



Yangi meva va sabzavotlarning saqlash muddatini uzaytirish uchun ultratovush va ultrabinafsha nurlanishining sinergik qo'llanilishi

Jasur E. Safarov¹, Shaxnoza A. Sultanova², Murodjon M. Pulatov³, Azamat B. Usenov⁴

¹ t.f.d., prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; jasursafarov@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0003-0349-8986>

² Toshkent shahar hokimi o'rinbosari, Toshkent, ko'cha. Islom Karimov 51, t.f.d., prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; sh.sultanova@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0002-5492-1636>

³ PhD, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; murod121@bk.ru <https://orcid.org/0009-0001-2674-5989>

⁴ PhD, dots., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; azamat_usenov_92@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0970-981X>

Dolzarbli: meva va sabzavotlar inson ratsionida muhim o'rin tutuvchi biologik faol moddalar, vitaminlar, mineral elementlar hamda antioksidantlarning asosiy manbai hisoblanadi. Biroq yig'ib olingandan so'ng ularda nafas olish jarayonlari, fermentativ reaksiyalar va mikroorganizmlarning rivojlanishi davom etishi natijasida sifat ko'rsatkichlari pasayadi hamda saqlash muddati qisqaradi. An'anaviy konservatsiya usullari, jumladan kimyoviy dezinfektsiya vositalari va issiqlik bilan ishlov berish mahsulotning organoleptik hamda ozuqaviy xususiyatlariga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu sababli ultratovush va ultrabinafsha (UV-C) nurlar asosidagi noissiqlik ishlov berish texnologiyalarini uyg'unlashtirish orqali meva-sabzavotlarning mikrobiologik xavfsizligini ta'minlash, sifatini saqlash va saqlash muddatini uzaytirish bo'yicha ilmiy asoslangan yechimlarni ishlab chiqish dolzarb ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi.

Maqsad: ultratovush va ultrabinafsha (UV-C) nurlarining birgalikdagi sinergik ta'sirini o'rganish, ularning meva va sabzavotlarning mikrobiologik holati, fizik-kimyoviy hamda bioaktiv xususiyatlariga ta'sirini baholash, saqlash muddatini uzaytirishning optimal texnologik parametrlarini aniqlash hamda jarayonning matematik modelini ishlab chiqish.

Usullari: tadqiqotda yuqori intensivlikdagi ultratovush va 254 nm to'lqin uzunligidagi UV-C nurlanishidan foydalanishga asoslangan kombinatsiyalangan ishlov berish texnologiyasi taklif etiladi. Jarayonni optimallashtirish uchun Response Surface Methodology (RSM) va Box-Behnken eksperimental dizaynidan foydalanish rejalashtirilgan. Mahsulot sifatini baholashda mikrobiologik tahlillar, massa yo'qotilishi, rang koordinatalari (CIELAB), tekstura, askorbin kislotasi, umumiy fenol birikmalari va antioksidant faolligi aniqlanadi. Olingan natijalarni tavsiflash uchun mikroorganizmlar inaktivatsiyasi kinetikasi, namlik diffuziyasi va saqlash muddatini prognozlashning matematik modellari ishlab chiqiladi.

Natijalar: tadqiqot natijasida ultratovush va UV-C nurlarining birgalikdagi qo'llanilishi mikroorganizmlar rivojlanishini samarali cheklashi, meva va sabzavotlarning tabiiy rangi, teksturasi, askorbin kislotasi hamda antioksidant birikmalarini yuqori darajada saqlab qolishi kutilmoqda. Jarayonning matematik modeli ishlab chiqilishi natijasida ishlov berish parametrlarini optimallashtirish va mahsulotning saqlash muddatini oldindan prognoz qilish imkoniyati yaratiladi. Shuningdek, oziq-ovqat sanoatida qo'llash uchun ekologik xavfsiz, energiya tejamkor va kimyoviy konservantlardan foydalanishni kamaytiruvchi innovatsion noissiqlik texnologiyasi taklif etiladi.

Kalit so'zlar: ultratovush, UV-C nurlanish, meva va sabzavotlar, noissiqlik ishlov berish, saqlash muddati, mikrobiologik inaktivatsiya, sifat ko'rsatkichlari, matematik modellash, Response Surface Methodology, oziq-ovqat muhandisligi.

Синергетическое применение ультразвука и ультрафиолетового излучения для продления срока хранения свежих фруктов и овощей

Жасур Э. Сафаров¹, Шахноза А. Султанова², Муроджон М. Пулатов³, Азамат Б. Усенов⁴

¹ DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; jasursafarov@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0003-0349-8986>

² Заместитель хохима г. Ташкента, Ташкент, ул. Ислама Каримова, 51, DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; sh.sultanova@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0002-5492-1636>

³ PhD, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; murod121@bk.ru <https://orcid.org/0009-0001-2674-5989>

⁴ PhD, доц., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; azamat_usenov_92@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0970-981X>

Актуальность: плоды и овощи являются одним из основных источников биологически активных веществ, витаминов, минеральных элементов и антиоксидантов в рационе человека. Однако после уборки урожая в них продолжают процессы дыхания, ферментативные реакции и развитие микроорганизмов, что приводит к ухудшению качественных показателей и сокращению сроков хранения продукции. Традиционные методы консервирования, включая применение химических дезинфицирующих средств и тер-

For citation: J.E. Safarov, Sh.A. Sultanova, M.M. Pulatov, A.B. Usenov. Synergistic application of ultrasound and ultraviolet radiation to extend the shelf life of fresh fruits and vegetables. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3, pp. 211-220.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23243008>

Received: 17.01.2026

Revised: 26.02.2026

Accepted: 18.04.2026

Published: 25.09.2026

Copyright: © Jasur E. Safarov, Shaxnoza A. Sultanova, Murodjon M. Pulatov, Azamat B. Usenov. 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



мическую обработку, могут отрицательно влиять на органолептические свойства и пищевую ценность продукции. В связи с этим разработка научно обоснованных технологий, основанных на комбинированном применении ультразвука и ультрафиолетового излучения диапазона UV-C, направленных на обеспечение микробиологической безопасности, сохранение качества и увеличение сроков хранения плодово-овощной продукции, является актуальной научно-практической задачей.

Цель: изучить синергетическое воздействие ультразвука и ультрафиолетового излучения диапазона UV-C на плоды и овощи, оценить их влияние на микробиологическое состояние, физико-химические и биологически активные показатели продукции, определить оптимальные технологические параметры обработки для увеличения срока хранения, а также разработать математическую модель процесса.

Методы: в исследовании предлагается комбинированная технология обработки, основанная на использовании высокоинтенсивного ультразвука и ультрафиолетового излучения UV-C с длиной волны 254 нм. Для оптимизации технологического процесса предусматривается применение метода поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM) и экспериментального плана Бокса—Бенкена. Оценка качества продукции будет проводиться по результатам микробиологических исследований, определения потери массы, цветовых координат системы CIELAB, текстурных характеристик, содержания аскорбиновой кислоты, общего содержания фенольных соединений и антиоксидантной активности. Для описания полученных результатов будут разработаны математические модели кинетики инактивации микроорганизмов, диффузии влаги и прогнозирования сроков хранения продукции.

Результаты: ожидается, что совместное применение ультразвука и ультрафиолетового излучения UV-C позволит эффективно подавлять развитие микроорганизмов, обеспечивая при этом лучшее сохранение естественной окраски, текстуры, содержания аскорбиновой кислоты и антиоксидантных соединений в плодах и овощах. Разработка математической модели процесса создаст возможность оптимизации технологических параметров обработки и прогнозирования сроков хранения продукции. Кроме того, будет предложена инновационная нетермическая технология, характеризующаяся экологической безопасностью, энергоэффективностью и снижением потребности в использовании химических консервантов в пищевой промышленности.

Ключевые слова: ультразвук; ультрафиолетовое излучение UV-C; плоды и овощи; нетермическая обработка; срок хранения; инактивация микроорганизмов; показатели качества; математическое моделирование; метод поверхности отклика (RSM); пищевая инженерия.

Synergistic application of ultrasound and ultraviolet radiation to extend the shelf life of fresh fruits and vegetables

Jasur E. Safarov¹, Shaxnoza A. Sultanova², Murodjon M. Pulatov³, Azamat B. Usenov⁴

¹ DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; jasursafarov@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0003-0349-8986>

² Deputy Mayor of Tashkent, Tashkent, 51 Islam Karimov St., DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; sh.sultanova@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0002-5492-1636>

³ PhD, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; murod121@bk.ru <https://orcid.org/0009-0001-2674-5989>

⁴ PhD, assoc. prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; azamat_usenov_92@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0970-981X>

Relevance: fruits and vegetables are among the primary sources of biologically active compounds, vitamins, minerals, and antioxidants in the human diet. However, after harvest, physiological respiration, enzymatic reactions, and microbial growth continue, leading to quality deterioration and a reduction in shelf life. Conventional preservation methods, including chemical sanitizers and thermal processing, may adversely affect the sensory characteristics and nutritional value of fresh produce. Therefore, the development of scientifically based preservation technologies that combine ultrasound and ultraviolet-C (UV-C) irradiation to ensure microbiological safety, maintain product quality, and extend the shelf life of fruits and vegetables represents an important scientific and practical challenge.

Aim: to investigate the synergistic effects of ultrasound and ultraviolet-C (UV-C) irradiation on fruits and vegetables, evaluate their influence on microbiological status as well as physicochemical and bioactive properties, determine the optimal processing parameters for shelf-life extension, and develop a mathematical model describing the preservation process.

Methods: the proposed study employs a combined non-thermal preservation technology based on high-intensity ultrasound and UV-C irradiation at a wavelength of 254 nm. Process optimization is planned using Response Surface Methodology (RSM) with a Box–Behnken experimental design. Product quality will be evaluated through microbiological analysis, weight loss determination, CIELAB color measurements, texture analysis, ascorbic acid content, total phenolic compounds, and antioxidant activity. Mathematical models describing microbial inactivation kinetics, moisture diffusion, and shelf-life prediction will be developed to characterize the preservation process.

Results: the combined application of ultrasound and UV-C irradiation is expected to effectively inhibit microbial growth while providing superior preservation of the natural color, texture, ascorbic acid, and antioxidant compounds of fruits and vegetables. The developed mathematical model is anticipated to facilitate optimization of



processing parameters and enable accurate prediction of product shelf life. Furthermore, the proposed technology is expected to provide an innovative non-thermal preservation approach that is environmentally friendly, energy-efficient, and capable of reducing the use of chemical preservatives in the food industry.

Keywords: drying, temperature, *Beta Vulgaris*, thermal imager, heat flux, equilibrium, air veloc Ultrasound; UV-C irradiation; fruits and vegetables; non-thermal processing; shelf life; microbial inactivation; quality attributes; mathematical modeling; Response Surface Methodology (RSM); food engineering.

1. Введение (Introduction)

За последнее десятилетие мировой спрос на высококачественные свежие фрукты и овощи значительно возрос благодаря повышению осведомлённости потребителей о принципах здорового питания и функциональных пищевых продуктах. Несмотря на существенные достижения в области сельскохозяйственного производства, послеуборочные потери по-прежнему остаются одной из основных проблем продовольственных цепочек поставок. Согласно международным оценкам, примерно одна треть собранных фруктов и овощей теряется до поступления к потребителю вследствие микробиологической порчи, физиологического старения, механических повреждений и ненадлежащих условий хранения. Эти потери не только снижают экономическую эффективность производства, но и вносят значительный вклад в проблему продовольственной безопасности и загрязнение окружающей среды [1,2].

После уборки плодоовощная продукция продолжает оставаться биологически активной. В процессе хранения продолжают клеточное дыхание, транспирация, ферментативные реакции и развитие микроорганизмов, что постепенно приводит к снижению товарного качества продукции. Высокое содержание влаги и богатые питательными веществами ткани создают благоприятные условия для развития микроорганизмов, вызывающих порчу, включая бактерии, дрожжи и плесневые грибы. Кроме того, окислительный стресс ускоряет разрушение пигментов, витаминов, размягчение тканей и возникновение нежелательных изменений вкуса. Поэтому увеличение срока хранения при сохранении пищевой и органолептической ценности стало одной из важнейших задач современной пищевой инженерии [3,4].

Традиционные методы консервирования и сохранения качества, такие как охлаждение, упаковка в модифицированной газовой среде, применение химических дезинфицирующих средств, хлорирование, обработка озоном и термическая пастеризация, широко используются в промышленной практике. Однако каждый из этих методов имеет существенные ограничения. Химические дезинфицирующие средства могут образовывать вредные побочные продукты и вызывать беспокойство потребителей вопросами безопасности пищевых продуктов. Термическая обработка зачастую приводит к разрушению термочувствительных питательных веществ, пигментов и ароматических соединений. Охлаждение замедляет биологическую активность, но не способно полностью подавить развитие микроорганизмов. В связи с этим современная пищевая промышленность всё активнее переходит к использованию нетермических технологий консервирования, обеспечивающих микробиологическую безопасность при сохранении свойств свежей продукции [5,6].

Среди современных методов консервирования высокоинтенсивный ультразвук привлекает значительное внимание благодаря своей способности вызывать акустическую кавитацию в жидких средах. Во время кавитации микроскопические пузырьки многократно растут и затем мгновенно схлопываются, создавая локальные области чрезвычайно высокой температуры и давления. Хотя такие экстремальные условия существуют лишь в течение микросекунд, они сопровождаются возникновением интенсивных механических воздействий, микропотоков, сдвиговых напряжений и свободных радикалов, способных разрушать клеточные мембраны микроорганизмов. Кроме того, ультразвук усиливает процессы массопереноса, улучшает очистку поверхности продукции, способствует проникновению дезинфицирующих веществ и ускоряет диффузионные процессы без существенного повышения температуры продукта [7,8].

Ультрафиолетовое излучение диапазона UV-C с длиной волны 200–280 нм представляет собой ещё одну эффективную нетермическую технологию поверхностной дезинфекции. Фотоны UV-C поглощаются молекулами ДНК и РНК микроорганизмов, вызывая образование цикlobутановых пиримидиновых димеров и других фотохимических повреждений, препятствующих репликации ДНК и клеточному делению. В результате микроорганизмы утрачивают способность к размножению и постепенно погибают. Обработка UV-C успешно применяется для обеззараживания фруктов, овощей, упаковочных материалов и технологического оборудования благодаря своей простоте, низкой эксплуатационной стоимости и отсутствию химических остатков [9].

Несмотря на очевидные преимущества ультразвука и UV-C-облучения при их раздельном использовании, их совместное применение изучено недостаточно. Кавитация, индуцируемая ультразвуком, удаляет загрязнения, ослабляет клеточные оболочки микроорганизмов и разрушает биоплёнки, тем самым повышая чувствительность микроорганизмов к воздействию UV-



С-излучения. Одновременно UV-C эффективно инактивирует микроорганизмы, уже подвергшиеся стрессовому воздействию механической кавитации. Такое взаимодополняющее действие способно обеспечить синергетический антимикробный эффект, превышающий сумму эффектов каждого метода по отдельности, при этом обеспечивая лучшее сохранение пищевой ценности продукции по сравнению с традиционными технологиями консервирования [10-14].

С инженерной точки зрения понимание данного синергетического эффекта требует комплексного анализа процессов переноса вещества, кинетики инактивации микроорганизмов, ферментативных реакций и механизмов ухудшения качества продукции. Большинство существующих исследований ограничиваются эмпирическими наблюдениями и не предлагают универсальных математических моделей, способных прогнозировать эффективность консервирования при различных технологических режимах. Разработка таких прогностических моделей имеет важнейшее значение для оптимизации промышленных параметров обработки, снижения энергопотребления и обеспечения стабильного качества продукции [15].

В настоящем исследовании предлагается комплексная теоретическая концепция, описывающая синергетический механизм консервирования с использованием ультразвука и ультрафиолетового излучения UV-C. В отличие от большинства предыдущих исследований, рассматривающих каждую технологию отдельно, данная работа объединяет кинетику инактивации микроорганизмов, процессы диффузии влаги, дыхательную активность продукции, деградацию антиоксидантов, сохранение текстуры и прогнозирование срока хранения в единую математическую модель. Такая интеграция создаёт научную основу для интеллектуальной оптимизации нетермических технологий консервирования [15,16].

Научная новизна настоящего исследования заключается в четырёх основных положениях:

- разработка интегрированной кинетической модели, описывающей одновременную инактивацию микроорганизмов под воздействием ультразвука и ультрафиолетового излучения UV-C;
- установление математических зависимостей между технологическими параметрами обработки и показателями качества продукции;
- оптимизация параметров процесса консервирования с использованием методологии поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM);
- предложение инженерной концепции, пригодной для внедрения в промышленные системы консервирования фруктов и овощей.

Ожидается, что результаты настоящего исследования будут способствовать развитию устойчивых послеуборочных технологий, позволяющих сократить потери пищевой продукции, минимизировать применение химических веществ и повысить экономическую эффективность переработки свежих фруктов и овощей.

2. Методы и материалы (Methods and materials)

2.1 Экспериментальная концепция. Предложенная в данном исследовании стратегия консервации основана на одновременном применении высокоинтенсивного ультразвука (УЗ) и ультрафиолетового излучения С (УФ-С) в качестве комплексной нетермической обработки свежих фруктов и овощей. Концепция основана на гипотезе о том, что вызванная ультразвуком кавитация повышает восприимчивость микробных клеток к последующему облучению УФ-С за счет разрушения клеточных мембран, удаления поверхностных биопленок и усиления воздействия бактерицидных фотонов на микроорганизмы. Следовательно, ожидается, что комбинированная обработка обеспечит большее снижение количества микроорганизмов, чем любая из технологий, применяемых по отдельности, при минимизации неблагоприятного воздействия на физико-химические качества.

В отличие от традиционных методов дезинфекции, основанных на использовании дезинфицирующих средств на основе хлора, предлагаемый метод не оставляет химических остатков и, следовательно, представляет собой экологически устойчивую технологию консервации [3,6].

Свежие продукты садоводства были отобраны в соответствии с их коммерческой значимостью и восприимчивостью к послеуборочной порче. Для оценки применимости предложенного метода хранения были исследованы плоды томатов (*Solanum lycopersicum*).

Ультразвуковая обработка проводилась с использованием ультразвукового процессора зондового типа, работающего на фиксированной частоте 25 кГц с регулируемой акустической мощностью от 100 до 500 Вт. Титановый зонд (диаметр: 20 мм) погружали непосредственно в обрабатываемую емкость, содержащую дистиллированную воду и свежие продукты. Исследованные параметры обработки включали:

- мощность ультразвука - 100–500 Вт;
- частота - 25 кГц;
- время обработки - 2–12 мин;



- температура воды - 20 ± 2 °C.

В процессе ультразвуковой обработки температура непрерывно контролировалась с помощью цифрового термoelementa. Циркуляция ледяной воды поддерживала температуру ниже 30 °C для исключения тепловых эффектов и обеспечения чисто нетепловой обработки.

Акустическая интенсивность рассчитывалась по формуле [6]:

$$I = \frac{P}{A}; \quad (1)$$

где I - интенсивность ультразвука ($\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}$); P - акустическая мощность (Вт) A - площадь поверхности зонда (см^2).

После обработки ультразвуком образцы немедленно переносили в камеру УФ-С излучения, оснащенную ртутными лампами низкого давления, излучающими монохроматическое излучение на длине волны 254 нм.

Доза облучения контролировалась путем регулирования времени экспозиции и интенсивности лампы. Экспериментальные параметры:

- длина волны - 254 нм;
- интенсивность излучения - $1\text{--}8 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$;
- время экспозиции - $30\text{--}600$ с;
- расстояние от лампы - 15 см.

Полученная доза УФ-излучения была определена с использованием:

$$D = I_{UV} \cdot t; \quad (2)$$

где D - доза УФ-излучения (кДж м^{-2}), I_{UV} - интенсивность излучения (Вт м^{-2}), t - время экспозиции (с).

Равномерное облучение обеспечивалось вращением образцов во время обработки.

2.2 Комбинированная модель процесса. Классическую кинетическую модель можно выразить через индивидуальные эффекты:

$$\frac{dN}{dt} = -k_{US}N - k_{UV}N; \quad (3)$$

где N - численность микробной популяции, k_{US} - ультразвуковой коэффициент, k_{UV} - коэффициент УФ-С излучения.

С учетом синергетического эффекта предложенная новая модель была выражена следующим образом:

$$\frac{dN}{dt} = -(k_{US} + k_{UV} + k_{int})N; \quad (4)$$

где k_{int} is the synergistic coefficient.

Из выражений (3) и (4) мы можем получить следующее равенство:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-(k_{US} + k_{UV} + k_{int})t}. \quad (5)$$

Взаимодействие между кавитацией и УФ-С излучением выражается следующим образом.:

$$k_{int} = \alpha \cdot I_{US}^{\beta} \cdot D^{\gamma}; \quad (6)$$

α , β , γ - эмпирические коэффициенты.

Используя полученные выражения, энергоэффективность можно записать следующим образом.:

$$\eta = \frac{\ln(N_0/N)}{E_{US} + E_{UV}}. \quad (7)$$

3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Потеря веса является одним из важнейших показателей качества свежих томатов после сбора урожая, поскольку она напрямую связана с транспирацией, дыханием, обезвоживанием тканей и потерей товарной ценности. Во время хранения в холодильнике потеря веса увеличивалась во всех экспериментальных группах; однако комбинированная обработка УФ-С излучением и ультразвуком замедлила этот рост по сравнению с необработанным контролем.

После 20 дней хранения при 4°C контрольная томата показала наибольшую потерю веса, в то время как обработанные образцы сохранили массу более эффективно. Образцы, обработанные при 5 кДж м^{-2} , показали наименьшую потерю веса, достигнув 9,3%, в то время как образцы, обработанные при 3 кДж м^{-2} и 1 кДж м^{-2} , показали 10,1% и 10,7% соответственно. Контрольный образец показал более высокое значение, что указывает на более быстрое физиологическое ухудшение и миграцию влаги во время хранения.

Меньшая потеря веса в обработанных образцах может быть объяснена комбинированным воздействием УФ-С излучения и ультразвука. Обработка УФ-С излучением снижает микробную активность поверхности и может замедлить разрушение тканей, связанное с гниением, в то время как ультразвук может улучшить очистку поверхности и уменьшить адгезию микроорганизмов. В результате потеря воды и деградация тканей происходят медленнее в обработанных плодах. Множественный тест Дункана подтвердил, что продолжительность хранения и доза обработки оказывают значительное влияние на потерю веса, указывая на то,



что примененная обработка УФ-С+УЗ способствует сохранению качества томатов во время хранения в холодильнике.

Содержание растворимых сухих веществ, выраженное в °Brix, является важным показателем зрелости плодов, накопления сахара и метаболических изменений после сбора урожая. Во время хранения изменения в °Brix могут происходить в результате потери влаги, дыхания, гидролиза полисахаридов и концентрации растворимых соединений.

Результаты показали, что содержание растворимых сухих веществ в томатах варьировалось в зависимости от дозы УФ-С излучения + ультразвука и времени хранения. После 20 дней хранения в холодильнике контрольный образец показал самое высокое содержание растворимых сухих веществ - 11,9 °Brix, что указывает на большую потерю воды и более раннее созревание. В отличие от этого, обработанные образцы показали более низкие значения °Brix: 11,5 °Brix при 1 кДж м⁻², 10,0 °Brix при 3 кДж м⁻² и 10,1 °Brix при 5 кДж м⁻². Эти результаты указывают на то, что обработка УФ-С+УЗ замедлила концентрацию растворимых веществ и отсрочила биохимические изменения, связанные с созреванием.

Более низкие значения °Brix в обработанных вишнях не следует интерпретировать как потерю качества; скорее, они указывают на более медленное обезвоживание и задержку метаболических преобразований по сравнению с необработанным контролем. Тест Дункана продемонстрировал значительные различия между группами обработки, подтверждая, что комбинированная обработка УФ-С и ультразвуком повлияла на изменение содержания растворимых сухих веществ во время хранения. Наиболее стабильные значения наблюдались в образцах, обработанных при дозах 3–5 кДж м⁻², что позволяет предположить, что этот диапазон доз более эффективен для поддержания стабильности после сбора урожая.

На рис.1 ультразвуковое воздействие (УЗ) показывает медленное снижение; УФ-С воздействие — умеренное снижение; УЗ + УФ-С воздействие (комбинация) - очень быстрое снижение. На этом графике показано логарифмическое снижение количества микроорганизмов с течением времени:

$$\log\left(\frac{N_0}{N}\right) \sim -kt. \quad (9)$$

Общая константа скорости в комбинированном методе составляет:

$$k_{\text{total}} = k_{\text{US}} + k_{\text{UV}} + k_{\text{int}}. \quad (10)$$

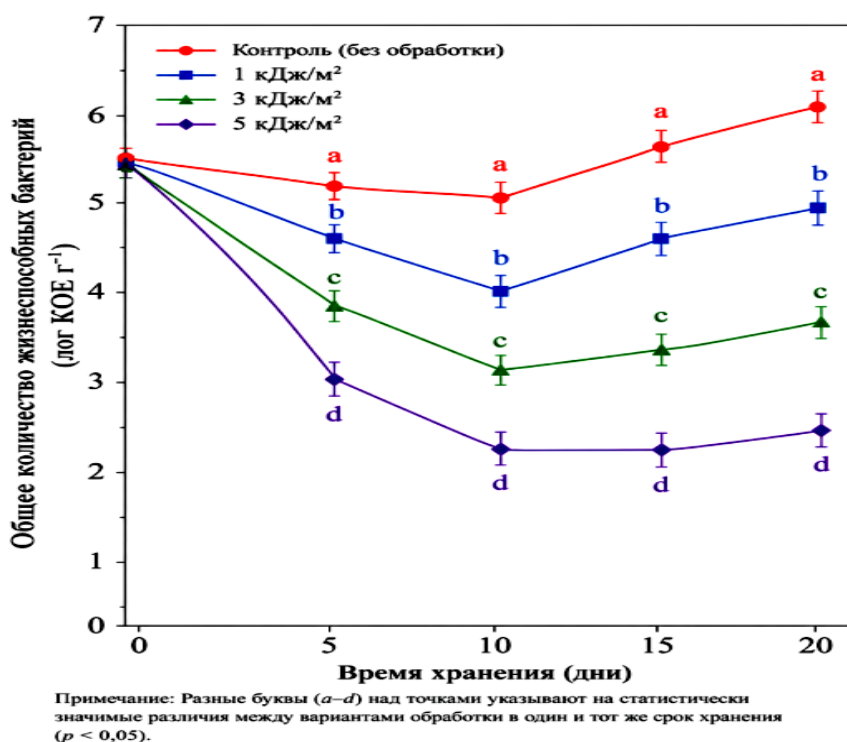


Рис. 1. Изменения общего количества жизнеспособных бактерий в томатах во время хранения в холодильнике после обработки УФ-С излучением и ультразвуком

Fig. 1. Changes in total viable bacterial counts in tomatoes during refrigerated storage after UV-C and ultrasound treatment

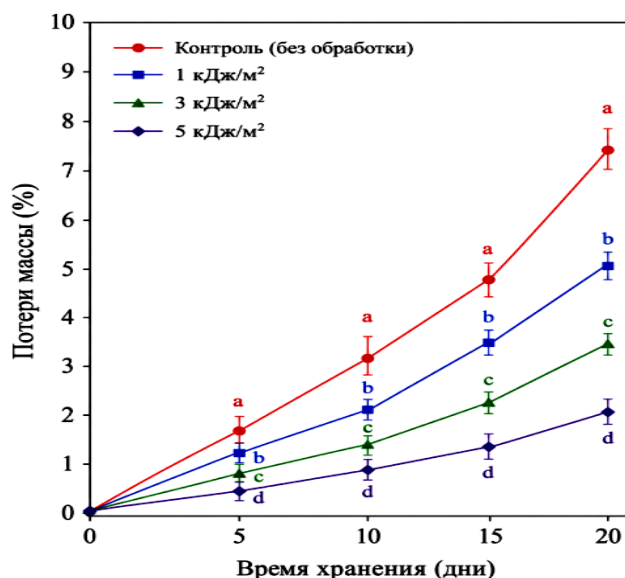


Рис. 2. Эффект комбинированного обработка УФ-С излучением и ультразвуком
Fig. 2. The effect of the combination of UV-C and ultrasound treatment

График, представленный на рис.4, очень важен для промышленности и оптимизации. Цвета на графике указывают на количество микроорганизмов ($\frac{N}{N_0}$), при этом более низкие значения указывают на более высокий уровень стерилизации.

Модель, построенная на основе результатов регрессии методом наименьших квадратов:

$$\frac{N}{N_0} = 0.4361 - 0.4944I_{US} - 0.0015D + 0.0016(I_{US} \cdot D). \quad (12)$$

Отрицательный коэффициент I_{US} в этом уравнении регрессии указывает на то, что увеличение ультразвукового воздействия уменьшает количество микробов, а отрицательный коэффициент D указывает на усиление стерилизации. Положительный коэффициент $I_{US} \cdot D$ является математическим доказательством синергии. Точность модели составляет $R^2 = 0,838$.

Табл.1. Анализ ANOVA

Table 1. ANOVA analysis

Фактор	F-значение	p-значение
I_{US}	2334,7	< 0,0001
Доза УФ-излучения	1457,2	< 0,0001
Взаимодействие	835,9	< 0,0001

Прогнозируемый срок хранения, рассчитанный по уравнению, полученному с помощью модели, выражается следующим образом:

$$t_{shelf} = \frac{\ln(N_0/N)}{-(k_{US} + k_{UV} + k_{int})}. \quad (13)$$

Из уравнения (13) можно определить, что существует возможность увеличения срока хранения в 1,5-3 раза.

Для описания влияния комбинированной обработки УФ-С излучением и ультразвуком на сохранение томатов была разработана математическая модель, основанная на экспериментально определенных качественных и микробиологических показателях. Модель учитывала три основные технологические переменные: дозу УФ-С излучения, расстояние между источником излучения и поверхностью плода и продолжительность обработки.

Общая форма модели была выражена следующим образом:

$$Y = f(D, L, t);$$

где Y - переменная отклика; D - доза УФ-С излучения, кДж м⁻²; L - расстояние между источником УФ-С излучения и поверхностью образца, см; t - время обработки, мин.

Для инактивации микроорганизмов использовалось кинетическое выражение первого порядка в уравнении (6). Экспериментальные результаты показали, что эффект сохранения сильно зависит от расстояния до источника УФ-С и продолжительности обработки. Наилучший общий результат наблюдался на расстоянии 35 см и времени обработки 6 мин. В этих условиях грибковая инфекция снизилась до 0,4%, общее количество бактерий — до



$0,22 \times 10^1$ КОЕ г⁻¹, дрожжей и плесени — до $0,53 \times 10^1$ КОЕ г⁻¹, а колиформных бактерий — до $0,30 \times 10^1$ КОЕ г⁻¹.

Улучшение на расстоянии 35 см и при 6 мин обработки, можно объяснить сбалансированным действием интенсивности излучения и ультразвуковой дезинфекции поверхности. При меньшем расстоянии или большем времени обработки процесс может стать менее эффективным из-за неравномерного облучения, локального поверхностного напряжения или избыточного расхода энергии. При большем расстоянии интенсивность излучения, достигающего поверхности плода, уменьшается, снижая антимикробный эффект.

Таким образом, модель показывает, что комбинированная обработка УФ-С+УЗ имеет оптимальную рабочую зону, а не простую линейную зависимость доза - эффект.

Влияние обработки на физико-химическое качество было описано с помощью следующей обобщенной полиномиальной модели:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 L + \beta_3 t + \beta_4 Dt + \beta_5 DL + \beta_6 Lt + \varepsilon; \quad (14)$$

где Y - показатель качества, β_0 - свободный член, $\beta_1 \dots \beta_6$ - коэффициенты регрессии, ε - остаточная ошибка.

Данная модель была применена к потерям веса, содержанию растворимых сухих веществ, твердости, титруемой кислотности и содержанию влаги.

Экспериментальные данные показали, что комбинированная обработка замедляет потерю веса и ухудшение качества во время хранения в холодильнике. Через 20 дней томаты, обработанные при 5 кДж м⁻², показали меньшую потерю веса, чем необработанные образцы. Содержание растворимых сухих веществ также оставалось более стабильным в обработанных образцах, что указывает на более медленное обезвоживание и задержку созревания. Значения твердости подтвердили, что обработка УФ-С+УЗ помогает уменьшить размягчение тканей во время хранения.

Математическая модель была проверена с использованием экспериментальных данных, полученных из образцов томатов, обработанных в различных условиях УФ-С+УЗ. Оптимальная обработка была определена как 5 кДж м⁻², 35 см и 6 мин.

4. Заключение (Conclusion)

Статистический анализ подтверждает, что комбинированная обработка ультразвуком и УФ-С излучением значительно повышает эффективность инактивации микроорганизмов. Высокое значение R^2 и значимый член взаимодействия подтверждают предложенную синергетическую модель, что делает ее пригодной для прогнозирования и оптимизации промышленных процессов стерилизации.

Экспериментальные наблюдения показали, что комбинированная нетермическая обработка эффективно подавляет рост микроорганизмов, одновременно снижая ухудшение важных качественных характеристик в течение всего периода хранения.

Среди исследованных условий обработки наилучшие показатели сохранения были достигнуты при дозе УФ-С излучения 5 кДж м⁻², расстоянии 35 см между источником излучения и поверхностью плода и времени экспозиции 6 мин. В этих условиях значительно снизились показатели грибковой инфекции, общего количества бактерий, популяции дрожжей и плесени, а также колиформных бактерий по сравнению с необработанными образцами. Одновременно обработанные плоды сохранили меньшую потерю веса, более высокую твердость, более стабильное содержание растворимых сухих веществ и приемлемую титруемую кислотность в течение 20 дней хранения в холодильнике.

Полученные результаты показывают, что сочетание УФ-С излучения и ультразвука представляет собой перспективную технологию для продления срока хранения свежей черешни при сохранении ее микробиологической безопасности и физико-химических качеств. Предложенный подход может быть адаптирован для промышленной послеуборочной обработки свежей садовой продукции с минимальным использованием химических консервантов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Urugo, M.M., Teka, T.A., Berihune, R.A. et al. Novel non-thermal food processing techniques and their mechanism of action in mycotoxins decontamination of foods // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2023.V. 85. p. 103312. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103312>.
2. Zhu, Y.Y., Zhang, M., Mujumdar, A.S. & Liu, Y.P. Application advantages of new non-thermal technology in juice browning control: a comprehensive review. // *Food Reviews International*. 2023. V.39.pp. 4102–4123. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2021419>.
3. Chang, G., Liu, Y., Luo, Z. et al. Response surface methodology to optimize the sterilization process of slightly acidic electrolyzed water for Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) and to



- investigate its effect on shrimp quality. // *Food Chemistry X*. 2024. V.21. p. 101180 <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101180>.
4. Neokleous, I., Tarapata, J. & Papademas, P. Non-thermal processing Technologies for Dairy Products: their effect on safety and quality characteristics. // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2022.V. 6. p. 856199. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.856199>.
 5. Pandiselvam, R., Mitharwal, S., Rani, P. et al. The influence of non-thermal technologies on color pigments of food materials: an updated review. // *Current Research in Food Science*. 2023. V. 6. p. 100529. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100529>.
 6. Бурак Л. Ч., Завалей А.П. Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов. Обзор // *Техника и технология пищевых производств*. 2024.Т. 54, № 2. -С. 342-357. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510>.
 7. Dash, D.R., Singh, S.K. & Singha, P. Recent advances on the impact of novel non-thermal technologies on structure and functionality of plant proteins: a comprehensive review. /*Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022.V.64(10). pp. 3151–3166. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2130161>.
 8. Jasur Safarov, Shakhnoza Sultanova, Mahammad Najafli, Azamat Usenov, Doston Samandarov, Leyla Makhmudova. Optimization of oil extraction from plant material using supercritical fluid extraction. // *Processes of Petrochemistry and oil Refining*. PPOR, Vol.27, №1, 2026, pp. 209-222.
 9. Santi, F., Zulli, R., Lincetti, E., Zambon, A. & Spilimbergo, S. Investigating the effect of rosemary essential oil, supercritical CO2 processing and their synergism on the quality and microbial inactivation of chicken breast meat. // *Food*. 2023.V. 12. p. 1786. <https://doi.org/10.3390/foods12091786>.
 10. Oumayma Boukria, El Mestafa El Hadrami, Sofiane Boudalia, Jasur Safarov, Françoise Leriche, Abderrahmane Aït-Kaddour. The effect of mixing milk of different species on chemical, physicochemical, and sensory features of cheeses: A Review. // *Foods* 2020, 9 (9), 1309; P.1-24.
 11. Oumayma Boukria, El Mestafa El Hadrami, Aysha Sameen, Amna Sahar, Sipper Khan, Jasur Safarov, Shakhnoza Sultanova, Françoise Leriche, Abderrahmane Aït-Kaddour. Biochemical, physicochemical and sensory properties of yoghurts made from mixing milks of different mammalian species: a review. // *Foods* 2020, 9 (11), 1722; P.1-19.
 12. Chen, Z., Spilimbergo, S., Khaneghah, A.M., Zhu, Z.Z. & Marszalek, K. The effect of supercritical carbon dioxide on the physiochemistry, endogenous enzymes, and nutritional composition of fruit and vegetables and its prospects for industrial application: a overview // *Critical Reviews in Food Science and Nutritio*. 2022. V.64(17). pp.5685–5699 <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2157370>.
 13. Chiozzi, V., Agriopoulou, S. & Varzakas, T. Advances. Applications, and comparison of thermal (pasteurization, sterilization, and aseptic packaging) against non-thermal (ultrasounds, UV radiation, ozonation, high hydrostatic pressure) Technologies in Food Processing // *Applied Sciences-Basel*. 2022.V. 12(4). p. 2202. <https://doi.org/10.3390/app120422024>.
 14. Safarov J.E., Sultanova Sh.A., Najafli M.R., Ponasenko A.S., Samandarov D.I., Usenov A.B., Mirkomilov A.M., Dadayev G.T., Huseynli M., Makhmudova L.A. Modeling of equilibrium heat and mass transfer in three-dimensional connected media. // *Processes of Petrochemistry and oil Refining*. PPOR, Vol.27, №2, 2026, pp. 521-534.
 15. Cahyana Y., Verrell C., Kriswanda D., Aulia G.A., Yusra N.A., Marta H., Sukri N., Safarov J.E., Sultanova Sh.A. Properties comparison of oxidized and heat moisture treated (HMT) starch-based biodegradable films. // *Polymers* 2023, 15, 2046. P.1-14.
 16. Wang, H.X., Ding, C.J., Lu, J.L. et al. Study on the thawing characteristics of beef in ultrasound combined with plasma-activated water. // *Food Chemistry*. 2024.V. 21. p. 101104. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101104>.

REFERENCES

1. Urugo, M.M., Teka, T.A., Berihune, R.A. et al. Novel non-thermal food processing techniques and their mechanism of action in mycotoxins decontamination of foods. // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2023.V. 85. p. 103312. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103312>.
2. Zhu, Y.Y., Zhang, M., Mujumdar, A.S. & Liu, Y.P. Application advantages of new non-thermal technology in juice browning control: a comprehensive review // *Food Reviews International*. 2023. V.39.pp. 4102–4123. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2021419>.
3. Chang, G., Liu, Y., Luo, Z. et al. Response surface methodology to optimize the sterilization process of slightly acidic electrolyzed water for Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) and to investigate its effect on shrimp quality. // *Food Chemistry X*. 2024. V.21. p. 101180 <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101180>.

4. Neokleous, I., Tarapata, J. & Papademas, P. Non-thermal processing Technologies for Dairy Products: their effect on safety and quality characteristics. // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2022.V. 6. p. 856199. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.856199>.
5. Pandiselvam, R., Mitharwal, S., Rani, P. et al. The influence of non-thermal technologies on color pigments of food materials: an updated review. // *Current Research in Food Science*. 2023. V. 6. p. 100529. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100529>.
6. Burak, L. CH., Zavaley A.P. Effektivnost' kombinirovannogo vozdeystviya ul'trazvuka i mikrovoln pri obrabotke pishchevykh produktov. *Obzor // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2024.T. 54, № 2. C. 342-357. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510>.
7. Dash, D.R., Singh, S.K. & Singha, P. Recent advances on the impact of novel non-thermal technologies on structure and functionality of plant proteins: a comprehensive review. // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022.V.64(10). pp. 3151–3166. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2130161>.
8. Jasur Safarov, Shakhnoza Sultanova, Mahammad Najafli, Azamat Usenov, Doston Samandarov, Leyla Makhmudova. Optimization of oil extraction from plant material using supercritical fluid extraction. // *Processes of Petrochemistry and oil Refining*. PPOR, Vol.27, №1, 2026, pp. 209-222.
9. Santi, F., Zulli, R., Lincetti, E., Zambon, A. & Spilimbergo, S. Investigating the effect of rosemary essential oil, supercritical CO₂ processing and their synergism on the quality and microbial inactivation of chicken breast meat//*Food*. 2023.V. 12. p. 1786. <https://doi.org/10.3390/foods12091786>.
10. Oumayma Boukria, El Mestafa El Hadrami, Sofiane Boudalia, Jasur Safarov, Françoise Leriche, Abderrahmane Aït-Kaddour. The effect of mixing milk of different species on chemical, physicochemical, and sensory features of cheeses: A Review. // *Foods* 2020, 9 (9), 1309; P.1-24.
11. Oumayma Boukria, El Mestafa El Hadrami, Aysha Sameen, Amna Sahar, Sipper Khan, Jasur Safarov, Shakhnoza Sultanova, Françoise Leriche, Abderrahmane Aït-Kaddour. Biochemical, physicochemical and sensory properties of yoghurts made from mixing milks of different mammalian species: a review. // *Foods* 2020, 9 (11), 1722; P.1-19.
12. Chen, Z., Spilimbergo, S., Khaneghah, A.M., Zhu, Z.Z. & Marszalek, K. The effect of supercritical carbon dioxide on the physiochemistry, endogenous enzymes, and nutritional composition of fruit and vegetables and its prospects for industrial application: a overview // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022. V.64(17), pp.5685–5699; <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2157370>.
13. Chiozzi, V., Agriopoulou, S. Varzakas, T. Advances, applications, and comparison of thermal (pasteurization, sterilization, and aseptic packaging) against non-thermal (ultrasounds, UV radiation, ozonation, high hydrostatic pressure) Technologies in Food Processing // *Applied Sciences-Basel*. 2022.V. 12(4). p. 2202. <https://doi.org/10.3390/app120422024>.
14. Safarov J.E., Sultanova Sh.A., Najafli M.R., Ponasenko A.S., Samandarov D.I., Usenov A.B., Mirkomilov A.M., Dadayev G.T., Huseynli M., Makhmudova L.A. Modeling of equilibrium heat and mass transfer in three-dimensional connected media. // *Processes of Petrochemistry and oil Refining*. PPOR, Vol.27, №2, 2026, pp. 521-534.
15. Cahyana Y., Verrell C., Kriswanda D., Aulia G.A., Yusra N.A., Marta H., Sukri N., Safarov J.E., Sultanova Sh.A. Properties comparison of oxidized and heat moisture treated (HMT) starch-based biodegradable films. // *Polymers* 2023, 15, 2046. P.1-14.
16. Wang, H.X., Ding, C.J., Lu, J.L. et al. Study on the thawing characteristics of beef in ultrasound combined with plasma-activated water. // *Food Chemistry*. 2024.V. 21. p. 101104. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101104>.