

## Анализ применения микроволнового излучения в технологиях стерилизации растительного сырья

Канд. техн. наук **А.А. Королев**, process@vniitek.ru  
канд. техн. наук **С.Б. Тюрина**, sofya.tyurina@yandex.ru  
канд. хим. наук **М.В. Тришканева**, labnta@vniitek.ru

*Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН  
142703, Россия, Московская обл., Видное, Школьная ул., 78*

Исследовали возможность применения СВЧ-энергии в технологиях стерилизации растительного сырья и производстве пищевых продуктов с целью поиска решений сохранения качества при хранении и переработке свежего растительного сырья и снижения потерь, связанных с ростом микроорганизмов. Рассматривали особенности диэлектрического нагрева. Показаны преимущества применения СВЧ-нагрева и его эффективность в технологии стерилизации, пастеризации и обеззараживании растительного сырья. В пищевой промышленности применяют микроволновое поле, работающее на частотах 915 МГц и 2,45 ГГц. Процесс микроволновой стерилизации кратковременной высокотемпературной обработки применяется не только для инактивации патогенных микроорганизмов, но и для минимизации снижения качества пищевых продуктов на протяжении всего срока годности. Применение микроволнового нагрева способствует инактивации ферментов, снижающих органолептические качества и питательную ценность фруктов и овощей. При обработке продуктов и сырья с низкой влажностью микроволновый энергоподвод имеет преимущество, заключающееся в более короткой продолжительности обработки. Для многих видов растительного сырья длительное воздействие микроволновой энергии наносит необратимые повреждения, изменяя показатели качества, в том числе и физико-химические. Применение импульсной, комбинированной обработки может быть решением этой проблемы. Микроволновую обработку используют как для сохранения качества и предупреждения заболеваний плодов, так и в послеуборочный период. Этот способ существенно снижает общие энергозатраты стерилизации, обеспечивая сохранение питательной ценности растительного сырья, благодаря эффективному уничтожению таких опасных микроорганизмов, как *Salmonella*, *E.coli*, *Campylobacter sp.*, *Staphylococcus sp.*, *Listeria*, а также дрожжи и плесени. Данный анализ является первой частью в исследованиях по определению оптимальных режимов обработки пищевой продукции.

**Ключевые слова:** предварительная обработка сырья; стерилизация; микроволновое излучение; диэлектрический нагрев; растительное сырье; микроорганизмы.

DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-3-81-91

---

## The application of microwave radiation for sterilization of plant raw materials

Ph. D. **Aleksei A. Korolev**, process@vniitek.ru  
Ph. D. **Sofia B. Tyurina**, sofya.tyurina@yandex.ru  
Ph. D. **Marina V. Trishkaneva**, labnta@vniitek.ru

*All-Russian Research Institute of Canning Technology –  
Branch of V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS  
78, Sholnaya str., Vidnoe, Moscow region, 142703, Russia*

The possibilities of microwave energy application for sterilization of plant raw materials and production of foodstuffs to search the solutions of quality preservation at storage and processing of fresh plant raw materials and decrease of losses connected with growth of microorganisms are discussed. The peculiarities of dielectric heating are considered. The advantages of microwave heating application and its efficiency in the technology of sterilization, pasteurization, and disinfection of vegetable raw materials are shown. The food industry uses a microwave field operating at frequencies of 915 MHz and 2.45 GHz. The process of microwave sterilization of short-term high-temperature processing is used not only for inactivation of pathogenic microorganisms, but also to minimize the decrease in the quality of food products throughout their shelf life. Application of microwave heating promotes inactivation of enzymes reducing organoleptic qualities and nutritive value of fruits and vegetables. When processing products and raw materials with low humidity, microwave energy supply has the advantage of shorter processing times. For many types of plant raw materials prolonged exposure to microwave energy causes irreversible damage and change quality indicators including physicochemical ones. The use of combined pulsed

processing can be a solution to this problem. Microwave treatment is used to maintain quality and prevent fruit diseases, as well as in the post-harvest period. This method significantly reduces the overall energy consumption of sterilization, ensuring the preservation of its quality and nutritional value through the effective elimination of dangerous microorganisms such as *Salmonella*, *E.coli*, *Campylobacter sp.*, *Staphylococcus sp.*, *Listeria*, as well as yeast and mold. This analysis is the first part of a study to determine the optimal treatment of food products.

**Keywords:** pretreatment of raw materials; sterilization; microwave radiation; dielectric heating; plant materials; microorganisms.

## Введение

Воздействие физических методов на различные виды микроорганизмов неоднородно, и для достижения эффекта необходимы интенсивные режимы обработки. Основной проблемой применения интенсивной обработки физическими методами растительного сырья, является снижение его качества. Так, при использовании повышенной мощности и длительном воздействии СВЧ-поля, происходит разрушение клеточных структур растительных тканей, питательных веществ и витаминов. Для такого сырья, как грибы, свежая зелень, фрукты эта проблема актуальна. Применение комбинированных методов стерилизации позволит решить ряд проблем с выборочным воздействием различных видов обработки на микроорганизмы. Таким образом, необходим поиск решений сохранения качества при хранении и переработке свежего растительного сырья и снижения потерь, повышения микробиологической стабильности и безопасности пищевой продукции.

В настоящее время применяются различные физические методы для послеуборочной обработки сельскохозяйственной продукции с целью обеззараживания и увеличения продолжительности ее хранения. Эти методы предусматривают использование ионизирующих излучений (таких, как  $\gamma$ -излучение, облучение электронным пучком) [1,2], ультрафиолетового [3], инфракрасного [4], сверхвысокочастотного электромагнитного излучения [5–8].

Цель работы – разработка комбинированной системы антисептирования плодоовощной продукции физическими методами.

Задачи работы: провести анализ применения физических методов воздействия, в частности СВЧ-поля, как элемента комбинированной обработки пищевых продуктов для обеспечения требований микробиологической безопасности и определение граничных условий их использования.

## Объекты и методы исследования

В исследовании применяли общепринятые методы исследований: систематизация, анализ и обобщение. Основными объектами анализа являются существующие подходы к применению СВЧ-поля для воздействия на нативную и секундарную микрофлору растительного сырья и продуктов их переработки, описанные в отечественных и зарубежных научных публикациях и патентах.

## Представление о природе диэлектрического нагрева обрабатываемых объектов

СВЧ-поле создается электромагнитным излучением в диапазоне частот от 300 МГц до 300 ГГц, соответствующем длинам волн от 1 мм до 1 м. Для промышленных, научных и медицинских целей используют частоты 915 МГц и 2,45 ГГц [6, 9]. Микроволновая обработка сырья широко применяется в пищевой промышленности для сушки, нагрева, бланширования, варки, пастеризации, стерилизации. Микроволновый нагрев имеет значительные преимущества по сравнению с обычными методами нагрева, в том числе и по показателям энергоэффективности.

Эффект разогрева в микроволновом поле связан с диэлектрическими свойствами объектов. Под действием СВЧ-поля молекулы воды (диполи) совершают колебательные и вращательные движения, ориентируясь с частотой поля по его электрическим линиям. Чем больше воды в заданном объеме, чем больше молекул участвует в этом движении, тем больше тепловой энергии выделяется, и разогрев происходит во всем объеме продукта [7, 10].

Преимущества, которые способны обеспечить технологии микроволновой обработки продуктов переработки растительного и животного происхождения, опираются на целый ряд свойств, характеризующих взаимодействие микроволнового излучения с диэлектрическими объектами:

- объемный характер выделения энергии при облучении объектов микроволновыми электромагнитными волнами [11];
- микроволновая энергия выделяется селективно (именно в тех областях, которые характеризуются самыми высокими диэлектрическими параметрами  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$ , то есть в тех областях, в которых имеет место наибольшее содержание влаги). Эта особенность выделения энергии при микроволновом воздействии на объект обеспечивает высокую конечную однородность объектов обработки [12, 13];
- микроволновая обработка характеризуется высокой скоростью нагрева и относительно низкой температурой процесса обработки, что применительно к пищевым продуктам является основой для очень высокого (до 96–98%) уровня сохраняемости полезных веществ и витаминов в данном процессе [14].
- источником энергопотребления микроволновых генераторов является исключительно электроэнергия; в микроволновых технологиях не используется энергия сжигания газов, жидкого и твердого топлива, что обеспечивает их исключительную экологическую чистоту производства.

### **Анализ применения микроволновой энергии в технологиях стерилизации растительного сырья**

Пастеризация является наиболее широко используемой технологией для уничтожения патогенных и порчи микроорганизмов в молоке и фруктовых соках; однако, это может в значительной степени снизить органолептические показатели, пищевую ценность и физико-химические характеристики продукта [15]. Производство безопасных и минимально обработанных пищевых продуктов с высокими показателями качества, есть одно из важнейших и перспективных направлений для пищевой промышленности. Решение этой задачи приводит к поиску инновационных технологий обработки пищевых продуктов [16].

В исследованиях [17, 18] сообщается о применении для пастеризации микроволнового поля с частотой 2450 МГц. Однако при использовании СВЧ-поля с частотой 915 МГц достигается более равномерный нагрев пищевых продуктов, что связано с большей глубиной проникновения микроволн с частотой 915 МГц, чем с микроволнами с частотой 2450 МГц [19, 20]. Мощность и частоты зависят от обрабатываемой продукции.

В России запатентованы микроволновые установки для термообработки и обеззараживания растительного сырья, с использованием магнетронов, работающих на частотах 2,45 ГГц и выходной мощностью 800Вт. Оборудование позволяет снизить микробиологическую обсемененность в сырье до допустимой нормы при достаточно высокой исходной бактериальной загрязненности. Обрабатывают такими установками ячмень, горох, соевые бобы, фуражное зерно, мясное сырье, сыпучие материалы комбикормов и др.

Запатентована установка для термообработки и обеззараживания растительного сырья в электромагнитном поле сверхвысокой частоты в процессе измельчения. Продолжительность воздействия СВЧ-излучением зависит от вида сырья. Регулирование мощности микроволновой установки осуществляется с использованием нескольких СВЧ-генераторов [21]. Для термообработки и обеззараживания сыпучего сырья применяется установка, состоящая из сверхвысокочастотных генераторов (2450 МГц) и тороидального резонатора [22]. Запатентованная установка, совмещающая микроволновую обработку с сушкой и обеззараживанием сельскохозяйственного или лекарственного сырья растительного происхождения. Устройство включает генератор СВЧ-поля, нагревательную камеру и механизм подачи обрабатываемого материала. В установке применяется магнетрон, работающий на частоте 2,45 ГГц и имеющий выходную мощность 800Вт. Микробиологические тесты с культурой *E.coli* исходной концентрации  $1 \cdot 10^7$  клеток/мл показали, что эффективность обеззараживания обработанных проб составляет  $95 \pm 5\%$  [23].

В запатентованном в России устройстве для обработки сока и жмыха ягод осуществляется обеззараживание поступающего из пресса сока под воздействием электромагнитной энергии, излучаемой СВЧ-магнетронами. Затем сок без контакта с окружающим воздухом герметично упаковывается для использования как полуфабрикат или готовая продукция. Жмых после пресса поступает в зону комбинированного воздействия СВЧ- и ИК-излучателей. Высушенный жмых до влажности 8–12% измельчают в порошок и упаковывают. Использование изобретения позволит

снизить затраты на производство путем внедрения энергосберегающих методов и повышения количественных и качественных показателей продукции [24].

Ряд исследований показывает, что при использовании микроволновой обработки наблюдается более высокая летальность по сравнению с обычным нагревом. Это указывает на развитие микробного теплового сопротивления по сравнению с обычной термической обработкой, в то время как разрушительный эффект микроволновой обработки может быть вызван разрывом клеточных стенок из-за повышения внутриклеточного давления [25, 26]. Микроволновая стерилизация – это высокотемпературный кратковременный тип обработки, используемый не только для инактивации микроорганизмов, способствующих порче, но и для минимизации снижения качества в пищевых продуктах на протяжении всего срока годности [27].

Продукты, подвергнутые микроволновой стерилизации (128°C и продолжительность обработки 3 мин), превосходят по качеству продукты, выработанные при традиционной технологии стерилизации (120°C и продолжительностью обработки 45 мин) [28]. Возможно и нетепловое воздействие микроволнового поля на микроорганизмы, при котором электрическая составляющая микроволн может влиять на полярные и/или заряженные фрагменты белков (то есть, COO- и NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) [29], и на разрушение нековалентных связей при микроволновой является более вероятной причиной контаминации микроорганизмов [30].

Для многих видов растительного сырья длительное воздействие микроволновой энергии наносит необратимые повреждения, изменяя физико-химические показатели качества. Решением этой проблемы служит импульсное воздействие на объекты. Воздействие происходит одним или несколькими импульсами микроволнового излучения от 7 до 20 сек. или более. Способ эффективен в отношении таких микроорганизмов, как *E.coli*, *Salmonella sp.*, *Campylobacter sp.*, *Listeria monocytogenes*, *Shigella sp.*, *Staphylococcus aureus*, дрожжей и плесеней. Импульсная обработка может применяться для обработки широкого ряда продуктов, включая фрукты, овощи, зерновые продукты, молочные и мясные продукты. Мощность и частота импульсов (в диапазоне от 1 до 300 ГГц) могут быть постоянными или переменными величинами в зависимости от цели обработки. Например, выходная мощность может составлять 1,5 кВт на магнетрон, используемая частота – 2,45 ГГц. В устройстве может быть установлено от 1 до 25 или даже 50 магнетронов [31].

Наряду с этим возможно применение комбинированных способов СВЧ обработки. Например, для стерилизации упакованных термочувствительных фруктов и овощей с переменным типом воздействие на них электромагнитным полем (сначала непрерывными, а затем – пульсирующими микроволнами) с целью их нагревания до 50–55°C. Мощность непрерывного СВЧ поля составляет 700–1000 Вт. Продолжительность рабочего интервала пульсирующих микроволн – 2–5 сек.; длительность микроволн за один период составляет 0,5–1,5 сек. Обработка обеспечивает эффективное (> до 99%) обеззараживание фруктов и овощей при регулируемом повышении температуры, уменьшение степени их дыхания, сохранение органолептических свойств и питательности, а также увеличение продолжительности хранения [32].

Применение микроволновой обработки эффективно против *Salmonella enterica*. При продолжительности микроволновой обработки от 40 до 50 сек. и скорости нагрева 0,76 и 0,62°C/сек. на среднем уровне мощности (700 Вт) может привести к сокращению количества *Salmonella enterica* на помидорах более чем в 1,5 раза [33].

Применение микроволнового нагрева способствует инактивации ферментов, которые существенно влияют на текстуру, цвет, вкус и питательную ценность фруктов и овощей. Для сохранения пищевой ценности пищевых продуктов приемлемо использовать микроволновую обработку и в качестве альтернативы традиционному бланшированию пищевых продуктов.

Во Франции запатентованы способы сохранения качества свежей растительной продукции, обеспечивающие увеличение продолжительности хранения и предусматривающие воздействие на нарезанные ломтиками плоды (манго, ананас, киви, дыня и др.) в полимерных упаковках в СВЧ-поле с целью предупреждения размножения микроорганизмов и инактивирования ферментов. Продолжительность такой обработки составляет 20–40 сек. в зависимости от вида плодов. Продолжительность хранения обработанной продукции может составлять более 10 дней без ухудшения ее органолептических характеристик [34, 35].

Комбинацией таких способов обработки, как раствор органических кислот, микроволновая энергия и термообработка возможно снизить продолжительность и температурное воздействие на сырье. Так, для сохранения качества свежих упакованных ломтиков фруктов с целью инактивации ферментов и предупреждения размножения микроорганизмов (в частности бактерий и дрожжей), предложена комбинированная обработка. Она включает в себя следующие операции: обработка растворами лимонной или аскорбиновой кислот, вакуумирование, микроволновая обработка в течение 1,5 мин с целью быстрого повышения температуры плодов до 57,2–65,6°C и выдержка тары с плодами в водяной бане в течение 10 мин. Способ обеспечивает пастеризацию фруктов и сохранение их цвета, текстуры и аромата в течение более длительного времени без использования искусственных консервантов [36].

В Китае разработан способ обезвоживания и обеззараживания свежей растительной продукции (фрукты, ростки бамбука и др.), предусматривающий ее обработку 10–30%-м солевым раствором с последующей обработкой в СВЧ-поле. Способ обеспечивает 10–40%-е обезвоживание растительной продукции и эффективное обеззараживание. Например, при обработке ростков бамбука предложенным способом достигаются следующие микробиологические показатели: общее количество колониеобразующих единиц < 120КОЕ/г; плесени < 10КОЕ/г; дрожжи < 10КОЕ/г; Coliforms (MPN/100 г) < 30; патогенных микроорганизмов не выявлено [37].

Микроволновую обработку применяют и для сохранения качества и предупреждения заболеваний плодов в послеуборочный период. Известен способ обработки плодов в СВЧ поле с частотой 2450 МГц и мощностью 0,25–0,45 кВт в течение от 1 до 4 мин, выдерживание при 20°C в течение 20 мин, погружение плодов на 30 сек. Способ предусматривает дальнейшую обработку плодов растворами дрожжей антагонистического действия, содержащими микроорганизмы *Cryptococcus laurentii* или *Rhodotorula glutinis*. Обработанные плоды обсушивают и хранят при 20°C или в условиях охлаждения после упаковывания в защитную пленку. Способ обеспечивает увеличение продолжительности хранения плодов без ухудшения их качества и питательности [38].

Для сохранения свежести скоропортящихся плодов с увеличением срока их годности, предусмотрена обработка СВЧ полем в течение 100–200 сек. при повышении температуры до 62–75°C и последующее хранение при температуре 0–5°C. Частота СВЧ поля составляет 500–1000 МГц. Обработанные плоды могут храниться в течение 42–45 дней без ухудшения качества [39].

Для сохранения свежести черники, предусматривает обработку ягод в камере с частотой СВЧ поля 2450 МГц при мощности 1,1 кВт в течение 45–75 сек. и последующее их постепенное замораживание до –18°C с сохранением целостности клеток тканей. Способ является недорогостоящим и простым в выполнении, эффективно предупреждает порчу ягод и обеспечивает значительное увеличение продолжительности их хранения. Размороженные ягоды черники сохраняют товарное качество, органолептические показатели и пищевую ценность [40].

Для сохранения качества дыни, промытые водой и обработанные раствором дезинфицирующего средства плоды, обрабатывают в СВЧ поле с частотой 915 или 2450 МГц в течение 10–600 сек. с целью уничтожения патогенных микроорганизмов (*Rhizopus sp.*, *Penicillium sp.* и др.). Мощность используемого микроволнового генератора может составлять 0,5–50 кВт. При обработке температура в поверхностном слое дыни толщиной до 10 мм составляет 20–70°C. После обеззараживания на поверхность дыни наносят защитное покрытие, например, в виде водного раствора хитозана. Способ обеспечивает уничтожение находящихся на поверхности дыни патогенных микроорганизмов и увеличение продолжительности хранения и транспортировки [41].

Микроволновая стерилизация продуктов и сырья с низкой влажностью имеет преимущество, заключающееся в более короткой продолжительности обработки. При равномерном воздействии СВЧ энергии на объекты с низкой влажностью не происходит значительных локальных перегревов, и обеспечивается высокое качество обработанной продукции [42]. При обработке обезвоженных продуктов в стерилизационной камере при мощности магнетрона 9,6–13 кВт с подачей горячего воздуха 75–90°C в течение 3 мин обеспечивается эффективное уничтожение таких микроорганизмов, как *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Staphylococcus aureus* [43].

Совмещение воздействия СВЧ-поля (с частотой 2450 МГц) и последующего вакуумирования в герметичной рабочей камере обеспечивает достижение показателей деконтаминации (на примере

такой микрофлоры, как дрожжи), составлявших от 1 до 2,5 порядков. В России запатентован способ обеззараживания сушеных пищевых продуктов (сушеные фрукты, овощи, лекарственные травы, специи и др.), предусматривающий нагрев продукта микроволновым излучением при атмосферном давлении до 85–140°C и охлаждение до температуры 30–50°C путем испарения части влаги при понижении давления в камере до 1,0–10 мм рт. ст. [44, 45].

Увеличение продолжительности микроволновой обработки сушеных пищевых продуктов до 30 мин при температуре 90–120°C, обеспечивает максимальное уничтожение таких микроорганизмов, как стафилококки, кишечные палочки. Обеззараживающее действие микроволновых волн обеспечивается за счет резкого возрастания температуры продукта при одновременном диэлектрическом нагреве протеинов микроорганизмов [46].

Одностадийная обработка подготовленных сухофруктов (изюм, курага, чернослив) в электромагнитном СВЧ поле с частотой 2450 МГц при удельной мощности 450 Вт/дм<sup>3</sup> в течение 58–60 сек. до конечной температуры продукта 75–80°C эффективна против грибов рода *Penicillium*, *Mucor* и *Fusarium* [47].

Метод обеззараживания в СВЧ поле продуктов и материалов с низкой теплопроводностью, сухих и сыпучих материалов, эффективен для инактивации всех микроорганизмов как вегетативных, так и споровых форм. Например, при микроволновом нагреве до 110°C измельченной сухой травы – солянки холмовой (*Salsolacollina Pall*) – с начальной влажностью 8%, анализ показал снижение мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов с 10<sup>6</sup> до 10<sup>3</sup> КОЕ/г. Плесени, дрожжи и грибы были полностью уничтожены (при первоначальной обсемененности 2·10<sup>3</sup> КОЕ/г) [48].

Для эффективной обработки сухого черного чая и чайного сырья в СВЧ поле необходима скорость роста температуры обрабатываемого продукта в диапазоне значений 1,0–3,0°C/сек. до температур 60,0–85,0°C [49].

Обеззараживание ядер грецкого ореха, семян мака и кунжута предусматривается обработка в СВЧ поле с частотой 2450 МГц при удельной мощности 300–600 Вт/дм<sup>3</sup>. Продолжительность микроволновой обработки может составлять 30–90 сек. до конечной температуры продукта 55–80°C. Способ обеспечивает повышение степени обеззараживания ядер и семян от таких микроорганизмов, как *Penicillium*, *Mucor*, *Fusarium* и *Alternaria* [50].

Известен способ обеззараживания комбикормов с использованием СВЧ поля, предусматривающий избирательный нагрев объектов обработки до максимальной температурной точки (80°C) выживания термофильной группы микроорганизмов. В зависимости от результатов анализа наличия микроорганизмов в компонентах комбикормов процесс обеззараживания проводят следующим образом: если в комбикорме присутствуют только психрофильные микроорганизмы, то нагрев осуществляют до 30°C, если только мезофильные – до 45°C, а при наличии всех групп микроорганизмов нагрев производят до максимальной температуры выживания термофильной микрофлоры (80°C). Обеззараживание проводится в установке, оснащенной цилиндрической рабочей камерой и источником СВЧ поля, в течение 50–60 сек. Способ обеспечивает обеззараживание каждого вида сырья и повышение его качества [51].

Применение импульсной обработки зернового сырья с целью дезинсекции и дезинфекции позволяет сократить энергозатраты в десятки раз по сравнению с использованием прямого СВЧ нагрева зерна. СВЧ энергия преобразуется в энергию плазмы, занимающую часть рабочего объема разрядной камеры. Малое плазменное образование перемещают по всему объему камеры так, чтобы за время пролета все зерна подвергались плазменному воздействию [52].

В России также запатентован способ обеззараживания зерна, включающий этапы равномерного увлажнения зерна озонированной водой, отволаживания и обработку в СВЧ поле с последующей сушкой до безопасной для хранения влажности. С момента попадания озонированной воды на поверхность зерна начинается процесс уничтожения различных видов фитопатогенных микроорганизмов (плесневых грибов, бактерий и дрожжей), а также токсичных продуктов их жизнедеятельности. СВЧ воздействие на увлажненное и прошедшее отволаживание зерно вызывает интенсивный нагрев и испарение содержащейся в нем воды, при этом погибают оставшиеся вредные микроорганизмы и плесневые грибы. Способ обеспечивает повышение интенсивности и равномерность обеззараживания

зернового материала, а также эффективность процесса по количеству и видовому составу уничтожаемой фитопатогенной микрофлоры [53].

Известен также способ быстрой одновременной стерилизации, дезинфекции и дезинсекции, предусматривающий кратковременное воздействие на пищевой продукт электромагнитным полем сверхвысокой частоты 2,45 ГГц в течение 2 мин при плотности потока мощности не менее 170 мВт/см<sup>2</sup>. Способ обеспечивает уничтожение (до 99%) болезнетворных микроорганизмов и любых паразитов при сохранении свойств пищевых продуктов. Способ позволяет обеззараживать не только пищевые продукты, но и лекарственные травы, и другие материалы [54].

Применение СВЧ поля с целью снижения зараженностями плесенью описано в работе [55]. Грибы рода *Micor* чрезвычайно устойчивы к температурному воздействию в СВЧ поле. Авторы отмечают, что для полного обеззараживания зерна ячменя пивоваренного от этой грибной инфекции и сохранности его жизнеспособности, необходимо увеличить экспозицию обработки, но при этом скорость нагрева оставить минимальной. Таким образом, обработка зерна ячменя СВЧ полем при скорости нагрева 0,6–0,8°С/сек. и экспозиции обработки 60–90 сек. вызывает обеззараживающий эффект практически по всем видам грибной инфекции, температура нагрева зерна при этом составляет 60–70°С.

В работе [56] описываются исследования по обработке нерезистентного, мутантного штамма *E. Coli* WP2 электромагнитным полем сверхвысокой частоты в диапазоне частот от 8,82 до 10,4 ГГц и экспозиции от 30 до 150 мин. Максимальное снижение выживаемости 50% обнаружено при обработке на частоте 10,14 ГГц и максимальном времени экспозиции 150 мин.

Для снижения энергозатрат, технологию микроволновой стерилизации применяют и в технологии выращивания грибов. Обрабатывают субстратные блоки для выращивания съедобного гриба шиитаке. Обычно стерилизацию субстратов проводят в энергозатратных паровых стерилизаторах. Применение СВЧ поля при обработке блоков в течение 15–20 мин полностью ингибирует контаминантную микрофлору, т. е. обеспечивает стерильность субстрата. Авторы отмечают, что микроволновая обработка позволяет сократить продолжительность стерилизации в 4–5 раз, а энергозатраты в 2,7 раза [57].

### Заключение

Анализ применения СВЧ поля для обработки растительного сырья подтверждает его эффективность. Данный вид обработки может широко применяться для решения проблем увеличения продолжительности хранения сырья и продукции. Технология микроволнового нагрева для пастеризации и стерилизации обеспечивает эффективную инактивацию таких патогенных микроорганизмов, как *Salmonella*, *E.coli*, *Campylobacter* sp., *Staphylococcus* sp., *Listeria*, а также дрожжи и плесени, и значительно сокращает продолжительность обработки. Однако эффективное применение микроволновой обработки зависит от ряда свойств обрабатываемых материалов – диэлектрических, физических и химических. В описанных примерах для обработки применяются широкие диапазоны воздействия СВЧ поля на объекты. Это может приводить к разрушению клеточных структур растительных тканей, питательных веществ и витаминов в сырье, поэтому определение оптимальных режимов и граничных условий обработки пищевой продукции с целью минимизации негативных последствий необходимо и требует дальнейших исследований.

### Литература

1. Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И. (ред.) Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИ радиологии и агроэкологии. 2015. 400 с.
2. Неменуца Л.А. Методы лазерной, радиационной и других видов обработки сельскохозяйственного сырья и готовой продукции: научно-аналитический обзор. Москва: Росинформагротех, 2015. 55 с.
3. Гимранов Ф.М., Беляев А.Н., Флегентов И.В., Суслов А.С. Оценка возможности использования комплексных методов обеззараживания воды в пищевой промышленности // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 8. С. 289–291.
4. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1989. 272 с.
5. Adarsh M. Kalla, Devaraju R. Microwave energy and its application in food industry: A review. *Asian J. Dairy & Food Res.* 2017, V. 36, no. 1, pp. 37–44.
6. Meredith R.J. *Engineers' handbook of industrial microwave heating*. Institution of Electrical Engineering, London, 1998. 380 p.

7. Decareau R.V., Peterson R.A. *Microwave processing and engineering*. Weinheim:VCH; Chichester:Ellis Horwood, 1986. 224 p.
8. Puligundla P. Potentials of Microwave Heating Technology for Select Food Processing Applications – a Brief Overview and Update. *Journal of Food Processing & Technology*. 2013, V. 4, Is. 11, pp. 2–9.
9. Hoogenboom R., Wilms T.F.A, Erdmenger T., Schubert U.S. Microwave-assisted chemistry: a closer look at heating efficiency. *Aust. J. Chem.* 2009, no. 62, pp. 236–243.
10. Oliveira M.E.C., Franca A.S. Microwave heating of foodstuffs. *J. Food Eng.* 2002, no. 53, pp. 347–359.
11. Pozar D.M. *Microwave engineering*. John Wiley & Sons. 2011. 756 p.
12. Witkiewicz K., Nastaj J.F. Simulation strategies in mathematical modeling of microwave heating in freeze-drying process. *Drying Technol.* 2010, no. 28, pp. 1001–1012.
13. Ahmed J., Ramaswamy H.S., Raghavan V.G.S. Dielectric properties of Indian Basmati rice flour slurry. *J. Food Eng.* 2007, no. 80, pp. 1125–1133.
14. Varith J., Dijkanarukkul P., Achariyaviriya A., Achariyaviriya S. Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *J. Food Eng.* 2007, no. 81, pp. 459–468.
15. Espachs-Barroso A., Barbosa-Canovas G.V., Martin-Belloso O. Microbial and enzymatic changes in fruit juice induced by high-intensity pulsed electric fields. *Food Rev. Int.* 2003, no. 19, pp. 253–273.
16. Riahi E., Ramaswamy H.S. High pressure inactivation kinetics of amylase in apple juice. *J. Food Eng.* 2004, no. 64, pp. 151–160.
17. Decareau R.V. *Microwave foods: new product development*. Connecticut: Food nutrition press Inc. 1992. 213 p.
18. Giese J. Advances in microwave food processing. *Food Technol.* 1992, no. 42, pp. 118–123.
19. Tong C.H., Lentz R.R., Rossen J.L. Dielectric properties of pea puree at 915 MHz and 2450 MHz as a function of temperature. *J. Food Sci.* 1994, no. 59, pp. 121–122.
20. Mudgett R.E. Microwave food processing. *Food Technol.* 1989, no. 43, pp. 117–126.
21. Жданкин Г.В., Новикова Г.В., Зайцев П.В., Сергеева Е.Ю. Микроволновая установка для термообработки сырья в процессе измельчения: пат. 2671710 Российская Федерация, 2018. Бюл. № 31. 12 с.
22. Белов А.А., Жданкин Г.В., Новикова Г.В., Михайлова О.В., Ершова И.Г. Радиоволновые установки для термообработки сырья: пат. 2626156 Российская Федерация, 2017. Бюл. № 21. 15 с.
23. Подзорова Е.А., Хуако А.Ю., Кузьма Н.Н., Майданский С.Я., Хуако Р.А., Тарабан В.Б. Устройство для микроволновой обработки сыпучих и длинномерных материалов: пат. 2291596 Российская Федерация, 2007. Бюл. № 1. 15 с.
24. Отбойщиков Н.А., Шахматов С.Н. Устройство для обработки сока и жмыха ягод энергосберегающими методами: пат. 2630248 Российская Федерация, 2017. Бюл. № 25. 8 с.
25. Khalil H.M., Villota R. Comparative study on injury and recovery of *Staphylococcus aureus* using microwave and conventional heating. *J. Food Protect.* 1988, no. 51, pp. 181–186.
26. Tajchakit S., Ramaswamy H.S., Fustier P. Enhanced destruction of spoilage microorganisms in apple juice during continuous flow microwave heating. *Food Res. Int.* 1998, no. 31, pp. 713–722.
27. Esteve M.J., Frigola A., Martorell L., Rodrigo C. Kinetics of ascorbic acid degradation in green asparagus during heat processing. *J. Food Prot.* 1998, no. 61, pp. 1518–1521.
28. Ohlsson T. Sterilization of foods by microwaves. *International Seminar on New Trends in Aseptic Processing and Packaging of Food stuffs* (22–23 Oct. 1987). Munich. SLK Report no. 564.
29. Decareau R.V. *Microwaves in the food processing industry*. New York: Acad. Press Inc. 1985. 234 p.
30. Koutchma T., Le Bail A., Ramaswamy H.S. Comparative experimental evaluation of microbial destruction in continuous-flow microwave and conventional heating systems. *Can Biosyst. Eng.* 2001, V. 43, pp. 3.1–3.8.
31. Alvarado C., Brooks J.C., Brashears M.M., Brashears T., Coccoli G., et al. Method and system for preserving food. *United States Patent* 8956673. 2015.
32. Zhou Quan, Chen Leping, Sterilization method for fresh-cut vegetables and fruits in electromagnetic field. Nanchang Hangkong, *Patent CN* 103798353. 2014.
33. Lu Y., Turley A.C., Dong X., & Wu C. Reduction of *Salmonella enterica* on grape tomatoes using microwave heating. *International Journal of Food Microbiology*. 2011, no. 145, pp. 349–352.
34. Laurent B. Fresh plants e.g. vegetable plants, forming method, involves closing food plastic material cases in hermetical manner, and cooling food plastic material cases to preserve and transport fresh plants. France, *Demande de Certificat d'Utilite* 2949947. 2011.
35. Laurent B. Bag for fruit and method for preparing fruit cut into pieces in order to preserve it in the medium term. France, *Demande de Brevet d'Invention* 2958918, 2011.
36. Perdue R.R. Packaged pasteurized fresh fruits and a method for production. *United States Application* 2006034980. 2006.
37. Xu Chungen. Dewatering and disinfecting process for fresh fruit group food. *China patent* 1465257, 2004.



38. Hongyin Zhang, Ying Dong, Xiaofeng Ren, Bin Xu, Haihui Zhang. Method for preventing fruit postharvest diseases. *China patent* 101697750, 2010.
39. Chen Yunzhong. Microwave fruit preservation method. *China Patent Application* 103636747, 2014
40. Zhang Zhe, Guo Xu, Tian Jinjin, Xu Yao, Zhang Zhiquan. Blueberry freshness-preserving method. *China Patent Application* 108402173, 2018.
41. Jinxi Li, Zuoshan Feng, Jiluan Chen et al. Post-harvest storage and fresh-keeping method of fresh-eating oriental melon. *China Patent Application* 101473867, 2009.
42. David K.H.J., Kurt A.K., Archie G.W., Glenn B. Mechanism of microwave sterilization in the dry state. *Appl. Environ. Microbiol.* 1987, V. 53, no. 9, pp. 2133–2137.
43. Shim Hyun Soon, Chou Yeon Suk, Jang Jae Soo, Bang Jin Su. Method and apparatus for sterilizing foods by using hot wind and microwave. *Korea patent* 20180025401, 2018.
44. Иванов В.А. Способ обеззараживания сушеных пищевых продуктов: пат. 2313263 Российская Федерация, 2007. Бюл. № 36. 5 с.
45. Иванов В.А. Способ обеззараживания сушеных пищевых продуктов: пат. 2551093 Российская Федерация, 2015. Бюл. № 14. 8 с.
46. Трегубова Е.В. Способ стерилизации сушеных пищевых продуктов: пат. 2294124 Российская Федерация, 2007. Бюл. № 6. 4 с.
47. Цугленок Н.В., Юсупова Г.Г., Цугленок Г.И., Толмачева Т.А., Цугленок В.Н. Способ обеззараживания сухофруктов: пат. 2248128 Российская Федерация. 2005. Бюл. № 8. 8 с.
48. Хуако А.Ю. Устройство для микроволнового обеззараживания: пат. 2599018 Российская Федерация, 2016. Бюл. № 28. 5 с.
49. Лисиненко И.В., Лисиненко И.Н. Способ обработки сухого черного чая, чайного сырья: пат. 2683474, Российская Федерация, 2019. Бюл. № 10. 12 с.
50. Цугленок Н.В., Цугленок Г.И., Юсупова Г.Г., Толмачева Т.А., Цугленок В.Н. Способ обеззараживания ядер и семян растительного сырья для использования в пищевой промышленности: пат. 2312505 Российская Федерация, 2017. Бюл. № 35. 7 с.
51. Сыроватка В.И., Иванов Ю.А., Обухов А.Д., Мишуров Н.П. Способ теплового обеззараживания рассыпных кормов: пат. 2481049 Российская Федерация, 2013. Бюл. № 13. 7 с.
52. Лысов Г.В. Способ для дезинсекции и дезинфекции материалов зернового происхождения и устройство для его осуществления: пат. 2143794 Российская Федерация, 2000. 11 с.
53. Пахомов В.И., Пахомов А.И., Буханцов К.Н., Максименко В.А. Способ обеззараживания зерна и семян сельскохозяйственных культур: пат. 2496291 Российская Федерация, 2013. Бюл. № 30. 16 с.
54. Мельниченко А.В., Ихлов Б.Л., Ощепков А.Ю. Способ быстрой одновременной стерилизации, дезинфекции и дезинсекции пищевых продуктов: пат. 2677783 Российская Федерация, 2019. Бюл. № 18. 5 с.
55. Кретова Ю.И. Мицелиальная контаминация пищевого сырья и пути ее устранения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2014. Т. 2. №3. С. 5–12.
56. Ихлов Б.Л., Мельниченко А.В., Ощепков А.Ю. Действие сверхвысокочастотного электромагнитного поля на микроорганизмы // Вестник новых медицинских технологий. 2017. Т. 24. №2. С. 141–146.
57. Иванов А.И., Корягин Ю.В., Поликанов А.В., Анохин Р.В. Стерилизация сверхвысокочастотной энергией субстратных блоков для выращивания съедобного гриба шиитакэ (*Lentinula edodes*) // Нива Поволжья. 2016. № 2(39). С. 29–34.

### References

1. Kozmin G.V., Geraskin S.A., Sanzharova N.I. (Ed.) Radiation technologies in agriculture and food industry. Obninsk, Russian Institute of Radiology and Agroecology. 2015. 400 p. (*In Russian*).
2. Nemenushchaya L.A. *Methods of laser, radiation and other types of processing of agricultural raw materials and finished products*. Scientific and analytical review. Moscow, Rosinformagroteh Publ., 2015. 55 p. (*In Russian*).
3. Gimranov F.M., Belyaev A.N., Flegentov I.V., Suslov A.S. Evaluation of the possibility of using complex methods of water disinfection in the food industry. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2012, no. 8, pp. 289–291 (*In Russian*).
4. Rogov I.A. *Electrophysical methods of food processing*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989. 272 p. (*In Russian*).
5. Adarsh M. Kalla, Devaraju R. Microwave energy and its application in food industry: A review. *Asian J. Dairy & Food Res.* 2017, V. 36, no. 1, pp. 37–44.
6. Meredith R.J. *Engineers' handbook of industrial microwave heating*. Institution of Electrical Engineering, London, 1998. 380 p.
7. Decareau R.V., Peterson R.A. *Microwave processing and engineering*. Weinheim:VCH; Chichester:Ellis Horwood, 1986. 224 p.
8. Puligundla P. Potentials of Microwave Heating Technology for Select Food Processing Applications – a Brief Overview and Update. *Journal of Food Processing & Technology*. 2013, V. 4, Is. 11, pp. 2–9.

9. Hoogenboom R., Wilms T.F.A, Erdmenger T., Schubert U.S. Microwave-assisted chemistry: a closer look at heating efficiency. *Aust. J. Chem.* 2009, no. 62, pp. 236–243.
10. Oliveira M.E.C., Franca A.S. Microwave heating of foodstuffs. *J. Food Eng.* 2002, no. 53, pp. 347–359.
11. Pozar D.M. *Microwave engineering*. John Wiley & Sons. 2011. 756 p.
12. Witkiewicz K., Nastaj J.F. Simulation strategies in mathematical modeling of microwave heating in freeze-drying process. *Drying Technol.* 2010, no. 28, pp. 1001–1012.
13. Ahmed J., Ramaswamy H.S., Raghavan V.G.S. Dielectric properties of Indian Basmati rice flour slurry. *J. Food Eng.* 2007, no. 80, pp. 1125–1133.
14. Varith J., Dijkanarukkul P., Achariyaviriya A., Achariyaviriya S. Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *J. Food Eng.* 2007, no. 81, pp. 459–468.
15. Espachs-Barroso A., Barbosa-Canovas G.V., Martin-Belloso O. Microbial and enzymatic changes in fruit juice induced by high-intensity pulsed electric fields. *Food Rev. Int.* 2003, no. 19, pp. 253–273.
16. Riahi E., Ramaswamy H.S. High pressure inactivation kinetics of amylase in apple juice. *J. Food Eng.* 2004, no. 64, pp. 151–160.
17. Decareau R.V. *Microwave foods: new product development*. Connecticut: Food nutrition press Inc. 1992. 213 p.
18. Giese J. Advances in microwave food processing. *Food Technol.* 1992, no. 42, pp. 118–123.
19. Tong C.H., Lentz R.R., Rossen J.L. Dielectric properties of pea puree at 915 MHz and 2450 MHz as a function of temperature. *J. Food Sci.* 1994, no. 59, pp. 121–122.
20. Mudgett R.E. Microwave food processing. *Food Technol.* 1989, no. 43, pp. 117–126.
21. Zhdankin G.V., Novikova G.V., Zaitsev P.V., Sergeeva E.Yu. Microwave installation for heat treatment of raw materials in the grinding process. *Patent RF*, no. 2671710. 2018.
22. Belov A.A., Zhdankin G.V., Novikova G.V., Mikhailova O.V., Ershova I.G. Radio wave installations for heat treatment of raw materials. *Patent RF*, no. 2626156. 2017.
23. Podzorova E.A., Huako A.Yu., Kuzma N.N., Maidansky S.Ya., Huako R.A., Taraban V.B. A device for microwave processing of bulk and lengthy materials. *Patent RF*, no. 2291596. 2007.
24. Bumpers N.A., Shakhmatov S.N. A device for processing juice and oilcake energy-saving methods. *Patent RF*, no. 2630248. 2017.
25. Khalil H.M., Villota R. Comparative study on injury and recovery of *Staphylococcus aureus* using microwave and conventional heating. *J. Food Protect.* 1988, no. 51, pp. 181–186.
26. Tajchakavit S., Ramaswamy H.S., Fustier P. Enhanced destruction of spoilage microorganisms in apple juice during continuous flow microwave heating. *Food Res. Int.* 1998, no. 31, pp. 713–722.
27. Esteve M.J., Frigola A., Martorell L., Rodrigo C. Kinetics of ascorbic acid degradation in green asparagus during heat processing. *J. Food Prot.* 1998, no. 61, pp. 1518–1521.
28. Ohlsson T. Sterilization of foods by microwaves. *International Seminar on New Trends in Aseptic Processing and Packaging of Food stuffs* (22–23 Oct. 1987). Munich. SLK Report no. 564.
29. Decareau R.V. *Microwaves in the food processing industry*. New York: Acad. Press Inc. 1985. 234 p.
30. Koutchma T., Le Bail A., Ramaswamy H.S. Comparative experimental evaluation of microbial destruction in continuous-flow microwave and conventional heating systems. *Can Biosyst. Eng.* 2001, V. 43, pp. 3.1–3.8.
31. Alvarado C., Brooks J.C., Brashears M.M., Brashears T., Coccoli G., et al. Method and system for preserving food. *United States Patent* 8956673. 2015.
32. Zhou Quan, Chen Leping, Sterilization method for fresh-cut vegetables and fruits in electromagnetic field. Nanchang Hangkong, *Patent CN* 103798353. 2014.
33. Lu Y., Turley A.C., Dong X., & Wu C. Reduction of *Salmonella enterica* on grape tomatoes using microwave heating. *International Journal of Food Microbiology*. 2011, no. 145, pp. 349–352.
34. Laurent B. Fresh plants e.g. vegetable plants, forming method, involves closing food plastic material cases in hermetical manner, and cooling food plastic material cases to preserve and transport fresh plants. France, *Demande de Certificat d'Utilite* 2949947. 2011.
35. Laurent B. Bag for fruit and method for preparing fruit cut into pieces in order to preserve it in the medium term. France, *Demande de Brevet d'Invention* 2958918. 2011.
36. Perdue R.R. Packaged pasteurized fresh fruits and a method for production. *United States Application* 2006034980. 2006.
37. Xu Chungun. Dewatering and disinfecting process for fresh fruit group food. *China patent* 1465257. 2004.
38. Hongyin Zhang, Ying Dong, Xiaofeng Ren, Bin Xu, Haihui Zhang. Method for preventing fruit postharvest diseases. *China patent* 101697750. 2010.
39. Chen Yunzhong. Microwave fruit preservation method. *China Patent Application* 103636747. 2014
40. Zhang Zhe, Guo Xu, Tian Jinjin, Xu Yao, Zhang Zhiquan. Blueberry freshness-preserving method. *China Patent Application* 108402173. 2018.

41. Jinxi Li, Zuoshan Feng, Jiluan Chen et al. Post-harvest storage and fresh-keeping method of fresh-eating oriental melon. *China Patent Application* 101473867. 2009.
42. David K.H.J., Kurt A.K., Archie G.W., Glenn B. Mechanism of microwave sterilization in the dry state. *Appl. Environ. Microbiol.* 1987, V. 53, no. 9, pp. 2133–2137.
43. Shim Hyun Soon, Chou Yeon Suk, Jang Jae Soo, Bang Jin Su. Method and apparatus for sterilizing foods by using hot wind and microwave. *Korea patent* 20180025401. 2018.
44. Ivanov V.A. The method of disinfecting dried food products. *Patent RF*, no. 2313263. 2007.
45. Ivanov V.A. The method of disinfecting dried food products. *Patent RF*, no. 2551093. 2015.
46. Tregubova E.V. The method of sterilization of dried food products. *Patent RF*, no. 2294124. 2007.
47. Tsuglenok N.V., Yusupova G.G., Tsuglenok G.I., Tolmacheva T.A., Tsuglenok V.N. The method of disinfection of dried fruits. *Patent RF*, no. 2248128. 2005.
48. Huako A.Yu. Device for microwave disinfection. *Patent RF*, no. 2599018. 2016.
49. Lisinenko I.V., Lisinenko I.N. A method of processing dry black tea, tea raw materials: *Patent RF*, no. 2683474. 2019.
50. Tsuglenok N.V., Tsuglenok G.I., Yusupova G.G., Tolmacheva T.A., Tsuglenok V.N. The method of disinfecting kernels and seeds of plant materials for use in the food industry. *Patent RF*, no. 2312505. 2017.
51. Syrovatka V.I., Ivanov Yu.A., Obukhov A.D., Mishurov N.P. The method of thermal disinfection of bulk feed. *Patent RF*. No. 2481049. 2013.
52. Lysov G.V. A method for disinsection and disinfection of materials of grain origin and a device for its implementation. *Patent RF*, no. 2143794. 2000.
53. Pakhomov V.I., Pakhomov A.I., Bukhantsov K.N., Maksimenko V.A. The method of disinfecting grain and seeds of crops. *Patent RF*, no. 2496291. 2013.
54. Melnichenko A.V., Ikhlov B.L., Oshchepkov A.Yu. A method for the rapid simultaneous sterilization, disinfection and disinsection of food products. *Patent RF*, no. 2677783. 2019.
55. Kretova Yu.I. Mycelial contamination of food raw materials and ways to eliminate it. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology.* 2014. V. 2, no. 3, pp. 5–12 (*In Russian*).
56. Ikhlov B.L., Melnichenko A.V., Oshchepkov A.Yu. The effect of a microwave electromagnetic field on microorganisms. *Journal of New Medical Technologies.* 2017, V. 24, no. 2, pp. 141–146 (*In Russian*).
57. Ivanov A.I., Koryagin Yu.V., Polikanov A.V., Anokhin R.V. Sterilization by microwave energy of substrate blocks for growing edible shiitake mushroom (*Lentinula edodes*). *Niva Povolzhya.* 2016, no. 2(39), pp. 29–34 (*In Russian*).

Статья поступила в редакцию 11.08.2019