мороженого с 15,5% сахарозы составляет 62. Несмотря на то, что трегалоза состоит из двух остатков глюкозы, её ГИ на 28% ниже, чем у самой глюкозы. Совместное использование композиции фруктозы и трегалозы позволило снизить ГИ мороженого на 27%. Мороженое при этом переходит в категорию продуктов с низким гликемическим индексом. ГИ мороженого определяли расчётным способом с учетом гликемического индекса сахаров и их массовой доли в общей доле углеводов.

Исходя из данных, приведенных выше, исследована также дисперсность кристаллов льда на модельных растворах сахаров и пищевого волокна инулина при их массовой доле, используемой в смесях для мороженого (таблица 1). Содержание воды соответствовало её количеству в смесях для мороженого, с учетом общего содержания сухих веществ.

Таблица 1. - Состав модельных растворов сахаров и инулина

Наименование вещества	Раствор 1	Раствор 2	Раствор 3
Вода, г	70,5	70,5	67,0
Сахароза, г	15,5	-	-
Фруктоза, г	-	8,0	8,0
Трегалоза, г	-	7,5	7,5
Инулин, г	-	-	3,0

Установлено, что средний размер кристаллов льда в растворе 1 составил (21,0±0,95) мкм, в растворе 2 – (16,6±0,63) мкм, в растворе 3 – (14,7±0,68) мкм (рисунок 6).

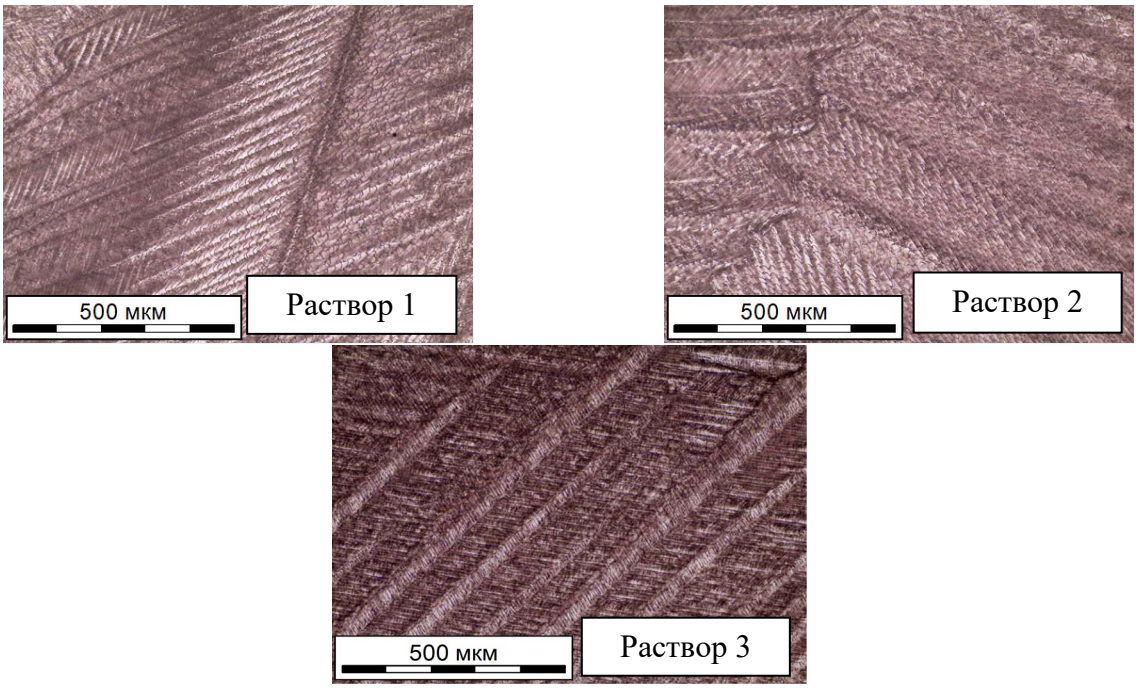
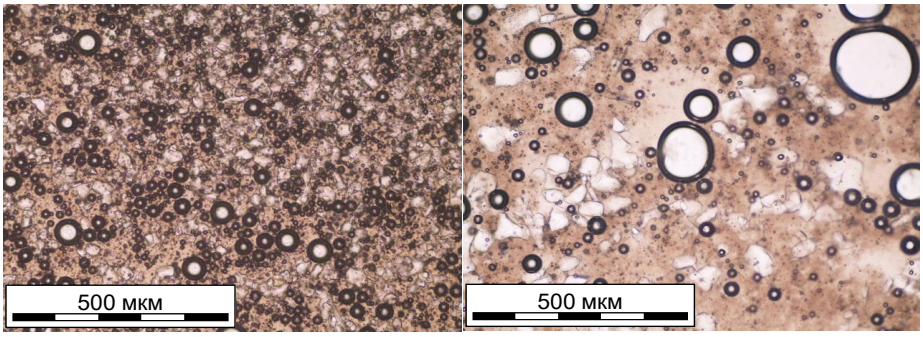


Рисунок 6. Микрофотографии кристаллов льда в модельных растворах

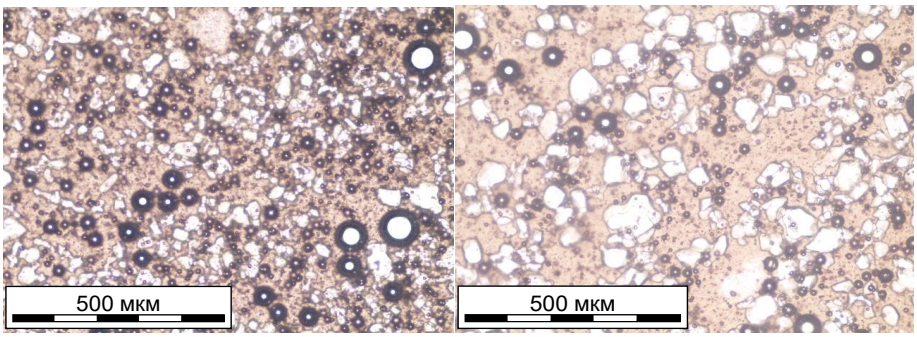
Таким образом, внесение сахаров фруктозы и трегалозы, а также их совместное использование с инулином, способствует снижению среднего размера кристаллов льда на 20 и 30 % по сравнению с раствором сахарозы, что является подтверждением синергетических криопротекторных свойств этой композиции.

Для подтверждения установленного эффекта были выработаны опытные образцы мороженого с фруктозой и трегалозой с различными стабилизационными системами и с инулином/полидекстрозой: обр. №11 (Cremodan 709, полидекстроза), обр. № 12 (Е475+МГД+КРД+КТ+КРГ, инулин) и обр. № 13 (Cremodan 334, инулин). В качестве контроля обр. № 4к (Cremodan 709) и обр. № 10к (Cremodan 334).

Образцы сравнивали по дисперсности кристаллов льда, поскольку высокое содержание влаги в молочном мороженом может привести к образованию крупных (органолептически ощутимых) кристаллов (рисунки 7, 8).



А Б



В Г

Рисунок 7 – Микрофотографии кристаллов льда: после закаливания: А – образец 11, Б – образец 4К; через 12 месяцев: В – образец 11, Г – образец 4К

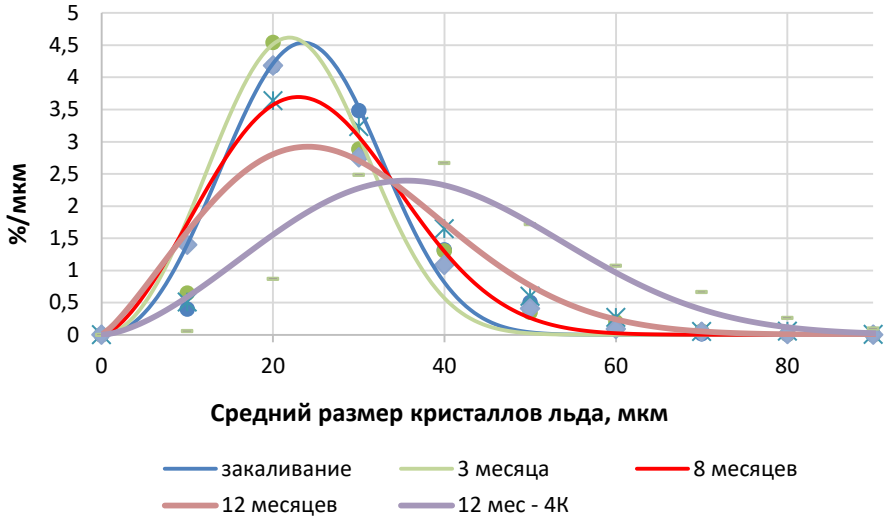


Рисунок 8. Кривые распределения кристаллов льда в мороженом с фруктозой и трегалозой (образец №11) и контрольном образце

Приведенные данные (рисунки 7 и 8) свидетельствуют о том, что применение в мороженом фруктозы, трегалозы и пищевых волокон позволяет при его хранении сохранять дисперсность кристаллов льда на высоком уровне: через 12 мес. хранения на долю кристаллов размером от 10 до 30 мкм приходилось 69 % кристаллов, в контрольном образце - 33 %.

Также важным показателем является доля кристаллов льда размером до 50 мкм. После закаливания в опытном образце мороженого их доля составляла 99%, через 12 месяцев данный показатель сохранялся на уровне 94%. В контрольном образце доля кристаллов льда такого размера через 12 месяцев хранения составляла 77 %.

Определение криоскопической температуры и температуры стеклования в образцах мороженого без сахарозы

Учитывая, что молекулярная масса фруктозы в 1,8 раза меньше, чем у сахарозы, расчетным и экспериментальным методами определена криоскопическая температура смеси и температура выгрузки мороженого из фризера при массовой доле вымороженной воды 50 % (таблица 2). Для

сравнения был выработан образец с использованием эритрита, часто применяемого для замены сахарозы по сухому веществу (обр. №14) (таблица 2).

Таблица 2. - Значения криоскопической температуры мороженого и температуры выгрузки из фризера при доле вымороженной воды 50%

Образцы	$t_{кр}$, °С	$t_{выгр}$, °С
4К	-(2,34±0,09)	-4,9
10К	-(2,34±0,09)	-4,9
11	-(3,35±0,15)	-7,1
12	-(3,30±0,27)	-7,0
13	-(3,25±0,06)	-6,9
14	-(3,29±0,12)	-6,9

Как следует из данных, приведенных в таблице 2, замена сахарозы фруктозой и трегалозой приводит к снижению криоскопической температуры смеси в 1,6 раза. Отличия при известном техническом решении замены сахарозы на пищевые волокна и сахароспирты составляли всего 0,2°С.

Полученные результаты использованы при установлении параметров процесса фризерования в технологии молочного мороженого с фруктозой и трегалозой.

Исследовано влияние доли вымороженной воды на дисперсность кристаллов льда. Мороженое с фруктозой и трегалозой (обр. №11) выгружали из фризера при разных температурах (доля вымороженной воды выше и ниже 50%). На рисунке 9 представлены кривые распределения кристаллов льда после закаливания и через 8 месяцев хранения.

Попарное сравнение выборок с использованием дисперсионного анализа (one-way ANOVA) показало, что при разной температуре выгрузки имеются статистически значимые отличия (P<0,05). Таким образом, можно сделать вывод, что температура выгрузки из фризера оказывает заметное влияние на дисперсность кристаллов льда.

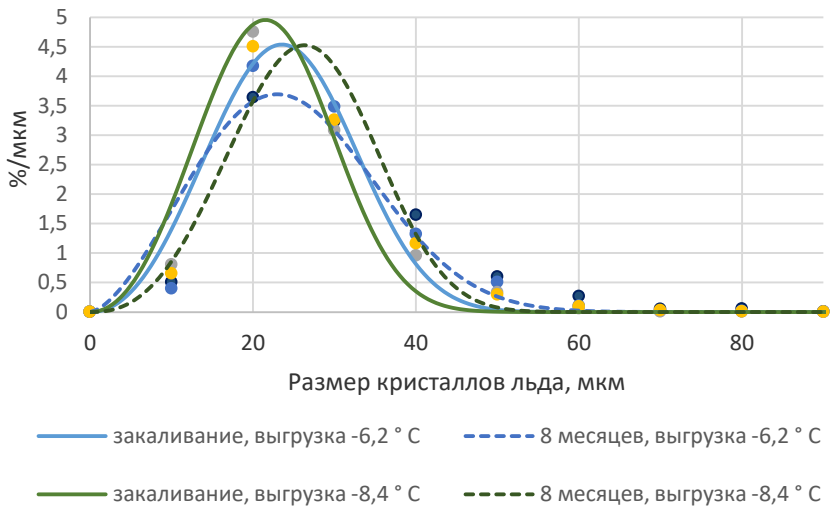


Рисунок 9 – Кривые распределения кристаллов льда в мороженом при температуре выгрузки -6,2 °С и -8,4 °С

Как видно из данных, представленных на рисунке 9, разница между дисперсностью кристаллов льда очевидна уже после закаливания и к 8 мес. резервирования она сохраняется.

Однако, понижение температуры до -8,4°С привело к снижению взбитости и уплотнению структуры, поэтому рекомендуемая температура выгрузки мороженого из фризера была установлена на уровне не выше -6,6 °С.

Для установления причин положительного влияния фруктозы, трегалозы и пищевых волокон на дисперсность кристаллов льда исследовали температуру стеклования методом ДСК. Достижение эффекта стеклования в интервале температур минус 18 – 30 °С, возможных в условиях предприятий производства и реализации, обеспечивает стабильность кристаллов льда в процессе длительного хранения. Предположили, что данные компоненты оказывают влияние на этот показатель.

Результаты исследований, однако, показали, что эффект стеклования идентифицируется для всех применяемых в производстве сахаров и пищевых волокон, лишь в диапазоне температур от минус 55 до минус 40 °С. Кроме того установлено, что использование альтернативных подсластителей взамен традиционной сахарозы (обр. №4К) приводит к снижению температуры стеклования на 13% (обр. №11) и 32% (обр. №14) (рисунок 10). Это, скорее всего, обусловлено низкой молекулярной массой фруктозы и эритрита.

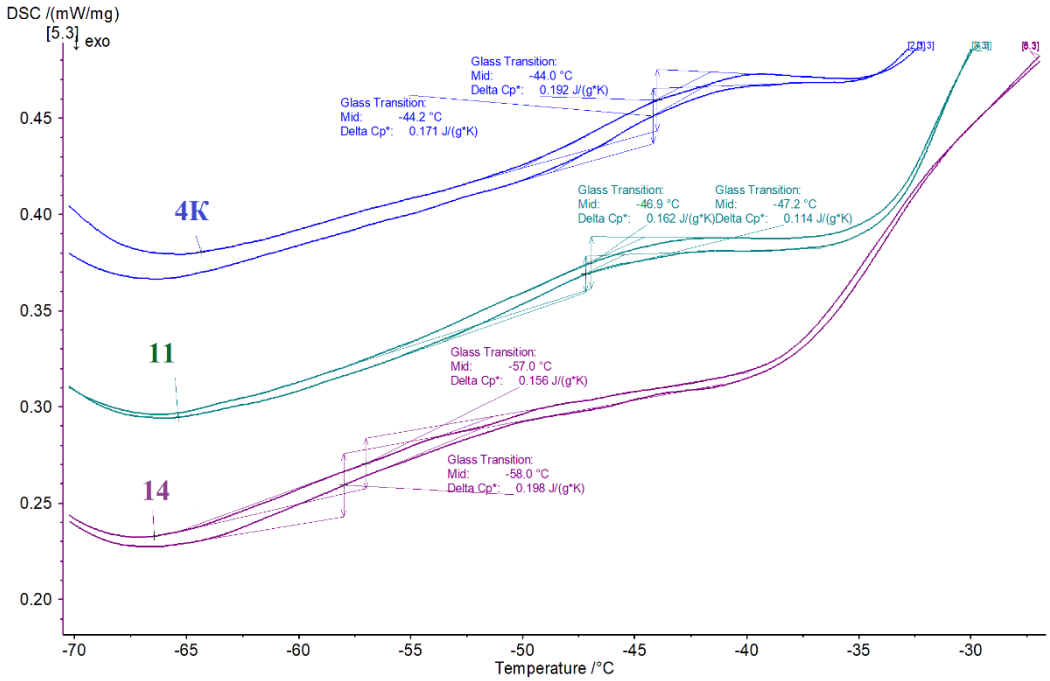


Рисунок 10. - Термограммы процесса стеклования в образцах

Таким образом, можно предположить, что положительное влияние композиции сахаров и пищевых волокон на дисперсность кристаллов льда обусловлено молекулярной конформацией и высокой гидратацией этих веществ, как это было установлено при проведении обзора литературы.

Изучение показателей качества мороженого с фруктозой и трегалозой после цикла колебаний температуры

Учитывая различную дисперсность кристаллов льда в мороженом с сахарозой и композицией фруктозы и трегалозы, практический интерес представляло исследование влияния колебаний температуры на состояние кристаллов льда. Исследования проводили в камере с автоматизированным управлением циклами колебаний. Схема исследований представлена на рисунке 11.

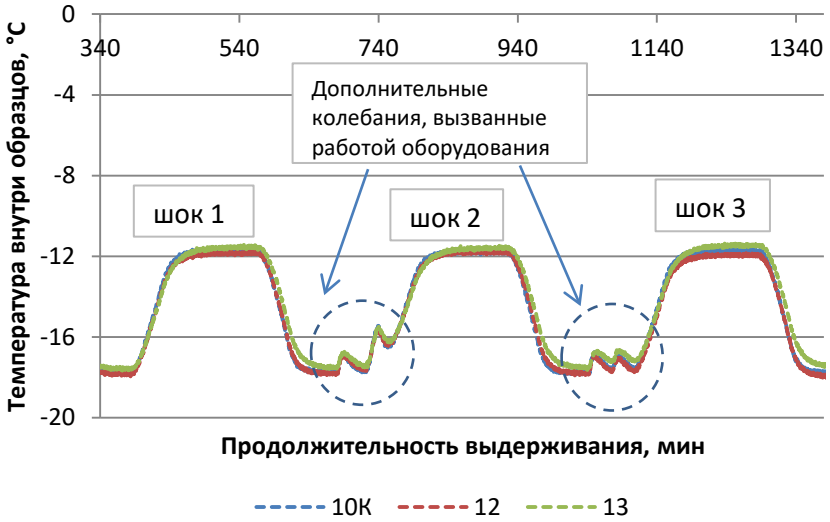
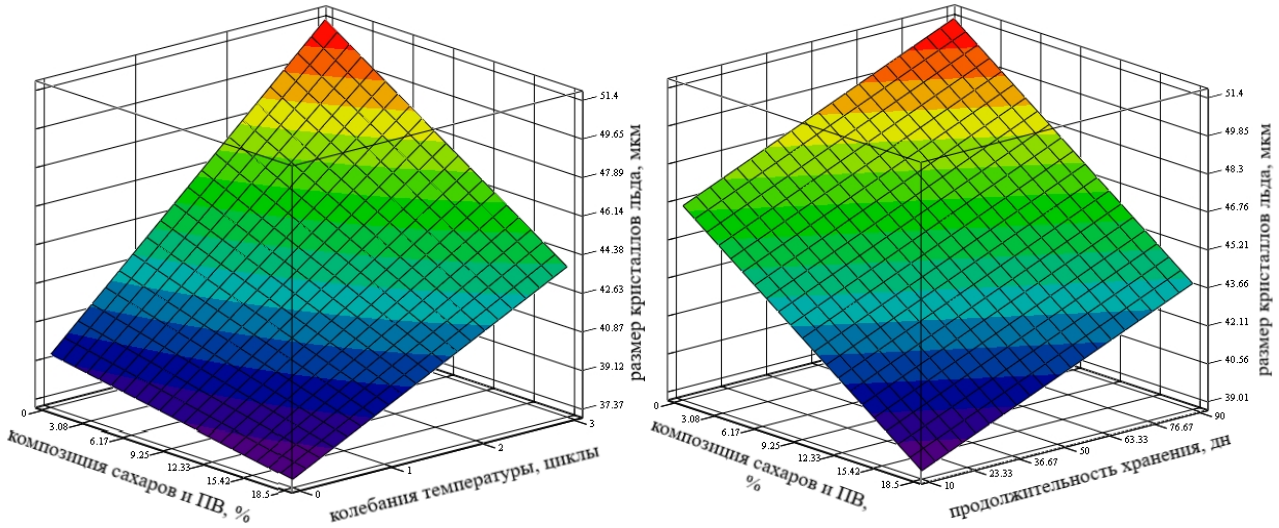


Рисунок 11. Температура в образцах в процессе колебаний температуры

На основании данных о размерах кристаллов льда после циклов колебаний температуры получена математическая модель, характеризующая размер кристаллов льда (y) и учитывающая количество композиции сахаров и ПВ (ω), циклы колебаний температуры (z) и продолжительность хранения (τ):

$$y = 39{,}4 - 0{,}11 \cdot \omega + 2{,}2 \cdot z - 0{,}1 \cdot \omega \cdot z + 0{,}02 \cdot z \cdot \tau \qquad (1)$$

Были выбраны значения, соответствующие фактору τ и z на максимальном уровне, и построены графики поверхности отклика (рисунок 12).

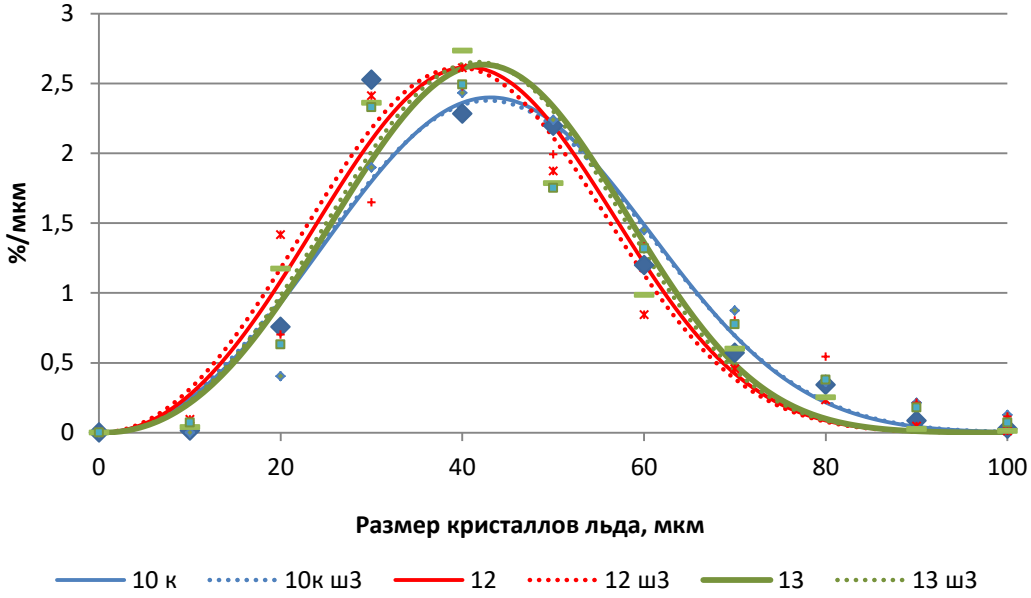


τ = 90 дн z = 3 цикла

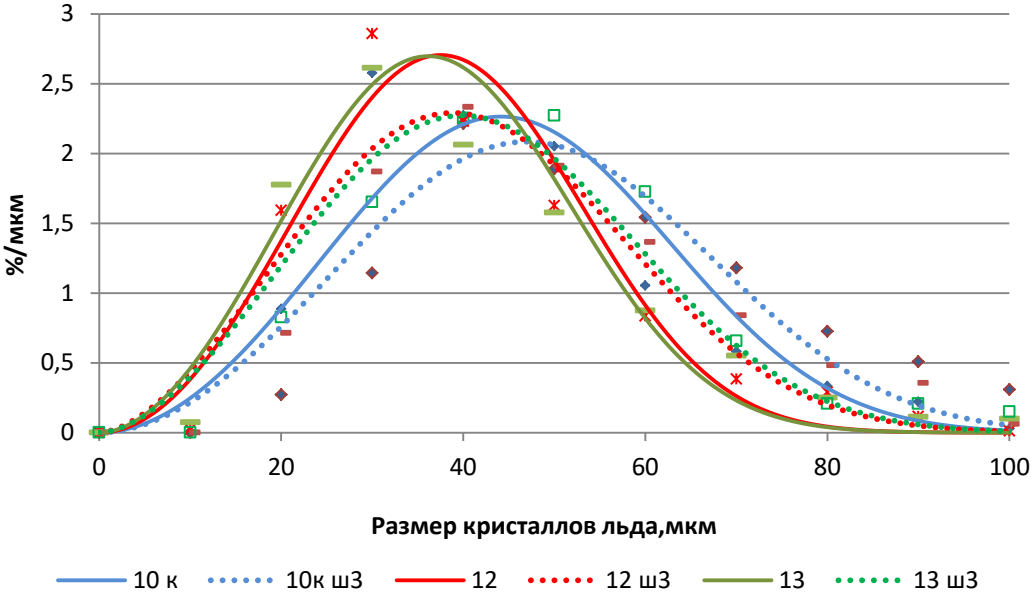
Рисунок 12. Зависимость размера кристаллов льда от влияния факторов

По приведенным графикам можно судить о том, что замена сахарозы композицией сахаров и ПВ положительно сказалось на дисперсности кристаллов льда в мороженом при хранении после колебаний температуры. И, как следовало ожидать, увеличение числа колебаний температуры привело к снижению дисперсности кристаллов льда.

Определена дисперсность кристаллов льда в экспериментальных образцах. На рисунке 13 представлены кривые распределения после закаливания и через 10 и 90 дней хранения после 3 циклов колебаний температуры.



через 10 дней



через 90 дней

Рисунок 13 – Кривые распределение кристаллов льда по размерам при хранении после 3 циклов колебаний температуры

Данные рисунка 13 отражают то, что колебания температуры через 10 дней хранения не оказывают влияние на размеры кристаллов льда в рамках отдельно взятого образца. Более заметные изменения в дисперсности кристаллов льда отмечены через 3 месяца хранения после колебаний температуры. При этом стоит отметить, что кристаллы льда в контрольном образце изначально крупнее, чем в образцах №12 и №13.

На долю кристаллов льда размером до 50 мкм через 3 месяца хранения после 3 циклов колебаний температуры в образцах 12Ш3 и 13Ш3 приходится 68% и 70% кристаллов льда соответственно, в контрольном образце (10КШ3) доля таких кристаллов составляет 54%.

В образцах 12 и 13 через 3 месяца хранения отсутствует разница в размерах кристаллов льда до теплового шока и после 1 и 2 температурных колебаний ($P>0.05$), различия очевидны только после 3 колебаний температуры ($P<0,05$).

Исследования подтвердили также конкурентоспособность разработанной стабилизационной системы, поскольку в образце с её использованием (№12) и в образце №13 нет существенных отличий в размерах кристаллов льда ($P>0,05$).

На основании проведенных исследований разработаны принципы стабилизации структуры низкожирного молочного мороженого с фруктозой и трегалозой, базирующиеся на стабилизации его основных структурных элементов кристаллов льда и воздушной фазы:

1. Для формирования стабильных структурных элементов мороженого с низкой массовой долей молочного жира (не более 3 %) необходимо обеспечение в смеси для мороженого массовой доли сухих веществ не менее 32 % и динамической вязкости не менее 300 мПа·с при градиенте сдвига на срез 0,83 $с^{-1}$.
2. Для достижения и сохранения в процессе резервирования в мороженом с низкой массовой долей жира органолептически неощутимых кристаллов льда (менее 50 мкм) следует применять:

- стабилизаторы, способствующие формированию мелких кристаллов льда, в частности камеди рожкового дерева и тары;

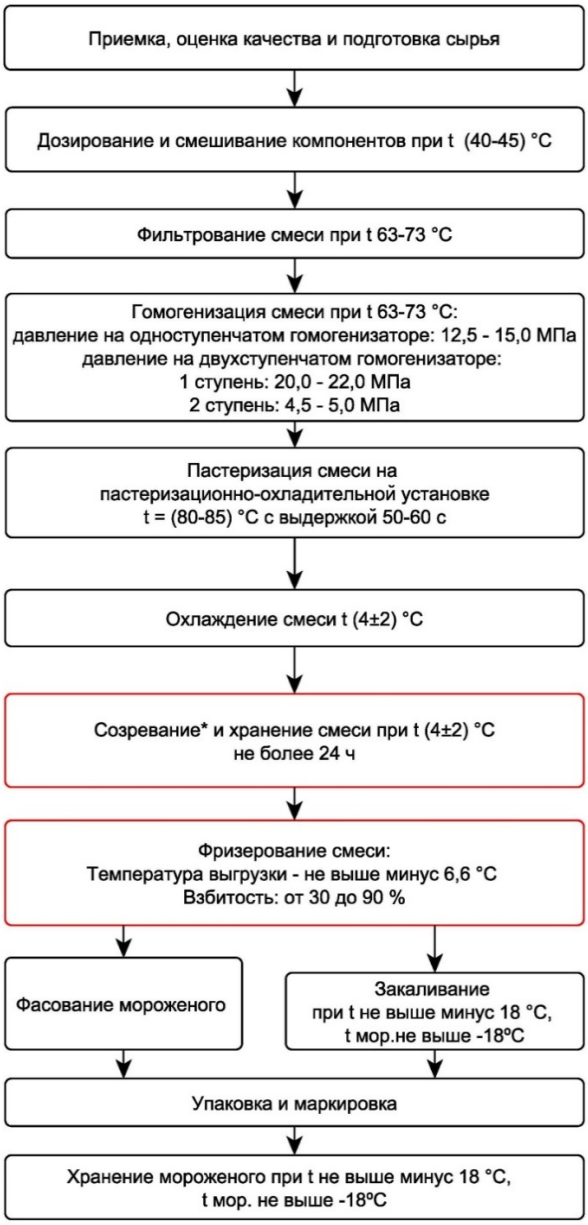
- синергетические композиции криопротекторов сахаров (фруктозы и трегалозы) и пищевых волокон, инициаторов нуклеации, способствующих формированию мелких кристаллов льда и препятствующих их росту в процессе хранения и в условиях колебаний температуры в диапазоне ±5°С.

3. При стабилизации воздушной фазы в мороженом с низкой массовой долей жира необходимо дополнительно к белкам СОМО использовать эффективные эмульгаторы, непосредственно стабилизирующие поверхность воздушных пузырьков в отсутствии агломерированного жира. К таким эмульгаторам относят композиции эфиров полиглицерина и жирных кислот и дистиллированных моноглицеридов.

«Разработка технологии молочного мороженого с фруктозой и трегалозой»

Результаты исследований нашли практическое применение при разработке технологии молочного мороженого с фруктозой и трегалозой.

Определение значений криоскопической температуры позволило установить температуры выгрузки мороженого из фризера при доле вымороженной воды на уровне 50 %. На основании отсутствия изменений динамической вязкости смесей до и после созревания был сделан вывод о возможности производства мороженого без стадии созревания в технологическом процессе. На рисунке 14 представлена технологическая схема производства мороженого с фруктозой и трегалозой на действующих предприятиях отрасли с обозначенными технологическими параметрами на основе экспериментальных исследований.



* - созревание смеси не является обязательной стадией технологического процесса

Рисунок 14. Технологическая схема производства молочного мороженого с фруктозой и трегалозой

Основные результаты и выводы

1. Анализ научной и специализированной технической литературы показал, что основными компонентами для замены сахарозы в мороженом являются полиолы, пищевые волокна и интенсивные подсластители, способствующие формированию излишне плотной консистенции, органолептически ощутимых кристаллов льда и нетрадиционного профиля сладости. На основании анализа определена перспектива использования фруктозы и трегалозы для замены сахарозы по сладости и сухому веществу.

2. Экспериментально обоснован композиционный состав стабилизационной системы для мороженого с низкой массовой долей жира, базирующийся на синергетическом взаимодействии гидроколлоидов и эмульгаторов, при массовой доле:

– не менее 30 % гидроколлоидов с доминирующим содержанием камеди рожкового дерева (47 % от общего содержания стабилизаторов), инициирующих нуклеацию с образованием мелких кристаллов льда.

– не более 70 % эмульгаторов - композиции дистиллированных моноглицеридов и эфиров полиглицерина и жирных кислот с положительным влиянием на дисперсность воздушной фазы и стабильность структурных элементов.

3. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность применения отдельно или в композиции инулина и полидекстрозы для восполнения сухих веществ в молочном мороженом до уровня не менее 32%, обеспечивающего формирование органолептически неощутимых кристаллов льда, и достижения эффекта сенсорного ощущения жира, при их массовой доле в продукте не более 3 %.

4. Разработана композиция фруктозы (8%), трегалозы (7,5%) и пищевых волокон (3%), обладающая криопротекторными свойствами и обеспечивающая высокие органолептические показатели продукта, снижение гликемического индекса на 27%, формирование кристаллов льда размером 20-30 мкм при пороге органолептической ощутимости 50 мкм.

5. Доказана возможность сохранения высокой дисперсности кристаллов льда в мороженом с фруктозой и трегалозой при колебаниях температуры - в диапазоне двукратных цикличных колебаний температуры минус 18°С - минус 12°С - минус 18°С - доля кристаллов льда размером до 50 мкм через 3 месяца хранения в образцах с фруктозой и трегалозой составляла 68% и 70%, в образце с сахарозой - 54%.

6. Обоснованы стадии и параметры процесса производства мороженого. В связи с отсутствием заметных физических изменений в жировой фазе продукта, определяемых по показателю «увеличение динамической вязкости смеси после созревания», установлено, что созревание не является обязательной стадией технологического процесса. Обоснована рекомендуемая температура выгрузки мороженого из фризера (не выше минус 6,6 °С) с обеспечением доли вымороженной воды в условиях интенсивного отвода теплоты – около 50%.

7. Разработаны технические требования к молочному мороженому и технология его производства, изложенные в технической документации (ТУ и ТИ ТУ). Новизна технических решений отражена в заявке на патент № 2020134223 «Мороженое без сахарозы с низким содержанием жира».

Список трудов, опубликованных по материалам диссертации

Статьи в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science:

1. Tvorogova, A.A. Scientific and practical aspects of trehalose contain in ice cream without sucrose/ A.A. Tvorogova, A.V. Landikhovskaya, N.V. Kazakova, [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. - 640(5). - 052017. https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/5/052017
2. Ландиховская, А.В. Влияние трегалозы на дисперсность кристаллов льда и консистенцию низкожирного мороженого / А.В. Ландиховская, А.А. Творогова, Н.В. Казакова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50, № 3. – С. 450–459. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-450-459.

Статьи в журналах, рецензируемых ВАК:

3. Творогова, А.А. Мороженое пониженной калорийности / А.А. Творогова, Н.В. Казакова, А.В. Ландиховская, [и др.] // Молочная промышленность. – 2017. - №3. – С. 72 – 73.
4. Творогова, А.А. Свойства и влияние эмульгаторов на термоустойчивость мороженого / А.А. Творогова, Н.В. Казакова, А.В. Ландиховская // Холодильная техника. - 2018. - №4. - С. 46 – 49.
5. Творогова, А.А. Совершенствование композиционного состава и структуры молочного мороженого / А.А. Творогова, Т.В. Шобанова, А. В. Ландиховская, [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2018. - № 2 (48). – С. 109 – 116. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-2-109-116
6. Творогова, А.А. Применение продуктов переработки крахмала для восполнения сухих веществ в мороженом / А.А. Творогова, Н.В. Казакова, А.В. Ландиховская // Достижения науки и техники АПК. - 2020. - Т34, №5. - С. 77 – 81. https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10516
7. Ландиховская, А.В. Применение глюкозно-фруктозных сиропов в мороженом без сахарозы с низким содержанием жира / А.В. Ландиховская, А.А. Творогова, Н.В. Казакова // Пищевая промышленность. – 2021. - №5. - С. 71-74. https://doi.org/10.52653/PPI.2021.5.5.017
8. Творогова, А.А. Мороженое с заменой сахарозы / А.А. Творогова, Н.В. Казакова, А.В. Ландиховская, [и др.] // Молочная промышленность. – 2021. - №5. - С. 46-48. https://doi.org/10.31515/1019-8946-2021-05-46-48

Статьи в материалах конференций и журналах, индексируемых в РИНЦ

9. Творогова, А.А. Обоснование композиционного состава мороженого / А.А. Творогова, А.В. Ландиховская, Т.В. Шобанова, [и др.] // Вопросы питания. - 2018. - №5, Том 87 (приложение). – С. 242–243. https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10354

10. Ландиховская, А.В. Нутриентный состав мороженого и замороженных десертов: современные направления исследований / А.В. Ландиховская, А.А. Творогова // Пищевые системы. - 2021. - Т4, №2. - С. 74-81. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-2-74-81

11. Ландиховская, А.В. Разработка композиционного состава и исследование показателей качества низкокалорийного мороженого без сахарозы/ А.В. Ландиховская // Пищевые системы. - 2021. - Т.4, №3S. - С. 179-183. https://doi.org/10.21323/2618–9771-2021-4-3S-179-183

12. Творогова, А.А. Научно-практические аспекты использования пищевых волокон в производстве мороженого / А.А. Творогова, А.В. Ландиховская, О. Бирюков, [и др.] // В сборнике: Материалы научной конференции с международным участием «Развитие пищевой и перерабатывающей промышленности России: кадры и наука». - 2017. – С. 107–108.

13. Ландиховская, А.В. Создание и применение структурообразующей композиции пищевых добавок для низкокалорийного мороженого / А.В. Ландиховская, А.А. Творогова // В сборнике: Материалы XI международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов отделения сельскохозяйственных наук РАН: «Пищевые системы: теория, методология, практика». - 2017. – С. 181-186.

14. Ландиховская, А.В. Повышение дисперсности кристаллов льда в молочном мороженом / А.В. Ландиховская, А.А. Творогова // Международная научно-практическая конференция «Новые подходы к разработке технологий производства и переработки сельскохозяйственной продукции»: сборник научных трудов. - 2018. – С. 312-316.

15. Ландиховская, А.В. Роль пищевых волокон в производстве молочного мороженого / А.В. Ландиховская, Р.Р. Закирова, И.А. Гурский, [и др.] // Материалы XII международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов организаций в сфере сельскохозяйственных наук: «Интенсификация пищевых производств: от идеи к практике»: сборник научных трудов. - 2018. – С. 188-193.

16. Ландиховская, А.В. Направления производства мороженого и взбитых замороженных десертов с низким содержанием жира / А.В. Ландиховская, А.А. Творогова, Р.Р. Закирова [и др.] // «Инновационные технологии обработки

и хранения сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов»: сборник научных трудов. - 2020. - С. 236-245.

Список сокращений и условных обозначений

КМЦ – карбоксиметилцеллюлоза;
КРГ – каррагинан;
КТ – камедь тары;
КРД – камедь рожкового дерева;
МГД – моноглицериды дистиллированные;
ДЭ – декстрозный эквивалент;
ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия;
ГИ – гликемический индекс;
ПВ – пищевое волокно;
Ш1, Ш2 и Ш3 – 1, 2 или 3 цикла колебаний температуры.