



**Бурдо, О. Г.** Процессы инактивации микроорганизмов в микроволновом поле [Текст] : монография / Бурдо Олег Григорьевич, Рыбина Ольга Борисовна. - Одесса : Полиграф, 2010. - 200 с. : табл., рис. - Библиогр.: с. 178-193. - ISBN 978-966-2326-04-8.

Книга содержит сведения по развитию теории и техники микробиологической стабилизации жидких пищевых продуктов. Обосновываются перспективы нового

подхода, который основывается на электромагнитной обработке потока. Эффективность метода доказывается аналитически и иллюстрируется примерами исследований микробиологических процессов в электромагнитных полях. Сформулирована гипотеза о принципах согласования режимных, конструктивных параметров и структуры продукта на эффективность инактивации микроорганизмов. Гипотеза эффективности тонкопленочной обработки подтверждена экспериментально, результатами микробиологических исследований и дегустацией продукта. Представлены результаты экспериментальных микробиологических процессов в условиях микроволнового поля. Приведены зависимости уровня летальных температур для молочной сыворотки и вина от режимных и конструктивных параметров аппарата. Изложены принципы проектирования аппаратов, предназначенных для микробиологической стабилизации продукта в электромагнитном поле. Предлагаются современные подходы к совершенствованию технологий пастеризации для консервной, виноконьячной, молочной и др. отраслей АПК.

Книга предназначена для студентов, магистров, аспирантов, докторантов, научных сотрудников, которые занимаются исследованием микробиологических процессов и разработкой микроволновой техники. Книга представляет интерес для специалистов - проектировщиков технологического оборудования для пищевых технологий.

*То, что мы знаем, - ограничено,  
а что не знаем - бесконечно.  
Анулей*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Более полтора столетия назад великий французский ученый Луи Пастер обосновал новый способ консервирования пищевых продуктов нагреванием не выше 100°C. В честь автора такой способ называли пастеризацией. При пастеризации погибает большинство неспороносных бактерий, дрожжей и плесневых грибов, содержащихся в продукте, а также разрушаются ферменты. В основе открытия Пастера лежало глубокое понимание вопросов и физики, и химии, ведь он успешно защитил две докторские диссертации: одну по физике, а вторую по химии.

Первые работы Л. Пастера были посвящены поискам средств борьбы с болезнями вина - нарушением процесса брожения. К настоящему времени создана стройная методология микробиологических исследований и сформированы научные основы процесса пастеризации. Однако бурное развитие прикладных исследований микробиологических процессов, привлечение для практического решения задач новых эффективных приемов для длительного сохранения пищевых продуктов привели к некоторому противоречию. Появились случаи, когда техника опережает развитие науки. Четкие методы микробиологических исследований фиксируют факты качественной обработки продукта, а механизмы процесса остаются до конца не понятыми. Более того, хромает даже терминология, пастеризацией называют процессы далекие от предложения Л. Пастера. Доказано, что причиной повышения сроков сохранности продукта могут быть процессы обработки сверхвысоким давлением (работы Донецкого национального университета экономики и торговли), механического отделения микроорганизмов при нанофильтрации, ДИВЭ - технологии (работы института технической теплофизики АН Украины) и пр. В последние годы растет интерес к процессам электрофизической обработки пищевых продуктов, которые позволяют увеличить сроки сохранности продуктов при повышении их качественных характеристик по сравнению с классической пастеризацией.

Целью данной монографии не является углубление в микробиологическую науку и формирование современных концепций взаимодействия микроорганизмов с различными факторами. Внимание авторов сосредоточено на формировании гипотез, разработке соответствующих модулей для обработки жидких пищевых продуктов микроволновым полем, проведении экспериментального моделирования и установлении фактов инактивации отдельных микроорганизмов. На последнем этапе исследований применялись общепризнанные методы микробиологического анализа.

В связи с отсутствием соответствующих терминов для характеристики микробиологических процессов в микроволновом поле, в работе используются понятия: «микробиологическая стабилизация» (достижение регламентированного состояния микрофлоры в продукте), «инактивация» (гибель или угнетение на заданный срок микроорганизмов при обработке

продукта).

Объектами исследований выбраны: виноматериал (по аналогии с опытами Л. Пастера) и молочная сыворотка (как продукт наиболее критичный к срокам хранения).

Авторы выражают искреннюю благодарность: к.т.н, Семкову С.В. за участие в исследованиях и апробации режимов микробиологической стабилизации вина в условиях производства; научному сотруднику Малашевичу С. А. за помощь в разработке и изготовлении модулей; инженеру Терзезман Е.Ф. за активное участие в проведении экспериментов; к.т.н. Рыбину Б.С. за консультации по вопросам математического моделирования микробиологических процессов в микроволновом поле.

Авторы выражают признательность д.т.н. Капрельянцу Леониду Викторовичу, д.т.н. Малежику Ивану Федоровичу и д.т.н. Верхивкеру Якову Григорьевичу за ценные замечания и советы, которые они сделали при рецензировании рукописи. Замечания и пожелания читателей будут приняты авторами с благодарностью.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Пастеризация жидких пищевых продуктов - один из важнейших способов их длительного сохранения. Однако современные режимы пастеризации имеют ряд недостатков. Так, высокая температура при высокотемпературном кратковременном режиме пастеризации ведет к ухудшению органолептических свойств продукта, а необходимость длительной экспозиции продукта при низкотемпературном долговременном режиме не позволяет организовать непрерывную обработку продукта в потоке и требует наличия больших емкостей.

В пищевой промышленности все более широкое распространение находят электрофизические методы обработки, которые применяют в технологических процессах переработки как растительного, так и животного сырья.

Многие ученые проводят исследования процесса пастеризации с применением энергии электромагнитного поля. По результатам этих исследований стало известно, что при пастеризации в электромагнитном поле температуры и длительность обработки оказываются более низкими, чем при стандартных методах обработки. Однако этот процесс довольно сложен, зависит от большого числа параметров и до конца не изучен. Поэтому единой теории пастеризации в электромагнитном поле нет. Есть различные математические модели пастеризации конкретных пищевых продуктов или только части процесса пастеризации.

Температуры, при которых происходит пастеризация жидких пищевых продуктов электромагнитным полем сверхвысокой чистоты, ниже температур при стандартных методах пастеризации. Это связывается с избирательным нагревом. Избирательный нагрев проявляется в разности

температур нагревания различных компонентов продукта из-за разности их диэлектрических характеристик. Также возможно непосредственное воздействие (не связанное с нагреванием) электромагнитного поля на диэлектрик, чем, в частности, и является любой пищевой продукт.

Разработанные математические модели не дают универсальной теории, которая описывала бы в полной мере все стадии пастеризационного процесса. Это связано с огромным числом параметров, от которых зависит степень завершенности процесса пастеризации, а также от характеристик пастеризуемого продукта. Поэтому актуальны задачи разработки математической модели пастеризации жидких продуктов в условиях микроволнового электромагнитного (МЭМ) поля и создания установки для микроволновой пастеризации пищевых жидкостей.

В монографии представлены последовательные этапы, на которых решались следующие частные задачи:

- формулировка гипотезы и обоснование механизмов низкотемпературной инактивации микроорганизмов, путей совершенствования микроволновых пастеризаторов;
- создание модифицированной дистрибутивной модели, позволяющей рассчитывать диэлектрические характеристики различных пищевых продуктов;
- разработка и исследование моделей распределения электромагнитного поля и температур в рабочей камере при дискретных и непрерывных процессах пастеризации;
- исследование зависимости летальности микроорганизмов от температуры, толщины и концентрации обрабатываемого слоя продукта и от режимов МЭМ-поля;
- исследование зависимости летальности микроорганизмов от температуры, скорости протекания продукта и конструкции пастеризационного модуля;
- разработка методологической базы и изготовление экспериментального оборудования для комплексных исследований процессов микроволновой пастеризации жидких пищевых продуктов, выявление целесообразных режимов;
- испытания лабораторного образца микроволнового пастеризатора в производственных условиях, проведение соответствующих микробиологических исследований продукта.

Экспериментальное моделирование и испытания в условиях производства проводились на молочной сыворотке и на виноматериалах.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>

<b>Список основных условных обозначений.....</b>	<b>7</b>
<b>ГЛАВА ПЕРВАЯ. ТЕОРИЯ И ТЕХНИКА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ. ДОСТИГНУТЫЙ УРОВЕНЬ.....</b>	<b>9</b>
1.1. Фильтрационные микробиологические процессы.....	9
1.2. Тепловая пастеризация продуктов.....	11
1.3. Влияние пастеризации на микрофлору продуктов.....	12
1.4. Моделирование степени завершенности процесса пастеризации.....	13
1.5. Методы пастеризации пищевых продуктов в микроволновом поле.....	15
1.6. Механизмы нагрева диэлектриков в микроволновом поле.....	16
1.7. Применение микроволнового поля для пастеризации пищевых продуктов.....	18
1.8. Применение микроволнового нагрева для микробиологической стабилизации молочных продуктов.....	19
1.9. Применение микроволнового нагрева для микробиологической стабилизации сыворотки.....	22
1.10. Математическое моделирование микробиологических процессов в микроволновом поле.....	23
1.11. Механизмы инактивации микроорганизмов в микроволновом электромагнитном поле.....	26
1.12. Специфика измерения температуры в камере для микроволнового нагрева.....	31
1.13. Преимущества и недостатки микроволновой микробиологической стабилизации.....	32
<b>ГЛАВА ВТОРАЯ. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНИКИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОДУКТОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ.....</b>	<b>34</b>
2.1. Классификация микробиологических процессов.....	34
2.2. Формирование научной гипотезы.....	37
2.3. Механизмы низкотемпературной микробиологической стабилизации продуктов в микроволновом поле.....	39
2.4. Температурные поля при наноскопической микроволновой обработке продуктов.....	40
2.5. Тепломеханические модели микроорганизма.....	41
2.6. Теплоперенос в системе «микроорганизм - продукт».....	48
<b>ГЛАВА ТРЕТЬЯ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ.....</b>	<b>53</b>
3.1. Одномерная модель.....	53
3.2. Влияние толщины продукта.....	55
3.3. Стоячие волны.....	57

3.4. Пространственная модель.....	58
3.4.1. Модель рабочей камеры при полном заполнении продуктом.....	58
3.4.1.1. Большие размеры камеры.....	59
3.4.1.2. Малые размеры камеры.....	59
3.4.2. Модель рабочей камеры при частичном заполнении продуктом.....	62
3.5. Влияние формы продукта.....	63
3.6. Влияние объема продукта.....	64
<b>ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. МОДИФИЦИРОВАННАЯ ДИСТРИБУТИВНАЯ МОДЕЛЬ ПРОДУКТА.....</b>	<b>65</b>
4.1. Диэлектрические свойства продукта.....	65
4.2. Расчет электрических свойств молочной сыворотки при помощи модифицированной дистрибутивной модели.....	66
4.3. Зависимость диэлектрических констант сыворотки от температуры.....	70
<b>ГЛАВА ПЯТАЯ. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ В СИСТЕМЕ «МИКРООРГАНИЗМ - ПРОДУКТ».....</b>	<b>71</b>
5.1. Избирательный нагрев диэлектриков.....	71
5.2. Перегрев в адиабатных условиях.....	73
5.3. Зависимость перегрева от теплообмена со средой.....	74
5.3.1. Теплообмен по уравнению Ньютона - Рихмана.....	74
5.3.2. Теплообмен теплопроводностью.....	77
5.4. Влияние на теплообмен мембраны микроорганизма.....	81
<b>ГЛАВА ШЕСТАЯ. МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ.....</b>	<b>83</b>
6.1. Обобщенная модель процесса низкотемпературной инактивации в микроволновом поле.....	83
6.2. Методика определения летальности микроорганизмов.....	86
6.3. Методика определения температуры продукта.....	88
6.4. Оценка погрешностей измерений.....	89
6.4.1. Инструментальные погрешности.....	89
6.4.2. Погрешность косвенных измерений и метода аппроксимации.....	90
6.5. Характеристика экспериментального стенда для дискретного режима обработки.....	92
6.6. Характеристика экспериментального стенда для обработки продукта в потоке.....	93
<b>ГЛАВА СЕДЬМАЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ МИКРОВОЛНОВЫМ ПОЛЕМ.....</b>	<b>98</b>

7.1. Характеристика молочной сыворотки.....	98
7.2. Общая характеристика микрофлоры и химические методы консервации.....	100
7.3. Специфика пастеризации молочной сыворотки.....	102
7.4. Экспериментальные исследования в дискретном режиме обработки.....	103
7.4.1.Зависимость летальности микроорганизмов от продолжительности импульса подачи энергии.....	103
7.4.2.Зависимость летальности микроорганизмов от концентрации сухих веществ в молочной сыворотке.....	107
7.4.3.Зависимость летальности микроорганизмов от толщины обрабатываемого слоя продукта.....	110
7.4.4.Зависимость летальности микроорганизмов от начальной температуры продукта.....	115
7.5. Исследование летальности микроорганизмов при непрерывном режиме обработки продукта.....	117
7.5.1. Режим обработки в трубопроводе.....	118
7.5.2. Режим непрерывной обработки в змеевике.....	120
7.6. Обобщение результатов экспериментов.....	125
<b>ГЛАВА ВОСЬМАЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ВИНМАТЕРИАЛОВ МИКРОВОЛНОВЫМ ПОЛЕМ.....</b>	<b>135</b>
8.1. Тепловые режимы микробиологической стабилизации вина.....	135
8.2. Задачи экспериментальных исследований.....	136
8.3. Гидравлические исследования модулей.....	142
8.4. Тепловые исследования модулей.....	146
8.5. Исследование процесса низкотемпературной стабилизации вина в потоке.....	149
8.5.1.Общая характеристика экспериментального моделирования.....	149
8.5.2.Влияние направления движения потока.....	150
8.5.3.Влияние величины зазора.....	151
8.5.4.Влияние скорости потока.....	153
8.5.5.Влияние мощности электромагнитного поля.....	155
8.6. Кинетика микробиологических процессов в модуле.....	156
8.7. Обобщение результатов экспериментов.....	157
<b>ГЛАВА ДЕВЯТАЯ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОДУКТОВ.....</b>	<b>160</b>
9.1. Обобщенная структура расчета микроволновых установок для микробиологической стабилизации продуктов.....	160
9.2. Расчет аппарата для обработки молочной сыворотки.....	161
9.2.1.Постановка задачи.....	161

9.2.2. Расчет тепловых нагрузок.....	164
9.2.3. Расчет конструктивных и энергетических параметров установки.....	166
9.2.4. Гидравлический расчет.....	166
9.3. Оптимизация конструктивных параметров установки.....	167
9.3.1. Влияние диаметра трубки на энергетические затраты при нагреве продукта.....	168
9.3.2. Расчет гидравлических сопротивлений.....	169
9.3.3. Расчет суммарной затрачиваемой энергии.....	170
9.4. Испытания микроволнового аппарата для микробиологической стабилизации вина.....	171
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>175</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>178</b>
<b>СОДЕРЖАНИЕ.....</b>	<b>194</b>