

На правах рукописи

НАУМЕНКО Ольга Васильевна

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СВЧ-ИНДУКЦИОННОЙ
УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ТВОРОЖНОГО СЫРЬЯ
В СЕЛЬХОЗПРЕДПРИЯТИЯХ**

05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве
05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Новикова Галина Владимировна.

Официальные оппоненты: **Сторчевой Владимир Федорович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», проректор по учебной работе;

Бредихин Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет пищевых производств», зав. кафедрой «Технологическое оборудование и процессы отрасли».

Ведущая организация – Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» (ВИЭСХ).

Защита состоится 27 июня 2013 г. в 12³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 220.070.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия» по адресу: 428003, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, 29, ауд. 222, телефон (факс) 8(8352) 62-23-34, e.mail: info@academy21.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия».

Автореферат разослан 22 мая 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

С.С. Алатырев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Объем производства творожного сырья по статистическим данным в 2011 г. по Российской Федерации (РФ) и по Чувашской Республике (ЧР) составляет 381 и 11 млн. кг/год соответственно. Из этого объема до 20% (76 млн. кг по РФ и 2 млн. кг по ЧР) идет на производство творожных изделий различного ассортимента. Причем 7% (5,3 млн. кг по РФ и 0,132 млн. кг по ЧР) производимых творожных изделий – это национальные изделия, например, в ЧР – это «Чăкăт». При этом удельные энергетические затраты на термообработку творожного сырья остаются достаточно высокими, а показатели качества изделий – неудовлетворительными. Поэтому разработка ресурсосберегающей технологии производства творожных изделий и соответствующей установки является актуальной задачей. Потребность в таких установках по РФ составляет до 1200 шт., а по ЧР – 30 шт. при производительности 30...35 кг/ч.

Уровень разработанности темы. Анализ существующих способов термообработки пищевых продуктов (кондуктивный, конвективный, диэлектрический и индукционный) показывает возможность улучшения качества изделий при сниженных энергетических затратах за счет научно-обоснованного применения энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ). Для обеспечения поточности процесса термообработки сырья в ЭМП СВЧ используют волноводные и резонаторные установки со сложными гребенчатыми шлюзовыми устройствами. С целью обеспечения наилучшего условия генерирования эндогенного тепла в сырье в поточном режиме и ограничения излучения СВЧ энергии из объемного резонатора в окружающее пространство через прорези, к нему пристыкован диафрагмированный запердельный волновод в виде цилиндрического сегмента. В связи с этим обоснован новый метод термообработки творожного сырья, реализованный в СВЧ-индукционной установке.

Целью работы является разработка и обоснование конструктивно-технологических параметров и режимов работы СВЧ-индукционной установки для термообработки творожного сырья, позволяющей улучшить качество продукта при сниженных энергетических затратах.

Объект исследования: технологическое оборудование и процесс термообработки творожного сырья экзо- эндогенным нагревом; продукция из творожного сырья.

Предметом исследования является выявление закономерностей процесса термообработки творожного сырья многократным комбинированным воздействием экзо- эндогенного нагрева.

Научную новизну работы представляют:

- математические зависимости, позволяющие обосновать параметры СВЧ-индукционной установки, обеспечивающей процесс термообработки творожного сырья;
- закономерности влияния конструктивно-технологических параметров и режимов работы СВЧ-индукционной установки на динамику экзо- эндогенного нагрева творожного сырья и на качество продукта;
- разработанная СВЧ-индукционная установка, имеющая новое конструк-

тивное исполнение рабочей камеры, состоящей из двух объемных резонаторов с запердельными волноводами в виде диафрагмированного цилиндрического сегмента и двух индукционных нагревательных устройств;

- рациональные режимы и комплекс конструктивно-технологических параметров СВЧ-индукционной установки, обеспечивающей термообработку творожного сырь в поточном режиме, с соблюдением безопасной нормы излучения при сниженных энергетических затратах.

Практическую значимость представляет разработанная и изготовленная СВЧ-индукционная установка для термообработки творожного сырь в поточном режиме за счет применения запердельного волновода в виде диафрагмированного цилиндрического сегмента (*решение о выдаче патента на изобретение от 06.03.2013, заявка № 2012100570 от 10.01.2012 г.*).

Реализация результатов исследований. Исследования процесса термообработки творожного сырь с применением энергии электромагнитных излучений проводились в лаборатории «Электротехнологии» в соответствии с планом НИОКР ФГБОУ ВПО ЧГСХА. В рамках тематического плана Министерства сельского хозяйства РФ по разделу «Био-нанотехнологии» с 10.01.2013 г. ведутся исследования по теме «Разработка и обоснование установок для термообработки кисломолочных продуктов».

Апробирование разработанной СВЧ-индукционной установки для термообработки творожного сырь проводилось в производственном цехе ООО «Мир вкуса», г. Цивильск. Результаты исследования процесса термообработки творожного сырь переданы в ОАО «Компания ЮНИМИЛК «Чебоксарский гормолзавод», г. Чебоксары.

Результаты научно-исследовательской работы применяются в учебном процессе ФГБОУ ВПО ЧГСХА, ФГБОУ ВПО «Казанский ГАУ», ФГБОУ ВПО «Марийский ГУ», АНО ВПО «Региональный институт технологии и управления» (г. Новочебоксарск).

Апробация работы. Основные научные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научных конференциях: ФГБОУ ВПО ЧГСХА (2011...2013 г.г.); АНО ВПО «РИТиУ» (2010...2012 г.г.); ФГБОУ ВПО «Казанский ГАУ» (2012, 2013 г.г.); ФГБОУ ВПО «Марийский ГУ» (2011...2013 г.г.); ФГБОУ ВПО «Башкирский ГАУ» (2012 г.); ФГБОУ ВПО «Ижевская ГСХА» (2012 г.); ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет» (2012 г.); ФГБОУ ВПО «Вятская ГСХА» (2013 г.).

Результаты исследований были обсуждены на: республиканском фестивале научно-технического творчества молодежи «НТТМ-Чувашия» (2012 г.); межрегиональной конференции – фестивале научного творчества молодежи «Юность Большой Волги» (Чебоксары, 2012 г.); VII республиканском конкурсе инновационных проектов по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (УМНИК – 2012 г., г. Чебоксары); IX республиканском конкурсе научно-исследовательских работ студентов, молодых ученых и специалистов «Наука XXI века» (2013 г., г. Чебоксары).

Результаты исследований, проведенных соискателем удостоены:

1) гранта VII республиканского конкурса инновационных проектов по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса»

(УМНИК – 2012 г., г. Чебоксары, договор № 17196-10);

2) стипендии Президента РФ для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2013...2015 г.г. (приказ Министерства образования и науки РФ №136 от 28.02.2013 г.);

3) специальной стипендии Главы ЧР для представителей молодежи и студентов за особую творческую устремленность (распоряжение № 2-рг от 15.01.2013 г.).

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

по специальности 05.20.02:

- математические зависимости, позволяющие обосновать эффективные конструктивно-технологические параметры и режимы работы СВЧ-индукционной установки для термообработки творожного сырь;я;

- разработанная и апробированная в производственных условиях СВЧ-индукционная установка для термообработки творожного сырь;я, содержащая в экранирующем корпусе диэлектрическую вращающуюся плоскость, обеспечивающую транспортирование сырь;я через рабочую камеру, состоящую из объемных резонаторов с запердельными диафрагмированными волноводами и индукционных нагревательных устройств;

- рабочие режимы и комплекс конструктивно-технологических параметров установки с экзо- эндогенным нагревом, обеспечивающей термообработку творожного сырь;я при сниженных энергетических затратах и улучшение качества творожных изделий;

по специальности 05.18.12:

- разработанный технологический процесс термообработки творожного сырь;я многократным комбинированным воздействием экзо- эндогенного нагрева;

- экспериментальная оценка рациональных режимов термообработки творожного сырь;я и их влияние на органолептические, физико-химические и микробиологические показатели качества изделия.

Публикации. Результаты теоретических и экспериментальных исследований отражены в 20 печатных работах, в том числе 4 – из перечня ведущих периодических изданий, определенных ВАК при Министерстве образования и науки РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 150 страницах и состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы, включающего 144 наименования и 8 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, выделены объект и предмет исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе «Состояние вопроса и задачи исследования» проведен анализ ресурсов и объемов перерабатываемого сырья, диэлектрических характеристик творожного сырья при разной жирности в сантиметровом диапазоне волн.

Обзор существующих технических средств показал, что конвейерная СВЧ установка позволяет улучшить технико-экономические показатели процесса термообработки сырья по сравнению с установками периодического действия. При этом обеспечивается максимальная долговечность генератора путем создания оптимальных условий его работы, но вопросы экранизации СВЧ излучений остаются сложными, даже если мощность генератора составляет около единицы киловатт. Существуют волноводы, обеспечивающие полное поглощение просачивающейся через загрузочные окна СВЧ энергии размером менее четверти длины волны. В случае превышения этих размеров следует предусмотреть другие варианты, поэтому нами предлагается использование запердельного диафрагмированного волновода.

Результаты исследований Атабекова Г.И., Бородина И.Ф., Бредихина С.А., Башилова А.М., Бунимовича В.И., Вышемирского Ф.А., Воробьева В.А., Гинзбурга А.С., Золотина В.П., Кудрявцева И.Ф., Крусь Г.Н., Кавецкого Г.Д., Кисунько Г.В., Крылова Н.Н., Лыкова А.В., Неймана М.С., Николаева Н.С., Новиковой Г.В., Плаксина Ю.М., Пчельникова Ю.Н., Рогова И.А., Стребкова Д.С., Цугленок Н.В. и др. показывают, что применение энергии электромагнитных излучений эффективно для переработки с.-х. продукции, в том числе при термообработке молочной продукции. Анализ показал, что производственно-технологические аспекты и закономерности динамики нагрева творожного сырья изучены недостаточно полно.

Задачи исследований. Для достижения поставленной цели исследования обоснованы следующие основные задачи:

1. Разработать методику термообработки творожного сырья многократным экзо-эндогенным нагревом в процессе его транспортирования в контейнерах через рабочие камеры;
2. Теоретически описать процесс комбинированного диэлектрического и индукционного нагрева творожного сырья;
3. Обосновать конструктивно-технологические параметры и режимы работы СВЧ-индукционной установки, обеспечивающей термообработку творожного сырья в поточном режиме;
4. Получить регрессионные зависимости, связывающие энергетические затраты на термообработку сырья с ключевыми факторами, влияющими на технологический процесс;
5. Разработать и апробировать в производственных условиях СВЧ-индукционную установку для термообработки творожного сырья, оценить экономический эффект её применения в сельскохозяйственных предприятиях.

Во втором разделе «Теоретическое обоснование параметров СВЧ-индукционной установки для термообработки сырья» приведены: описание разработанной СВЧ-индукционной установки для термообработки творожного сырья; теоретические основы процесса комбинированного экзо-эндогенного нагрева сырья; обоснование конструктивно-технологических параметров и режимов работы установки.

С учетом диэлектрических параметров творожного сырья и глубины проникновения энергии ЭМИ в творожное сырье обоснована технологическая схема его термообработки, предусматривающая многократное последовательное воздействие экзо-эндогенного нагрева. Для реализации данной технологии разработана СВЧ-индукционная установка, представляющая техническую новизну (рис. 1). Она содержит диэлектрическую вращающуюся плоскость 4 со сквозными радиально расположенными отверстиями 5, позволяющими транспортировать диэлектрические контейнеры 9 с творожным сырьем 10 через рабочую камеру, образованную двумя объемными резонаторами СВЧ генератора 6 и вторичной обмоткой индукционного нагревателя 2. При этом имеющиеся прорези в объемных резонаторах, предназначенные для транспортирования контейнеров с сырьем, состыкованы с запредельным волноводом (рис. 2). Под диэлектрической плоскостью 4 установлена круглая пластина 2 из ферромагнитного материала, как вторичная обмотка индуктора. Под ней, по периферии установлены индукционные нагреватели 7 (первичные обмотки). Для загрузки и выгрузки продукта имеется окно в экранирующем цилиндрическом корпусе 11. Вращение диэлектрической плоскости осуществляется мотор-редуктором 8.

С учетом чередующихся разных видов энергоподвода вычислена продолжительность воздействия каждого источника и общая продолжительность процесса, и соответственно скорость транспортирования сырья через рабочую камеру. Вращающаяся плоскость условно разделена на пять секторов, в четырех из которых с чередованием установлены источники экзо-эндогенного тепла. При этом обеспечена определенная скважность технологического процесса, позволяющая стабилизировать температуру и давление по всему объему обрабатываемого сырья. Для этого расстояние между источниками энергоподвода должно быть не менее длины резонаторной камеры.

Зная конструктивные размеры комплектующих узлов, используемых в СВЧ-индукционной установке, определен радиус вращающейся диэлектрической плоскости 0,43 м и вычислена добротность резонаторной камеры, равная 333. При этом напряженность электрического поля в резонаторной камере объемом 12,4 л составляет 630 В/см. Обоснована конфигурация диафрагмированного запредельного волновода, отличающегося от гребешковой замедляющей системы тем, что при равном шаге изменяется радиус расположения диафрагм (рис. 2, 3). При этом проанализирована картина распределения электрического поля и определен коэффициент замедления в зависимости от диаметра диафрагм. Размер прорези в резонаторной камере согласован с длиной волны и высотой контейнеров, выбранных в соответствии с глубиной проникновения энергии ЭМИ в творожное сырье.

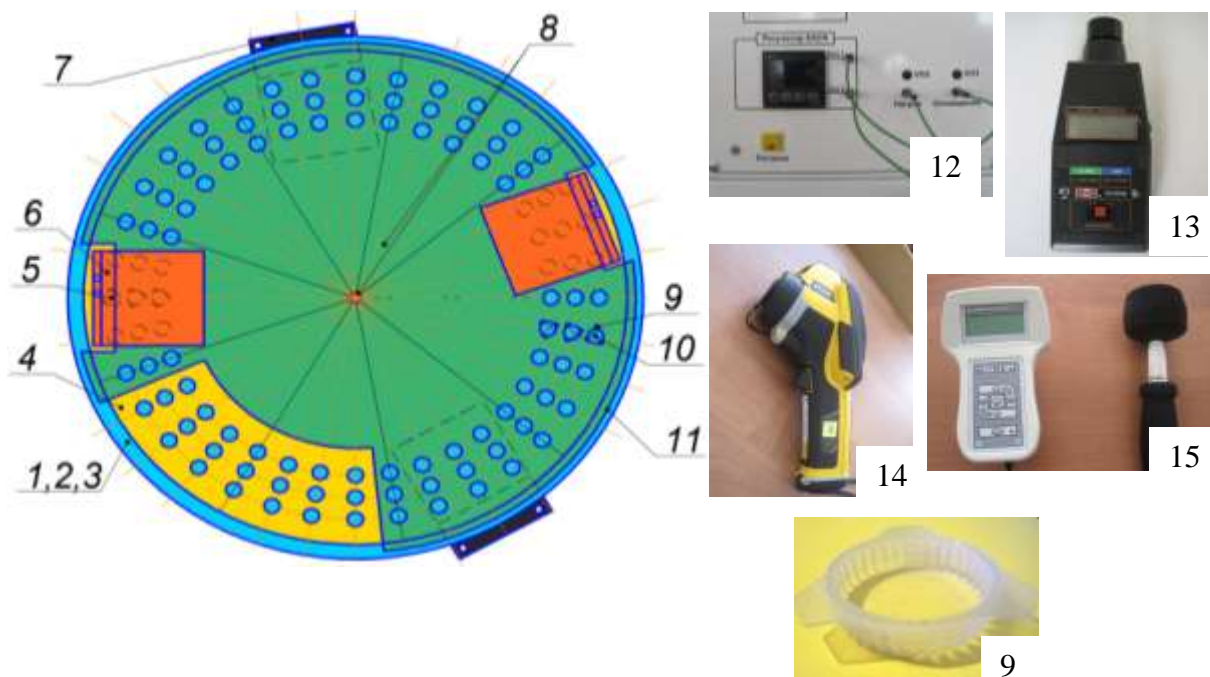


Рисунок 1 – СВЧ-индукционная установка для термообработки творожного сырья без верхней части экранирующего корпуса: 1 – монтажный каркас; 2 – круглая пластина; 3 – ролики; 4 – диэлектрическая плоскость (конвейер); 5 – сквозные отверстия; 6 – СВЧ генераторы; 7 – индукционные нагреватели; 8 – мотор-редуктор; 9 – силиконовые контейнеры; 10 – творожное сырье; 11 – экранирующий корпус; 12 – цифровой контролер температуры E5CN; 13 – фототахометр ДТ-2234А; 14 – тепловизор FLIR 365; 15 – измеритель мощности потока ЭМИ ПЗ-33М

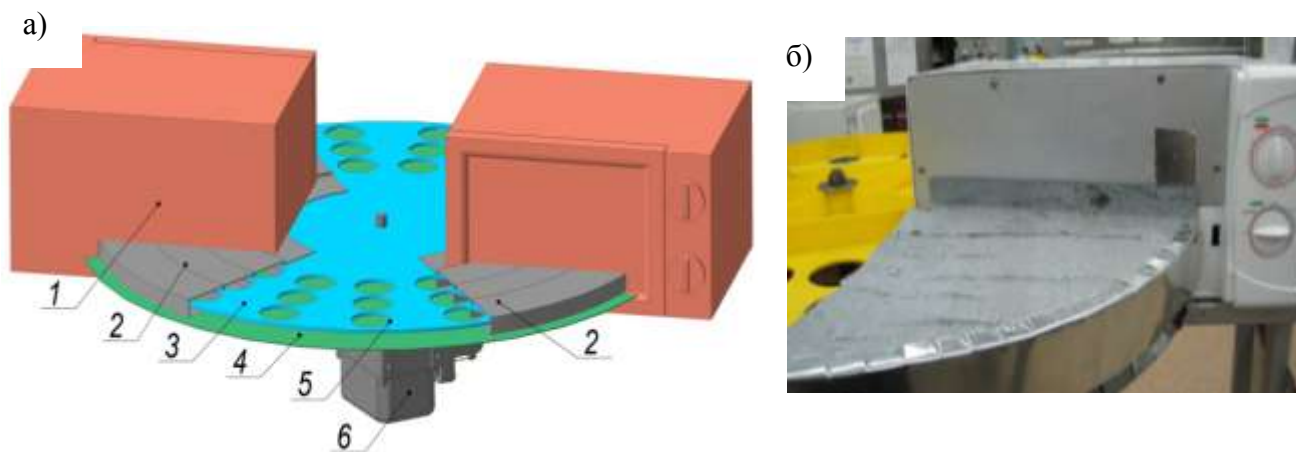


Рисунок 2 – Резонаторные камеры с запредельными диафрагмированными волноводами, обеспечивающими транспортирование творожного сырья в контейнерах, размещенных в ячейках диэлектрического конвейера: а) пространственное изображение; б) реальное исполнение запредельного волновода: 1 – СВЧ-генераторы, 2 – запредельный диафрагмированный волновод, 3 – диэлектрический конвейер, 4 – монтажный стол, 5 – ячейки, 6 – мотор-редуктор

Необходимость диафрагмирования запредельного волновода для замедления волны обоснована тем, что при его отсутствии происходит перегрев или выход из строя магнетрона второго генератора, предназначенного для увеличения производительности установки. Определена добротность резонаторной ка-

меры при присутствии прорези в ней для передвижения конвейера и при содержании запердельного волновода. Система диафрагмированного запердельного волновода представлена на рис. 3.

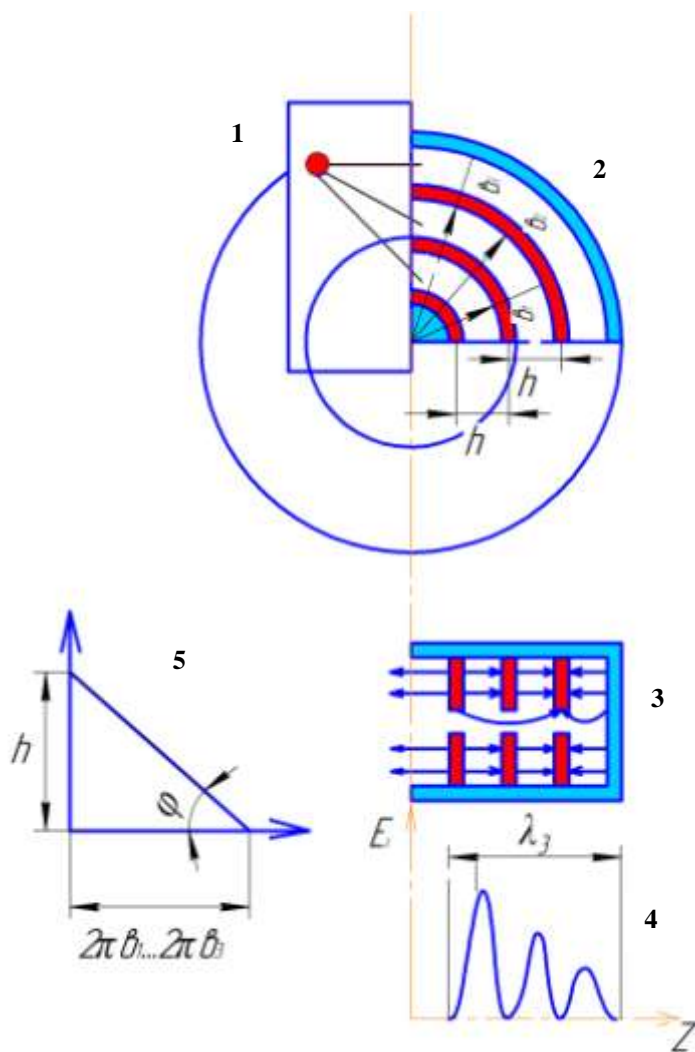


Рисунок 3 – Система диафрагмированного запердельного волновода: 1 – СВЧ генератор; 2 – запердельный диафрагмированный волновод; 3 – структура электрического поля замедленной волны, распространяющейся в диафрагмированном волноводе; 4 – продольная составляющая электрического поля на участках, соответствующих диафрагмам; 5 – отношение шага и диаметра диафрагм; b – радиус диафрагмы по центру поперечного сечения; h – шаг между продольными осями диафрагмы; φ – угол между направлением волны вдоль продольной оси и шагом диафрагмы

Сочетая методики расчета гребешковой и спиральной замедляющих систем с учетом граничных условий, проведено обоснование цилиндрического диафрагмированного запердельного волновода. Чем больше радиус диафрагмы, тем

меньше угол φ и $\cos\varphi$, а, следовательно, выше замедление электромагнитной волны. Из-за прорези в резонаторной камере, предназначенной для сквозного транспортирования сырья, мощность потока ЭМИ распространяется за ее пределами. Зазор при этом не превышает четверти длины волны. Приращение температуры творожного сырья внутри резонаторной камеры составляет $48\dots 68^\circ\text{C}$, а за ее пределами на расстоянии 40 см от излучателя – 3°C . Изменение приращения температуры творожного сырья по мере удаления от источника излучения при удельной мощности генератора $2,67 \text{ Вт/г}$ представлено на рис. 4. При содержании запердельного диафрагмированного волновода излучение ЭМИ практически полностью ограничивается.

За счет краевого потока мощности ЭМИ в запердельном волноводе творожное сырье сохраняет температурный режим в процессе транспортирования. С учетом поточности технологического процесса термообработку творожного сырья необходимо осуществлять в силиконовых контейнерах диаметром 7 см и высотой 2 см. При этом в резонаторной камере одновременно находится 5 ячеек с сырьем общей массой 300 г, а удельная мощность эндогенного нагрева составляет $2,67 \text{ Вт/г}$.

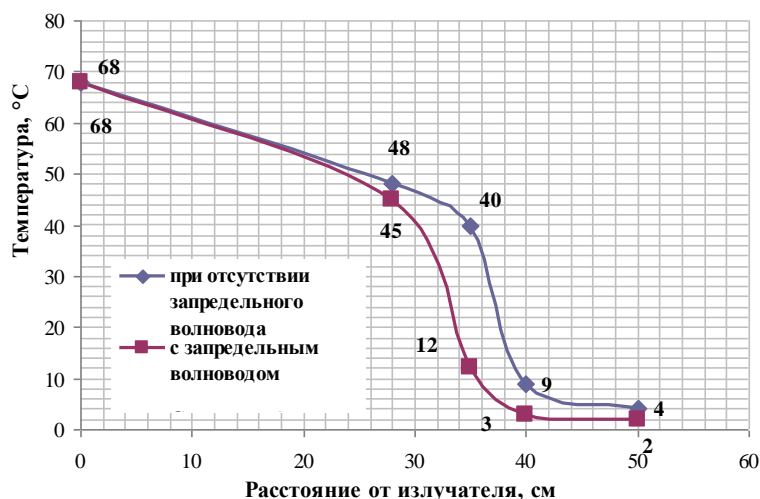
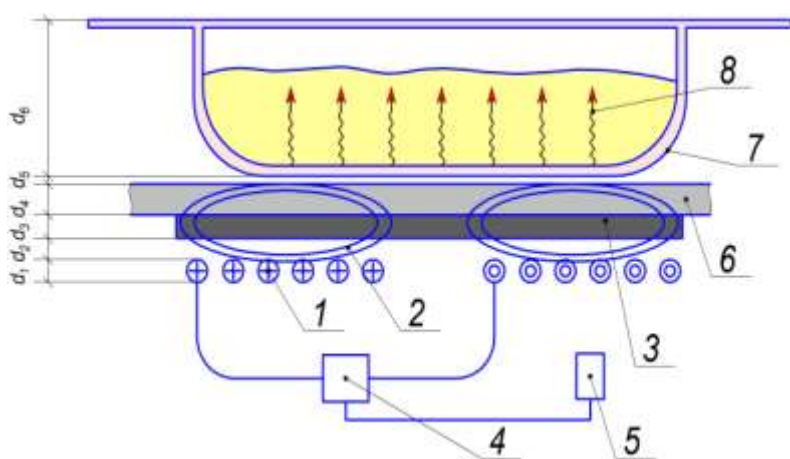


Рисунок 4 – График приращения температуры творожного сыря при эндогенном нагреве по мере удаления от источника ЭМИ

Тепловой расчет индукционного нагревательного устройства. Проектируемое индукционное нагревательное устройство под стеклокерамическим покрытием содержит индуктор



(первичная обмотка), представленный в виде спирально расположенной медной проволоки в горизонтальной плоскости. Вторичная обмотка выполнена в виде ферромагнитной пластины и находится над стеклокерамическим покрытием (рис. 5).

Рисунок 5 – Функциональная схема индукционного нагревательного устройства: 1 – индуктор (первичная обмотка); 2 – магнитное поле; 3 – стеклокерамическое покрытие; 4 – преобразователь частоты; 5 – электронный блок управления; 6 – ферромагнитная пластина (вторичная обмотка); 7 – силиконовый контейнер; 8 – тепловой поток; d_1 – высота первичной обмотки; d_2 – зазор между первичной обмоткой и стеклокерамическим покрытием; d_3 – толщина стеклокерамического покрытия; d_4 – толщина ферромагнитной пластины; d_5 – воздушный зазор; d_6 – высота контейнера

Для анализа работы индукционного нагревательного устройства воспользовались Г – образной эквивалентной схемой замещения (рис. 6). Она составлена по методике В.В. Москаленко в предположении, что насыщение магнитной системы не влияет на реактивное сопротивление обмоток, ток намагничивания зависит только от приложенного напряжения. Определив максимальный ток, протекающий через ферромагнитную пластину, вычислена мощность, потребляемая индуктором из сети.

На основе дифференциального уравнения теплового баланса выведено уравнение нагрева творожного сыря и определена постоянная времени нагрева, что позволило оценить приращение температуры за промежуток времени транспортирования сыря поверх ферромагнитной пластины, нагретой до необходимой температуры.

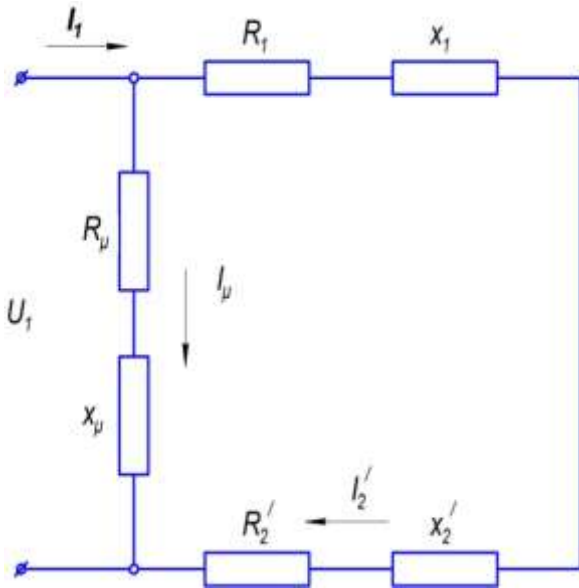


Рисунок 6 – Схема замещения индукционного нагревательного устройства: U_1 – напряжение на индукторе, В; I_1 – сила тока в индукторе, А; I_2' – ток протекающий через ферромагнитную пластину, приведенный к напряжению индуктора; I_μ – ток контура намагничивания; R_1, R_2' и R_μ – активные сопротивления соответственно индуктора, нагреваемой пластины, приведенной к напряжению индуктора и контура намагничивания, Ом; x_1, x_2' и x_μ – реактивные сопротивления соответственно индуктора, нагреваемой пластины, приведенной к напряжению индуктора и контура намагничивания, Ом

$$\text{Напряжение на индукторе } U_1 = I_1 \sqrt{R_1 + R_2' + x_1 + x_2'^2}, \quad (1)$$

$$\text{сопротивления } R_2' = R_2 \omega^2, \quad x_2' = x_2 \omega^2, \quad R_2 = \rho_2 \cdot a / b \cdot z_{02}, \quad (2)$$

где ρ_2 – удельное электрическое сопротивление нагреваемой пластины, Ом·м; S – площадь пластины (a и b – длина и ширина пластины соответственно), м²; z_{02} – эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в нагреваемый металл, м.

Активное сопротивление нагреваемой пластины, приведенное к напряжению индуктора, Ом: $R_2' = R_2 \omega^2 = \rho_2 \cdot a \cdot \omega^2 / b \cdot z_{02}$. (3)

$$\text{Мощность, подводимая к индуктору, Вт: } P_1 = (I_1')^2 R_1 + R_2'. \quad (4)$$

Приведенный максимальный ток, протекающий через ферромагнитную пластину:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + x_1 + x_2'^2}}, \text{ А.} \quad (5)$$

Мощность, потребляемая индуктором из сети $P_{\text{общ}}$, расходуется на потери в контуре намагничивания P_μ , потери в индукторе P_1 и преобразуется в электромагнитную мощность P_2 , позволяющую нагреть ферромагнитную пластину.

$$\text{Электромагнитная мощность, Вт: } P_2 = I_2'^2 \cdot R_2' = \frac{U_1 \cdot R_2'}{R_1 + R_2' + x_1 + x_2'^2}. \quad (6)$$

Данная мощность (Вт) расходуется на нагрев творожного сыря ($P_{\text{пол}}$), транспортирующего механизма ($P_{\text{вспом}}$) и экранирующего корпуса ($P_{\text{экр}}$), на компенсацию тепловых потерь через экранирующий корпус в окружающую среду ($P_{\text{окр.ср}}$):

$$P_2 = P_{\text{пол}} + P_{\text{вспом}} + P_{\text{экр}} + P_{\text{окр.ср}}. \quad (7)$$

$$\text{Полезная мощность, Вт: } P_{\text{пол}} = \frac{c_{\text{тв}} \cdot m_{\text{тв}} \cdot T_{\text{к}} - T_{\text{н}}}{t}, \quad (8)$$

где $c_{тв}$ – удельная теплоемкость творожного сыря, кДж/кг·°С; $m_{тв}$ – масса творожного сыря, находящегося над нагреваемой пластиной, кг; T_k и T_n – температура творожного сыря, соответственно в конце и начале нагрева, °С; t – продолжительность нагрева, с.

Мощность (Вт), идущая на нагрев диэлектрической пластины и экранирующего корпуса:

$$P_{вспом} = \frac{c_{плас} \cdot m_{плас} \cdot T_{к1} - T_{н1} + c \cdot m_{экр} \cdot T_{к2} - T_{н2}}{t}, \quad (9)$$

где $c_{плас}$, $c_{экр}$ – удельная теплоемкость диэлектрической пластины и экранирующего корпуса, кДж/кг·°С; $m_{плас}$, $m_{экр}$ – масса пластины и корпуса, кг; $T_{к1}$, $T_{н1}$ и $T_{к2}$, $T_{н2}$ – температура пластины и корпуса, соответственно в конце и начале процесса нагрева, °С.

Исследования показывают, что при мощности индукционного нагревательного устройства 1,8 кВт ферромагнитная пластина нагревается до 150°С за 180 с. При этом, мощность необходимая на приращение температуры творожного сыря на 66°С, составляет 0,55 Вт за 120 с (рис. 7).

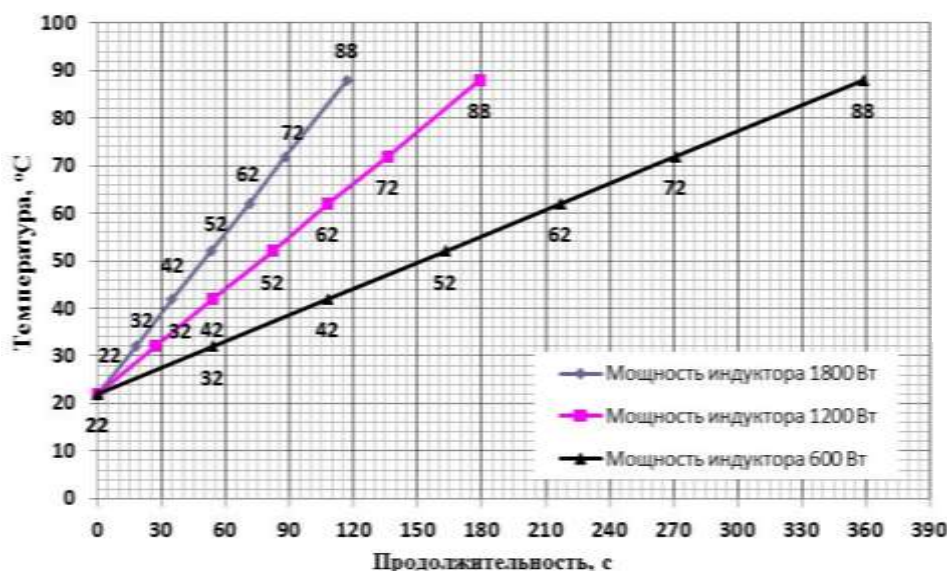


Рисунок 7 – Динамика экзогенного нагрева творожного сыря при разной потребляемой мощности индуктора

В третьем разделе «Методика и средства экспериментальных исследований» кроме программы экспериментальных исследований и частных методик приведены операционно-технологическая схема термообработки творожного сыря и описание разработанной СВЧ-индукционной установки для ее реализации. Расчеты конвейера и его привода проводились по известным формулам. Источником СВЧ энергии служит генератор марки «Mystery», работающий на частоте 2450 МГц, потребляемой мощностью 1,2 кВт. Источником экзогенного нагрева является плита индукционная марки HS-III-B26 мощностью 1,8 кВт. Вращение диэлектрической плоскости с контейнерами осуществляется с помощью мотор-редуктора марки МЭО 6,3/10-0,25 Р-94. Измерение мощности привода диэлектрической плоскости осуществляли с помощью цифрового прибора D2436AB, а частоты вращения – фототахометром ДТ-2234А. Температуру в

продукте контролировали с помощью цифрового контролера E5CN с термопарой.

Аналитическая часть работы предусматривает обоснование конструктивно-технологических параметров и режимов работы СВЧ-индукционной установки для термообработки творожного сырья, а также получение расчетных зависимостей температуры нагрева сырья от продолжительности процесса при разных удельных мощностях источников энергии.

Экспериментальная часть работы предусматривает: проектирование и изготовление лабораторного образца СВЧ-индукционной установки; исследование динамики нагрева сырья при комбинированном воздействии экзо- эндогенного нагрева для подтверждения теоретически обоснованных параметров технологического процесса; апробирование лабораторного образца СВЧ-индукционной установки (рис. 8) в производственных условиях; математическую обработку экспериментальных данных; проведение инженерных расчетов для согласования полученных оптимальных режимов работы с эффективными конструктивно-технологическими параметрами СВЧ-индукционной установки; оценку экономической эффективности применения СВЧ-индукционной установки.

В четвертом разделе «Результаты исследования технологического процесса термообработки творожного сырья» приведены: реальное исполнение СВЧ-индукционной установки для термообработки творожного сырья (рис. 8) с обоснованными конструктивно-технологическими параметрами и режимами работы; результаты исследования динамики нагрева творожного сырья в рабочей камере при комбинированном воздействии экзо- эндогенного нагрева; результаты оценки качества творожных изделий; анализ графиков распределения потока мощности ЭМИ в рабочей камере; эффективные режимы термообработки творожного сырья, выявленные в результате проведения эксперимента с использованием трехфакторного активного планирования типа 2^3 .



Рисунок 8 – Реальное исполнение СВЧ-индукционной установки с запредельным диафрагмированным волноводом

Техническая характеристика установки приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Техническая характеристика СВЧ-индукционной установки

Наименование	Кол-во
Количество СВЧ генераторов, шт.	2
Количество индукторов, шт.	2
Производительность, кг/ч	30
Потребляемая мощность СВЧ генераторов, Вт	2400
Потребляемая мощность индукторов, Вт	3600
Потребляемая мощность СВЧ-индукционной установки, Вт	6070
Удельные энергетические затраты, кВт·ч/кг	0,202
Габариты, мм	1200 x 1000 x 1000

Экспериментальные исследования динамики эндогенного нагрева творожной смеси при удельной мощности СВЧ генератора 2 Вт/г показывают, что приращение температуры сырья 20...23°C происходит при продолжительности воздействия 112 с (рис. 9). За такой же промежуток времени индукционное нагревательное устройство мощностью 1,8 кВт обеспечивает приращение температуры 63...66°C. Полная термообработка творожного сырья (приращение температуры 83...89°C) при начальной температуре сырья 18...22°C происходит за 2 цикла комбинированного экзо- эндогенного нагрева.

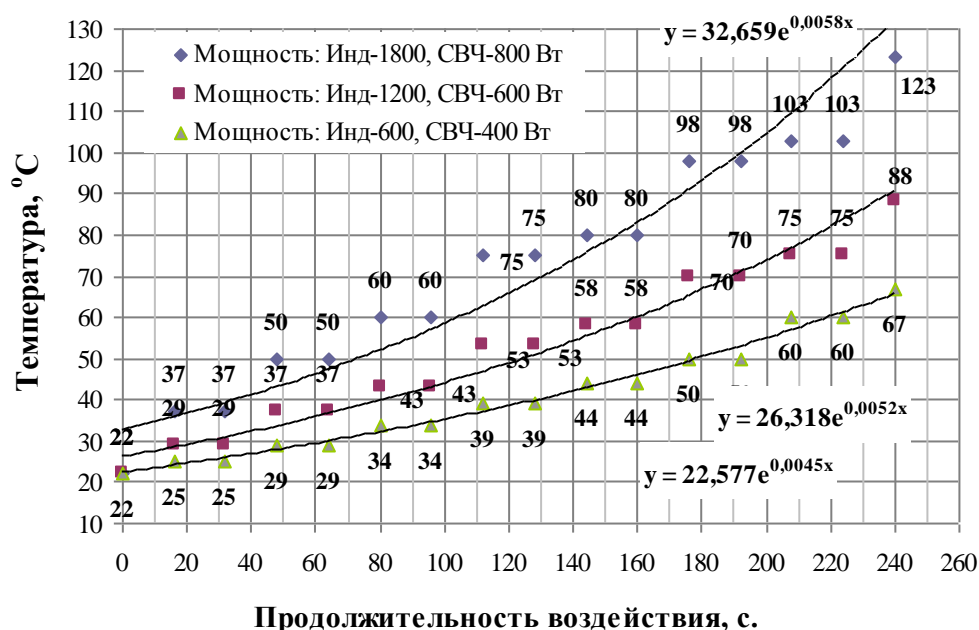


Рисунок 9 – Динамика комбинированного экзо- эндогенного нагрева творожного сырья при мощности СВЧ генератора 600 Вт и варьировании мощностью индуктора

Эмпирические выражения динамики экзо- эндогенного нагрева творожного сырья при варьировании мощностью индуктора: $T = 27,05 \cdot e^{0,006\tau}$ (1,8 кВт); $T = 26,31 \cdot e^{0,005\tau}$ (1,2 кВт); $T = 25,97 \cdot e^{0,004\tau}$ (0,6 кВт), (10) где τ – продолжительность воздействия, с.

Исследования распределения теплового потока (рис. 10) показывают, что в процессе термообработки творожного сырья неравномерность нагрева по поверхности изделия в стационарном режиме (рис. 10а) составляет 25...38°C, а в

поточном – 8...13°C (рис. 10б). Следовательно, неравномерность нагрева творожного сыря в разработанной установке снижается в 2,5 раза.

Оценка качества творожных изделий. В ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Чувашской Республике» проведена оценка пищевой ценности творожных изделий на основе органолептических, физико-химических и микробиологических показателей (протокол № 1418 от 17.09.2012 г.). Испытано 2 образца в 4-х кратной повторности (табл. 2, 3): 1 – контрольный образец – творожное изделие после традиционной термообработки; 2 – опытный образец – творожное изделие после экзо-эндогенного нагрева. При этом эндогенный нагрев с 22 до 45°C проводили при удельной мощности 2 Вт/г, а экзогенный нагрев – до приращения температуры 66°C. Общая продолжительность воздействия составила 240 с. Результаты исследований приведены в табл. 2. Оценку качества органолептических показателей творожных изделий проводили по 30-балльной шкале. Из результатов исследований (табл. 2) следует, что органолептические показатели опытного образца лучше контрольного на 6 баллов.

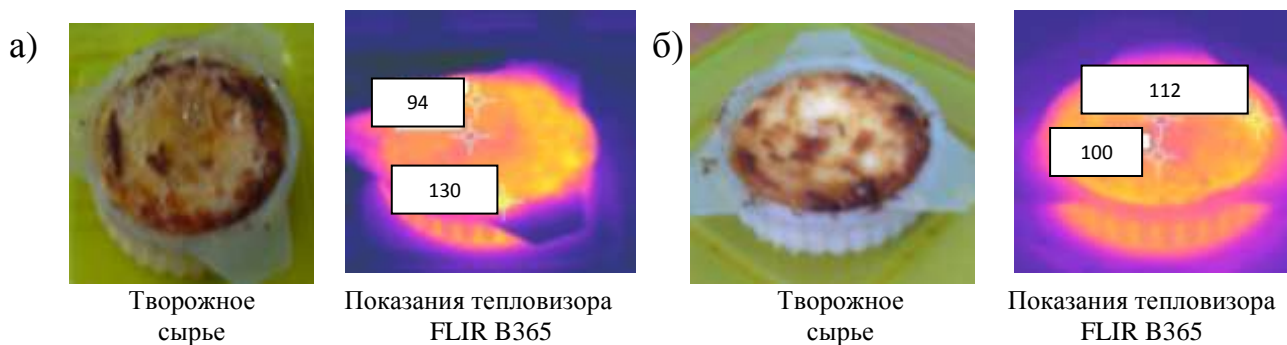


Рисунок 10 – Сравнительный анализ распределения теплового потока по поверхности продукта в процессе экзо-эндогенного нагрева:
а) стационарное воздействие; б) воздействие в поточном режиме

Таблица 2 – Органолептическая оценка качества творожного изделия (опытного и контрольного образцов)

Показатель качества	Характеристика продукта			
	контрольный	баллы	опытный	баллы
Внешний вид и цвет	Низкий овал со слегка выпуклой боковой поверхностью с поджаренной корочкой. Молочно-белый, с кремовым оттенком	4	Низкий овал со слегка выпуклой боковой поверхностью с поджаренной корочкой. Молочно-белый, с кремовым оттенком, равномерный по всей поверхности	6
Консистенция	Плотная, связанная, рассыпчатая с наличием крупинок молочного белка	8	Плотная, связанная, слегка рассыпчатая	9
Вкус и запах	Чистый кисломолочный	12	Чистый кисломолочный	15

Результаты исследования физико-химических параметров показывают, что кислотность снижается на 16°, а влажность – на 1,3 %. Микробиологические показатели удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 52814-07.

Таблица 3 – Физико-химические и микробиологические показатели творожного изделия (опытного и контрольного образцов)

№	Показатели	Результаты исследования образцов		Допустимый уровень (ПДК)
		контрольный	опытный	
Физико-химические показатели ГОСТ 3624-92				
1	Массовая доля влаги, %	51,5	50,2	не менее 50
2	Массовая доля жира, %	26,0	26,0	не менее 25
3	Кислотность, °Т	156	140	не более 240
Микробиологические показатели				
1	БГКП (колиформы), в 0,1 г	не обнаружены	не обнаружены	не допускается
2	<i>S. aureus</i> , в 0,1 г	не обнаружены	не обнаружены	не допускается
3	Патогенные микроорганизмы, в т.ч. сальмонеллы, в 25 г	не обнаружены	не обнаружены	не допускается
4	Плесени и дрожжи, КОЕ/г	менее 10	менее 10	не более 50

В результате исследований выявлено улучшение качества творожного изделия, подвергнутого термообработке в разработанной установке увеличение его срока хранения при температуре 5...6°C на 2 сутки, по отношению к творожному изделию, подвергнутому термообработке существующим способом, срок годности которого составляет 5 суток (СанПиН 2.3.2.1324-03).

С использованием программы *Statistica V5* получена модель приращения температуры творожного сырья в зависимости от ее плотности и дозы воздействия ЭМП СВЧ (рис. 11). Получено эмпирическое выражение, характеризующее зависимость приращения температуры (ΔT , °C) сырья плотностью 1030 кг/м³ от удельной мощности ($P_{уд}$, Вт/г) и продолжительности воздействия (τ , с) ЭМП СВЧ:

$$\Delta T = -36852 + 2,95 \cdot P_{уд} + 2,98 \cdot \tau - 0,158 \cdot P_{уд}^2 + 0,023 \cdot P_{уд} \cdot \tau - 0,017 \cdot \tau^2. \quad (11)$$

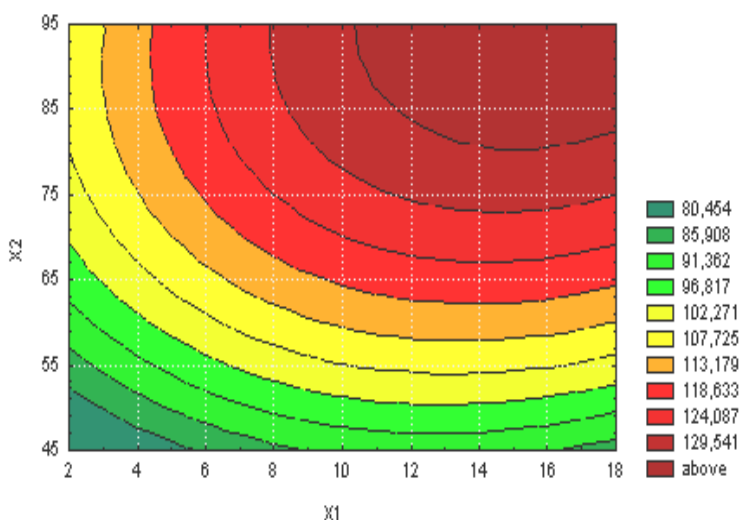


Рисунок 11 – Двумерные сечения в изолиниях трехфакторной модели приращения температуры сырья при эндогенном нагреве в зависимости от удельной мощности (x_1) и продолжительности воздействия (x_2)

В результате исследования комплекса конструктивно-технологических параметров и режимов работы установки выявлены следующие эффективные режимы экзоэндогенного нагрева творожного сырья с исходной температурой 18...22°C: производительность СВЧ-индукционной установки 25...30 кг/ч, удельная мощность 2,5...3 Вт/г, продолжительность цикла 120 с, количество циклов – 2, при-

ращение температуры эндогенного нагрева за весь процесс 20...23°C, а экзогенного – 63...66°C.

В пятом разделе «Оценка экономической эффективности применения СВЧ-индукционной установки для термообработки творожного сырья» приведены расчеты экономических показателей применения СВЧ-индукционной установки для термообработки творожного сырья. За базовый вариант принят пекарный шкаф ЭШП-0,8 мощностью 10,4 кВт, работающий в периодическом режиме, производительностью 17 кг/ч. Годовой экономический эффект от применения СВЧ-индукционной установки для термообработки творожных изделий производительностью 25...30 кг/ч составляет 240 тыс. руб.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Технические средства для термообработки сырья с традиционными электронагревателями достаточно энергоемкие, а срок хранения готовой продукции низкий. Использование конвейерных СВЧ установок, повышающих экономические показатели процесса термообработки сырья, возможно при использовании запредельного волновода, обеспечивающего полное поглощение СВЧ энергии, просачивающейся через прорезь, предназначенны для транспортирования сырья.

2. *Разработана* методика термообработки творожного сырья в поточном режиме за счет многократного комбинированного воздействия экзо- эндогенного нагрева, реализованная в СВЧ-индукционной установке с рабочей камерой, образованной объемными резонаторами с запредельными диафрагмированными волноводами и индукционными нагревательными устройствами, расположенной под экранирующим корпусом. *Установлено*, что эффективными режимами термообработки творожного сырья при исходной температуре 18...22°C в СВЧ-индукционной установке производительностью 25...30 кг/ч являются: удельная мощность СВЧ генератора 2,5...3 Вт/г, продолжительность цикла 120 с, количество циклов – 2, приращение температуры эндогенного нагрева за весь процесс на 20...23°C, а экзогенного – 63...66°C. Результаты оценки органолептических показателей творожного изделия по 30-ти бальной шкале свидетельствуют, что консистенция и внешний вид творожного изделия, подвергнутого термообработке в разработанной установке выше на 3 балла, вкус и запах также на 3 балла, расхождение по цвету не наблюдалось.

3. *Выявлено*, что диэлектрическая плоскость диаметром 0,83 м с радиально расположенными отверстиями в три ряда для контейнеров позволяет транспортировать сырье через прорези в объемных резонаторах и диафрагмированные волноводы, выполненные в виде цилиндрического сегмента, радиусом 18,36 см ($3 \cdot \lambda / 2$) и высотой, равной четверти длины волны. При объеме резонаторных камер 12 л и добротности, равной 333 обеспечивается напряженность электрического поля 600...630 В/см, способствующая снижению бактериальной обсемененности изделия в 10...12 раз, по отношению к исходному сырью.

Согласована мощность индукционного нагревательного устройства 1,8 кВт с конструктивными параметрами ферромагнитной пластины для нагрева до

150°C за 180 с. При этом, мощность необходимая на приращение температуры творожного сырья на 66°C за 120 с составляет 0,55 Вт.

4. Установлено, что алюминиевый корпус установки, внутри которого расположены два объемных резонатора с диафрагмированными волноводами, обеспечивает экранизацию потока мощности электромагнитных излучений до 0,04 мВт/см² на расстоянии 1,5 м. В результате производственной апробации СВЧ-индукционной установки выявлено снижение удельных энергетических затрат на термообработку творожного сырья с 0,31 до 0,2 кВт ч/кг, улучшение качества творожного изделия и увеличение срока хранения его на 2 суток при температуре 5...6°C. Экономический эффект от применения СВЧ-индукционной установки составит 240 тыс. руб./год.

5. *Перспективы дальнейшей разработки темы.* В дальнейших исследованиях планируется разработать методику проектирования конвейерных технических устройств с механизмами загрузки и выгрузки продукта, обеспечивающих комбинированный экзо-эндогенный нагрев творожного сырья в автоматизированном режиме.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

*- публикации в изданиях, определенных ВАК
при Министерстве образования и науки РФ*

1. Науменко, О.В. Разработка сверхвысокочастотной установки для выпечки творожных и мучных кондитерских изделий / О. В. Науменко // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева, 2011.– № 4 (72), ч.1. – С. 94...97.

2. Науменко, О.В. Обоснование применения СВЧ-индукционной установки для выпечки творожных изделий / О. В. Науменко // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева, 2012.– № 2 (74) – С. 112...115.

3. Науменко, О.В. Оценка эффективности применения СВЧ-индукционной установки для термообработки творожного сырья / Н. Т. Уездный, О.В. Науменко, Г.В. Новикова // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева, 2012.– № 4 (76).– С. 124...127.

4. Науменко, О.В. Экономическая эффективность применения СВЧ установки для выпечки хлебобулочных изделий / О. В. Науменко // Международный научно-теоретический и прикладной журнал Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И. Я. Яковлева. – Чебоксары: ЧГПУ, 2013. – № 2 (78), ч. 1. – С. 167...170.

- публикации в сборниках научных трудов и материалов конференций

5. Науменко, О.В. Влияние технологических параметров на качество творога / О.В. Науменко // Сборник научных трудов АНО ВПО "Региональный институт технологии и управления". – Новочебоксарск: Полиграфика, 2010. том 2. – С. 62...65.

6. Науменко, О.В. Разработка механизированной линии по производству творожного изделия «Чакат» / О.В. Науменко, Т.Г. Лукина // Материалы международной научно – практической конференции АНО ВПО «Региональный институт технологии и управления «Наука и инновации». – Новочебоксарск: Полиграфика, 2011.– С. 43...47.

7. Науменко, О.В. Совершенствование пекарной камеры для выпечки мучных и кондитерских изделий / О.В. Науменко, Г.В. Новикова// Материалы международной научно – практической конференции АНО ВПО «Региональный институт технологии и управления «Наука и инновации». – Новочебоксарск: Полиграфика, 2011.– С. 47...51.

8. Науменко, О.В. Обзор существующих способов и технических средств для выпечки творожных изделий / О.В. Науменко // Материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию инженерного факультета «Повышение эффективности механизации сельскохозяйственного производства». – Че-

боксары: ФГБОУ ВПО ЧГСХА, 2011. – С. 161...163.

9. Науменко, О.В. Технологическая линия выпечки творожных изделий с использованием энергии электромагнитных излучений / О.В. Науменко // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства». – Йошкар-Ола: Марийский ГУ, 2012, вып. XIV. – С. 148...149.

10. Науменко, О.В. СВЧ-индукционная установка для выпечки творожных изделий / О.В. Науменко, Г. В. Новикова, Н. Р. Репина // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства». – Йошкар-Ола: Марийский ГУ, 2012, вып. XIV. – С. 150...152.

11. Науменко, О.В. Обработка данных эксперимента по изучению производительности СВЧ-индукционной установки, с использованием программы Statistica/ О. В. Науменко, Г. П. Турханова // Материалы научно-практической конференции «Наука. Молодость. Творчество». – г. Новочебоксарск: АНО ВПО «Региональный институт технологии и управления», 2012, вып. XII. – С. 138...140.

12. Науменко, О.В. Камера для выпечки творожных изделий/ О.В. Науменко, Г.В. Новикова// Материалы VIII всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Молодежь и инновации». – Чебоксары: ФГБОУ ВПО ЧГСХА, 2012. – С. 230...233.

13. Науменко, О.В. Обоснование использования энергии электромагнитных излучений сверхвысокочастотного и килогерцового диапазонов для выпечки творожных изделий / О.В. Науменко, Г.В. Новикова // Материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 35-летию факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства «Инновационные электротехнологии и электрооборудование – предприятиям АПК». – Ижевск: ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2012. – С. 29...31.

14. Науменко, О.В. Технология выпечки творожного изделия «Чакат» / О.В. Науменко, Г.В. Новикова // Материалы международной научно-практической конференции института механизации и технического сервиса «Актуальные вопросы совершенствования технологий и технического обеспечения сельскохозяйственного производства». – Казань: ФГБОУ ВПО «Казанский ГАУ», 2012. – С. 166...168.

15. Науменко, О.В. Обоснование режимов работы камеры для термообработки творожного сырья / О.В. Науменко // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Аграрная наука – основа успешного развития АПК». – Чебоксары: ФГБОУ ВПО ЧГСХА, 2012. – С. 462...464.

16. Науменко, О.В. СВЧ-индукционная установка для термообработки творожного сырья / О.В. Науменко // Материалы VII республиканского конкурса инновационных проектов по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (УМНИК – 2012). – Чебоксары: МГОУ, 2012. – С. 76...77.

17. Науменко, О.В. Определение мощности индукционного нагревательного устройства / О.В. Науменко, Г. В. Новикова // Материалы международной научно – практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства». – Йошкар-Ола: ФГБОУ ВПО «Марийский ГУ», 2013, Вып. XV. – С. 126...127.

18. Науменко, О.В. Определение мощности индукционного нагревательного устройства / О.В. Науменко, Г.В. Новикова // Материалы всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Молодежь и инновации». – Чебоксары: ФГБОУ ВПО ЧГСХА, 2013. – С. 162...164.

19. Науменко, О.В. Тепловой расчет индукционного нагревательного устройства, используемого для термообработки творожного сырья / О.В. Науменко, Г.В. Новикова // Материалы всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Молодежь и инновации». – Чебоксары: ФГБОУ ВПО ЧГСХА, 2013. – С. 164...168.

20. Науменко, О.В. СВЧ-индукционная установка для тепловой обработки творожного сырья в фермерских хозяйствах / О.В. Науменко, Г.В. Новикова // Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей «Знание молодых: наука, практика и инновации». – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2013, Ч. 2. – С. 44...46.

Подписан в печать 16.05.2013 г. Формат 60x84/16. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.
Полиграфический отдел, ФГБОУ ВПО ЧГСХА, 428003, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, 29.
Лицензия ПЛД № 27-36.