На правах рукописи

АФОНЬКИНА Валентина Александровна

ИНФРАКРАСНАЯ СУШКА ТЕРМОЛАБИЛЬНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ НА ПРИМЕРЕ ЗЕЛЕННЫХ КУЛЬТУР

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2014

Работа выполнена на кафедре «Электротехника и автоматика» ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Попов Виталий Матвеевич

Официальные оппоненты: **Рудобашта Станислав Павлович,**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Теплотехника, гидравлика и энергообеспечение предприятий» ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Алтухов Игорь Вячеславович,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Энергообеспечение и теплотехника» ФГБОУ ВПО «Иркутская государственная сельскохозяйственная академия»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет»

Защита состоится «20» февраля 2015 г., в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.069.01 на базе ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» http://www.csaa.ru.

Автореферат разослан «26» декабря 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета

Плаксин
Алексей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день основная задача сельхозтоваропроизводителей – находить новые способы и средства переработки сырья в целях сокращения энергозатрат на производство, улучшения качества и уменьшения потерь нереализованной свежей продукции.

Зеленные культуры, реагируя на повышение температуры переработки разрушением целевых компонентов, представляют класс термолабильных. Однако более 70 % товаропроизводителей этого не учитывают, используя экстенсивные и устаревшие технологии переработки – естественную сушку и сушку конвективным способом. Ряд недостатков (низкий КПД, появления микро- и макрофлоры, неравномерность обработки, высокое энергопотребление, биохимические изменения, снижающие качество сырья) делают актуальными исследования по нахождению новых способов и технологий переработки биологического сырья на хранение. В предыдущих исследованиях подробно рассмотрены различные способы сушки сырья, среди которых использование инфракрасного (ИК) излучения выделяется как менее энергоемкий и более экологичный способ. Однако при разработке установок с использованием ИК-излучения ученые выбирают традиционные источники – лампы и ТЭНы, не всегда учитывая взаимосвязь спектральных характеристик излучателя и сырья и термолабильность.

Таким образом, разработка экологически безопасных, ресурсосберегающих сушильных ИК-установок в рамках реализации межведомственной координационной программы фундаментальных и приоритетных прикладных исследований по научному обеспечению развития АПК РФ (приказ Минсельхоза РФ от 25 июня 2007 г. №342 «О концепции развития аграрной науки и научного обеспечения АПК России до 2025 года») относится к приоритетному направлению развития науки и техники и является актуальной.

Цель работы: повышение эффективности ИК-сушки термолабильного растительного сырья на основе применения низкотемпературных пленочных электронагревателей за счет снижения энергозатрат, уменьшения потерь сырья и повышения качества конечного продукта.

Задачи исследования:

1. Установить взаимосвязь спектральных оптических характеристик зеленных культур (на примере укропа и петрушки) и низкотемпературных пленочных электронагревателей с конструктивно-технологическими параметрами сушильной установки.

2. Разработать методику определения оптических характеристик растительного сырья с помощью логарифмической амплитудно-волновой характеристики.

3. Разработать транспортерно-каскадную ИК-установку непрерывного действия на основе применения низкотемпературных пленочных электронагревателей с обоснованием конструктивно-технологических параметров для сушки зеленных культур.

4. Дать энергетическую и экономическую оценку использования пленочных электронагревателей в установке для сушки зеленных культур.

Объект исследования: процесс сушки зеленных культур в установке ИК-типа с применением пленочных электронагревателей.

Предмет исследования: взаимосвязь спектральных оптических характеристик растительного сырья и источника ИК-излучения с конструктивно-технологическими параметрами установки для сушки зеленных культур.

Анализ научно-технической литературы позволил сформулировать рабочую **гипотезу:** использование низкотемпературных инфракрасных пленочных электронагревателей в конструкции установок для сушки термолабильного растительного сырья позволит создать установки со сниженным энергопотреблением и выходом готовой продукции высокого качества.

Научная новизна основных положений, выносимых на защиту:

1. Впервые определены спектральные оптические характеристики зеленных культур и пленочных электронагревателей в инфракрасном диапазоне электромагнитного излучения, позволяющие согласовывать оптические характеристики ИК-генераторов с поглощательной способностью зеленных культур при выборе оптимальной технологии сушки.

2. Предложен теоретический метод определения коэффициента затухания мощности излучения в продукте с помощью логарифмической волновой характеристики.

3. Впервые предложено, апробировано и обосновано использование низкотемпературных инфракрасных пленочных электронагревателей в конструкции ИК-установок для сушки термолабильного сырья.

4. Разработана ИК-установка непрерывного действия транспортерно-каскадного типа для сушки термолабильного растительного сырья, обеспечивающая снижение энергозатрат на 1 кг испаренной влаги и сохранение высокого качества сухопродукта, новизна которой подтверждена патентом РФ.

Практическая ценность работы и реализация ее результатов. Предложенный теоретический метод определения коэффициента затухания излучения позволяет оценить поглощательную способность сырья и сделать выбор ИК-излучателя, обеспечив рациональное распределение энергоресурсов. Полученные взаимосвязи позволяют дать рекомендации по проектированию сушилок с применением низкотемпературных пленочных электронагревателей (НЭП) и режимам сушки термолабильного сырья.

Результаты исследований определили конструктивно-технологические параметры разработанного, апробированного и внедренного в ООО НТЦ «АгроЭСБ» (г. Челябинск) опытного образца установки транспортерно-каскадного типа для ИК-сушки зеленных культур. В ГНУ ЮУНИИПОК Россельхозакадемии (г. Челябинск) внедрены рекомендации по ИК-сушке растительного сырья с применением НЭП. Результаты работы используются в учебном процессе и стали базой для проведения научных исследований по определению влияния режимов сушки на качество сельскохозяйственного сырья на кафедре «Электротехника и автоматика» ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались и были одобрены на ежегодных научно-технических конференциях ФГБОУ ВПО ЧГАА (г. Челябинск, 2010–2014 гг.); Международной агропромышленной научно-практической конференции «Перспективы развития возобновляемой и малой энергетики АПК» в рамках деловой части программы выставки «Агрорусь» (г. Санкт-Петербург, 2011 г.); Международной научно-практической конференции «Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития» (КрасГАУ, г. Красноярск, 2012 г.); зарубежных конференциях «Научная индустрия европейского континента» и «Vĕda a vznik» – 2013/2014» (г. Прага, 2013–2014 гг.).

Сушильная установка была представлена на конкурсе Законодательного собрания Челябинской области в номинации «Научно-исследовательский проект», получен диплом победителя (г. Челябинск, 2012 г.), на IV Всероссийском инновационном форуме «Творчество и инновации молодежи», получены дипломы II степени (г. Челябинск, 2012 г.); выставке УРФО «Агро-2013» (г. Челябинск) и выставке «Золотая осень-2013» (г. Москва), где получены золотые медали. В рамках ХО ООО НТЦ «АгроЭСБ» получены и реализованы гранты Минэкономразвития Челябинской области и программы «СТАРТ-2013» на общую сумму 1,5 млн рублей.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 20 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 зарубежные статьи и 2 патента на полезную модель РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, библиографии из 131 наименования и 8 приложений. Содержание работы изложено на 168 страницах, включая 38 рисунков, 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы проблемная ситуация, научная проблема, определены направления исследований, кратко отражены основные положения, выносимые на защиту, представлена общая характеристика работы.

Первая глава *«Современное состояние вопроса сушки термолабильного сырья»* отражает анализ отечественной и зарубежной научно-технической и патентной литературы, посвященной методам и технологическим схемам сушки растительного сырья.

Исследованиями и разработкой способов сушки продукции растениеводства занимались П. А. Ребиндер, А. В. Лыков, А. С. Гинзбург, С. М. Липатов, Ю. Л. Кавказов, Т. К. Филоненко, П. Д. Лебедев, В. Н. Карпов и другие. Главной целью исследований была интенсификация технологического процесса с использованием электрофизических методов воздействий. В основе этих технологий – нетрадиционные носители энергии: переменное электромагнитное поле сверхвысокой и низкой частоты, инфракрасное излучение и т. п.

Весьма перспективным было признано использование для сушки ИК-излучения, благодаря важным отличиям его от классических методов нагрева. Данный способ позволяет в щадящем режиме обезвоживать сырье излучением специально подобранной длины волны. Однако применение ИК-излучения для сушки термолабильного сырья сопряжено с рядом трудностей: размещение излучателей относительно продукта, снижение температуры на поверхности излучателей без потери плотности потока, энергосбережение, сохранение качества сырья и др. Таким образом, разработка новых энергосберегающих технологий и технических средств сушки термолабильного сырья является актуальной задачей.

На основе выполненного анализа были определены объект и предмет исследования, поставлена цель, обозначены задачи и сформирована рабочая гипотеза исследования.

Во **второй главе** *«Теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров установки для сушки зеленных культур инфракрасным излучением»* рассмотрены общие принципы проектирования оптической техники для сушки растительного сырья. Анализ известных методик показал, что принципиальным вопросом в процессе проектирования сушилок стала производительность в ущерб качеству и энергосбережению. Существенные потери энергии при использовании методов оптической электротехнологии связаны с преобразованием ее в другой вид и во многом зависят от спектральных характеристик обрабатываемых объектов и генераторов оптического излучения. В связи с этим вопрос определения оптических характеристик пары «сырье – излучатель» при разработке ИК-установок играет немаловажную роль.

Основной оптической характеристикой сырья является коэффициент экстинции r_λ. Это величина, характеризующая эффективность поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ). ИК-лучи, согласно электромагнитной теории света, являются электромагнитными колебаниями и подчиняются всем законам излучения тел. На основе этого в диссертационной работе нами впервые предложено для оценки оптической восприимчивости сырья (на примере укропа и петрушки) в ИК-диапазоне использовать методику построения логарифмических амплитудно-частотных характеристик и ввести в рассмотрение логарифмическую волновую характеристику (ЛВХ).

ЛВХ, характеризуя коэффициент затухания, поможет определить те длины волн, на которых сырье обладает наивысшей поглощающей способностью.

Качественные показатели сырья в общем технологическом процессе ИК-сушки являются объектом управления, который можно представить в виде «черного ящика», обладающего собственной спектральной чувствительностью ε_λ, промежуточные этапы преобразований в котором менее важны, чем соотношения между сигналами на его входе и выходе (рисунок 1).

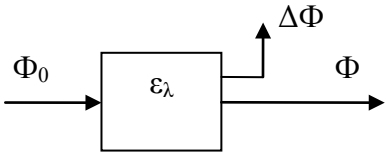


Рисунок 1 – Связь энерготехнологических параметров с объектом управления

Теоретическое соотношение, связывающее сигналы на его входе и выходе, является передаточной функцией. Передаточная функция сырья, подверженного воздействию ЭМИ, – это выражение, характеризующее затухание излучения в продукте по мощности:

$$L_d = 10\lg\frac{\Phi}{\Phi_0}, \qquad (1)$$

где L_d – коэффициент затухания излучения, дб;

Φ – поток излучения, не воспринятый продуктом, Вт/м^2;

Φ_0 – поток излучения, упавший на продукт, Вт/м^2.

Лучистый поток, упавший на продукт, определяется как

$$\Phi_0 = \varepsilon A\int_0^\infty m(\lambda T)d\lambda, \qquad (2)$$

где A – площадь тела излучения, м^2;

λ – длина волны излучения, мкм;

ε – степень черноты тела излучения;

$m(\lambda T)$ – спектральная энергетическая светимость, Вт/м^2·мкм.

Численное значение спектральной энергетической светимости определяется по формуле Планка:

$$m(\lambda T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}, \qquad (3)$$

где C_1 и C_2 – первая и вторая постоянные уравнения Планка;

T – температура поверхности тела излучения, К.

Поток излучения, прошедший сквозь сырье и переотразившийся в пространство, определяют как

$$\Phi = \Phi_0 - \Phi_э, \qquad (4)$$

где $\Phi_э$ – эффективный поток, Вт/м^2.

Величину эффективного потока излучения, поглощенного сырьем, рассчитывают по формуле:

$$\Phi_э = \varepsilon A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} m(\lambda T) \cdot \varepsilon(\lambda) d\lambda, \qquad (5)$$

где A – площадь приемника ИК-излучения, м^2;

$\varepsilon(\lambda)$ – спектральная чувствительность приемника;

λ_1, λ_2 – верхняя и нижняя границы длин волн потока излучения, воспринимаемого приемником, мкм.

На ЛВХ абсциссой является коэффициент затухания L_d, выраженный в децибелах, ординатой – длины волн в логарифмическом масштабе (рисунок 2, 3). Логарифмическая мера отношения мощностей обусловлена необходимостью качественного анализа спектральных характеристик сырья в широком диапазоне.

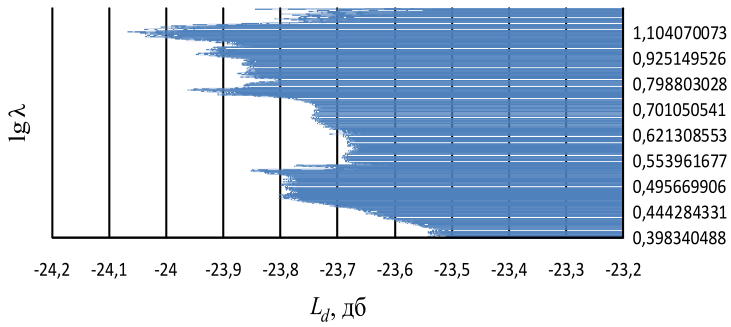


Рисунок 2 – Логарифмическая волновая характеристика укропа

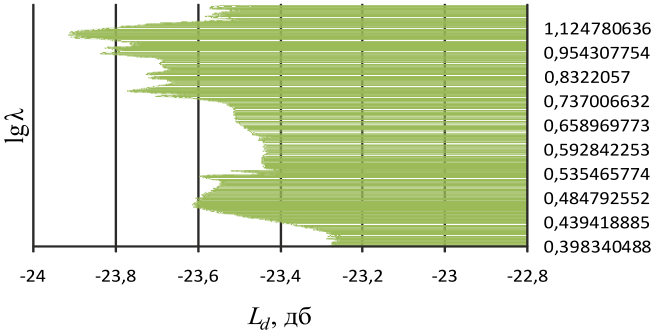


Рисунок 3 – Логарифмическая волновая характеристика петрушки

Анализируя ЛВХ укропа и петрушки, полученные из выражения (2), определяем четыре области, где коэффициент затухания L_d излучения в сырье уходит в отрицательную область и имеет максимальное значение. Пики характеристик, соответствующие максимальной поглощательной способности ИК-излучения сырьем, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные данные по коэффициенту затухания мощности ИК-излучения в сырье L_d max

Укроп			Петрушка		
L_d max, дб	lg λ	λ, мкм	L_d max, дб	lg λ	λ, мкм
–24,05	1,10	12,50	–23,90	1,10	12,50
–23,98	***0,93***	***8,70***	***–23,81***	***0,95***	***9,00***
–23,85	0,50	3,10	–23,78	0,73	5,30
–23,80	0,44	2,75	–23,60	0,48	3,00

Условием применимости данной методики косвенной оценки спектральных характеристик сырья является согласование их с параметрами ИК-излучателя при его выборе, а также выявление длин волн излучения, при которых исключается вероятность перегрева термолабильного сырья, что позволит сократить время сушки и получить продукт высокого качества с наименьшими энергозатратами.

При разработке сушильных ИК-установок со сниженным энергопотреблением конструктивные параметры камеры играют важную

роль. Основными показателями становятся количество теплоты Q и коэффициент облученности φ, определяющие, какая часть полного излучения, идущего от генератора ИК-излучения, попадает на поверхность-приемник.

Нами разработана методика расчета конструктивных параметров каскадных сушильных установок. В данной методике установлена взаимосвязь количества теплоты, эффективно используемой в процессе ИК-сушки, коэффициента облученности сырья, конструктивных параметров сушильной камеры и ИК-излучателя. Объединяет в себе зависимости данных параметров качественной сушки выражение для определения количества тепла (6):

$$Q = 4,9\varepsilon_{\text{пр}}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]H\ , \qquad (6)$$

где Q – количество тепла, передаваемого излучением от плоскости 1 к плоскости 2 в результате их взаимного излучения и поглощения, Дж;

T_1 и T_2 – абсолютные температуры поверхностей тела 1 и тела 2, К;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы;

F_1, F_2 – площади поверхностей тела 1 и тела 2, м^2;

$\varphi_{1\text{-}2}$ и $\varphi_{2\text{-}1}$ – средние на поверхности коэффициенты облученности тела 1 на тело 2 и тела 2 на тело 1;

величина $H = \varphi_{1\text{-}2}F_1 = \varphi_{2\text{-}1}F_2$ называется взаимной излучающей поверхностью тела 1 и тела 2 и определяется выражением (7):

$$H = \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos\psi_1 \cos\psi_2}{\pi r^2} dF_2\ , \qquad (7)$$

где ψ_1 и ψ_2 – углы, составленные направлением излучения с нормалями к площадкам dF_1 и dF_2;

r – расстояние между площадками.

Выражение для определения коэффициента облученности между поверхностями имеет вид

$$\varphi_{F_1-F_2} = \frac{1}{\pi}\int_{F_2} \frac{\cos\psi_1 \cos\psi_2}{r^2} dF_2 \qquad (8)$$

и показывает, какая часть полного излучения, идущего с поверхности 1 в пространство, попадает на поверхность 2 или какая доля всего излучения, поступающего на площадку 1 из пространства, идет с поверхности 2.

Коэффициент облученности – это своего рода КПД сушильной установки, поэтому при проектировании последней необходимо стремиться к максимальному его значению. Из выражения (8) становится понятно, что важной задачей при определении оптимальных конструктивных параметров ИК-установки является определение размеров излучателей, взаимное расположение их в сушильной камере и расстояния от излучателей до сырья.

При проведении расчетов коэффициента облученности φ можно принять, что каскад сушильной камеры имеет форму призмы в соответствии с рисунком 4.

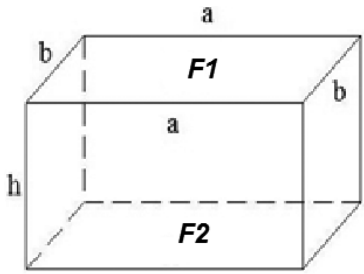


Рисунок 4 – Вспомогательная схема для расчета оптимальных конструктивных параметров каскадов сушильной установки

Выражение (8) для определения среднего коэффициента облученности между противоположными поверхностями F_1 и F_2 после применения двойного интегрирования и решения интеграла выразится следующей зависимостью:

$$\varphi_{F_1-F_2} = \frac{2}{ab\pi}\left[b\sqrt{a^2+h^2}\cdot\arctan\frac{b}{\sqrt{a^2+h^2}} + a\sqrt{b^2+h^2}\times\right.$$

$$\left.\times\arctan\frac{a}{\sqrt{b^2+h^2}} - bh\arctan\frac{b}{h} - \arctan\frac{a}{h} - \frac{h^2}{2}\ln\frac{\left(h^2+a^2+b^2\right)h^2}{\left(a^2+h^2\right)\left(b^2+h^2\right)}\right].$$

Полученное уравнение отображает зависимость габаритных параметров каскада сушильной установки (a – длина; b – ширина; h – высота) и дает возможность разработать камеру с параметрами, при которых коэффициент облученности будет стремиться к максимуму, делая процесс сушки более коротким по времени, а следовательно, и менее энер-

гоемким. Данная методика расчета справедлива только в случае плоского источника, что конкретизировало выбор типа ИК-излучателя, его геометрические размеры, исключив точечные источники: ИК-лампы и ТЭНы. Для получения верного равенства выражение (9) рассчитывалось при постоянной величине *b* (ширина, определяемая типоразмерным рядом излучателя). Результаты расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчета конструктивных параметров каскада сушильной установки

a – длина облучаемой зоны, м	*b* – ширина, м	*h* – высота каскада, м
1,3	0,51	0,3

Спектральные характеристики сырья, биотехнические условия нагрева укропа и петрушки, полученные конструктивные параметры каскада стали факторами, определившими выбор генераторов ИК-излучения в конструкции сушильной установки, которыми стали низкотемпературные пленочные электронагреватели (рисунок 5, таблица 3).

Рисунок 5 – Внешний вид напыленного плоского пленочного электронагревателя

Таблица 3 – Технические характеристики генератора ИК-излучения – напыленного низкотемпературного пленочного электронагревателя

Напряжение, В	220
Удельная мощность, Вт/м^2	350
Размер нагревателя, м	0,51×1,3
Толщина напыленного резистивного слоя, нм	45
Коэффициент черноты, ε	0,96
Температура нагрева, °С	50

Факторов обоснования несколько. Во-первых, напыленные пленочные электронагреватели (НЭП) обладают высокой степенью черноты ε, которая реализована тем, что в качестве резистивного нагревающего и излучающего элемента используют термостойкую электроизоляционную пленку с нанесенным на всю ее поверхность слоем нихрома. Степень черноты нихрома очень близка к степени черноты абсолютно черного тела, что позволяет НЭП даже при низких температурах нагрева обладать максимальной плотностью излучения.

Во-вторых, согласно теоретически полученным спектральным характеристикам НЭП (рисунок 6, точка *а*), было установлено, что нагреватель обладает максимальным коэффициентом эффективного использования энергии при длине волны излучения 9 мкм и температуре нагрева 48 °С. Это позволяет паре «сырье – нагреватель» работать энергоэффективно, селективно и с учетом термолабильности данного сырья.

В-третьих, НЭП представляет собой равномерно излучающую поверхность, а возможность варьирования толщины резистивного слоя позволяет создавать нагреватели требуемой мощности в широких пределах заданных геометрических размеров.

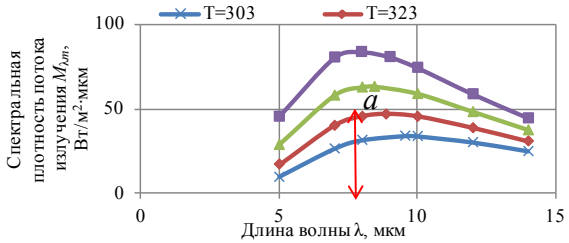


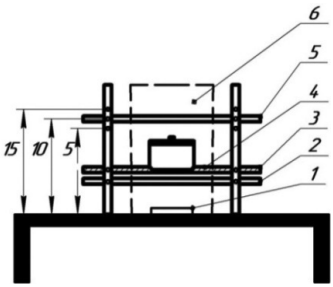
Рисунок 6 – Спектральные характеристики низкотемпературных пленочных электронагревателей в зависимости от температуры нагрева

В **третьей главе** *«Программа и методики исследования процесса сушки термолабильного сырья инфракрасным излучением (на примере зеленных культур)»* показано, что программой экспериментов предусматривалось: исследование характера зависимости времени и качества сушки от спектральных оптических характеристик сырья и генераторов ИК-излучения – НЭП; определение режимов сушки термолабильных культур на примере укропа и петрушки и обоснование конструктивных параметров установки для ее реализации; определение органолептических характеристик и содержания

витамина С сухопродукта; оценка энергетической и экономической эффективности установки. В качестве базового варианта использовалась сушильная установка «Урал-4».

Спектральные оптические характеристики для укропа и петрушки с начальной влажностью 80% определялись с помощью ИК-Фурье спектрометра BRUKER Optics на базе Южно-Уральского государственного университета. Закладываемый в кюветы продукт подготавливался по стандартной методике, характеристики в виде интерферограмм получали с помощью программного обеспечения спектрометра и человеко-машинного интерфейса.

С целью установления взаимосвязи спектральных характеристик сырья и излучателя НЭП на основе оценки вольтовой интегральной чувствительности излучения, а также определения режимов сушки нами была разработана лабораторная установка (рисунок 7) с использованием оптического инфракрасного датчика. Для повышения эффективности и расширения функциональных возможностей установки для исследования режимов сушки сельскохозяйственного сырья была разработана система автоматического управления процессом.



1 – оптический датчик; 2 – стекло; 3 – изоляционный материал;
4 – продукт сушки; 5 – пленочный электронагреватель; 6 – активная зона

Рисунок 7 – Экспериментальная установка

Предлагаемая система автоматического управления позволяет задавать параметры, при которых необходимо проводить процесс сушки с максимальной интенсивностью и не допустить снижения качества сырья в ходе процесса. Точно допустимые температурные режимы, а также настройки САУ, при которых она будет способна анализировать полученные данные и контролировать процесс сушки

в реальном времени, было предусмотрено установить на основании экспериментально полученных динамических характеристик нагрева и охлаждения пленочных электронагревателей.

Оценка качества сухопродуктов проводилась в два этапа. Первый этап с использованием стандартного метода определения органолептических показателей сухопродукта. Сущность метода заключается в оценке внешнего вида, цвета, консистенции, запаха и вкуса. Оценка проводилась по 5-балльной шкале и была отражена в дегустационном листе. Второй этап заключался в определении содержания в зеленных культурах витамина С и соответствие его ГОСТ Р52622-2006, а также сравнении качества полученных сухопродуктов с сухопродуктами известных торговых марок, маркированных ГОСТ. Оценка качества выполнялась лабораторией ГНУ ЮУНИИПОК Россельхозакадемии г. Челябинск и подтверждена протоколом.

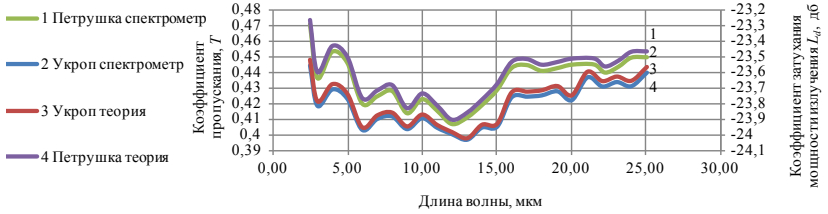
В **четвертой главе** *«Результаты экспериментальных исследований»* проведен анализ экспериментальных данных.

Любое сырье обладает четко выраженной селективностью к поглощению ИК-излучения. Поэтому для практических целей в условиях выбора ИК-излучателя необходимо пользоваться спектральными характеристиками, которые отражают взаимодействие продукта с лучистой энергией во всем используемом диапазоне длин волн, что нами и было сделано.

Максимальное поглощение ИК-излучения сырьем приходится на четыре области: 3, 6; 9 и 12–13 мкм. По уравнению Вина четыре значения пиковой интенсивности соответствуют ряду поверхностных температур источника: 692 °С; 210 °С; 48 °С; –30 °С и –50 °С. Согласно биотехническим условиям нагрева термолабильного сырья, для ИК-сушки подходит только одна область излучения – 9 мкм (48 °С), так как температуры 692 °С и 210 °С вызовут биохимические изменения и снизят пищевую ценность. Область минусовых температур соответствует сублимационному виду сушки, который не подходит для зеленных культур из-за неизбежности разрыва тканей тонколистой массы. Полученные впервые опытным путем спектральные характеристики укропа и петрушки подтверждают ранее предложенную (глава 2) методику определения коэффициента затухания излучения в сырье с помощью ЛВХ (рисунок 10), что позволяет говорить о ее применимости при составлении технологических регламентов сушки растительного сырья.

Рисунок 8 – Зависимость коэффициента пропускания укропа от длины волны в инфракрасной области спектра

Рисунок 9 – Зависимость коэффициента пропускания петрушки от длины волны в инфракрасной области спектра



1 – петрушки, полученные теоретическими методами; 2 – петрушки, полученные с помощью спектрометра; 3 – укропа, полученные теоретическим методом; 4 – укропа, полученные с помощью спектрометра

Рисунок 10 – Спектральные оптические характеристики сырья

Установленные закономерности изменения оптических характеристик использовались при выборе пленочных электронагревателей и режимов сушки. Согласовав спектральные характеристики

сырья (рисунок 10) и нагревателя (рисунок 6) по длине волны излучения 9 мкм, с помощью лабораторной установки (рисунок 7) проверили селективность работы пары «сырье – излучатель», корректность подобранного режима и установили зависимость длительности процесса от расстояния между излучателем и сырьем на основании зависимости изменения поглощательной способности сырья по мере его высыхания (рисунок 11).

Из полученной зависимости видно, что на удаленности в 5 см влажное сырье на 80% поглотило излучение подобранной длины волны, время цикла до достижения конечной влажности 8% составило 80 минут, при этом замечалось замедление процесса из-за образования «водного тумана» над поверхностью сырья. При удаленности в 10 см поглощение составило 76%, однако переходный процесс был более равномерным, а окончание сушки отмечено на 60 минутах. Удаленность в 15 см показала худший результат поглощением в 60% и незаконченностью переходного процесса.

Затраты энергии, контролируемые в ходе эксперимента, при наиболее рациональном удалении излучателя от сырья 10 см составили 0,9 кВт·ч на 1 кг испаренной влаги, что на 28% ниже ближайших аналогов ИК-установок.

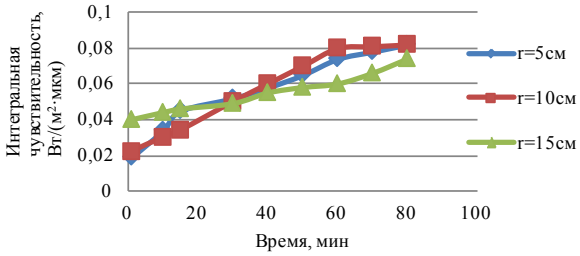


Рисунок 11 – Изменение оптических характеристик сырья в процессе сушки при трех вариантах удаленности излучателя от продукта: 5 см, 10 см, 15 см

Анализ динамических характеристик НЭП в режимах нагрева и охлаждения (рисунки 12–13) позволил сделать следующие практические выводы:

– НЭП можно отнести к безынерционным нагревателям, с монотонным переходным процессом, что дает возможность управлять ими по длине волны в автоматическом режиме;

– время выхода нагревателя в каскаде установки на рабочую температуру сушки для зеленных культур составляет 1 мин 36 с;

– прерывистый режим сушки позволит не только управлять градиентом температуры, но и получить экономию энергии.

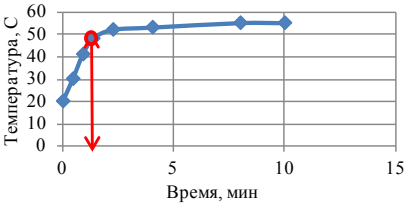


Рисунок 12 – График динамики нагрева напыленного пленочного электронагревателя $P_{уд}$ = 350 Вт/м^2

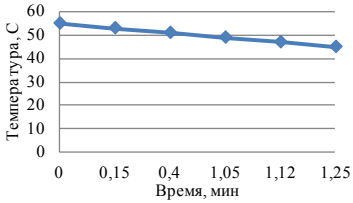


Рисунок 13 – График динамики охлаждения напыленного пленочного электронагревателя $P_{уд}$ = 350 Вт/м^2

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил определить технологический регламент сушки укропа и петрушки, с применением которого были получены образцы сухопродуктов. Качество образцов оценивалось по содержанию в них витамина С в соответствии с ГОСТ Р 52622-2006 химико-диагностической лабораторией ГНУ ЮУНИИПОК Россельхозакадемии и подтверждено протоколом. Анализ показал, что образцы, высушенные предложенным способом, соответствуют ГОСТ и по содержанию целевого компонента (витамина С) превышают образцы сухопродуктов известных торговых марок и высушенных на базовом варианте установке «Урал-4» от 20 до 60 %.

В **пятой главе** *«Разработка инфракрасной установки для сушки термолабильного сырья с оценкой энергетической и экономической эффективности»* представлены материалы и инженерные расчеты по разработке установки транспартерно-каскадного типа для сушки термолабильных культур ИК-излучением. Экспериментальные исследования подтвердили корректность расчетных данных, что позволило разработать конструкторскую документацию и изготовить опытный образец сушилки (рисунок 14) с оптимизированными параметрами (таблица 3) для зеленных культур.

Рисунок 14 – Внешний вид транспортерно-каскадной сушильной установки ИК-типа непрерывного действия

Таблица 4 – Конструктивно-технологические параметры установки для сушки зеленных культур

Габариты (длина, высота, ширина), м	1,70×1,50×0,6
Тип	Транспортерно-каскадная непрерывного действия
Напряжение питания, В	220
Мощность, кВт	1
Удельная мощность ИК-излучателей, Вт/м^2	350
Тип излучателя	НЭП
Высота подвеса излучателя, м	0,01
Рабочая температура программируемая, °С	30–60
Количество каскадов, шт.	4
Время сушки (плавно регулируемое), мин	8–60
Производительность, кг исп. влаги/ч	0,9
Время сушки, контроль температуры и влажности осуществляется через программируемые регуляторы и систему датчиков, имеющих человеко-машинный интерфейс	

Опытный образец сушильной установки на примере зеленных культур характеризуется более высокой технико-экономической эффективностью за счет уменьшения затрат энергии на 1 кг испаренной влаги на 28 % и улучшения органолептических показателей готового продукта на 60 % по сравнению с базовым вариантом установкой «Урал-4». Годовой экономический эффект составляет 85 тыс. рублей в расчете на установку с производительностью по испаренной влаге 0,9 кг/ч.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На сегодняшний день из множества различных способов и технологий сушки растительного сырья использование инфракрасного (ИК) излучения ученые выделяют как менее энергоемкий и более экологичный способ. Однако при разработке установок с использованием ИК-излучения исследователи не всегда учитывают взаимосвязь спектральных оптических характеристик излучателя и сырья, а также такое свойство, как термолабильность. Использование низкотемпературных инфракрасных пленочных электронагревателей в конструкции установок для сушки растительного сырья позволит разработать технологию, учитывающую термолабильность и позволяющую получить сухопродукт высокого качества при снижении энергозатрат на его получение.

2. Исследование оптических характеристик термолабильного растительного сырья зеленных культур и генераторов ИК-излучения – низкотемпературных пленочных электронагревателей – дало возможность установить их взаимосвязь и определить, что пара «сырье – излучатель» способна работать селективно на длине волны 9 мкм (48 °С), решая тем самым актуальную научно-техническую задачу – уменьшение энергоемкости процесса сушки путем исключения потерь излучения рассеиванием и переотражением.

3. Методика теоретического определения коэффициента затухания мощности излучения, разработанная на основе применения логарифмической волновой характеристики и впервые апробированная в данной работе, позволяет оценить оптические характеристики термолабильного сырья без использования сложной техники ИК-спектроскопии и анализировать селективность поглощения инфракрасного излучения сырьем в широком диапазоне длин волн.

4. Методика определения селективности работы пары «излучатель – сырье» с помощью датчика интегральной чувствительности позволяет оценить не только поглощательную способность сырья, но и изменение влажности продукта по мере его высыхания.

5. Полученные опытным путем графические зависимости спектральных оптических характеристик сырья (впервые на примере укропа и петрушки) подтверждают корректность разработанной теоретической методики и позволяют определить коэффициенты поглощения и пропускания укропа и петрушки, необходимые для составления технологического регламента сушки.

6. Оценка качественных показателей полученных образцов сухопродукта по остаточному содержанию витамина С показала, что образцы соответствуют ГОСТ и обладают высокими органолептическими характеристиками.

7. Полученные конструктивно-технологические параметры и полностью автоматизированный процесс сушки с контролем основных параметров сушки помогли получить технико-экономическую эффективность. В предлагаемом варианте сушильной установки затраты энергии на килограмм испаренной влаги при сушке зеленных культур составили 0,9 кВт·ч, что на 28 % экономичнее ближайших аналогов, органолептические показатели качества сухопродукта соответствуют ГОСТ и выше аналогов по содержанию витамина С в среднем на 60 %.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Попов, В. М. Использование пленочных электронагревателей (ПЛЭН) в технологическом процессе сушки растительного и дикорастущего сырья [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина // Вестник КрасГАУ. – 2011. – № 12. – С. 216–218.

2. Попов, В. М. Методика выбора ИК-излучателей при проектировании установок для сушки термолабильных культур [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина // Известия СПбГАУ. – 2013. – № 32. – С. 238–242.

3. Попов, В. М. Применение инфракрасных пленочных электронагревателей в конструкции сушильных установок каскадного типа [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, Е. И. Шукшина // Известия СПбГАУ. – 2012. – № 26. – С. 387–391.

4. Попов, В. М. Сушка термолабильных культур в ИК-диапазоне с учетом оптических свойств продукта [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, Е. И. Шукшина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. : Энергетика. – 2012. – Вып. 17. – № 26(294). – С. 17–20.

Публикации в других изданиях

5. Афонькина, В. А. Теоретические аспекты обоснования выбора пленочных ИК-излучателей для сушки термолабильных культур [Текст] / В. А. Афонькина // Вестник ЧГАА. – 2012. – Т. 62. – С. 5–9.

6. Попов, В. М. Возможность использования энергии возобновляемых источников при эксплуатации пленочных ИК-нагревателей в различных сферах АПК [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, С. Ю. Вахрушева // Материалы LII междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2013. – Ч. V. – С. 232–238.

7. Попов, В. М. Инновационные энергосберегающие оптические технологии и технические средства в АПК [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина // Экология и природопользование. Т. 3. : Избр. труды междунар. симп. по фундамент. и прикл. проблемам науки. – М. : РАН, 2012. – С. 69–74.

8. Попов, В. М. Инфракрасная сушка гранулированных органоминеральных удобрений на основе птичьего помета с применением пленочных нагревателей ПЛЭН [Текст] / В. М. Попов, А. А. Кечкин, В. А. Афонькина // Материалы L междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2011. – Ч. V. – С. 175–181.

9. Попов, В. М. Инфракрасная сушка зеленных культур [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина // Межвузовский науч. сборник «Энергообеспечение и энергосбережение на предприятиях АПК». – Уфа, 2011. – № 6. – С. 72–74.

10. Попов, В. М. Использование пленочных электронагревателей для повышения эффективности послеуборочной обработки семян рапса [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, Е. И. Шукшина [и др.] // Материалы LII междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2013. – Ч. V. – С. 238–243.

11. Попов, В. М. Использование пленочных электронагревателей для повышения эффективности процесса сушки мелкосеменных культур [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, Е. И. Шукшина // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития. – Красноярск : КрасГАУ, 2012. – № 2. – С. 144–146.

12. Попов, В. М. Исследование спектральных характеристик пленочных электронагревателей в технологическом процессе сушки зеленных культур [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, А. А. Кечкин // Материалы L междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2011. – Ч. V. – С. 171–174.

13. Попов, В. М. Мелкосемянные культуры как объект ИК-сушки [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, Е. И. Шукшина // Материалы LI междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2012. – Ч. V. – С. 159–164.

14. Попов, В. М. Поиск рационального энергосберегающего способа сушки рапсового семени [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, Е. И. Шукшина [и др.] // Материалы X междунар. науч.-практ. конф. «Vĕda a vznik» – 2013/2014». – Прага : Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2014. – Ч. 32. – С. 30–33.

15. Попов, В. М. Применение инфракрасных пленочных электронагревателей в предварительной подготовке семян сельскохозяйственных культур к электросепарации [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, М. Т. Сковородников [и др.] // Материалы IX междунар. науч.-практ. конф. «Научная индустрия европейского континента». – Прага : Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2013. – Ч. 33. – С. 73–75.

16. Попов, В. М. Проблемы проектирования и эксплуатации электротехнологических установок [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина // Материалы LII междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2013. – Ч. V. – С. 227–232.

17. Попов, В. М. Сушка овощей и фруктов пленочными лучистыми электронагревателями [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина // Материалы XLIX междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАУ, 2010. – Ч. 2. – С. 374–378.

18. Попов, В. М. Теоретическое обоснование конструктивных параметров инфракрасной электроустановки для сушки термолабильных культур [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, Е. И. Шукшина [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. – Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2012. – № 20. – С. 343–349.

Авторские свидетельства, патенты

19. Пат. 102771. Российская Федерация, RU F 26 B 3/30. Сушильная установка [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, А. А. Кечкин. – № 2010140666 ; заявл. 04.10.10 ; опубл. 10.03.1, Бюл. № 7.

20. Пат. 122758. Российская Федерация, RU F 26 B 9/06. Сушильная установка [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, Е. И. Шукшина, А. В. Горбатько. – № 2012106499 ; заявл. 10.04.07 ; опубл. 10.12.12, Бюл. № 34.

Подписано в печать 08.12.2014. Формат 60×84/16
Гарнитура Times. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 269

Отпечатано в ИПЦ ФГБОУ ВПО ЧГАА
454080, г. Челябинск, ул. Энгельса, 83