

УДК 664.08.037

## Влияние ультразвука на процесс замораживания и качество замороженных фруктов и овощей

Канд. техн. наук Л. Ч. БУРАК<sup>1</sup>, А. Н. САПАЧ<sup>2</sup>, М. И. ПИСАРИК<sup>3</sup>

<sup>1</sup>leonidburak@gmail.com, <sup>2</sup>sapabra7@gmail.com, <sup>3</sup>info@belrosakva.by

Общество с ограниченной ответственностью «БЕЛРОСАКВА»

*Консервирование с помощью замораживания является эффективным методом сохранения качества и пищевой ценности фруктов и овощей, а также продления их срока годности. Скорость замораживания влияет на качество замороженного плодовоовощного сырья. Цель данной работы — обзор результатов научных исследований использования ультразвуковой технологии в качестве предварительной обработки фруктов и овощей перед замораживанием. Проведенный научный поиск и анализ результатов исследований показывает целесообразность использования ультразвука в качестве предварительной обработки плодов и овощей перед замораживанием. По сравнению с обычным замораживанием, дополнительное применение ультразвука при замораживании способствует сокращению времени замораживания, а также улучшает физико-химические показатели качества, включая потерю влаги, цвет, твердость, химический состав, общее количество фенолов и антоцианов, а также микроструктуру. В данном обзоре показано кавитационное действие ультразвука и его влияние на время замораживания, а также физико-химические показатели замороженных фруктов и овощей. Вместе с тем применение ультразвука при заморозке продуктов может оказывать негативное влияние на эффективность замораживания и качественные характеристики продукта, по причине неравномерного распределения мощности ультразвука. Необходимо проводить дополнительные исследования для определения соответствующих параметров обработки ультразвуком с учетом состава плодовоовощного сырья, его физико-химических свойств, а также модификации морозильного оборудования.*

**Ключевые слова:** фрукты, овощи, ультразвук, кавитация, эффективность, время замораживания, качество, цвет, химический состав.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 13.09.2023, одобрена после рецензирования 15.01.2024, принята к печати 18.01.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-71-78

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Бурак Л. Ч., Сапач А. Н., Писарик М. И. Влияние ультразвука на процесс замораживания и качество замороженных фруктов и овощей // Вестник Международной академии холода. 2024. № 1. С. 71–78. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-71-78

## Influence of ultrasound on freezing and the quality of frozen fruits and vegetables

Ph. D. L. Ch. BURAK<sup>1</sup>, A. N. SAPACH<sup>2</sup>, M. I. PISARIK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>leonidburak@gmail.com, <sup>2</sup>sapabra7@gmail.com, <sup>3</sup>info@belrosakva.by

BELROSAKVA Limited Liability Company

*Freeze canning is an effective method of preserving the quality and nutritional value of fruits and vegetables as well as extending their shelf life. The freezing speed affects the quality of frozen fruit and vegetable raw materials. The purpose of this work is to review the results of scientific research on the use of ultrasonic technology as a pre-treatment of fruits and vegetables before freezing. A scientific research analysis shows the feasibility of using ultrasound as a pre-treatment of fruits and vegetables before freezing. Compared with conventional freezing, an additional use of ultrasound during freezing helps to reduce freezing time and also improves physicochemical quality indicators, including moisture loss, color, hardness, chemical composition, total amount of phenols and anthocyanins, as well as microstructure. This review shows the cavitation effect of ultrasound and its effect on freezing time as well as the physicochemical properties of frozen fruits and vegetables. At the same time, the use of ultrasound when freezing products can have a negative impact on the freezing efficiency and quality characteristics of the product due to the uneven distribution of ultrasound power. It is necessary to conduct additional research to determine the appropriate parameters for ultrasonic treatment, taking into account the composition of fruit and vegetable raw materials, its physicochemical properties, as well as modifications of freezing equipment.*

**Keywords:** fruits, vegetables, ultrasound, cavitation, efficiency, freezing time, quality, color, chemical composition.

**Article info:**

Received 13/09/2023, approved after reviewing 15/01/2024, accepted 18/01/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-71-78

Article in Russian

**For citation:**

Burak L. Ch., Sapach A. N., Pisarik M. I. Influence of ultrasound on freezing and the quality of frozen fruits and vegetables. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 1. p. 71–78. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-71-78

**Введение**

Овощи, фрукты и ягоды содержат многие питательные вещества, такие как витамины, пищевые волокна, макро и микроэлементы, антиоксиданты, которые благотворно влияют на здоровье людей. Вместе с тем, за счет высокого содержания в своем составе влаги в процессе послеуборочного хранения происходит ухудшение качества и порча, что приводит к сокращению срока хранения плодовоовощного сырья. С целью, обеспечения качества фруктов и овощей, их безопасности для потребителя и увеличения срока годности применяют процессы консервирования. Разработка и внедрение современных способов консервирования способствует предотвращению роста патогенных микроорганизмов и микроогранизмов, вызывающих порчу в сырье [1].

Замораживание является эффективным методом, который широко используется в пищевой промышленности для продления срока годности и сохранения органолептических показателей фруктов и овощей. По причине высокого содержания воды, фрукты и овощи в процессе замораживания подвержены образованию кристаллов льда большого размера, что вызывает повреждение клеток и снижение текстуры и в итоге приводит к ухудшению качества замороженных продуктов. Так как качество замороженных продуктов тесно связано с размером кристаллов льда, а скорость замораживания в значительной степени влияет на размер кристаллов льда, то методы увеличения скорости замораживания оказывают решающее значение для уменьшения размера кристаллов льда и сохранения качественных характеристик замороженных продуктов [2, 3].

С этой целью применяют различные методы предварительной обработки фруктов и овощей, такие как высокое давление, дегидрозамораживание, антифризный белок и ультразвук [4]–[6]. Среди этих методов предварительная обработка плодовоовощного сырья ультразвуком оказалось наиболее эффективным и перспективным, по причине низкой стоимости, экологичности и безопасности [7]–[9]. Ультразвук генерирует кавитационные пузырьки на частоте 20–100 кГц, которые могут вызывать первичное кристаллообразование льда. Схлопывание кавитационных пузырьков способствует распаду дендритных кристаллов льда на более мелкие кристаллы [10]. Кроме того, ультразвук способствует усилению конвективной теплопередачи через кавитационные пузырьки, которые увеличивают частоту столкновений микроскопических частиц, уменьшают толщину пограничного слоя твердое тело-жидкость и снижают сопротивление теплопередаче [11, 12]. Следовательно, применение ультразвука при замораживании может сократить время замораживания, уменьшить размер кристаллов льда и улучшить качество замороженных фруктов и овощей.

Цель данной работы представляется в обзоре результатов исследований процесса замораживания и показателей качества замороженных фруктов и овощей с применением ультразвуковой технологии в качестве предварительной обработки.

В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период 2010–2023 гг. Более ранние научные статьи рассматривались только при отсутствии новых публикаций по конкретным аспектам исследуемой темы.

**Результаты и их обсуждение****1. Кавитационный эффект ультразвука**

Действие ультразвука низкой частоты (20–100 кГц) вызывает акустическую кавитацию, представляющую собой процесс образования и взрыва кавитационных пузырьков в жидкой среде, сопровождающийся выделением большого количества энергии [13]. В период акустической кавитации образование пузырьков приводит к увеличению площади поверхности и возникновению газовой диффузии, что вызывает расширение пузырьков.

Схлопывание пузырьков происходит тогда, когда энергии ультразвука недостаточно для удержания газовой фазы в пузырьках, которые обеспечивают области высокой температуры (5500 К) и высокого давления (50 МПа). Кавитация подразделяется на стабильную и переходную кавитацию [14]. Стабильная кавитация показывает, что пузырьки регулярно колеблются в течение многих акустических циклов, что приводит к возникновению явления микропотока. Данное явление микропотоков вызывает стресс, разрушающий биологические клетки. Кратковременная кавитация показывает, что пузырьки растут, а затем схлопываются в нерегулярных колебательных циклах, которые вызывают изменение температуры и давления для создания сил сдвига, тем самым разрушая клеточную структуру. Кроме того, явление кавитации вызывает механические, термические и химические процессы. Механический процесс создается за счет механических ударов акустических волн, которые приводят к нарушению клеточной структуры. Тепловой эффект возникает в результате частичного преобразования энергии ультразвука в тепло, которое можно использовать при сушке, оттаивании и стерилизации [15]. Химический процесс происходит за счет схлопывания кавитационных пузырьков, что способствует распаду молекул воды с образованием радикалов  $H^+$  и  $OH^-$  а также перекиси водорода. Эти свободные радикалы способны участвовать в ряде реакций в биологических системах, таких как объединение этих свободных радикалов и ДНК в бактериальной клетке с нарушением репликации ДНК [16]. Кроме того, кави-

тационный эффект ультразвука в процессе замораживания может вызвать начало кристаллизации. В ходе исследований установлено, что кавитационные пузырьки могут выступать в роли зародышей, когда достигают необходимого размера для кристаллообразования. Таким образом, применение ультразвука в процессе замораживания может способствовать образованию кристаллов льда в качестве зародышей для первичной нуклеации без существующих кристаллов, о чем свидетельствуют процессы нуклеации в переохлажденном водном растворе [5, 8]. Авторами Xu B. G., Zhang M., Bhandari B., Cheng X. F., Islam M. N. было установлено, что применение ультразвука в процессе замораживания вызывает образование зародышей, когда кавитационные пузырьки лопаются. В другом исследовании ученые показали некоторую задержку между разрывом кавитационных пузырьков и появлением зародышей [13]. Следует отметить, что, микроструя и ударная волна, генерируемая ультразвуком, также могут разрушать существующие крупные кристаллы льда с образованием мелких кристаллов льда в качестве вторичного зародыша. С другой стороны, высокое давление, создаваемое схлопыванием кавитационного пузыря за короткий промежуток времени, вызывает сильное переохлаждение, приводящее к образованию зародышей. В соответствии с данными исследованиями установлено, что кавитационный эффект ультразвука может ускорить тепло- и массоперенос и предотвратить мягкое таяние кристаллов льда, вызванного выделением скрытого тепла, тем самым способствуя образованию мелких кристаллов льда в процессе замораживания.

## 2. Влияние ультразвука на время замораживания

Ультразвук способствует увеличению скорости замораживания, что в основном влияет на образование зародышей, рост кристаллов льда, массу и теплоперенос во время процесса замораживания пищевых продуктов. Результаты проведенных исследований подтвердили, что применение ультразвука в процессе замораживания способствует ускорению процесса замораживания, тем самым сокращая время замораживания. Авторы Xin, Ying, Min Zhang et. al. исследовали время замораживания брокколи в процессе воздействия ультразвуком (0,33 Вт/см<sup>2</sup>, 40 кГц) и обработке осмодегидрофризоном. Установлено, что время замораживания (10 мин) брокколи обработанного осмодегидрофризоном с ультразвуковым воздействием было явно короче, чем у негидратированных (19,8 мин) [17]. Xu et al. оценили влияние применения ультразвука (0,09, 0,17, 0,26 и 0,37 Вт/см<sup>2</sup>, 20 кГц) при иммерсионной заморозке на время замораживания красной редьки, отметив, что время замораживания красной редьки с воздействием ультразвуком мощностью 0,09, 0,17, 0,26 и 0,37 Вт/см<sup>2</sup> составило 792, 744, 722 и 806 с, соответственно. При этом, время замораживания красной редьки с обработкой ультразвуком мощностью 0,26 Вт/см<sup>2</sup> было меньше, чем при других интенсивностях мощности [16]. В ходе исследования Zhu et al. о влиянии ультразвука различных частот (20, 28 и 40 кГц) на скорость замораживания картофеля, установлено, что время замораживания уменьшается с увеличением числа ультразвуковых частот. Общее время замораживания картофеля сократилось на 30,1 %, 41,5 % и 48,1 % при трех частотах

Таблица 1

### Влияние обработки ультразвуком на время замораживания фруктов и овощей

Table 1

#### Influence of ultrasound on the time of freezing of fruits and vegetables

| Обрабатываемые продукты  | Параметры обработки ультразвуком                                                                        | Результаты воздействия                                                                                                                                                                                                                                               | Источник |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Брокколи                 | 0; 125; 150; 175; 190 Вт;<br>20 30 кГц;<br>60 с вкл/60 с выкл                                           | Замораживание с помощью ультразвука при 150 (30 кГц) или 175 Вт (20 кГц) обеспечивает более высокую скорость замораживания и более короткое время замораживания по сравнению с обычным замораживанием                                                                | [17]     |
| Киви                     | 0; 120; 180; 240; 300 Вт;<br>20 кГц; 30 мин                                                             | Время замораживания при осмотической дегидрозаморозке с помощью ультразвука при 240 Вт было короче, чем в контроле.                                                                                                                                                  | [19]     |
| Корень лотоса            | 0; 90; 150; 210 Вт; 30 кГц;<br>6 мин (30 с вкл/30 с выкл;<br>15 с вкл/45 с выкл;<br>45 с вкл/15 с выкл) | Общее время замораживания при иммерсионной заморозке с помощью ультразвука (785 с) при мощности 150 Вт (30 с вкл./30 с выкл.) сократилось на 16,4 % и 52,2 % по сравнению с заморозкой в погружении (939 с) и заморозкой со струей воздуха (1641 с), соответственно. | [3]      |
| Картофель                | 21,1 Вт; 35 кГц;<br>8 с вкл/1 с выкл                                                                    | Время замораживания при применении ультразвука при температуре –2 °С (53,39 мин) было значительно ниже, чем в контроле (62,44 мин)                                                                                                                                   | [20]     |
| Красная редька           | 0; 0,09; 0,17; 0,26;<br>0,37 Вт·см <sup>2</sup> ;<br>20 кГц; 30 с вкл/30 с выкл                         | Применение ультразвука мощностью 0,26 Вт/см <sup>2</sup> сократило время замораживания на 14 % и 90 % по сравнению с замораживанием погружением и медленным замораживанием, соответственно                                                                           | [16]     |
| Клубника                 | 0; 0,09; 0,17; 0,28; 0,42;<br>0,51 Вт/см <sup>2</sup> ; 30 кГц;<br>30 с (5 с вкл/5 с выкл)              | Ультразвуковое воздействие при температуре –1,6 °С значительно сократило время замораживания, по сравнению с контролем                                                                                                                                               | [21]     |
| Яблоко, редис, картофель | 0,62 Вт·см <sup>2</sup> ; 28 кГц; 2 мин<br>(30 с вкл/30 с выкл)                                         | Замораживание погружением с помощью ультразвука значительно улучшило скорость замораживания, по сравнению с замораживанием погружением и сократило общее время замораживания яблок, редьки и картофеля на 5,40, 17,75 и 26,32 %, соответственно                      | [22]     |

(20, 28 и 40 кГц), двух частотах (20 и 28 кГц) и одной частоте (20 кГц), соответственно [18]. Следует отметить, что тройные частоты способствовали самому минимальному времени замораживания и наибольшей скорости замораживания, потому как многочастотный ультразвук может улучшать кавитационные эффекты, создавая больше кавитационных пузырьков, индуцировать новые ядра кавитации и улучшать теплопередачу, тем самым сокращая время замораживания. Согласно результатам вышеуказанных исследователей, параметры ультразвука (интенсивность, частота, время и температура) способны улучшить процесс замораживания.

### 3. Влияние обработки ультразвуком в процессе замораживания на физико-химические показатели продуктов

В процессе замораживания происходит повреждение структуры фруктов и овощей, а также ухудшение физико-химических показателей. Это связано с тем, что высокое содержание воды в сырье приводит к образованию кристаллов льда большого размера во время замораживания, что вызывает повреждение тканей в замороженных фруктах и овощах, тем самым снижая их качество. Проведенные научные исследования подтвердили, что замораживание с помощью ультразвука позволяет максимально сохранить физико-химические показатели плодовоовощного сырья, такие как потеря влаги, цвет, твердость, содержание аскорбиновой кислоты и микроструктуру. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 2.

#### 3.1. Потеря влаги

Вода в плодовоовощном сырье в процессе заморозки превращается в лед, что приводит к увеличению физического давления на продукт. В процессе оттаивания вода может вытекать, что приводит к ее потере и ухудшению качества замороженной продукции [25]. Многие исследования посвящены анализу влияния замораживания с помощью ультразвука на потерю влаги. Так, например, Tu J., Zhang M., Xu B., Liu H. Провели исследование эффективности иммерсионного замораживания с помощью ультразвука (90 Вт, 30 с вкл./30 с выкл.; 150 Вт, 30 с вкл./30 с выкл.; 210 Вт, 30 с вкл./30 с выкл.; 150 Вт, 15 с вкл./45 с выкл. и 150 Вт, 45 с вкл./15 с выкл.) на капельное стекание корней лотоса. Авторы установили, что потери при стекании (8,2–11,3%) при иммерсионной заморозке с помощью ультразвука были ниже, чем при воздушной заморозке (18,5%) и иммерсионной заморозке (12,9%) [3]. Снижение потери влаги в корнях лотоса было связано с образованием мелких кристаллов льда за счет применения иммерсионной заморозки с помощью ультразвука, что привело к меньшему повреждению клеточной структуры. Xu B., Zhang M., Bhandari B., Cheng X., Sun J. [16] изучали влияние ультразвука различной интенсивности (0,09, 0,17, 0,26 и 0,37 Вт/см<sup>2</sup>; 20 кГц) иммерсионного замораживания красной редьки на потерю влаги. Установлено, что потери стекания красной редьки, обработанной ультразвуком 0,26 Вт/см<sup>2</sup>, снижаются на 53 % по сравнению с медленным замораживанием. В исследовании [18] показано, что на 5,24% потери капель в картофеле при применении ультразвука (270 Вт, тройная частота 20, 28 и 40 кГц) при иммерсионной за-

морозке были ниже, чем при одночастотной и двухчастотной заморозке. Данные работы подтверждают, что применение ультразвуковой технологии способствует снижению потерь влаги.

#### 3.2. Цвет

Цвет является одним из основных показателей качества, влияющим на выбор потребителей. Кроме того, изменение цвета отражает изменение качества замороженных продуктов после оттаивания [13, 28]. Islam et al. изучали влияние применения ультразвука (0,13–0,39 Вт/см<sup>2</sup>, 20 кГц) при иммерсионной заморозке на цвет грибов (*Lentinula edodes*, *Pleurotus eryngii*, *Agaricus bisporus*), установив, что значения угла оттенка *L. edodes* и *P. Eryngii* не имели явных изменений при увеличении интенсивности ультразвука [26]. В ходе исследования красной редьки, что окраска ( $L^*$ ,  $a^*$  и  $b^*$ ) при иммерсионной заморозке с помощью ультразвука (0,09, 0,17, 0,26 и 0,37 Вт/см<sup>2</sup>; 20 кГц) была снижена по сравнению со свежей редькой. Применение ультразвука привело к небольшому улучшению значений  $L^*$ ,  $a^*$  и  $b^*$  красной редьки по сравнению с медленным замораживанием и замораживанием погружением [16]. Исследование эффективности иммерсионного замораживания с помощью ультразвука (90 Вт, 30 с вкл./30 с выкл.; 150 Вт, 30 с вкл./30 с выкл.; 210 Вт, 30 с вкл./30 с выкл.; 150 Вт, 15 с вкл./45 с выкл. и 150 Вт, 45 с вкл./15 с выкл.) на цвет корней лотоса показало, что заморозка воздушным потоком оказала негативное влияние на цвет, но заморозка погружением и заморозка погружением с помощью ультразвука продемонстрировали сохранения цвета корней лотоса [3].

Применение ультразвука при иммерсионной заморозке показало незначительное влияние на цвет, а иммерсионная заморозка и иммерсионная заморозка с помощью ультразвука не имели существенной разницы в изменении цвета. Результаты данных исследований подтверждают, что применение ультразвука при заморозке является перспективной технологией для сохранения цвета продуктов.

#### 3.3 Твердость

Исследование влияния ультразвука различной интенсивности (0,09, 0,17, 0,26 и 0,37 Вт/см<sup>2</sup>) при заморозке на твердость красной редьки показало, что твердость замороженной красной редьки с помощью ультразвука при 0,26 Вт/см<sup>2</sup> была значительно ( $P < 0,05$ ) выше, чем при медленной заморозке и заморозке погружением [16]. Это может быть связано с тем, что применение ультразвука увеличивает скорость замораживания, вызывая незначительные изменения в микроструктуре продукта. Zhu et al. оценили влияние пустот на иммерсионную заморозку с помощью ультразвука в яблоках, редисе и картофеле, указав, что ультразвук с частотой 0,62 Вт/см<sup>2</sup> (28 кГц) продемонстрировал наилучшую твердость в картофеле, в то время как на твердость яблок, влияние иммерсионной заморозки или иммерсионной с помощью ультразвука — не выявило никакой разницы [22]. В другом своем исследовании эти авторы сообщили о влиянии замораживания с помощью многочастотного ультразвука на твердость картофеля, указав, что значения твердости картофеля на одной частоте (20 кГц), двух частотах (20 и 28 кГц) и тройных частотах (20, 28 и 40 кГц) замораживания с помощью ультразвука, по сравнению с за-

Таблица 2

**Влияние замораживания с помощью ультразвука  
на физико-химические показатели качества фруктов и овощей**

Table 2

**Influence of ultrasound freezing on physico-chemical indicators of fruits and vegetables**

| Обрабатываемые продукты  | Параметры обработки ультразвуком                                                               | Результаты воздействия                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Источник |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Яблоко, редис, картофель | 0,62 Вт·см <sup>-2</sup> ; 28 кГц; 2 мин (30 с вкл/30 с выкл)                                  | Воздействие ультразвука 0,62 Вт/см <sup>2</sup> (28 кГц) способствовало наилучшей плотности и минимальной потере картофеля. Не было выявлено существенных различий в качественных показателях между замораживанием погружением и замораживанием погружением с помощью ультразвука в образцах яблок                                                                                                                                                                                                                                   | [22]     |
| Киви                     | 0; 120; 180; 240; 300 Вт; 20 кГц; 30 мин                                                       | Осмотическая дегидрозаморозка с помощью ультразвука при 240 Вт способствовала лучшим качественным характеристикам (потеря стекания, плотность, содержание аскорбиновой кислоты и вкус) по сравнению с обработкой без ультразвука                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | [19]     |
| Корень лотоса            | 0; 90; 150; 210 Вт; 30 кГц; 6 мин (30 с вкл/30 с выкл, 15 с вкл/45 с выкл, 45 с вкл/15 с выкл) | Иммерсионная заморозка с помощью ультразвука при мощности 150 Вт (30 с вкл/30 с выкл) показала эффективность в сохранении цвета, плотности и потери влаги, по сравнению с заморозкой в погружении. Содержание витамина С при заморозке на воздухе и при замораживании погружением не имело существенной разницы, тогда как содержание витамина С в образцах, полученных при замораживании погружением с помощью ультразвука, было значительно выше. Ультразвуковая иммерсионная заморозка сохранила наилучшую микроструктуру         | [3]      |
| Картофель                | 270 Вт; 20, 28 кГц; 120 с (50 % рабочего цикла)                                                | Ультразвук с двумя частотами 20 и 28 кГц эффективнее уменьшает потерю влаги и повышает твердость, по сравнению с одночастотным ультразвуком. Для наблюдения за микроструктурой, двухчастотное ортогональное замораживание с помощью ультразвука обеспечило картофелю самые тонкие поры и самую пухлую ткань                                                                                                                                                                                                                          | [23]     |
|                          | 270 Вт; 20; 28; 40 кГц; 120 с (30 с вкл / 30 с выкл)                                           | Трехчастотный ультразвук с частотой 20; 28; 40 кГц сохраняет лучшие качественные характеристики (потеря капель, твердость, общее содержание кальция, содержание L-аскорбиновой кислоты и общее содержание фенола), чем одночастотный и двухчастотный ультразвук. Кроме того, образование кристаллов льда с помощью трехчастотного ультразвука было тонким и равномерно распределенным, что привело к меньшему повреждению                                                                                                            | [20]     |
| Красная редька           | 0,26 Вт·см <sup>-2</sup> ; 20 кГц; 30 с вкл/30 с выкл                                          | Ультразвуковое (0,26 Вт·см <sup>-2</sup> ) погружение замороженных образцов редиса значительно сохранило лучшее качество, такое как потеря капель, твердость и содержание кальция. Микроструктуры редиса, полученные при ультразвуковой иммерсионной заморозке, имели меньший размер пор и меньший разрушительный эффект по сравнению с иммерсионной заморозкой                                                                                                                                                                      | [16]     |
|                          | 0; 0,09; 0,17; 0,26; 0,37 Вт·см <sup>-2</sup> ; 20 кГц; 30 с вкл/30 с выкл                     | Применение ультразвука при 0,26 Вт см <sup>-2</sup> значительно снизило потерю капель, антоцианов, витамина С и фенольных соединений, по сравнению с погружением и медленным замораживанием. По сравнению с продуктами медленного замораживания, продукты иммерсионной заморозки и иммерсионной заморозки с помощью ультразвука сохраняют лучшую текстуру, более высокое содержание кальция, лучшие летучие соединения и лучшие клеточные структуры с меньшим разделением и разрушением клеток                                       | [16]     |
|                          | 420 Вт; 28 кГц; 120 с (рабочий цикл 50 %)                                                      | Предварительная дегазация при 0,09 МПа в течение 5 мин с последующим замораживанием с помощью ультразвука способствовала сохранению редьке качественных характеристик (твердость, общее содержание кальция, содержание связанного кальция, степень удержания связанного кальция), более сходные со свежими. Микроструктуры в редьке с предварительной дегазацией при 0,09 МПа в течение 5 мин с последующим замораживанием с помощью ультразвука, очевидно, облегчили прокол плазматической мембраны, разделение клеток и деформацию | [24]     |
| Клубника                 | 0; 0,09; 0,17; 0,28; 0,42; 0,51 Вт/см <sup>2</sup> ; 30 кГц; 30 с (5 с вкл / 5 с выкл)         | Ультразвуковое воздействие при температуре –1,6 °С значительно сократило время замораживания по сравнению с контролем                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | [21]     |
| Яблоко, редис, картофель | 0,62 Вт·см <sup>-2</sup> ; 28 кГц; 2 мин (30 с вкл/30 с выкл)                                  | Замораживание погружением с помощью ультразвука значительно улучшило скорость замораживания по сравнению с замораживанием погружением и сократило общее время замораживания яблок, редьки и картофеля на 5,40, 17,75, 26,32%, соответственно                                                                                                                                                                                                                                                                                         | [22]     |

мораживанием погружением, было выше на 16,47, 27,06 и 36,47%, соответственно [18]. Эти результаты позволяют сделать вывод, что ультразвук способствует сохранению текстуры замороженных овощей. Также при выборе растительного сырья следует учитывать, что наличие пустот в тканях растений способствует рассеиванию волн, а их количество в тканях различных растений может значительно отличаться (так в яблоках содержание воздуха составляет около 20–25%, в то время как в картофеле этот показатель равен 2 %) [22, 27].

Следует отметить работу российских авторов [29] по оценке эффективности ультразвукового воздействия на процесс замораживания яблок. Данное исследование показало, что предварительная обработка ультразвуковым воздействием оказывает значительное влияние 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.

#### 3.4. Химический состав

Максимальное сохранение химического состава и пищевой ценности фруктов и овощей, снижение потерь витаминов, антоцианов и других питательных веществ является основной задачей в процессе использования способов консервирования. К сожалению, в процессе замораживания/оттаивания происходят потери питательных веществ [30]–[34]. Как подтверждают результаты исследований, ультразвуковая технология также оказывает влияние на химический состав плодовоовощного сырья в процессе заморозки. Так например, красная редька, подвергнутая замораживанию с помощью ультразвука (0,09, 0,17, 0,26 и 0,37 Вт/см<sup>2</sup>; 20 кГц), показала значительное ( $P < 0,05$ ) снижение содержания антоцианов и витамина С. Вместе с тем, в образцах обработанных ультразвуком мощностью 0,26 Вт/см<sup>2</sup> общее содержание фенолов было выше, чем в образцах подвергнутых медленной заморозке. Это объясняется тем, что применение ультразвука при замораживании сокращало время замерзания, в результате чего образовывались мелкие кристаллы льда, что приводило к уменьшению потерь влаги при размораживании. Кроме того, Zhu et al. обнаружили, что иммерсионная заморозка с помощью ультразвука (0,62 Вт см<sup>-2</sup>, 28 кГц) способствует сохранению общего содержания фенолов в замороженных яблоках, редьке и картофеле [22]. Общее содержание фенолов в замороженном картофеле, обработанном ультразвуком, было меньше (31,69%), по сравнению с образцами, не обработанными ультразвуком (43,81 %). При этом не было существенной разницы в потере общего содержания фенолов в замороженном яблоке (66,92%) и редьке (54,41 %). Также авторы исследования Zhu et al. установили, что применение многочастотного ультразвука (одночастотного — 20 кГц; двухчастотного — 20, 28 кГц и трехчастотного — 20, 28 и 40 кГц) значительно снижает потери аскорбиновой кислоты и общего содержания фенолов в замороженном картофеле, по сравнению с иммерсионной заморозкой. По сравнению со свежим картофелем, образцы обработанные ультразвуком с двумя частотами 20 и 28 кГц лучше сохраняли содержание аскорбиновой кислоты,

а образцы, подвергнутые воздействию ультразвука с тремя частотами 20, 28 и 40 кГц лучше сохраняли общее содержание фенола [18].

#### 3.5. Микроструктура

В процессе замораживания, образование кристаллов льда в тканях вызывает повреждение клеточной структуры [34]–[36]. Применение ультразвука при замораживании способствует улучшению процесса кристаллизации, в результате которого образуются мелкие кристаллы льда, тем самым уменьшая повреждение клеточной структуры [13, 19, 34–36]. Как уже отмечалось, в исследовании Xu B., Zhang M., Bhandari B., Cheng X., Sun J. проведена оценка влияния ультразвука (0,09–0,39 Вт/см<sup>2</sup>) при замораживании на микроструктуру размороженной ткани редьки, установившая, что при медленном замораживании световая микрофотография клеток редьки демонстрирует явное нарушение клеточной стенки и разделение клеток. Световая микрофотография (СМФ) клеток редьки при иммерсионной заморозке имела меньше нарушений, по сравнению с медленной заморозкой. Кроме того, применение ультразвука мощностью 0,09–0,37 Вт/см<sup>2</sup> при иммерсионной заморозке показало очевидную разницу в микроструктуре клеток редьки, а при использовании ультразвука при 0,17 и 0,26 Вт/см<sup>2</sup> в процессе иммерсионного замораживания не наблюдается разрыва клеточной стенки, клетки более плотные, по сравнению с образцами, подвергшимися иммерсионному замораживанию [16]. Применение ультразвука мощностью 0,09 и 0,37 Вт/см<sup>2</sup> при иммерсионной заморозке показало нарушение клеточной стенки и разделение клеток. Tian Y. et. al. исследовали влияние одно-и двухчастотного (20, 28, 20 + 20 и 20 + 28 кГц) ортогонального ультразвукового замораживания на микроструктуру картофеля. Авторы установили, что воздействие двухчастотного (20 + 28 кГц) ортогонального ультразвука при заморозке картофеля позволило получить продукт с мельчайшими порами [23]. Также авторами работы [18], оценено влияние воздействия многочастотного ультразвука при замораживании на микроструктуру картофеля, указав, что СМФ-изображения замороженного-оттаявшего картофеля с применением тройных ультразвуковых частот (20, 28 и 40 кГц) демонстрируют лучшую клеточную структуру и более однородную структуру кристаллов льда в тканях картофеля, по сравнению с одночастотным (20 кГц) и двухчастотным (20 и 28 кГц) ультразвуком. Однако на СМФ-изображениях картофеля, замороженного и оттаявшего методом иммерсионной заморозки, поры в кристалле льда были больше. Это показывает, что для уменьшения времени замерзания и размера кристаллов льда необходимы оптимальные условия воздействия ультразвука, что позволит сохранить целостность клеточной структуры.

#### Выводы

По результатам данного исследования и обзора результатов научных изысканий, можем заключить, что применение ультразвука в процессе замораживания фруктов и овощей позволяет сократить время замораживания. Кроме того, по сравнению с обычным методом замораживания, применение ультразвука при замораживании способствует сохранению качественных показате-

телей плодовоовощного сырья, включая снижение потери влаги, сохранению цвета, твердости, сохранению химического состава (аскорбиновая кислота, общее количество фенолов и антоцианов), а также поддержанию микро-структуры фруктов и овощей. Тем не менее, применение ультразвука при заморозке продуктов растительного происхождения все же имеет некоторые ограничения. В зависимости от вида плодовоовощного сырья, тепловое воздействие ультразвука в процессе замораживания может оказывать негативное влияние на эффективность замораживания и качественные характеристики продукта. В настоящее время научные исследования по применению ультразвука в процессе замораживания проводятся в основном в условиях лаборатории и пилотных установок. Кроме того, мощность ультразвука распределяется неравномерно, поэтому необходимо проводить дальнейшие научные исследования для определения оптимальных параметров обработки ультразвуком, физико-химических показателей замороженных овощей и фруктов, и модификации морозильного оборудования, с целью масштабного промышленного внедрения.

### Литература/References

1. Бурак Л. Ч. Существующие способы обработки пищевых продуктов и их влияние на пищевую ценность и химический состав // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания. 2021. № 3. С. 59–73. DOI: 10.24412/2311–6447-2021-3-59-73 [Burak L. Ch. Existing methods of processing food products and their influence on nutritional value and chemical composition. Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex — healthy food products. 2021. No. 3. P. 59–73. DOI: 10.24412/2311–6447-2021-3-59-73 (in Russian)]
2. Jiang Q., Zhang M., Xu B. Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020. V. 1 (69). p. 105261.
3. Tu J., Zhang M., Xu B., Liu H. Effects of different freezing methods on the quality and microstructure of lotus (*Nelumbo nucifera*) root. *International Journal of Refrigeration*. 2019. V. 52. p. 59–65.
4. Kong C. H., Hamid N., Liu T., Sarojini V. Effect of antifreeze peptide pretreatment on ice crystal size, drip loss, texture, and volatile compounds of frozen carrots. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2016. V. 64 (21). p. 4327–4335.
5. Xu B. G., Zhang M., Bhandari B., Cheng X. F., Islam M. N. Effect of ultrasound-assisted freezing on the physico-chemical properties and volatile compounds of red radish. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019. V. 27. p. 316–24.
6. Ando H., Kajiwara K., Oshita S., Suzuki T. The effect of osmotic dehydrofreezing on the role of the cell membrane in carrot texture softening after freeze-thawing. *Journal of Food Engineering*. 2020. V. 108. pp. 473–479.
7. Bilek S. E., Turantaş F. Decontamination efficiency of high power ultrasound in the fruit and vegetable industry, a review. *International Journal of Food Microbiology*. 2018. V. 166. pp. 155–162.
8. Xu B., Chen J., Sylvain Tiliwa E. Effect of multi-mode dual-frequency ultrasound pretreatment on the vacuum freeze-drying process and quality attributes of the strawberry slices. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. V. 78. p. 105714.
9. Xu B., Ren A., Chen J. Effect of multi-mode dual-frequency ultrasound irradiation on the degradation of waxy corn starch in a gelatinized state. *Food Hydrocolloids*. 2021. V. 113. P. 106440.
10. Kiani, H., Sun, D.-W. & Zhang, Z. The effect of ultrasound irradiation on the convective heat transfer rate during immersion cooling of a stationary sphere. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017. V. 19. pp. 1238–1245.
11. Kiani H., Zhang Z., Sun D.-W. Effect of ultrasound irradiation on ice crystal size distribution in frozen agar gel samples. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2013. V. 18. p. 126–131.
12. Cheng X., Zhang M., Xu B., Adhikari B., Sun J. The principles of ultrasound and its application in freezing related processes of food materials: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020. v. 27. p. 576–585.
13. Qiu L., Zhang M., Chitrakar B., Bhandari B. Application of power ultrasound in freezing and thawing processes: Effect on process efficiency and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020. V. 68. P. 105230.
14. Dolas R., Saravanan C., Kaur B. P. Emergence and era of ultrasonic's in fruit juice preservation: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019. V. 58. p. 104609.
15. São José J. F. B. D., Andrade N. J. D., Ramos A. M., Vanetti M. C. D., Stringheta P. C., Chaves J. B. P. Decontamination by ultrasound application in fresh fruits and vegetables. *Food Control*. 2017. v. 45. pp. 36–50.
16. Xu B., Zhang M., Bhandari B., Cheng X., Sun J. Effect of ultrasound immersion freezing on the quality attributes and water distributions of wrapped red radish. *Food and Bioprocess Technology*. 2015. V. 8. pp. 1366–1376.
17. Xin Y., Zhang M., Adhikari B. The effects of ultrasound-assisted freezing on the freezing time and quality of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. botrytis L.) during immersion freezing. *International Journal of Refrigeration*. 2014. V. 41. pp. 82–91.
18. Zhu Z., Zhang P., Sun D.-W. Effects of multi-frequency ultrasound on freezing rates and quality attributes of potatoes. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020. v. 60. P. 104733.
19. Fan K., Zhang M., Wang, W. & Bhandari, B. A novel method of osmotic-dehydrofreezing with ultrasound enhancement to improve water status and physicochemical properties of kiwifruit. *International Journal of Refrigeration*. 2020. V. 113. pp. 49–57.
20. Comandini P., Blanda G., Soto-Caballero M. C., et al. Effects of power ultrasound on immersion freezing parameters of potatoes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2014. V 18. pp. 120–125.
21. Cheng X., Zhang M., Adhikari B., Islam M. N., Xu, B.-G. Effect of ultrasound irradiation on some freezing parameters of ultrasound-assisted immersion freezing of strawberries. *International Journal of Refrigeration*. 2015. V. 44. pp. 49–55.
22. 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.
23. Tian Y., Zhang P., Zhu Z., Sun D.-W. Development of a single/dual-frequency orthogonal ultrasound-assisted rapid freezing technique and its effects on quality attributes of frozen potatoes. *Journal of Food Engineering*. 2020. V. 286. p. 110112.
24. Tian Y., Chen Z., Zhu Z., Sun D.-W. Effects of tissue pre-degassing followed by ultrasound-assisted freezing on freezing

- efficiency and quality attributes of radishes. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020. V. 67. p. 105162.
25. Kong C. H. Z., Hamid N., Ma Q., Lu J., Wang B.-G., Sarojini, V. Antifreeze peptide pretreatment minimizes freeze-thaw damage to cherries: An in-depth investigation. *LWT — Food Science and Technology*. 2017. V. 84. pp. 441–448.
  26. Islam M. N., Zhang M., Adhikari B., Xinfeng C., Xu B.-G. The effect of ultrasound-assisted immersion freezing on selected physicochemical properties of mushrooms. *International Journal of Refrigeration*. 2014. V. 42. pp. 121–133.
  27. 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*. 2018. Vol. 54. no 3. P. 885–894.
  28. 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.
  29. Курбонова М. К., Булькан 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. [Kurbonova M. K., Boulkrane 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 (in Russian)]
  30. Hu R., Zhang M., Liu W., Mujumdar A. S., Bai B. Novel synergistic freezing methods and technologies for enhanced food product quality: A critical review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2022. V. 21. pp. 1979–2001. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12919>
  31. Ngo M.-H., Nguyen H., Nguyen T.-B., Le T.-D., Le Q.-H. Experimental study of the effect of ultrasound on the freezing process of bo ching ginseng. *Applied Sciences*. 2023. V. 13 (1). P. 408. <https://doi.org/10.3390/app13010408>
  32. Kamińska-Dwórznińska A., Kot A., Jakubczyk E., Buniowska-Olejniak M., Nowacka M. Effect of ultrasound-assisted freezing on the crystal structure of mango sorbet. *Crystals*. 2023. V. 13 (3). P. 396. <https://doi.org/10.3390/cryst13030396>
  33. Kathika Das, Min Zhang, Bhesh Bhandari, Huizhi Chen, Baosong Bai, Manik Chandra Roy. Ultrasound generation and ultrasonic application on fresh food freezing: Effects on freezing parameters, physicochemical properties and final quality of frozen foods. *Food Reviews International*. 2023. V. 39:7. pp. 4465–4495.
  34. Köprüalan Aydın Ö., Yüksel Sarioğlu H., Dirim S. N. et al. Recent advances for rapid freezing and thawing methods of foods. *Food Eng Rev*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09356-0>
  35. Jiang Q., Zhang M., Mujumdar A. S., Chen B. Comparative freezing study of broccoli and cauliflower: effects of electrostatic field and static magnetic field. *Food Chem*. 2022. V. 397. p. 133751. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133751>
  36. Islam M. N., Zhang M., Adhikari B. Ultrasound-Assisted Freezing of Fruits and Vegetables: Design, Development, and Applications. In: Barbosa-Cánovas, G., et al. *Global Food Security and Wellness*. Springer. 2017. New York. NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6496-3\\_22](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6496-3_22)

### Сведения об авторах

#### Бурак Леонид Чеславович

К. т. н., заместитель директора ООО «Белросаква»,  
220015, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Пономаренко 35А,  
[leonidburak@gmail.com](mailto:leonidburak@gmail.com),  
ORCID: 0000-0002-6613-439X

#### Сапач Александр Николаевич

Инженер-химик ООО «Белросаква»,  
220015, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Пономаренко 35А,  
[Sapabra7@gmail.com](mailto:Sapabra7@gmail.com), ORCID: 0000-0002-8579-2689

#### Писарик Максим Иванович

Директор ООО «Белросаква»,  
220015, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Пономаренко 35А,  
[info@belrosakva.by](mailto:info@belrosakva.by)

### Information about authors

#### Burak Leanid Ch.

Ph. D., Deputy Director of the Limited Liability  
Company «Belrosakva», 220015 Republic of Belarus, Minsk,  
st. Ponomarenko 35A, [leonidburak@gmail.com](mailto:leonidburak@gmail.com),  
ORCID: 0000-0002-6613-439X

#### Sapach Alexandr N.

Chemical engineer of the Limited Liability Company «Belrosakva»,  
220015 Republic of Belarus, Minsk, st. Ponomarenko 35A,  
[Sapabra7@gmail.com](mailto:Sapabra7@gmail.com), ORCID: 0000-0002-8579-2689

#### Pisarik Maksim I.

Director of the Limited Liability Company «Belrosakva»  
220015 Republic of Belarus, Minsk, st. Ponomarenko 35A,  
[info@belrosakva.by](mailto:info@belrosakva.by)



Статья доступна по лицензии  
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»