

Научная статья

УДК 664.8.022.6

DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-2-3-12

Разработка метода определения граничных условий обработки сырья в СВЧ поле для нивелирования термической компоненты

А.А. Королев*, В.В. Кондратенко

*ВНИИТеК – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН
Видное, Московская обл., Россия, *process@uniitek.ru*

Аннотация. В статье описывается алгоритм поиска граничных условий для термического и волнового эффекта от обработки в СВЧ поле растительного сырья. Обработку физическими методами (СВЧ, УФ, быстрыми электронами и др.) растительного сырья и пищевой продукции проводят с целью поддержания гарантированного качества в течение всего срока годности. Поиск граничных условий для обработки в СВЧ поле осуществляется с целью снижения негативных воздействий обработки, приводящих к необратимым повреждениям растительной ткани, изменяющих показатели качества при хранении и переработке. Необратимые повреждения растительного сырья характеризуются разрушением клеточных структур, что приводит к потере питательных веществ и витаминов в сырье. Расчет граничных условий, разделяющих тепловой и волновой эффект воздействия СВЧ поля позволит выделить режимы обработки (продолжительность, суммарная мощность) с проявлением преимущественно волнового эффекта, при котором негативное воздействие на сырье будет минимально. Рассчитаны граничные условия обработки в СВЧ поле для свежих грибов с учетом суммарной мощности СВЧ источников, начальных и предельных показателей температур от 23,67 с для четырех источников (3200 Вт) до 38,23 с для одного источника (800 Вт). Разработанный подход позволяет адекватно определить предельную продолжительность обработки для любой отдельной СВЧ установки.

Ключевые слова: предварительная обработка сырья; микроволновое излучение; диэлектрический нагрев; растительное сырье

Original article

Development of a method for determining the boundary conditions of raw material processing in a microwave field for leveling the thermal component

Aleksii A. Korolev*, Vladimir V. Kondratenko

*Russian Research Institute of Canning Technology – Branch of V.M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of RAS
Vidnoe, Moscow region, Russia, *process@uniitek.ru*

Abstract. The article describes an algorithm for finding boundary conditions for the thermal and wave effects of processing plant raw materials in the microwave field. Processing by physical methods (microwave, UV, fast electrons, etc.) of plant raw materials and food products is carried out in order to maintain guaranteed quality throughout its shelf life. The search for boundary conditions for processing in the microwave field is carried out in order to reduce the negative effects of processing, resulting in irreversible damage to plant tissue, changing the quality indicators during storage and processing. Irreversible damage to plant raw materials is characterized by the destruction of cellular structures, which results in the loss of nutrients and vitamins in the raw materials. The calculation of the boundary conditions separating the thermal and wave effects of the microwave field allows to distinguish processing modes (duration and total power) with the manifestation of a predominantly wave effect, in which the negative impact on the raw material is minimal. The boundary conditions of processing in the microwave field for fresh mushrooms are calculated, taking into account the total power of the microwave sources, the initial and maximum temperature values from 23.67s for 4 sources (3200 W) to 38.23s for 1 source (800 W). The authors believe that the developed approach allows to determine the maximum processing time for any individual microwave installation adequately.

Keywords: pretreatment of raw materials; microwave radiation; dielectric heating; vegetable raw materials

Введение

Растительное сырье, используемое в пищевой промышленности, служит источником доступных нутриентов – белков, жиров, углеводов, витаминов, пищевых волокон, природных антиоксидантов, способствующих регулированию физиологических функций организма. Высокая влажность и наличие питательных веществ в растительной ткани часто способствуют развитию микрофлоры на поверхности

сырья, приводящей к его порче [1]. Это обуславливает целесообразность обработки сырья различными способами, в том числе и с применением физических методов воздействия [2]. Наряду с эффективными и доступными физическими методами воздействия на сырье применяют обработку СВЧ полем, обладающим бактерицидным и бактериостатическим действием [3, 4].

В пищевой промышленности оборудование с использованием СВЧ энергии широко применяется для процессов тепловой обработки. Воздействие СВЧ поля на различные материалы, в т. ч. растительное сырье, можно разделить на термическую и волновую компоненту. Микроволновый нагрев применяется в процессах сушки, нагрева, бланширования, варки, пастеризации и стерилизации и имеет значительные преимущества по сравнению с обычными методами нагрева, в том числе и по показателям энергоэффективности [5–7].

Динамика нагрева материала под воздействием микроволнового излучения зависит от его диэлектрических свойств. Материал с высокими диэлектрическими параметрами ϵ и $\text{tg}\delta$ нагревается в тех областях, которые имеют большое содержание влаги [8, 9]. Под воздействием СВЧ поля молекулы воды (диполи) совершают колебательные и вращательные движения, ориентируясь с частотой поля по его электрическим линиям, выделяя тепловую энергию. При высоком содержании влаги в заданном объеме задействуется значительное количество молекул, участвующих в движении, тем самым происходит большее выделение тепловой энергии и разогрев происходит по всему объему продукта [10–13].

Процесс обработки сырья в СВЧ поле проходит с высокой скоростью нагрева и относительно низкой температурой процесса. Эти параметры микроволновой обработки способствуют высокому уровню сохраняемости полезных веществ и витаминов (до 96–98%) [3].

Для быстрого достижения значительного бактерицидного эффекта необходима достаточно интенсивная обработка, так как различные виды микроорганизмов не одинаково восприимчивы к воздействию различных физических методов. Интенсивная обработка в СВЧ поле растительного сырья может привести к снижению его качества из-за процесса разрушения клеточных структур растительных тканей и последующей потери питательных веществ и витаминов.

Решением проблемы негативного воздействия на сырье в процессе обработки может стать сочетание методов воздействия, например, комбинация микроволновой и ультрафиолетовой обработки [14]. Комбинирование физических методов обработки позволяет снизить количество или полностью ингибировать патогенную микрофлору, находящуюся на поверхности, а также повысить микробиологическую стабильность и безопасность сырья [15–17].

Нетепловое воздействие СВЧ поля на биологические объекты характеризуется изменениями в работе биологических систем микроорганизмов, влиянием на обменные процессы, работу гормонов, витаминов и других биологически активных веществ. Нетермическое действие СВЧ поля (радиокомпонента) на биологические объекты до конца не изучено, но представляет интерес главным образом в технологии стерилизации. Стерилизационный эффект при обработке в СВЧ поле растительного сырья может достигаться не только тепловым воздействием, но и предположительно специфическим – нетепловым свойством СВЧ поля на микрофлору.

При воздействии СВЧ поля малой мощности на биологические объекты наблюдается нарушение структуры белковых молекул, изменяется кинетика биохимических реакций и электролитические свойства клеточных жидкостей. Кроме того, специфический нетепловой эффект СВЧ поля может отражаться на функциях нервных и гуморальных систем многоклеточных организмов, в том числе и насекомых.

В ряде исследований по воздействию СВЧ поля различной частоты на микрофлору, в том числе патогенную, отмечается возможный нетермический эффект микроволнового излучения, оказывающий угнетающее воздействие на микроорганизмы и снижающий их вирулентность [18–20]. В связи с этим, поиск технологических режимов и методов определения граничных условий обработки в СВЧ поле растительного сырья (свежих грибов, зелени, фруктов и др.) с целью поддержания микробиологической стабильности и повышения безопасности при сохранении качества в процессе хранения и переработки является актуальной задачей. В данном исследовании под граничным условием понимаются зависимость продолжительности обработки от суммарной мощности СВЧ, при котором не происходит отепление выше заданного значения. Графически выражается в виде криволинейной динамики,

проходящей по нижней границе коридора варьирования значений нагрева с учетом естественного отопления объекта обработки.

Изучение влияния нетермической компоненты микроволнового излучения на микрофлору обрабатываемых объектов является предметом дальнейших комплексных фундаментальных исследований.

Цель данной работы – разработка метода определения допустимых граничных условий обработки сырья в СВЧ поле.

Объекты и методы исследования

В качестве основного оборудования для СВЧ обработки использована конвейерная установка УСК2 (НПО «Этна», Россия). Установка, схема и параметры которой представлены на рисунке 1 и в таблице 1 соответственно, предназначена для сушки как пищевых, так и непищевых продуктов.

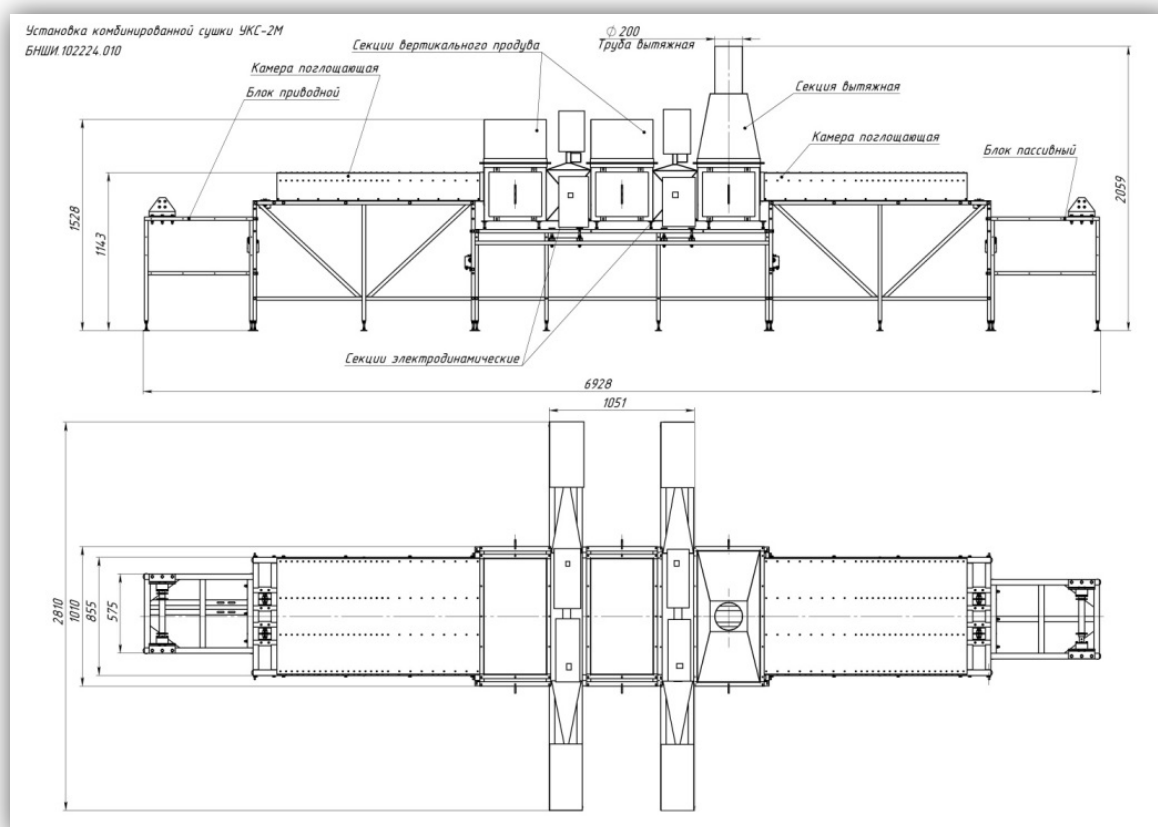


Рисунок 1 – Схема установки УСК2
Figure 1. Diagram of USK2 installation

Аппарат состоит из последовательно установленных на раме секций конвективного и микроволнового нагрева. Для возможности перемещения через них обрабатываемого материала секции соединены между собой. Секции СВЧ нагрева представляют собой желобковый волновод, в боковых стенках которого выполнены окна для подачи обрабатываемого материала. К секциям желобковых волноводов присоединены источники СВЧ энергии: два с боковых торцов и два на верхней стороне. Секции конвективного нагрева оснащены тепловыми вентиляторами. Установка имеет цепной транспортер, на который помещают технологические поддоны из радиопрозрачного материала (фторопласт Ф4) с объектами обработки. Продолжительность воздействия микроволнового излучения задавалась путем изменения скоростей цепного транспортера, обеспечивающего равномерное перемещение объектов обработки, через рабочие секции установки.

Таблица 1. Параметры установки УСК2

Table 1. Parameters of USK2 installation

| Параметры | Значения |
|--|-------------|
| рабочая частота источников СВЧ мощности, ГГц | 2,45 ± 0,05 |
| температура воздуха в рабочем канале микроволновой части установки, °С, не более | 30–90 |
| температура воздуха в рабочем канале секции вертикального продува, °С, не более | 60–140 |
| выходная мощность каждого источника СВЧ мощности ЭДС установки, кВт, не менее | 0,7 |
| суммарная выходная СВЧ мощность установки, кВт, не менее | 16,8 |
| скорость движения конвейера, см/мин | 25–100 |

Для измерения поверхностной температуры нагреваемых объектов (гидратированная красная фасоль) использовали пирометр Optris MS (Optris, Китай). Точность измерения пирометра: ±1% в диапазоне от 0 до 420 °С.

Сырье: модельная среда для определения равномерности нагрева – гидратированная фасоль (влажность 60%). Гидратированная фасоль выбрана, так как она более инертна к температурным воздействиям на свою структуру и требует длительной гидротермической обработки для приготовления в пищу [21].

Основной объект для определения граничных условий СВЧ нагрева – свежие шампиньоны. Грибы помещали в полимерные контейнеры, которые герметично запаивали в прозрачную полимерную пленку.

Экспозиция СВЧ обработки ≈ 40–90 с.

Изменение мощности достигалось последовательным пошаговым включением дополнительных источников (800 Вт) после прохождения объектами всего диапазона экспозиций обработки.

Результаты и обсуждение

Определение параметров нагрева в СВЧ поле в зависимости от суммарной мощности магнетронов

Равномерность нагрева – один из основных показателей эффективности работы теплового оборудования, в т. ч. СВЧ приборов и установок.

Для количественной оценки эффективности работы УСК2 был проведен расчет коэффициента равномерности нагрева объектов в СВЧ поле. Для этого одновременно обрабатывали 8 закрытых контейнеров из радиопрозрачного материала, заполненных модельным телом – гидратированной фасолью (влажностью 60%), массой 100 ± 5 г. Контейнеры располагали с учетом равномерности заполнения рабочей поверхности поддона. Начальная температура материала в контейнерах составляла 5 ± 2 °С. В результате обработки для каждого из вариантов суммарной мощности СВЧ поля определяли температуру модельного тела в каждом контейнере. На основании полученных данных рассчитывали коэффициент равномерности нагрева (кРН). Расчет включал в себя три этапа:

$$\Delta t_{i*} = t_{ie} - t_{is};$$

$$\Delta t_c = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_{i*}}{n};$$

$$k = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta t_c - \Delta t_{i*}|}{\sum_{i=1}^n \Delta t_{i*}},$$

где k – коэффициент равномерности;

t_{is} – исходная температура модельного тела в i -м контейнере, °С;

t_{ie} – конечная температура модельного тела в i -м контейнере, °С;

Δt_{i*} – прирост температуры модельного тела в i -м контейнере, °С;

Δt_c – усредненный прирост температуры модельного тела, °С;

n – количество контейнеров на рабочей поверхности.

Таблица 2. Коэффициент равномерности нагрева в зависимости от экспозиции и суммарной мощности обработки

Table 2. Coefficient of heating uniformity depending on exposition and total handling power

| Режим обработки | | Продолжительность обработки, с | | | | | |
|-----------------------|------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|
| количество источников | суммарная мощность, Вт | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| 1 | 800 | 0,90 | 0,88 | 0,87 | 0,94 | 0,84 | 0,87 |
| 2 | 1600 | 0,86 | 0,74 | 0,85 | 0,88 | 0,79 | 0,74 |
| 3 | 2400 | 0,81 | 0,87 | 0,86 | 0,86 | 0,88 | 0,88 |
| 4 | 3200 | 0,85 | 0,81 | 0,84 | 0,92 | 0,93 | 0,90 |

Анализ результатов показывает, что коэффициенты равномерности нагрева, полученные при различных диапазонах экспозиции, имеют показатели не ниже 0,7. При этом наименьшие значения показателя получены при экспозициях 50; 80 и 90 с при задействовании двух магнетронов, включенных с одной стороны от рабочего канала установки. Это объясняется сильным перегревом обрабатываемого модельного тела в зонах вблизи выхода волноводов работающих магнетронов.

Наибольшая равномерность нагрева при работе всех 4 источников отмечена в экспозиции 70–80 с. Максимальные коэффициенты равномерности отмечены как при длительных экспозициях в варианте с 4 источниками СВЧ, несмотря на локальные перегревы, так и в варианте с минимальной экспозицией – 40 с – и одним магнетроне.

Разработка метода определения граничных температурных и временных условий обработки

Для продуктов, требовательных к изменению температурно-влажностного режима при обработке и дальнейшем хранении, таких как плодовые тела шампиньонов, необходимо определить граничные условия их обработки в СВЧ поле, при котором температурная компонента была бы сведена к минимуму.

Согласно требованиям ГОСТа 31916-2012, свежие шампиньоны для быстрого снижения интенсивности дыхания, торможения биохимических процессов, сохранения пищевой и биологической ценности рекомендуется сразу после сбора и перед упаковыванием предварительно быстро охладить до температуры от 5 до 8°C, после чего поместить в охлажденное помещение для дальнейшего хранения при оптимальных условиях. Шампиньоны необходимо хранить 4–5 суток при температуре от 0 до 2°C; 2–3 суток при температуре 5°C с момента сбора.

Соответственно, продолжительность обработки свежих грибов в СВЧ поле не должна допускать превышение отепления более чем до 9°C, то есть допустимый диапазон изменения температуры грибов не выше 4°C. При этом также необходимо учитывать и процесс естественного отепления грибов в ходе обработки из-за разности их температуры и температуры окружающей среды. В сумме температура грибов от естественного нагрева и сверхвысокочастотного не должна превышать значение верхней границы, указанной в ГОСТ 31916-2012.

Анализ результатов экспериментальных данных показал, что изменение температуры при СВЧ обработке грибов в диапазоне температур до 15°C подчиняются экспоненциальному закону и могут быть адекватно описаны зависимостью

$$t_i = a_i \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{b_i}\right), i \in \mathbb{N}. \quad (1)$$

В то же время естественный нагрев в условиях комнатной температуры (18°C) может быть адекватно аппроксимирован зависимостью

$$t_0 = a_0 + b_0 \cdot \tau^3, \quad (2)$$

где τ – продолжительность СВЧ обработки, с;

t_i и t_0 – температура при СВЧ обработке и естественном нагреве, соответственно, °C;

τ – продолжительность обработки, с;

a_0, a_i, b_0 и b_i – коэффициенты.

Статистические характеристики зависимостей (1) и (2) представлены в таблице 3.

Таблица 3. Статистические характеристики зависимостей температуры шампиньонов от продолжительности нахождения в СВЧ поле

Table 3. Statistical parameters for the dependencies of champion temperature on the time of microwave field processing

| Мощность СВЧ обработки, Вт | Статистические характеристики | | | |
|----------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------|---------|
| | коэффициенты | значения | $P > t $ | r^2 |
| 0 | a_0 | 4,7030 | 0,00000 | 0,96398 |
| | b_0 | $2,44 \cdot 10^{-6}$ | 0,00049 | |
| 800 | a_1 | 5,8669 | 0,01644 | 0,75585 |
| | b_1 | -65,03304 | 0,00974 | |
| 1600 | a_2 | 7,6037 | 0,03160 | 0,76046 |
| | b_2 | -56,9043 | 0,01341 | |
| 2400 | a_3 | 6,1951 | 0,03526 | 0,84556 |
| | b_3 | -43,9500 | 0,00385 | |
| 3200 | a_4 | 7,1523 | 0,03612 | 0,86614 |
| | b_4 | -40,2706 | 0,00259 | |

Таким образом, учитывая, что параллельно термической составляющей эффекта воздействия СВЧ поля на обрабатываемый объект, при стартовой температуре, меньшей, чем температура окружающей среды, в процессе обработки также имеет место естественный нагрев, происходящий в некотором темпе, можно постулировать наличие монотонного уменьшения допустимой величины отепления с течением времени

$$\Delta t = t_{st} + \Delta t_d - t_0,$$

где t_{st} – начальная температура обрабатываемого объекта, °С;

Δt_d – допустимая величина отепления, °С.

В свою очередь, в процессе СВЧ обработки величина отепления обрабатываемого объекта составляет

$$\Delta t_i = t_i - t_{st},$$

где Δt_i – величина отепления в процессе СВЧ обработки, °С.

Следовательно, требование не превышения величины отепления обрабатываемого в СВЧ поле объекта выше заданного значения может быть формализовано следующим образом

$$\Delta t_i \leq \Delta t. \tag{3}$$

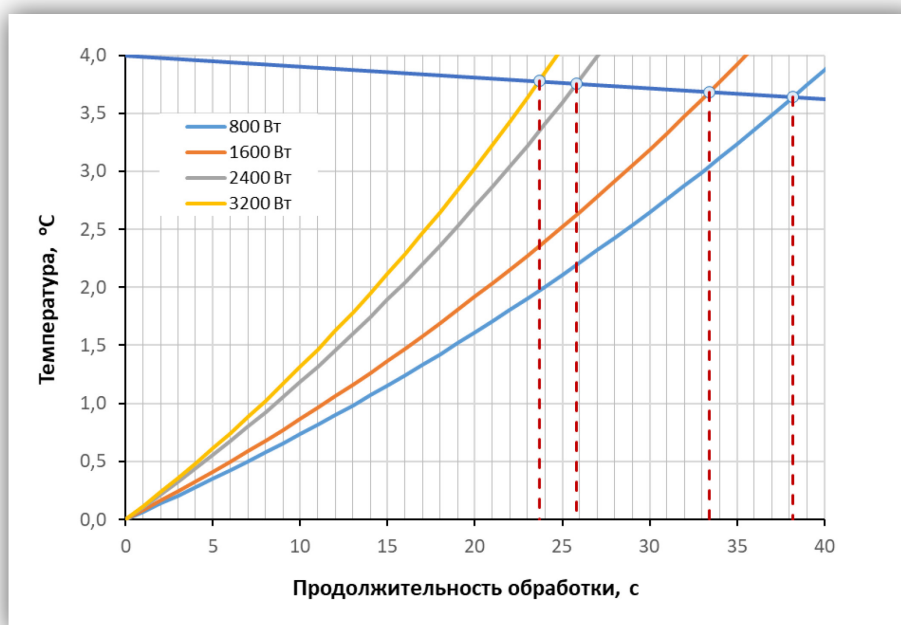


Рисунок 2 – Динамики температуры шампиньонов в процессе СВЧ обработки в пределах допустимого отепления
 Figure 2. Dynamics of champion temperature during microwave processing within permitted heating range

Таким образом, каждому значению мощности СВЧ поля будет соответствовать единственное значение предельной продолжительности обработки, при котором еще соблюдается условие (3). Графическое отображение приведенных суждений, применительно к СВЧ обработке шампиньонов на установке УСК2, представлено на рисунке 2.

В силу особенностей аналитических зависимостей (1) и (2), непосредственный расчет предельной продолжительности СВЧ обработки при том или ином значении мощности возможно только численными методами. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4. Расчетные значения предельной продолжительности СВЧ обработки
Table 4. Calculated values of maximum time of microwave processing

| Суммарная мощность, Вт | Предельная продолжительность обработки, с |
|------------------------|---|
| 0 | 120,761 |
| 800 | 38,226 |
| 1600 | 33,448 |
| 2400 | 25,833 |
| 3200 | 23,671 |

Анализ полученных данных показывает закономерное уменьшение предельной продолжительности СВЧ обработки при увеличении суммарной мощности микроволнового излучения. Данная закономерность может быть адекватно (при $\alpha \leq 0,0001$) аппроксимирована функцией вида ($r^2 = 0,9974$, a_τ и b_τ адекватны при $\alpha \leq 0,0002$)

$$\tau = (a_\tau + b_\tau \cdot \sqrt{W})^{-1},$$

где W – суммарная мощность СВЧ излучения;

$$a_\tau = 8,2832 \cdot 10^{-3};$$

$$b_\tau = 5,9278 \cdot 10^{-4}.$$

Графическое отображение зависимости предельной продолжительности СВЧ обработки о суммарной мощности СВЧ излучения представлено на рисунке 3.

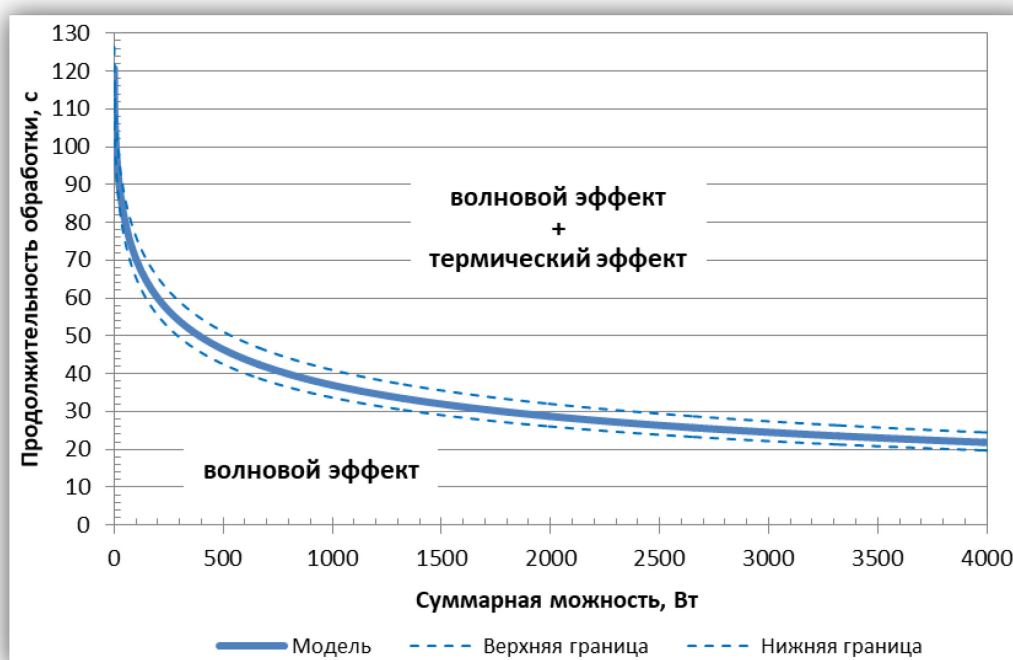


Рисунок 3 – Влияние суммарной мощности СВЧ излучения на предельную продолжительность обработки шампиньонов

Figure 3. The influence of total microwave radiation power on maximum time of champion microwave processing

При этом области пространства в координатах «суммарная мощность – продолжительность обработки» над кривой соответствует суммарному – термическому и волновому – эффектам микроволнового излучения. Тогда как области под кривой соответствует условие проявления преимущественно волнового эффекта. Таким образом, сама функция, определяемая (3), являет собою основное граничное условие обработки в СВЧ поле, задающее область определения совокупности аргумента и зависимого фактора для нивелирования термической компоненты эффекта воздействия СВЧ излучения на обрабатываемый объект. Соответственно, для изучения влияния волновой составляющей СВЧ излучения на объекты обработки максимальная продолжительность микроволновой обработки не должна превышать значений граничного условия для выбранной мощности.

В связи с тем, что использованный подход основан на статистической обработке исходных данных, конечный результат неизбежно является усреднением и обязательно включает некоторый доверительный коридор на всей области определения аргумента функции, определяемый совокупностью исходных данных, получаемой функциональной зависимостью и доверительной вероятностью. Соответственно, для практического применения в качестве собственно граничного условия обработки в СВЧ поле для нивелирования термической компоненты с заданной доверительной вероятностью следует принимать не саму функцию, а ее нижнюю границу доверительного коридора.

Потенциально, разработанный метод позволяет адекватно определить предельную продолжительность обработки для любой отдельно взятой СВЧ установки с целью проведения дальнейших исследований влияния волнового эффекта на целевые свойства обрабатываемых объектов.

Заключение

В результате проведенных исследований разработан потенциально универсальный метод определения граничных условий СВЧ обработки для нивелирования (с заданной доверительной вероятностью) термической компоненты эффекта микроволнового излучения, на основании которого могут быть рассчитаны значения предельной продолжительности обработки исследуемого объекта в зависимости от суммарной мощности СВЧ излучения. Метод может быть полезен при изучении влияния нетермической компоненты микроволнового излучения на исследуемые объекты.

Литература

1. 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.
2. Мишуrow Н.П., Неменущая Л.А., Павлов Ю.С., Кондратенко В.В., Тришканева М.В., Королев А.А. Физические методы обработки сельскохозяйственного сырья: аналит. обзор. М.: Росинформагротех, 2020. 88 с.
3. Королев А.А., Тюрина С.С., Тришканева М.В. Анализ применения микроволнового излучения в технологиях стерилизации растительного сырья // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств» 2019. № 3. С. 81–91.
4. Дроздова Н.А., Дыдыкин А.С., Горбунова Н.А., Семенова А.А. Применение ионизирующего и неионизирующего излучения в пищевой промышленности // Все о мясе. 2017. № 1. С. 16–20.
5. Ушакова Н.Ф., Копысова Т.С., Касаткин В.В., Кудряшова А.Г. Опыт применения СВЧ-энергии при производстве пищевых продуктов // Пищевая промышленность. 2013. № 10. С. 30–32.
6. Руциц А.А., Щербакова Е.И. Применение СВЧ-нагрева в пищевой промышленности и общественном питании // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2014. № 1. С. 9–15.
7. Kalla A.M., 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.
8. 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.
9. 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.
10. Decareau R.V., Peterson R.A. *Microwave processing and engineering*. Weinheim:VCH; Chichester:Ellis Horwood, 1986. 224 p.
11. 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.

12. Oliveira M.E.C., Franca A.S. Microwave heating of foodstuffs. *J. Food Eng.* 2002, no. 53, pp. 347–359.
13. Pozar D.M. *Microwave engineering*. John Wiley & Sons. 2011. 756 p.
14. Колоколова А.Ю., Илюхина Н.В., Тришканева М.В., Королев А.А. Влияние комбинирования микроволнового и ультрафиолетового методов обработки растительного сырья на ингибирование культуры *Salmonella* // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 1. С. 76–81.
15. Yaghmaee P., Durance T. Efficacy of vacuum microwave drying in microbial decontamination of dried vegetables. *Drying Technology*. 2007, V. 25, no.6, pp. 1099–1104.
16. 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.
17. Janković S.M., Milošev M.Z., Novaković M.L. Dejstva mikrotalasnog zračenja na kulture mikroorganizama. *Hospital Pharmacology*. 2014, V. 1, no. 2, pp. 102–108.
18. Мониц В.А., Малиновская С.Л., Махрова Т.В., Малиновский Д.С. Особенности воздействия низкоинтенсивных электромагнитных излучений различных диапазонов на микроорганизмы // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. №2. С. 435–438.
19. Лаврский А.Ю., Калугина Н.Ю. Влияние микроволнового излучения различных частот на рост культур *escherichia coli* // Вестник ПГГПУ. Серия № 2. Физико-математические и естественные науки. 2020. № 1. С. 36–44.
20. Соболева О.М. Динамика численности микроорганизмов на поверхности зерновок ржи и ячменя после электромагнитной обработки // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т 32. № 9. С. 21–23.
21. Костикова Н.О. Технологические и потребительские показатели качества зерна фасоли // Зернобобовые и крупяные культуры. 2019. № 3. С. 92–94.

References

1. 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.
2. Mishurov N.P., Nemenushchaya L.A., Pavlov Yu.S., Kondratenko V.V., Trishkaneva M.V., Korolev A.A. Physical methods of processing of agricultural raw material: Analyt. review. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 2020. 88 p. (In Russian)
3. Korolev A.A., Tyurina S.S., Trishkaneva M.V. The application of microwave radiation for sterilization of plant raw materials. *Processes and Food Production Equipment*. 2019, no. 3, pp. 81–91. (In Russian)
4. Drozdova N.A., Dydykin A.S., Gorbunova N.A., Semenova A.A. Using ionizing and nonionizing radiation in food industry. *Vsyo o myase*. 2017, no. 1, pp. 16–20. (In Russian)
5. Ushakova N.F., Kopysova T.S., Kasatkin V.V., Kudryashova A.G., Experience of using microwave energy in the production of food products. *Food Industry*. 2013, no. 10, pp. 30–32. (In Russian)
6. Rushchits A.A., Shcherbakova E.I. Use of microwave heating in food industry and public catering. *Bulletin of South Ural State University, Series "Food and Biotechnology"*. 2014, no. 1, pp. 9–15. (In Russian)
7. Kalla A.M., 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.
8. 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.
9. 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.
10. Decareau R.V., Peterson R.A. *Microwave processing and engineering*. Weinheim:VCH; Chichester:Ellis Horwood, 1986. 224 p.
11. 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.
12. Oliveira M.E.C., Franca A.S. Microwave heating of foodstuffs. *J. Food Eng.* 2002, no. 53, pp. 347–359.
13. Pozar D.M. *Microwave engineering*. John Wiley & Sons. 2011. 756 p.
14. Kolokolova A.Yu., Ilyuhina N.V., Trishkaneva M.V., Korolev A.A. The effect of combining microwave and ultraviolet methods of plant materials processing on *Salmonella* culture inhibition. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020, V. 82, no. 1, pp. 76–81. (In Russian)
15. Yaghmaee P., Durance T. Efficacy of vacuum microwave drying in microbial decontamination of dried vegetables. *Drying Technology*. 2007, V. 25, no.6, pp. 1099–1104.
16. 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.
17. Janković S.M., Milošev M.Z., Novaković M.L. Dejstva mikrotalasnog zračenja na kulture mikroorganizama. *Hospital Pharmacology*. 2014, V. 1, no. 2, pp. 102–108.

18. Monich V.A., Malinovskaya S.L., Mahrova T.V., Malinovsky D.S. Peculiarities of action of different waveband low-intensity electromagnetic radiation on microorganisms. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2010, no. 2, pp. 435–438. (In Russian)
19. Lavrskii A.Yu., Kalugina N.Yu. Influence of microwave radiation of different frequencies on the growth of *Escherichia coli*. *Vestnik PGGPU. Seriya no. 2. Fiziko-matematicheskie i estestvennye nauki*. 2020, no. 1, pp. 36–44. (In Russian)
20. Soboleva O.M. Dynamics of microorganism population on the surface of rye and barley grains after electromagnetic treatment. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2018, V. 32, no. 9, pp. 21–23. (In Russian)
21. Kostikova N.O. Technological and consumer indicators of quality of bean grain. *Legumes and Groat Crops*. 2019, no. 3, pp. 92–94. (In Russian)

Информация об авторах

Алексей Александрович Королев – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник

Владимир Владимирович Кондратенко – канд. техн. наук, доцент

Information about the authors

Aleksei A. Korolev, Ph. D., Senior researcher

Vladimir V. Kondratenko, Ph. D., Associate Professor

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 22.03.2021

Одобрена после рецензирования 26.04.2021

Принята к публикации 18.05.2021

The article was submitted 22.03.2021

Approved after reviewing 26.04.2021

Accepted for publication 18.05.2021