МРНТИ 65.51.03 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.3.28-1198**

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАПИТКОВ

М.Ч. Тултабаев, М.К. Оспанова

Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан
Корреспондент-автор: shomanyli@mail.ru

Исследования показывают, что ультразвуковая обработка может эффективно снижать активность ферментов, таких как полифенолоксидаза (PPO), ответственных за энзиматическое потемнение и влиять на цветовые характеристики напитков, измеряемые по шкале CIELAB (ΔE). Однако влияние продолжительности обработки (t) и частоты ультразвука (f) на эти параметры часто нелинейно, что требует разработки математических моделей для оптимизации процесса. Анализ полученных результатов нелинейной поверхности отклика влияния ультразвука на цвет и ферменты, позволили сделать следующие предположения, что нелинейность поверхности отклика отражает ускорение окисления (ΔE) при увеличении t и f, а также насыщение инактивации PPO при высоких значениях. Установлено, что оптимум при $t = 5$, $f = 2$ минимизирует потемнение ($\Delta E \approx 3,71$) и обеспечивает высокую инактивацию PPO (78,5%), а также низкие t и f сохраняют бетацианины и полифенолы, минимизируя окисление.

Ключевые слова: витаминизированные напитки, ультразвуковая обработка, окисление, инактивация, математическая модель.

THE EFFECT OF THE DURATION OF ULTRASONIC TREATMENT ON THE QUALITY OF BEVERAGES

M.Ch. Tultabaev, M.K. Ospanova

K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,
e-mail: shomanyli@mail.ru

Studies show that ultrasound treatment can effectively reduce the activity of enzymes such as polyphenol oxidase (PPO), responsible for enzymatic darkening, and affect the color characteristics of beverages measured on the CIELAB scale (ΔE). However, the effect of treatment duration (t) and ultrasound frequency (f) on these parameters is often nonlinear, which requires the development of mathematical models to optimize the process. Analysis of the obtained results of the nonlinear response surface of the effect of ultrasound on color and enzymes allowed us to make the following assumptions that the nonlinearity of the response surface reflects the acceleration of oxidation (ΔE) with increasing t and f, as well as saturation of PPO inactivation at high values. It was found that the optimum at $t = 5$, $f = 2$ minimizes darkening ($\Delta E \approx 3,71$) and provides high inactivation of PPO (78.5%), as well as low t and f preserve betacyanins and polyphenols, minimizing oxidation.

Keywords: fortified drinks, ultrasonic treatment, oxidation, inactivation, mathematical model.

УЛЬТРАДЫБЫСТЫҚ ӨҢДЕУ ҰЗАҚТЫҒЫНЫҢ СУСЫНДАРДЫҢ САПАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІНЕ ӘСЕРІ

М.Ч. Тултабаев, M.K. Ospanova

Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,
e-mail: shomanyli@mail.ru

Зерттеулер көрсеткендей, ультрадыбыстық өңдеу ферменттердің белсенділігін тиімді түрде төмендетуі мүмкін, мысалы, ферменттік қызаруға жауап беретін полифенолоксидаза (PPO) және

CIELAB (ΔE) шкаласы бойынша өлшенетін сусындардың түс сипаттамаларына әсер етеді. Алайда, өңдеу ұзақтығы (t) мен ультрадыбыстық жиіліктің (f) бұл параметрлерге әсері көбінесе сызықты емес, бұл процесті оңтайландыру үшін математикалық модельдерді әзірлеуді қажет етеді. Ультрадыбыстың түс пен ферменттерге әсерінің сызықтық емес жауап бетінің нәтижелерін талдау жауап бетінің сызықтық емес болуы t және f жоғарылауындағы тотығу үдеуін (ΔE), сондай-ақ жоғары мәндердегі PPO инактивациясының қанықтылығын көрсетеді деген келесі болжамдарды жасады. $T = 5$, $f = 2$ кезінде оңтайлы қызаруды азайтады ($\Delta E \approx 3,71$) және жоғары PPO инактивациясын (78,5%), сондай-ақ төмен t және f тотығуды азайту үшін бетацианиндер мен полифенолдарды сақтайды.

Түйін сөздер: байытылған сусындар, ультрадыбыстық өңдеу, тотығу, инактивация, математикалық модель.

Введение. В последние годы ультразвуковая обработка (УЗО) приобрела значительную популярность в пищевой промышленности как нетермический метод консервации и улучшения качества напитков [1-5]. Этот подход использует акустические волны высокой частоты для генерации кавитации, которая приводит к механическому разрушению клеток, инактивации микроорганизмов и ферментов, а также стабилизации физико-химических свойств продуктов. В частности, УЗО применяется для витаминизированных напитков, таких как функциональные воды на основе экстрактов шиповника и свекольного сока, где важно сохранить биоактивные соединения, включая полифенолы, витамин С и бетацианины, при минимизации окислительных процессов [6-9]. Исследования показывают, что УЗО может эффективно снижать активность ферментов, таких как полифенолоксидаза (PPO), ответственных за энзиматическое потемнение, и влиять на цветовые характеристики напитков, измеряемые по шкале CIELAB (ΔE). Однако влияние продолжительности обработки (t) и частоты ультразвука (f) на эти параметры часто нелинейно, что требует разработки математических моделей для оптимизации процесса.

В контексте витаминизированной воды, состав которой включает 93,83% воды, 3% экстракта шиповника (с полифенолами 1,05–5,4 мг/100 г и витамином С 3–45 мг/100 г), 3% свекольного сока (бетацианины 1,5–6 мг/100 г, витамин С 0,09–0,24 мг/100 г), 0,15% ксантановой камеди, 0,02% премикса (витамин С 9 мг/100 г) и антиоксиданты (0,05% аскорбиновой кислоты и 0,03% лимонной кислоты), УЗО проводится при мощности ~200 Вт и pH 6. Ключевыми переменными являются t (5–15 минут) и f (2–4 кГц), которые влияют на изменение цвета (ΔE), вызванное окислением полифенолов и бетацианинов за счет накопления реактивных форм кислорода (ROS), и на снижение активности PPO ($PROloss$, % от исходной), с экспоненциальной инактивацией и насыщением при высоких значениях t и f. Исследования подтверждают, что УЗО приводит к нелинейному росту ΔE из-за взаимодействия времени и частоты, а $PROloss$ демонстрирует экспоненциальную зависимость, лучше отражающую физико-химические процессы [10, 12].

Для адекватного описания этих эффектов предлагается нелинейная математическая модель, включающая квадратичные и экспоненциальные члены. Модель позволит построить трехмерную поверхность отклика для комбинированной целевой функции Z, интегрирующей ΔE и $PROloss$ в пространстве (t, f, Z). Это обеспечит оптимизацию процесса, минимизируя деградацию цвета при максимальной инактивации ферментов. Предыдущие работы демонстрируют эффективность УЗО в инактивации PPO и POD в соках, с временным снижением фенолов, но подчеркивают необходимость учета нелинейностей для точного прогнозирования. Аналогично, мета-анализы подтверждают зависимость от интенсивности и длительности, где высокая амплитуда усиливает инактивацию.

В целом, разработка такой модели способствует повышению качества витаминизированных

напитков, сохраняя их функциональные свойства. Дальнейшие исследования, включая экспериментальную валидацию, позволят интегрировать УЗО в промышленные процессы.

Материалы и методы. Для исследования нами разработана рецептура напитка. В состав напитка (на 100 г, оптимальная рецептура) входят: 1) вода - 93,83%; 2) экстракт шиповника - 3% (полифенолы: 1,05–5,4 мг/100 г, витамин С: 3–45 мг/100 г); 3) свекольный сок - 3% (бетацианины: 1,5–6 мг/100 г, витамин С: 0,09–0,24 мг/100 г); 4) ксантановая камедь - 0,15%; 5) премикс - 0,02% (витамин С: 9 мг/100 г); 6) антиоксиданты: 0,05% аскорбиновой кислоты (50 мг/100 г), 0,03% лимонной кислоты (30 мг/100 г). Показатель кислотности (pH) напитка составляет 6 единиц.

Для ультразвуковой обработки напитков использовалась установка SONIC RPTOR 4000 производства США [13,14], имеющего следующие характеристики ультразвукового оборудования: 1) частота (f): 2–4 кГц; 2) мощность: ~200 Вт; 3) продолжительность воздействия (t): 5–15 минут.

Для построения нелинейной математической модели и трехмерной поверхности отклика, описывающей влияние продолжительности ультразвуковой обработки (t, 5–15 минут) и частоты ультразвука (f, 2–4 кГц) на цвет витаминизированной воды (изменение цвета ΔE) и разложение ферментов (снижение активности полифенолоксидазы, $PROloss$) использованы квадратичные и экспоненциальные зависимости, которые лучше отражают физико-химические процессы окисления пигментов и инактивации ферментов. Поверхность отклика будет построена для комбинированной целевой функции Z, учитывающей ΔE и $PROloss$, в трехмерном пространстве (t, f, Z).

Для построения математической модели предположено, что выполнены следующие аксиомы.

Аксиома 1. Изменение цвета в CIELAB, вызвано окислением полифенолов и бетацианинов. $PROloss$: Снижение активности полифенолоксидазы (% от исходной), фермент присутствует в шиповнике и свекольном соке.

Аксиома 2. Изменение цвета в CIELAB из-за накопления реактивных форм кислорода (ROS) и взаимодействия времени и частоты носит нелинейный рост.

Аксиома 3. Модель предполагает однородность напитка.

На переменные t и f накладываются следующие ограничения: $5 \leq t \leq 15$ минуты,

$2 \leq f \leq 4$, кГц. Целевые функции: ΔE, $PROloss$.

В качестве критерия оптимизации выбирается комбинированная нелинейная функция:

$$Z = \frac{w_1 * \Delta E}{\Delta E_{\text{max}}} - \frac{w_2 * PROloss}{PROloss_{\text{max}}} \qquad (1)$$

где: $w_1 = 0,6$, $w_2 = 0,4$ (приоритет минимизации потемнения). $\Delta E_{\text{max}} = 15$ (максимальное изменение цвета при $t = 5$, $f = 4$). $PROloss_{\text{max}} = 100\%$.

Задача оптимизации. Необходимо минимизировать критерий (1) по переменной ΔE и максимизировать по переменной $PROloss$.

Для определения зависимости параметра ΔE от времени t и частоты f строится следующее выражение:

$$\Delta E = a_1 * t + a_2 * f + a_3 * t * f + a_4 * t^2 + a_5 * f^2 \qquad (2)$$

где: a_1 - линейный вклад времени (ΔE/мин); a_2 - линейный вклад частоты (ΔE /кГц); a_3 – вклад взаимодействия времени и частоты; a_4 - квадратичный вклад времени (усиление окисления); a_5 - квадратичный вклад частоты (усиление кавитации).

В результате проведенных экспериментов выбраны следующие значения параметров:

$$a_1 = 0,4; a_2 = 0,8; a_3 = 0,08; a_4 = 0,02; a_5 = 0,1.$$

В предположении, что антиоксиданты снижают ΔE на ~30% из (2) получим, что

$$\Delta E = 0,7 * (0,4 * t + 0,8 * f + 0,08 * t * f + 0,02 * t^2 + 0,1 * f^2) \quad (3)$$

Для определения зависимости параметра $PROloss$ от времени t и частоты f строится следующее выражение:

$$PROloss = b_1 * (1 - e^{-k_1}t - k_2 * f^2) * 100 \quad (4)$$

где: b_1 - максимальная инактивация (~95%); k_1 - константа для времени учитывает нелинейный эффект кавитации (1/мин); k_2- константа для частоты учитывает усиление инактивации при росте частоты (1/кГц²).

В результате проведенных экспериментов выбраны следующие значения параметров:

$$b_1 = 0,95; k_1 = 0,154; k_2 = 0,25$$

.

С учетом вышеизложенного для целевой функции получим следующую зависимость:

$$Z = 0,6 * \frac{\Delta E}{15} - 0,4 * PROloss/100 \quad (5)$$

где $\Delta E = 0,7 * (0,4 * t + 0,8 * f + 0,08 * t * f + 0,02 * t^2 + 0,1 * f^2)$,

$PROloss = 0,95 * (1 - e^{-0,15} * t - 0,25 * f^2)$.

С учетом следующих ограничений $5 \leq t \leq 15$, $2 \leq f \leq 4$; $\Delta E \leq 10$ (желательно); $PROloss \geq 50\%$ (минимальная инактивация), проведем вычисления значений ΔE, $PROloss$ и Z в граничных точках.

Показатели ΔE, $PROloss$ и Z в точке (t=5, f=2) равны:

$\Delta E = 0,7 \cdot (0,4 \cdot 5 + 0,8 \cdot 2 + 0,08 \cdot 5 \cdot 2 + 0,02 \cdot 52 + 0,1 \cdot 22) = 3,71$

$PPOloss = 95 \cdot (1 - e - 0,15 \cdot 5 - 0,25 \cdot 22)95 \cdot 0,826 \approx 78,5\%$

$Z = 0,6 \cdot 3,7115 - 0,4 \cdot 78,5100 = 0,1484 - 0,314 = -0,1656.$

Показатели ΔE, $PROloss$ и Z в точке (t=5, f=4) равны:

$\Delta E = 0,7 \cdot (0,4 \cdot 5 + 0,8 \cdot 4 + 0,08 \cdot 5 \cdot 4 + 0,02 \cdot 52 + 0,1 \cdot 42) == 6,23$

$PPOloss = 95 \cdot (1 - e - 0,15 \cdot 5 - 0,25 \cdot 42) \approx 94,1\%$

$Z = 0,6 \cdot 6,2315 - 0,4 \cdot 94,1100 = 0,2492 - 0,3764 = -0,1272$

Показатели ΔE, $PROloss$ и Z в точке (t=15, f=2) равны:

$\Delta E = 0,7 \cdot (0,4 \cdot 15 + 0,8 \cdot 2 + 0,08 \cdot 15 \cdot 2 + 0,02 \cdot 152 + 0,1 \cdot 22) = 10,43$

$PPOloss = 95 \cdot (1 - e - 0,15 \cdot 15 - 0,25 \cdot 22 \approx 91,3\%$

$Z = 0,6 \cdot 10,4315 - O,4 \cdot 91,31 = 0,052$

Показатели ΔE, $PROloss$ и Z в точке (t=15, f=4) равны:

$\Delta E = 0,7 \cdot (0,4 \cdot 15 + 0,8 \cdot 4 + 0,08 \cdot 15 \cdot 4 + 0,02 \cdot 152 + 0,1 \cdot 42) = 14,07$

$PPOloss = 95 \cdot (1 - e - 0,15 \cdot 15 - 0,25 \cdot 42 \approx 94,8\%$

$Z = 0,6 \cdot 14,0715 - 0,4 \cdot 94,81 = 0,1836$

Полученные результаты показывают, что оптимальной точкой является: $t = 5$, $f = 2$, $Z = -0,1656$, которая минимизирует ΔE (3,71) и обеспечивает высокую инактивацию PPO (78,5%).

Построим трехмерную поверхность отклика для нелинейной функции $Z = f(t, f)$, которая показывает зависимость от времени и частоты, а также оптимальную точку и границы ограничений. На рисунке 1 показана нелинейная поверхность отклика влияния ультразвука на цвет и ферменты.

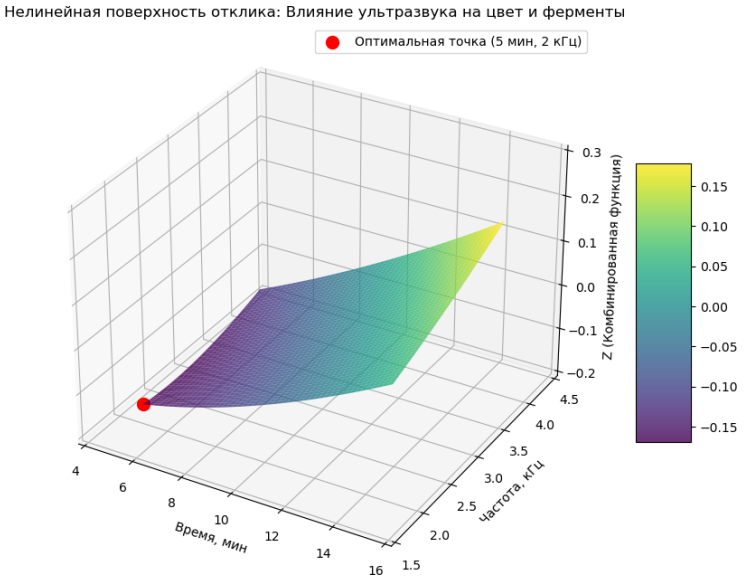


Рис.1 - Нелинейная поверхность отклика влияния ультразвука на цвет и ферменты
*(*x - продолжительность обработки (t, 5–15 минут); y - частота ультразвука (f, 2–4 кГц); z - комбинированная целевая функция Z (учитывает ΔE и $PROloss$))

Нелинейность поверхности обусловлена квадратичными членами в ΔE (t^2, f^2) и экспоненциальной зависимостью в $PROlos$.

Минимальные значения Z (около - 0,17) соответствуют низким t и f, максимальные (около 0,18) - высоким t и f; Поверхность изогнута из-за взаимодействия $t * f$ с t и нелинейных эффектов. Границы области образуют прямоугольник: $5 \leq t \leq 15$, $2 \leq f \leq 4$. Оптимальная точка (5,2,Z=−0,1656) на графике отмечена красным цветом, что соответствует $\Delta E = 3,71$, $PROloss = 78,5\%$.

Результаты и обсуждение. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Нелинейность отражает ускорение окисления ΔE при увеличении t и f, а также насыщение инактивации PPO при высоких значениях. Оптимум при $t = 5$, $f = 2$ минимизирует потемнение (ΔE≈3,71) и обеспечивает высокую инактивацию PPO (78,5%).

Низкие t и f сохраняют бетацианины и полифенолы, минимизируя окисление.

PPO эффективно инактивируется даже при минимальных параметрах, но дальнейший рост t и f увеличивает ΔE, что нежелательно.

Антиоксиданты (0,05% аскорбиновой кислоты и 0,03% лимонной кислоты) снижают ΔE на 30%.

Квадратичные члены (t^2 , f^2) в ΔE отражают усиление окисления при длительной обработке и высокой частоте. Экспоненциальная модель $PROloss$ с f^2 учитывает нелинейный эффект кавитации.

В результате рекомендуется использвать t=5, $f = 2$ для оптимального баланса. Применяйте деаэрацию и охлаждение (<30°C) для дальнейшего снижения ΔE.

Выводы. Комплексный анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы. Ультразвук с частотой 4 кГц вызывает менее интенсивную кавитацию по сравнению с 20–40 кГц, но 10-минутная обработка при мощности ~200 Вт создает значительное количество ROS, локальный нагрев (до 50–80°C в зонах кавитации) и механическое воздействие.

Ультразвук разрушает витамин С, превращая его в дегидроаскорбиновую кислоту или продукты распада (например, оксалаты). Потери составляют 20–50% за 10 минут при 4 кГц, особенно в присутствии кислорода. Разложение витамина С может усиливать окисление других компонентов, образуя перекись водорода H_2O_2.

Минералы устойчивы к ультразвуку, но ионы железа (0,045–0,186 мг/100 г) могут катализировать окисление полифенолов и бетацианинов, усиливая потемнение. Сохранение минералов, но каталитическая активность железа способствует цветовым изменениям.

Улучшение гомогенности за счет дисперсии ксантановой камеди, но снижение вязкости из-за гидролиза пектинов.

Рекомендации для минимизации потемнения и потерь.

1. Снижение до 3-5 минут при 4 кГц и 200 Вт., будет способствовать сохранению 80–90% витамина С и бетацианинов (сокращение времени обработки).

2. Удаление кислорода (вакуумирование или продувка азотом) для снижения окисления полифенолов и витамина С (leаэрация).

3. Увеличение доли аскорбиновой кислоты (0,05% = 50 мг/100 г) способствует нейтрализации ROS.

4. Контроль температуры во время обработки для предотвращения нагрева (охлаждение до 20–30°C).

Выработанные рекомендации, на основе созданных математических моделей и результатов нелинейной поверхности отклика, позволят значительно улучшить качества витаминизированных напитков. Однако, требуются дальнейшие исследования для оптимизации других процессов технологии получения напитков.

Финансирование. *Данное исследование было проведено в рамках грантового проекта № AP23488817 ”Разработка технологии производства витаминизированных напитков, обогащенных кислородом, с использованием схемы симплексной решетки Шеффе”, финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2024-2026 годы.*

Благодарность. Благодарим руководство университета за техническую поддержку в ходе реализации проекта и подготовку материалов для этой статьи.

Литература

1. Birmpa A, Sfika V, Vantarakis A. Ultraviolet light and Ultrasound as non-thermal treatments for the inactivation of microorganisms in fresh ready-to-eat foods//Int J Food Microbiol.- 2013.- Vol.167(1). - P.96 - 102. DOI10.1016/J.IJFOODMICRO.2013.06.005.

2. Mukhtar Tultabayev, Tamara Tultabayeva, Dametken Zhumanova, Rabiga Kasymbek, Aruzhan Shaman. Denaturation of proteins under the influence of ultrasound. Hypothesis. BIO Web of Conferences 64, 01007 (2023). Agro-Bio-Technologies. DOI ORG/10.1051/BIOCONF/20236401007

3. Chemat F, Zill-E-Huma, Khan MK. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. Ultrason Sonochem. (2011) 18:813–35. DOI 10.1016/J.ULTSONCH.2010.11.023.

4. Delmas H, Barthe L.25-Ultrasonic mixing, homogenization, and emulsification in food processing and other applications//Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound. Elsevier Ltd. -2015. -

P.757-791.

5. Rifna EJ, Singh SK, Chakraborty S, Dwivedi M. Effect of thermal and non-thermal techniques for microbial safety in food powder: recent advances. Food Res Int. (2019) 126:108654. DOI: 10.1016/J.FOODRES.2019.108654. DOI 10.1016/B978-1-78242-028-6.00025-9.

6. Lei Zhou, Jian Zhang, +1 author Wangang Zhang. Applications and effects of ultrasound assisted emulsification in the production of food emulsions: A review// Trends in Food Science and Technology.-2021. -Vol110.- P.493-512. DOI 10.1016/J.TIFS.2021.02.008.

7. Cesar Ozuna, Ingrid Paniagua-Martinez,Eduardo Castano-Tostado. Innovative applications of high-intensity ultrasound in the development of functional food ingredients: Production of protein hydrolysates and bioactive peptides/Food Research International.-2015.-Vol.77.-P.685-696. DOI 10.1016/j.foodres.2015.10.015.

8. Arzeni C., Martinez K., Zema P., Arias A., Perez O.E., Pilosof A.M.R. Comparative study of high intensity ultrasound effects on food proteins functionality// Chemistry, Journal of Food Engineering.-2012.- Vol.108(3).- P.463-472. DOI 10.1016/J.JFOODENG.2011.08.018.

9. Bhargava N., Mor R.S., Kumar K., Sharanagat V.S. Advances in application of ultrasound in food processing: A review//Ultrason Sonochem.-2021.-Vol.70:105293. DOI 10.1016/J.ULTSONCH.2020.105293.

10. Mason T.J, Chemat F., Ashokkumar M. Power ultrasonics for food processing//Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound.- Elsevier Ltd.- 2015.-P.815-843. DOI 10.1016/B978-1-78242-028-6.00027-2.

11. Wu Li, Gamlath J. Gamlath ,Rachana Pathak, Gregory J.O Martin, Muthupandian Ashokkumar. Ultrasound - the physical and chemical effects integral to food processing // Innovative Food Processing Technologies.-2021.-P.329-358. DOI 10.1016/B9780-08-1005965.22679-6.

12. Barekat S., Soltanizadeh N. Improvement of meat tenderness by simultaneous application of high-intensity ultrasonic radiation and papain treatment// Innov. Food. Sci.& Emerg. Technol.- 2017.- Vol.39.-P.223-229. DOI 10.1016/j.ifset.2016.12.009.

13. Тултабаев М.Ч., Сафуани Ж.Е., Тултабаева Т.Ч., Жунусова Г.С., Касымбек Р. и др. Ультразвуковое эмульгирование сафлорового масла// Пищевая промышленность.-2022- №12.- С.30-33. DOI 10.52653/PPI.2022.12.12.006.

14. Gan Z, Feng X, Hou Y, Sun A, Wang R. Cold plasma jet with dielectric barrier configuration: investigating its effect on the cell membrane of E. coli and S. cerevisiae and its impact on the quality of chokeberry juice//Lwt -2021.-Vol.136.:110223. DOI 10.1016/j.lwt.2020.110223

References

1. Birmpa A, Sfika V, Vantarakis A. Ultraviolet light and Ultrasound as non-thermal treatments for the inactivation of microorganisms in fresh ready-to-eat foods//Int J Food Microbiol.- 2013.- Vol.167(1). -P.96 - 102. DOI10.1016/J.IJFOODMICRO.2013.06.005.

2. Mukhtar Tultabayev, Tamara Tultabayeva, Dametken Zhumanova, Rabiga Kasymbek, Aruzhan Shaman. Denaturation of proteins under the influence of ultrasound. Hypothesis. BIO Web of Conferences 64, 01007 (2023). Agro-Bio-Technologies. DOI ORG/10.1051/BIOCONF/20236401007

3. Chemat F, Zill-E-Huma, Khan MK. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. Ultrason Sonochem. (2011) 18:813–35. DOI 10.1016/J.ULTSONCH.2010.11.023.

4. Delmas H, Barthe L.25-Ultrasonic mixing, homogenization, and emulsification in food processing and other applications//Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound. Elsevier Ltd. -2015. -P.757-791.

5. Rifna EJ, Singh SK, Chakraborty S, Dwivedi M. Effect of thermal and non-thermal techniques for microbial safety in food powder: recent advances. Food Res Int. (2019) 126:108654. DOI: 10.1016/J.FOODRES.2019.108654. DOI 10.1016/B978-1-78242-028-6.00025-9.

6. Lei Zhou, Jian Zhang, +1 author Wangang Zhang. Applications and effects of ultrasound assisted emulsification in the production of food emulsions: A review// Trends in Food Science and Technology.-2021. -Vol110.- P.493-512. DOI 10.1016/J.TIFS.2021.02.008.

7. Cesar Ozuna, Ingrid Paniagua-Martinez,Eduardo Castano-Tostado. Innovative applications of high-intensity ultrasound in the development of functional food ingredients: Production of protein hydrolysates and bioactive peptides/Food Research International.-2015.-Vol.77.-P.685-696. DOI 10.1016/j.foodres.2015.10.015.

8. Arzeni C., Martinez K., Zema P., Arias A., Perez O.E., Pilosof A.M.R. Comparative study of high intensity ultrasound effects on food proteins functionality// Chemistry, Journal of Food Engineering.-2012.- Vol.108(3).- P.463-472. DOI 10.1016/J.JFOODENG.2011.08.018.

9. Bhargava N., Mor R.S., Kumar K., Sharanagat V.S. Advances in application of ultrasound in food processing: A review//Ultrason Sonochem.-2021.-Vol.70:105293. DOI 10.1016/J.ULTSONCH.2020.105293.

10. Mason T.J, Chemat F., Ashokkumar M. Power ultrasonics for food processing//Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound.- Elsevier Ltd.- 2015.-P.815-843. DOI 10.1016/B978-1-78242-028-6.00027-2.

11. Wu Li, Gamlath J. Gamlath ,Rachana Pathak, Gregory J.O Martin, Muthupandian Ashokkumar. Ultrasound - the physical and chemical effects integral to food processing // Innovative Food Processing Technologies.-2021.-P.329-358. DOI 10.1016/B9780-08-1005965.22679-6.

12. Barekat S., Soltanizadeh N. Improvement of meat tenderness by simultaneous application of high-intensity ultrasonic radiation and papain treatment// Innov. Food. Sci.& Emerg. Technol.- 2017.- Vol.39.-P.223-229. DOI 10.1016/j.ifset.2016.12.009.

13. Tultabaev M.Ch., Safuani Zh.E., Tultabaeva T.Ch., Zhunusova G.S., Kasymbek R. i dr. Ul' trazvukovoe jemul' girovanie saflorovogo masla// Pishhevaja promyshlennost'.- 2022 - №12.- S.30-33. DOI 10.52653/PPI.2022.12.12.006.[in Russian]

14. Gan Z, Feng X, Hou Y, Sun A, Wang R. Cold plasma jet with dielectric barrier configuration: investigating its effect on the cell membrane of E. coli and S. cerevisiae and its impact on the quality of chokeberry juice//Lwt -2021.-Vol.136.:110223. DOI 10.1016/j.lwt.2020.110223

Сведения об авторах

Тултабаев М.Ч.- д.т.н., профессор, исследователь кафедры, КазУТБ им.К.Кулажанова,Астана, Казахстан, e-mail: shomanyli@mail.ru;

Оспанова М.К.- к.ф.-м.н., начальник отдела, КазУТБ им.К.Кулажанова, e-mail: ospanova_madi_59@mail.ru.

Information about the author

Tultabaev M.Ch.- Doctor of Technical Sciences, Professor, Researcher, KazUTB named after K. Kulazhanov Astana, Kazakhstan, e-mail: shomanyli@mail.ru;

Ospanova M.K. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department, KazUTB named after K. Kulazhanov, e-mail: ospanova_madi_59@mail.ru.