

На правах рукописи



СЕМЁНОВА ОЛЬГА ЛЕОНИДОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ПШЕНИЧНОЙ МУКИ
В ПОЛЕ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ**

Специальность 05.20.02 – электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ижевск – 2012

Работа выполнена на кафедре «Технологии и оборудование пищевых и перерабатывающих производств» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА)

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор **Касаткин Владимир Вениаминович**

Официальные оппоненты:

Аипов Рустам Сагитович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и электрооборудование» ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ

Лаврова Лариса Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» ФГАОУ ВПО УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Защита состоится 29 марта 2012 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета КМ220.030.02 в ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА по адресу: 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д.9, ауд. 3–201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА

Автореферат разослан 28 февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Литвинюк Надежда Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Актуальность темы. В 2008...2010 годы в северном Казахстане, а также в близлежащих областях Российской Федерации в летний период наблюдалась крайне засушливая погода, характеризующаяся низким уровнем осадков. Зерно, собранное в период засухи или поврежденное суховеями, имеет особенности, которые необходимо учитывать при хранении и переработке. Суховейное зерно значительно отличается по своим свойствам от того, что собрано в период стабильных температурно-влажностных условий. Мука, полученная из суховейного зерна, содержит большее количество белкового азота и клейковины, характеризуется сниженной активностью протеиназ, а клейковина обладает повышенной упругостью и малой растяжимостью. Таким образом, муку, полученную из суховейного зерна, как правило, можно отнести к муке с пониженными хлебопекарными свойствами.

Для улучшения муки можно применять различные способы: внесение пищевых добавок, хлебопекарных улучшителей, биологически-активных добавок, физические методы обработки хлебопекарного сырья. Физические методы обработки (ультрафиолетовое, инфракрасное излучение, обработка в поле сверхвысокой частоты (СВЧ) и др.) являются наиболее перспективными направлениями в повышении качества пшеничной муки. Исследования по физическим способам обработки зерна и хлебопекарного сырья изложены в трудах Л.Я. Ауэрмана, А.С. Гинзбурга, Э.А. Исаковой, Т.Б. Цыгановой, Н.В. Цугленка, Г.И. Цугленок, Г.Г. Юсуповой и других авторов.

Одним из физических способов является обработка токами сверхвысокой частоты, которая нашла широкое применение в пищевой промышленности, в том числе для улучшения показателей качества зерна и продуктов его переработки.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, актуальным является исследование влияния параметров СВЧ-обработки пшеничной муки, полученной из суховейного зерна на её качественные показатели, что позволит выпускать продукцию требуемого качества.

Целью настоящей работы является исследование процесса СВЧ-обработки пшеничной муки, полученной из суховейного зерна для улучшения показателей качества.

Задачи исследований:

- разработать и исследовать технологию обработки с применением СВЧ-поля на примере пшеничной муки, полученной из суховейного зерна на разработанной лабораторной установке периодического действия с СВЧ-энергоподводом;
- разработать математическую модель энергетических составляющих СВЧ-обработки пшеничной муки на установках периодического действия с СВЧ-энергоподводом;
- определить рациональные параметры СВЧ-обработки муки, полученной из суховейного зерна с целью улучшения её показателей качества;
- обосновать технико-экономическую эффективность разработанной технологии и оборудования.

Объект исследований: технологический процесс сверхвысокочастотной обработки пшеничной муки первого сорта, полученной из суховейного зерна, произрастающего в засушливых регионах Республики Казахстан и Российской Федерации.

Предмет исследований: экспериментальные и аналитические зависимости, характеризующие влияние параметров СВЧ–обработки на показатели качества пшеничной муки, полученной из суховейного зерна.

Информационную базу исследования составляют материалы научных конференций, научно-техническая литература, публикации зарубежных и отечественных изданий, нормативные документы по теме исследования.

Научная новизна:

- исследована и разработана технология обработки пшеничной муки, полученной из суховейного зерна в поле СВЧ с целью улучшения её качества;
- разработаны математические модели частных процессов СВЧ–обработки пшеничной муки. Получены аналитические зависимости параметров для условий процесса в электромагнитном поле СВЧ;
- обоснованы режимы работы установки с СВЧ–энергоподводом для обработки пшеничной муки, полученной из суховейного зерна в электромагнитном поле СВЧ.

Практическая ценность работы:

- разработана и испытана лабораторная установка периодического действия с СВЧ–энергоподводом, на основе которой может быть создана промышленная установка;
- разработан технологический процесс и получены аналитические зависимости, обеспечивающие рационализацию энергозатрат при СВЧ–обработке муки для улучшения её показателей качества;
- определены рациональные параметры СВЧ–обработки муки, полученной из суховейного зерна с целью улучшения её показателей качества.

На защиту вынесены следующие положения:

- технология обработки муки, полученной из суховейного зерна на установке с СВЧ–энергоподводом;
- механизмы обработки пшеничной муки в электромагнитном поле СВЧ и их математическое описание;
- закономерности электротермического воздействия на показатели качества пшеничной муки;
- технико-экономическая эффективность разработанной технологии.

Личный вклад автора. Модель, схемы, результаты численных и экспериментальных исследований, их анализ и интерпретация, представленные в диссертации, получены автором лично. Выбор приоритетных задач, направлений, методов исследования, формирование структуры и содержания работы выполнены при активном участии научного руководителя.

Макет установки периодического действия с СВЧ–энергоподводом, используемый при экспериментальных исследованиях, разработан коллективом кафедры «Транспорта и технологических машин» (Республиканское государственное казенное предприятие «Рудненский индустриальный институт», г. Рудный, Республика Казахстан) при активном участии автора.

Апробация работы и публикации. По теме диссертации опубликовано 12 статей, в том числе основные положения работы доложены и одобрены: на научно-практических конференциях: «Качество продукции, технологий и образования», Магнитогорск, 2009, 2010, на VI научно–практической конференции с международным участием «Качество продукции, технологий и образования», Магнитогорск, 2011; на международных конференциях: «Роль стратегии индустриально–информационного развития Республики Казахстан в условиях

глобализации. Проблемы и перспективы», Рудный, 2009; «Инновации в образовании и науке в условиях политической и экономической модернизации Казахстана», Рудный, 2011; на III этапе Евразийского экономического форума молодежи, г.Ижевск, 2011.

Объем и структура диссертации

Работа изложена на 154 листах основного текста, в своем составе имеет: титульный лист, содержание, введение, 5 разделов, в том числе 18 рисунков и 12 таблиц, общие выводы и рекомендации, список использованной литературы из 210 источников, в том числе 21 на иностранном языке и 15 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту диссертации, а также данные о научной новизне и практической ценности работы.

В первой главе «Современное состояние технологии и оборудования СВЧ-обработки пищевых материалов» рассмотрены существующие направления в улучшении качества пшеничной муки химическими, биологическими и физическими способами. Дан анализ технологий и оборудования для обработки продуктов в электромагнитном поле (ЭМП).

Проведенный анализ позволил установить:

- преимущество СВЧ-обработки над другими существующими способами для повышения качества пшеничной муки;
- необходимость дальнейших исследований процесса СВЧ-обработки пшеничной муки, полученной из суховейного зерна;
- необходимость разработки технологии и оборудования для обработки пшеничной муки с использованием электромагнитного поля СВЧ.

Во второй главе «Обоснование технологии обработки пшеничной муки в поле сверхвысокой частоты с целью улучшения показателей качества» представлено теоретическое исследование процесса обработки в поле сверхвысокой частоты и приведено обоснование предполагаемого технологического процесса обработки пшеничной муки.

Установлена необходимость внесения изменений в традиционную технологию выработки муки и улучшать показатели качества пшеничной муки, полученной из суховейного зерна в поле сверхвысокой частоты после стадии контроля количественных и качественных характеристик в условиях производственной лаборатории (рисунок 1).

Для проведения экспериментальных исследований была взята мука первого сорта (контрольный образец) со следующими показателями (по средним значениям): влажность – 13,5 %; содержание белка – 15,17 %; белизна – 53,8 условных единиц по показаниям прибора РЗ–БПЛ; зольность – 0,65 %; массовая доля сырой клейковины – 32,04 %, качество сырой клейковины – 38 условных единиц по показаниям прибора ИДК, растяжимость по линейке – 9 см, число падения – 405 с., кислотность муки – 2,8 °. Лабораторные исследования проводились в производственно-технической лаборатории мельничного комплекса ТОО «Иргиз» (г. Рудный, Республика Казахстан).

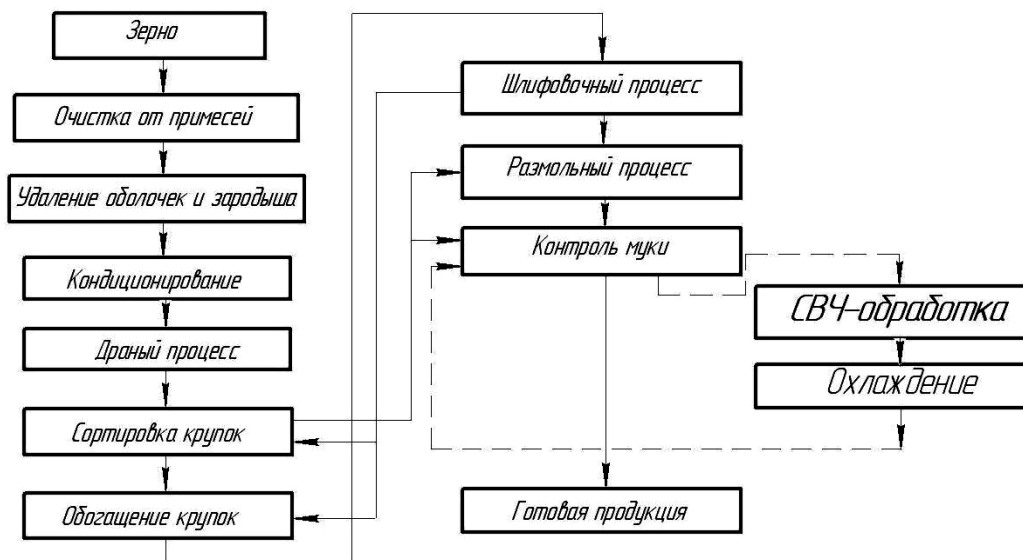
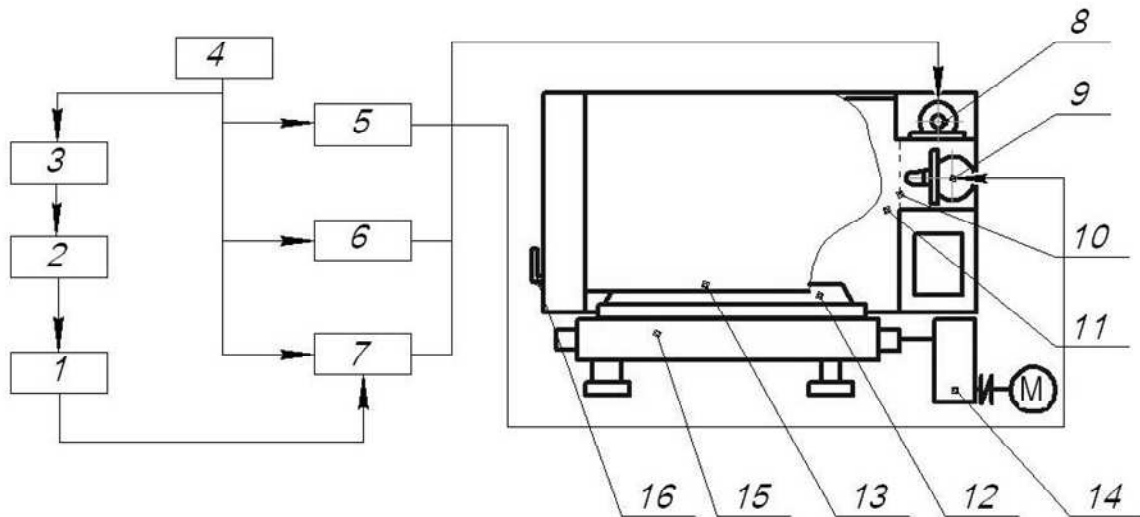


Рисунок 1 - Схема предлагаемой технологии производства пшеничной муки

Исследования обработки пшеничной муки осуществляли на лабораторной установке с СВЧ-энергоподводом (рисунок 2), разработанной аспирантом. Электроэнергия от узла ввода 4 после включения установки подается в блок автоматики 5, который обеспечивает нормальные условия работы магнетрона 9 – защиту от перегрева, последовательность включения. Кроме этого энергия подается в накальный трансформатор 6. При этом включается вентилятор охлаждения магнетрона 8, и получают питание блок защиты 3 и блок управления 2. После прогрева катода магнетрона, задается необходимая толщина слоя муки с помощью экранирующей шиберной заслонки 13, включается привод транспортёра 14, происходит загрузка рабочей камеры 11 продуктом 12 при помощи транспортера 15 и на блоке 1 задается продолжительность обработки и удельная тепловая мощность СВЧ-энергоподвода. Процесс диэлектрического нагрева начинается после подачи напряжения на анодный трансформатор 7, высокое напряжение которого подается на СВЧ-генератор, при этом СВЧ-энергия подается в рабочую камеру 11, через диэлектрическую перегородку 10. При обработке производят измерение температуры образца электронным термометром 16 с термопарой. После окончания процесса обработки установка переходит в дежурный режим. При этом анодный трансформатор и привод отключаются. После обработки пшеничную муку охлаждают естественным путем до достижения температуры 20...22 °С, при которой проводят исследование показателей качества муки.

Для проведения эксперимента был выбран симметричный композиционный план Бокса второго порядка, состоящий из 14 опытов в трехкратной повторности. Расчеты и графическая интерпретация результатов реализации параметрических моделей проводились с использованием программного обеспечения MathCAD14, STATISTICA 6.1, Microsoft Excel 2007. Достоверность результатов подтверждалась критерием Фишера (F-критерий) при доверительной вероятности $p = 0,95$.

В соответствии со схемой проведения эксперимента предусматривалось изучение показателей качества пшеничной муки с помощью стандартизованных физико-химических методов исследований. Определение безопасности хлеба по показателю микробиологической устойчивости хлебных изделий к возбудителю картофельной болезни (*Bacillus subtilis*) осуществлялось проведением пробной выпечки хлеба в лабораторных условиях.



- 1 – блок задания параметров; 2 – блок управления; 3 – блок защиты; 4 – узел ввода;
 5 – блок автоматики магнетрона; 6 – накальный трансформатор; 7 – анодный трансформатор;
 8 – вентилятор охлаждения магнетрона; 9 – магнетрон; 10 – диэлектрическая перегородка;
 11 – рабочая камера; 12 – обрабатываемый продукт; 13 – экранирующая шибберная заслонка;
 14 – привод транспортера; 15 – транспортёр; 16 – термометр

Рисунок 2 - Схема лабораторной установки с СВЧ-энергоподводом

В результате исследований выявлено, что показатели качества муки (y_i) зависят от следующих параметров обработки в поле СВЧ: температуры нагрева муки, времени обработки, удельной тепловой мощности СВЧ-энергоподвода, толщины слоя муки при обработке в электромагнитном поле СВЧ:

$$y_i = f(T, P, t, h), \quad (1)$$

где T – температура обработанного продукта, °С; P – удельная тепловая мощность СВЧ-энергоподвода, кВт/м³; t – время воздействия СВЧ-поля, с; h – толщина слоя муки, мм.

В третьей главе «Теоретическое обоснование применения СВЧ-обработки для улучшения показателей качества пшеничной муки на установках периодического действия с СВЧ-энергоподводом» приведены результаты теоретических исследований обработки пшеничной муки, полученной из суховейного зерна в СВЧ-поле.

Для определения влияния параметров электромагнитного поля СВЧ на температуру пшеничной муки, общее количество тепла, подведенное в обрабатываемую пшеничную муку, Дж, вычисляется

$$Q = P_o \cdot dt = n \cdot \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f \cdot E^2 \cdot V \cdot dt, \quad (2)$$

где P_o – мощность, Вт; n – эмпирический коэффициент, $n = 0,556 \cdot 10^{-6}$ Ф/м; ε' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости материала; δ – угол диэлектрических потерь, °; f – частота электромагнитного поля, Гц; E – напряженность электрического поля, В/м; V – рабочий объём камеры, м³.

Удельную мощность СВЧ-обработки, кВт/м³, можно определить

$$P = \frac{n \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f \cdot E^2}{V}. \quad (3)$$

Глубина проникновения электромагнитного поля, м, рассчитывается, как

$$\Delta = \frac{l}{f \sqrt{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}}, \quad (4)$$

где l – эмпирический коэффициент, $l = 9,55 \cdot 10^7$ м/с

При микроволновом воздействии на пшеничную муку в основном наблюдается перенос тепла, поэтому для характеристики данного процесса рассматривается система дифференциальных уравнений конвекционного теплообмена. Уравнение энергии для движущейся среды с учетом испарения влаги из материала и с внутренним источником тепла, имеет вид

$$\rho \cdot c(1 - \Pi) \frac{dT}{dt} + \frac{r\alpha\beta\rho\Delta(1 - \Pi)}{t} = \lambda(1 - \Pi)\nabla^2 T + N_v, \quad (5)$$

где ρ - плотность муки, кг/м³; c - удельная теплоемкость пшеничной муки, Дж/(кг·°C); Π - порозность пшеничной муки в слое; r - удельная теплота испарения, Дж/кг; β - удельная поверхность, м²/м³; α - доля испаренной влаги; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); ∇^2 - оператор Лапласа, м⁻²; N_v - плотность мощности внутренних источников, Вт/м³.

Плотность внутренних источников тепла связана с местом подвода СВЧ - энергии к материалу. Плотность мощности определяется выражением

$$N_v = P e^{\frac{y}{\Delta}}, \quad 0 \leq y \leq h, \quad (6)$$

где y - координата изменения толщины слоя муки, м.

$$P = \frac{N_{СВЧ}}{2F_0\Delta}, \quad (7)$$

где $N_{СВЧ}$ - мощность СВЧ, Вт; F_0 - площадь поперечного сечения, м².

Для решения задачи теплопроводности по распределению температурного поля в слое муки, примем допущение, что слой пшеничной муки при обработке в электромагнитном поле будем считать одномерной бесконечной пластиной, которая геометрически ограничена по одной координате - толщине и соответственно, изменение температуры, происходит по одной координатной оси. Расчетная схема для решения задачи теплопроводности по распределению температурного поля в слое муки представлена на рисунке 3.

Уравнение теплопроводности по распределению температурного поля в слое муки

$$F \cdot \lambda \frac{d^2T}{dy^2} - U \cdot k(T - T_c) = 0, \quad (8)$$

где F - площадь поверхности, м²; U - периметр поверхности обрабатываемого материала, м; k - удельная теплоотдача, Вт/(м²·°C); T_c - температура в слое муки, °C.

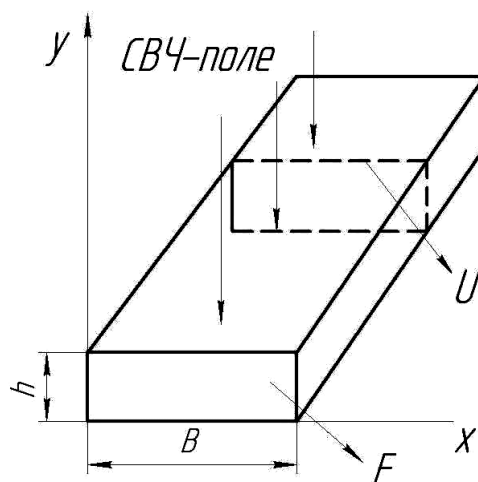


Рисунок 3 – Схема расчета задачи по распределению температурного поля в слое муки

Решением уравнения (8) будет служить

$$T = C_1 ch\gamma \cdot y + C_2 sh\gamma \cdot y, \quad (9)$$

где $\gamma^2 = \frac{U \cdot k}{F \cdot \lambda}$.

Учитывая граничные условия $0 \leq y \leq h$, $T|_{y=0} = T_C$, $T|_{y=h} = T_C$

$$T = T_C ch\gamma \cdot y + \frac{T_C(1 - ch\gamma \cdot h)}{sh\gamma \cdot h} \cdot sh\gamma \cdot y. \quad (10)$$

При обработке в электромагнитном поле в квазистационарном случае и уравнения (10), уравнение (5) примет вид

$$\rho \cdot c \frac{dT_C}{dt} \cdot F(y) - \frac{r\alpha\beta\rho\Delta}{t} = \lambda \cdot T_C \frac{d^2 F(y)}{dy^2} + \frac{N_v}{1 - \Pi}, \quad (11)$$

где $F(y) = ch\gamma \cdot y + \frac{(1 - ch\gamma \cdot h)}{sh\gamma \cdot h} \cdot sh\gamma \cdot y$ и $\frac{d^2 F(y)}{dy^2} = F_1(y)$.

Решением уравнения (11), будет служить

$$T_C = Ae^{\frac{\lambda \cdot (\gamma^2 ch\gamma \cdot y + \gamma^2 \frac{1 - ch\gamma \cdot h}{1 - sh\gamma \cdot h} \cdot sh\gamma \cdot y)}{\rho \cdot c \cdot (ch\gamma \cdot y + \frac{1 - ch\gamma \cdot h}{1 - sh\gamma \cdot h} \cdot sh\gamma \cdot y)} \cdot t} + \frac{(\frac{N_v}{1 - \Pi} + \frac{r\alpha\beta\rho\Delta}{t})}{\lambda \cdot (\gamma^2 ch\gamma \cdot y + \gamma^2 \frac{1 - ch\gamma \cdot h}{1 - sh\gamma \cdot h} \cdot sh\gamma \cdot y)}, \quad (12)$$

где A – начальная температура пшеничной муки, °С.

Согласно поставленной задаче улучшения качественных показателей пшеничной муки в электромагнитном поле СВЧ необходимо нагреть пшеничную муку на предельно допустимую температуру за определенный период времени. Для обработки пшеничной муки была выбрана частота $2,45 \pm 0,05$ ГГц, которая является рациональной для тепловой обработки большей части пищевых материалов. На этой частоте коэффициент поглощения СВЧ–излучения очень высокий, а глубина проникновения поля достаточна для равномерного распределения энергии по всему объему нагреваемого продукта. Диапазон варьирования удельной тепловой мощности СВЧ–энергоподвода предварительно принимался от 0,1 до 0,6 кВт/м³ (формулы (3) и (7)). Изучалось влияние этого параметра на температуру нагрева пшеничной муки при СВЧ–обработке. Время обработки варьировалось в пределах 30...90 секунд, диапазон значений был принят исходя из энергоёмкости процесса обработки (формула (2)). При влажности в диапазоне 12...14 %, учитывая электрофизические характеристики пшеничной муки рациональной глубиной проникновения электромагнитного поля можно считать 20...40 мм (формула (4)). Исследованиями установлено, что при СВЧ–обработке признаки первоначального изменения клейковинного комплекса происходят при температуре 30 °С, а его разрушение при температуре 75 °С и выше. Принимаем граничные условия $30 \text{ °С} \leq T_C \leq 75 \text{ °С}$ для решения уравнения (12), учитывая тепло– и электрофизические характеристики пшеничной муки. Анализируя зависимость (12), установленную между температурой нагрева пшеничной муки и параметрами СВЧ–обработки, можно установить, что режимными параметрами обработки, при которых достигается температура 30...75 °С являются: время

воздействия $t=30\dots90$ с; удельная тепловая мощность СВЧ–энергоподвода $P=0,12\dots0,408$ кВт/м³; толщина слоя муки $h=20\dots40$ мм.

Таким образом, разработана математическая модель энергетических составляющих СВЧ–обработки пшеничной муки на установках периодического действия с СВЧ–энергоподводом, связывающая изменение температуры пшеничной муки при СВЧ–обработке с изменением времени обработки, удельной мощности СВЧ–энергоподвода и толщины слоя муки.

В четвертой главе «Исследование влияния параметров СВЧ–обработки на физико-химические показатели пшеничной муки, полученной из суховейного зерна» проведено комплексное исследование влияния параметров СВЧ–обработки на показатели качества пшеничной муки, полученной из суховейного зерна.

Математическая обработка экспериментальных данных методом множественного регрессионного анализа позволила получить эмпирические зависимости физико-химических показателей пшеничной муки от параметров СВЧ–обработки при действии режимных факторов: времени воздействия t , удельной тепловой мощности СВЧ–энергоподвода P , толщины слоя муки h в заданной области значений их уровней. Если на показатель оказывалось существенное совместное влияние двух факторов (tP , Ph , th), то для его выявления строились частные зависимости показателей от них.

В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, связывающие показатели качества со временем воздействия (x_1), удельной тепловой мощностью СВЧ–энергоподвода (x_2), толщиной слоя муки (x_3). В уравнениях (13)–(21) представлены эмпирические зависимости температуры и показателей качества пшеничной муки, характеризующие её хлебопекарные свойства:

$$y_1 = 56,96 + 8,87x_1 + 12,23x_2 + 4,83x_3 - 2,63x_1^2 - 3,79x_2^2 + 4,25x_1x_2 - 0,75x_1x_3, \quad (13)$$

$$y_2 = 11,75 - 1,13x_1 - 1,32x_2 - 0,57x_3 - 0,348x_3^2 - 0,912x_1x_2 - 0,179x_1x_3 - 0,179x_2x_3, \quad (14)$$

$$y_3 = 51,73 - 0,75x_1 - 1,44x_2 - 0,137x_3 + 0,192x_2^2 + 0,292x_3^2 - 0,57x_1x_2, \quad (15)$$

$$y_4 = 34,88 - 2,93x_1 - 2,81x_2 - 2,04x_3 - 1,6x_1^2 - 2,14x_2^2 - 1,43x_3^2 - 3,52x_1x_2 - 2,935x_1x_3 - 2,84x_2x_3, \quad (16)$$

$$y_5 = 51,71 - 8,9x_1 - 13,5x_2 - 0,97x_3 - 6,54x_2^2 - 13,58x_1x_2 - 5,67x_1x_3 - 7,33x_2x_3, \quad (17)$$

$$y_6 = 15,26 - 0,025x_1 - 0,058x_2 - 0,032x_2^2 + 0,014x_3^2 - 0,085x_1x_2 - 0,015x_1x_3 - 0,019x_2x_3, \quad (18)$$

$$y_7 = 11,44 - 2,37x_1 - 2,33x_2 - 2,1x_2^2 - 2,96x_1x_2 - 1,21x_1x_3 - 1,79x_2x_3, \quad (19)$$

$$y_8 = 344,75 + 33,87x_2 + 9,083x_1^2 + 52,25x_2^2 - 13,083x_3^2 + 20,583x_1x_2 + 7,33x_2x_3, \quad (20)$$

$$y_9 = 2,594 + 0,06x_1 + 0,197x_2 + 0,24x_2^2 + 0,129x_1x_2, \quad (21)$$

где y_1 – температура продукта, °С; y_2 – влажность, %; y_3 – белизна, усл. ед. по показаниям прибора РЗ-БПЛ; y_4 – количество клейковины, %; y_5 – массовая доля сырой клейковины, усл. ед. по показателю прибора ИДК; y_6 – растяжимость клейковины, см; y_7 – содержание белка, %; y_8 – число падения, с; y_9 – кислотность, °.

Исследование влияния параметров СВЧ–обработки на показатель зольности пшеничной муки не проводилось, т.к его изменения процессе обработки в электромагнитном поле СВЧ были незначительны.

Анализируя уравнение (13) установлено, что с увеличением времени воздействия от 60 до 90 секунд, удельной тепловой мощности СВЧ–энергоподвода от 0,264 до 0,408 кВт/м³, толщины слоя муки от 30 до 40 мм, а также при сочетании

минимальных и максимальных значений времени воздействия и толщины слоя муки происходит увеличение температуры нагрева.

Анализ уравнения регрессии (14) выявил, что между влажностью муки и входными параметрами существует сильная корреляция. Установлено, что с увеличением времени воздействия от 60 до 90 секунд, удельной тепловой мощности СВЧ-энергоподвода от 0,264 до 0,408 кВт/м³, толщины слоя муки от 30 до 40 мм, а также при сочетании максимальных значений времени воздействия, удельной тепловой мощности СВЧ-энергоподвода и толщины слоя муки происходит уменьшение влажности муки. Снижение влажности пшеничной муки при СВЧ-обработке обусловлено тепловым воздействием параметров поля сверхвысокой частоты на структуру муки, т.к происходит её усушка.

Анализируя уравнение (15), установлено, что с увеличением времени воздействия от 60 до 90 секунд, удельной тепловой мощности СВЧ-энергоподвода от 0,264 до 0,408 кВт/м³, толщины слоя муки от 30 до 40 мм, а также при сочетании максимальных значений времени воздействия и удельной тепловой мощности СВЧ-энергоподвода происходит уменьшение показателя белизны в связи с тепловым воздействием параметров СВЧ-поля на муку.

Анализ уравнения регрессии выявил (16), что между массовой долей сырой клейковины муки и входными параметрами существует средняя корреляция. Из уравнения регрессии видно, что при времени воздействия от 30 до 60 секунд, удельной тепловой мощности СВЧ-энергоподвода от 0,12 до 0,264 кВт/м³, толщины слоя муки от 20 до 30 мм, а также при сочетании минимальных и максимальных значений времени воздействия, удельной тепловой мощности СВЧ-энергоподвода и толщины слоя муки происходит увеличение массовой доли сырой клейковины в муке. Данные изменения можно объяснить тем, что при СВЧ-обработке в клейковине увеличивается количество дисульфидных связей ($-S=S-$), по сравнению с клейковиной муки контрольного образца, имеющего большее количество сульфгидрильных связей ($-SH$).

Анализируя уравнение (17), установлено, что между качеством сырой клейковины и входными параметрами существует средняя корреляция (рисунок 4). Из уравнения регрессии видно, что при времени воздействия от 30 до 60 секунд, удельной тепловой мощности СВЧ-энергоподвода от 0,12 до 0,264 кВт/м³, толщины слоя муки от 20 до 30 мм, а также при сочетании минимальных и максимальных значений времени воздействия, удельной тепловой мощности СВЧ-энергоподвода и толщины слоя муки качество сырой клейковины улучшается. В контрольном варианте мука имела удовлетворительную по качеству клейковину (II группа качества, удовлетворительно крепкая). При обработке муки при вышеперечисленных параметрах, она достигает температуры 35...51°C, происходит частичная денатурация белков, проявляющаяся в виде расслабления клейковины пшеничной муки, полученной из суховейного зерна.

Анализ уравнения регрессии (18) выявил, что между содержанием белка и входными параметрами существует средняя корреляция. Установлено, что при времени воздействия от 30 до 60 секунд, удельной тепловой мощности СВЧ-энергоподвода от 0,12 до 0,264 кВт/м³, а также при сочетании минимальных значений времени воздействия, удельной тепловой мощности СВЧ-энергоподвода и толщины слоя муки содержание белка не уменьшается по сравнению с контрольным образцом.

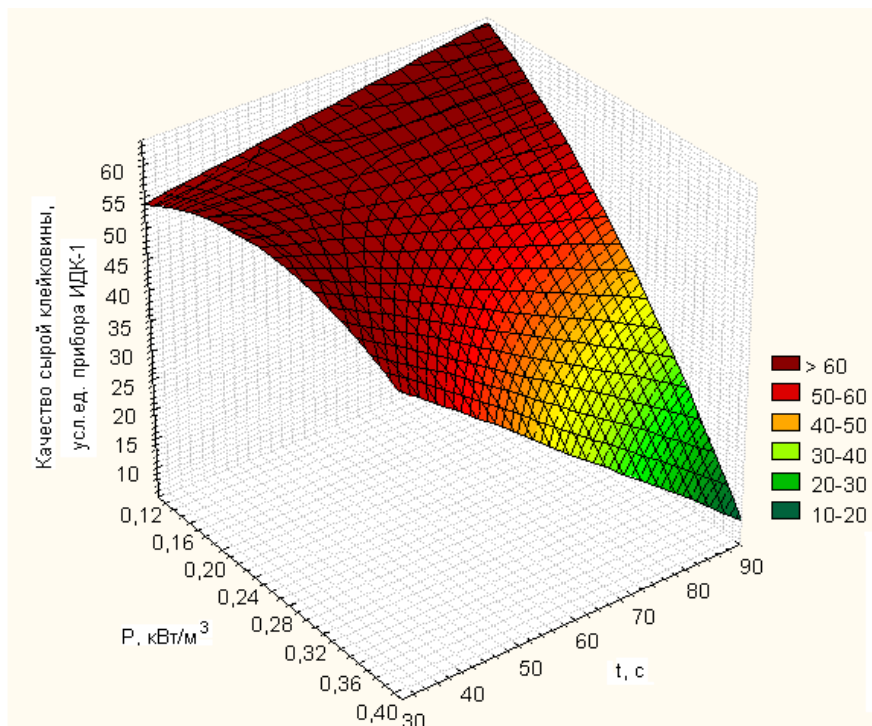


Рисунок 4 – Зависимость качества сырой клейковины муки от времени воздействия и удельной тепловой мощности СВЧ–энергоподвода

Из уравнения регрессии (19) видно, что при времени воздействия от 30 до 60 секунд, удельной тепловой мощности СВЧ–энергоподвода от 0,12 до 0,264 кВт/м³, а также при варьировании минимальных и максимальных значений времени воздействия, удельной тепловой мощности СВЧ–энергоподвода и толщины слоя муки происходит увеличение показателя растяжимости. Повышение растяжимости клейковины пшеничной муки при СВЧ–обработке обусловлено воздействием параметров поля сверхвысокой частоты на структуру муки, при вышеперечисленных параметрах мука нагревается до температуры 38...45°С, клейковина при этом теряет упругость в результате частичной денатурации белков и становится более растяжимой.

Анализ уравнения регрессии (20) выявил, что между числом падения муки и режимными факторами существует сильная корреляция. При этом число падения с увеличением удельной тепловой мощности СВЧ–энергоподвода в диапазоне времени воздействия от 60 до 90 с, возрастает, а при времени воздействия от 30 до 60 с, с ростом удельной тепловой мощности СВЧ–энергоподвода число падения снижается (рисунок 5). Уменьшение значения числа падения можно объяснить повышением активности амилолитических ферментов α - и β -амилазы под воздействием электромагнитного поля СВЧ.

Анализ уравнения регрессии (21) выявил, что между кислотностью муки, временем воздействия и удельной тепловой мощностью СВЧ–энергоподвода существует сильная корреляция, причём толщина слоя муки не оказывает влияния на показатель кислотности. Из уравнения регрессии видно, что с увеличением времени воздействия от 30 до 60 секунд, удельной тепловой мощности СВЧ–энергоподвода от 0,12 до 0,264 кВт/м³, происходит уменьшение кислотности муки. Снижение показателя кислотности связано с ростом связи фосфорных соединений в фитине.

Для каждого параметра оптимизации также были получены предельные значения в диапазоне режимных параметров при помощи прикладной программы «MathCAD14».

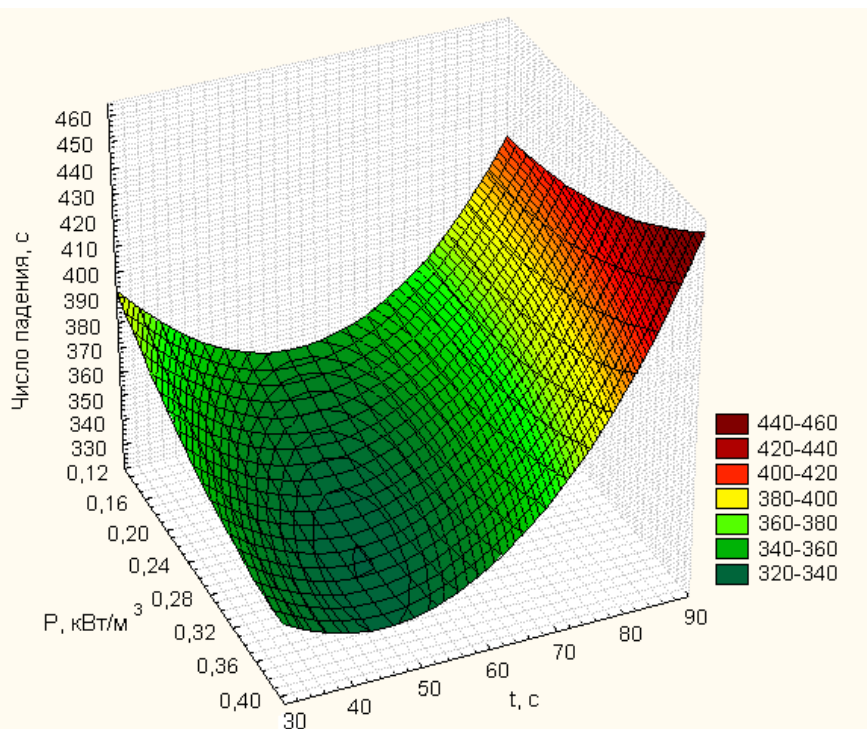


Рисунок 5 – Зависимость числа падения муки от времени воздействия и удельной тепловой мощности СВЧ–энергоподвода

Путём анализа экспериментальных данных были определены рациональные параметры СВЧ–обработки пшеничной муки, т.е. диапазоны параметров обработки в электромагнитном поле СВЧ, в пределах которых наблюдалось наиболее существенное улучшение показателей качества муки, полученной из суховейного зерна (таблица 1).

Таблица 1 – Рациональные параметры СВЧ–обработки пшеничной муки

Номер варианта	Время воздействия, t, с	Удельная тепловая мощность, P, кВт/м ³	Толщина слоя муки, h, мм
1	80÷90	0,12	20
2	30÷35	0,264÷0,408	20
3	30÷90	0,12	30
4	30÷35	0,264	30
5	30÷60	0,12	40
6	30÷35	0,264	40

Для определения безопасности хлеба по показателю микробиологической устойчивости хлебных изделий к возбудителю картофельной болезни (*Bacillus subtilis*) осуществляли проведение пробной выпечки хлеба в лабораторных условиях. Было установлено, что в образцах хлеба из муки контрольного образца признаки развития картофельной болезни проявились после 24 ч термостатирования. В образцах хлеба, выпеченных из обработанной муки, картофельная болезнь проявилась в течение 72 (1, 3, 5 вариант) и 96 часов (2, 4, 6 вариант), что больше требуемых 36 ч согласно «Инструкции по предупреждению картофельной болезни хлеба».

Целесообразность применения того или иного варианта зависит от исходного качества пшеничной муки, полученной из суховейного зерна. Так,

варианты 1, 4, 5, 6 могут быть применимы для пшеничной муки с качеством сырой клейковины 30...40 единиц прибора ИДК, вариант 2, 3 – для пшеничной муки с качеством сырой клейковины 40...45 единиц прибора ИДК.

Адекватность математической модели энергетических составляющих СВЧ-обработки пшеничной муки проверена путем сравнения дисперсий расчётных данных с экспериментальными по критерию Фишера (F-критерий) (рисунок 6).

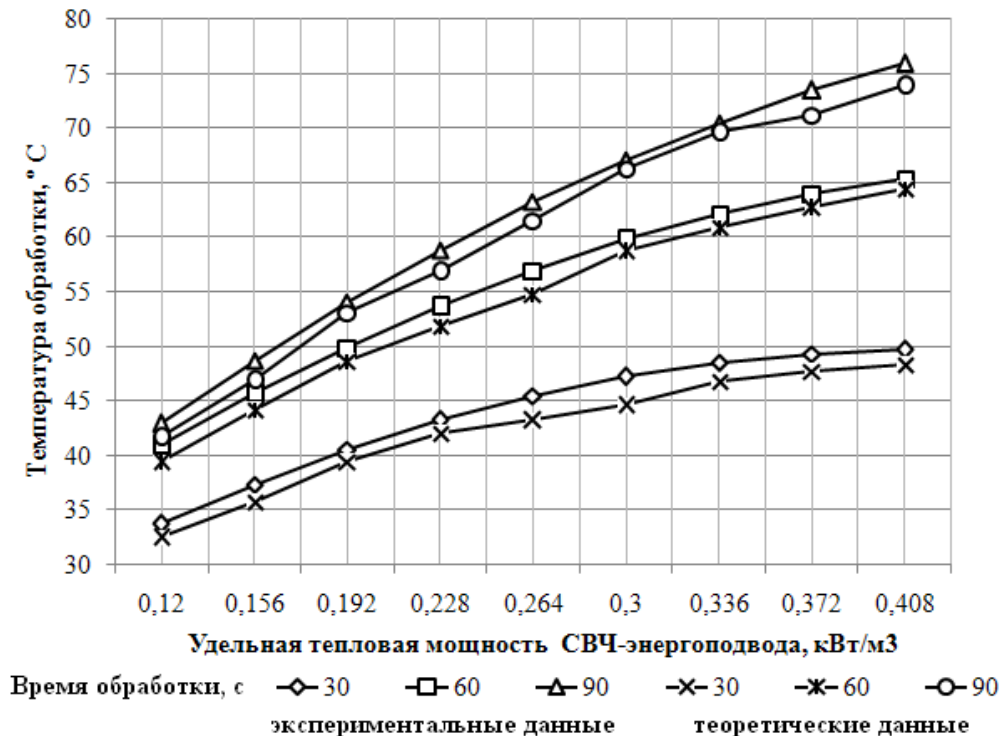


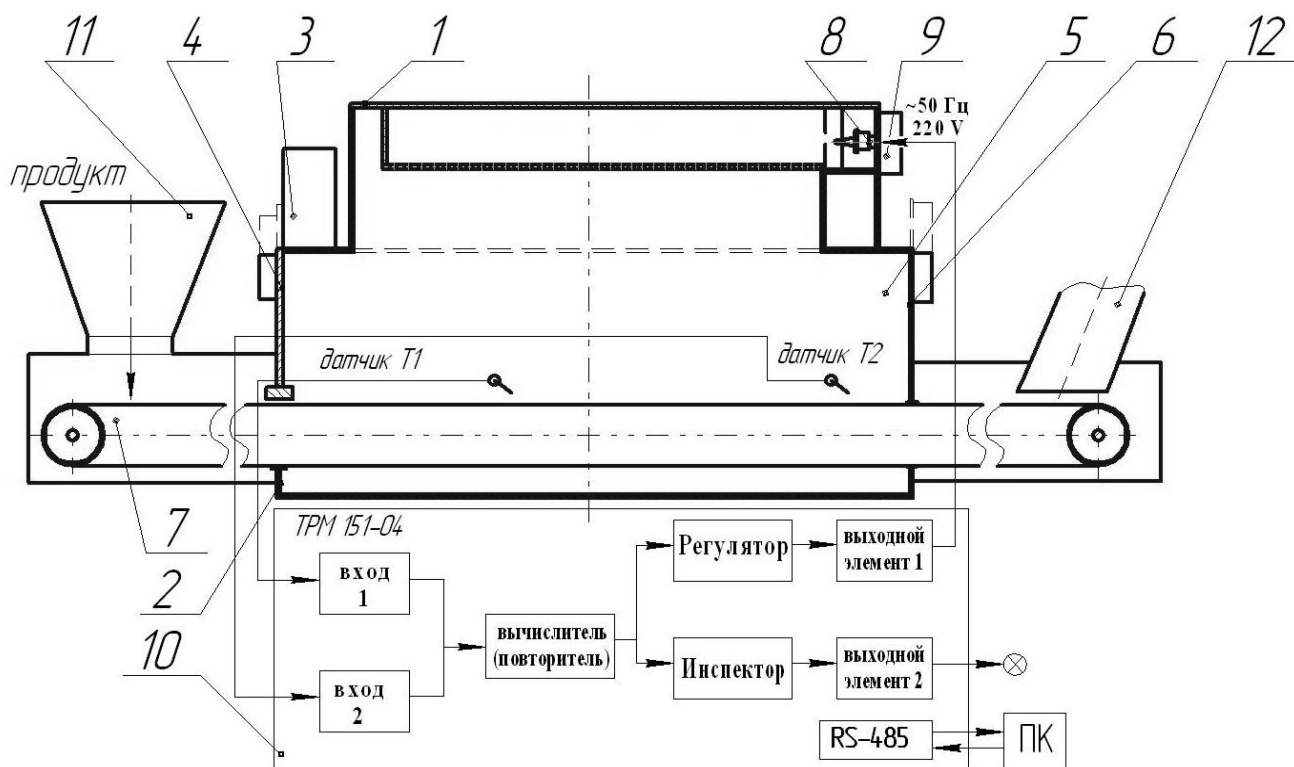
Рисунок 6 – Температуры нагрева пшеничной муки при обработке на установке периодического действия с СВЧ-энергоподводом

Модель адекватна с надежностью 95%. Расчеты осуществлялись в программах STATISTICA 6.1 и Microsoft Excel 2007.

Таким образом, при рациональных параметрах обработки качество пшеничной муки принимает целесообразные для применения в хлебопекарном производстве параметры: по прибору ИДК она соответствует I группе качества (55...65 ед. прибора ИДК), по растяжимости - средней, число падения снижается на 12...20 %, содержание массовой доли сырой клейковины увеличивается на 4...11 %, показатель кислотности снижается на 5...8 %, показатель белизны уменьшается незначительно – на 1...2,5 %, содержание белка не снижается по сравнению с контрольным образцом, показатель зольности практически не изменяется по сравнению с контрольным образцом, а влажность муки снижается на 2...9 %.

В пятой главе «Технико-экономические показатели и эффективность разработанной технологии и оборудования» приведены расчеты капиталовложений и эксплуатационных расходов на СВЧ-обработку муки в промышленной установке с СВЧ-энергоподводом (рисунок 7), экономической эффективности, критического объема производства пшеничной муки и чистого дисконтированного дохода при внедрении установки с СВЧ-энергоподводом на примере мельничного комплекса ТОО «Иргиз» (г. Рудный, Республика Казахстан).

Установка состоит из экранного корпуса 1 и каркаса 2, на передней панели которой размещен блок управления 3, диэлектрическая шиберная заслонка с приводом 4 для загрузки продукта в рабочую камеру 5. Рабочая камера 5 имеет форму параллелепипеда и снабжена транспортёром 7. Магнетрон 8 получает напряжение от системы питания, соединенной с узлом ввода энергии 9.



- 1 – корпус; 2 - каркас; 3 – блок управления; 4,6 - заслонки; 5 – рабочая камера;
 7 - конвейер; 8 – магнетрон; 9 – узел ввода энергии; 10 – блок контроля работы установки;
 11 – бункер; 12 – пневмотранспортёр

Рисунок 7 - Функциональная схема промышленной установки с СВЧ-энергоподводом

После подключения установки к источнику электроэнергии пшеничную муку из бункера 11 загружают в рабочую камеру при помощи транспортёра, задают на панели управления удельную мощность СВЧ-энергоподвода и время обработки. Толщина слоя муки регулируется при помощи шиберной заслонки 4. Далее магнетрон создаёт переменное магнитное поле, имеющее частоту колебаний $2,45 \pm 0,05$ МГц. По окончании процесса пшеничная мука выгружается из рабочей камеры через диэлектрическую заслонку 6 с приводом и подается пневмотранспортом 12 на бестарное хранение в бункера с последующим проведением контроля качества муки. Установка с СВЧ-энергоподводом снабжена системой контроля и управления 10. Температура муки в процессе обработки контролируется термодатчиками (Т1 и Т2), расположенными по длине рабочей камеры установки.

Результаты расчетов экономических показателей, приведенные в таблице 2, подтверждают рациональность использования установки с СВЧ-энергоподводом на предприятиях по переработке зерна.

Таблица 2 - Основные экономические показатели по капитальным вложениям и текущим затратам при обработке пшеничной муки в установке с СВЧ-энергоподводом

Показатели	Без обработки	С обработкой в СВЧ-установке
Объём производства в натуральном выражении, тонн	7110	7110
Цена тонны производимой продукции, тыс. руб.	13	14
Себестоимость зерна на производство муки, тыс. руб.	43931,25	43931,25
Первоначальные капитальные вложения, тыс. руб.	-	1056
Текущие затраты на содержание и эксплуатацию оборудования в год, тыс. рублей	-	3091,67
Выручка от реализованной продукции, тыс. руб.	92430	99540
Экономический эффект от реализации муки, тыс. руб.	-	7110
Экономическая эффективность, руб./руб		1,71
Критический объём производства, тонн		3728
Чистый дисконтированный доход за три года, тыс. рублей	-	117343,79

Годовой экономический эффект после внедрения разрабатываемой установки в производство составит 7110 тыс. руб., критический объём производства муки с внедрением установки с СВЧ–энергоподводом составит 3728 тонн при годовой производительности 7110 тонн пшеничной муки, что указывает на то, что капитальные вложения окупаются менее чем за год, при этом значение чистого дисконтированного дохода положительное и составляет за трехлетний период 116450,3 тыс. рублей.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ технологий по улучшению показателей качества пшеничной муки химическими, биологическими и физическими способами, который позволил установить целесообразность использования сверхвысокочастотного поля для обработки муки, полученной из суховейного зерна. Рассмотрено существующее оборудование для обработки зерна и продуктов его переработки в электромагнитном поле СВЧ.

2. Разработана и исследована технология обработки с применением СВЧ–поля на примере пшеничной муки, полученной из суховейного зерна. Выявлены условия проведения обработки в электромагнитном поле СВЧ и установлены основные параметры процесса, влияющие на показатели качества муки: время воздействия, удельная тепловая мощность, толщина слоя муки.

3. Разработана лабораторная установка с СВЧ–энергоподводом для изучения влияния СВЧ–поля на показатели качества пшеничной муки, описан алгоритм работы установки.

4. Представлены физические модели процесса обработки в электромагнитном поле СВЧ на установке периодического действия. Разработана математическая модель энергетических составляющих СВЧ–обработки пшеничной муки на установках периодического действия с СВЧ–энергоподводом. На основании полученной зависимости, для исследований и определения рациональных режимов СВЧ–обработки пшеничной муки при частоте $f=2,45\pm 0,05$ ГГц можно использовать

следующие диапазоны входных параметров, позволяющие производить обработку пшеничной муки в СВЧ–поле до предельно–допустимой температуры:

времени обработки $t=30...90$ с,

удельной мощности СВЧ–энергоподвода $P=0,12...0,408$ кВт/м³

толщины слоя муки $h=20...40$ мм.

5. Исследована кинетика СВЧ–обработки на установке периодического действия с СВЧ–энергоподводом на количественные и качественные показатели пшеничной муки. Математическая обработка экспериментальных данных позволила определить рациональные параметры СВЧ–обработки, при которых качество клейковины принимает рациональные для применения в хлебопекарном производстве параметры: по прибору ИДК она соответствует I группе качества (55...65 ед. прибора ИДК), по растяжимости - средней, число падения снижается на 12...20 % при этом увеличивается содержание массовой доли сырой клейковины на 4...11 %; показатель кислотности снижается на 5...8 %, показатель белизны уменьшается незначительно – на 1...2,5 %, содержание белка не снижается по сравнению с контрольным образцом, показатель зольности практически не изменяется по сравнению с контрольным образцом, а влажность муки снижается на 2...9 %.

6. Разработана функциональная схема промышленной установки с СВЧ–энергоподводом, на основании которой обоснована технико–экономическая эффективность разработанной технологии и оборудования. Годовой экономический эффект после внедрения разрабатываемой установки в производство составит 7110 тыс. руб., критический объем производства муки с внедрением установки с СВЧ–энергоподводом составит 3728 тонн при годовой производительности 7110 тонн пшеничной муки, что указывает на то, что капитальные вложения окупаются менее чем за год, при этом значение чистого дисконтированного дохода положительное и составляет за трехлетний период 116450,3 тыс. рублей.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Журналы, указанные в перечне ВАК:

1. Семёнова, О.Л. Оптимизация параметров обработки пшеничной муки в поле сверхвысокой частоты/О.Л.Семёнова//Известия Оренбургского государственного аграрного университета – Оренбург: ФГОУ ВПО «Оренбургский государственный аграрный университет», 2011. – №4 (32). - С. 107-110.

2. Семёнова, О.Л. Влияние режимных параметров СВЧ–установки на показатели качества пшеничной муки/О.Л.Семёнова//Вестник Алтайского Государственного аграрного университета – Барнаул: ФГБОУ ВПО «Алтайский Государственный аграрный университет», 2012. – №1(87). - С. 74-76.

3. Семёнова О.Л. Разработка технологии обработки пшеничной муки в поле сверхвысокой частоты и исследование влияния режимных параметров на её показатели качества / О.Л. Семёнова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – №01(75). С. 715 – 729. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/01/pdf/54.pdf>

Другие издания:

4. Семёнова, О.Л. Влияние сверхвысокочастотной обработки на качество муки/О.Л.Семёнова//Качество продукции, технологий и образования: материалы IV научно-практической конференции – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2009. – С. 54-60.

5. Семёнова, О.Л. Физические методы обработки хлебопекарного сырья как перспективное направление в повышении качества хлеба и хлебобулочных изделий/О.Л.Семёнова, Е.Н.Рязанцева// Роль стратегии индустриально-информационного развития Республики Казахстан в условиях глобализации. Проблемы и перспективы: сборник материалов международной конференции – Рудный : РГКП Рудненский индустриальный институт, 2009. - С.353-357.

6. Семёнова, О.Л. Использование сверхвысокочастотной технологии для обработки муки с пониженными хлебопекарными свойствами /О.Л.Семёнова//Качество продукции, технологий и образования: материалы V научно-практической конференции г. Магнитогорск, 13-14 апреля, 2010 г. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2010. – С. 204-206.

7. Семёнова, О.Л. Применение сверхвысокочастотной обработки для улучшения качества некондиционной муки /О.Л.Семёнова// Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : материалы 68-й межрегиональной научно-технической конференции – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. – Т. I.– С. 99-102.

8. Семёнова, О.Л. Влияние СВЧ–обработки на качество муки с пониженными хлебопекарными свойствами/О.Л.Семёнова//Алдамжаровские чтения: сборник материалов международной научно-практической конференции – Костанай: КСТУ им.З.Алдамжар, 2010. – С. 396-401.

9. Семёнова, О.Л. Исследование влияния параметров поля сверхвысокой частоты на количественные и качественные показатели муки /О.Л.Семёнова//Качество продукции, технологий и образования: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием – Магнитогорск: МиниТип, 2011. – С. 271-276.

10. Семёнова, О.Л. Применение СВЧ–обработки для улучшения качества муки, полученной из суховейного зерна/О.Л.Семёнова// Современное состояние и перспективы развития пищевой промышленности и общественного питания: материалы V международной научно-практической конференции г. Челябинск, 21–22 октября, 2011 г.: в 2 т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – Т. I.– С. 123–127.

11. Семёнова, О.Л. Повышение качества пшеничной муки путем обработки СВЧ–излучением/О.Л.Семёнова//Инновации в образовании и науке в условиях политической и экономической модернизации Казахстана : сборник материалов международной научно-практической конференции - Рудный: РГКП Рудненский индустриальный институт, 2011. - С.204-208.

12. Семёнова, О.Л. Технология улучшения качества хлебопекарной пшеничной муки СВЧ–излучением/О.Л.Семёнова//Дулатовские чтения-2011: сборник материалов международной научно-практической конференции – Костанай: КИНЕУ, 2011. – С. 277–279.

Сдано в производство 24.02.2012
Бумага офсетная Гарнитура Times New Roman Формат 60x84 ^{1/}₁₆.
Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 4385
Изд-во ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА,
426069, Удмуртская республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 11

