

Министерство образования Украины
Украинский Государственный Университет пищевых технологий

На правах рукописи

УДК 66.047.45..63..61..57..621.3.02

ЛУПАШКО
Андрей Спиридонович

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЫРЬЯ МЕДИКО-
БИОЛОГИЧЕСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ**

Специальность 05. 18. 12. – Процессы и аппараты
пищевых производств

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени доктора технических наук

Киев – 1996

Работа выполнена в Техническом Университете Молдовы

Научные консультанты:

Заслуженный работник Высшей школы
Украины, доктор технических наук,
профессор Малезик И. Ф. (Украина)

Доктор технических наук,
профессор Мустяца В. Т. (Молдова)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А. Ф. Буляндра
доктор технических наук, профессор М. А. Гришин
доктор технических наук, профессор И. М. Федоткин

Ведущая организация - АО "Букурия", г. Кишинев (Р.Молдова).

Защита состоится **9 октября 1996 г.** в **14** часов на заседании
Специализированного ученого совета Д 01.15.04 Украинского
Государственного Университета пищевых технологии по адресу: 252017,
Киев, ул.Владимирская 68, корпус А. аудитория 311.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Украинского
Государственного Университета пищевых технологий.

Автореферат разослан **8 сентября 1996 г.**

Ученый секретарь

специализированного Совета,

кандидат технических наук, доцент



В.Л.Завьялов

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00759958 (0)

Стабильное развитие промышленности Республики Молдова зависит от уровня развития отраслей аграрно-промышленного сектора, занимающего наибольший удельный вес, а также от рационального использования импортируемого сырья, в частности, какао бобов.

При этом эффективность работы аграрно-промышленного комплекса, учитывая его сезонность, во многом определяется сроком переработки сырья и полуфабрикатов.

Особую значимость в последнее время приобретают вопросы, связанные с использованием сырья как пищевой, так и медико-биологической направленности. В своей технологической переработке оно также подвергается процессу сушки. Поэтому для него следует применять такие методы тепловой обработки, которые позволили бы достигать не только требуемые конечные технологические цели, но и получать другие полезные эффекты, способные благоприятно влиять на человеческий организм с точки зрения медицины.

Крайне мало работ посвящено исследованию процессов сушки таких биологических объектов, как шиповник, красный стручковый перец, семена тыквы и какао бобы, которые, как показали исследования, целесообразнее использовать в виде какао крупки. Наличие таких сведений позволило бы создать рациональные режимы сушки с точки зрения соблюдения технологических требований, сокращения затрат, сохранения биологически-активных компонентов сырья.

Определенные перспективы в интенсификации процесса сушки сельскохозяйственного сырья медико-биологической направленности при улучшении качества готового продукта может дать применение токов высокой частоты (ТВЧ). Поэтому, разработка научных основ проведения процесса сушки сырья медико-биологической направленности с применением токов высокой частоты является актуальной задачей и имеет важное теоретическое и практическое значение.

Цель работы.

Главной целью данной работы является: на основе современных аналитических и экспериментальных исследований осуществить комплексное изучение электрофизических параметров сложных гетерогенных многокомпонентных систем, какими являются медико-биологические объекты растительного происхождения. Кроме того, определить аналитические решения и провести исследования дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса в случае внутреннего источника тепла для таких тел, как

шар, неограниченный полый цилиндр и ограниченный полый цилиндр. Экспериментальные исследования кинетики и динамики процесса сушки вышеназванных объектов, а также научное обоснование и практическая реализация рациональных технологических режимов процесса их сушки.

Исследования проведены на медико-биологических объектах растительного происхождения, характерных для Республики Молдова: плоды шиповника (*rosa canina* L.), красный стручковый перец (*capsicum annuum* L.) и семена тыквы (*cucurbitaceae*). а также для импортируемых какао бобов (крупки). Аналитические исследования сочетаются с экспериментальными, проведенными в лабораторных и производственных условиях.

Научная новизна.

Изучена возможность и доказана перспективность и целесообразность исследования комбинированного энергоподвода - конвекции и токов высокой частоты для сушки с/х сырья медико-биологической направленности.

Сформулирован и математически определен метод расчета электрофизических параметров материалов, имеющих сложную многокомпонентную гетерогенную структуру. Эффективность предложенного метода экспериментально доказана на примере шиповника.

Впервые сформулированы и математически описаны методики расчета дифференциальных уравнений процесса тепло- и массопереноса при комбинированном энергоподводе - конвекция и токи высокой частоты для материалов, имеющих геометрическую форму шара, полого неограниченного цилиндра и полого ограниченного цилиндра. Доказана целесообразность их использования соответственно для шиповника, красного стручкового перца и семян тыквы.

Доказана возможность использования комбинированного энергоподвода - конвекция и токи высокой частоты для сушки плодов шиповника. Установлены закономерности кинетики процесса их сушки. Обоснован технологический режим сушки.

Исследована кинетика процесса сушки красного стручкового перца при комбинированном энергоподводе - конвекция и токи высокой частоты.

Доказана целесообразность их применения и обоснованы оптимальные технологические режимы процесса его сушки.

Предложена, научно и экспериментально обоснована необходимость использования комбинированного энергоподвода - конвекции и внутреннего источника тепла (ТВЧ) для сушки семян тыквы. Выявлены рациональные технологические режимы проведения процесса их сушки.

Новизна предложенных технологий, разработанных на основе теоретических и экспериментальных исследований кинетики процесса сушки с/х сырья

медико-биологической направленности, подтверждена 4 авторскими свидетельствами и одним положительным решением на выдачу патента в Республике Молдова.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Результаты проведенных исследований позволили разработать целый ряд технологических режимов для проведения процесса сушки с/х сырья медико-биологической направленности.

Изготовлена опытно-промышленная установка для сушки шиповника, прошедшая успешное производственное испытание на предприятии с ограниченной ответственностью "Дион" (Москва).

Изготовлена опытно-промышленная установка для сушки красного стручкового перца, прошедшая успешное производственное испытание в Фармацевтическом центре (Республика Молдова).

Полученные образцы сушеного красного стручкового перца с использованием комбинированного энергоподвода успешно внедрены в секции физиологии и биохимии Центральной Научно-Исследовательской Лаборатории Государственного Медицинского и Фармацевтического Университета им. Н. Тестемицану (Республика Молдова).

Предложенная установка также прошла успешное производственное испытание для сушки семян тыквы при комбинированном энергоподводе - конвекция и токи высокой частоты - в АО "Букурия" (Республика Молдова).

Разработан ряд математических моделей, позволяющих автоматизировать работу сушильных установок, предназначенных для сушки с/х сырья при использовании комбинированного энергоподвода - конвекции и токов высокой частоты.

Впервые определены электрофизические характеристики плодов шиповника, красного стручкового перца, семян тыквы и какао-крупки, а также определены математические закономерности их изменения в зависимости от различных внешних факторов воздействия, позволяющие создать алгоритм автоматического отслеживания проведения процесса сушки их в случае использования токов высокой частоты.

Промышленное внедрение результатов исследований обеспечило получение экономического эффекта более 316 тыс. руб. (в ценах 1990 года), повысило технический уровень производства, а также увеличило количество сушеного с/х сырья, что тем самым позволило продлить сроки хранения и реализации биологического продукта, а также уменьшить потери дорогостоящего какао масла за счет уменьшения его миграции в какао веллу.

Апробация работы.

Основные положения работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на IV Всесоюзном совещании по электрофизической обработке материалов (Кишинев, 1975), на 10-ой (1976), 11-ой (1977), 12-ой (1978), 13-ой (1979), 14-ой (1980), 1983-1988 г. научно-технических конференциях Кишиневского политехнического института им. С. Лазо, на заседании технического совета Кишиневской опытно-экспериментальной фабрики "Букурдя" (1980), на 5-ой Всесоюзной научно-технической конференции "Электрофизические методы обработки пищевых продуктов" (Москва, 1985), на Всесоюзных семинарах "Интенсификация и автоматизация технологических процессов обработки пищевых продуктов" (Москва, 1987 и 1989г.), на III-ей Всесоюзной научно-технической конференции "Разработка процессов получения комбинированных продуктов питания (медико-биологические аспекты, технология, аппаратурное оформление, оптимизация)" (Москва, 1988), на республиканской научно-технической конференции "Интенсификация технологии и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК" (Киев КТИПП, 1989), 55-й науковій конференції (Київ, КТІХП, 1989), II-ой Всесоюзной научной конференции "Проблемы индустриализации общественного питания страны" (Харьков, 1989), VI-ой Всесоюзной научно-технической конференции "Электрофизические методы обработки пищевых продуктов и сельскохозяйственного сырья" (Москва, 1989), на XXXIII научно-технической конференции вузов Прибалтийских республик, Белорусской ССР и Молдавской ССР (Минск, 1989), на республиканской научно-технической конференции, посвященной 25-летию образования КПИ им. С. Лазо (Кишинев, 1989), на научно-технической конференции КПИ им. С. Лазо (Кишинев, 1990), на VI-ом Всесоюзном совещании по электрофизической обработке материалов (Кишинев, 1990), на Всесоюзной научной конференции "Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания" (Харьков, 1990), на Международной конференции по сушке 2-го Международного форума по тепло- и массообмену (Киев, 1992), на Международной конференции по тепло- и массообмену в технологических процессах (Юрмала, 1992), на Міжнародній науково-технічній конференції "Розробка та впровадження нових технологій і обладнання у харчову та переробні галузі АПК (Київ, КТІХП, 1993), Conferinta tehnico-stiintifica jubiliara (Chisinau, 1994), на III конференции теплотехников Румынии (Клуж-Напока, 1995), на IV конференции теплотехников Румынии (Яссы, 1996).

Публикации.

Основные положения диссертации опубликованы в 48 печатных работах, в том числе двух учебных пособиях, 4 авторских свидетельствах и одном положительном решении по патенту Республики Молдова.

Объем работы.

Диссертация состоит из введения, девяти глав, основных результатов и выводов, списка использованной литературы и приложений. Основное содержание изложено на 381 странице; содержит 126 рисунков и 28 таблиц. Список литературы включает 309 наименований. Приложения к диссертации представлены на 26 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

Во введении охарактеризовано современное состояние производства сушеного с/х сырья, имеющего медико-биологическое назначение как в Республике Молдова, так и в других республиках СНГ.

Отмечены основные тенденции совершенствования техники и технологии, обоснована актуальность работы, определены направления исследования.

В первой главе на базе литературного обзора определен современный научный уровень представления основных теоретических положений вопросов тепло- и массопереноса. Определены и даны перспективные тенденции развития техники и технологии процесса сушки с/х сырья медико-биологического назначения. Выявлены и сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе выявлены и теоретически обоснованы современные положения определения и расчета электрофизических параметров материалов, имеющих внутреннюю однородную и неоднородную структуру. Выявлены основные виды поляризации для данных типов материалов.

В неполярных материалах, имеющих однородную структуру, характерно наличие электронной и ионной поляризаций, которые могут быть математически описаны уравнением Клаузиуса-Мосотти.

Электронная и ионная поляризации относятся к так называемой деформационной поляризации $\alpha_{\text{деф}}$. Для полярных диэлектриков Дебай кроме деформационной поляризации ввел еще дипольную поляризацию.

Приведена классификация однородных диэлектриков в зависимости от возникающих в них видов поляризаций. Проанализированы и представлены научные направления для выявления зависимостей относительной диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ от различных факторов воздействия, таких как частота электромагнитного

поля, влажность и температура материала.

Для сложных неоднородных материалов виды поляризации определяются их коллоидно-физическими свойствами. Таким материалам присущи поляризации, которые характерны и для однородных материалов, но к ним добавляется еще микро- и макроструктурная поляризация.

Сложность структуры неоднородных гетерогенных материалов приводит к большим затруднениям в определении их электрофизических параметров. В связи с этим, все методики для расчета $\operatorname{tg} \delta$ и ϵ' , отмеченные выше, дают существенную погрешность. Поэтому, для таких материалов нами предлагается методика расчета ее электрофизических параметров. Ниже приводится методика расчета $\operatorname{tg} \delta$ и ϵ' , рассмотренная на примере плодов шиповника.

Плод шиповника, с точки зрения диэлектрика, рассматривается в разрезе в виде последовательно соединенных элементов: кожица - семена - кожица (рис. 1). Если использовать схему замещения с последовательным соединением, то общую мощность, подводимую к диэлектрику, можно выразить как:

$$P = P_a + P_p \quad (1)$$

где P_a , P_p - соответственно активная и реактивная мощности, Вт.

Величины этих мощностей определяются как сумма величин мощностей каждой из компонент W_j , входящих в состав шиповника.

$$P_a = \sum_{j=1}^n W_j', \quad P_p = \sum_{j=1}^n W_j'' \quad (2)$$

Если обозначить относительные объемные концентрации компонент через a и b (для нашего случая $2a+b=1$), то емкости отдельных слоев можно представить как выражение:

$$\frac{C_a}{C_b} = \frac{b \cdot \epsilon'_a}{2 \cdot a \cdot \epsilon'_b} \quad (3)$$

Обозначив через $b/a = \mu$ и $\epsilon'_a / \epsilon'_b = \eta$, и допуская, что каждый отдельно взятый слой можно представить как ячейку с параллельной схемой замещения, и выражая $\operatorname{tg} \delta_{\text{см}}$ через емкости этих слоев, а также

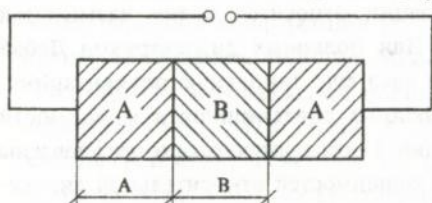


Рис. 1. Схема замещения плода шиповника; А - кожица, В - семена

проведя некоторые несложные математические упрощения, получим следующее выражение для расчета $\operatorname{tg} \delta$ для смесей:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{см}} = \operatorname{tg} \delta_a + \frac{\mu \eta (\operatorname{tg} \delta_b \cdot \operatorname{tg} \delta_a)}{2 + \mu \eta} \quad (4)$$

Принимая, что площади контактных слоев системы одинаковы, и

учитывая предыдущие условия, была получена формула для расчета относительной диэлектрической проницаемости для смеси:

$$\epsilon'_{см} = \frac{\epsilon'_a \cdot \epsilon'_b}{2 \cdot a \cdot \epsilon'_a + b \cdot \epsilon'_b} \quad (5)$$

Адекватность полученных выражений была проверена на экспериментальных данных шиповника и показала положительные результаты.

Также выявлены основные способы и методы измерения и определения электрофизических параметров материалов. Научно обосновано, что для материалов со сложной структурой, какими в большинстве случаев являются пищевые продукты, для данного спектра частот следует использовать метод резонанса при способе трех измерений.

В третьей главе экспериментально определены электрофизические параметры некоторых наименований сельскохозяйственного сырья медико-биологического назначения, таких как шиповник, красный стручковый перец, семена тыквы и какао крупка. Получены математические зависимости $\tan \delta$ и ϵ' от частоты электромагнитного поля, влажности и температуры продукта.

Исследование электрофизических параметров растительного сырья проводилось на лабораторной установке (рис. 2).

Она состоит из измерителя добротности Е4-5А 1, к которому подсоединяются конденсатор 2, заполненный продуктом, и катушки индуктивности 3. Электрофизические характеристики определялись при различной температуре. Подогрев конденсатора с продуктом осуществлялся ТЭНами 4. Температура перца измерялась медь-константановой термопарой 5, подсоединенной к измерительному мосту Р-4833 6 через сосуд Дюара 7 со льдом.

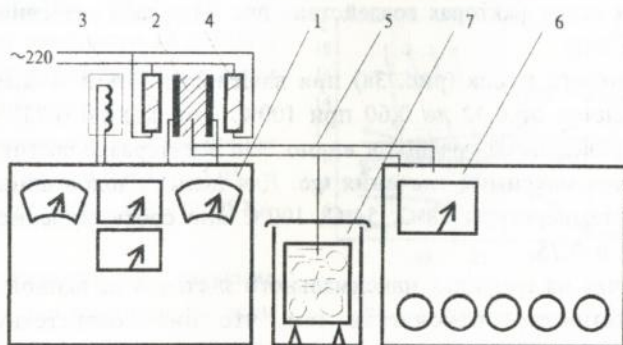


Рис. 2. Схема установки по определению электрофизических параметров: 1 - измеритель добротности Е4-5А; 2 - конденсатор с продуктом; 3 - катушка индуктивности; 4 - ТЭН; 5 - термопара; 6 - прибор Р4833; 7 - сосуд Дюара со льдом.

Измерительный конденсатор конструктивно состоит из двух круглых пластинок диаметром 40 мм и толщиной 3 мм, разделенных изолирующим кольцом, изготовленным из фторопласта Ф-4. Одна пластина конденсатора была заземлена. Геометрические размеры конденсатора были подобраны из условий обеспечения наименьшего электромагнитного краевого эффекта. Для этого внутренний диаметр изолирующего кольца был принят на 1 мм меньше, чем наружный диаметр круглых пластинок. Измерительный конденсатор был помещен в металлический экран, что позволило уменьшить влияние паразитных емкостей и индуктивностей.

Для шиповника исследования проводились как с целыми плодами, так и его составными частями - кожей и семенами.

Экспериментальные данные показали, что наиболее целесообразно сушить шиповник в целом виде, а не отдельно его составные части - кожу и семена. Поэтому в дальнейшем будут представлены данные по целому шиповнику.

На рис. 3 представлены зависимости электрофизических характеристик целого шиповника от частоты электромагнитного поля в интервале частот 15-45 МГц.

Исследования проводились с образцами различной влажности (0; 14,0; 24,0; 34,0%) при температурах от 18°C до 100°C в интервале частот 15-45 МГц.

Исследования показали, что прибор для измерения добротности позволял определить $\operatorname{tg} \delta$ и ϵ' , а также их зависимости от частоты только до влажности 34%. В связи с этим, наибольший интерес представляет получение зависимостей электрофизических параметров при указанных выше факторах воздействия для интервала значений влажности от 0% до 34%.

Для целого плода (рис. 3а) при влажности 34% и температуре 18°C $\operatorname{tg} \delta$ изменяется от 0,32 до 0,60 при 100°C - от 0,18 до 0,75.

Из приведенных графиков видно, что в интервале частот 25-30 МГц наблюдается максимум значения $\operatorname{tg} \delta$. Для целых плодов шиповника при значении температуры 18°C, 54°C, 100°C оно соответственно составило 0,60; 0,62 и 0,75.

Наличие на графиках максимального значения на данной частоте, по всей видимости, объясняется тем, что она соответствует такому соотношению между периодом приложенного напряжения и временем релаксации, при котором наблюдается наибольшая затрата энергии на преодоление диполями сопротивления, а именно трения среды.

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ' (рис. 3б) принимает некоторое среднее значение по отношению к величинам ϵ' для кожи и семян, которое может быть определено в первом приближении как

равное 10-12. Из анализа графиков (рис. 3 а, б) видно, что наибольшее тепловыделение будет при частоте 27 МГц.

Поэтому, исходя из существующего параметрического ряда промышленных генераторов, с целью получения равномерного и более интенсивного нагрева следует выбрать для ведения процесса сушки генератор ВЧ с рабочей частотой 27 МГц.

Повышенный интерес представляют описания зависимостей электрофизических параметров плодов шиповника от влажности на данной частоте.

Выявлено, что с ростом влажности значения $\text{tg}\delta$ увеличиваются по линейному закону. Такой же характер наблюдается и для ϵ' .

В таблице 1 приведены уравнения математической зависимости изменения $\text{tg}\delta$ и ϵ' от влажности для температур 18, 54, 100°C в интервале влажности 0-34%.

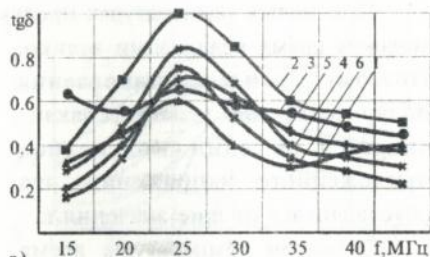
При этом значения $\text{tg}\delta$ изменялись при температурах 18°C, 54°C и 100°C соответственно в интервалах: $0,05 \div 0,42$; $0,06 \div 0,5$ и $0,1 \div 0,76$. При этих же условиях ϵ' изменялась соответственно в пределах: $2 \div 10,5$; $5 \div 16,2$; 13 .

Температура в большей степени влияет на параметры диэлектриков. На рис.4 представлены зависимости $\text{tg}\delta$ от температуры (рис. 4.а) и ϵ' (рис. 4.б) при частоте электромагнитного поля 27 МГц.

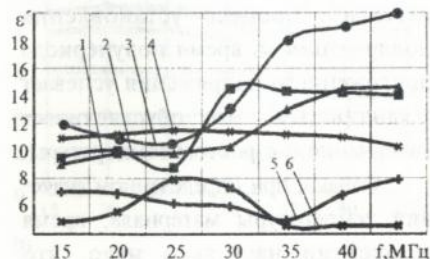
Из графиков видно, что $\text{tg}\delta$ (рис.4.а) для влажности 14 и 34% с ростом температуры увеличивается по линейному закону.

Для влажности 14% уравнение имеет вид: $\text{tg}\delta = 0,008T - 0,05$, а для влажности 34% - $\text{tg}\delta = 0,008T + 0,20$.

Для влажности 0% значение $\text{tg}\delta$ остается постоянным во всем интервале используемых температур.



а)



б)

Рис. 3. Зависимость $\text{tg}\delta$ (а) и ϵ' (б) от частоты для целого шиповника при $W=34\%$ и температуре 1 - 18°C; 2 - 41°C; 3 - 54°C; 4 - 79°C; 5 - 90°C; 6 - 100°C.

Таблица 1

$T = 18^{\circ}\text{C}$	$\text{tg}\delta = 0,01W + 0,08$	$\epsilon' = 0,035W + 3$
$T = 54^{\circ}\text{C}$	$\text{tg}\delta = 0,18W + 0,012$	$\epsilon' = 0,030W + 5$
$T = 100^{\circ}\text{C}$	$\text{tg}\delta = 0,013W + 0,05$	$\epsilon' = 0,030W + 3$

Зависимость ϵ' от температуры представлена на рис. 4.б. Она показывает, что для целого шиповника при влажности 0% ее величина в вышеуказанном интервале температур остается постоянной и составляет 5,0.

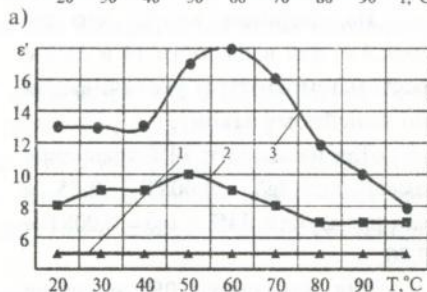
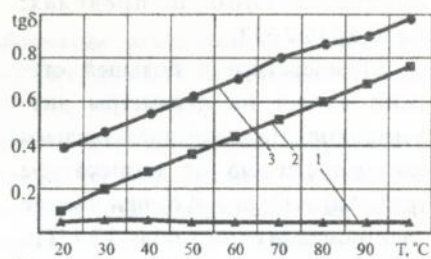
Для влажности 14% и 34%, как видно из графиков, наблюдается два периода. Они определяются интервалами температур 18 - 60°C и 60-100°C. В первом периоде прослеживается увеличение ϵ' с ростом температуры и для целого шиповника при 14% влажности и температуре 20°C ϵ' составляет 8, а при 60°C - 9. При дальнейшем увеличении температуры, т.е. во втором периоде, происходит уменьшение значений ϵ' . При этом минимальное значение для температуры 100°C составляет 7,0.

При малых температурах продукта за счет низкой частоты колебаний молекул время релаксации велико. Поэтому процесс установления поляризации не успевает заканчиваться за один полупериод приложенного напряжения, что обуславливает низкие значения ϵ' .

С ростом температуры время релаксации уменьшается, а следовательно, процесс установления поляризации за время полупериода приложенного напряжения успевает заканчиваться. Это обуславливает увеличение ϵ' с ростом температуры.

Однако, при определенном значении температуры материала, время релаксации настолько мало, что процесс поляризации в значительной степени заканчивается за время полупериода приложенного напряжения и дальнейшее ее увеличение приводит к уменьшению ϵ' .

Полученные электрофизические параметры красного стручкового перца позволили выявить, что их зависимости от частоты (рис. 5) имеют сложный



б)

Рис. 4. Зависимость $\text{tg}\delta$ (а) и ϵ' (б) от T при $f = 27$ МГц; при влажности 1-0%, 2-14%, 3-34%.

характер, при этом прибор позволял определить их только до влажности 36%.

В интервале частот 25–30 МГц наблюдается максимум значения $\operatorname{tg}\delta$ (рис. 5а). Так, для целых плодов перца при значениях температуры 20°C, 60°C и 100°C в этом интервале они составили соответственно 0,23; 0,31 и 0,46.

Наличие на графиках максимального значения $\operatorname{tg}\delta$, по всей видимости, объясняется тем, что оно соответствует такому соотношению между периодом применяемого напряжения и временем релаксации, при котором наблюдается затрата энергии на преодоление диполями сопротивления, а именно трения среды.

Для целого перца с влажностью 6,0% в интервале температур 20–100°C и частот 15–45 МГц (рис. 5.б) значения ϵ' составляют 3,4–9,3.

Таким образом, анализируя полученные экспериментальные данные, можно сделать вывод, что наиболее целесообразной частотой электромагнитного поля рабочего генератора токов высокой частоты следует выбрать 27 МГц.

Исходя из этого, повышенный интерес представляет описание зависимостей электрофизических параметров от влажности на данной частоте.

Кривые, характеризующие зависимость тангенса угла диэлектрических потерь целого перца от влажности, представлены на рис. 6.а.

Из рисунка видно, что с ростом влажности значение $\operatorname{tg}\delta$ растет.

По-видимому, это связано с повышением активной составляющей тока с ростом влажности перца.

График указывает на нелинейный характер изменения $\operatorname{tg}\delta$, который объясняется сложностью структуры продукта.

С ростом влажности продукта ϵ' также растет (рис. 6.б). По-видимому, этот феномен наблюдается потому, что с увеличением влажности происходит увеличение количества полярных молекул воды. Это в свою очередь приводит к росту ϵ' .

Известно, что температура продукта во многом влияет на его электрофизические свойства. На рис. 7 представлены зависимости $\operatorname{tg}\delta$ и ϵ' красного

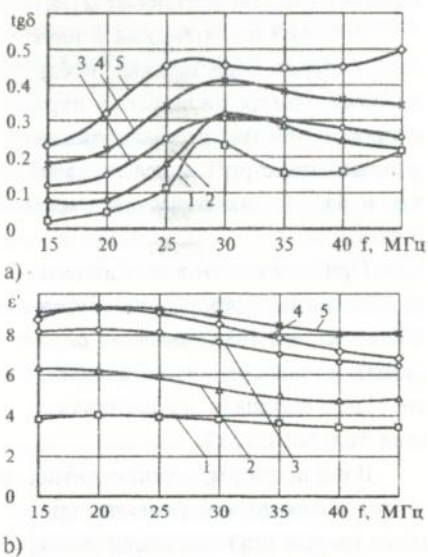


Рис. 5. Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ и ϵ' целого перца от f при его влажности $W=6\%$ и температуре 1–20°C, 2–40°C, 3–60°C, 4–80°C, 5–100°C.

стручкового перца от температуры.

Из графиков видно, что с увеличением температуры значение $\text{tg}\delta$ для целого перца (рис.7а) в интервале влажности 6,0-36,0% растет. Это объясняется уменьшением времени поляризации.

Зависимость ϵ' от температуры для перца (рис. 7.б) показывает, что при влажности 0% ее значение остается постоянной и составляет 3,5. С повышением влажности от 6 до 36% наблюдаются два периода. Первый в интервале $20 \div 80^\circ\text{C}$, второй - $80 \div 100^\circ\text{C}$. Максимальное значение ϵ' выявлено для температуры 80°C . При $W=36\%$ оно составляет 21,8.

Большой практический и научный интерес представляют исследования электрофизических параметров семян тыквы. Были исследованы параметры как целых семян, так и их составных частей - ядра и кожицы.

При всех условиях используемый нами прибор - измеритель добротности Е4-5А позволял определить их зависимость от влажности семян тыквы и их составляющих только до 20%.

В связи с этим, с точки зрения энергетического обеспечения процесса нагрева влажных семян тыквы наибольший интерес представляет рассмотрение зависимостей их электрофизических параметров при влажности 20%.

Проведенные исследования выявили, что наиболее положительный эффект воздействия ТВЧ наблюдается для целых семян

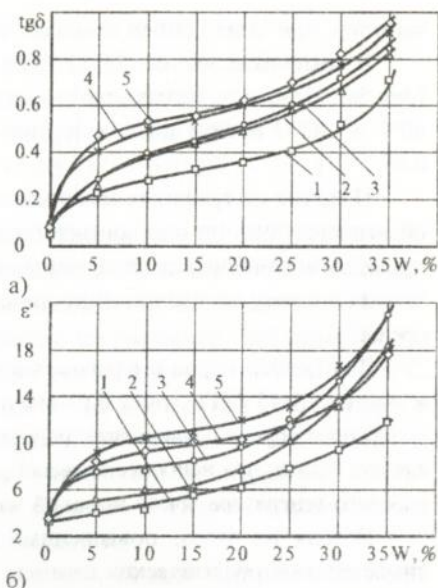


Рис. 6. Зависимость $\text{tg}\delta$ и ϵ' целого перца от W при частоте 27 МГц и температуре 1- 20°C , 2- 40°C , 3- 60°C , 4- 80°C , 5- 100°C .

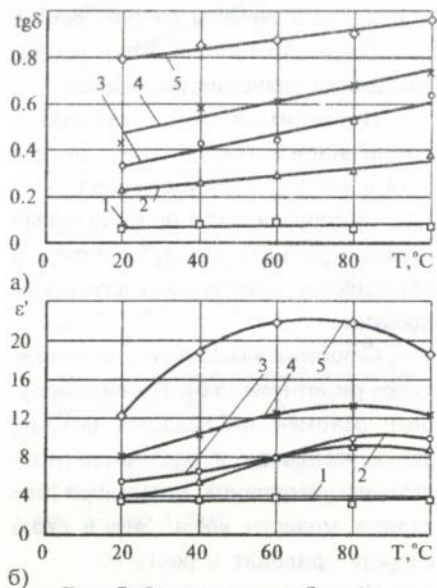


Рис. 7. Зависимость $\text{tg}\delta$ и ϵ' целого перца при частоте 27 МГц и влажности 1-0%, 2-6%, 3-16%, 4-26%, 5-36%.

тыквы. В связи с этим определенный интерес представляют результаты исследований именно целых семян.

На рис. 8 представлены зависимости электрофизических параметров семян тыквы $\text{tg}\delta$ и ϵ' от частоты.

Для температур 20, 40, 60, 80 и 100°C при частотах 17,5-20 МГц обнаруживаются экстремальные максимальные значения $\text{tg}\delta$ (рис. 8.а). Это, по-видимому, объясняется тем, что в указанном интервале частот наблюдается такое соотношение между периодом приложенного напряжения и временем релаксации, при котором происходит наибольшая затрата энергии на преодоление диполями сопротивления, а именно трения среды.

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ' семян тыквы с ростом частоты, как видим из рис. 8.б, увеличивается. При этом характер изменения имеет линейный вид. Полученные формулы в результате математической обработки представлены в таблице 2.

Как видим из рис. 8, с учетом значений параметрического ряда рабочих частот выпускаемых промышленных генераторов ВЧ, наиболее целесообразно сушить целые семена тыквы при частоте генератора 27 МГц. Тепловыделение в семенах тыквы на этой частоте будет наибольшим.

Таблица 2.

№ п/п	Температура семян	Предел частоты МГц	Полученная формула уровня регрессии
1	20	15,0-33,3	$\epsilon' = 15 + 0,27f$
2	40	15,0-27,0	$\epsilon' = 11 + 0,33f$
3	60	15,0-27,0	$\epsilon' = 5 + 0,74f$
4	80	15,0-33,3	$\epsilon' = 5 + 0,63f$
5	100	15,0-40,0	$\epsilon' = \text{const} = 15$

Кривые, характеризующие зависимости диэлектрических свойств семян тыквы от их влажности представлены на рис. 9.

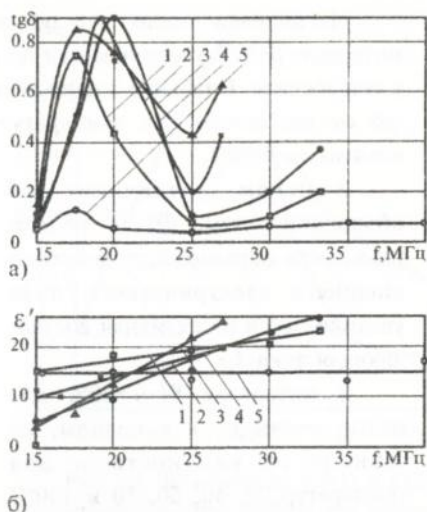


Рис. 8. Зависимость $\text{tg}\delta$ (а) и ϵ' (б) целых семян тыквы от частоты электромагнитного поля f при влажности продукта $W=20\%$ и температуре 1-20°C; 2-40°C; 3-60°C; 4-80°C; 5-100°C.

Из рисунка видно, что $\operatorname{tg} \delta$ во всех случаях с ростом влажности в интервале 0-20% увеличивается по параболам, выпуклостью направленным к оси абсцисс. В таблице 3 приведены уравнения математической зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от влажности для температур 20, 40, 60, 80 и 100°C в интервале влажности 0-20%.

В целом, увеличение $\operatorname{tg} \delta$ объясняется тем, что с ростом влажности образцов при действии внешнего электрического поля увеличивается их активная составляющая тока I_a .

В интервале $W=0 \div 20\%$ для целых семян ϵ' , в основном, не зависит от влажности и для температур 20, 40, 60, 80 и 100°C ее значение составило 20,5; 20,0; 23,7; 19,0 и 14,5.

Температура в очень большой степени влияет на параметры диэлектриков, в частности, на относительную диэлектрическую проницаемость ϵ' и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$.

Таблица 3.

Температура образца	Полученная формула
20	$\operatorname{tg} \delta = 10^{-3}(0,2W^2 - W + 14)$
40	$\operatorname{tg} \delta = 10^{-3}(1,4W^2 - 8W + 20)$
60	$\operatorname{tg} \delta = 10^{-3}(2,2W^2 - 15W + 30)$
80	$\operatorname{tg} \delta = 10^{-3}(0,3W^2 - 0,7W + 15)$
100	$\operatorname{tg} \delta = 10^{-3}(0,2W^2 - 1,9W + 15)$

На рис. 10 представлены зависимости $\operatorname{tg} \delta$ и ϵ' семян тыквы от температуры. Как видно из графиков, $\operatorname{tg} \delta$ для целых семян имеет довольно сложный характер. В указанном интервале температур для целых семян при температуре 60°C наблюдается максимум. По-видимому, в случае малых температур и для материалов с малой сквозной проводимостью, какими являются семена тыквы, происходит увеличение активной составляющей тока из-за возникающих

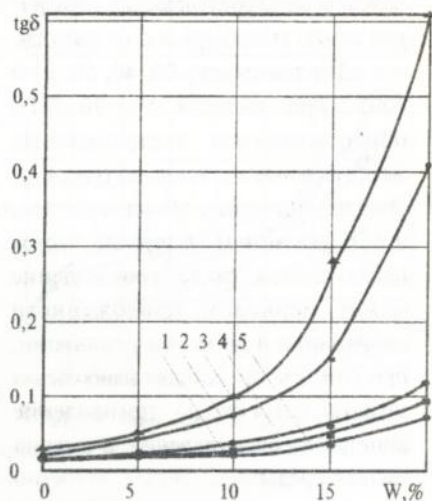


Рис. 9. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ целых семян тыквы от их влажности W при $f=27$ МГц и температуре: 1-20°C; 2-40°C; 3-60°C; 4-80°C; 5-100°C.

поляризационных эффектов, что приводит к увеличению $\text{tg}\delta$.

Полученная зависимость ϵ' от температуры выявила наличие двух периодов (рис. 10(2)). Первый период составляет 20-60°C, второй - 60-100°C. Значение ϵ' в первом периоде практически не изменяется и ориентировочно может быть принято равным 25,0.

Во втором периоде наблюдается уменьшение ϵ' с ростом температуры. Минимальное значение ϵ' приобретает при температуре образцов 100°C и равно для целых семян 15,0.

Такой характер зависимости $\epsilon' = f(T)$, видимо, объясняется изменением внутренней структуры материала при повышении температуры.

Исследование электрофизических параметров какао крупки различных фракций (1,0; 1,0-2,0; 2,0-4,0 мм) выявило сложную зависимость $\text{tg}\delta$ (рис. 11) от частоты, при этом плотность заполнения конденсатора соответственно составляла 708, 620, 530 кг/м^3 .

Для всех трех фракций при частоте 35 МГц обнаруживаются экстремальные максимальные значения $\text{tg}\delta$. Соответственно по фракциям это составило $5,0 \cdot 10^{-2}$; $5,6 \cdot 10^{-2}$ и $6,1 \cdot 10^{-2}$.

Во всем измеряемом спектре частот ϵ' для различных фракций не менялась и для соответствующих фракций составила 1,5; 2,0; 1,6.

Таким образом, исходя из параметрического ряда значений частот промышленных генераторов следует, видимо, для сушки какао крупки выбрать генератор с частотой 40,06 МГц.

Как показали исследования (рис. 12), с повышением влажности какао крупки $\text{tg}\delta$ увеличивается по линейному закону.

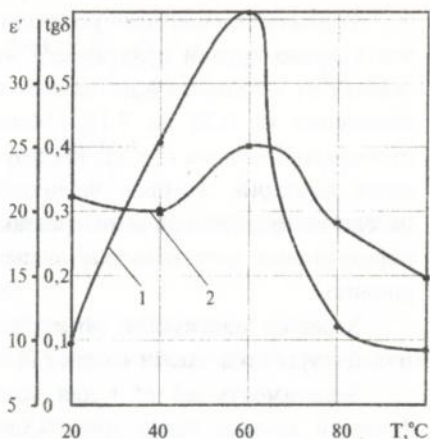


Рис. 10. Зависимость $\text{tg}\delta(1)$ и $\epsilon'(2)$ от температуры при $W=20\%$ для целых семян тиквы.

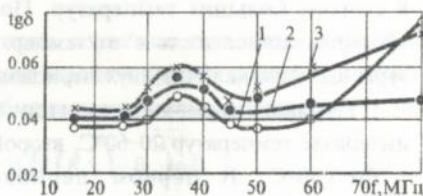


Рис. 11. Зависимость $\text{tg}\delta$ от f при $t=20^\circ\text{C}$ и $W=7,1\%$: 1-фракция до 1 мм; 2-фракция 1-2 мм; 3-фракция 2-4 мм.

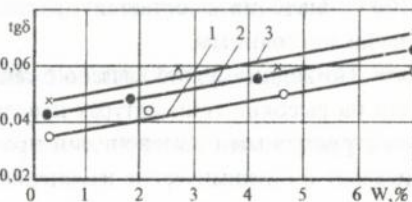


Рис. 12. Зависимость $\text{tg}\delta$ от W при $t=20^\circ\text{C}$ и $f=27$ МГц: 1-фракция до 1 мм; 2-фракция 1-2 мм; 3-фракция 2-4 мм.

Результаты измерений показали, что ϵ' какао крупки практически не зависит от влажности в диапазоне ее изменения от 0,28 до 7,1%. Мало отличаются значения ϵ' и для исследуемых фракций. Разброс значений находится практически в интервалах, определяемых погрешностью эксперимента.

Характер зависимости $\text{tg}\delta$ и ϵ' от температуры представлен на рис. 13.

Зависимость $\text{tg}\delta$ от t для всех фракций какао (рис. 13.а) имеет ярко выраженный максимум. Как видно из указанного рисунка, с ростом их размеров максимум $\text{tg}\delta$ возрастает по величине и смещается в сторону больших температур. Полученная зависимость ϵ' от температуры выявила наличие двух периодов.

Первый период находится в интервале температур 20–60°C, второй – 60–100°C. В первом периоде значение ϵ' растет.

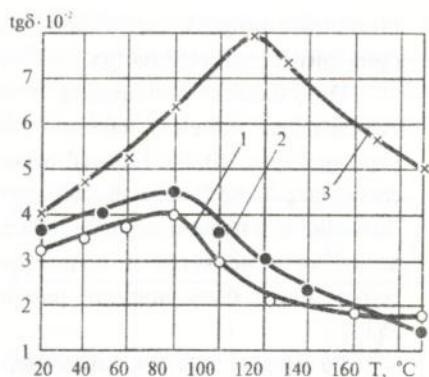
Во втором периоде при дальнейшем повышении температуры до 100°C значение ϵ' остается практически постоянным.

По-видимому, это связано с тем, что на высоких температурах наряду со структурными изменениями происходят и биохимические изменения.

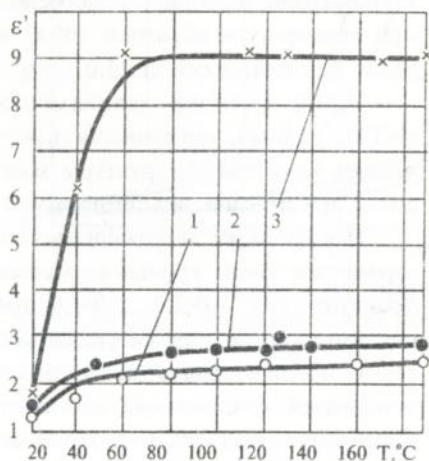
В четвертой главе отражены математические модели тепло- и массопереноса во влажных сложных гетерогенных системах, какими являются шиповник, красный стручковый перец, семена тыквы и какао крупка.

Если смоделировать шиповник в виде шара, перенос энергии внутри шара осуществляется тепловой движущей силой, переносом веществ, а также внутренним источником тепла.

Исходя из этого, математическая формулировка задачи запишется следующим образом:



а)



б)

Рис. 13. Зависимость а) $\text{tg}\delta$ и б) ϵ' от W при $t=20^\circ\text{C}$ и $f=27$ МГц: 1-фракция до 1 мм; 2-фракция 1–2 мм; 3-фракция 2–4 мм.

$$\frac{d[r t(r, \tau)]}{d\tau} = a_q \frac{d^2[r t(r, \tau)]}{dr^2} + \frac{\varepsilon \gamma' c'_r}{c_q} \cdot \frac{d[r \theta(r, \tau)]}{d\tau} + \frac{Q_r}{c_q \rho} \quad (6)$$

$$\frac{d[r \theta(r, \tau)]}{d\tau} = a_m \frac{d^2[r \theta(r, \tau)]}{dr^2} + a_m \delta \frac{d^2[r \theta(r, \tau)]}{dr^2} \quad (7)$$

где a_q , a_m - соответственно коэффициенты температуропроводности и потенциалопроводности массопереноса, $\text{м}^2/\text{с}$;

ε - критерий фазового перехода;

γ' - удельная теплота фазового перехода, кДж/кг ;

c'_r , c_q - соответственно удельная массоемкость, $\text{кг}/(\text{К}^\circ\text{М})$ и теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг К})$;

Q_r - внутренний источник тепла, Вт/м^3 ;

ρ - плотность сухой части влажности тела, кг/м^3 ;

d - коэффициент Сорэ для влажного тела, $1/\text{град}$;

q - потенциал влагопереноса, $^\circ\text{М}$.

Исходя из условия, решение задачи выполнено при граничных условиях третьего рода.

При нагревании влажного капиллярно-пористого тела, когда теплообмен поверхности тела с окружающей средой происходит по закону конвекции, граничные условия тепло- и массообмена в этом случае будут иметь вид:

$$-\lambda_q \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial r} + \alpha [t_c - t(R, \tau)] - (1 - \varepsilon) \rho \beta (\theta(R, \tau) - \theta_p) = 0 \quad (8)$$

$$\lambda_m \left[\frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial r} + \delta \cdot \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial r} \right] + \beta (\theta(R, \tau) - \theta_p) = 0 \quad (9)$$

где λ_q , λ_m - соответственно коэффициенты теплопроводности $\text{Вт}/(\text{м К})$ и массопроводности, $\text{кг}/(\text{мс}^\circ\text{М})$;

α , β - соответственно коэффициенты теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{К})$ и влагообмена, $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{с}^\circ\text{М})$.

Они выражают уравнение баланса тепла, подведенного к поверхности тела, и уравнение массы вещества.

Начальные условия определяются заданием закона распределения температуры и потенциала в начальный момент времени.

$$\left. \begin{aligned} T(r, 0) &= t_0 \\ \theta(r, 0) &= \theta_0 \end{aligned} \right\}$$

Используя преобразования Лапласа, были получены решения системы дифференциальных уравнений внутреннего тепло- и массообмена в виде:

$$T = \frac{t(r, \tau) - t_0}{t_c - t_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left(C_{n1} \frac{\sin v_2 \mu_n \frac{r}{R}}{\frac{r}{R}} - C_{n2} \frac{\sin v_1 \mu_n \frac{r}{R}}{\frac{r}{R}} - \frac{C_{n3}}{\frac{r}{R}} \right) \exp(-\mu_n^2 F_0) \quad (10)$$

$$= \frac{U_0 - U(r, \tau)}{U_0 - U_p} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left(C'_{n2} (1 - v_1^2) \frac{\sin v_1 \mu_n \frac{r}{R}}{\frac{r}{R}} - C'_{n1} (1 - v_2^2) \frac{\sin v_2 \mu_n \frac{r}{R}}{\frac{r}{R}} - \frac{C_{n3}}{\frac{r}{R}} \right) \exp(-\mu_n^2 F_0) \quad (11)$$

Определенные трудности исследования на адекватность данной модели выражаются в наличии двух переменных, что затрудняет экспериментальным путем доказать ее адекватность. Для упрощения модели окончательные уравнения температуры и влажности (10), (11) были усреднены по радиусу. В результате этих преобразований вышеуказанные уравнения могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{T}(\tau) &= 3 \int_0^1 x^2 T(x, \tau) dx = \\ &= 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^1 [C_{n1} x \cdot \sin v_2 \mu_n x - C_{n2} x \cdot \sin v_1 \mu_n x - C_{n3} x] \exp(-\mu_n^2 F_0) dx \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \bar{U}(\tau) &= 3 \int_0^1 x^2 \theta(x, \tau) dx = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^1 [C'_{n2} (1 - v_1^2) x \cdot \sin v_1 \mu_n x - \\ &- C'_{n1} (1 - v_2^2) x \cdot \sin v_2 \mu_n x - C_{n3} x] \exp(-\mu_n^2 F_0) dx \end{aligned} \quad (13)$$

Упрощение результатов (12) и (13) при определенных допущениях дало возможность получить выражения для безразмерных параметров в виде:

$$\bar{T} = C_1 + A_1 e^{B_1 \tau} \quad (14)$$

$$\bar{U} = C_2 + A_2 e^{B_2 \tau} \quad (15)$$

где $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ - константы данных уравнений.

Рассчитав константы, входящие в эти уравнения, по известным методикам, были получены соответствующие уравнения для T и U . При этом температура изменялась в пределах 60-100°C, а влажность - 6-34%.

Проверка на адекватность полученных выражений по критерию Фишера показала, что данные уравнения согласуются с исходными в пределах 20%.

Отмечено, что в последнее время все больше в промышленных сушильных устройствах с применением ТВЧ в качестве основной рабочей ячейки используют коаксиальный конденсатор. Однако, его использование несколько затруднено из-за отсутствия теоретической модели, позволяющей рассчитывать процесс тепло- и массопереноса для этих условий.

Если представить коаксиальный конденсатор в виде неограниченного

полого цилиндра, то математическая формулировка модели может быть записана в следующем виде:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a_q \left(\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon' r' c'_T}{c_q} \cdot \frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial \tau} + \frac{Q}{c_q \rho} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 \theta(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial r} \right) + a_m \delta \left(\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (17)$$

с граничными условиями:

$$\lambda_q \frac{\partial t(R_1, \tau)}{\partial r} + \alpha [t_c - t(R_1, \tau)] - (1 - \varepsilon) \rho \beta (\theta(R_1, \tau) - \theta_p) = 0 \quad (18)$$

$$-\lambda_q \frac{\partial t(R_2, \tau)}{\partial r} + \alpha [t_c - t(R_2, \tau)] - (1 - \varepsilon) r' \beta (\theta(R_2, \tau) - \theta_p) = 0 \quad (19)$$

$$-\lambda_m \left[\frac{\partial \theta(R_1, \tau)}{\partial r} + \delta \cdot \frac{\partial t(R_1, \tau)}{\partial r} \right] + \beta (\theta(R_1, \tau) - \theta_p) = 0 \quad (20)$$

$$\lambda_m \left[\frac{\partial \theta(R_2, \tau)}{\partial r} + \delta \cdot \frac{\partial t(R_2, \tau)}{\partial r} \right] + \beta (\theta(R_2, \tau) - \theta_p) = 0 \quad (21)$$

Используя операционный метод, были получены выражения для расчета температуры и влагосодержания, которые имеют вид:

$$t(r, \tau) = t_0 + (t_c - t_0) \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[D_{n1} I_0 \left(\frac{\mu_n}{R_1} r \right) \mu_n^2 + D_{n2} Y_0 \left(\frac{\mu_n}{R_1} r \right) \mu_n^2 \right] \exp(-\mu_n^2 F_0) + \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{\infty} \left[D_{n3} I_0 \left(\frac{\mu_j}{R_2} r \right) \mu_j^2 + D_{n4} Y_0 \left(\frac{\mu_j}{R_2} r \right) \mu_j^2 + D_{n5} \right] \exp \left(-\mu_j^2 \frac{R_1^2}{R_2^2} F_0 \right) \right\} \quad (22)$$

$$u(r, \tau) = u_0 - (u_0 - u_p) \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{D_{n1}}{c'_T} \left(1 - \frac{\mu_n^2}{R_1^2} \right) I_0 \left(\frac{\mu_n}{R_1} r \right) \mu_n^2 + \right. \right. \\ \left. + \frac{D_{n2}}{c'_T} \left(1 - \frac{\mu_n^2}{R_1^2} \right) Y_0 \left(\frac{\mu_n}{R_1} r \right) \mu_n^2 \right] \exp(-\mu_n^2 F_0) - \sum_{j=1}^{\infty} \left[\frac{D_{n3}}{c'_T} \left(1 - \frac{\mu_j^2}{R_2^2} \right) I_0 \left(\frac{\mu_j}{R_2} r \right) \mu_j^2 + \right. \\ \left. + \frac{D_{n4}}{c'_T} \left(1 - \frac{\mu_j^2}{R_2^2} \right) Y_0 \left(\frac{\mu_j}{R_2} r \right) \mu_j^2 - D_{n5}^* \right] \exp \left(-\mu_j^2 \frac{R_1^2}{R_2^2} F_0 \right) \right\} \quad (23)$$

Уравнения (22) и (23) были усреднены по радиусу по следующим выражениям:

$$\bar{t}(\tau) = \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} r T(r, \tau) dr \quad (24)$$

$$\bar{u}(\tau) = \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} r U(r, \tau) dr \quad (25)$$

Полученные усредненные потенциалы могут быть представлены в виде выражений (14) и (15).

Рассчитав константы, входящие в эти уравнения, по известным методикам, были получены окончательные выражения для T и U .

Проверка на адекватность по критерию Фишера показала, что вышеуказанные уравнения хорошо согласуются с исходными данными.

Отмечается, что если семена тыквы условно принять за пластину, расположенную в коаксиальном конденсаторе, то данную систему можно рассматривать как полый ограниченный цилиндр с внутренним источником тепла.

Решение этой задачи можно представить как произведение решений для неограниченного полого цилиндра и неограниченной пластины, пересечением которой с неограниченным цилиндром образован конечный цилиндр, т. е.

$$\begin{aligned} T(r, z, \tau) &= T(r, \tau) \Gamma(z, \tau) \\ \theta(r, z, \tau) &= \theta(r, \tau) \Theta(z, \tau) \end{aligned} \quad (26)$$

$T(r, \tau)$; $\theta(r, \tau)$ - решение для неограниченного полого цилиндра;

$\Gamma(z, \tau)$; $\Theta(z, \tau)$ - решение для неограниченной пластины.

Среднее значение потенциалов в ограниченном цилиндре определяются по уравнениям:

$$\bar{T}(\tau) = \frac{2}{1 - \bar{R}_1^2} \cdot \frac{1}{\bar{H}} \int_{\bar{R}_1}^1 \int_{\bar{Z}_1}^1 X T(x, Z, \tau) dx \cdot dz \quad (27)$$

$$\bar{\theta}(\tau) = \frac{2}{1 - \bar{R}_1^2} \cdot \frac{1}{\bar{H}} \int_{\bar{R}_1}^1 \int_{\bar{Z}_1}^1 X \theta(x, z, \tau) dx \cdot dz \quad (28)$$

где безразмерные координаты определяются следующим образом:

$$\bar{H} = \frac{H}{R_2}; \quad \bar{R}_1 = \frac{R_1}{R_2}; \quad \bar{Z}_1 = \frac{Z_1}{R_2}; \quad \bar{Z}_2 = \frac{Z_2}{R_2}; \quad X = \frac{r}{R_2}; \quad Z = \frac{z}{R_2};$$

Из выражений (27) и (28), после несложных преобразований можно получить, как и ранее, (14) и (15).

Проверка на адекватность по критерию Фишера показала, что данные уравнения согласуются с исходными данными.

В пятой главе приведены результаты исследований по кинетике процесса сушки шиповника. Дана общая характеристика и конструкция экспериментальной установки для исследования процесса.

Установка состоит из сушильной камеры 1 (рис. 14), внутри которой размещен коаксиальный конденсатор 2, выполненный в форме полый

цилиндрической чаши. Боковые стенки коаксиального конденсатора выполнены из диэлектрика типа Ф-4. Пластины конденсатора подключены к высокочастотному коаксиальному волноводу, причем внутренняя - к высокочастотному фидеру, а наружная - к корпусу.

Коаксиальный конденсатор соединен с механическими весами 3. К камере подсоединены два воздуховода 4 и 5 для подачи и выхода сушильного агента.

Высокочастотное питание установки от генератора ЛГД - 6000 А (НРБ) обеспечивается посредством коаксиального волновода 6.

Сыпучий материал загружается в коаксиальный конденсатор. В случае конвективного энергоподвода сушильный агент, нагретый в электрокалорифере 7, вентилятором 8 через систему воздуховодов подается через патрубки в сушильную камеру 1.

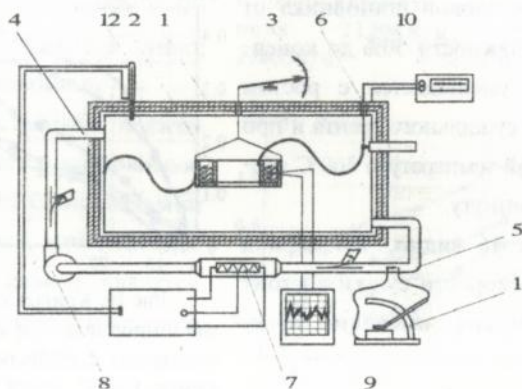


Рис. 14. Лабораторная установка для исследования кинетики процесса сушки с/х сырья.

При нагреве продукта ТВЧ на обкладки коаксиального конденсатора, между которыми размещен продукт, подается высокочастотное питание. Выход образующихся паров влаги происходит за счет естественной конвекции.

При сочетании нагрева ТВЧ и конвективного нагрева, вышеописанные процессы происходят одновременно. В процессе сушки замечались убыль массы, изменение температуры продукта, напряжение на обкладках конденсатора, скорость и температура горячего воздуха и расход электроэнергии. При достижении требуемой конечной влажности процесс сушки прекращается и высушенный продукт выгружается из конденсатора.

Температура сушильного агента, подаваемого в сушильную камеру, поддерживалась системой автоматики. Основными элементами схемы

являются контактный термометр 12 (рис. 14), электрокалорифер (ТЭН) 7 и электронный блок.

Скорость движения воздуха в сушильной камере поддерживалась постоянной и измерялась по показаниям микроманометра.

Кинетика процесса сушки шиповника при конвективном энергоподводе представлена на рис. 15, 16 и 17.

Как видно из рис. 15, время процесса сушки плодов шиповника от начальной влажности 50% до конечной - 14% уменьшается с ростом температуры сушильного агента и при максимальной температуре 100°C составило 351 минуту.

Из рис. 16 видно, что период убывающей скорости сушки состоит из двух участков, имеющих точку перегиба.

Причем, значение влажности шиповника, при котором отмечается точка перегиба, в основном, не подчиняется линейному росту температуры продукта. Так, при температуре шиповника 60°C эта точка соответствует 21% влажности, при 70°C - 19%, а для 100°C - 23%. Это объясняется тем, что для таких сложных гетерогенных систем, какой является шиповник, изменение полей влажности в процессе сушки в большей степени зависит от внутренних биохимических процессов.

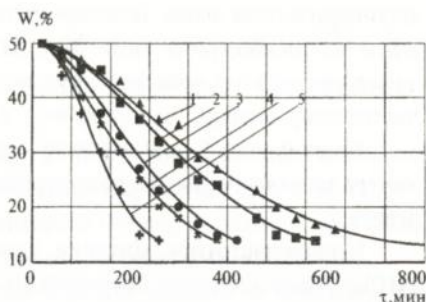


Рис. 15. Кривые сушки плодов шиповника при конвективном энергоподводе с температурой сушильного агента: 1-60°C, 2-70°C, 3-80°C, 4-90°C, 5-100°C.

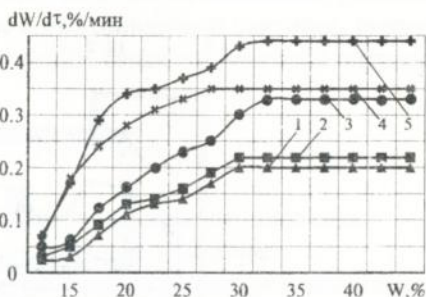


Рис. 16. Кривые скорости сушки плодов шиповника при конвективном энергоподводе с температурой сушильного агента: 1-60°C, 2-70°C, 3-80°C, 4-90°C, 5-100°C.

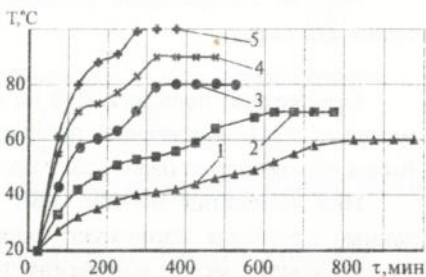


Рис. 17. Температурные кривые сушки плодов шиповника при конвективном энергоподводе с температурой сушильного агента: 1-60°C, 2-70°C, 3-80°C, 4-90°C, 5-100°C.

мических изменений в шиповнике, нежели от его температуры.

Значение максимальной скорости сушки, как видно из графиков, увеличивается по мере роста температур сушильного агента (рис. 16).

На температурных кривых (рис. 17) показано, что в начальной стадии температура поверхности материала повышается, быстро достигается температура мокрого термометра и на протяжении всего первого периода процесса сушки она остается постоянной.

Анализ качественных показателей высушенного шиповника, таких как витамин С, провитамин А и масло показал, что наиболее оптимальным режимом является сушка шиповника при температуре сушильного агента 100°C. На рис. 18 и 19 представлены кривые сушки и скорости сушки при температуре сушильного агента 100°C при различных напряженностях поля.

Из приведенных исследований видно, что высокочастотный нагрев в сочетании с конвективным способом энергоподвода является более перспективным для процесса обезвоживания плодов шиповника. При этом процесс сушки проводится, как показали исследования, в 2 этапа. На первом этапе до получения конечной влажности шиповника 34% следует осуществлять конвективный энергоподвод ($t=100^{\circ}\text{C}$), на втором этапе для получения равновесной влажности 14% использовать комбинированный энергоподвод - конвекция

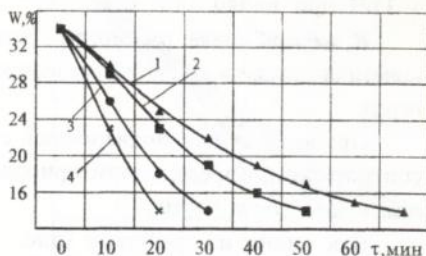


Рис. 18. Кривые сушки плодов шиповника при комбинированном энергоподводе - конвекция + ТВЧ при температуре сушильного агента $T=100^{\circ}\text{C}$ и напряженности электромагнитного поля: 1-21200 В/м, 2-25600 В/м, 3-29800 В/м, 4-34000 В/м.

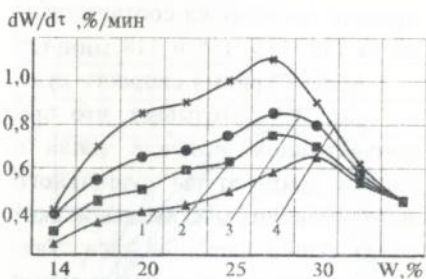


Рис. 19. Кривые скорости сушки плодов шиповника при комбинированном энергоподводе - конвекция + ТВЧ при температуре сушильного агента $T=100^{\circ}\text{C}$ и напряженности электромагнитного поля: 1-21200 В/м, 2-25600 В/м, 3-29800 В/м, 4-34000 В/м.

+ ТВЧ при $E=340 \cdot 10^2$ В/м.

В шестой главе рассмотрен вопрос экспериментального исследования кинетики процесса конвективно-высоочастотной сушки красного стручкового перца.

Процессу сушки подвергалась смесь семян перца и его перикарпии в соотношении, определяемом природными функциями произрастания того или иного сорта перца.

Как видно из графиков (рис. 20), время процесса сушки перца во многом зависит от температуры сушильного агента. Так, если при температуре сушильного агента 60°C продолжительность сушки от начальной влажности 78% до конечной 6% составило 275 минут, то при 70, 80, 90 и 100°C тот же процесс происходил соответственно за 198, 155, 135 и 118 минут.

Анализ кривых скорости сушки (рис. 21) показывает, что при конвективном подводе тепла с ростом температуры сушильного агента величина максимальной скорости сушки увеличивается. Так, при температуре сушильного агента 60°C значение максимальной скорости сушки составило 0,31 %/мин, а при температурах 70, 80, 90 и 100°C - соответственно 0,43; 0,53; 0,62 и 0,75 %/мин.

Процесс сушки перца при комбинированном энергоподводе проводился в два этапа. На первом, до влажности 36%, он сушился только конвекцией, на втором, до влажности 6%, при комбинированном энергоподводе - конвекция + ТВЧ.

Доказано, что сушка смеси из семян и перикарпии является более

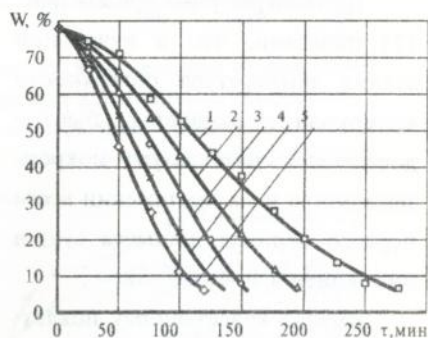


Рис. 20. Кривые сушки красного стручкового перца при конвективном энергоподводе с температурой сушильного агента: 1 - 60°C , 2 - 70°C , 3 - 80°C , 4 - 90°C , 5 - 100°C .

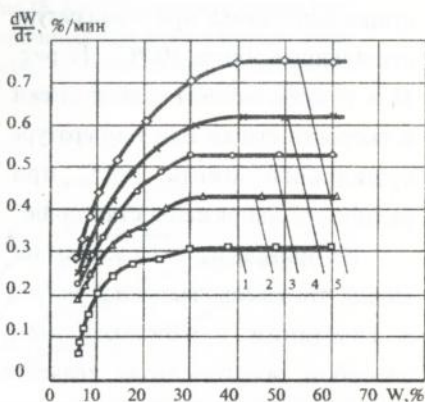


Рис. 21. Кривые скорости сушки красного стручкового перца при конвективном энергоподводе с температурой сушильного агента: 1 - 60°C , 2 - 70°C , 3 - 80°C , 4 - 90°C , 5 - 100°C .

рациональной, нежели отдельных частей.

Исследования проводились при напряженностях электрического поля 8500, 10500, 12500, 14500 и 16500 В/м.

Результаты исследований для температуры сушильного агента 60°C представлены на рис. 22 и 23.

Как видно из графиков (рис. 22), с ростом напряженности поля время процесса сушки перца сокращается. Так, если при напряженности электромагнитного поля $E=8500$ В/м время процесса сушки до конечной влажности $W=6\%$ составило 55 минут, то при $E=16500$ В/м - 35 минут.

Сокращение продолжительности процесса сушки плодов красного стручкового перца обусловлено более интенсивным выделением тепла в единице объема перца с ростом напряженности поля.

Как видно из приведенных графиков (рис. 23), при наложении электромагнитного поля высокой частоты период с постоянной скоростью сушки практически не наблюдается. Процесс сушки протекает в основном в периоде падающей скорости сушки.

С ростом напряженности электромагнитного поля увеличивается значение максимальной скорости сушки и при $E=16500$ В/м оно составило 0,98 %/мин.

Характер кривых сушки и скорости сушки перца в исследуемых интервалах температур не изменялся. Однако, с ростом температуры сушильного агента и при одном и том же значении напряженности поля время процесса

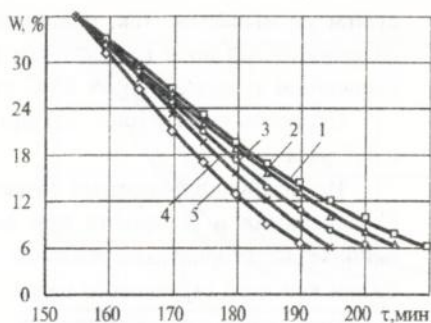


Рис. 22. Кривые сушки красного стручкового перца при комбинированном энергоподводе - конвекция + ТВЧ и температуре сушильного агента 60°C и напряженности электромагнитного поля 1-8500 В/м, 2-10500 В/м, 3-12500 В/м, 4-14500 В/м, 5-16500 В/м.

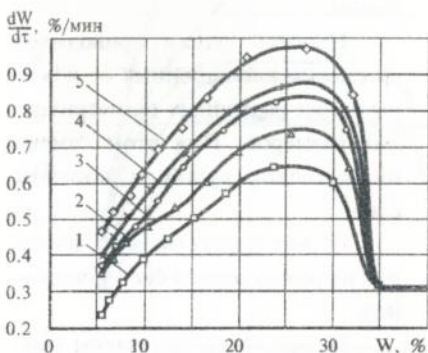


Рис. 23. Кривые скорости сушки красного стручкового перца при комбинированном энергоподводе - конвекция + ТВЧ при температуре сушильного агента 60°C и напряженности электромагнитного поля 1-8500 В/м, 2-10500 В/м, 3-12500 В/м, 4-14500 В/м, 5-16500 В/м.

сушки уменьшается. Так, при температуре сушильного агента 100°C и при напряженности поля $E=16500 \text{ В/м}$ (рис. 24) оно составило 16 минут, т.е. по сравнению с температурой 60°C уменьшилось более чем в два раза.

Скорость сушки (рис. 25) при этом режиме увеличивается более чем в 1,7 раза.

Исследование основных качественных показателей, таких как витамин С, капсаицин и β -каротин при различных режимах сушки выявило, что наиболее благоприятным режимом сушки красного стручкового перца является сушка с комбинированным энергоподводом при температуре сушильного агента 60°C и напряженности электромагнитного поля $E=16500 \text{ В/м}$.

В седьмой главе отражены основные результаты исследований кинетики процесса сушки семян тыквы.

Процесс сушки проводился со смесью неочищенных от кожуры семян различных геометрических размеров. При этом семена подвергались сушке в плотном слое.

Во всех опытах скорость движения нагретого воздуха была постоянной.

На рис. 26 представлены кривые сушки семян тыквы при конвективном подводе тепла при температурах сушильного агента $60, 70, 80, 90$ и 100°C . Как видно из рис. 26, время обезвоживания семян тыквы от влажности 40% до 5% во многом зависит от температуры сушильного агента. Так, при температуре 60°C оно составило 310 минут, а при 100°C - 150 минут.

На кривых скорости сушки

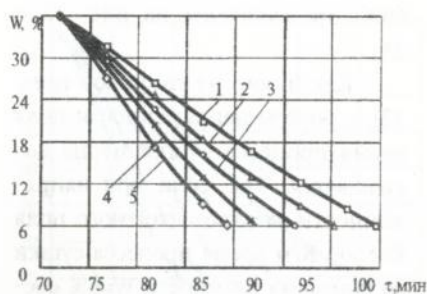


Рис. 24. Кривые сушки красного стручкового перца при комбинированном энергоподводе - конвекция + ТВЧ при температуре сушильного агента 100°C и напряженности электромагнитного поля 1-8500 В/м, 2-10500 В/м, 3-12500 В/м, 4-14500 В/м, 5-16500 В/м.

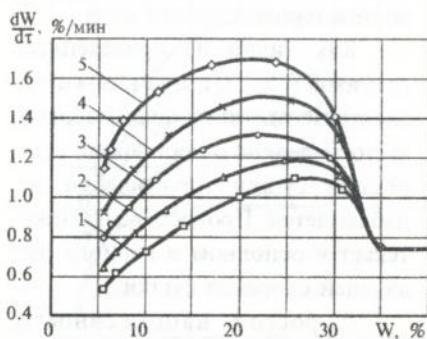


Рис. 25. Кривые скорости сушки красного стручкового перца при комбинированном энергоподводе - конвекция + ТВЧ при температуре сушильного агента 100°C и напряженности электромагнитного поля 1-8500 В/м, 2-10500 В/м, 3-12500 В/м, 4-14500 В/м, 5-16500 В/м.

(рис. 27) для конвективного энергоподвода видно, что с ростом температуры сушильного агента значение максимальной скорости сушки растет. Так, при температуре 60°C оно составило $17 \cdot 10^{-2}$, а при 100°C - $30 \cdot 10^{-2} \text{ \%}/\text{мин}$.

При наложении электрического поля высокой частоты интенсивность процесса сушки значительно возрастает. Наиболее высокая интенсивность сушки, при хороших качественных показателях семян и различных напряженностях поля была выявлена при температуре сушильного агента 100°C . Как видно из рис. 28, с ростом напряженности электрического поля продолжительность процесса сокращается. Например, если при напряженности электрического поля $E=24600 \text{ В/м}$ равновесная влажность достигается за 135 минут, то при напряженности $E=44000 \text{ В/м}$ та же влажность достигается за 88 минут, то есть сокращается более чем в 1,5 раза.

Как видно из рис. 29, при этой же температуре для комбинированного энергоподвода при наложении электрического поля высокой частоты период с постоянной скоростью сушки практически не наблюдается. Процесс сушки протекает в основном в периоде падающей скорости сушки.

Максимальное значение скорости сушки наблюдается при $E=44000 \text{ В/м}$ и составляет $3,0 \text{ \%}/\text{мин}$.

Анализ качественных показателей, из которых основным считается масло, выявил, что наилучшим технологическим режимом для сушки

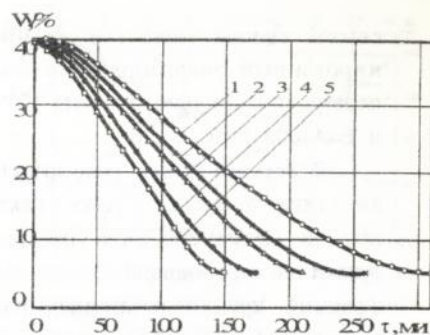


Рис. 26. Кривые сушки семян тыквы при конвективном энергоподводе с температурой сушильного агента: 1- 60°C , 2- 70°C , 3- 80°C , 4- 90°C , 5- 100°C .

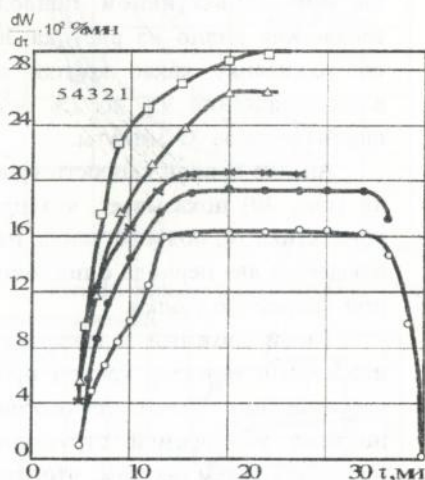


Рис. 27. Кривые скорости сушки семян тыквы при конвективном энергоподводе с температурой сушильного агента: 1- 60°C , 2- 70°C , 3- 80°C , 4- 90°C , 5- 100°C .

семян тиквы является комбинированный энергоподвод с температурой сушильного агента 100°C и $E=44000 \text{ В/м}$.

В восьмой главе рассмотрена кинетика процесса сушки какао крупки. Отмечено, что процесс сушки ее проводился со смесью фракций крупки различных размеров: до 1 мм; $1\div 2 \text{ мм}$ и $2\div 4 \text{ мм}$.

На рисунке 30 представлены кривые сушки, скорости сушки и температурные кривые какао крупки при конвективном подводе тепла. Как видно из рисунка 30, обезвоживание какао крупки от влагосодержания 9% до 2% осуществляется за 32 минуты.

Анализ кривой скорости сушки (рис. 30) показывает, что при конвективном подводе тепла наблюдается два периода с постоянной скоростью сушки.

Такой сложный и несколько необычный характер кривой процесса, видимо, объясняется особенностями внутренней структуры материала и тем фактом, что при обжарке какао крупки одновременно происходят и биохимические изменения, связанные с удалением некоторых летучих веществ и также вызывающие потери массы.

Определенный интерес для интенсификации процесса сушки какао крупки имеет использование токов высокой частоты.

Результаты исследования по кинетике процесса сушки какао крупки токами высокой частоты представлены на рисунках 31 и 32.

При наложении электрического поля высокой частоты интенсивность

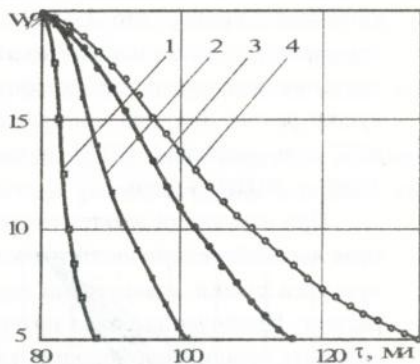


Рис. 28. Кривые сушки семян тиквы при комбинированном энергоподводе - конвекция + ТВЧ при температуре сушильного агента 100°C и напряженности электромагнитного поля: 1-44000 В/м, 2-38000 В/м, 3-31200 В/м, 4-24600 В/м.

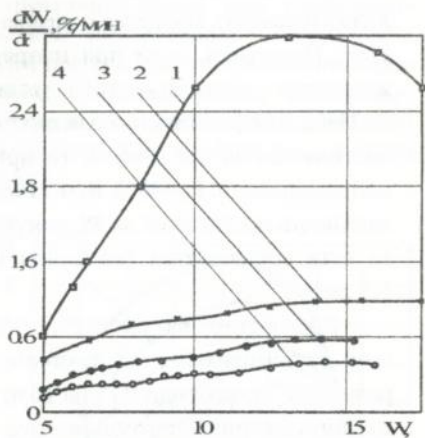


Рис. 29. Кривые скорости сушки семян тиквы при комбинированном энергоподводе - конвекция + ТВЧ при температуре сушильного агента 100°C и напряженности электромагнитного поля: 1-44000 В/м, 2-38000 В/м, 3-31200 В/м, 4-24600 В/м.

процесса сушки значительно возрастает. Как видно из рисунка 31, с ростом напряженности электрического поля продолжительность процесса сокращается. Например, если при напряженности электрического поля $E=485 \cdot 10^2$ В/м равновесная влажность достигается за 11 минут, то при напряженности $E=900 \cdot 10^2$ В/м та же влажность достигается за 3 минуты, то есть сокращается примерно в 3,6 раза.

Как видно из рисунка 32, при наложении электрического поля высокой частоты период с постоянной скоростью сушки практически не наблюдается. Процесс сушки протекает в основном в периоде падающей скорости сушки.

С ростом напряженности электрического поля скорость процесса сушки увеличивается. Так, при напряженности электрического поля $E=485 \cdot 10^2$ В/м максимальная скорость процесса составила 1,14 %/мин, а при напряженности электрического поля $E=900 \cdot 10^2$ В/м - 2,85 %/мин.

Для оценки качества высушенного продукта при указанных методах сушки был проведен качественный анализ крупки, который предусматривал определение ароматических веществ и летучих кислот.

Исследования показали, что сохранение ароматических веществ в какао крупке при сушке токами высокой частоты тем больше, чем больше напряженность электрического поля. Так, при напряженности электрического поля $E=485 \cdot 10^2$ В/м сохранилось после сушки около 60%, а при

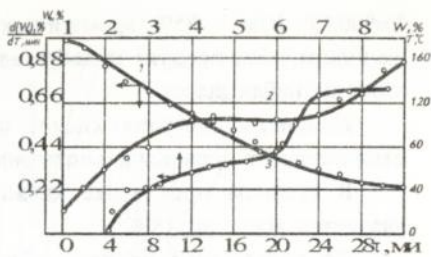


Рис. 30. Кривые сушки какао крупки конвективным методом: 1 - кривая сушки; 2 - кривая температуры; 3 - кривая скорости сушки.

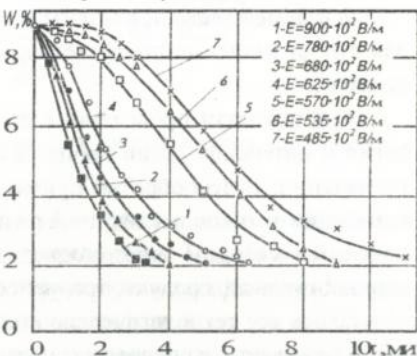


Рис. 31. Кривые сушки какао крупки при наложении ТВЧ.

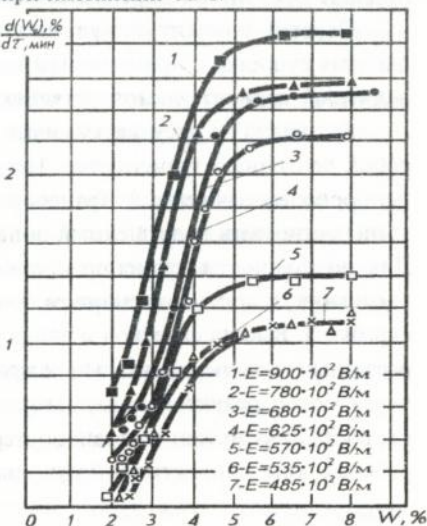


Рис. 32. Кривые скорости сушки какао крупки при наложении ТВЧ.

$E=900 \cdot 10^2$ В/м - 85% ароматических веществ. Однако, при этой напряженности поля продукт приобретает горелый привкус, а при $E=780 \cdot 10^2$ В/м этого не наблюдалось.

Изменение летучих кислот в процессе сушки какао крупки мало отличается от первоначального значения.

В среднем при сушке какао крупки токами высокой частоты их удаляется всего до 18%.

По результатам проведенных исследований был сделан вывод, что наиболее рациональным методом сушки какао крупки, с точки зрения сохранения ароматических веществ, является сушка токами высокой частоты при напряженности электрического поля $780 \cdot 10^2$ В/м.

В девятой главе приведены разработанные технологические установки для сушки пищевых продуктов при конвективно-высокочастотном энергоподводе.

Как показали проведенные нами исследования, для улучшения технологии и интенсификации процесса сушки продуктов медико-биологического назначения, целесообразно применять метод комбинированного нагрева - конвекции и токов высокой частоты. Проведение процесса сушки комбинированным методом энергоподвода, позволяющее получить высококачественный готовый продукт, требует создания таких установок, где бы хорошо сочетались все технологические и конструктивные параметры, определенные как в результате экспериментальных исследований, так и расчетным путем.

Так, установка для сушки шиповника при комбинированном энергоподводе состоит из двух элементов.

Первый элемент - сушилка с применением конвекции; второй - шахтная сушилка с применением конвекции и ТВЧ. На рис. 33 представлен эскизный вариант данной установки.

Как видно из рисунка, сушилка 1 с применением конвекции представляет собой ленточный транспортер. Несущим полотном его является ленточная перфорированная сетка 2. Транспортер расположен под углом, позволяющим транспортировать подсушенный шиповник в зону загрузки шахтной сушилки. Для возможности транспортировки сыпучего продукта, каким является шиповник, к сетке транспортера со строго определенным шагом закреплены скребки 3. Высота скребков и длина рабочей ветви транспортера определялась расчетным и экспериментальным путем. Привод транспортера осуществляется через мотор-редуктор и вариатор, позволяющий регулировать линейную скорость перемещения транспортера и время нахождения шиповника в рабочей зоне конвективной сушилки.

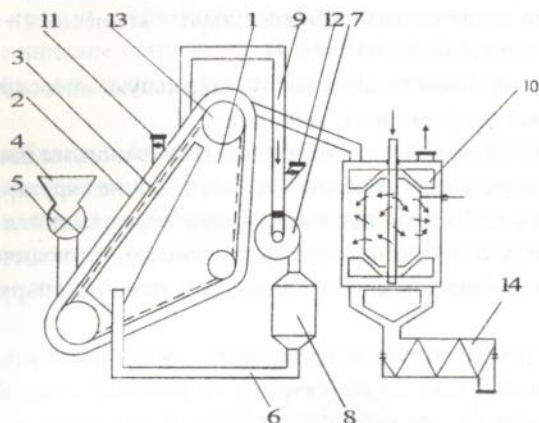


Рис. 33. Схема сушильной установки для сушки плодов шиповника с применением конвекции + ТВЧ.

Влажный шиповник подается в бункер 4, откуда посредством шлюзового дозатора 5 поступает на рабочую ветвь транспортера. Под рабочей ветвью расположен воздуховод 6, посредством которого сквозь продукт вентилятором 7 продувается горячий воздух, нагретый в калорифере 8.

Пройдя рабочую зону транспортера, шиповник подсушивается до влажности 34%. Для более экономичного использования ленточной сушилки она снабжена рециркуляционным контуром 9. Подвод свежего объема воздуха и вывод отработанного осуществляется заслонками соответственно 11 и 12.

При достижении требуемой влажности продукт поступает на вторую установку - шахтную сушилку с применением комбинированного энергоподвода - конвекции + ТВЧ.

Установка имеет вид коаксиального конденсатора, в зазоре которого, равномерно за счет лопастей 10 подается сырье. Перемещение сырья по высоте сушильной камеры осуществляется посредством сил гравитации. Разгрузка и одновременное охлаждение осуществляется шнековым транспортом 14.

Высокочастотное питание установки обеспечивалось генератором ГД-6000А (Болгария) посредством коаксиального волновода.

Предлагаемая установка позволяет сушить не только шиповник, но и другой сыпучий неомкучивающийся материал.

Проведенные исследования позволили предложить промышленную сушильную установку для красного стручкового перца и семян тыквы.

Как было отмечено ранее, наиболее целесообразным энергоподводом в этом случае является комбинированный: - конвекция + ТВЧ. Общий вид установки представлен на рис. 34.

Установка представляет собой модульную многоярусную ленточную конструкцию непрерывного действия.

Каждый из модулей снабжен теплоизоляционными щитами. Теплоизоляционные щиты расположены по всей длине яруса, перекрывая всю поверхность и образуя последовательно чередующийся ряд глухих 17 и открывающихся 18 щитов, для возможности периодической инспекции внутренних элементов короба, наладки и ремонта оборудования.

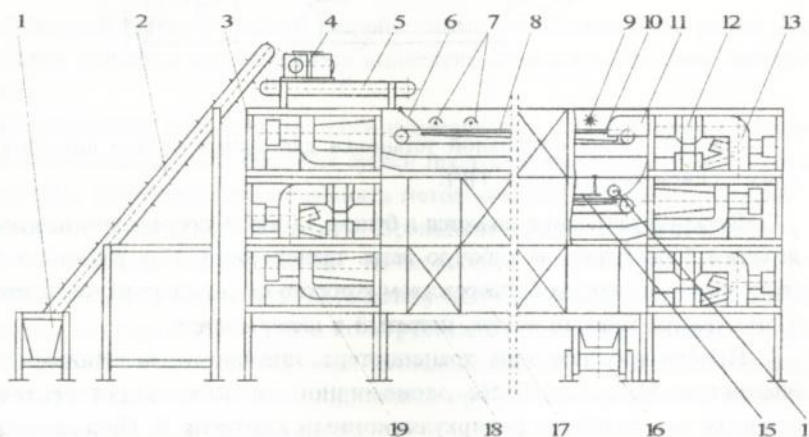


Рис. 34. Установка для сушки красного стручкового перца и семян тыквы при комбинированном энергоподводе - конвекция и ТВЧ.

Цепной конвейер 8 снабжен несущим полотном, выполненным в виде нержавеющей сетки. В ярусном расположении коробов каждый цепной конвейер размещен строго друг под другом таким образом, что их продольные оси совпадают. Все конвейеры снабжены индивидуальным идентичным приводом.

С целью предотвращения комкования продукта установка снабжена ворошителями 9, которые представляют собой закрепленные на вращающемся валу цилиндрические стержни разной высоты из эластичного материала, служащие для предотвращения комкования высушиваемых плодов или овощей.

Ворошитель 9 установлен в начале верхнего яруса, а уплотнители 14 установлены в начале второго и третьего ярусов.

Каждый ярус снабжен наклонной пластиной 6, предназначенной для

создания условия перехода продукта с одного яруса на другой.

Над второй и третьей ветвями транспортеров установлены пластинчатые электроды 15, заменяющие одну обкладку рабочей ячейки конденсатора. В качестве второй обкладки используются сами ленты транспортеров, которые заземлены.

Установка снабжена бункером-питателем 1 для исходного продукта. Для подачи исходного продукта на верхний ярус сушилки предусмотрен наклонно установленный скребковый транспортер 2. Последний представляет собой ленточный транспортер, имеющий в качестве несущего полотна прорезиненную ленту с закрепленными к ней поперечными скребками.

Над верхним ярусом сушилки смонтирован укладчик 4, обеспечивающий перемещение продукта в условии, формирующем монослой при равномерности его распределения по всей ширине рабочей ветви конвейера. Привод укладчика осуществляется посредством цепной передачи, связанной со скребковым транспортером 2. Укладчик выполнен в виде прорезиненного вала, формирующего монослой высушиваемого продукта при взаимодействии последнего с вышеупомянутым валком и несущим полотном питающего конвейера 5.

Под нижним ярусом сушилки установлен разгрузочный ленточный транспортер 16, длина и скорость перемещения ленты которого обеспечивают условия, необходимые для охлаждения продукта до 40-50°C.

В качестве сушильного агента используется воздух, нагнетаемый центробежным вентилятором 13. Подогрев сушильного агента осуществляется паровым калорифером 12. Далее сушильный агент нагнетается в воздуховод 11, имеющий разветвление при входе в стальной короб. Нагнетательная часть воздуховода соединена с диффузором 10, расположенным между рабочей и холостой ветвями конвейера. В верхней части диффузора выполнены окна с отражательными щитками для направления потока теплоносителя под несущее полотно цепного конвейера. Нагнетание теплоносителя в верхний ярус сушилки осуществляется в правую нижнюю часть короба, а всасывание производится центробежным вентилятором 19 в его верхнюю левую часть. В нижних ярусах установки цикл нагнетание-всасывание последовательно чередуется, т. е. в последнем верхнем ярусе нагнетание теплоносителя осуществляется в левую нижнюю часть короба, а всасывание - в правую верхнюю его часть.

Процесс сушки в установке контролируется системой автоматического регулирования.

По мере перемещения продукта на первой и второй конвейерной ленте происходит процесс чисто конвективной сушки. При этом образу-

ющаяся паровоздушная смесь всасывается центробежным вентилятором и посредством системы воздуховода направляется частично на рециркуляцию и частично в атмосферу.

На третьей ленте продукт попадает в зону воздействия ТВЧ, где происходит процесс комбинированной сушки: - конвекция с электромагнитным полем ТВЧ, что способствует интенсификации процесса.

Далее, после прохождения всего пути рабочей камеры, продукт выходит из нее, попадая на ленту разгрузочного конвейера 14. Длина и скорость перемещения ленты разгрузочного конвейера выбраны таким образом, чтобы обеспечить охлаждение продукта до 40-50°C.

Постоянный расход горячего воздуха, нагнетаемого и всасываемого центробежными вентиляторами и проходящего через воздуховод, соединенный с диффузором, создаст необходимые условия в каждом ярусе установки, обеспечивая получение конечного продукта высокого качества.

Это достигается тем, что горячий приточный воздух при прохождении через диффузор истекает из его выходных окон за счет отражательных щитков в одном направлении под сеткой полотна конвейера. В результате взаимодействия струй горячего воздуха между собой создается единый струйный поток эжектирующего типа, который образует в объеме герметичного короба восходящую циркуляцию воздуха, совпадающую с конвективными потоками.

Кроме того, истечение струй в направлении динамического давления в воздуховоде снижает гидравлические потери в выпускных окнах.

Таким образом обеспечивается конвективная сушка с применением ТВЧ.

В случае необходимости сушить измельченное влажное растительное сырье, в частности красный стручковый перец, установка снабжена устройством для измельчения влажного растительного сырья.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Произведен глубокий анализ существующих технологий и используемой техники для их реализации в процессах сушки сельскохозяйственного растительного сырья медико-биологической направленности.

Установлено, что наибольшее распространение для сушки большинства растительного сырья медико-биологической направленности получила воздушно-солнечная сушка, имеющая серьезные недостатки. Для устранения существующих недостатков впервые было предложено использовать комбинированный энергоподвод - конвекция и ТВЧ.

2. В результате систематизации проведенных исследований процесса

сушки ряда видов растительного сырья медико-биологического назначения на примере плодов шиповника, красного стручкового перца, семян тыквы и какао крупки показана перспективность использования комбинированного энергоподвода конвекции и токов высокой частоты (ТВЧ).

3. Для решения вопросов оптимального использования комбинированного энергоподвода определены электрофизические параметры ($\text{tg}\delta$ и ϵ') шиповника, красного стручкового перца, семян тыквы и какао крупки. Проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования их зависимости от частоты электромагнитного поля, температуры и влажности продукта.

4. На основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований электрофизических параметров вышеназванных объектов выявлено, что наиболее благоприятной частотой электромагнитного поля для тепловой обработки плодов шиповника, красного стручкового перца и семян тыквы является частота 27 МГц, а для какао крупки 40,06 МГц.

Также доказано, что рассмотренные объекты растительного сырья, с точки зрения технико-экономических и качественных показателей, целесообразно сушить в целом виде, а не отдельно взятые их составные части, кроме какао крупки, получаемой путем дробления какао бобов.

Экспериментально обосновано значение влажности продукта, с которой следует проводить сушку при комбинированном энергоподводе. Так для плодов шиповника это 34%, для красного стручкового перца - 36% и для семян тыквы - 20%.

5. Сформулирована и экспериментально подтверждена математическая модель, позволяющая рассчитать электрофизические параметры сложных гетерогенных многокомпонентных систем.

Адекватность полученной математической модели была проверена на примере шиповника и дала положительные результаты.

6. Впервые математически решена задача системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса для сложной многокомпонентной системы, имеющей геометрические очертания шара для случая комбинированного энергоподвода с применением конвекции и внутреннего источника тепла (ТВЧ).

Адекватность математической модели была проверена на экспериментальных данных, полученных в результате исследования кинетики процесса сушки шиповника.

7. Впервые математически решена задача системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса для сложного многокомпонентного продукта в случае комбинированного подвода тепла при сушке его в полом неограниченном цилиндре.

Адекватность полученной модели была проверена на примере сушки красного стручкового перца и были получены положительные результаты.

8. Впервые математически решена задача расчета дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса в сложных многокомпонентных системах при комбинированном энергоподводе - конвекции и внутреннего источника тепла для случая полого ограниченного цилиндра.

Полученные данные при проверке по критерию Фишера выявили положительный результат.

9. Исследована кинетика процесса сушки плодов шиповника при комбинированном энергоподводе — конвекции и ТВЧ. Определено, что процесс сушки плодов шиповника необходимо проводить в два этапа. Сушка шиповника до $W = 34\%$ осуществляется только при конвективном энергоподводе. При сушке шиповника от 34% до 14% влажности, что соответствует второму этапу, процесс протекает в условиях комбинированного энергоподвода, т.е. к конвекции подключается ТВЧ.

Анализ проведенных исследований по кинетике сушки, с учетом полученных качественных показателей высушенного шиповника, позволил определить, что наиболее благоприятным режимом для сушки шиповника является комбинированный, с температурой сушильного агента $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и напряженностью электрического поля $E = 340 \cdot 10^3\text{ В/м}$.

10. Исследована кинетика процесса сушки красного стручкового перца при комбинированном энергоподводе - конвекция и ТВЧ. При этом определено, что до влажности перца 36% его следует сушить только конвекцией, после чего — при комбинированном энергоподводе.

Анализ проведенных исследований по кинетике процесса сушки, с учетом полученных качественных показателей высушенного перца, позволил определить, что наиболее благоприятным режимом для сушки красного стручкового перца является комбинированный, с температурой сушильного агента $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и напряженностью электромагнитного поля $E = 16,5 \cdot 10^3\text{ В/м}$.

11. Исследована кинетика процесса сушки семян тыквы при комбинированном энергоподводе - конвекция и ТВЧ. Анализ проведенных исследований позволил определить режимные параметры процесса сушки, обеспечивающие сокращение продолжительности процесса и повышение качества готовой продукции. Определено, что для сушки предпочтительней использовать так называемые "голосеменные" семена тыквы.

12. Исследована кинетика процесса сушки какао крупки.

Экспериментальным путем обнаружено, что при изменении напряженности поля от $485 \cdot 10^2$ до $900 \cdot 10^2\text{ В/м}$ максимальная скорость сушки какао крупки увеличивается в 2,5 раза, а продолжительность сушки сокращается в 3,7 раза. Найдены режимные параметры процесса сушки какао крупки

токами высокой частоты для обеспечения высокого качества выпускаемой продукции и сокращения продолжительности процесса, а именно: напряженность электромагнитного поля $E = 780 \cdot 10^2$ В/м, скорость сушильного агента $vc = 0,5$ м/с.

13. Полученные данные, как теоретического так и практического характера, явились основой для разработки и создания технологических установок для проведения процесса сушки указанных видов растительного сырья медико-биологической направленности. Часть способов и установок сушки, применяемых для этих целей, защищена авторскими свидетельствами. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения технологических установок по сушке плодов шиповника, красного стручкового перца, семян тыквы и какао крупки в ценах 1990 года составил более 316 тыс. руб.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Мустьяца В.Т., Ганя Г.П., Лупашко А.С. Частотные характеристики электрофизических свойств какао крупки // Электронная обработка материалов. - 1977. - №5. - с.83-85.

2. Мустьяца В.Т., Ганя Г.П., Лупашко А.С. Исследование электрофизических свойств какао крупки // Электронная обработка материалов. - 1979. - №2. - с.78-81.

3. А.С. 684268 СССР, МКИ F26B. Установка для сушки сыпучих материалов / Мустьяца В.Т., Ганя Г.П., Лупашко А.С., Ялковский В.С. (СССР). - Опубл. 1979. Бюл. №33.

4. Мустьяца В.Т., Ганя Г.П., Лупашко А.С. Исследование процесса сушки какао крупки // Электронная обработка материалов. - 1980. - №6. - с.70-74.

5. Карпов С.С., Балануца А.П., Лупашко А.С. Обработка виноградной мезги и виноматериалов ИК-лучами и токами высокой частоты // Материалы пятой Всесоюзной конференции / Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. - М.: МТИММП, 1985. - с.117.

6. Лупашко А.С., Мустьяца В.Т., Ганя Г.П. Обработка какао крупки токами высокой частоты // Материалы пятой Всесоюзной конференции / Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. - М.: МТИММП, 1985. - с.92.

7. А.С. 1227239 СССР, МКИ B02C 18/00 // C12G 1/02. Устройство для

измельчения влажного растительного сырья /Лупашко А.С., Кыса С.Ф., Балановская Л.Н. (СССР). - № 3731097/28-13; Заявлено 18.04.84; Выдано 30.04.86; Оpubл. 30.04.86, Бюл. №16.

8. А.С. 1314658 СССР, МКИ C12G 1/02 Установка для сбраживания суслу на мезге. / Лупашко А.С. и др. (СССР). -№3873308/23-13; Заявлено 26.03.85; Выдано 01.02.87.

9. Мустяца В.Т., Ганя Г.П., Лупашко А.С. Пробой какао крупки и способ его устранения // Электронная обработка материалов - 1987. - №2.

10. Саушкин Б.П., Лупашко А.С., Ганя Г.П. Новые методы и оборудование обработки пищевого сырья (учебное пособие). - Кишинев: КПИ им. С.Лазо. - 1987. - 82с.

11. Лупашко А.С. Исследование тепло- и массообмена в процессе сушки какао крупки токами высокой частоты: Дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. - Защищена 06.01.81; Утв. 13.05.81; ТН № 044562. - Киев, 1981. - 145с.

12. Лупашко А.С., Федоткин И.Н., Мустяца В.Т., Котелевич Н.И. Исследование электрофизических параметров шиповника // Тезисы докл. / Третья Всесоюзная НТК / Разработка процессов получения комбинированных продуктов питания.- М.: 1988. - с.270.

13. Лупашко А.С., Малезик И.Ф., Котелевич Н.И. Исследование внешних факторов воздействия на электрофизические параметры шиповника // Тезисы докладов / 2-я Всесоюзная НТК. / Проблемы индустриализации общественного питания страны. - Харьков. - 1989. - с.582 - 583.

14. Малезик И.Ф., Лупашко А.С., Берник М.П., Чеботарь И.Л. Исследование электрофизических параметров стручкового красного перца // Тезисы докладов/ 6-я Всесоюзная НТК. / Электрофизические методы обработки пищевых продуктов и с/х сырья. - Москва. - 1989.

15. Малезик И.Ф., Лупашко А.С., Кройтору В.В., Рожко В.С. Применение газоразрядных ламп для интенсификации процесса сушки пищевых продуктов// Тезисы докладов / 6-я Всесоюзная НТК / Электрофизические методы обработки пищевых продуктов и с/х сырья. - Москва. - 1989.

16. Лупашко А.С., Малезик И.Ф., Котелевич Н.И., Ганя Г.П. Влияние внешних факторов на электрофизические параметры шиповника. // Тезисы докладов/ 6-я Всесоюзная НТК / Электрофизические методы обработки пищевых продуктов и с/х сырья. - Москва. - 1989. - с.31.

17. Малезик И.Ф., Лупашко А.С., Котелевич Н.И. Исследование электрофизических параметров шиповника. // Тезисы докладов НТК / Интенсификация технологии и совершенствование оборудования перерабатывающих

отраслей АПК. - Киев. - 1989. - с.32-33.

18. Малежик И.Ф., Лупашко А.С., Берник М.П. Исследование электрофизических параметров стручкового перца // Тезисы докладов / 33-я НТК. - Минск.- 1989. - с.118.

19. Малежик И.Ф., Лупашко А.С., Котелевич Н.И. Экспериментальная установка для измерения электрофизических параметров // Тезисы докладов / НТК посвященная 25-летию образования КПИ им.С.Лазо. - Кишинев. - 1989. - с.94.

20. Малежик И.Ф., Лупашко А.С., Берник М.П. Частотные характеристики электрофизических параметров стручкового красного перца // Тезисы докладов / НТК посвященная 25-летию образования КПИ им.С.Лазо. - Кишинев. - 1989. - с.95.

21. Малежик И.Ф., Лупашко А.С., Котелевич Н.И., Рэдукан М.Г. Влияние температуры и влажности шиповника на его электрофизические характеристики // Тезисы докладов / НТК посвященная 25-летию образования КПИ им.С.Лазо.- Кишинев. - 1989. - с.98.

22. Малежик И.Ф., Лупашко А.С., Чеботарь И.Л. Электрофизические характеристики крушиновой облепихи // Тезисы докладов / НТК посвященная 25-летию образования КПИ им.С.Лазо.- Кишинев. - 1989. - с.93.

23. Малежик И.Ф., Лупашко А.С., Кроитору В.В., Рожко В.С. Сушка яблок с применением газоразрядных ламп // Тезисы докладов / НТК Интенсификация технологий и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК. - Киев. - 1989. - с.44.

24. Мустяца В.Т., Лупашко А.С., Берник М.П., Чеботарь И.Л., Рожко В.С. Электрофизические характеристики некоторых растительных материалов // Тезисы докладов / НТК. - Кишинев - 1990. - с.101.

25. Малежик И.Ф., Лупашко А.С., Котелевич Н.И., Рэдукан М.Г. Расчет электрофизических параметров для сложных многокомпонентных систем // Тезисы докладов / НТК. - Кишинев. - 1990. - с.99-100.

26. Лупашко А.С., Рожко В.С., Ганя Г.П., Малежик И.Ф. Использование газоразрядных ламп для интенсификации процесса сушки // Тезисы докладов / НТК. - Кишинев. - 1990. - с.102.

27. Лупашко А.С., Малежик И.Ф., Котелевич Н.И., Грозав Э.К., Рожко В.С., Осояну А.Д. Сушка шиповника комбинированным способом с применением токов высокой частоты. Качественные показатели высушенных плодов // Тезисы докладов / Всесоюзная НТК / Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания. - Харьков. - 1990. - с.170-171.

28. Лупашко А.С., Мустяца В.Т., Берник М.П. Электрофизические параметры красного стручкового перца // Тезисы докладов / Всесоюзная НТК / Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания. - Харьков. - 1990. - с.254-255.
29. Лупашко А.С., Малезик И.Ф., Рожко В.С., Ганя Г.П. Сушка яблок с использованием газоразрядных ламп // Тезисы докладов / Всесоюзная НТК / Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания. - Харьков. - 1990. - с.453-454.
30. G. Ganea, A. Lupasco, L. Andronic. Calculul parametrilor transportorului cu bandă. Aplicind mașina electronică de calcul (material didactic). - I.P.C. - S.Lazo - 1990. - 80p.
31. Лупашко А.С., Мустяца В.Т., Берник М.П. Сушка стручкового перца конвективно-высокочастотным методом // Тезисы докладов / 2-й Минский Международный форум по тепло-и массообмену. - Киев. - 1991.
32. Малезик И.Ф., Лупашко А.С., Котелевич Н.И. Сушка плодов шиповника конвективно-высокочастотным способом // Тезисы докладов / 2-й Минской Международный форум по тепло- и массообмену. - Киев. - 1991. - с.187.
33. Лупашко А.С., Мустяца В.Т., Берник М.П. Конвективно-высокочастотная сушка стручкового перца // Международная конференция по тепло-и массообмену. - Юрмала. - 1991.
34. Малезик И.Ф., Лупашко А.С., Котелевич Н.И. Высокочастотная сушка плодов шиповника // Международная конференция по тепло- и массообмену. - Юрмала - 1991.
35. А.С. 1748776 СССР, МКИ A23B 7/02. Способ сушки шиповника/ Лупашко А.С., Малезик И.Ф., Котелевич Н.И., Ганя Г.П. (СССР). - №4849874/13; Заявлено 10.07.90; Опубл. 23.07.92; Бюл. №27.
36. V. Musteața, A. Lupasco, M. Bernic. Uscarea ardeiului iute (Capsicum L.) // Teze la conferința tehnico-stiințifică. - Chișinău. - 1992.
37. A. Lupasco, M. Bernic, G. Ganea Uscarea cu curenți de frecvență înaltă a semințelor de bostan // Darea de seamă pe tema bugetară. - Chișinău. - 1992.
38. Лупашко А.С., Котелевич Н.И., Малезик И.Ф., Ганя Г.П. Сушка плодов шиповника с применением токов высокой частоты // Электронная обработка материалов. - 1992. - №2 - с. 58-61.
39. Лупашко А.С., Котелевич Н.И., Малезик И.Ф. Сушка плодов шиповника конвективно-высокочастотным способом // Тезисы докладов / 2-й Минский Междунар. форум по тепло- и массообмену. - Киев. - 1992. - с.187.
40. A. Lupasco, I. Malejic, V. Rojco. Uscător pentru mere cu aplicarea tubului

cu descărcarea în gaz // Teze la conferința tehnică și științifică. - Chișinău. - 1993.

41. I. Malejic, A. Lupașco, N. Cotelevici. Uscarea măceșului prin metoda combinată convectivă în ansamblu cu curenți de frecvență înaltă // Conf. tehnico-științifică jubilară. - UTM. - Chișinău. - 1994. - p.149-150.

42. V. Musteața, A. Lupașco, M. Bernic Uscarea convectivă și cu curenți de frecvență înaltă a ardeiului iute // Teze la conferința tehnico-științifică jubilară. - UTM. - Chișinău - 1994. - p.147.

43. Мустяца В.Т., Лупашко А.С., Берник М.П. Комплексное исследование электрофизических параметров красного стручкового перца // Электронная обработка материалов. - 1995. - №1 - с.68-72.

44. Мустяца В.Т., Лупашко А.С., Берник М.П. Сушка красного стручкового перца (*Capsicum Annuum* L.) токами высокой частоты // Электронная обработка материалов. - 1995. - №2 - с.66-69.

45. V. Musteața, A. Lupașco, M. Bernic Procesul de uscare a ardeiului // Teze la conferința termotehnicienilor români. - Cluj-Napoca. - 1995.

46. Лупашко А.С., Ганя Г.П., Рожко В.С., Плиток В.Л., Тарлев В.П. Исследование диэлектрических свойств семян тыквы // Электронная обработка материалов. - 1995. - №4 (справка прилагается).

47. Лупашко А.С., Ганя Г.П., Плиток В.Л., Тарлев В.П. Конвективно - высокочастотная сушка семян тыквы // Электронная обработка материалов. - 1995. - №5 (справка прилагается).

48. V. Musteața, A. Lupașco, M. Bernic Cinetica procesului de uscare a ardeiului iute // Termotehnica românească -96./ Lucrări prezentate la a 6-a conferință națională de termotehnică. - Iasi. - 1996. - p.69-72.

Анотація

А.С.Лупашко. Інтенсифікація процесу сушіння сільськогосподарської сировини медико-біологічної орієнтації із застосуванням токів високої частоти.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук по спеціальності 05.18.12- "Процеси та апарати харчових виробництв", Український державний університет харчових технологій, Київ, 1996.

Захищаються 48 наукових праць, в т.ч. 4 авторських свідоцтва, які містять комплекс теоретичних і експериментальних досліджень впливу токів високої частоти (ТВЧ) на інтенсифікацію процесу сушіння сільсько-

господарчої сировини медико-біологічної орієнтації.

Установлено, що застосування комбінованого енергопідводу - конвекція + ТВЧ в кілька разів інтенсифікує процес сушіння сировини. Визначені і математично обґрунтовані електrofізичні параметри деяких видів рослинної сировини, як то: шипшина, червоний стручковий перець, насіння гарбуза та какао боби(крупка).

Запропоновано ряд математичних моделей для розрахунку диференціальних рівнянь тепло- і масопереносу при комбінованому енергопідводі - конвекція і внутрішнє джерело енергії (ТВЧ). Визначені основні технологічні режими процесу сушіння шипшини, червоного стручкового перцю, насіння гарбуза та какао крупки.

Разроблено і виготовлено ряд установок для сушіння рослинної сировини. Здійснено промислове впровадження запропонованих сушильних установок і технологічних режимів.

Ключові слова: сушіння, комбінований енергопідвід, конвекція, токи високої частоти, шипшина, червоний стручковий перець, насіння гарбуза, какао крупка.

Abstract

A.S.Lupashko Intensification of the agricultural raw materials drying process with application of high-frequency currents, the starting material processed to be used in medicinal and biological preparations.

Thesis for the degree of Doctor of Sciences on speciality 05.18.12 - "Processes and apparatuses for the food industry enterprises", Food Technologies State University of the Ukraine, Kiev, 1996.

There are defended 48 scientific works, including 4 Certificates of Authorship, covering the range of theoretical and experimental investigations aimed at exploring the influence of high-frequency currents (HFC) with respect to agricultural vegetable raw materials drying process, the starting material produced to be used in medicinal and biological preparations. It has been determined that application of combined power supply, i.e. convection + HFC intensifies the raw materials drying process several times. There have been determined and mathematically substantiated the electrophysical parameters of some kinds of vegetable raw materials, such as wild rose hips, red pepper, pumpkin seeds and cocoa beans (middlings). There have been suggested a number of mathematical

models to solve the differential equations for heat and mass transfer under combined power supply: convection plus the internal heat source (HFC).

There have been determined the basic processing regimes concerning drying of wild rose hips, red pepper, pumpkin seeds and cocoa middlings. There have been designed and manufactured several drying installations to process vegetable raw materials. There was carried into effect industrial introduction of the above drying installations and processing regimes suggested.

Key words: drying, combined power supply, convection, high-frequency currents, wild rose hips, red pepper, pumpkin seeds, cocoa middlings.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and a final vertical stroke.



Фирма "InterSpumante"

438788

AB 35.544