

Влияние акустического замораживания на показатели структуры сублимированной клубники

Семёнов Геннадий Вячеславович

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»

Адрес: 125080, город Москва, Волоколамское шоссе, дом 11

E-mail: sgv47@yandex.ru

Краснова Ирина Станиславовна

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»

Адрес: 125080, город Москва, Волоколамское шоссе, дом 11

E-mail: ira3891@mail.ru

Хвыля Сергей Игоревич

Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности - филиал ФГБНУ

«Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН

Адрес: 127422, город Москва, ул. Костякова, дом 12

E-mail: gistolab@yandex.ru

Балаболин Дмитрий Николаевич

ООО «Акустическая заморозка»

Адрес: 109316, город Москва, ул. Талалихина, дом 31

E-mail: dbalabolin@gmail.com

Исследование посвящено вопросам изменения структуры клубники, предварительно замороженной традиционным способом в условиях естественной конвекции или замороженной с наложением микровибрации. Микровибрацию создавали в воздушной среде морозильной камеры в лабораторном устройстве АВАТ-20/1-AEF, оснащенным цифровым синтезатором частот оригинальной конструкции, с генерации электромагнитных полей мощностью от 1 до 500 Вт/м³ с пакетами одно и двух полярных прямоугольных импульсов в диапазонах частот 10 мГц – 5000 кГц. Замороженные в двух вариантах ягоды подвергали вакуумной сублимационной сушке на оригинальном лабораторном стенде СВП-0,36. Температура сублимации составляла минус 30 ± 1 °С, на этапе досушки температура была равной 38-40 °С. Общая длительность цикла высушивания составила 14-16 часов в зависимости от размера ягод. Ягоды сушили до конечной влажности 1,7%. В высушенных образцах изучали микроструктуру и оценивали показатели пенетрации, предельного напряжения сдвига, водопоглощения, определяли сорбционные свойства и органолептические показатели. Отмечено, что наложение микровибрации позволяет формировать мелкокристаллическую структуру льда и обеспечивать сохранность тканевых структур в высушенных продуктах. Исследования микроструктуры показали, что уровень сохранности клеточных структур при наложении микровибрации составляет 60-70%, в сопоставлении с 25-30% при традиционном замораживании. Выявлено, что применение микровибрации в процессах замораживания позволяет улучшить структурно-механические характеристики высушенных ягод клубники и их сохранность в процессе фасовки и транспортировки. Органолептические показатели у исследуемых образцов при двух вариантах замораживания остаются практически одинаковыми. В результате проведенных исследований отмечено, что наибольший эффект от наложения микровибраций отмечен для ягод меньшего размера.

Ключевые слова: микровибрация; клубника; вакуумная сублимационная сушка; микроструктура; структурно-механические показатели; сорбционные свойства

Введение

В настоящее время признано, что вакуумная сублимационная сушка является одним из лучших методов удаления влаги и получения готового продукта высшего качества и длительного хранения (Дондокова, Битуева, Антипов, 2016, с.37-48.; Овчарова, Абреч, Непорожная, 2008, с.14-15; Христюк, Сязин, Мякинникова, 2014, с.78-80; Marques, Silveira, Freire, 2006, с. 457-463). В пищевой промышленности наиболее широко этот метод применяют для получения высококачественных быстрорастворимых сортов кофе и цикория, для сушки заквасок молочнокислых микроорганизмов и различных ферментов. (Похиленко, Баранов, Детушев, 2009, с. 99-121.; Burmester, Pietsch, Eggers, 2011, с. 1344 – 1352.; Gaidhani, Harwalkar, Bhambere, Nirgude, 2015, с. 516-543.). Тем не менее, вакуумная сублимационная сушка обладает огромным потенциалом для развития в нашей стране и для консервирования других пищевых продуктов.

Современный потребитель требует более высокое качество продуктов питания. Вакуумная сублимационная сушка, не смотря на высокое качество готовой продукции, всё ещё остается дорогостоящим и длительным методом, и высокие затраты на организацию процесса производства ограничивают её широкое применение в промышленных масштабах в пищевой промышленности. В связи с чем, проводят большое количество исследований в нашей стране и в мире по оптимизации процесса замораживания и сублимационной сушки, сокращению времени сушки и получению продукта заданного уровня качества (Крумликов, Остроумов, Сухих, Кригер, 2016, с. 25–30.; Семёнов, Булкин, Кузенков, 2015, с. 187-202.; Kozak, Dziki, Krzykowski, Rudy, 2011, с. 134–141.; Koroishi, Boss, Wolf Maciel, Filho, 2009, с. 425-441.; Tarafdar, Shahi, Singh, Sirohi, 2017, с.1-6; Salazar, Alvarez, Orrego, 2018, с. 192-204.).

Как известно, решающее влияние на показатели качества сублимированных продуктов и интенсивность последующего процесса обезвоживания оказывает замораживание. На этапе замораживания формируется кристаллическая структура, при этом форма и размер кристаллов льда, их распределение в замороженном материале, изменение физико-химических показателей зависит от режимных параметров процесса и свойств объектов замораживания. Вопросам замораживания в технологии консервирования термолабильных

материалов и использованию вакуумной сублимационной сушки посвящена обширная литература (Постольски, Груда, 1974, 607 с.; Семёнов, Краснова, 2018, 292 с.; Ишевский, Давыдов, 2007, с. 43-59.; Колодязная, Кипрушкина, Бараненко, Румянцева, Шестопалова, 2013, с. 24-28.; Воскобойников, 2015, с. 21-23.; Ciużyńska, Lenart, 2011, с. 165–171; Rey, May, 2001, с. 163–164). Однако до сих пор вопросы получения более мелких однородных кристаллов, способных сохранить клеточные структуры остаются актуальными. Особенно это относится к фруктам и ягодам с нежной структурой, например, землянике садовой (клубнике). Более жесткие и плотные ягоды, лучше подвергаются обработке и транспортировке и имеют более длительный срок хранения и более привлекательный внешний вид, чем мягкоплодные ягоды. В связи с этим, актуальным является поиск различных методов, обеспечивающих более плотную структуру при замораживании и последующей обработке ягод.

На современном этапе наиболее распространенным методом обеспечения мелкокристаллической структуры в замораживаемых объектах является применение метода «шоковой заморозки». Он достигается использованием высоких скоростей воздуха (более 10 м/с) в низкотемпературных морозильных камерах с температурой воздуха на уровне минус 40 - 450С. Оборудование для шоковой заморозки достаточно сложное и дорогостоящее. Его применение требует высоких затрат электроэнергии и способствуют усушке продукта (Сороко, Усень, 2011, с. 63-67.; Беляева, 2017, с. 40-43.; Celli, Ghanem, Su-Ling Brooks, 2017, с. 280-304.) Альтернативным методом формирования мелкокристаллической структуры может являться воздействие микровибрацией на ягоды при замораживании. В связи с чем, целью исследования являлось оценить влияние микровибрации на структурные показатели замороженной и сублимированной клубники.

В соответствие с целью в исследовании поставлены следующие задачи:

- определить влияние микровибрации на микроструктуру замороженной и высушенной сублимационной сушкой клубники.
- исследовать влияние микровибрации на показатели пенетрации и предельного напряжения сдвига замороженной и высушенной сублимационной сушкой клубники.
- оценить сорбционные свойства сублимированной клубники после обработки

микровибрацией.

Материалы и методы

Объекты и методы исследования

Объектом исследований являлись ягоды земляники садовой (клубники) (лат. «*Fragaria x ananassa*», сорт «Азия», Россия), собранные 18 июня 2018 года (Агрохолдинг «Совхоз имени Ленина»). Размер ягод составлял 25 - 35 мм в диаметре, с ярко выраженной окраской и характерным ароматом.

Замораживание

Ягоды замораживали двумя способами. Половину ягод замораживали традиционным способом при минус 30 °С в условиях конвективного теплообмена. Вторую часть замораживали в тех же условиях, при дополнительном воздействии на ягоды микровибраций, создаваемых в воздушной среде морозильной камеры по определенной программе. В лабораторном устройстве АВАТ-20/1-АЕФ использован цифровой синтезатор частот оригинальной конструкции, имеющий возможность генерации электромагнитных полей мощностью от 1 до 500 Вт/м³ с пакетами одно и двух полярных прямоугольных импульсов в диапазонах частот 10 мГц – 5000 кГц. В замороженных ягодах исследовали микроструктуру и структурно-механические характеристики.

Вакуумная сублимационная сушка

Вакуумную сублимационную сушку ягод осуществляли на сублимационном лабораторном стенде СВП-0.36. (Семёнов, Краснова, 2018, 292 с.).

Замороженные ягоды размещали на двух металлических противнях, каждый вариант заморозки на отдельном противне. Температура сублимации составляла минус 30 ± 1 °С, температура на этапе досушки была равной 38 - 40 °С.

Длительность цикла высушивания контролировали по датчикам, вставленным в ягоды. Общее время высушивания составило 14-16 часов в зависимости от размера ягод. Массовая доля влаги в высушенных ягодах составляла в среднем 1,7%. В замороженных и сублимированных ягодах исследовали микроструктуру и структурно-механические характеристики. Общая схема замораживания и сублимационной сушки ягод

представлена на рисунке 1.

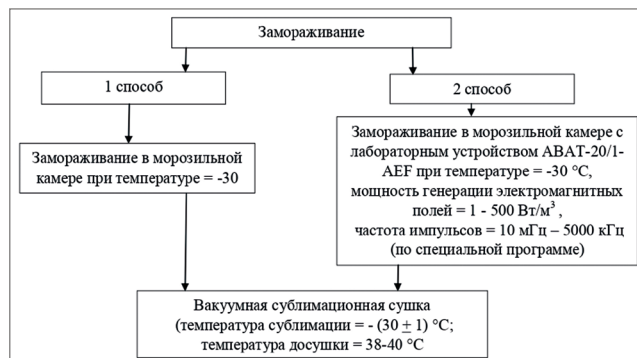


Рисунок 1. Схема производства ягод клубники.

Микроструктурные исследования

Для микроструктурного исследования замороженной клубники с целью определения степени разрушения тканей при разных режимах замораживания применяли следующую методику (Хвыля, 2016, с. 2-5.; Хвыля, Гиро, 2015, 240 с.). Из ягод без размораживания и отепления вырезали кусочки размером 20 x 20 x 10 мм, которые монтировали на предметные столики криостата. Максимально быстро, чтобы избежать размораживания и изменения микроструктурной организации тканей образцы переносили в камеру замораживающего микротомы MIKROM - 525 с установленной температурой минус 20°С. Толщина изготавливаемых срезов составляла около 25 мкм. Полученные срезы монтировали на предметные стекла, переносили в комнатные условия и подсушивали. Затем срезы окрашивали гематоксилином Эрлиха и свежим водно-спиртовым эозином. Препараты заключали в глицерин-желатин. Анализ структуры клубники и ее фотографирование проводили с использованием светового микроскопа AxioImager.A1 (Carl Zeiss, Germany). Обработку иллюстративного материала осуществляли с помощью программы ACDS 8 PRO.

Исследования пенетрации и предельного напряжения сдвига

Замороженные ягоды дефростируют перед определением значений пенетрации и предельного напряжения сдвига. Дефростацию осуществляли посредством естественного отепления ягод при комнатной температуре 22-23 °С.

Полное размораживание ягод достигалось в этих условиях через 2,5-3 часа. Значения пенетрации и предельного напряжения сдвига определяли при комнатной температуре. Ягоды клубники

фиксируют на измерительной платформе и проводят измерения на самой высокой точке ягоды клубники, поэтому небольшие различия в геометрии поверхности вызвали наименьший эффект. Также все ягоды не имели рельефных различий. Измерения проводили с помощью моторизованного устройства для испытания материалов (пенетrometer ПМДП), оснащенного тензодатчиком на 100 Н и цилиндрическим конусом с углом вершины 60 °С. Измеряли глубину погружения индентора и сопротивление продукта погружению индентора в течение 60 секунд.

Величину пенетрации определяли по формуле Ребиндера П.А.:

$$P = k \cdot m / h^2, \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от угла конуса ($k = 2.1 \text{ Н/кг}$);

m – масса конуса со штангой ($50.69 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$);

h – глубина погружения конуса, м

Предельное напряжение сдвига определяли по аналогичной формуле, где h – глубина погружения конуса в течение 60 секунд.

Исследование водопоглощения

Степень гидратации сублимированных образцов ягод (Δ) определяли по изменению массы клубники до и после регидратации путем погружения ягод в емкость с водой комнатной температуры на 5-7 часов, до полного увлажнения. Затем ягоды вынимали, давали стечь лишней влаге и взвешивали:

$$\Delta = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100, \quad (2)$$

где

m_1 – масса клубники до регидратации, г

m_2 – масса клубники после регидратации, г

Исследование сорбционных свойств

Гигроскопичность сублимированных образцов ягод (φ) оценивали по изменению массы клубники, находящейся в помещении при комнатной температуре 22-23 °С и влажности окружающего воздуха 68%. Взвешивание ягод производилось непосредственно после окончания сублимационной сушки, а затем через каждые 24 часа в течение трех суток:

$$\varphi = \frac{m_4 - m_3}{m_3} \times 100, \quad (3)$$

где

m_3 – масса клубники непосредственно после окончания сублимационной сушки, г

m_4 – масса клубники через каждые 24 часа в течение трех суток, г

Органолептическая оценка сублимированных ягод

Органолептическую оценку сухих и восстановленных после регидратации сублимированных ягод клубники проводили согласно ГОСТ 32896-2014. Фрукты сушеные. Общие технические условия. Ягоды восстанавливали путем погружения в воду комнатной температуры до полного их обводнения. Далее ягоды извлекали из воды и располагали на сетчатой поверхности для стекания лишней влаги. После чего проводили их органолептическую оценку.

Статистическая обработка данных

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью метода математической статистики.

$$\text{Среднее арифметическое значение: } M = \frac{\sum N}{h}$$

Среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (N - M)^2}{h - 1}}$$

$$\text{Средняя квадратичная ошибка: } m = \frac{\sigma}{\sqrt{h - 1}}$$

Критерий достоверности средней арифметической:

$$t = \frac{M}{m}$$

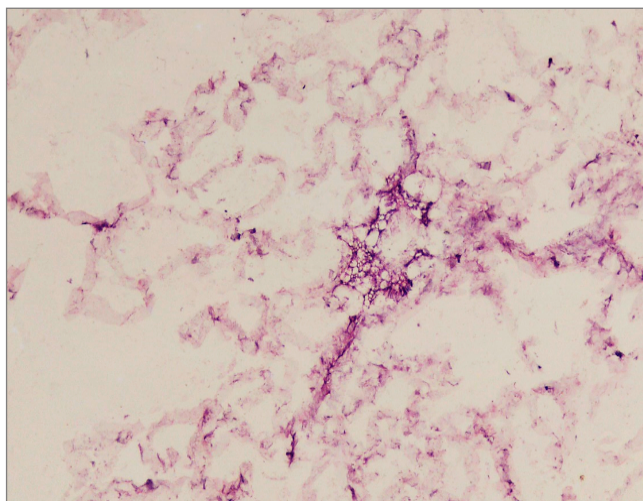
Критерий достоверности между двумя средними арифметическими:

$$t_{\sigma} = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}, \quad (3)$$

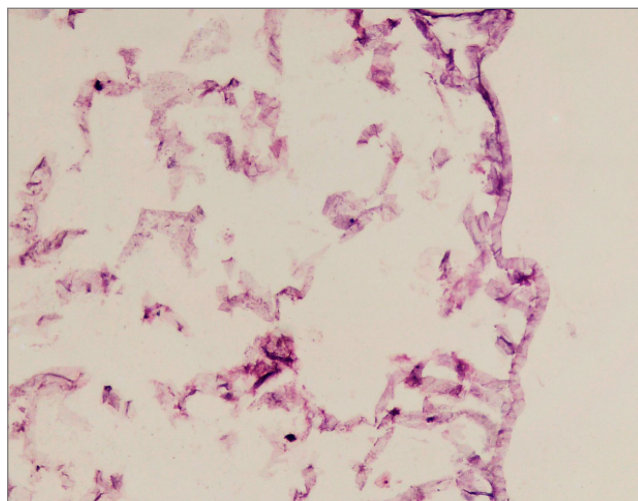
где N – величина значения каждого наблюдения;
 h – число наблюдений.

Результаты и их обсуждение

Анализ микроструктуры тканей ягод, замороженных традиционным способом, показал, что по всей толщине образца, включая внешнюю часть ягод и их глубокие слои, сформировались крупные кристаллические структуры, не окрашиваемые гистологическими красителями. Отмечено, что материал, не воспринимающий использованные красители,



а



б

Рисунок 2. Микроструктура тканей ягоды клубники замороженной традиционным способом. Ув. объектив 20х. а - внутренней части, б - наружной поверхности.

образуется из цитоплазматического содержимого при замораживании ягод (рисунок 2а).

В образцах клубники, замороженной традиционным способом наблюдалось частичное разрушение клеточных стенок как наружной части ягод, так и клеток, формирующих основную массу плода (рис. 2). Использование традиционного режима замораживания привело к фрагментации клеточных оболочек при визуальной оценке препаратов ориентировочно на 60-70% от общего количества внешних клеточных структур. Более прочные клетки сосудистой системы ягод разрушались в меньшей степени.

Анализ изменений микроструктуры тканей ягод клубники, замороженной с помощью микровибрации, проведенный в аналогичных условиях, показал, что по всему объему замороженных ягод, включая их внешнюю часть и более глубокие слои, сформировались крупные структуры кристаллизованной влаги. Так же, как и в случае применения традиционного режима замораживания, в клетках произошли процессы деструкции клеточного материала, проявляющиеся визуально, прежде всего, в частично разрушении клеточных стенок. В то же время степень наблюдаемых деструктивных изменений микроструктуры тканей ягод при использовании данного режима существенно меньше по сравнению с традиционным режимом замораживания и при визуальной оценке препаратов составила ориентировочно 25-35% от общего количества внешних клеточных структур. Снижение степени разрушений отмечено как на внешней части ягод, так и в более глубоких слоях

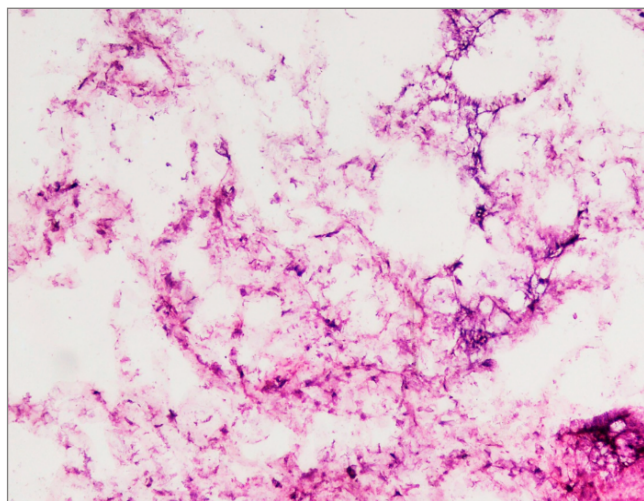
тканей плода (рис. 3).

Срезы сублимированной клубники, замороженной традиционным способом и с помощью микровибрации, представлены на рисунке 4.

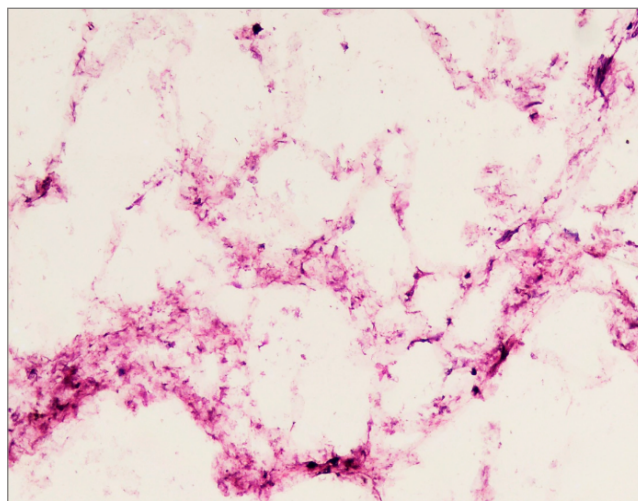
Анализ структурных особенностей сублимированной клубники показал, что срез ягод, замороженных с дополнительной обработкой микровибрации даже в глубине сублимированной ягоды демонстрирует существенно большую сохранность клеточных стенок. Он характеризуется отчетливыми, сохранными и более контрастными клеточными стенками при более мелких цитоплазматических полостях, утративших воду в процессе сублимации.

Для подтверждения микроструктурных изменений проведены исследования по определению структурно-механических характеристик ягод клубники дефростированных после заморозки и регидратированных после сублимационной сушки. Результаты представлены в таблице 1.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что прочность как ягод, замороженных традиционным способом, так и ягод, замороженных с наложением микровибрации после дефростации значительно снижается, по сравнению со свежими ягодами. Отмечено, что в ягодах, замороженных с помощью микровибрации, значения исследуемых показателей более высокие по сравнению с традиционно замороженной клубникой, что свидетельствует о лучшей сохранности структуры ягод. Однако разница в показателях невелика.



а



б

Рисунок 3. Микроструктура тканей ягоды клубники, замороженной с микровибрацией. Ув. объектив 20х, а - внутренняя часть, б - наружная поверхность.



а



б

Рисунок 4. Срез ягоды сублимированной клубники Ув. 5х: а - предварительно замороженные традиционным способом; б - предварительно замороженные с микровибрацией.

Таблица 1

Структурно-механические показатели ягод клубники

	Пenetрация ^а , кПа	Предельное напряжение сдвига ^а , кПа
Свежие ягоды	15,50±0,61	10,41±0,20
Ягоды, дефростированные после традиционной заморозки	0,61±0,03	0,41±0,12
Ягоды, дефростированные после заморозки с микровибрацией	0,71±0,13	0,48±0,03
Регидратированные сублимированные ягоды, предварительно замороженные традиционным способом	0,49±0,14	0,42±0,17
Регидратированные сублимированные ягоды, предварительно замороженные с микровибрацией	0,55±0,03	0,47±0,15

^а Усредненные данные по 15 ягодам каждого вида.

Аналогичная зависимость показателей выявлена при исследовании сублимированных образцов клубники. Механическая прочность сублимированной клубники, предварительно замороженной с микровибрацией, оказалась выше на 8-10% по сравнению с сублимированными ягодами, предварительно замороженными традиционным способом.

Ещё одной важной характеристикой структуры сублимированных продуктов являются сорбционные свойства, такие как степень гидратации при восстановлении и скорости поглощения влаги из окружающей среды (гигроскопичность). Данные по уровню регидратации сублимированных ягод клубники представлены в таблице 2.

После регидратации в течение 5 часов масса сублимированных ягод, замороженных традиционным способом, увеличилась на 73,4%. Масса ягод, подверженные заморозке с дополнительной микровибрацией увеличилась, лишь до 67,7%. Такая разница не является значительной и связана с тем, что более мелкая

капиллярная структура сухих ягод, подверженных микровибрации, препятствует проникновению влаги внутрь в центр ягоды. Далее ягоды находились в воде ещё 2 часа и степень увлажнения ягод обоих вариантов замораживания оказалась практически одинаковой и равной 75%.

Результаты исследования сорбционной способности сублимированных ягод представлены на рисунке 5

В условиях промышленного производства исключительно важную роль играет поглощение влаги сублимированными ягодами из окружающей среды. Этот параметр влияет на выбор технологии упаковки, допустимого времени нахождения ягод на открытом воздухе без упаковки, а также типа упаковочного материала. Исследования гигроскопичности клубники показали, что сублимированная клубника, замороженная с наложением микровибрации, увеличивается в массе за счёт естественного поглощения влаги из воздуха более интенсивно. Для обеспечения сохранности качества высушенных сублимированных ягод их следует упаковывать в

Таблица 2

Уровень поглощения влаги сублимированными ягодами при погружении в воду комнатной температуры

Образец	Средняя масса образцов сублимированных ягод, г	Средняя масса восстановленных образцов, г	Масса поглощенной влаги, г	Доля поглощенной влаги, % к общей массе
Сублимированные ягоды, предварительно замороженные традиционным способом	2,81±0,14	10,71±0,2	7,9±0,1	73,4±0,17
Сублимированные ягоды, предварительно замороженные с микровибрацией	2,31±0,13	7,23±0,14	4,9±0,2	67,7±0,15

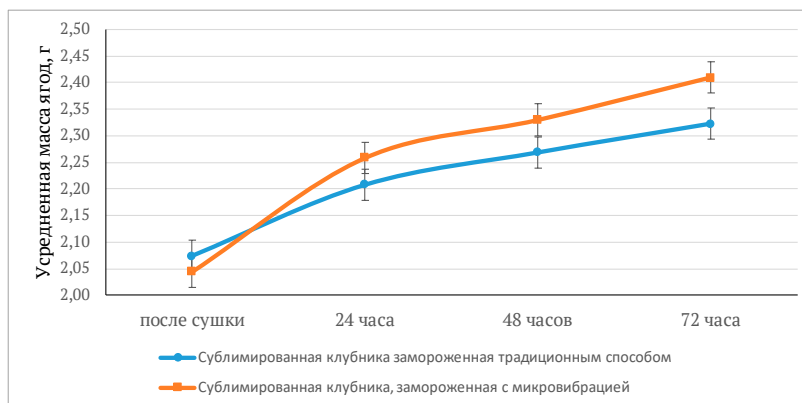


Рисунок 5. Изменение массы сублимированных ягод в процессе хранения на открытом воздухе при температуре 22-23 °C и относительной влажности 68%.

свето-газо-непроницаемую металлизированную полимерную пленку. Такая закономерность является еще одним доказательством факта формирования микрокристаллической структуры и, как следствие, более мелких капилляров в высушенных ягодах. Полученные данные соответствуют известной закономерности увеличения сорбционной способности сухих капиллярно-пористых тел по мере уменьшения размеров капилляров, что приводит к пропорциональному увеличению площади поглощения влаги (Поповский, Бантыш, Ивасюк, 1975, с. 336.; Sagara, 2001, с. 183-190.; Segura, Oyarzún, 2012, с. 2102–2109.; Harnkarnsujarit, Kawai, Watanabe, Suzuki, 2016, с. 10-20.).

Конечной целью получения сухих сублимированных ягод является их использование в пищевой промышленности как самостоятельного продукта, либо в составе рецептур различных пищевых продуктов. В соответствие с этим, проведена органолептическая оценка сублимированных сухих и восстановленных исследуемых ягод.

При дегустации сухих сублимированных ягод до регидратации дегустаторы отметили несколько более яркую окраску у сублимированных ягод после замораживания в обычном режиме. На разрезе (предварительно свежие ягоды были разрезаны пополам, до начала эксперимента) у сублимированных ягод после акустической заморозки лучше сохранилась естественная структура тканей ягод клубники. Сублимированные ягоды двух вариантов представлены ниже на рисунке 6. Дегустаторы не выявили различий во

вкусе и аромате исследуемых образцов.

При органолептической оценке восстановленных сублимированных ягод после регидратации, как и в образцах до регидратации, дегустаторы не выявили заметных отличий между образцами. Дегустаторы улавливали только незначительные отличия по вкусу и цвету в одном или в другом варианте образца. При этом отмечена несколько более плотная консистенция у ягод, предварительно замороженных с микровибрацией.

Выводы

Отличительной особенностью предложенной технологии замораживания является дополнительное воздействие на ткани объекта в процессе заморозки акустических волн, передаваемых через воздушную окружающую среду и вызывающих в тканях микровибрации. В замороженных ягодах формируется мелкокристаллическая структура льда, обеспечивающая сохранность тканевых структур. Воспринимаемые поверхностью замораживаемого объекта колебания распространяются внутрь объекта с затуханием тем большим, чем больше расстояние от его поверхности. По мере замораживания внешних частей объекта, скорость распространения колебаний в них увеличивается (скорость механических волн в твердом теле выше примерно в два раза), а затухание уменьшается. Это позволяет в значительной мере нивелировать влияние формы и взаимного расположения замораживаемых материалов на конечный



а



б

Рисунок 6. Сухие сублимированные ягоды: а – предварительно замороженные традиционным способом, б – предварительно замороженные с микровибрацией.

результат.

Проведенные исследования показали, что замораживание ягод клубники при дополнительном воздействии на ягоды микровибрацией оказывает положительное влияние как на само замороженное сырьё, так и на его структурные характеристики в высушенном сублимацией состоянии.

Выявлено, что замораживание с применением микровибрации повышает механическую прочность как замороженных, так и сублимированных ягод. Это обстоятельство показывает, что микровибрация позволяет повысить сохранность клубники при ее транспортировке и фасовке.

Исследования, проведенные с использованием ягод клубники, позволяют сделать достаточно обоснованный прогноз о том, что заморозка с микровибрацией в сравнении с традиционной заморозкой ягод мелкого размера с плотной оболочкой (смородина, крыжовник, земляника, клюква и т.д.) позволит получить более значимые преимущества при их сублимационной сушке. Особо важную положительную роль это играет для транспортировки хрупких высушенных ягод.

Литература

- Беляева М.А. Оптимизация технологических регламентов и аппаратного оформления процесса замораживания плодов (на примере клубники) // Пищевая промышленность. 2017. №3. С.40-43.
- Воскобойников В.А. Основные методы производства инстант-продуктов // Пищевая промышленность. 2015. №7. С.21-23.
- Дондокова С.А., Битуева Э.Б., Антипов А.В. Использование сублимационной сушки в производстве мясных продуктов // Научное обозрение. Технические науки. 2016. №4. С.37-48.
- Ишевский А.Л., Давыдов И.А. Замораживание как метод консервирования пищевых продуктов // теория и практика переработки мяса. 2007. №2. С.43-59.
- Клочкова Т.И., Шпрах З.С. Организация, масштабирование и оптимизация производства лиофилизированных препаратов // Российский биотерапевтический журнал. 2006. №3, Том 5. С.115-122.
- Колодязная В. С., Кипрушкина Е.И., Бараненко Д.А., Румянцева О.Н., Шестопалова И.А. Продовольственная безопасность и холодильная технология // Вестник МАХ. 2013. №1. С. 24-28.
- Крумлик В.Ю., Остроумов Л.А., Сухих С.А., Кригер О.В. Подбор параметров стабилизации (замораживание и сушка) симбиотического консорциума с целью получения закваски прямого внесения // Техника и технология пищевых производств. 2016. Том. 42. № 3. С. 25-30.
- Овчарова Г.П., Абреч М.Ю., Непорожняя Е.Ю. Функциональные продукты сублимационной сушки // Пищевая промышленность. 2008. №2. С.14-15.
- Поповский В.Г., Бантыш Л.А., Ивасюк Н.Т. Сублимационная сушка пищевых продуктов растительного происхождения. М.: Пищевая промышленность, 1975. 336 с.
- Постольски Я., Грета З. Замораживание пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1974. 607 с.
- Похиленко В.Д., Баранов А.М., Детушев К.В. Методы длительного хранения коллекционных культур микроорганизмов и тенденции развития // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2009. № 4 (12). С.99-121.
- Семёнов Г.В., Булкин М.С., Кузнецов А.В. Современные направления научных исследований и технические решения по интенсификации процесса сублимационной сушки в пищевой промышленности, фармпроизводствах и прикладной биотехнологии (Часть 1) // Вестник МАХ. 2015., №1. С.187-202.
- Семёнов Г.В., Краснова И.С. Сублимационная сушка пищевых продуктов. М.: ДеЛи плюс. 2018. 292 с.
- Сороко О., Усеня Ю. Анализ способов замораживания пищевых продуктов. // Наука и инновации. 2011. №5(99). С.63-67.
- Хвилья С.И. Гистологический метод оценки влияния замораживания и хранения на микроструктуру мяса. // Холодильная техника. 2016. №11. С. 2-5.
- Хвилья С.И., Гиро Т.М. Оценка качества и биологической безопасности мяса и мясных продуктов микроструктурными методами. Саратов.: СГАУ, 2015. 240 с.
- Христюк А.В., Сязин И.Е., Мякинникова Е.И. Технология плодовых и овощных криопорошков // Современные проблемы качества и безопасности продуктов питания в свете требований технического регламента таможенного союза: материалы международной научно-практической конференции (26 марта 2014 г). 2014. С.78-80.
- Burmester K., Pietsch A., Eggers R. (2011). A basic investigation on instant coffee production by vacuum belt drying, Procedia Food Science,

- 1, 1344 – 1352. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.199>.
- Celli G. B., Ghanem A., Su-Ling Brooks M. (2016). Influence of freezing process and frozen storage on the quality of fruits and fruit products, *Food Reviews International*, 32(3), 280-304. <https://doi.org/10.1080/87559129.2015.1075212>.
- Ciurzyńska A., Lenart A. (2011) Freeze-Drying - Application in Food Processing and Biotechnology - a Review, *Pol. J. Food Nutr. Sci*, 61(3), 165–171. <https://doi.org/10.2478/v10222-011-0017-5>.
- Gaidhani K.A., Harwalkar M., Bhambere D., Nirgude P.S. (2015). Lyophilization / freeze drying – a review, *World Journal of Pharmaceutical Research*, 4 (8), 516-543.
- Harnkarnsujarit N., Kawai K., Watanabe M., Suzuki T. (2016). Effects of freezing on microstructure and rehydration properties of freeze-dried soybean curd, *Journal of Food Engineering*, 184, 10-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.03.014>.
- Koroishi E.T., Boss E.A., Wolf Maciel M.R., Filho R.M. (2009). Process development and optimization for freeze-drying of natural orange juice, *Journal of Food Process Engineering*, 32(3), 425-441. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00225.x/>
- Kozak P., Dziki D., Krzykowski A., Rudy S. (2011). Optimization of energy consumption in the freeze drying process of champignon (*Agaricus Bisporus* L.), *TEKA Kom. Mot. i Energ. Roln. – OL PAN*, 134–141.
- Marques L.G., Silveira A.M., Freire J.T. (2006). Freeze-Drying Characteristics of Tropical Fruits, *Drying Technology*, 24(4), 457-463. <https://doi.org/10.1080/07373930600611919>.
- Rey L., May J. (2001). Freeze-drying/Lyophilization of pharmaceutical and biological products. Book reviews, *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, 51, 163–164.
- Sagara Y. (2001). Advances in Transport Phenomena during Freeze-Drying of Food Materials: Fundamentals and Applications, *Food Science and Technology Research*, 7(3), 183-190. <http://dx.doi.org/10.3136/fstr.7.183>.
- Salazar N.A., Alvarez C., Orrego C.E. (2018). Optimization of freezing parameters for freeze-drying mango (*Mangifera indica* L.) slices, *Drying Technology*, 36(2), 192-204. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1315431>
- Segura L.A., Oyarzún C.A. (2012). Experimental evidence of mass transfer mechanisms during freeze-drying in a capillary porous medium, *International Journal of Refrigeration*, 35(8), 2102–2109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.08.014>
- Tarafdar A., Shahi N. Ch., Singh A., Sirohi R. (2017). Optimization of Freeze-Drying Process Parameters for Qualitative Evaluation of Button Mushroom (*Agaricus bisporus*) Using Response Surface Methodology, *Journal of Food Quality*, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2017/5043612>

The Influence of Micro-Vibration on the Structure of Freeze-Dried Strawberry

Gennadiy V. Semenov

*Moscow State University of Food Production
11 Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation
E-mail: sgv47@yandex.ru*

Irina S. Krasnova

*Moscow State University of Food Production
11 Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation
E-mail: ira3891@mail.ru*

Sergey I. Khvylya

*All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry - branch of V.M. Gorbатов
Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Science
12, Kostyakova str., Moscow, 127422, Russian Federation
E-mail: gistolab@yandex.ru*

Dmitry N. Balabolin

*Acoustic Freezing Ltd.
31, Talalikhina str., Moscow, 109316, Russian Federation
E-mail: dbalabolin@gmail.com*

The structure of freeze-dried strawberries, frozen in the traditional method and freeze-dried strawberries frozen with micro-vibration is shown in this research. Micro-vibrations created in the air of the freezer according to a specific program. A digital frequency synthesizer that generates 250 W/m³ electromagnetic field rectangular pulse packets in the frequency bands of 2,500 kHz to 5,000 kHz creates micro-vibrations. Frozen berries were dried on the lab scale freeze dryer SVP-0,36. The primary temperature was minus 30 + 1 °C. Secondary drying was carried out at a temperature of 38–40 °C. The total duration of the drying cycle was 14–16 hours, depending on the size of the strawberries. The final moisture content of the freeze-dried strawberries was 1,5–1,7%. Microstructure, penetration, shear stress, absorption, sorption and sensitive analysis were determined in the freeze-dried samples. It is noted that micro-vibration allows the formation of a fine-crystalline structure of ice and retains the cellular structures in the dried strawberries. Researches of the microstructure showed that freezing with micro-vibration remain 60–70% cellular structures, compared with 25–30% of cellular structures preserved during traditional freezing. It was determined that the use of micro-vibration in freezing allows to improve the structural and mechanical characteristics of freeze-dried strawberries and their preservation during packaging and transportation. The sensitive characteristics of the test samples were almost identical. As a result of the research, it was noted that the greatest effect from micro-vibrations was observed for smaller strawberries.

Keywords: micro-vibration; strawberry; vacuum freeze drying; microstructure; texture analysis; hygroscopic analysis

References

- Belyayeva M.A. Optimizatsiya tekhnologicheskikh reglamentov i apparaturnogo oformleniya protsessa zamorazhivaniya plodov (na primere klubniki) [Optimization of technological regulations and hardware design of the process of freezing fruits (for example, strawberries)] // Pishchevaya promyshlennost'. 2017, №3. P.40–43.
- Voskoboinikov V.A. Osnovnyye metody proizvodstva instant-produktov [The main methods of production of instant-products] // Pishchevaya promyshlennost'. 2015, №7. P.21–23.
- Dondokova S.A., Bituyeva E.B., Antipov A.V. Ispol'zovaniye sublimatsionnoy sushki v proizvodstve myasnykh produktov [The use of freeze-drying for the production of meat products] // Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskiye nauki. 2016, №4. P.37–48.
- Ishevskiy A.L., Davydov I.A. Zamorazhivaniye kak

- metod konservirovaniya pishchevykh produktov [Freezing as a method of food preservation] // Teoriya i praktika pererabotki myasa 2007, №2. P.43-59.
- Klochkova T.I., Shprakh Z.S. Organizatsiya, masshtabirovaniye i optimizatsiya proizvodstva liofilizirovannykh preparatov [Organization, scaling and optimization of the production of lyophilized preparations] // Rossiyskiy bioterapevticheskiy zhurnal. 2006, №3, Tom 5. P.115-122.
- Kolodyaznaya V. S., Kiprushkina Ye.I., Baranenko D.A., Rumyantseva O.N., Shestopalova I.A. Prodovol'stvennaya bezopasnost' i kholodil'naya tekhnologiya [Food safety and refrigeration technology] // Vestnik MAKH. 2013, №1. P. 24-28.
- Krumlikov V.YU., Ostroumov L.A., Sukhikh S.A., Kriger O.V. Podbor parametrov stabilizatsii (zamorazhivaniye i sushka) simbioticheskogo konsortsiума s tsel'yu polucheniya zakvaski pryamogo vneseniya [Choice of stabilization parameters (freezing and drying) of symbiotic consortium to obtain a starter of direct inoculation.] // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. 2016. Tom. 42. № 3. S. 25–30.
- Ovcharova G.P., Abrech M.YU., Neporozhnyaya Ye.YU. Funktsional'nyye produkty sublimatsionnoy sushki [Functional products of freeze-drying] // Pishchevaya promyshlennost'. 2008, №2. P.14-15.
- Popovskiy V.G., Bantysh L.A., Ivasyuk N.T. Sublimatsionnaya sushka pishchevykh produktov rastitel'nogo proiskhozhdeniya. [Freeze drying of foods of plant origin] M.: Pishchevaya promyshlennost', 1975. 336 p.
- Postol'ski Ya., Gruda Z. Zamorazhivaniye pishchevykh produktov. [Freezing food] M.: Pishchevaya promyshlennost', 1974. 607 p.
- Pokhilenko V.D., Baranov A.M., Detushev K.V. Metody dlitel'nogo khraneniya kollektсионnykh kul'tur mikroorganizmov i tendentsii razvitiya [Methods of long-term storage of collection cultures of microorganisms and development trends] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. 2009, № 4 (12). P.99-121.
- Semenov G.V., Krasnova I.S. Sublimatsionnaya sushka pishchevykh produktov [Freeze-drying food]. M.: DeLi plus, 2018. 292 p.
- Semenov G.V., Bulkin M.S., Kuzenkov A.V. Sovremennyye napravleniya nauchnykh issledovaniy i tekhnicheskiye resheniya po intensivatsii protsessа sublimatsionnoy sushki v pishchevoy promyshlennosti, farmproizvodstvakh i prikladnoy biotekhnologii (Chast' 1) [Modern directions of scientific research and technical solutions for the intensification of the process of freeze-drying in the food industry, pharmaceutical production and applied biotechnology (Part 1)] // Vestnik MAKH. 2015, №1. P.187-202.
- Soroko O., Usenya YU. Analiz sposobov zamorazhivaniya pishchevykh produktov [Analysis of methods for freezing food products] // Nauka i innovatsii. 2011, №5(99). P.63-67.
- Khvylya S.I. Gistologicheskiy metod otsenki vliyaniya zamorazhivaniya i khraneniya na mikrostrukturu myasa. [Histological method of assessing the impact of freezing and storage on the microstructure of meat] // Kholodil'naya tekhnika. 2016, №11. P. 2-5.
- Khvylya S.I., Giro T.M. Otsenka kachestva i biologicheskoy bezopasnosti myasa i myasnykh produktov mikrostrukturnymi metodami. [Evaluation of the quality and biological safety of meat and meat products by microstructural methods]. Saratov.: SGAU, 2015. 240 p.
- Khristyuk A.V., Syazin I.Ye., Myakinnikova Ye.I. Tekhnologiya plodovykh i ovoshchnykh krioporoshkov [Technology of fruit and vegetable cryo-powders] // Sovremennyye problemy kachestva i bezopasnosti produktov pitaniya v svete trebovaniy tekhnicheskogo reglamenta tamozhennogo soyuza: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Modern problems of quality and food safety in the light of the requirements of the technical regulations of the Customs Union: materials of the international scientific and practical conference], 2014, pp.78-80.
- Burmester K., Pietsch A., Eggers R. (2011). A basic investigation on instant coffee production by vacuum belt drying, *Procedia Food Science*, 1, 1344 – 1352. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.199>.
- Celli G. B., Ghanem A., Su-Ling Brooks M. (2016). Influence of freezing process and frozen storage on the quality of fruits and fruit products, *Food Reviews International*, 32(3), 280-304. <https://doi.org/10.1080/87559129.2015.1075212>.
- Ciurzyńska A., Lenart A. (2011) Freeze-Drying - Application in Food Processing and Biotechnology - a Review, *Pol. J. Food Nutr. Sci*, 61(3), 165–171. <https://doi.org/10.2478/v10222-011-0017-5>.
- Gaidhani K.A., Harwalkar M., Bhambere D., Nirgude P.S. (2015). Lyophilization / freeze drying – a review, *World Journal of Pharmaceutical Research*, 4 (8), 516-543.
- Harnkarnsujarit N., Kawai K., Watanabe M., Suzuki T. (2016). Effects of freezing on microstructure and rehydration properties of freeze-dried soybean curd, *Journal of Food Engineering*, 184, 10-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.03.014>.
- Koroishi E.T., Boss E.A., Wolf Maciel M.R., Filho R.M. (2009). Process development and optimization for freeze-drying of natural orange juice, *Journal of Food Process Engineering*, 32(3), 425-441. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00225.x/>

- Kozak P., Dziki D., Krzykowski A., Rudy S. (2011). Optimization of energy consumption in the freeze drying process of champignon (*Agaricus Bisporus* L.), *TEKA Kom. Mot. i Energ. Roln.* – OL PAN, 134–141.
- Marques L.G., Silveira A.M., Freire J.T. (2006). Freeze-Drying Characteristics of Tropical Fruits, *Drying Technology*, 24(4), 457-463. <https://doi.org/10.1080/07373930600611919>.
- Rey L., May J. (2001). Freeze-drying/Lyophilization of pharmaceutical and biological products. Book reviews, *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, 51, 163–164.
- Sagara Y. (2001). Advances in Transport Phenomena during Freeze-Drying of Food Materials: Fundamentals and Applications, *Food Science and Technology Research*, 7(3), 183-190. <http://dx.doi.org/10.3136/fstr.7.183>.
- Salazar N.A., Alvarez C., Orrego C.E. (2018). Optimization of freezing parameters for freeze-drying mango (*Mangifera indica* L.) slices, *Drying Technology*, 36(2), 192-204. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1315431>
- Segura L.A., Oyarzún C.A. (2012). Experimental evidence of mass transfer mechanisms during freeze-drying in a capillary porous medium, *International Journal of Refrigeration*, 35(8), 2102–2109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.08.014>
- Tarafdar A., Shahi N. Ch., Singh A., Sirohi R. (2017). Optimization of Freeze-Drying Process Parameters for Qualitative Evaluation of Button Mushroom (*Agaricus bisporus*) Using Response Surface Methodology, *Journal of Food Quality*, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2017/5043612>