

На правах рукописи

**УРАЗОВ Сергей Игоревич**



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА  
КОНВЕКТИВНО-ЛУЧЕВОЙ СУШКИ ОВОЩЕЙ  
В ПОЛЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА  
ЗА СЧЕТ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕТРА  
(НА ПРИМЕРЕ СУШКИ МОРКОВИ)**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии  
и электрооборудование в сельском хозяйстве

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2010

Работа выполнена на кафедре применения электрической энергии в сельском хозяйстве Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Возмилов Александр Григорьевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Басарыгина Елена Михайловна**

кандидат технических наук, доцент  
**Мелякова Ольга Александровна**

Ведущее предприятие: **ГООУ ВПО «Южно-Уральский  
государственный университет»**

Защита состоится «17» декабря 2010 г., в 9 часов на заседании диссертационного совета Д 220.069.01 при ФГОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинской государственной агроинженерной академии.

Автореферат разослан «15» ноября 2010 г. и размещен на официальном сайте ФГОУ ВПО «ЧГАА» <http://www.csaa.ru> «16» ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Возмилов А.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современное снабжение населения Российской Федерации овощной продукцией сельского хозяйства в условиях резкой неоднородности посевных площадей и рискованного земледелия в большинстве регионов является проблематичным. Во многих регионах выращивание овощей невозможно или требует несоразмерных затрат. В таком случае проблема нехватки овощной продукции решается с помощью транспортировки из других регионов, причем теряется значительная часть отгруженной продукции. Это связано с тем, что, как правило, транспортировка производится в осенне-зимний период, когда среднесуточная температура воздуха опускается ниже нуля. Овощная продукция, с её высоким влагосодержанием, при низких температурах может полностью или частично замерзнуть, вызывая необратимые изменения в клеточном составе. Транспортировка овощной продукции навалом приводит к быстрому распространению фитопатогенной микрофлоры и, как следствие, к порче значительной части овощей. Каждая дополнительная перевалка товара приводит к травмированию овощей, что делает их более уязвимыми для болезнетворных бактерий.

Исследование вопросов по сохранности овощной продукции показало, что снижение потерь при транспортировке невозможно без изменения исходных свойств продукции.

Анализ опыта зарубежных стран в деле снижения потерь овощной продукции при транспортировке показал, что необходимо производить хотя бы частичную переработку овощей в местах производства. Так, обезвоживание овощей до 8-12% влажности позволяет снизить объем перевозок втрое, существенно сократить потери продукции. Кроме того, переработка на месте производства овощей позволяет использовать некондиционную по размерам продукцию. Перспективным способом обезвоживания продукции растениеводства является конвективно-лучевая сушка.

Проведя анализ существующих способов интенсификации конвективно-лучевой сушки, мы пришли к выводу, что её интенсификация с помощью коронного разряда изучена недостаточно. В связи с вышеизложенным и была выбрана тема исследования.

Работа выполнена в соответствии с Межведомственной координационной программой фундаментальных и приоритетных исследова-

ний по научному обеспечению развития агропромышленного комплекса РФ на 2006 — 2010 гг. шифр IX.01 «Разработать систему конкурентоспособных экологически безопасных технологий и комплексы энергосберегающих машин нового поколения для производства приоритетных видов сельскохозяйственной продукции».

**Цель работы:** повышение эффективности конвективно-лучевой сушки продукции растениеводства путем активации сушильного агента электрическим ветром.

**Задачи исследования:**

1. Провести теоретическое исследование влияния электрического ветра на процесс конвективно-лучевой сушки овощей.

2. Провести экспериментальное исследование по интенсификации электрического ветра в зависимости от конструктивных параметров коронно-разрядной системы сушильной установки и температуры воздушной среды.

3. Провести экспериментальное исследование по определению влияния электрического ветра на динамику процесса конвективно-лучевой сушки овощей.

4. Разработать рекомендации по модернизации установок конвективно-лучевой сушки с учетом результатов исследований и определить технико-экономическую эффективность установок конвективно-лучевой сушки с использованием электрического ветра.

**Объект исследования:** процесс сушки овощей в конвективно-лучевых сушильных установках с использованием электрического ветра.

**Предмет исследования:** закономерности процесса конвективно-лучевой сушки овощей с использованием электрического ветра; взаимосвязь между его параметрами.

**Научная новизна основных положений,  
вносимых на защиту:**

1. Предложено аналитическое выражение, учитывающее влияние основных параметров поля коронного разряда на скорость испарения влаги из высушиваемого материала.

2. Предложен сравнительный критерий, учитывающий сокращение продолжительности конвективно-лучевой сушки в результате интенсификации и позволяющий проводить сравнительную оценку энергетической эффективности сушильных установок.

3. Получено аналитическое выражение для расчета температуры нагрева тел, коэффициент теплоотдачи которых линейно зависит от температуры.

4. Определена корреляционная зависимость, учитывающая влияние массы испаренной из высушиваемого продукта влаги на силу тока коронного разряда.

### **Практическая значимость работы и реализация ее результатов**

Разработаны рекомендации для проектирования сушильных установок с использованием поля коронного разряда, генерирующего электрический ветер, которые могут быть использованы в НИИ, КБ и других организациях при проектировании конвективно-лучевых камерных сушильных установок.

Модернизированная сушильная установка, отличающаяся наличием дополнительных коронирующих электродов над лотками с продуктом (конструкция защищена патентом РФ), позволяет интенсифицировать конвективно-лучевую сушку растительной продукции.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе Челябинской государственной агроинженерной академии, а также при проектировании сушильных установок в ГП ЦКТБ «Агротех».

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались, обсуждались и получили одобрение на ежегодных международных научных конференциях ЧГАУ (Челябинск, 2004-2009 гг.); ИжГСХА (2008 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в четырех научных статьях. Получен патент РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы (из 98 наименований), приложений; содержит 126 страниц основного текста, в том числе 37 рисунков, 10 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследования» приведены результаты анализа литературных источников, из которого следует, что хранение и транспортировка продукции растениеводства часто

не соответствуют санитарным нормам и нуждаются в совершенствовании. Существует ряд способов переработки продукции растениеводства в местах производства с целью снижения её влажности, что позволяет существенно снизить потери при транспортировке и хранении.

Исследованиями и разработкой способов тепловой сушки продукции растениеводства занимались Ребиндер П.А., Лыков А.В., Липатов С.М., Кавказов Ю.Л., Гинзбург А.С., Лебедев П.Д. и другие.

Одним из наиболее перспективных способов сушки является конвективно-лучевая сушка, комбинирующая подвод теплоты к высушиваемому продукту нагретым воздухом и инфракрасным излучением специально подобранной длины волны. Данный способ сушки позволяет в наиболее щадящем режиме обезвоживать нарезанные соответствующими размерами продукты. Однако в связи с особенностями испарения влаги такая сушка является продолжительным и энергоемким процессом.

Исследованиям и разработке способов интенсификации сушки продукции растениеводства посвящены работы Раджабова А.А., Сорочану Н.С., Попова А.М., Зеленко В.И., Казимилова А.Н., Ульриха Н.Н., Троцкой Т.П., Пожелене А., Печенкина И.М., Меляковой О.А. и других.

К способам интенсификации сушки относятся:

- предварительная электроискровая обработка материала;
- предварительная обработка материала электрическим током;
- предварительное охлаждение сушильного агента для конденсации водяных паров;
- предварительная обработка сушильного агента сорбентами для уменьшения его влажности;
- предварительная ионизация сушильного агента;
- сушка в поле коронного разряда.

Предварительная обработка материала, как правило, преследует цель повреждения оболочки клеток растительного материала, за счет чего сушка ускоряется на 40-50%, но усложняются условия хранения и может стать невозможным последующее восстановление продукта.

Понижение влажности сушильного агента на процесс сушки оказывает слабое влияние и усложняет сушильную установку. Охладительная камера или батарея сорбентов повышают аэродинамическое сопротивление конвективному потоку, что приводит к необходимости установки вентиляторов. В свою очередь при установке вентилятора повышаются

требования к чистоте воздуха, поскольку сушильная установка интенсивно запыляется, ухудшая санитарно-гигиенические свойства продукта.

Предварительная ионизация сушильного агента с целью насыщения его озоном достаточно просто позволяет дифференцировать выделение теплоты в зависимости от влажности высушиваемого продукта, но такой способ применим только для сушки растительной продукции при нормальных условиях. Повышение температуры сушильного агента приводит к интенсивному разложению озона и уменьшению полезного эффекта.

Сушка в поле коронного разряда применялась для обезвоживания травы при нормальных условиях; она недостаточно полно изучена. В начале сушки продукт свободно выделяет влагу из капилляров в окружающее пространство, повышая начальную влажность воздуха и изменяя тем самым диэлектрическую проницаемость и удельное сопротивление воздуха. В зависимости от объема закладки продукта, его начальной влажности и времени сушки, при одном и том же напряжении поля коронного разряда получаются далеко не одинаковые величины электрического тока, следовательно, и разные по интенсивности воздействия.

Повышение температуры сушильного агента позволяет ослабить колебания характеристик сушильного агента, снизить его относительную влажность и удельное сопротивление. Получаемое таким образом увеличение электрического тока приводит к интенсивному образованию электрического ветра, с помощью которого можно изменить режим сушки.

Помимо электрического ветра, в поле коронного разряда может происходить озonoобразование, в связи с чем были рассмотрены вопросы озонотенерирования и воздействия озоном на растительные материалы. Известно, что озonoобразование идет интенсивнее при большей силе тока короны. Однако разложение озона интенсифицируется при повышении температуры воздуха. Высокие концентрации озона эффективно дезинфицируют обрабатываемые продукты.

На основе проведенного анализа состояния вопроса были определены задачи исследования.

Вторая глава **«Теоретические исследования поля коронного разряда в нагреваемой среде»** посвящена исследованию механизма взаимного влияния электрического ветра, генерируемого полем коронного разряда, и конвективно-лучевой сушки.

В связи с высокой сложностью расчетов и недостаточной разработанностью теории сушки капиллярно-пористых тел аналитические расчеты проводились для оценки обобщенных параметров сушильных установок.

В общем случае скорость электрического ветра между коронирующим и заземленным электродами определяется по формуле

$$u_{0x} = \sqrt{\frac{I_L}{k \gamma_e A}}, \quad (1)$$

где  $I_L$  – линейный ток поля коронного разряда, А/м;

$k$  – подвижность ионов, м<sup>2</sup>/(В·с);

$\gamma_e$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$A$  – постоянный коэффициент, характеризующий геометрические характеристики коронирующей системы.

Наиболее простое распределение вихрей электрического ветра в коронирующей системе «ряд проводов — плоскость» показано на рисунке 1.

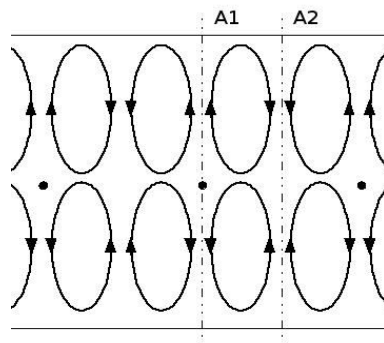


Рисунок 1 — Распределение потоков электрического ветра в системе электродов «ряд проводов между плоскостями»

Необходимо отметить, что электрический ветер в разных сечениях A1 и A2 имеет разное направление. В сечении A1 направление потока воздуха обусловлено непосредственно силами Кулона, в сечении A2 — разностью давлений возле пластин и в центральном сечении.

Если предположить, что пластины проницаемы для дополнительного конвективного потока, то электрический ветер вызовет искажения воздушного потока (рисунок 2).

В зоне I конвективный поток и электрический ветер противодействуют друг другу, давление в сечении A1 повышается и смещает поток в сечение A2. Чем выше перепад давлений в этих сечениях, тем ближе конвективный поток к траектории электрического ветра.



В зоне II конвективный поток и электрический ветер движутся по одной траектории.

В зоне III электрический ветер создает разрежение в сечении A1. За счет разности давлений в сечениях A1 и A2 воздушный поток смещается в сечение A1 и таким образом удаляется через верхнюю пластину.

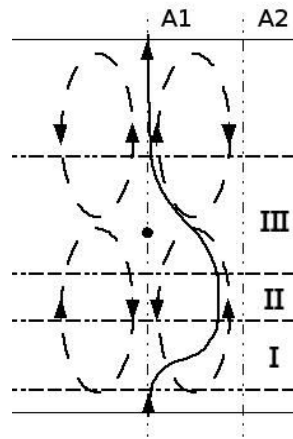


Рисунок 2 — Схема влияния потоков электрического ветра в системе электродов «ряд проводов между плоскостями» на воздушный поток, перпендикулярный коронирующим и плоским электродам

Известно, что над поверхностью жидкости или над влажным продуктом создается область повышенной влажности, препятствующая испарению. Электрический ветер, турбулизируя конвективный поток сушильного агента, изменяет область повышенной влажности (рисунок 3).

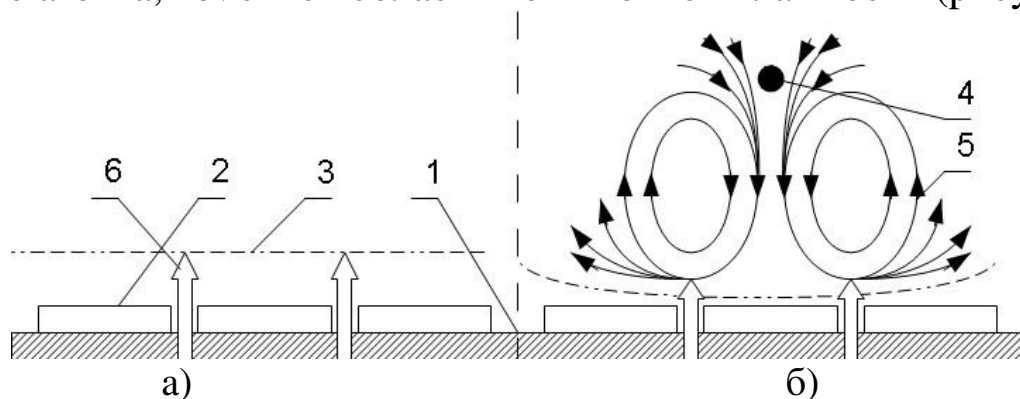


Рисунок 3 – Уменьшение толщины слоя влажного воздуха над влажным продуктом под действием электрического ветра в системе коронирующих электродов «проволочный электрод – плоскость»: а) без коронного разряда; б) с коронным разрядом; 1 – заземленный электрод (лоток для продукта); 2 – продукт; 3 – граница области повышенной влажности (пограничного слоя); 4 – проволочный коронирующий электрод; 5 – поток электрического ветра; 6 – основной воздушный поток

Благодаря такому действию электрического ветра, сушка происходит легче, за счет чего скорость её будет повышаться. При этом известные зависимости режима конвективно-лучевой сушки изменяются, как показано на рисунке 4.

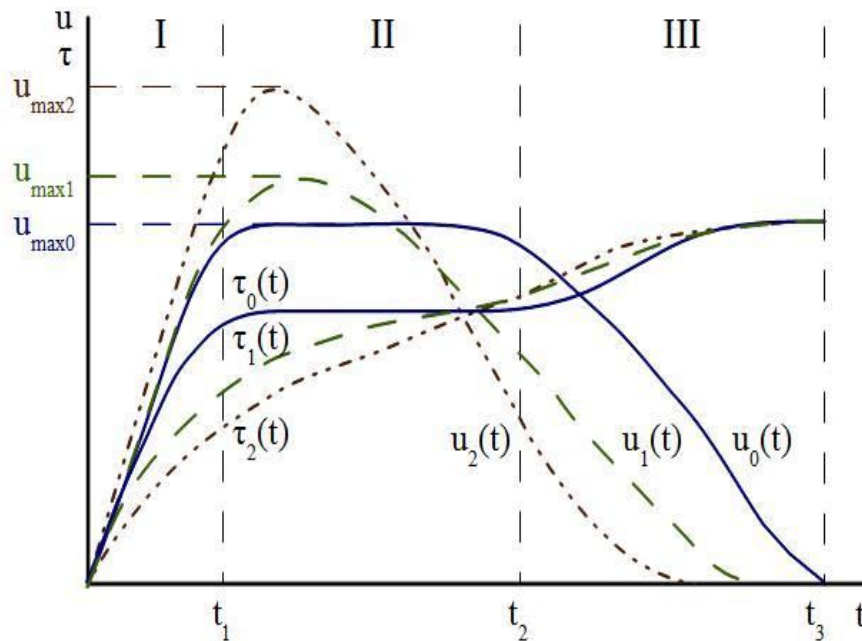


Рисунок 4 – Искажение кривых скорости сушки  $u(t)$  и температуры сушильного агента  $\tau(t)$  в результате действия электрического ветра:  $u_0(t)$ ,  $\tau_0(t)$  – естественные кривые скорости сушки и температуры сушильного агента соответственно;  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  – кривые скорости сушки под действием электрического ветра соответственно меньшей и большей величины;  $\tau_1(t)$ ,  $\tau_2(t)$  – кривые температуры сушильного агента под действием электрического ветра соответственно меньшей и большей величины

Наибольшие искажения претерпевает вторая фаза сушки. При этом температура сушильного агента становится значительно выше температуры окружающей среды, за счет чего повышается сила тока поля коронного разряда, следовательно, и скорость электрического ветра. Турбулизация сушильного агента приводит к улучшению условий удаления свободной влаги из продукта.

В третьей фазе скорость сушки понижается в связи с тем, что свободная влага межклеточного пространства уже удалена, досушка производится только с целью удаления несвязанной влаги из внутриклеточного пространства.

В целом в результате такого изменения режима средняя скорость сушки повышается и общее время сушки сокращается. Увеличение сред-

ней скорости сушки зависит от интенсивности электрического ветра и может быть определено по формуле

$$\Delta u = k_I \cdot I_V = k_U \cdot U (U - U_0) , \quad (2)$$

где  $k_I$  – коэффициент пропорциональности по объемному току короны,  $\text{м}^3/\text{А} \cdot \text{ч}$ ;

$I_V$  – средний за время сушки объемный ток короны,  $\text{А}/\text{м}^3$ ;

$k_U$  – коэффициент пропорциональности по напряжению коронного разряда,  $1/\text{В} \cdot \text{ч}$ ;

$U$  – напряжение поля коронного разряда, В;

$U_0$  – напряжение зажигания коронного разряда, В.

Для анализа эффективности интенсификации предложенным способом может быть использован коэффициент полезного действия сушильных установок. Однако коэффициент полезного действия учитывает только энергетические показатели сушки, не касаясь качественных характеристик сушильной установки. В связи с этим нами предложен новый сравнительный критерий оценки сушильных установок, который может быть определен по формуле

$$K_{\text{эз}} = \frac{m_c}{P_1 t_c} , \quad (3)$$

где  $m_c$  – масса сухого продукта, соответствующего по своим свойствам ГОСТу, кг;

$P_1$  – мощность ТЭНов сушильной установки, кВт;

$t_c$  – общее время сушки продукта до конечной влажности, ч.

Для разных установок  $K_{\text{эз}}$  зависит не только от размеров рабочей зоны, но и от корректности выбора этой зоны. Например, сушильные установки, не обеспечивающие равномерность сушки, будут иметь меньший  $K_{\text{эз}}$ , несмотря на возможность получения одинаковых КПД при их сравнении. Оценить равномерность сушки можно по равномерности температурного поля поддона с высушиваемым материалом.

Помимо электрического ветра в поле коронного разряда образуется озон, который может влиять на скорость конвективно-лучевой сушки. Известно, что время жизни молекулы озона зависит от температуры воздуха. На основании этого для оценки степени влияния генерируемого в поле коронного разряда озона на процесс конвективно-лучевой сушки была определена динамика разогрева сушильной установки. При этом были учтены полученные Меляковой О.А. экспериментальные данные о

коэффициенте теплоотдачи, линейно зависящем от температуры.

Уравнение теплового баланса для нагревателя при допущениях, соответствующих классическим, и при условии коэффициента теплоотдачи, линейно изменяющегося с ростом температуры, может быть записано в виде

$$P dt = C d\tau + (\alpha_0 + k_\alpha \tau) A_H \tau dt, \quad (4)$$

где  $P$  – мощность нагревателя, Вт;

$C$  – совокупная теплоемкость нагревателя, Дж/К;

$\alpha_0$  – постоянное слагаемое коэффициента теплоотдачи нагревателя, равное теплоотдаче нагревателя при начальных условиях, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$k_\alpha$  – коэффициент, учитывающий увеличение теплоотдачи нагревателя при росте его температуры, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>2</sup>;

$A_H$  – площадь теплоотдающей поверхности нагревателя, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – превышение температуры нагревателя над температурой окружающей среды, К;

$t$  – время, с.

Опуская эквивалентные преобразования, дифференциальное уравнение (4) можно представить в виде

$$\tau(t) = \tau_{уст} \frac{(1+p) \operatorname{th}\left(\frac{t}{B}\right)}{1+p \operatorname{th}\left(\frac{t}{B}\right)} + \tau_0 \frac{1 - \operatorname{th}\left(\frac{t}{B}\right)}{1+p \operatorname{th}\left(\frac{t}{B}\right)}, \quad (5)$$

где  $\tau_{уст}$  – установившееся превышение температуры тела над температурой окружающей среды ( $\tau_{уст} > 0$  и  $\tau_{уст} > \tau_0$  при нагреве), К;

$$\tau_{уст} = \frac{-\alpha_0 + \sqrt{D}}{2k_\alpha}; \quad (6)$$

$\tau_0$  – начальное превышение температуры ( $\tau_0 > 0$  при расчете охлаждения или при ненулевых начальных условиях нагрева), К;

$p$  – параметр кривизны, конкретизирующий кривую нагрева из семейства кривых ( $p < 1$  при нагреве,  $p > 1$  при охлаждении,  $p = 1$  при незначительном изменении коэффициента теплоотдачи, когда выражение (5) превращается в классическую зависимость из теории нагревательных печей);

$$p = \frac{2k_\alpha \tau_0 + \alpha_0}{\sqrt{D}} = \frac{\tau_0 + \tau_X}{\tau_{уст} + \tau_X}; \quad (7)$$

$\tau_x$  – условный показатель превышения температуры, характеризующий свойства нагревателя по теплоотдаче, К;

$$\tau_x = \frac{\alpha_0}{2k_\alpha} - \frac{T_{oc} - 273}{2}; \quad (8)$$

$T_{oc}$  – температура окружающей среды, К;

$B$  – постоянная процесса нагрева, с;

$$B = 2 \frac{C}{\sqrt{D}}, \quad (9)$$

где  $D$  – дискриминант параметрической части дифференциального уравнения нагрева (4), Вт<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>·К<sup>2</sup>;

$$D = \alpha_0^2 + 4 \frac{k_\alpha P}{A_H}. \quad (10)$$

Время разогрева приближенно определяется по формуле

$$t_H = 2,65 B. \quad (11)$$

Таким образом, установившееся превышение температуры слабо зависит от начальных условий, что подтверждается известными экспериментальными исследованиями. Так, опытная сушильная установка доходит до номинального режима уже на 15 минуте разогрева, который слабо зависит от колебаний температуры окружающей среды. Таким образом, озonoобразование возможно только в первые 15 минут работы установки. После этого времени за счет повышения температуры ток коронного разряда, значит, и скорость электрического ветра, будут наибольшими, что позволяет говорить о значительном влиянии его на сушку.

В третьей главе «**Программы и методики экспериментальных исследований**» изложены методики подготовки материала к сушке, проведения экспериментальных исследований по оценке влияния электрического ветра и сопутствующих явлений (образования озона в процессе сушки).

Программой экспериментов предусматривалось:

- исследовать зависимость величины тока коронного разряда от основных конструктивных параметров коронно-разрядной системы;
- исследовать характер зависимости скорости сушки растительных продуктов от напряжения поля коронного разряда;
- исследовать зависимость концентрации озона в рабочем помещении от режима работы, расстояния до установки и напряжения на коронирующих электродах;

- определить изменение времени сушки и расхода энергии в зависимости от режима работы и напряжения на коронирующих электродах.

Сушильная камера экспериментального стенда на основе сушильной установки «Урал-4» показана на рисунке 5, электрическая схема – на рисунке 6.

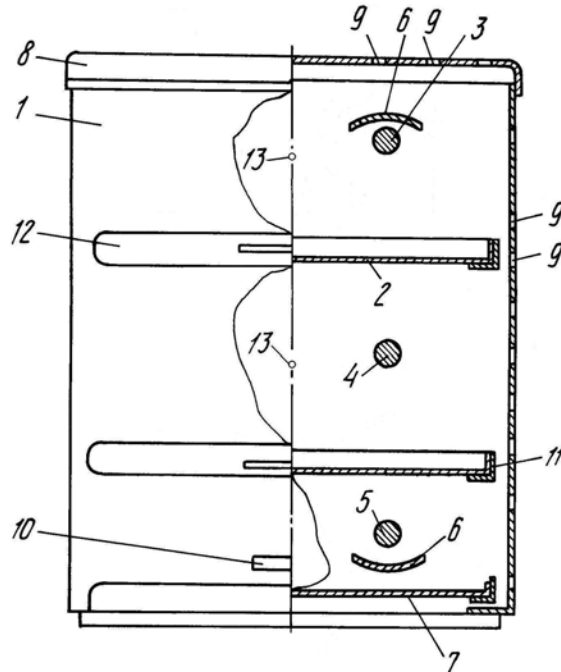


Рисунок 5 – Экспериментальный стенд

1 – корпус; 2 – лотки для закладки материала; 3, 4, 5 – соответственно верхние, средние и нижние керамические ТЭНы; 6 – отражатели;

7 – поддон; 8 – съемная крышка; 9 – отверстия в корпусе сушилки;

10 – блок управления; 11 – направляющие полозья; 12 – окно в передней панели корпуса; 13 – проволочные коронирующие электроды (на примере одного центрально-симметричного)

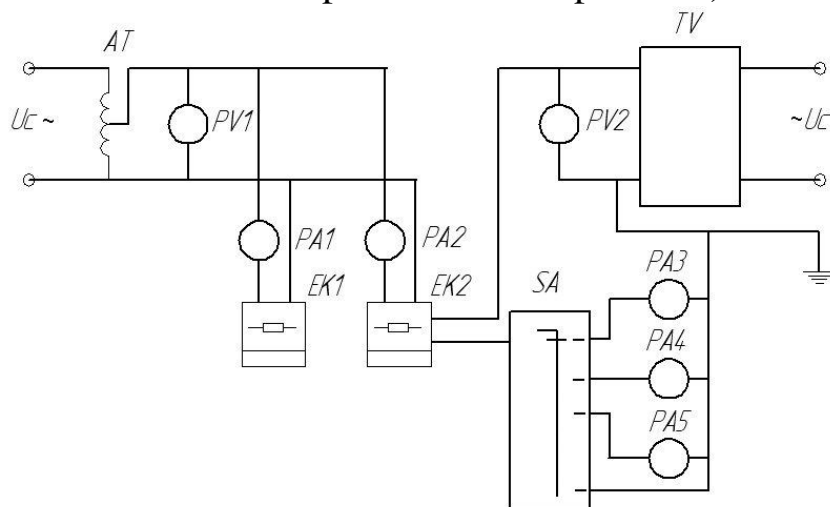


Рисунок 6 — Схема электрическая принципиальная экспериментального стенда

Эксперимент с сушкой растительной продукции проводился параллельно в опытной и контрольной идентичных установках с целью уменьшения степени влияния случайных факторов на результаты эксперимента. Закладываемый продукт подготавливался по стандартной технологии и после перемешивания разделялся на две равные по массе порции, которые помещались в опытную и контрольную сушильные установки.

Для оценки влияния вида коронно-разрядной системы на величину тока использовались съемные рамки (рисунок 7). Выбор проволочных электродов обусловлен рядом факторов:

- минимальными габаритными размерами коронирующей системы (за счет ограниченных размеров зоны, доступной для установки коронирующих электродов, уменьшающейся с ростом температуры сушильного агента);
- наибольшими надежностью и простотой коронно-разрядной системы;
- равномерностью коронного разряда над продуктом параллельно керамическим ТЭНам.

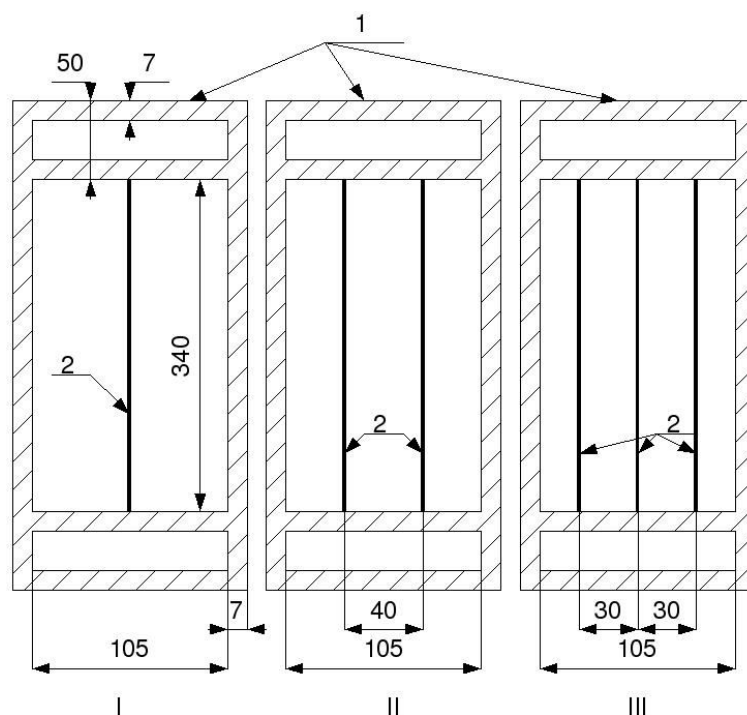


Рисунок 7 — Рамки с проволочными коронирующими электродами  
 I – рамка с одним центрально-симметричным проволочным электродом;  
 II – рамка с двумя проволочными электродами; III – рамка с тремя проволочными электродами; 1 — рама; 2 — проволочные электроды

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

Для определения основных размеров коронно-разрядной системы, обеспечивающей наибольший объемный ток, над каждым лотком размещались рамки с коронирующими электродами с различными межпроволочными и межэлектродными расстояниями. Реализация такой схемы показана на рисунке 8.

При различных коронно-разрядных системах были сняты в четырех повторностях вольт-амперные характеристики. На основании проведенных исследований был сделан вывод, что при использовании трех и более коронирующих электродов появляется эффект взаимного экранирования. Максимальные объемный ток и скорость электрического ветра достигались при использовании системы из двух проволочных коронирующих электродов с межпроволочным расстоянием 40 мм и межэлектродным расстоянием 45 мм.

Дальнейшие исследования влияния поля коронного разряда на зависимости режима конвективно-лучевой сушки проводились с использованием данной коронно-разрядной системы.

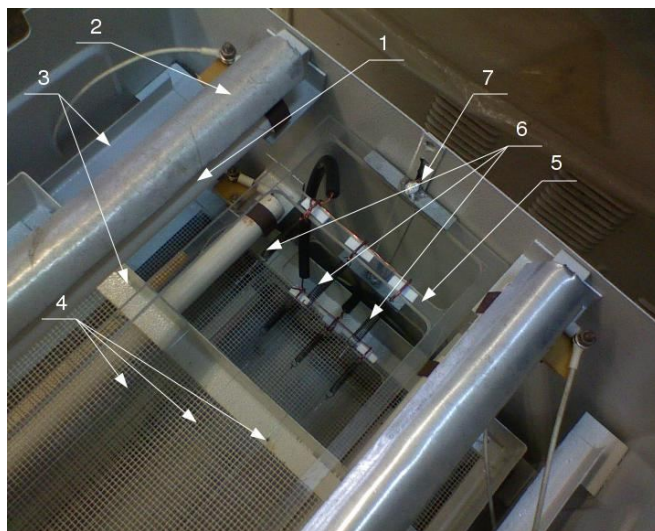


Рисунок 8 – Внутренний вид опытной сушильной установки «Урал-4»  
 1 – керамические ТЭНы; 2 – алюминиевые отражатели; 3 – поддоны для закладки продукта; 4 – проволочные коронирующие электроды (на примере рамки с тремя электродами); 5 – рамка; 6 – узел натяжения проволочного электрода; 7 – узел регулирования высоты рамок

Для оценки влияния электрического ветра на динамику конвективно-лучевой сушки проведен эксперимент в четырех повторностях, ре-



зультаты которого показаны на рисунках 9, 10, 11. В целом результаты эксперимента согласуются с результатами теоретического анализа (см. рисунок 4).

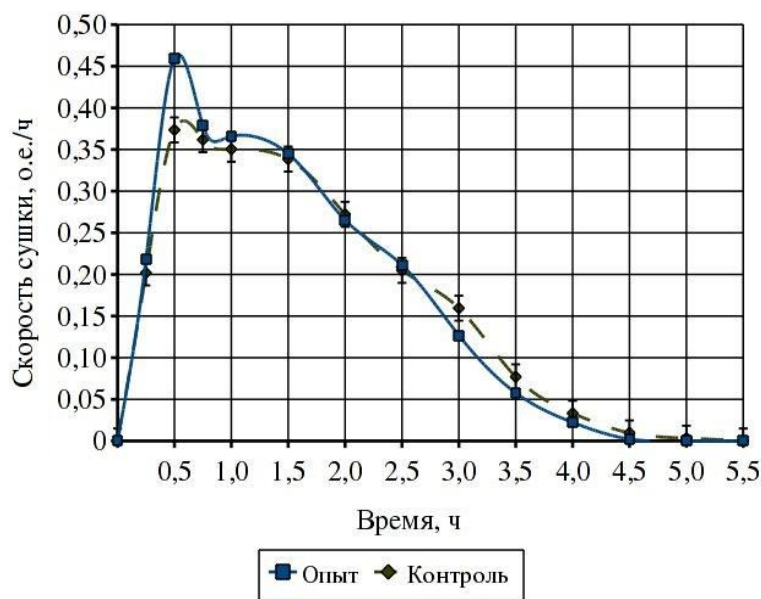


Рисунок 9 – Динамика сушки моркови в опытной и контрольной сушильных установках ( $U_{кр} = 10$  кВ)

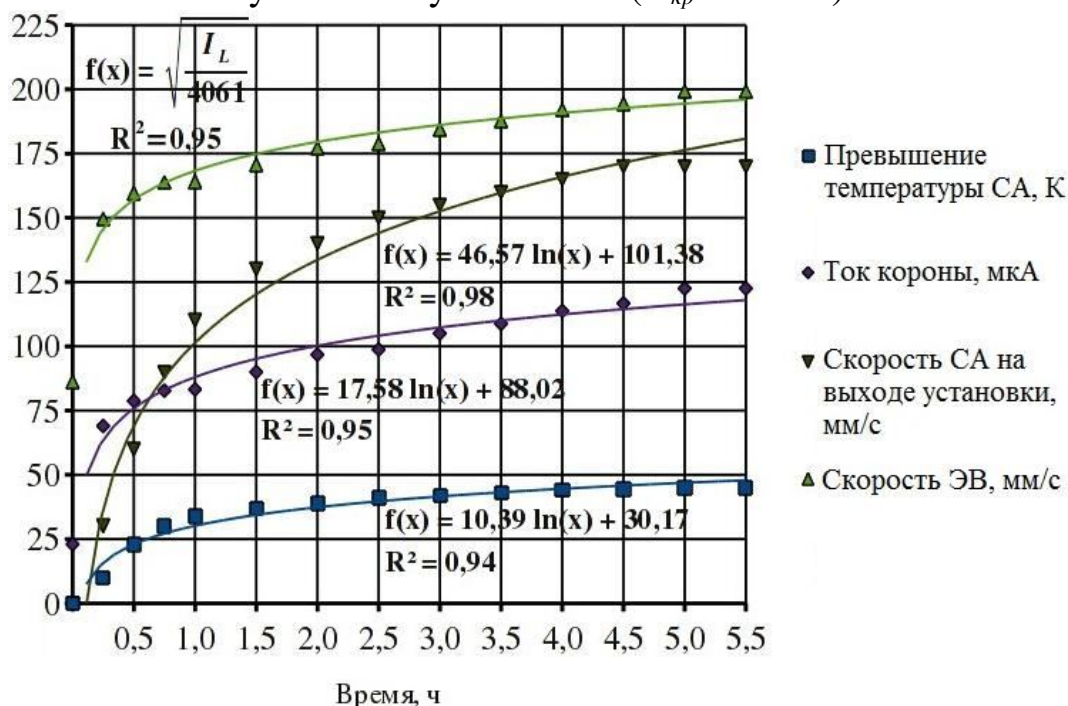


Рисунок 10 – Динамика тока коронного разряда, превышения температуры сушильного агента, скорости сушильного агента и расчетного значения скорости электрического ветра в процессе сушки ( $U_{кр} = 10$  кВ)

Необходимо отметить, что с понижением скорости сушки происходит пропорциональное увеличение тока коронного разряда. Это связано с тем, что при уменьшении скорости сушки снижается влажность су-

шильного агента, за счет чего уменьшается его теплоемкость, следовательно, увеличивается температура сушильного агента. Это приводит к снижению сопротивления воздуха в межэлектродном промежутке, росту тока коронного разряда и скорости электрического ветра.

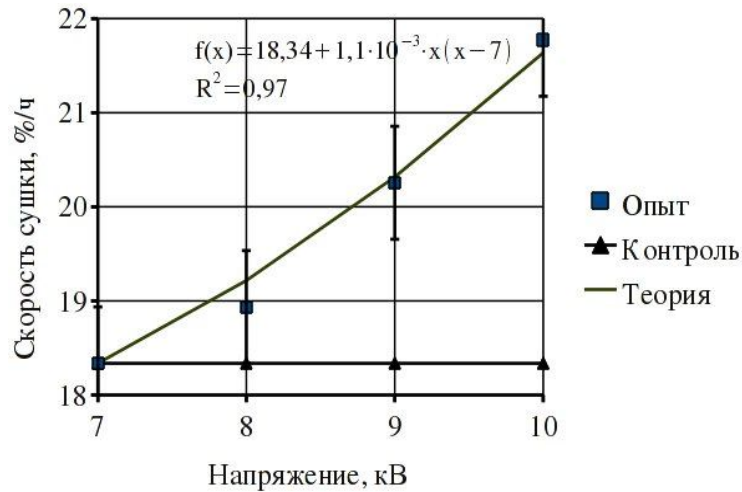


Рисунок 11 – Изменение скорости сушки продукта в зависимости от напряжения, приложенного к коронирующим электродам

Для оценки величины  $K_{ээ}$  (рисунок 12) проводилось исследование распределения температуры материала на поддонах с помощью тепловой камеры, которое показало, что высушиваемый продукт нагревается не выше допустимой по технологии конвективно-лучевой сушки температуры. В целом температурное поле равномерно.

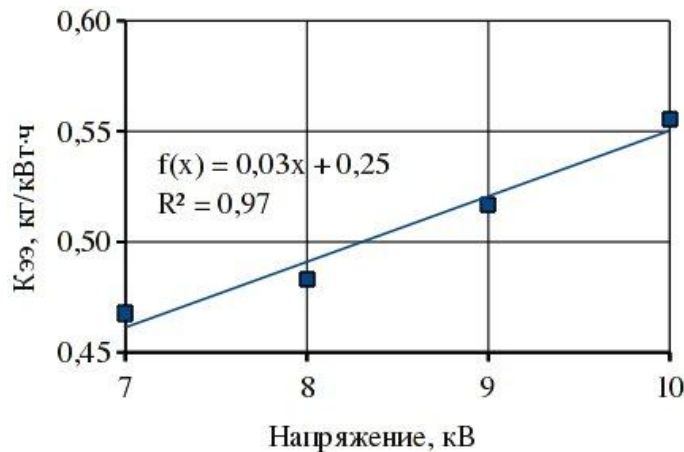


Рисунок 12 – Увеличение  $K_{ээ}$  в зависимости от напряжения, приложенного к коронирующим электродам (при напряжении выше 7 кВ)

Концентрация озона в начальный момент сушки в рабочем помещении не превышала  $15 \text{ мкг/м}^3$ . До сушки и в процессе сушки концентрация озона в рабочем помещении не превышала естественную. В сушильном шкафу наибольшее значение концентрации озона составляло –

213 мкг/м<sup>3</sup>. При разогреве сушильной установки концентрация озона в рабочем помещении не отличалась от естественной уже на 15 минуте работы установки.

Для оценки значимости влияния озона на динамику конвективно-лучевой сушки проведен дополнительный эксперимент, при котором поле коронного разряда включалось не одновременно с началом сушки, а после разогрева сушильной установки (на 15 минуте). В результате эксперимента было выявлено, что динамика сушки в целом повторяет зависимости на рисунке 9. Существенная разница наблюдалась только в момент включения поля коронного разряда. Это позволяет сделать вывод о том, что влияние озона на динамику сушки можно считать незначительным.

Концентрация  $\beta$ -каротина моркови, высушенной в опытной и контрольной сушильных установках, различается незначительно (менее 1%). Таким образом, использование поля коронного разряда не нарушает требования технологии конвективно-лучевой сушки овощей.

Пятая глава **«Оценка технико-экономической эффективности использования разработанной сушильной установки»** содержит рекомендации для проектирования новых сушильных установок и модернизации существующих; здесь же рассматривается сравнительная оценка сушильной установки «Урал-4» до и после модернизации.

При использовании поля коронного разряда в сушильных установках рекомендуется:

- применять поле коронного разряда для камерных конвективно-лучевых сушильных установок (в этом случае размеры зоны коронирования и общий ток коронного разряда установки, потребляемый от источника высокого напряжения, окажутся наименьшими, за счет чего стоимость источника высокого напряжения будет ниже);

- использовать униполярное отрицательное поле коронного разряда (за счет большей подвижности отрицательных ионов) при напряжении на коронирующих электродах в диапазоне 9,5-10,0 кВ (при этом уменьшение времени сушки достигает 16%);

- использовать систему двух проволочных коронирующих электродов диаметром 0,2...0,3 мм с межпроволочным расстоянием  $40 \pm 2,5$  мм, расположенных параллельно керамическим ТЭНам;

- выбирать высоту установки коронирующего электрода над уровнем лотка с продуктом из диапазона  $45 \pm 5$  мм и не меньше высоты окна ввода лотков с продуктом.

Отключение сушильной установки может выполняться автоматически после удаления некоторой порции влаги с помощью токовых реле, установленных в цепи питания источника высокого напряжения или в цепи заземления. Ток отключения может быть определен в зависимости от массы удаленной влаги:

$$I_0 = I_L \cdot \frac{L \cdot K_Z}{\eta}, \quad (12)$$

где  $I_L$  – линейный ток коронного разряда, мкА/м (рисунок 13);

$L$  – длина коронирующих электродов установки, м;

$K_Z$  – коэффициент, учитывающий коэффициент трансформации трансформатора и выпрямительной системы источника высокого напряжения ( $K_Z = 1$ , если реле тока устанавливается в цепи заземления сушильной установки);

$\eta$  – коэффициент полезного действия источника высокого напряжения ( $\eta = 1$ , если реле тока устанавливается в цепи заземления сушильной установки).

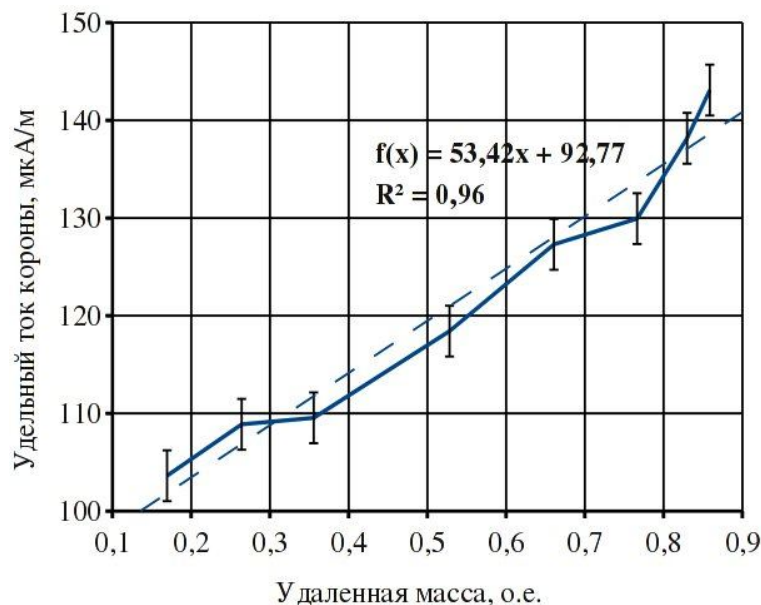


Рисунок 13 — Корреляционная зависимость изменения линейного тока коронного разряда  $I_L$  в зависимости от массы удаленной влаги (на диапазоне 15-85% от заложенной массы)

Для проектируемых сушильных установок рекомендуется экспериментально уточнять параметры этой зависимости.

Независимо от принятых рекомендаций, при использовании коронного разряда при конвективно-лучевой сушке необходимо соблюдать следующие требования:

- все металлические нетоковедущие части установки должны быть надежно заземлены с помощью нулевого защитного проводника либо, при его отсутствии, с помощью заземляющего проводника;

- не допускается вынимание лотков при наличии высокого напряжения на коронирующих электродах; в конструкции сушильной установки должны быть предусмотрены замки, препятствующие выниманию лотков при работе поля коронного разряда, или механическая блокировка, отключающая источник высокого напряжения при попытке вынимания лотка;

- установка должна быть оборудована устройством защитного отключения;

- проволочные коронирующие электроды не должны располагаться ближе чем на 40 мм к заземленным нетоковедущим частям сушильной установки;

- все некоронирующие части сушильной установки, находящиеся под высоким напряжением (крюки зацепления, узлы натяжения и др.), должны располагаться не ближе 30 мм к металлическим нетоковедущим частям установки.

Результаты технико-экономического расчета показаны в таблице.

Параметр	«Урал-4» (контр.)	«Урал-4М» (модерн.)
Капитальные вложения, руб.	1600	3000
Сокращение затрат электроэнергии, руб.	-	238,56
Годовой положительный эффект, руб.	-	1884,96
Срок окупаемости, лет	-	1,59
Коэффициент экономической эффективности ( $E_H = 0,2$ )	-	0,62

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Теоретически установлено влияние электрического ветра на процесс конвективно-лучевой сушки продукции растениеводства, которое позволяет утверждать, что при использовании поля коронного разряда, генерирующего электрический ветер, происходит сокращение времени тепловой обработки высушиваемого материала и, как следствие, снижение энергетических затрат и повышение качества высушиваемой продукции.

2. Экспериментально определено, что электрический ветер наиболее интенсивен в камерных сушильных установках при следующих основных конструктивных параметрах коронно-разрядной системы «два проволочных электрода - плоскость»: межпроволочное расстояние  $z = 40 \pm 2,5$  мм; межэлектродное расстояние  $h = 45 \pm 5$  мм; диаметр проволочных коронирующих электродов  $d = 0,25 \pm 0,05$  мм. Такая коронно-разрядная система позволяет получать наибольшую скорость электрического ветра (до  $v_0 = 0,2$  м/с в осевом сечении).

3. Экспериментально определено, что при использовании электрического ветра происходит изменение динамики конвективно-лучевой сушки, что позволяет сократить время сушки на 16%, вызывая тем самым соответствующее сокращение энергетических затрат на 16%.

4. Разработаны рекомендации для модернизации установок камерной конвективно-лучевой сушки, позволяющие без потери качества высушиваемых овощей сократить энергетические затраты на 16% ( $\approx 0,34$  кВт·ч/кг) и автоматизировать процесс конвективно-лучевой сушки за счет определения времени окончания сушки. При этом затраты на модернизацию сушильных установок «Урал-4» окупаются примерно за 1,6 года. Экономический эффект от использования модернизированных установок составляет 1884 руб./год на установку.

**Основные положения диссертации опубликованы  
в следующих работах:**

**Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК:**

1. Возмилов А.Г., Уразов С.И., Андреев Л.Н. Применение электрического ветра в технологических процессах АПК // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2008, №7, с. 24-25.

**Публикации в других изданиях**

1. Быков В.Г., Бабаян Н.Б., Уразов С.И. Нагрев керамического ТЭНа // Вестник ЧГАУ, 2003, т. 38, с. 81-84.

2. Уразов С.И. Энергосбережение в процессах конвективно-лучевой сушки // Вестник ЧГАУ, 2005, т. 44, с. 124-125.

3. Возмилов А.Г., Уразов С.И. О влиянии поля коронного разряда на конвективно-лучевую сушку продукции растениеводства // Материалы международной научно-технической конференции «Энергетика и энергосбережение». - Ижевск: Ижевская ГСХА, 2008, с. 34-37.

4. Сушильная установка: Патент на полезную модель по заявке № 2009149555/22(073197) от 30.12.2009. Положительное решение о выдаче патента на полезную модель 05.02.2010. / Возмилов А.Г., Быков В.Г., Уразов С.И.

Подписано в печать 08.11.2010 г.  
Формат А5. Объем 1,0 уч.-изд.л.  
Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

УОП ЧГАА

