

УДК 664.08.037

Эффект ультразвукового и микроволнового воздействия на процесс замораживания яблок

М. К. КУРБОНОВА¹, М. С. БУЛЬКРАН²,
П. С. АСТРЕЛИНА³, канд. техн. наук Д. А. БАРАНЕНКО⁴

¹kurbonova.m.k@yandex.ru, ²bmohamedsaid82@gmail.com,

³astrelinapolina@gmail.com, ⁴denis.baranenko@itmo.ru

Университет ИТМО

Применение ультразвукового и микроволнового воздействия являются потенциальными дополнительными к холоду средствами повышения показателей качества замороженной продукции. Объект исследования — яблоки российские сезонные, замораживаемые с дополнительным ультразвуковым или микроволновым воздействием. Исследовано влияние микроволнового и ультразвукового воздействия определенной частоты, мощности и продолжительности на растительное сырьё в процессе замораживания. Анализ температурных кривых показал, что температура образования кристаллов во всех вариантах составляла -5°C . Однако при ультразвуковом воздействии была более выражена разница между температурой образования кристаллов и начальной температурой заморзания. Температура образования кристаллов обработанного микроволнами образца значительно ниже (-5°C у контрольного и -9°C у обработанного образца). Было отмечено, что ультразвуковая обработка сократила потери влаги приблизительно на 5 %. Микроструктура образцов, замороженных с применением ультразвукового воздействия, была более плотной и компактной по сравнению с контрольными образцами, что, в свою очередь, является следствием образования кристаллов льда меньшего размера и их более равномерного распределения. Применение микроволнового излучения при замораживании требует дополнительного исследования. Применение ультразвука позволяет сохранить микроструктуру, уменьшить потерю влаги и изменения показателей качества яблок в результате замораживания.

Ключевые слова: замораживание, ультразвук, микроволновое излучение, криопротекторы, растительное сырьё.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 21.02.2023, одобрена после рецензирования 03.03.2023, принята к печати 10.03.2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-78-84

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Курбонова М. К., Булькран М. С., Астрелина П. С., Бараненко Д. А. Эффект ультразвукового и микроволнового воздействия на процесс замораживания яблок. // Вестник Международной академии холода. 2023. № 1. С. 78–84.

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-78-84

Ultrasonic and microwave exposure for freezing apples

M. K. KURBANOVA¹, M. S. BULKRAN²,
P. S. ASTRELINA³, Ph. D. D. A. BARANENKO⁴

¹kurbonova.m.k@yandex.ru, ²bmohamedsaid82@gmail.com, ³astrelinapolina@gmail.com, ⁴denis.baranenko@itmo.ru

ITMO University

The use of ultrasonic and microwave exposure are potential means of improving the quality of frozen products in addition to cold. The object of the study is Russian seasonal apples, frozen with additional ultrasonic or microwave exposure. The effect of microwave and ultrasonic exposure of a certain frequency, power, and duration on plant materials during freezing has been studied. An analysis of the temperature curves showed that the temperature of crystal formation in all variants was -5°C . However, with ultrasonic treatment the difference between the crystal formation temperature and the initial freezing temperature was more pronounced. The crystal formation temperature of the microwaved sample is significantly lower (-5°C for the control and -9°C for the treated sample). It was noted that sonication reduced moisture loss by approximately 5 %. The microstructure of samples frozen using ultrasonic treatment was denser and more compact compared to control samples, which, in turn, is a consequence of the formation of smaller ice crystals and their more uniform distribution. The use of microwave radiation in freezing requires further research. The use of ultrasound allows to preserve the microstructure, reduce the loss of moisture and changes in the quality of apples as a result of freezing.

Keywords: freezing, ultrasound, microwave, cryoprotectors, plant raw materials.

Article info:

Received 21/02/2023, approved after reviewing 03/03/2023, accepted 10/03/2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-78-84

Article in Russian

For citation:

Kurbanova M. K., Bulkran M. S., Astrelina P. S., Baranenko D. A. Ultrasonic and microwave exposure for freezing apples. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No 1. p. 78–84. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-78-84

Введение

Замораживание является одним из наиболее широко используемых способов консервирования в пищевой промышленности, отрицательные температуры позволяют гарантировать высокие органолептические показатели качества (текстура, вкус, внешний вид) и пищевую ценность (витамины, минералы) продукта. Замораживание снижает скорость химических реакций [1] и обеспечивает контроль активности микроорганизмов [2]. Однако повреждение клеточных структур в результате замораживания является серьезной проблемой для пищевой промышленности. Для минимизации клеточных повреждений применяется несколько стратегий — от традиционных до инновационных. Традиционные обычно включают использование наиболее эффективных условий замораживания (т. е. использование высокой возможности скорости замораживания) и предварительную обработку перед замораживанием (введение в тканевую систему различных веществ, таких как CaCl_2 , сахароза, пектин, другие криопротекторы и минералы). Более высокая скорость замораживания предпочтительнее медленной, поскольку многочисленные мелкие кристаллы льда образуются как во внутриклеточных, так и во внеклеточных структурах и приводят к меньшему перемещению воды из внутренней части клеток во внеклеточное пространство. Таким образом, качество замороженного продукта обычно лучше, когда образуются более мелкие кристаллы льда [3], поскольку более крупные повреждают клеточные мембраны из-за расширения воды во время фазового перехода [4]. Мелкие кристаллы обычно получают в результате более быстрых процессов замораживания, однако известно, что они требуют больших затрат энергии [5]–[7].

Чтобы избежать нежелательных эффектов недостаточно быстрого замораживания, предлагаются некоторые новые технологии для улучшения качества замороженных продуктов путем получения мелких и равномерно распределенных кристаллов льда, такие как замораживание при высоком давлении [8], замораживание с дополнительным воздействием электрических, магнитных [9], микро- и ультразвуковых волн [10], замораживание погружением в CO_2 [11, 12]. Ультразвук и микроволны признаются чрезвычайно перспективным дополнением к технологии замораживания для обеспечения процессов мгновенного льдообразования и последующей кристаллизации [13].

Однако существует недостаток информации о физических механизмах, вовлеченных в улучшение процесса замораживания с помощью ультразвука и микроволн. Отсутствует информация о влиянии замораживания с дополнительным воздействием ультразвука или микроволн на процесс замораживания яблок и их показатели качества. Целью данного исследования является определение влияния ультразвуковой и микроволновой

обработки на яблоки при замораживании. Для достижения цели работы исследовали влияние ультразвукового и микроволнового воздействия определенной частоты, мощности и продолжительности на температуру яблок в процессе замораживания и pH, потери влаги и структуру после размораживания.

Материалы и методы

Для проведения исследований были использованы свежие сезонные яблоки российского производства.

Ультразвуковая обработка.

Предварительно яблоко нарезали на прямоугольные кусочки с параметрами $5 \times 1,5 \times 1,5$ см. С одной стороны в образец вводили сонотрод на глубину примерно 2,5 см, с противоположной стороны вводили датчик цифрового термометра на примерно такую же глубину.

Образец помещали в морозильную камеру с температурой -30°C . Обработку ультразвуком начинали при достижении температуры в толще образца 1°C . Режим воздействия (был выбран на основании аналогичных работ): 8 мин, с периодичностью импульсов 30/30 с, частота 30 кГц, мощность 7 Вт. Ультразвуковая обработка проводилась при помощи прибора Bandelin SONOPULS mini20.

Обработка микроволновым излучением.

Аналогичные кусочки яблок помещали в кальций хлорид 6-водный с температурой -30°C , затем в микроволновую печь. Мощность излучения составляла 700 Вт. Обработку проводили 4 раза по 30 с, с интервалом 10 с и 4 раза по 1 мин с интервалом 5 с. Затем образцы также помещались в морозильную камеру с температурой -30°C , фиксировалось изменение их температуры.

Температурные кривые.

На протяжении всего времени замораживания фиксировались изменения температуры, данные были использованы в дальнейшем при построении температурных кривых. Контрольные образцы замораживали без дополнительного воздействия, также фиксируя изменение температуры внутри образца.

Измерение pH.

Для определения pH использовали стандартный pH-метр. 10 г размороженного образца гомогенизировали со 100 мл деионизованной воды, после чего измерялся pH отфильтрованной смеси.

Влагоудерживающая способность.

Потери воды в процессе оттаивания рассчитывали при помощи уравнения [14]:

$$DL = \frac{w_t - w_0}{w_s} \cdot 100\%,$$

где w_t — масса влажной бумаги в момент времени t , w_0 — масса сухой бумаги, w_s — масса замороженного образца.

Замороженные образцы помещали на предварительно взвешенную фильтровальную бумагу и оставляли оттаивать при температуре окружающей среды. Затем потери воды рассчитывали путем периодического взвешивания бумаги до тех пор, пока не было достигнуто постоянное значение.

Микроструктура.

Микроструктуру обработанных образцов наблюдали с помощью светового микроскопа. Оттаявшие образцы нарезали на кусочки размером менее 12 мкм с использованием прибора для криосекции. Образцы были исследованы на увеличениях 20 и 40.

Анализ текстурного профиля.

Был проведен анализ профиля текстуры оттаявших образцов. Для проведения эксперимента использовали универсальную испытательную машину EZ Test (Shimadzu, Япония) с использованием датчика нагрузки. Образцы дважды сжимали при испытательной скорости 2 мм/с [14].

Результаты и их обсуждение

Оценка скорости замораживания.

В ходе работы получены кривые зависимости температуры в толще образца от времени замораживания. Для обоих типов обработки наблюдалась общая тенденция: замораживание опытных образцов занимало больше времени, чем контрольных.

Литературные данные свидетельствуют о том, что повышение скорости теплопередачи и массообмена, вызванное воздействием ультразвука, тесно связано со скоростью замораживания и может ускорять этот процесс [15, 16]. Данный факт объясняется тем, что образующиеся в среде кавитационные пузырьки способны улучшать массообмен и повышать теплопередачу с поверхности [17]. Однако также отмечается, что высокая интенсивность воздействия может привести к возникновению теплового эффекта на поверхности образцов, что снижает скорость охлаждения [18].

Помимо этого, немаловажную роль играет природа обрабатываемого сырья, в особенности для ультразвукового воздействия, т. к. ультразвук является механической волной и коэффициент его ослабления при распространении волны различается в разных средах. В частности, при выборе растительного сырья следует учитывать, что наличие пустот в тканях растений способствует рассеиванию волны, а их количество в тканях разных растений может значительно отличаться (так в яблоках содержание воздуха составляет около 20–25 %, в то время как в картофеле этот показатель равен 2 %) [19].

Сравнение температурных кривых опытного и контрольного образцов показало, что температура образования кристаллов не имела существенных отличий (-5°C). Однако в случае обработанного ультразвуком образца разница между температурой образования кри-

сталлов и начальной температурой замерзания более выражена (рис. 1).

Предположительно одной из причин может являться медленный характер процесса, что позволило зафиксировать такое изменение температуры. Помимо этого, некоторые исследователи указывают на задержку во времени между схлопыванием кавитационных пузырьков и возникновением кристаллов льда [20], что также могло увеличить период между инициацией образования кристаллов и началом замораживания.

Полученные данные свидетельствуют о необходимости оптимизации режимов воздействия для снижения температурного эффекта, что нежелательно для процесса замораживания. Интенсивность ультразвукового воздействия играет в этом решающую роль, поскольку результаты предыдущих работ демонстрировали прямую зависимость между интенсивностью воздействия, кавитацией и тепловым эффектом. Для обеспечения баланса между кавитационными и тепловым эффектом ультразвука необходим тщательный подбор режима воздействия. Zhu Z. в работе [21] было отмечено, что для каждой стадии замораживания существует своя оптимальная интенсивность воздействия, поэтому целесообразно подбирать режим воздействия с меняющимися параметрами.

В случае образцов, обработанных микроволновым воздействием, наблюдался больший экзотермический пик при образовании кристаллов льда по сравнению с контролем (рис. 2). Помимо этого, температура образования кристаллов опытных образцов была значительно ниже (-5°C у контроля; -9°C у обработанных образцов).

Авторами Zhang L., Yang Z., Deng Q. в работе [22] было выявлено, что импульсное магнитное воздействие значительно снижает температуру образования кристаллов льда в тканевой жидкости огурца. Предположительно, этот факт объясняется наличием в обрабатываемой матрице заряженных частиц, воздействие магнитного поля на которые увеличивает их вибрацию, что приводит к повышенной теплопередаче и ингибированию образования водяных кластеров и кристаллов льда.

Влияние на температуру образования кристаллов может также оказывать ряд внутримолекулярных перестроек вещества, в частности полисахаридов и белков. В присутствии микроволн молекулы проявляют враща-

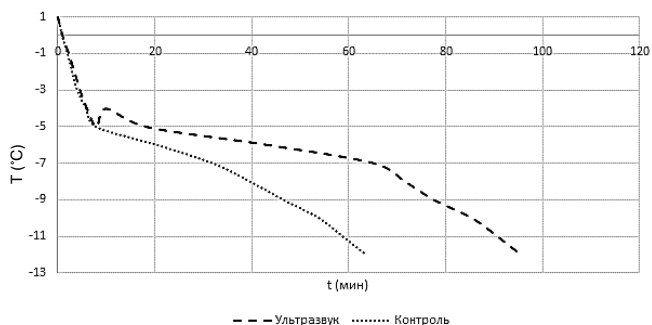


Рис. 1. График изменения температуры образцов при обычном замораживании и при замораживании с ультразвуковым воздействием

Fig. 1. Temperature changes of samples during normal freezing and freezing with ultrasound exposure

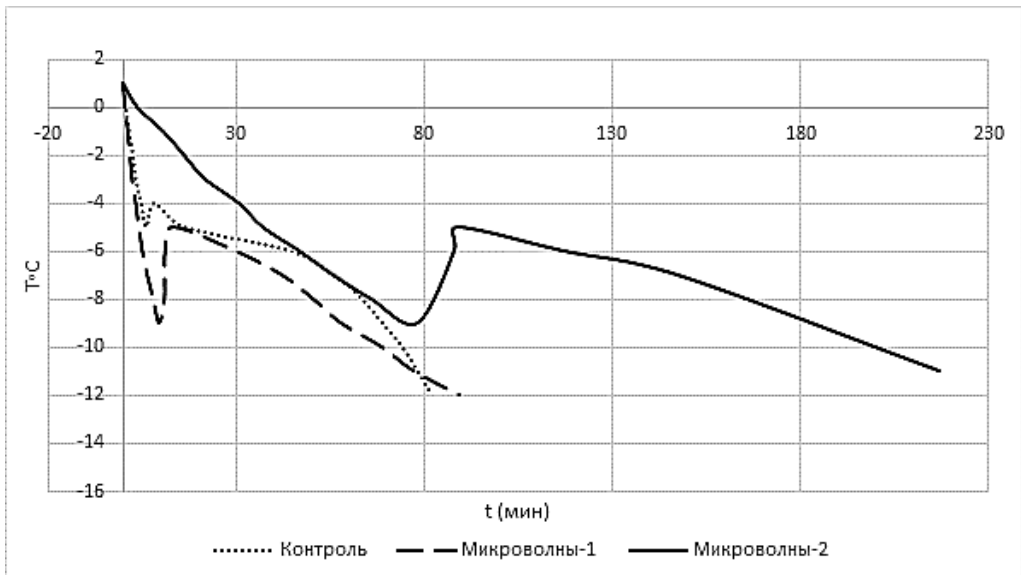


Рис. 2. График изменения температуры образцов при обычном замораживании и при замораживании с микроволновым воздействием. (Прим. «Микроволны-1» — обработка 4 раза по 30 с с интервалом 10 с; «Микроволны-2» — обработка 4 раза по 1 мин с интервалом 5 с; «Контроль» — образец замораживался без дополнительного воздействия)

Fig. 2. Temperature changes of the samples during normal freezing and freezing with microwave exposure. (Note: Microwaves-1 — Treatment four times for 30 seconds with an interval of 10 seconds; Microwaves-2 — Treatment four times for one minute with an interval of five seconds; Control — the sample was frozen without additional exposure)

тельное движение, и микроволновая энергия преобразуется в кинетическую и межмолекулярную. Так, например, было показано влияние микроволнового излучения на крахмальные гранулы семян лотоса, в результате чего последние могли агрегироваться с некрахмалистыми компонентами по мере увеличения плотности микроволновой мощности [23, 24]. Помимо крахмала изменяются также межмолекулярные связи белков [25]. Во всех приведенных работах акцентируется внимание на изменение слабых межмолекулярных воздействий (водородные и дисульфидные связи, силы Ван-дер-Ваальса).

Общее время замораживания для обработанных образцов превышало данный показатель у контрольной группы. При этом между длительностью воздействия, общим временем замораживания и длительностью фазового перехода наблюдалась прямая зависимость. Тенденция к сокращению скорости замораживания растительного сырья при микроволновой обработке наблюдалась и в других исследованиях [26, 27].

Xanthakis с соавт. также отмечали, что увеличение мощности микроволнового воздействия способствует снижению степени переохлаждения (состояние, при ко-

тором происходит рост кристаллов льда), что объясняется высокой чувствительностью процесса кристаллообразования к внешним воздействиям. Предположительно, электромагнитные волны стимулируют преждевременное образование кристаллов льда [27].

Оценка pH образцов и их влагоудерживающей способности.

Измерение уровня pH образцов показало различия между опытными и контрольными образцами (табл. 1). Изменение pH образцов, в первую очередь, объясняется длительностью замораживания. Небезосновательно предполагать, что чем меньше времени занимает процесс замораживания, тем меньшее влияние он оказывает на pH среды [28].

Изменение pH также тесно связано с таким показателем как водоудерживающая способность (табл. 2).

Потеря влаги из клеток приводит к увеличению концентрации протонов H⁺. Когда растительные клетки перестают дышать, начинается расщепление гликогена, вырабатываются протоны H⁺, что может снизить значение pH [29]. Результаты эксперимента подтверждают этот факт: чем больше потеря влаги образцом, тем ниже его pH.

Таблица 1
Сравнение с контролем pH образцов после каждого типа обработки

Table 1 Comparing pH of samples with the control after each type of treatment			
	pH		pH
Контроль	4,5	Контроль	3,5
Ультразвуковая обработка	4,7	Микроволновая обработка	3,4

Таблица 2
Потери влаги образцами при таянии

Table 2 Moisture loss of samples during melting			
	Потери воды при таянии, %		Потери воды при таянии, %
Контроль	49,2	Контроль	9,5
Ультразвуковая обработка	44,2	Микроволновая обработка	17,0

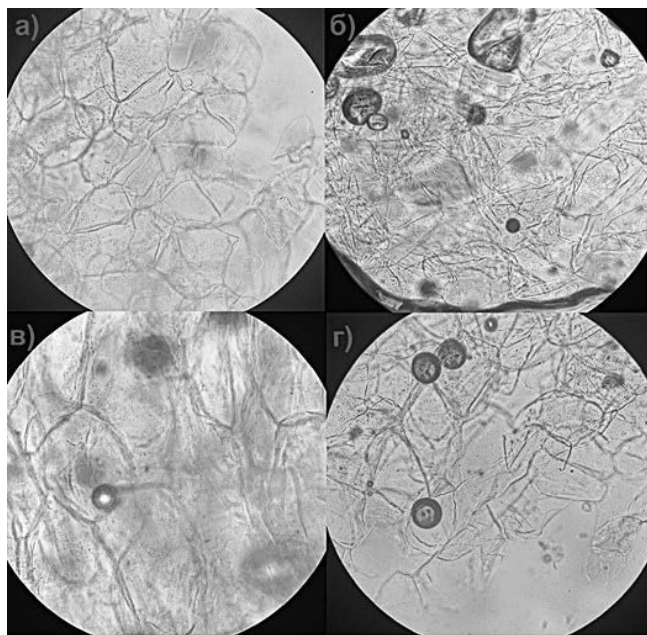


Рис. 3. Микроструктура образцов яблока, замороженных с применением ультразвукового воздействия и без него: а — микроструктура обработанного образца, увеличение в 200 раз; б — микроструктура контрольного образца, увеличение в 200 раз; в — микроструктура обработанного образца, увеличение в 400 раз; г — микроструктура контрольного образца, увеличение в 400 раз

Fig. 3. Microstructure of apple samples frozen with and without ultrasound exposure: a — microstructure of the treated sample, magnification by 200 times; б — microstructure of the control sample, magnification by 200 times; в — microstructure of the treated sample, magnification by 400 times; г — microstructure of the control sample, magnification by 400 times

Было отмечено, что ультразвуковая обработка сократила потери влаги приблизительно на 5%. Такой же эффект ультразвукового воздействия был показан и в более ранних работах: обработка образцов картофеля ультразвуком частотой 20–40 кГц приводила к сокращению потери влаги на 5–7% [30].

Обработка микроволновым излучением в этом отношении оказалась менее эффективной, показатель потери воды при таянии опытного образца значительно превысил таковой у контрольного. На данный момент литературных сведений об оптимальных параметрах микроволнового воздействия для замораживания продуктов недостаточно. Предполагается, что дальнейшая работа по оптимизации параметров значительно улучшит данные показатели.

Оценка микроструктуры образцов и характеристики текстурного профиля.

Исследование структуры клеток было проведено для оценки степени их повреждения в результате замораживания. На рис. 3 приведены изображения со светового микроскопа опытного и контрольного образцов.

Отчетливо видно, что структура контрольных образцов была нарушена, наблюдается фрагментация, разрывы клеток, а также частицы разрушенных клеточных стенок. В то время как в обработанных образцах видна целостная клеточная структура, повреждения ткани минимальны. Данные микроскопии дополнительно под-

тверждаются влагоудерживающей способностью образцов, которая была рассмотрена выше. Подверженные более сильному разрушению ткани теряют больше влаги при таянии, чем опытные.

Использование ультразвукового воздействия для сохранения клеточной структуры исследуется сравнительно недавно. Основным эффектом ультразвукового замораживания является уменьшение кристаллов льда вследствие кавитации и высокочастотной вибрации, в результате чего образующиеся кристаллы не разрушают клеточную структуру [16, 30, 31].

Полученные данные соотносятся с ранними исследованиями, которые свидетельствуют о положительном влиянии ультразвука на качество замораживаемого продукта. Zhu с соавт. было отмечено, что микроструктура образцов картофеля, на которые оказывалось ультразвуковое воздействие была более плотной по сравнению с контрольными образцами, что, в свою очередь, авторы объясняют следствием образования кристаллов льда меньшего размера и их более равномерного распределения [30].

Выделяют два основных механизма нарушения текстуры растительных тканей: механическое повреждение плазматической мембраны кристаллами льда и разрушение клеточной стенки, последнее, в свою очередь, ведет к разрушению жесткой структуры и высвобождению в межклеточное пространство ферментов клетки, способных гидролизовать пектины и гемицеллюлозы, что является дополнительным деструктивным фактором [32].

Исследование структурно-механических характеристик образцов показало, что применение ультразвуковой обработки привело к увеличению твердости образца и меньшей упругости (рис. 4) — свойства, близкие к характеристикам свежего яблока. Для обработанного образца значение твердости достигало 35 Н, для контрольного — 26 Н.

Аналогичные результаты были получены N. Islam с соавт., исследовавших эффект замораживания с дополнительным ультразвуковым воздействием на грибах. Контрольные образцы в этом исследовании обладали большей когезивностью, что может быть связано с миграцией влаги в межклеточное пространство в результате разрушения клеток [14].

Более высокую твердость обработанных образцов связывают также с меньшим размером образующихся в результате замораживания кристаллов. Схожий вид кривой, характеризующей твердость исследуемого образца, был получен при изучении влияния замораживания с ультразвуковым воздействием на ягоды черники. Обработка образцов снизила показатель твердости по сравнению со свежими ягодами в два раза, в то время как замораживание без дополнительных вмешательств снизило этот показатель в три раза [33].

Заключение

Данное исследование показало, что предварительная обработка ультразвуковым воздействием способна в значительной мере влиять на качество замороженного продукта. Данные текстурного анализа, показатель влагоудерживающей способности и микрофотографии клеточной структуры образцов свидетельствуют о положительном эффекте ультразвука на лучшую сохранность структуры растительного сырья при замораживании.

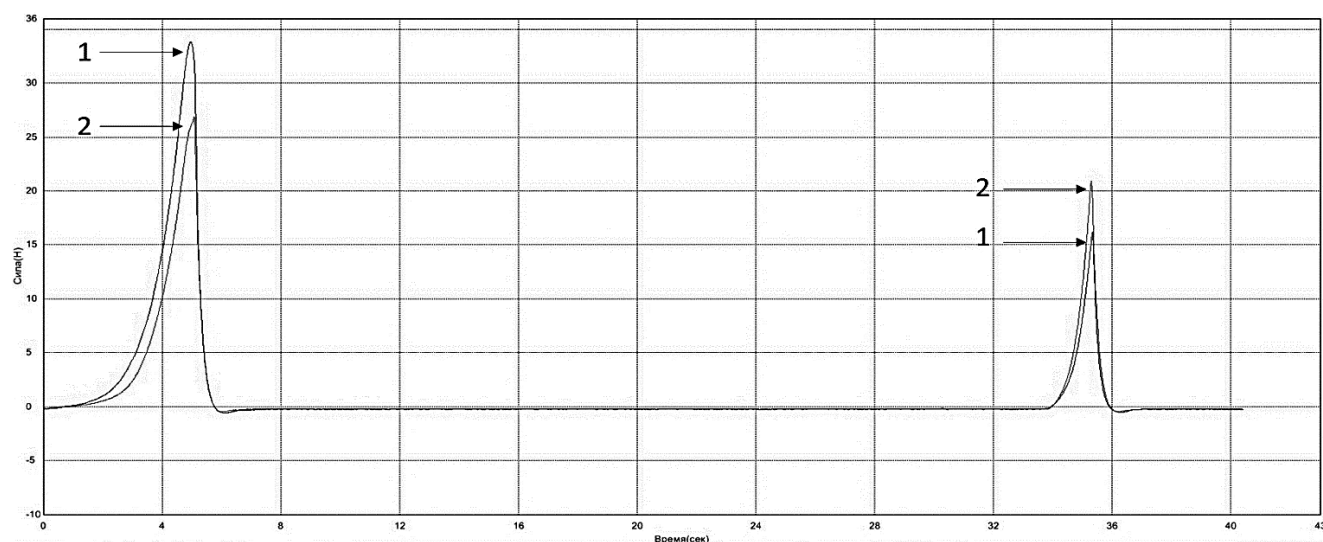


Рис. 4. Исследование структурно-механических характеристик образцов путем сжатия:

1 — образец, обработанный ультразвуком; 2 — контрольный образец

Fig. 4. Texture profile of the samples by compression: 1 — sample treated by ultrasound; 2 — control sample

Дальнейшая работа должна быть направлена на оптимизацию параметров воздействия (интенсивность и время воздействия) для сокращения общего времени замораживания и минимизации теплового эффекта. При этом важно сохранить положительный эффект ультразвука на текстурные показатели.

Результаты замораживания растительного сырья с предварительной микроволновой обработкой требуют более тщательных исследований. Немногочисленные

работы свидетельствуют о потенциальных положительных эффектах микроволновой обработки при замораживании. Большая разница в температурах образования кристаллов у опытного и контрольного образцов свидетельствует о значительных теплофизических эффектах. Однако требуется накопление теоретической и экспериментальной базы для выявления соответствующих закономерностей и определения оптимальных режимов воздействия.

Литература/References

- McFetridge J., Lim M., Liesebach J. Frozen Food Components and Chemical Reactions. Handbook of Frozen Foods. CRC Press, 2004.
- Bremer P. J., Ridley S. C. Safety of Frozen Foods. Handbook of Frozen Foods / ed. Hui Y. H. (Yiu H.). New York: Marcel Dekker, 2004. P. 595–618.
- Delgado AE, and Sun DW. Heat and mass transfer for predicting freezing processes, a review. *Journal of Food Engineering*, 2000. 47: 157–174. [Electronic resource]. URL: <http://www.sciencedirect.com/reference/73813> (accessed: 13.06.2022).
- Sadot M. et al. Microwave assisted freezing part I: Experimental investigation and numerical modeling. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. Elsevier, 2020. Vol. 62, No October 2019. P. 102360.
- Carrick Erskine Devine, R. Graham Bell S. L. Red meats. *Freezing Effects on Food Quality*. New York, 1996. P. 51–84.
- Chourot J. M. et al. Technical and economical model for the freezing cost comparison of immersion, cryomechanical and air blast freezing processes. *Energy Conversion and Management*. Pergamon, 2003. Vol. 44, no 4. P. 559–571.
- Dempsey P., Bansal P. The art of air blast freezing: Design and efficiency considerations. *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 41. P. 71–83.
- LeBail A. et al. High pressure freezing and thawing of foods: a review. *International Journal of Refrigeration*. Elsevier, 2002. Vol. 25, no 5. P. 504–513.
- Woo M. W., Mujumdar A. S. Effects of electric and magnetic field on freezing and possible relevance in freeze drying. *Drying Technology*. 2010. Vol. 28, no 4. P. 433–443.
- Jha P. K. et al. Effect of innovative microwave assisted freezing (MAF) on the quality attributes of apples and potatoes. *Food Chemistry*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 309. P. 125594.
- Xu B., Zhang M., Ma H. Food freezing assisted with ultrasound. *Ultrasound: Advances in Food Processing and Preservation*. Academic Press, 2017. P. 293–321.
- Xu Z. et al. Freezing by immersion in liquid CO₂ at variable pressure: Response surface analysis of the application to carrot slices freezing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. Elsevier, 2014. Vol. 22. P. 167–174.
- Singla M., Sit N. Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. Elsevier, 2021. Vol. 73. P. 105506.
- Islam M. N. et al. The effect of ultrasound-assisted immersion freezing on selected physicochemical properties of mushrooms. *International Journal of Refrigeration*. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 42. P. 121–133.
- Shi Z. et al. The effects of ultrasonic treatment on the freezing rate, physicochemical quality, and microstructure of the back muscle of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *LWT*. Academic Press, 2019. Vol. 111. P. 301–308.
- Astráin-Redín L. et al. Direct contact ultrasound assisted freezing of chicken breast samples. *Ultrasonics Sonochemistry*. Elsevier B. V., 2021. Vol. 70.

17. Martínez-Ramos T., Corona-Jiménez E., Ruiz-López I. I. Analysis of ultrasound-assisted convective heating/cooling process: Development and application of a Nusselt equation. *Ultrasonics Sonochemistry*. Elsevier B. V., 2021. Vol. 74.
18. Kiani H., Sun D. W. Numerical simulation of heat transfer and phase change during freezing of potatoes with different shapes at the presence or absence of ultrasound irradiation. *Heat and Mass Transfer*. [Wärme- und Stoffübertragung]. Springer Verlag, 2018. Vol. 54, no 3. P. 885–894.
19. Zhu Z. et al. Freezing Efficiency and Quality Attributes as Affected by Voids in Plant Tissues During Ultrasound-Assisted Immersion Freezing. *Food and Bioprocess Technology*. Springer New York LLC, 2018. Vol. 11, no 9. P. 1615–1626.
20. Zhang P., Zhu Z., Sun D. W. Using power ultrasound to accelerate food freezing processes: Effects on freezing efficiency and food microstructure. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Taylor and Francis Inc., 2018. Vol. 58, no 16. P. 2842–2853.
21. Zhu Z. et al. Effects of micro-nano bubbles on the nucleation and crystal growth of sucrose and maltodextrin solutions during ultrasound-assisted freezing process. *LWT*. Academic Press, 2018. Vol. 92. P. 404–411.
22. Zhang L., Yang Z., Deng Q. Effects of pulsed magnetic field on freezing kinetics and physical properties of water and cucumber tissue fluid. *Journal of Food Engineering*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 288.
23. Tao Y. et al. Structural changes of starch subjected to microwave heating: A review from the perspective of dielectric properties. *Trends in Food Science and Technology*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 99. P. 593–607.
24. Wang W., Zheng B., Tian Y. Functional group changes and chemical bond-dependent dielectric properties of lotus seed flour with microwave vacuum drying. *Journal of Food Science*. Blackwell Publishing Inc., 2020. Vol. 85, no 12. P. 4241–4248.
25. Lamacchia C., Landriscina L., D'Agnello P. Changes in wheat kernel proteins induced by microwave treatment. *Food Chemistry*. Elsevier Ltd, 2016. Vol. 197. P. 634–640.
26. Jha P. K. et al. Effect of innovative microwave assisted freezing (MAF) on the quality attributes of apples and potatoes. *Food Chemistry*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 309.
27. Xanthakis E. et al. Innovative and low energy microwave assisted freezing process for high quality foods. *Refrigeration Science and Technology*. International Institute of Refrigeration, 2015. P. 2580–2586.
28. Zhang M. et al. Influence of ultrasound-assisted immersion freezing on the freezing rate and quality of porcine longissimus muscles. *Meat Science*. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 136. P. 1–8.
29. Zhao Y. et al. Numerical and experimental study on the quick freezing process of the bayberry. *Food and Bioprocess Technology*. Institution of Chemical Engineers, 2020. Vol. 119. P. 98–107.
30. Zhu Z., Zhang P., Sun D. W. Effects of multi-frequency ultrasound on freezing rates and quality attributes of potatoes. *Ultrasonics Sonochemistry*. Elsevier B. V., 2020. Vol. 60.
31. Shi Z. et al. The effects of ultrasonic treatment on the freezing rate, physicochemical quality, and microstructure of the back muscle of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *LWT*. Academic Press, 2019. Vol. 111. P. 301–308.
32. Jha P. K. et al. Assessment of freeze damage in fruits and vegetables. *Food Research International*. Elsevier Ltd, 2019. Vol. 121. P. 479–496.
33. Nowak K. W., Zielinska M., Waszkielis K. M. The effect of ultrasound and freezing/thawing treatment on the physical properties of blueberries. *Food Science and Biotechnology*. The Korean Society of Food Science and Technology, 2019. Vol. 28, no 3. P. 741–749.

Сведения об авторах

Курбонова Маликахон Комилжоновна

Аспирант факультета биотехнологий Университета ИТМО, 191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, kurbonova.m.k@yandex.ru

Булькран Мохамед Саид

К. т. н., ассистент факультета биотехнологий Университета ИТМО, 191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, bmohamedsaid82@gmail.com

Астрелина Полина Сергеевна

Студент факультета биотехнологий Университета ИТМО, 191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, astrelinapolina@gmail.com

Бараненко Денис Александрович

К. т. н., доцент факультета биотехнологий Университета ИТМО, 191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, denis.baranenko@itmo.ru

Information about authors

Kurbonova Malikakhon K.

Postgraduate of Faculty of Biotechnology (BioTech), ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, kurbonova.m.k@yandex.ru

Boulkrane Mohamed S.

PhD, assistant of Faculty of Biotechnology (BioTech), ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, st. Lomonosov, 9, bmohamedsaid82@gmail.com

Astrelina Polina S.

Student of the Faculty of Biotechnology (BioTech), ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, st. Lomonosov, 9, astrelinapolina@gmail.com

Baranenko Denis A.

Ph. D., Associate Professor of Faculty of Biotechnologies (BioTech), ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, denis.baranenko@itmo.ru



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»