

На правах рукописи



ДОРОХИН Роман Владимирович

**НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА
КОМБИНИРОВАННОЙ СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ
СПЕЦИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭНЕРГОПОДВОДЕ**

Специальность 05.18.12 – Процессы и аппараты
пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВПО «ВГУИТ»)

Научный руководитель: **заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор Остриков Александр Николаевич,**

Официальные оппоненты: **Попов Виктор Михайлович**
доктор технических наук, профессор (ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия»)

Казарцев Дмитрий Анатольевич
кандидат технических наук, доцент (Организационно-административный центр НП «ТПП АПК»)

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Майкопский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВПО МГТУ), г. Майкоп**

Защита состоится «29» декабря 2014 г. в 10⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 212.035.01 при ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

Отзывы (в двух экземплярах) на автореферат, заверенные гербовой печатью учреждения, просим присылать ученому секретарю совета Д212.035.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети «Интернет» на официальном сайте ФГБОУ ВПО «ВГУИТ» www.vsuet.ru «28» октября 2014 г. Автореферат размещен в сети «Интернет» на официальном сайте Министерства образования и науки РФ: vak2.ed.gov.ru и на официальном сайте ФГБОУ ВПО «ВГУИТ» www.vsuet.ru «28» октября 2014 г.

Автореферат разослан «28» ноября 2014 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
на соискание ученой степени
кандидата наук, на соискание
ученой степени доктора наук Д 212.035.01



Л.Н. Фролова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Российский рынок специй, как и пищевых ингредиентов в целом, существует с 2000 г. Сектор специй является одним из самых быстрорастущих. По данным экспертов, россиянин употребляет в пищу примерно 1,5 кг специй в год при необходимой норме около 4 кг в год. В настоящее время потребность в специях, для обеспечения населения России, оценивается в 510 тыс. т., а ежегодный сбор в стране составляет не более 150 тыс. т., или 30 % от необходимого объема.

На сегодняшний день сушка специй осуществляется на конвективных сушилках со стационарными режимами. Это связано с большими энергозатратами, долгим процессом сушки, невысоким качеством готового продукта, поэтому стал вопрос о разработке принципиально новых аппаратов и технологий для производства специй.

Новые ароматические и вкусовые свойства специй, формирующиеся при сушке, связаны с происходящими биохимическими реакциями. При разработке технологии сушки специй важно подобрать такие технологические режимы, которые способствуют протеканию биохимических процессов, направленных на создание продукта высокого качества с большим содержанием витаминов, минералов и аминокислот.

Фундаментальные работы в области СВЧ-сушки проведены А.В. Лыковым, В.П. Касьяненко, В.В. Ткачом, Е.А. Четвериковым, А.М. Афанасьевым, Д.А. Будниковым, и др., которые разработали физические основы СВЧ-обработки пищевых продуктов.

Цель диссертационной работы: научное обеспечение процесса комбинированной СВЧ-конвективной сушки специй из плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха; повышение эффективности процесса за счет разработки рациональных режимов сушки плодов и повышение качества готовой продукции.

В соответствии с целью работы решались нижеперечисленные задачи.

➤ Плоды горького перца, чеснока и горчичного жмыха изучались как объекты исследования, изучение имеющихся кон-

струкций аппаратов с СВЧ-энергоподводом и выявление их недостатков.

➤ Определение теплофизических и электрофизических характеристик исследуемых плодов, выявление температурных интервалов, которые соответствуют испарению влаги с различной формой связи, а также активности воды и антиоксидантной активности.

➤ Изучение кинетических закономерностей процесса комбинированной СВЧ-конвективной сушки плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха при стационарных режимах.

➤ Определение рациональных технологических параметров для ступенчатых режимов комбинированной СВЧ-конвективной сушки.

➤ Разработка математической модели процесса СВЧ-конвективной сушки плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха.

➤ Проведение оценки качества плодов свежих и высушенных по предлагаемой технологии.

➤ Разработка аппарата, технологии и технологической линии по производству сушеных специй на основе полученных данных.

➤ Расчет энергетической эффективности предлагаемой линии и оценка технико-экономических показателей.

➤ Производственная апробация полученных продуктов.

Научная новизна. Исследованы кинетические закономерности процесса комбинированной СВЧ-конвективной сушки специй при стационарных режимах.

При помощи дифференциально-термического анализа выявлены формы взаимодействия влаги в исследуемых продуктах, определены температурные интервалы, соответствующие испарению влаги с различной формой связи.

Определена зависимость изменения теплофизических характеристик горького перца, чеснока и горчичного жмыха от температуры.

Выявлены зависимости изменения коэффициента диэлектрических потерь от влажности и температуры, и на основании этих зависимостей составлены эмпирические уравнения.

Разработана математическая модель процесса СВЧ-конвективной сушки специй.

Подобраны ступенчатые режимы энергоподвода для комбинированной СВЧ-конвективной сушки специй в соответствии с формой связи удаляемой влаги, что позволяет повысить качество получаемых специй и ускорить процесс испарения влаги с поверхности продукта.

Практическая значимость технических инноваций подтверждена патентами РФ № 2493515, № 2518733.

Практическая ценность. Разработаны оптимальные ступенчатые технологические параметры для процесса комбинированной СВЧ-конвективной сушки специй. Выполнен эксергетический и технико-экономический анализ предлагаемой конструкции для производства специй.

Проведено комплексное исследование качественных показателей готовых специй, полученных при комбинированной СВЧ-конвективной сушке. Определена антиоксидантная активность исследуемых проб вытяжки готовых специй.

Разработан аппарат и технологическая линия для производства специй, а также способы по переработке плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на международных, всероссийских научно-технических конференциях: Воронеж, 2011 – 2014; Тамбов, 2012; Алматы, 2013; Казань, 2013.

Соискатель является участником областного конкурса «Инженерные технологии XXI века», Воронеж, 2011. Награжден грамотой за профессиональную работу в жюри областного открытого турнира юных изобретателей и рационализаторов, Воронеж, 2013.

Публикации. По теме диссертации издано 15 печатных работ, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК, получены 2 патента.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, приложений и списка литературы. Работа изложена на 162 листах машинописного текста, включает 15 таблиц и 77 рисунков. Список лите-

ратуры состоит из 135 источников, в том числе 31 – на иностранных языках. Приложения к диссертации представлены на 74 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены данные о рынке специй, а также о производстве и потреблении специй в целом; приводится обоснование выбранной темы.

В первой главе приведен анализ литературных источников с информацией о теории, технике и технологии производства специй, рассмотрены наиболее значимые направления разработки СВЧ-сушилок и способов сушки пищевых продуктов. В результате проведенного эксперимента сформированы цель и задачи диссертации, аргументирован выбор объекта изучения.

Во второй главе исследованы плоды горького перца, чеснока и горчичного жмыха как объекты сушки: определен вид связи влаги в продуктах с выявлением температурных зон удаления влаги и терморазложения веществ. Исследование закономерностей теплового воздействия на горький перец, чеснок и горчичный жмых осуществляли на комплексном термоанализаторе марки Mettler-Toledo STAR (риснок 1) методом неизотермического анализа. Для исследуемых образцов зона 1 – нагрев и испарение физико-механически связанной влаги, которая имеет небольшую энергию связи с образцом, зона 2 – удаление осмотической влаги, зона 3 – удаление адсорбционной влаги.

Определены теплофизические характеристики горького перца, чеснока и горчичного жмыха методом нестационарного теплового режима и установлен характер их изменения в зависимости от температуры и влажности.

В результате изучения экспериментальных данных были получены уравнения для определения теплофизических характеристик горького перца в диапазоне температур 293-343 К:

при $W = 88,02 \%$:

$$c = 1,385 \cdot T + 3751; R^2 = 0,994,$$
$$\lambda = 0,0001 \cdot T + 0,272; R^2 = 0,996,$$

при $W = 9,17 \%$:

$$c = 1,608 \cdot T + 3751; R^2 = 0,999,$$
$$\lambda = 0,0000 \cdot T + 0,178; R^2 = 0,999,$$

$$a = 0,003 \cdot T + 6,75; R^2 = 0,996, \quad a = 0,002 \cdot T + 6,415; R^2 = 0,998.$$

Полученные значения теплофизических характеристик плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха были использованы при разработке математической модели процесса комбинированной СВЧ-конвективной сушки.

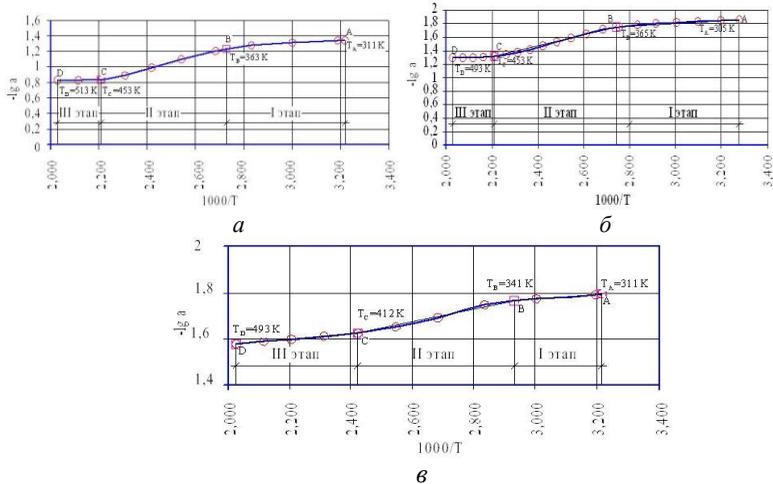


Рисунок 1 - Зависимость $-\lg a$ от величины $1000/T$ исследуемых продуктов: *а* – горький перец, *б* – чеснок, *в* – горчичный жмых

Исследованы изменения коэффициента диэлектрических потерь плодов горького перца чеснока и горчичного жмыха и построены зависимости коэффициента диэлектрических потерь от влажности и температуры (рисунок 2).

Значения коэффициента диэлектрических потерь были получены опытным путем методом сравнения (экспресс-метод), разработанным в РЭУ им. Г.В. Плеханова.

Из рисунка 2 видно, что уменьшение значения ϵ'' с повышением температуры плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха можно объяснить уменьшением ϵ'' воды при возрастании температуры, а также быстрым испарением жидкости при нагревании плодов.

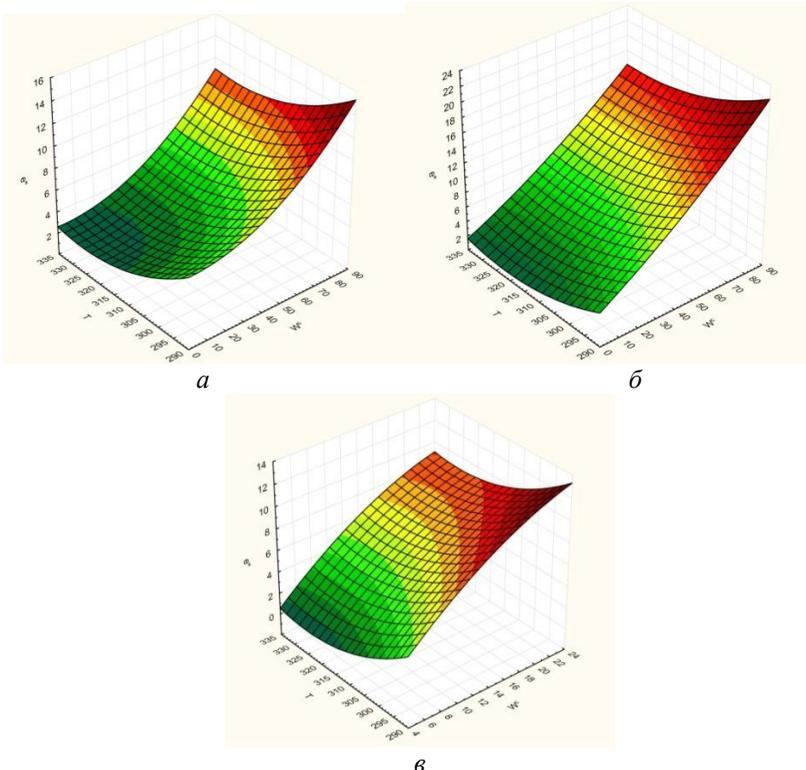


Рисунок 2 - Зависимости изменения коэффициента диэлектрических потерь ε'' при частоте электромагнитного поля $f = 2450$ МГц от влажности W и температуры T : *а* – горький перец, *б* – чеснок, *в* – горчичный жмых

В третьей главе предложено математическое описание процесса СВЧ-конвективной сушки частицы чеснока плоской формы толщиной $2L_1$. Примем, что пластина постоянной толщины и характерной формы. Системой дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса описывается изменение температуры T и влагосодержания U в процессе сушки:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{q_v(\tau)}{c\rho}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \varepsilon \frac{\partial U}{\partial \tau}. \quad (2)$$

Начальные условия

$$U(0, x) = U_0; \quad t(0, x) = t_0.$$

Граничные условия: при $x = 0$

$$\lambda_m \frac{\partial U}{\partial x} = \alpha_m (U - U_{\text{воз}}), \quad (3)$$

$$\alpha_q (t - t_{\text{воз}}) + \alpha_m (U - U_{\text{воз}}) \cdot r = \lambda \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (4)$$

при $x = L_1$, из условий симметрии

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial t}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

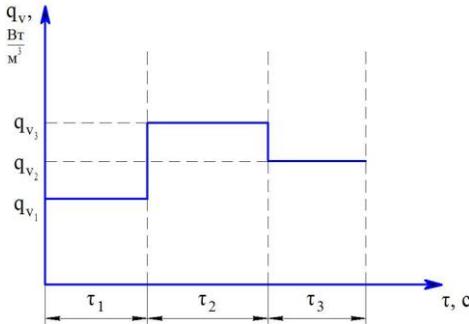


Рисунок 3 - Ступенчатый режим энергоподвода

С целью оптимизации сушки режим СВЧ - энергоподвода был выбран переменным во времени (рисунок 3). Ввиду сложности постановки задачи её решение осуществляется численным методом на компьютере.

На рисунок 4, 5 представлены результаты численного моделирования

процесса сушки чеснока при следующих значениях исходных данных: $a_m = 8,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$; $\varepsilon = 0,01$; $\tau = 1220 \text{ с}$, $\delta = 0,005 \text{ 1/К}$; $r = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$; $\rho = 1248 \text{ кг/м}^3$; $v_0 = 2$; $t_{\text{воз}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $L_1 = 0,001 \text{ м}$; $\lambda_q = 0,238 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; $\alpha_q = 25 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; $\alpha_m = 5 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$; $q_v = 10^6 \text{ Вт/м}^3$; $c = 2855 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$;

Число интервалов сетки по x $i_1 = 10$, шаг по времени $\Delta \tau = 0,005 \text{ с}$. Влажность в конце процесса сушки в слое чеснока постоянно и равно $U_i = 0,063 \text{ кг/кг}$.

Общее энергопотребление в расчете на 1 м^3 высушиваемого материала составляет $1,22 \text{ Дж/м}^3$.

Снижение температуры воздуха с 20 до 0 °С позволяет увеличить интенсивность энергоподвода q_v с 1 до 1,7 МВт/м³ без перегрева высушиваемого материала выше предельной температуры $t_{пр} = 60$ °С (рисунок 5). Время сушки при этом уменьшается с 1020 до 630 с (\approx на 60 %). При интенсивности внутреннего тепловыделения 1,7 МВт/м³ и продолжительности 730 с влагосодержание в слое чеснока будет постоянным ($U=0,07$).

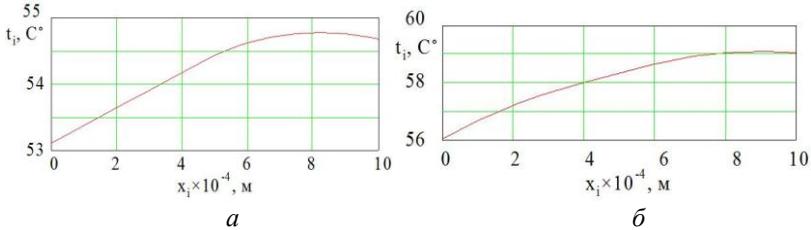


Рисунок 4 - Распределение температуры в слое чеснока в конце процесса сушки (а) и при $q_v=1,7$ МВт/м³ и $\tau=730$ с (б)

Для организации более равномерного режима сушки целесообразно реализовать переменный СВЧ-энергоподвод. Если разбить процесс сушки на три этапа продолжительностью 540, 410 и 330 с при интенсивности внутренних тепловыделений 0,8; 1,0 и 1,2 МВт/м³ то влагосодержание в конце каждого этапа при $U_0=2$ кг/кг составляет 1,35, 0,7 и 0,07 кг/кг.

Изменение влагосодержания в каждом этапе будет примерно одинаковым ($\Delta U = 0,65$ кг/кг). Распределения температуры в конце каждого этапа представлены на рисунок 5, 6, 7.

Реализация ступенчатого энергоподвода реализует более мягкий режим сушки и сокращает время воздействия максимальной температуры на высушиваемый материал.

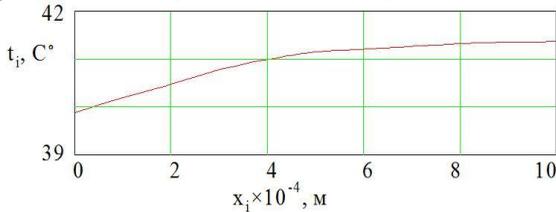


Рисунок 5 - Распределение температуры по толщине высушиваемого материала в конце 1-го этапа

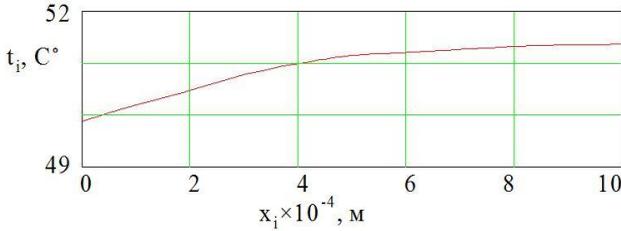


Рисунок 6 - Распределение температуры по толщине высушиваемого материала в конце 2-го этапа

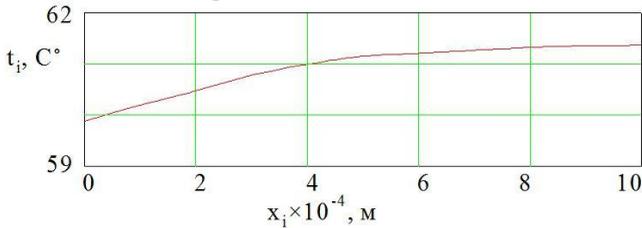


Рисунок 7 - Распределение температуры по толщине высушиваемого материала в конце 3-го этапа

Предложенная модель и программа расчета позволяет выполнить моделирование процесса СВЧ-сушки любых пищевых продуктов пластинчатой формы и разработать оптимальный технологический режим.

Для определения изменения температуры по толщине материала получено решение

$$t = t_c + \frac{q_v L_1^2}{a_\Sigma c \rho} \left[\left(\frac{x}{L_1} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{L_1} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Изменение влагосодержания в процессе сушки рассчитывали из уравнения

$$U = U_0 - \frac{a_m}{a_\Sigma} \frac{\delta q_v}{(1 - \varepsilon) c \rho} \tau, \quad (7)$$

Продолжительность процесса сушки определяли из уравнения

$$\tau_{\text{суш}} = \frac{a_\Sigma (1 - \varepsilon) c \rho (U_0 - U_k)}{a_m \delta q_v}, \quad (8)$$

На рис. 8 показаны распределение температуры по ре-

результатам численного моделирования при значениях параметров:
 $a_m = 8,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $\delta = 0,005 \text{ 1/К}$; $r = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$; $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$;
 $c = 3200 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; $\varepsilon = 0,01$; $t_{\text{воз}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $U_{\text{воз}} = 0,05$; $L_l = 0,001 \text{ м}$;
 $\lambda_q = 0,371 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; $\alpha_q = 100 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; $\lambda_m = 1,36 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
 $\alpha_m = 10^{-4} \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$; $q_v = 4 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^3$.

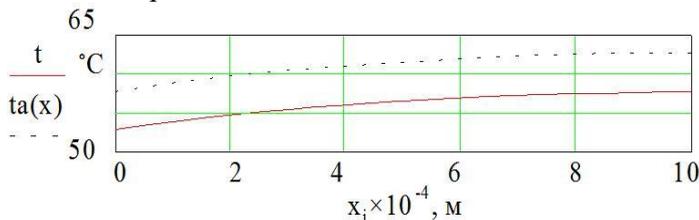


Рисунок 8 - Распределение температуры по толщине высушиваемого материала: 1 – численное, 2 – приближенное

Из него следует, что относительное отклонение распределения температур, полученных численным моделированием и приближенным решением, не превышает 10 %.

В четвертой главе приведено описание экспериментальной СВЧ-конвективной сушилки для исследования процесса сушки специй. Плоды горького перца и чеснока предварительно моют, сортируют, нарезают тонкими пластинами толщиной 2 мм, и подвергают комбинированной СВЧ-конвективной сушке.

Для определения необходимой СВЧ-мощности был проведен ряд экспериментов по сушке горького перца при мощностях СВЧ-поля 360-900 Вт. В результате эксперимента получены кинетические закономерности: кривые сушки, скорости сушки и термограммы сушки (рисунок 9).

Установили, что оптимальная мощность, с которой СВЧ-поле будет подводиться к продукту, должна находиться в диапазоне от 600 до 800 Вт. Это обеспечит получение продукта высокого качества и уменьшит время на обработки продукта.

Процесс сушки плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха изучался при следующих технологических режимах: скорость теплоносителя – 0,3-1,15 м/с, его температура – 293 К, толщина продукта – 1 – 3 мм, мощность электромагнитного поля 600 – 800 Вт, частота - 2450 МГц.

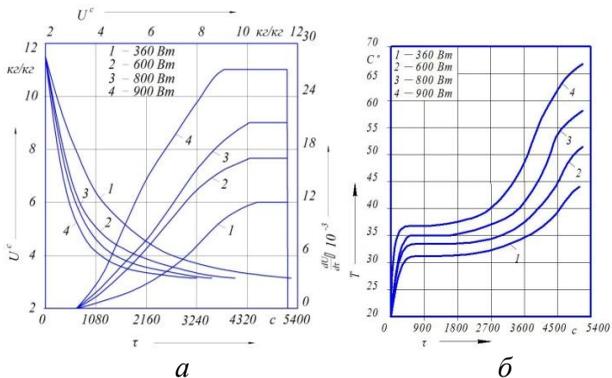


Рисунок 9 - Кинетические закономерности сушки горького перца при мощности СВЧ-поля 360, 600, 800 и 900 Вт:
 а – кривая сушки и скорости сушки; б – термограмма сушки

Основное влияние на интенсивность процесса сушки плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха оказывает мощность электромагнитного поля и скорость теплоносителя.

По результатам исследования процесса СВЧ-сушки плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха при стационарных режимах были построены кинетические закономерности: кривые сушки и скорости сушки (рисунок 10) и температурные кривые (рисунок 11).

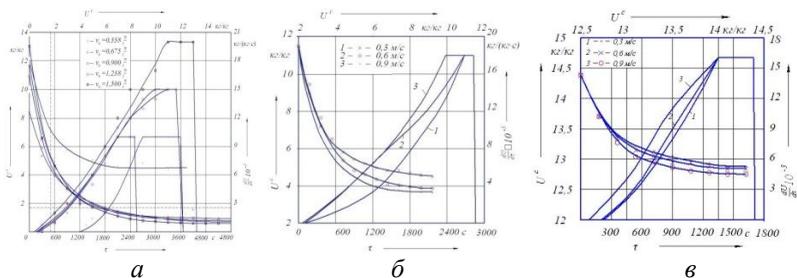


Рисунок 10 - Кривые сушки и скорости сушки при $W=600$ Вт:
 а – горький перец, б – чеснок, в – горчичный жмых

Анализируя кинетические закономерности процесса сушки плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха при стационарных режимах и формы связи влаги в продуктах, опреде-

ленные дифференциально-термическим анализом, подобрали ступенчатые режимы сушки (таблица 1). Данные режимы позволили сократить время сушки (с 3 до 1 ч. для горького перца и чеснока) и минимизировать потери витаминов, минералов и аминокислот.

Таблица 1 - Ступенчатые режимы сушки плодов

Продукт	Этапы сушки		
	I	II	III
Горький перец	$\tau=5$ мин, $v=1,6$ м/с $T=313$ К,	$\tau=15$ мин, $v=0,9$ м/с, $T=318$ К,	$\tau=33$ мин, $v=0,6$ м/с, $T=325$ К,
Чеснок	$\tau=7,5$ мин $v=0,9$ м/с, $T=300$ К, ,	$\tau=12$ мин, $v=0,70$ м/с $T=316$ К,	$\tau=20$ мин, $v=0,5$ м/с $T=320$ К,
Горчичный жмых	$\tau=3$ мин, $v=0,9$ м/с $T=397$ К,	$\tau=7,5$ мин, $v=0,6$ м/с $T=318$ К,	$\tau=12$ мин, $v=0,3$ м/с $T=331$ К,

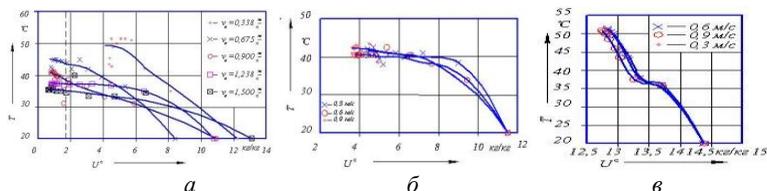


Рисунок 11 - Температурные кривые при $W=600$ Вт:
а – горький перец, *б* – чеснок, *в* – горчичный жмых

В пятой главе приведено различие в антиоксидантной активности (АОА) вытяжек из свежих плодов и готовых специй. Оно различие обусловлено разной суммарной АОА активностью из-за различия в качественном и количественном фракционном составе объектов исследования.

Проведена оценка витаминного, минерального и аминокислотного состава свежих продуктов и готовых специй: определены органолептические, физико-химические показатели, общий химический состав и антиоксидантная активность. Приведен химический состав свежего горького перца и высушенного по предлагаемой технологии (таблица 2). Также был определен химический состав плодов чеснока и горчицы.

Таблица 2 - Химический состав свежего горького и высушенного перца

Измеряемые параметры	Единицы измерения	Свежий перец	Высушенный перец
Общая влага	%	88,02±0,50	9,17±0,50
Углеводы (<i>общий сахар</i>)	%	8,80±0,04	61,76±0,04
Массовая доля белка	%	1,87±0,02	15,12±0,04
Зола	%	0,87±0,04	9,75±0,04
Массовая доля жира	%	0,44±0,04	4,20±0,04
Минеральный состав			
Калий (К)	мг	212,56±0,04	1587,12±0,04
Кальций (Са)	мг	14,07±0,04	104,17±0,02
Магний (Mg)	мг	23,19±0,04	171,14±0,02
Натрий (Na)	мг	9,07±0,04	67,56±0,04
Железо (Fe)	мг	1,03±0,04	7,72±0,04
Фосфор (P)	мг	43,56±0,04	315,65±0,02
Аминокислотный состав (незаменимые)			
Валин	г/100 г белка	0,082±0,004	0,442±0,004
Изолейцин	г/100 г белка	0,074±0,004	0,407±0,002
Лейцин	г/100 г белка	0,121±0,004	0,639±0,004
Лизин	г/100 г белка	0,092±0,002	0,482±0,002
Метионин + цистин	г/100 г белка	0,065±0,002	0,364±0,002
Треонин	г/100 г белка	0,072±0,004	0,397±0,004
Фенилаланин + тирозин	г/100 г белка	0,122±0,004	0,634±0,004
Содержание тяжелых металлов			
Ртуть (Hg)	мг/г	-	-
Мышьяк (As)	мг/г	-	-
Стронций (Sr ⁹⁰)	мг/г	-	-
Свинец (Pb)	мг/г	-	-
Цезий (Cs ¹³⁷)	мг/г	-	-
Кадмий (Cd)	мг/г	-	-
Содержание пестицидов			
ГЧЦГ	мг/кг	-	-
ДДТ	мг/кг	-	-
Микробиологические показатели			
КМАФАнМ	КОЕ/г	84	60
<i>S. aureus</i>	КОЕ/г	-	-
БГКП (колиформы)	КОЕ/г	-	-
Витаминный состав			
Рибофлавин (В ₂)	мг%	0,094±0,004	0,367±0,004
Витамин А	мкг%	48,1±0,2	171,5±0,2
Тиамин (В ₁)	мг%	0,072±0,004	0,262±0,004
Ниацин (PP)	мг%	1,24±0,10	3,09±0,10
Витамин С	мг%	143,7±0,2	302,2±0,1
Витамин Е	мг%	0,694±0,002	2,516±0,004

В шестой главе разработаны: оригинальная конструкция сушилки, линия для производства специй, а также технологии

производства специй из горького перца, чеснока и горчичного жмыха.

Отличительная особенность предлагаемой технологии в том, что установлена комбинированная СВЧ-конвективная сушилка, корпус которой имеет форму спирального короба, выполненного по винтовой линии. Внутри короба расположены сообщающиеся между собой камеры: камера загрузки, последовательно чередующиеся СВЧ-камеры и камеры охлаждения, камера выгрузки. Через все камеры проходят два параллельных цепных транспортера, на которых шарнирно закреплены перфорированные лотки. Привод цепных транспортеров обеспечивает циклическое-непрерывное движение перфорированных лотков с периодическими выстоями (рис. 12).

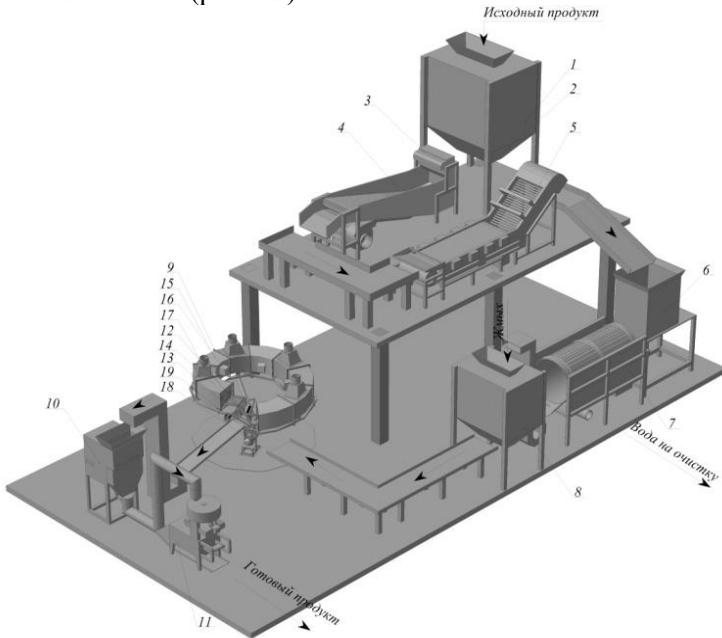


Рисунок 12 - технологическая линия производства сушеных специй: 1 – бункер; 2 – дозатор роторный; 3 – весы; 4 – машина моечная; 5 – транспортер инспекционный; 6 – машина для резки; 7 – машина для удаления семенного гнезда; 8 – промежуточный бункер; 9 – СВЧ-конвективная сушилка; 10 – дробилка; 11 – фасовочно-упаковочный автомат;

12 – перфорированные лотки; 13 – привод транспортера; 14 – цепной транспортер; 15 – СВЧ-камера; 16 – магнетрон; 17 – камера охлаждения; 18 – воздуховод; 19 вентилятор

Для сравнения энергетической эффективности существующих и предлагаемой технологии был выполнен эксергетический анализ (рисунок 13). Полученный эксергетический КПД составляет 17,02 %, что значительно выше, чем при применении технологии-прототипа, включающей ленточную конвективную сушилку, на 7,8 %.

Расчитанные технико-экономические показатели свидетельствуют о целесообразности внедрения нового оборудования – замена базового оборудования на СВЧ-конвективную сушилку с комбинированным энергоподводом.

Эффективность экономических показателей на 1 рубль капитальных вложений, составит приблизительно 105,81 р., что приведет к окупаемости затрат менее чем за 1 месяц. Следует отметить, что будет достигнут социальный эффект: повысится качество готовых продуктов, усовершенствуются условия и безопасность труда обслуживающего персонала.

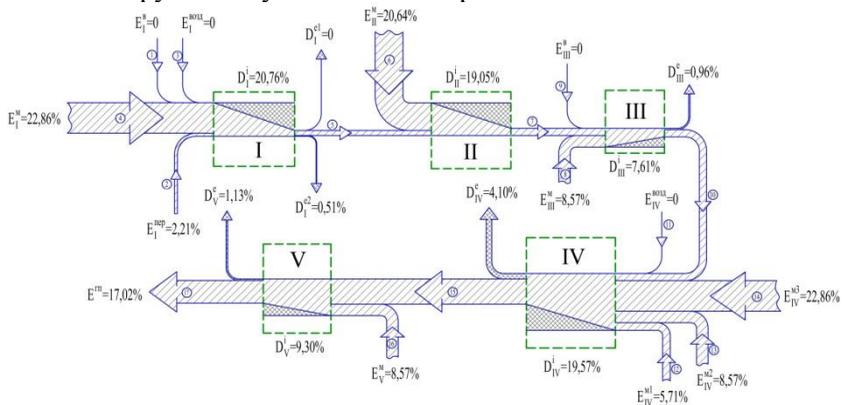


Рисунок 13 - Эксергетическая диаграмма энергетических потоков линии для производства специй

Условные обозначения:

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; ε – относительный коэффициент испарения влаги; r – теплота испарения воды, $\text{Дж}/\text{кг}$; c – теплоемкость частицы, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $q_v(\tau)$ – интенсивность внутренних тепловых источников, обусловленных СВЧ-энергоподводом; $U_{\text{ср}}$ – влагосодержание окружающей среды, $\text{кг}/\text{кг}$; a_m – коэффициент диффузии влаги в материале, $\text{м}^2/\text{с}$; λ_m – коэффициент массопроводности материала, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$; λ_q – теплопроводность материала, $\text{Вт}/\text{м}$; α_m – коэффициент массоотдачи по влагосодержанию, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$; α_q – коэффициент конвективной теплоотдачи; δ – относительный коэффициент термодиффузии влаги в материале, $1/\text{К}$; $U_{\text{воз}}$ – равновесное влагосодержание для параметров окружающего воздуха; $t_{\text{воз}}$ – температура окружающего воздуха; U – влагосодержание, $\text{кг}/\text{кг}$; T – температура продукта, К ; t_c – температура поверхности пластины, К ; ρ – плотность продукта, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Основные выводы и результаты:

1. Изучены плоды горького перца, чеснока и горчичного жмыха как объекты исследования. Определены: коэффициент теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости методом нестационарного теплового режима для интервала температур 293...348 К. Установили, что с повышением температуры теплофизические характеристики плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха увеличиваются. Выявили формы связи влаги в продукте и температурные интервалы, соответствующие испарению влаги с различной формой связи, методом дифференциально-термического анализа

2. Исследована кинетика процесса комбинированной СВЧ-конвективной сушки специй при стационарных режимах и следующих технологических параметрах: скорость теплоносителя - 0,338...1,535 м/с, температура воздуха - 293 К, мощность магнетрона - 600...800 Вт и частота электромагнитного поля - 2450 МГц.

3. Разработаны и обоснованы рациональные ступенчатые режимы сушки в зависимости от формы связи влаги в продукте и изученных стационарных режимах.

4. Исследованы диэлектрические характеристики среды, определен коэффициент диэлектрических потерь плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха.

5. Определены: антиоксидантная активность и активность воды в плодах горького перца, чеснока и горчичного жмыха: показатели качества свежих и высушенных по предлагаемой технологии плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха. Выявлено, что готовые специи обладают большим количеством ценных термолабильных веществ.

6. Разработана математическая модель процесса СВЧ-конвективной сушки специй, в которой описываются изменения температуры и влагосодержания на первом и втором этапе сушки.

7. Разработана технологическая линия, технология и конструкция аппарата для производства специй из плодов горького перца, чеснока и горчичного жмыха.

8. Проведена оценка энергетической эффективности разработанной технологической линии по производству специй, методом эксергетического анализа. Эксергетический КПД составил 17,02 %, что значительно выше, чем при использовании технологии-прототипа, включающей ленточную конвективную сушилку, на 7,8 %.

9. Проведено производственное испытание способа получения специй на ОАО «Живица».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Остриков, А.Н.** Исследование СВЧ-конвективной сушки горького перца при переменном теплоподводе [Текст] / А.Н. Остриков, Р.В. Дорохин // Вестник Воронежской государственной технологической академии. – 2012. – № 4. – С. 7-10.

2. **Дорохин, Р.В.** Комплексная оценка качества сушеного горького перца [Текст] / Р.В. Дорохин // Аграрный вестник Ура-

ла. – 2013. – № 1. – С. 40-43.

3. **Остриков, А.Н.** Теплофизические свойства горького перца, высушенного СВЧ-конвективным способом при переменном теплоподводе [Текст] / А.Н. Остриков, Р.В. Дорохин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2013. – № 4. – С. 91-92.

4. **Остриков, А.Н.** Исследование СВЧ-конвективной сушки чеснока при переменном теплоподводе [Текст] / А.Н. Остриков, Р.В. Дорохин // Известия вузов. Пищевая технология. – 2013. – № 5-6. – С. 69-71.

5. **Остриков, А.Н.** Исследование СВЧ-конвективной сушки горчичного жмыха при переменном теплоподводе [Текст] / А.Н. Остриков, Р.В. Дорохин // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2014. – № 1. – С. 21-24.

6. **Пат. 2493515 Российская Федерация, МПК⁷ F26B 15/26, F26B 3/347.** Комбинированная СВЧ-конвективная сушилка [Текст] / Остриков А.Н., Дорохин Р.В.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный университет инженерных технологий. – № 2012108886/06; заявлено 07.03.2012; опубл. 20.09.2013; Бюл. № 26.

7. **Пат. 2518733 Российская Федерация, МПК⁷ A23L 1/10 (2006.01).** Способ производства сушеного горького перца [Текст] / Остриков А.Н., Дорохин Р.В.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный университет инженерных технологий. – 2012153945/13; заявлено 14.12.2012; опубл. 10.06.2014; Бюл. №16.

Подписано в печать 27.10.2014. Формат 60×84 ¹/₁₆.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Ризография.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ .

ФГБОУВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»
(ФГБОУВПО «ВГУИТ»)

Отдел оперативной полиграфии ФГБОУВПО «ВГУИТ»

Адрес университета и отдела оперативной полиграфии

394036 Воронеж, пр. Революции, 19