

На правах рукописи



Алтухов Игорь Вячеславович

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИМПУЛЬСНОЙ
ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ САХАРОСОДЕРЖАЩИХ
КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и
электрооборудование в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Барнаул – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского», кафедра «Энергообеспечение и теплотехника»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАСХН
Цугленок Николай Васильевич

Официальные оппоненты:

Загинайлов Владимир Ильич

д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электроснабжение и электротехника им. академика И.А. Будзко» ФГБОУ ВПО «Российский государственный аграрный университета - МСХА им. К.А. Тимирязева», институт механики и энергетики им. В.П. Горячкина

Ксёنز Николай Васильевич

д.т.н., профессор кафедры «Техносферной безопасности и физики» ФГБОУ ВПО «Донской государственный аграрный университет», Азово-Черноморский инженерный институт в г. Зернограде

Порсев Евгений Георгиевич

д.т.н., с.н.с., профессор кафедры «Электротехнические комплексы» ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия»

Защита состоится 25 июня 2015 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, <http://www.altstu.ru>; ntsc@desert.secna.ru; elnis@inbox.ru; altukhigor@yandex.ru; тел/факс (3852) 36-71-29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им И.И. Ползунова» и на сайте <http://www.altstu.ru/media/f/dissertaciya-Altuhov-IV.pdf>

Автореферат разослан « 15 » апреля 2015 г.

Учёный секретарь диссертационного совета доктор технических наук, профессор



Куликова
Лидия Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Рост экономического могущества России во многом определяется состоянием её агропромышленного комплекса.

Увеличение производства продукции сельского хозяйства связано с внедрением индустриальных технологий, что приводит к возрастанию потребления энергоресурсов. В связи с этим, вопросы энергосбережения в сельском хозяйстве становятся все более актуальными. Применение современных энергосберегающих технологий и оборудования, для сохранения продукции сельского хозяйства, является важнейшим критерием для увеличения объёмов производства и снижения её себестоимости. Стратегическая задача сохранения полученной продукции и повышения продуктивности сельскохозяйственных животных обуславливает актуальность исследований по разработке энергосберегающих технологий сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов.

К сахаросодержащим клубнеплодам относится топинамбур, а к корнеплодам – свёкла, морковь, репа, турнепс, брюква, кузика и др. Данные продукты широко используются для кормления животных.

Длительное хранение корнеклубнеплодов в сыром виде требует значительных энергозатрат на поддержание оптимальной температуры, влажности, газового состава в хранилище. Поддержание в овощехранилище оптимальных параметров микроклимата весьма энергоёмкий процесс, небольшое изменение температуры, повлечет за собой образование влаги на поверхности корнеклубнеплодов и их загниванию. Но даже при полном соблюдении данных параметров потери при хранении могут составлять до 15 %.

Для сохранения корнеклубнеплодов на длительный период использования, одним из перспективных способов является сушка. Корнеклубнеплоды, высушенные с применением новых технологий и оборудования, сохраняют до 95% витаминов, микроэлементов и могут быть отнесены к продуктам высокой биологической активности. Сушка корнеклубнеплодов и получение из них муки повышает концентрацию питательных веществ в ней в 3-5 раз по сравнению с исходным сырьем. Продукты высокой биологической активности для кормления животных можно получать из сахаросодержащих корнеклубнеплодов, таких как морковь, свёкла, топинамбур и др.

Химический состав сахаросодержащих корнеклубнеплодов определяет их исключительную ценность в кормовом рационе. Биологическая активность содержащихся в них веществ, способствует повышению продуктивности животных. Мука из корнеклубнеплодов имеет высокую кормовую ценность и может быть использована в кормлении всех видов животных, в качестве добавки к рациону в составе комбикормов, брикетов, гранул.

Реализация инновационных энергосберегающих технологий и оборудования во многом будет определяться масштабами использования электрической энергии. Анализ развития электротехнологий применяемых для сушки сельскохозяйственного сырья показал, что установки, работающие на принципе преобразования электрической энергии в энергию инфракрасного излучения, имеют существенные преимущества и обширный диапазон использования.

Степень разработанности проблемы. Проблеме энергосбережения и сохранности сельскохозяйственного сырья посвящены работы многих известных

учёных. Исследованиями А.С. Гинзбурга, С.Г. Ильясова, В.Н. Карпова, В.В. Красникова, П.Д. Лебедева, А.В. Лыкова, Ю.М. Плаксина, И.А. Рогова, Е.П. Тюрёва, А.М. Худоногова, Н.В. Цугленка, В.В. Филатова и других авторов доказано, что применение инфракрасного (ИК) облучения в процессе переработки сырья растительного происхождения позволяет значительно повысить качество готовой продукции. Однако, ранее не рассматривались вопросы получения продуктов высокой биологической активности из сахаросодержащих корнеплодов методом импульсной инфракрасной сушки. Анализ библиографических источников показывает, что современная электротехнология сельского хозяйства, как наука, накопила достаточно большой опыт в изучении способов обработки и переработки сельскохозяйственного сырья растительного происхождения.

Существует большое разнообразие способов сушки: естественная, конвективная, сублимационная, СВЧ-сушка, кондуктивная, инфракрасная (ИК). Каждый из этих методов сушки имеет свои достоинства и недостатки. Инфракрасный метод сушки по некоторым показателям сопоставим с другими методами сушки, а по затратам энергии на испарение влаги превосходит их. Установки ИК-нагрева просты, надёжны, имеют более высокий КПД в сравнении с другими.

Технология импульсной инфракрасной сушки влажных продуктов позволяет практически на 100% использовать подведенную к корнеклубнеплоду энергию и значительно сократить продолжительность сушки. Даная технология обладает, высокой эффективностью при температуре 40–60°C. При такой сушке максимально сохраняется продукт, не рвутся клетки, не погибают витамины, не карамелизируются сахара. В то же время инфракрасное излучение, обладая стерилизующим эффектом, позволяет уничтожить микрофлору на поверхности корнеклубнеплодов, что делает продукты пригодными для длительного хранения.

Изложенное выше, позволяет сформулировать научную гипотезу и цель диссертационного исследования.

Научная гипотеза. Эффективные режимы энергосберегающей технологии импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов позволят получать качественную продукцию высокой биологической активности длительного хранения.

Цель работы – разработать энергосберегающую технологию импульсной инфракрасной сушки, сохраняющую высокую биологическую активность сахаросодержащих корнеклубнеплодов применяемых для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных.

Для достижения поставленной цели решены **следующие задачи:**

– проведён анализ существующих технологий и оборудования, применяемых для сушки сельскохозяйственной продукции и определены основные требования для данного процесса;

– разработаны модели процессов ИК-энергоподвода в технологии сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов и определены эффективные режимы, в соответствии с биотехническими условиями нагрева сырья;

– разработаны алгоритмы и методика экспериментальных исследований импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов для нахождения эффективных режимов управления ИК-энергоподводом;

– проведены исследования по определению эффективных режимов и технологических параметров импульсной инфракрасной сушки, влияющих на сохранность витаминов и микроэлементов;

– разработано оборудование для импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов и выполнены экспериментальные исследования электротехнологических параметров системы управления ИК-энергоподводом;

– проведён технико-экономический анализ оборудования импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов и эффективности применения продуктов высокой биологической активности.

Объект исследования. Технология, оборудование и режимы импульсной инфракрасной сушки для получения продуктов высокой биологической активности с максимальным сохранением витаминов и микроэлементов.

Предмет исследования. Взаимосвязь качественных показателей продуктов высокой биологической активности с технологическими режимами импульсной инфракрасной сушки.

Научную новизну представляют:

– модели эффективных режимов импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов, позволяющие определить технологические параметры процесса сушки, с учётом характеристик излучателей, и теплофизических свойства обрабатываемого сырья;

– энергосберегающая технология импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов для получения продуктов высокой биологической активности;

– алгоритмы и методики экспериментальных исследований электротехнологических параметров импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов позволяющие установить эффективные режимы управления ИК-энергоподводом;

– электрофизические характеристики сахаросодержащих корнеклубнеплодов определяющие технологические параметры инфракрасной сушки импульсными керамическими излучателями;

– алгоритм выбора технических и конструкционных параметров сушильной установки с использованием импульсных излучателей;

Методы исследования. Решение поставленных задач базируется на известных теоретических положениях и экспериментальных данных технологии сушки пищевых продуктов, биофизики, термодинамики необратимых процессов, тепломассообмена, автоматического управления, математической статистики, математического моделирования.

Эффективные режимы импульсной ИК-сушки моркови, свёклы и топинамбура определены посредством теоретических и экспериментальных исследований.

Основные параметры процессов термообработки корнеклубнеплодов соответствовали технологическим требованиям и были исследованы на специаль-

но разработанных экспериментальных установках лабораторного и производственного типов, в которых использовались современные измерительные приборы и разработанные в лаборатории «Энергосбережение в электротехнологиях» алгоритмы и методики исследований.

Количество и качество активно действующих веществ, витаминный состав, кормовые единицы в корнеклубнеплодах и продуктах высокой биологической активности определялись в Иркутской межобластной Ветеринарной лаборатории и испытательной лаборатории ФГБУ «Центр агрохимической службы «Иркутский»».

На защиту выносятся:

– модели эффективных режимов импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов, позволяющие определить технологические параметры процесса и учитывающие характеристики излучателей и свойства сырья;

– методика и алгоритм экспериментальных исследований электротехнологических параметров импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов для установления эффективных режимов управления ИК-энергоподводом;

– технология импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов позволяющая получать продукты высокой биологической активности;

– электрофизические характеристики корнеклубнеплодов, позволяющие определить технологические параметры процесса инфракрасной сушки;

– алгоритм выбора технических и конструкционных параметров сушильной установки при использовании импульсных керамических излучателей;

Практическая значимость и реализация работы. Разработанные технология и оборудование импульсной инфракрасной сушки, внедренные на аграрных предприятиях Иркутской области, позволяют сушить сельскохозяйственную продукцию с меньшими энергозатратами, и получать продукты высокой биологической активности.

Полученные в ходе экспериментальных исследований продукты высокой биологической активности, из корнеклубнеплодов моркови, свёклы и топинамбура, прошли испытания в производственных условиях в сельскохозяйственных предприятиях Иркутской области. Оценка влияния данных продуктов на продуктивность молочных коров проведена в ФГУП «Элита», ФГУП «Буретское», ОАО «Барки», при кормлении поросят в крестьянско-фермерском хозяйстве ИП Хараев Б.Х., ферме ОАО «Нукутское РТП». Полученные при этом результаты позволяют сделать заключение о том, что данные продукты оказывают выраженное стимулирующее действие на продуктивность коров молочного направления, повышают среднесуточный привес поросят опытной группы.

Технология и оборудование используются в учебном процессе кафедры энергообеспечения и теплотехники ИрГАУ им. А.А.Ежевского при изучении дисциплин: электротехнология, теплотехника, энергосбережение. Определённые свойства продуктов высокой биологической активности, полученных по разработанной технологии, применяются на факультете биотехнологии и вете-

ринарной медицины при изучении дисциплин: фитотерапия, ветеринарная фармакология, диетология и внутренние незаразные болезни.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований являются основой для проектирования и изготовления оборудования и систем управления ИК-облучателями, обеспечивающими минимальные энергозатраты, при высоком качестве готового продукта.

Достоверность результатов работы. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в работе, базируются на теоретических положениях и научных принципах, разработанных ведущими учеными по фундаментальным и прикладным аспектам электротехнологии сельского хозяйства и пищевой промышленности. Достоверность полученных результатов подтверждена адекватностью разработанных математических моделей, результатами производственных испытаний разработанных технологий и оборудования, а также высокой корреляцией результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях ИрГСХА (2000-2014); научно-практической конференции КрасГАУ «Энергосбережение – важнейший резерв развития АПК» (Красноярск, 2009); ежегодной научной конференции преподавателей, научных работников и аспирантов ВСГТУ (Улан-Удэ, 2010); всероссийской научно-практической конференции ИрГТУ «Повышение эффективности и использования энергии в условиях Сибири» (Иркутск, 2010); международной научно-практической конференции МГСХУ «Engineering problems in agriculture and industry» (Улан-Батор, 2010); круглом столе «Инновационная деятельность и развитие АПК», в рамках выставки «Агропромышленная неделя – 2010» (Иркутск, 2010); международной научно-практической конференции МГАУ им. В.П. Горячкина «Инновационные энергосберегающие технологии в АПК» (Москва, 2012).

Результаты исследований прошли всероссийский уровень апробации на выставках: «Агропромышленная неделя – 2009» (Иркутск, СибЭкспоЦентр, диплом), «Агропромышленная неделя – 2010» (Иркутск, СибЭкспоЦентр, 2 диплома), XIII Российская агропромышленная выставка «Золотая Осень – 2011» (Москва, ВВЦ, диплом и золотая медаль), «НТТМ – 2013 (Иркутск, Дом офицеров, диплом)».

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории «Энергосбережение в электротехнологиях» энергетического факультета ИрГАУ им. А.А.Ежевского, выполняющей тематические планы-задания по заказу МСХ РФ за счет средств федерального бюджета работающей по основной теме «Технология переработки сельскохозяйственного сырья растительного происхождения инфракрасным нагревом» (тема 27К, номер государственной регистрации в ВНИИЦ 01201372470).

Диссертационные исследования являются продолжением и развитием кандидатской диссертации автора, выполненной в Иркутской государственной сельскохозяйственной академии в 1997-2000 гг.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 47 печатных работ, в том числе 15 работ – в изданиях рекомендованных ВАК РФ, авторский вклад в них составляет 65%., три патента РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы из 298 наименований, приложений. Ее объем составляет 313 страницы машинописного текста, содержит 65 рисунка и 56 таблиц.

Личный вклад автора. Результаты исследований, представленные в диссертации, получены лично автором при непосредственном его участии в работе НИЛ «Энергосбережение в электротехнологиях». Вклад автора в работы, выполненные в соавторстве, заключается в обсуждениях и постановке задач на различных этапах научной работы, анализе и оформлении полученных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, ее научная новизна, сформулированы цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Технологии и оборудование, применяемое для сушки сельскохозяйственной продукции» выполнен анализ технологий и оборудования, применяемых для сушки сельскохозяйственного сырья с позиции энергозатрат, показаны преимущества и недостатки различных электротехнологических методов. Установлены биотехнические условия нагрева корнеклубнеплодов и их основные характеристики, дана оценка возможностей использования сахаросодержащих корнеклубнеплодов в различных отраслях.

Сохранение полученного урожая на длительный период требует значительных энергозатрат. При хранении клетки корней и клубней дышат, в них не прекращаются ферментативные процессы, это затрудняет сохранение в них витаминов и микроэлементов. Для длительного хранения корнеклубнеплодов, с максимальным содержанием витаминов и микроэлементов, оптимальным способом является сушка. Режимы сушки, соответствующие биотехническим условиям по температуре и скорости нагрева, минимальному времени процесса и энергозатратам, можно назвать эффективными режимами. Эффективные режимы сушки позволяют получать продукты высокой биологической активности.

Из всех известных методов сушки, инфракрасный метод, по энергозатратам на испарение влаги, простоте и технологическим возможностям превосходит остальные методы. Благодаря высокой проникающей способности ИК-излучения в материал, тепловыделение происходит в глубине материала, при этом интенсивность сушки увеличивается в 1,5-2 раза, что ведёт к снижению энергозатрат и сокращению времени процесса.

Применение эффективных режимов ИК-энергоподвода с использованием импульсных керамических преобразователей излучения, позволяет получать качественную продукцию при минимальных энергозатратах.

Исходя из выше изложенного, поставлена цель, и определены задачи исследования.

Во второй главе «Моделирование процессов импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов» разработаны модели позволяющие определить, технологические параметры импульсной инфракрасной сушки, скорость нагрева продуктов и постоянную времени, эффективные режимы импульсной инфракрасной сушки с соблюдением требуемого закона изменения параметров излучения во времени.

Для получения качественной продукции необходимо соблюдение биотехнических требований нагрева и технологических параметров ИК-энергоподвода. Одним из главных технологических параметров, определяющих предельную температуру, является скорость нагрева. Высокая скорость нагрева в процессе сушки может привести не только к быстрому удалению влаги, но и к сложным необратимым химическим изменениям и потере качества готового продукта. Следовательно, для соблюдения биотехнических требований, необходимо знать предельно допустимую скорость нагрева. Дифференцированием данного уравнения, выводится выражение для определения скорости нагрева.

$$A_{\lambda} \cdot \eta \cdot P \cdot d\tau = c \cdot d\theta + P_n \cdot d\tau, \quad (1)$$

где A_{λ} – коэффициент поглощения энергии ИК-излучения корнеклубнеплодами; η – КПД ИК-облучателя; c – теплоемкость корнеклубнеплодов, Дж/кг·К; P – мощность ИК-облучателя, Вт; P_n – мощность потерь, Вт; θ – превышение температуры, К; τ – время процесса, с.

Левая часть уравнения (1) показывает количество энергии, подведенное к обрабатываемым корнеклубнеплодам, правая часть – расход энергии на нагрев сырья и на различные потери. Поскольку превышение температуры зависит от подводимой мощности, решение этого дифференциального уравнения относительно превышения температуры нагрева корнеклубнеплодов над температурой окружающей среды, при известных допущениях, дает следующее выражение:

$$\theta = \theta_{\max} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_H}} \right) + \theta_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_H}}, \quad (2)$$

где θ_{\max} – максимально возможное превышение температуры, К; e – основание натурального логарифма; T_H – постоянная времени нагрева корнеклубнеплода, с; $\theta_{\text{нач}}$ – начальное превышение температуры, К.

Максимально возможное превышение температуры определяется из выражения, предложенного Р. Борхертом

$$\theta_{\max} = \frac{A_{\lambda} \cdot \eta \cdot P}{Q_F}, \quad (3)$$

где Q_F – теплоотдача с поверхности растения, Вт/К.

$$Q_F = \alpha_{\text{к.и.}} \cdot F, \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{к.и.}}$ – суммарный коэффициент теплообмена, Вт/м²·К; F – площадь теплообмена, м²

Для установления зависимости между плотностью мощности и скоростью нагрева корнеклубнеплодов продифференцируем уравнение (3) по τ . Тогда

максимально возможная скорость нагрева, в наиболее общем виде представляется как:

$$g_{\max} = \xi \cdot \frac{1}{T_H} \cdot \frac{P}{F} \quad (5)$$

где показатель $\xi = \frac{A_\lambda \cdot \eta}{\alpha_{к.и.}}$ (6)

объединяет группу коэффициентов, характеризующих свойства излучателей и корнеклубнеплодов, зависящих, главным образом, от согласования спектральных характеристик источников излучения и оптических свойств корнеклубнеплодов, где A_λ – коэффициент поглощения энергии ИК-излучения корнеклубнеплодами; η – КПД ИК-облучателя; $\alpha_{к.и.}$ – суммарный коэффициент теплообмена, Вт/м²·К; F – площадь теплообмена, м².

На основании данных, учитывающих теплофизические свойства сырья, предельно допустимую температуру с учетом геометрических размеров нарезки корнеклубнеплодов по уравнению (5) выполнены расчеты предельно допустимой скорости нагрева.

Для определения технологических параметров и режимов термообработки корнеклубнеплодов необходимо определить постоянную времени нагрева $T_H = C/Q$ которая, является отношением теплоемкости к теплоотдаче. Она зависит от физических и геометрических характеристик корнеклубнеплодов и определяется расчётным путем из выражения.

$$T_H = \frac{c \cdot \rho \cdot V}{\alpha \cdot F} \quad (7)$$

где c – удельная теплоемкость материала, Дж/кг·°С; ρ – плотность материала, кг/м³; α – коэффициент теплообмена, Дж/м²·°С·с; V – объем единичного корнеклубнеплода, м³; F – площадь внешней поверхности единичного корнеклубнеплода, м².

Анализ связей влаги с материалом показывает, что для удаления свободной влаги в начальный момент процесса термообработки целесообразно подводить большое количество тепловой энергии. Быстрое повышение температуры корнеклубнеплода после критической точки приводит к длительному воздействию высокой температуры, что вызывает ухудшение его технологических свойств. Таким образом возникает необходимость в прерывном облучении, то есть в сочетании нагрева корнеклубнеплодов ИК-лучами с охлаждением его воздухом. Данное обстоятельство позволяет интенсифицировать процесс влагоудаления и сократить время сушки. По мере удаления влаги уровень подводимой энергии необходимо снижать и поддерживать рабочую температуру, не превышающую предельно допустимых значений для данного растения.

Для осуществления процесса сушки применялись импульсные керамические преобразователи излучения. Уникальным свойством данного рода излучателей является возможность очень точного селективного воздействия непосредственно на молекулярные связи в любых веществах. Применение для данной операции импульсных керамических нагревателей соз-

дает прерывный импульсный метод энергоподвода. Импульсность энергоподвода достигается особенностями работы керамических излучателей.

Для эффективного удаления влаги из корнеклубнеплодов необходимо процесс сушки проводить с понижением уровня энергоподвода в каждом последующем цикле, как это показано на рисунке 1. Чередование периодов интенсивного нагрева растений с интенсивной вентиляцией позволяет использовать эффект внутреннего термовлагопереноса и обеспечить более высокое качество готового продукта.

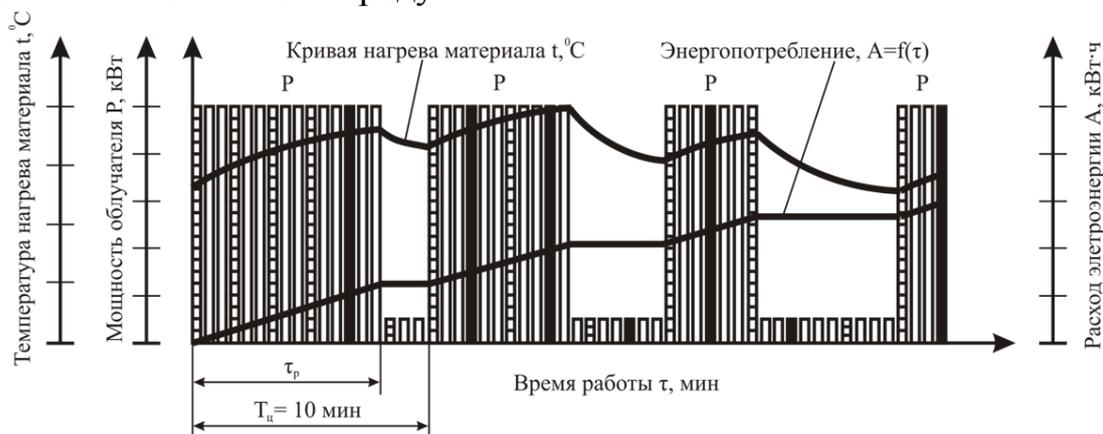


Рисунок 1 – Импульсно-прерывный метод управления с понижением уровня ИК-энергоподвода в каждом последующем цикле

Из рисунка 1 видно, что температура сырья изменяется по экспоненциальному закону и достигает установившихся колебаний со сравнительно небольшими амплитудами. Вследствие увеличения времени пауз, наибольшая температура t_{max} будет меньше температуры t_{max}^1 , которая имеет место при простом прерывном облучении с затратами энергии $A_{np.}$. Управление процессом облучения по предложенной схеме будет соответствовать затратам энергии $A_{упр.}$. Коэффициент, характеризующий снижение энергозатрат, определится из выражения

$$K_{эн.} = \frac{A_{упр.}}{A_{np.}} \quad (8)$$

Чем меньше значение данного коэффициента, тем меньше энергозатраты.

Время работы облучателя зависит от метода управления ИК-энергоподводом и определится из выражения

$$\tau_o = T_n \ln \frac{t_{max} - t_{min}}{t_{max} - t_{max}^1} \quad (9)$$

Поскольку на время сушки материала существенное значение оказывает максимально возможная скорость нагрева, определяемая из выражения (5). Тогда выражение (9) примет вид

$$\tau_{01} = T_n \ln \frac{t_{max} - t_{min}}{t_{max} - T_n \cdot V_{пред.доп.}}, \quad (10)$$

На основании теоретических исследований были установлены закономерности управления прерывным облучением. Описание этих закономерностей укладывается в теорию степенных рядов. Продолжительность импульсов для

второго и последующих циклов рассчитывается с использованием ряда Маклорена.

$$e^{-x} = 1 - \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{[(-1)^{n-1} \cdot x^n]}{n!} \quad (11)$$

Где $x = \frac{T_{цикл}}{T_H}$ - отношение времени цикла или его части к постоянной

времени нагрева корнеплодов.

Предварительные экспериментальные исследования по управлению прерывным облучением, позволяют установить эффективный режим изменения периода работы излучателя в циклах энергоподвода: $t_p = 8, t_p = 6, t_p = 4, t_p = 2$,

$$(12)$$

где t_p – время работы излучателя. Тогда общий член арифметической прогрессии для периодов работы излучателя, в циклах по 10 минут, определится по формуле

$$a_n = a_1 + d(n - 1), \quad (13)$$

где $d = -2$

$$a_n = 8 - 2(n - 1) = 8 - 2n + 2 = 10 - 2n, \quad (14)$$

подобно для периода паузы:

$$t_{пауз} = 2, t_{пауз} = 4, t_{пауз} = 6, t_{пауз} = 8, \quad (15)$$

где $t_{пауз}$ – время паузы.

$$a_n = 2 + 2(n - 1) = 2 + 2n - 2 = 2n, \quad (16)$$

где $d = 2$

В связи с этим, эффективный режим прерывного энергоподвода можно задавать аналитически:

$$f(t) = \begin{cases} \text{излучение}, t=10n, n=1,2,3,4... \\ \text{пауза}, t=2n, n=1,2,3,4..... \end{cases} \quad (17)$$

Одним из главных параметров, влияющих на качественные показатели высушиваемого сырья является характер распределения в нём температуры.

Распределение температуры по поверхности сырья $U(x,t)$ в каждом цикле на площадь облучения S при различных способах импульсно-прерывного энергоподвода в период работы излучателя принимаем за постоянную среднюю величину A , а в период паузы за постоянную среднюю величину B . (A и B – постоянные граничные условия). Таким образом, начальное распределение температуры сырья равно:

$$U(x;0) = f(x) = x \quad (18)$$

Задача заключается в нахождении решения дифференциального уравнения теплопроводности.

$$\frac{dU}{dt} = a^2 \frac{d^2U}{dx^2}, \quad (19)$$

удовлетворяющее граничным условиям

$$U(0;t) = A, \quad U(S,t) = B, \quad (20)$$

и начальному условию

$$U(x;0) = f(x) = x, \quad (21)$$

где $a^2 = \frac{\lambda}{c\rho}$; λ - коэффициент теплопроводности корнеклубнеплодов, c - удельная теплоёмкость корнеклубнеплодов, ρ - плотность материала.

Решение данной задачи основано на использовании метода Фурье. С этой целью введём новую функцию $v(x;t)$, связанную с искомой функцией $U(x;t)$ равенством

$$v(x;t) = U(x,t) - \frac{B-A}{S}x - A. \quad (22)$$

Решение полученной задачи запишется в виде:

$$U(x;t) = \frac{4S}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{1}{(2n-1)^2} \cdot e^{\frac{-\pi^2 a^2 (2n-1)^2 t}{S^2}} \cdot \sin \frac{\pi(2n-1)}{S} x + \frac{B-A}{S} \cdot x + A, \quad (23)$$

где $U(x,t)$ - функция распределения температуры сырья с абсциссой x в момент времени t , S - площадь облучения, a^2 - для каждого корнеплода имеет своё значение, e - основание натуральных логарифмов.

Уравнение (23) показывает, что на характер распределения температуры сырья в произвольный момент времени, оказывают влияние длительность периода работы излучателя и периода паузы в периодических циклах управляемого импульсного ИК-энергоподвода, а также теплофизические параметры корнеклубнеплодов и площадь распределения данного излучения.

В Третьей главе «Методика и оборудование проведения экспериментальных исследований технологии сушки». Теоретические и экспериментальные исследования состояли из нескольких последовательных и взаимосвязанных этапов (рис. 2).

На первом этапе исследования определяются теплофизические и терморadiационные характеристики корнеклубнеплодов, строятся кривые нагрева, поверхности отклика температурного поля излучателей.

Второй этап лабораторно экспериментальных исследований включает в себя исследование процесса сушки корнеклубнеплодов импульсными ИК-излучателями. Кроме того, на втором этапе устанавливались взаимосвязи между компонентами химического состава, физико-химическими и органолептическими показателями корнеклубнеплодов и режимами ИК-энергоподвода. Определяются режимы ИК-энергоподвода, влияющие на содержание и динамику изменения активно действующих веществ и влаги в сушеных корнеклубнеплодах. Исследуется влияние режимов импульсной инфракрасной сушки на энергетические затраты и определяются эффективные режимы ИК-энергоподвода. На этой стадии проводится проверка теоретических предпосылок, выдвинутых научной гипотезой.



Рисунок 2 – Алгоритм экспериментальных исследований

На следующем, третьем этапе, на основе априорной информации и предварительных исследований проводятся опыты на специальных установках производственного типа. На данном этапе уточняются эффективные режимы процесса импульсной инфракрасной сушки корнеклубнеплодов и энергосберегающие методы энергоподвода. Определяются пути интенсификации технологических процессов путем использования схем объемного облучения, рассчитываются основные технико-экономические показатели оборудования и различных режимов энергоподвода.

Четвёртый этап посвящен разработке технологических принципов получения продуктов высокой биологической активности из сахаросодержащих корнеклубнеплодов и их использования. Для получения достоверных результатов и эффективного проведения экспериментальных исследований выполнено активное планирование эксперимента и математическая обработка результатов.

Терморadiационные характеристики определены по следующей методике. В основе заложена идея измерения температуры на двух различных уровнях обрабатываемого материала. В качестве чувствительного температурного элемента используется полупроводниковый микротерморезистор типа МТ-54. Постоянная времени нагрева, которого равна 500 мкс, поэтому измерение температуры можно производить в течение 2-3 секунд.

Для проведения эксперимента очищенные корнеклубнеплоды, с определённой начальной влажностью, нарезались на кружки толщиной 2-3 мм, толщина слоя варьировалась от 5 до 30 мм с интервалом 5 мм.

Выполнив измерения в момент облучения испытуемого образца, определяли коэффициент поглощения по формуле

$$A_{\lambda} = \frac{2,3 \cdot lq \frac{n_1}{n_2}}{\Delta x}, \quad (24)$$

где n_1 – показания первого микроамперметра; n_2 – показания второго микроамперметра; Δx – толщина слоя материала, м.

Коэффициент пропускания определяется по формуле

$$T_{\lambda} = \frac{n_2}{n_1} \cdot 100\%. \quad (25)$$

Коэффициент отражения

$$R_{\lambda} = 1 - (T_{\lambda} + A_{\lambda}). \quad (26)$$

В ходе предварительных опытов было установлено, что морковь с начальной влажностью 85-90% путем применения импульсно-прерывного ИК-облучения достигает остаточной влажности 10-15% при максимальном сохранении активно действующих веществ, за 170 мин при снижающемся уровне энергоподвода. Таким образом, данный режим принят как «эффективный». Входные параметры варьировались на трех уровнях и были выбраны следующие: x_1 – режим ИК-энергоподвода (качественный фактор), x_2 – время сушки, мин (количественный фактор). Уровни факторов и интервалы варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Уровни факторов			Интервал варьирования
	-1	0	+1	
x_1 – режим энергоподвода	с повышением уровня энергоподвода (-1)	с постоянным уровнем энергоподвода (0)	с понижением уровня энергоподвода (+1)	-
x_2 – время сушки, мин	150	170	190	20

Аналогичная методика оценки режима ИК энергоподвода применена к сушке свёклы и топинамбура, с конкретными для каждого продукта исходными и конечными данными.

Для последовательного выполнения исследований и определению эффективных режимов воздействия импульсно-прерывного ИК-энергоподвода разработан алгоритм выполнения технологических операций (рис. 3).

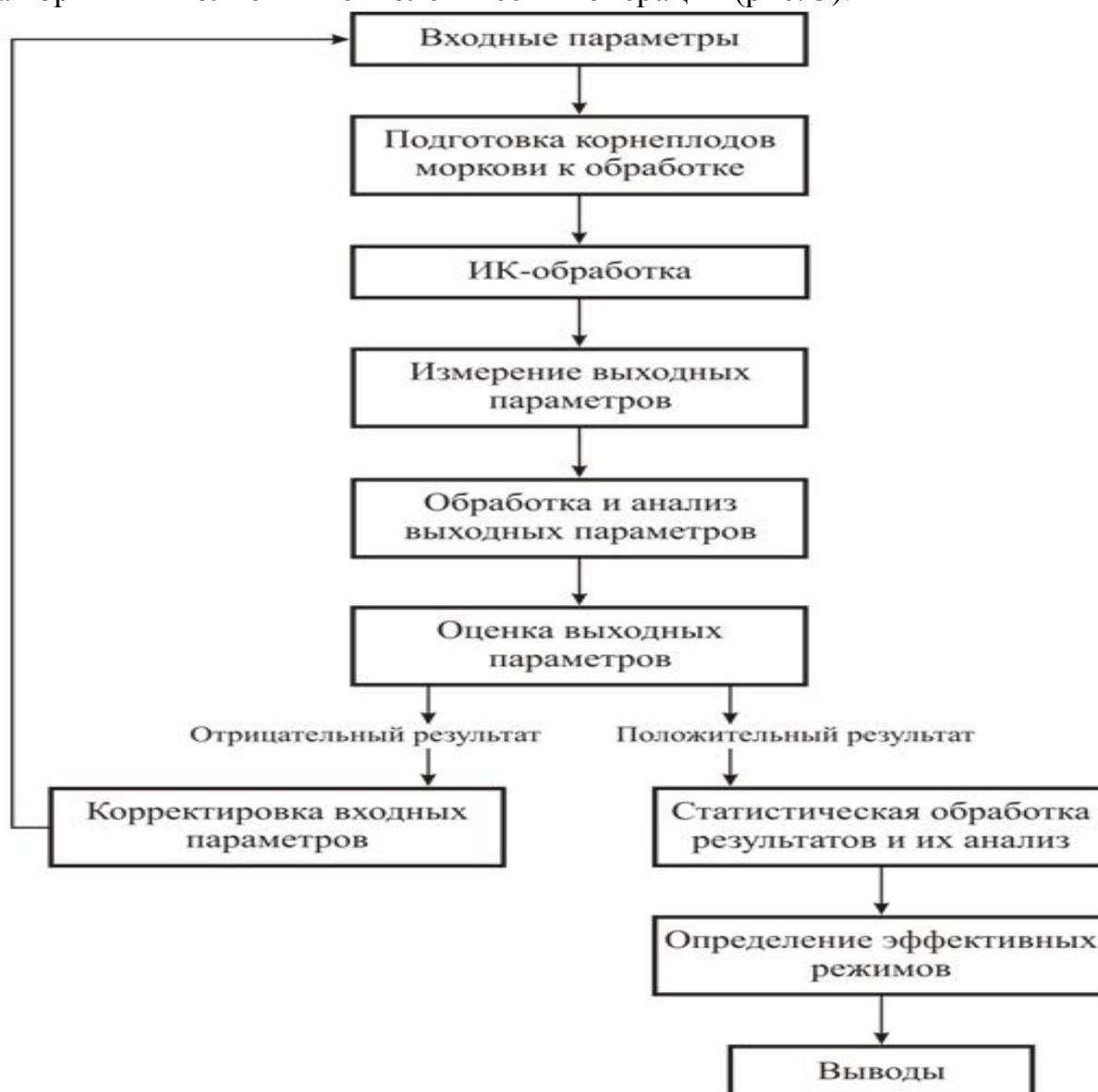


Рисунок 3 – Алгоритм выполнения технологических операций

Для решения поставленных задач был проведен ряд научно-производственных опытов. Экспериментальные исследования влияния продуктов высокой биологической активности на продуктивность животных проводились в течение 2012-2014 гг. в производственных условиях на фермах ФГУП «ЭЛИТА», ФГУП «Буретское», ОАО «Барки» на коровах чёрно-пёстрой породы, в крестьянско фермерском хозяйстве КФК ИП«Хараев» и ОАО «Нукутское РТП» на поросятах.

Четвёртая глава «Результаты экспериментальных исследований технологии сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов».

В результате проведения экспериментальных исследований определены параметры интегральной проницаемости ИК-излучения для корнеклубнеплодов различными источниками излучения. На основании этих данных получены зависимости спектрального коэффициента пропускания корнеклубнеплодов от толщины слоя и длины волны (рис. 4).

При анализе полученных данных определено, что для моркови, топинамбура и свёклы оптимальной является область спектра от 2,8 мкм до 3,3 мкм, так как в этом диапазоне наблюдается интенсивное поглощение энергии ИК-излучения, а, следовательно, для влагоудаления в процессах термообработки целесообразно использовать средневолновые импульсные ИК-излучатели.

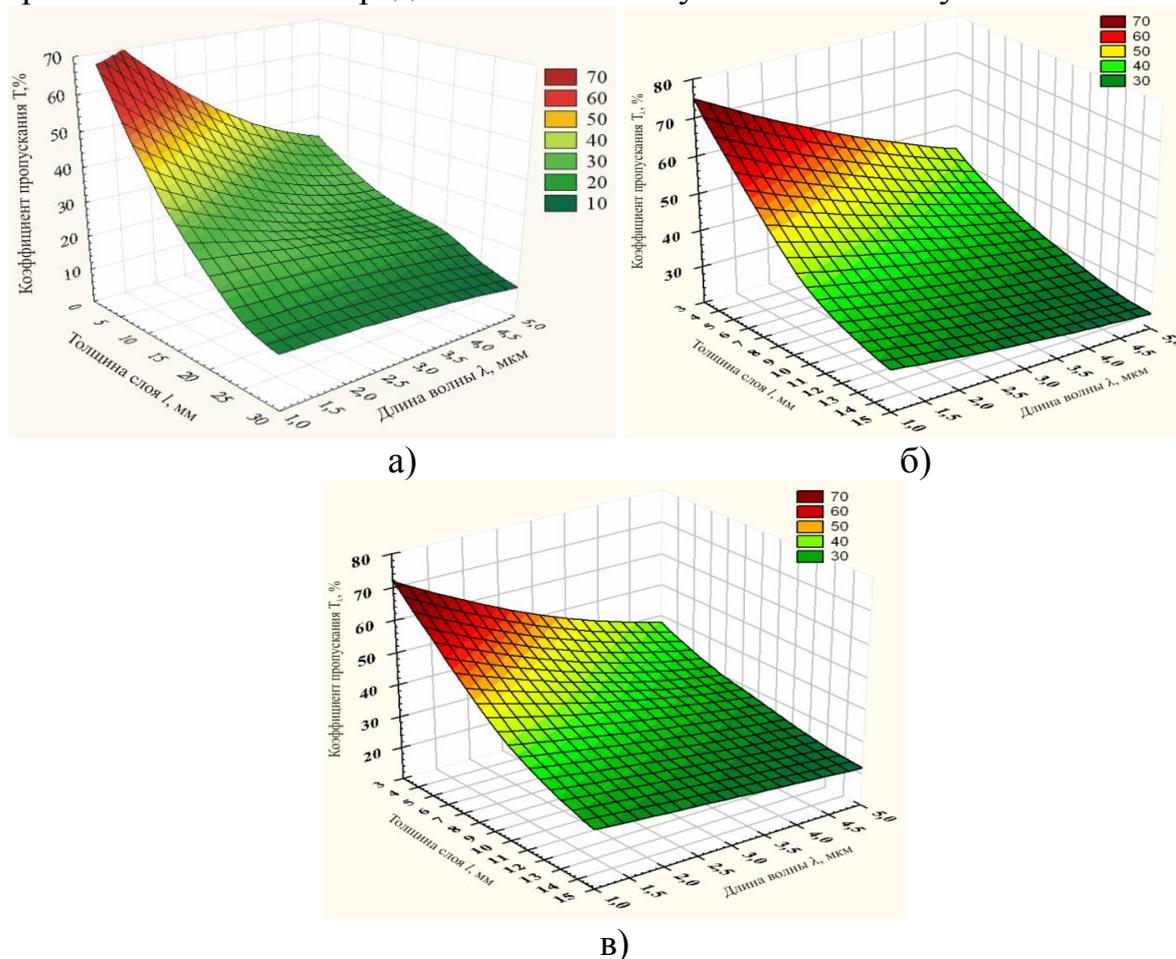


Рисунок 4 – Зависимость спектрального коэффициента пропускания корнеклубнеплодов моркови (а), топинамбура (б) и свёклы (в) от толщины слоя и длины волны

Установлено, что температура нагрева корнеклубнеплодов напрямую зависит от параметров ИК-энергоподвода. Рассмотрено влияние трех факторов:

мощность излучателя (500 Вт (-1), 1100 Вт (0) и 1500 Вт (+1)); время нагрева (60 сек (-1), 330 (0) и 600 сек (+1)); расстояние между излучателем и корнеклубнеплодами (150 мм (-1), 200 мм (0) и 250 мм (+1)). Получено уравнение регрессии:

$$y_1 = 118.74 + 28.67x_{1M} + 16.56x_{2H} - 24.28x_3 - 22.22x_{1M}^2 - 13.89x_{2H}^2 + 10.94x_3^2 - 8.5x_{1M}x_3, \quad (27)$$

где x_{1M} – мощность излучателя, Вт; x_{2H} – время нагрева, сек; x_3 – расстояние между излучателями и корнеклубнеплодами, мм; y_1 – температура нагрева корнеклубнеплодов, °С. Здесь наиболее отчетливо просматривается влияние показателя концентрации мощности на скорость нагрева продукта.

Анализ результатов показывает, что на расстоянии 225-250 мм при мощности излучателя 500 Вт в течении полного цикла облучения – 600 сек, температура нагрева корнеклубнеплодов не превышает 60°С. Минимальная температура нагрева корнеклубнеплодов (39°С) наблюдается при параметрах ИК-энергоподвода: 500 Вт, 60 сек и 250 мм, данные параметры ИК-энергоподвода можно принять как «эффективные». Максимальная температура нагрева корнеклубнеплодов (180°С) наблюдается при параметрах ИК-энергоподвода: 1500 Вт, 330-600 сек и 150 мм, данные параметры не соответствуют биотехническим требованиям нагрева сырья.

На основании исследований температурного поля импульсного излучателя ESC-2, показавшего наилучшую эффективность для сушки корнеклубнеплодов (рис. 4), установлен алгоритм выбора технических и конструкционных параметров сушильной установки с использованием импульсных излучателей: расстояние от вершины излучателя до материала должно быть в 1,1 раза больше осевого расстояния между соседними излучателями (отсчитанного между их центрами).

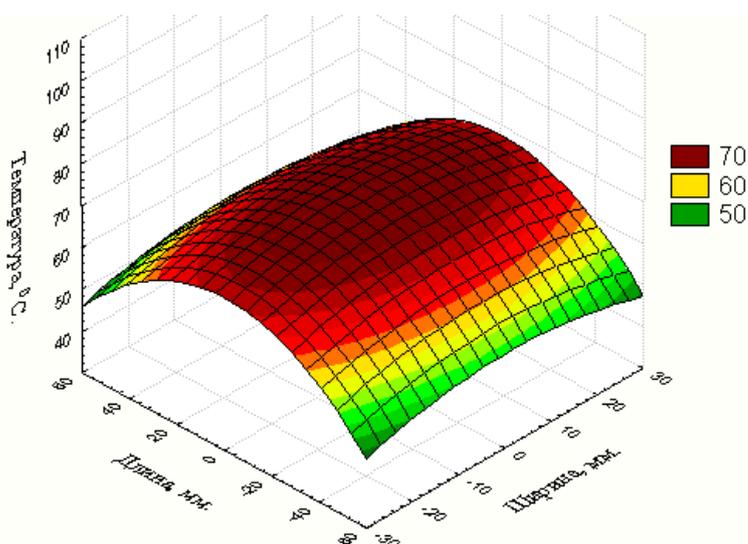


Рисунок 4 – Температурное поле излучателя ESC, мощностью 500 Вт для расстояния 250 мм от облучаемой поверхности

Таким образом, решена задача установления эффективных границ плотности мощности ИК-излучения в технологии импульсной инфракрасной сушки корнеклубнеплодов.

В результате анализа экспериментальных исследований влияния эффективных режимов ИК-энергоподвода на сохранность активно действующих веществ установлено, что наименьшие потери каротина (5,4%) относительно кон-

троля при необходимой остаточной влажности 10-12% наблюдаются при импульсно-прерывном режиме с понижением уровня энергоподвода в каждом последующем цикле при продолжительности сушки 160-170 мин.

Получены уравнения регрессии:

$$y_2 = 211,47 - 16,7325x_{1_3} + 0,2568x_{2_3} + 0,8433x_{1_3}^2 + 0,1552x_{1_3}x_{2_3}$$

$$y_3 = 17,47 - 6,42x_{1_3} - 0,112x_{2_3} + 1,17x_{1_3}^2 + 0,025x_{1_3}x_{2_3}, \quad (28)$$

где x_{1_3} – режим ИК-энергоподвода (качественный фактор); x_{2_3} – время сушки, мин (количественный фактор); y_2 – содержание каротина в абсолютно сухом веществе, мг/кг; y_3 – остаточная влажность, %.

В результате табулирования данного уравнения была построена графическая зависимость содержания каротина (контроль обозначен на графике «●») в готовом продукте от параметров: режима ИК-энергоподвода (качественный фактор) и времени сушки τ (количественный фактор). На рисунке 5 условно обозначены цифрами режимы энергоподвода: -1 – с повышением уровня энергоподвода; 0 – с постоянным уровнем энергоподвода; +1 – с понижением уровня энергоподвода.

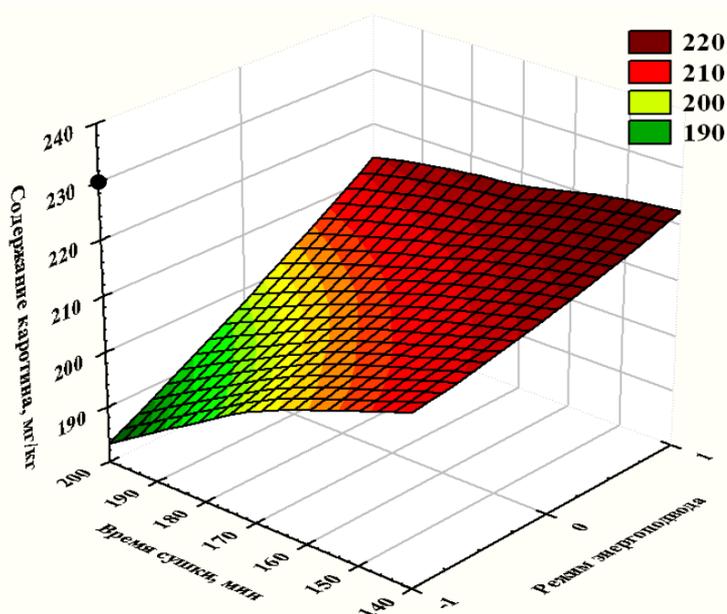


Рисунок 5 – Зависимость содержания каротина в корнеплодах моркови от режима ИК-энергоподвода и времени сушки

Анализ кривых сушки (рис. 6) корнеклубнеплодов моркови указывает, что наибольшую эффективность, по времени процесса, имеет импульсно-прерывный режим с понижением уровня энергоподвода в каждом последующем цикле 1 – с повышением уровня энергоподвода; 2 – с постоянным уровнем энергоподвода; 3 – с понижением уровня энергоподвода. При съеме влаги с $\omega_1 = 87\%$ до $\omega_2 = 12\%$ время процесса укладывается в 160-170 мин. При других режимах на процесс сушки затрачивается большее времени. На рисунках 7 и 8 режим с понижением уровня энергоподвода (линия 1), также свидетельствует об эффективности данного режима при соответствующих технологических параметрах.

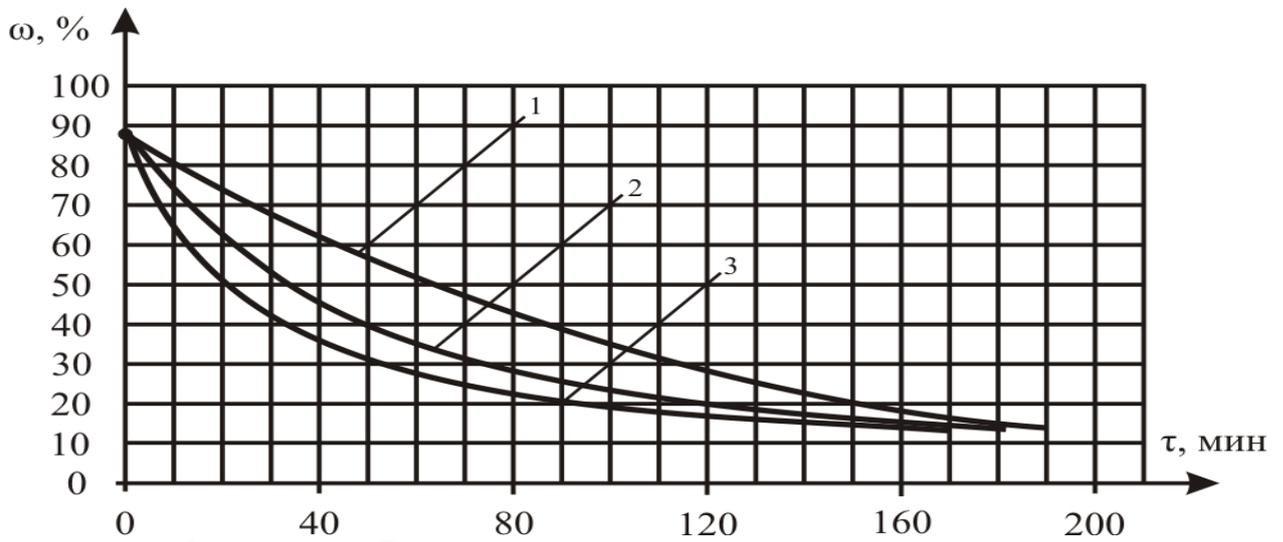


Рисунок 6 – Экспериментальные кривые сушки моркови

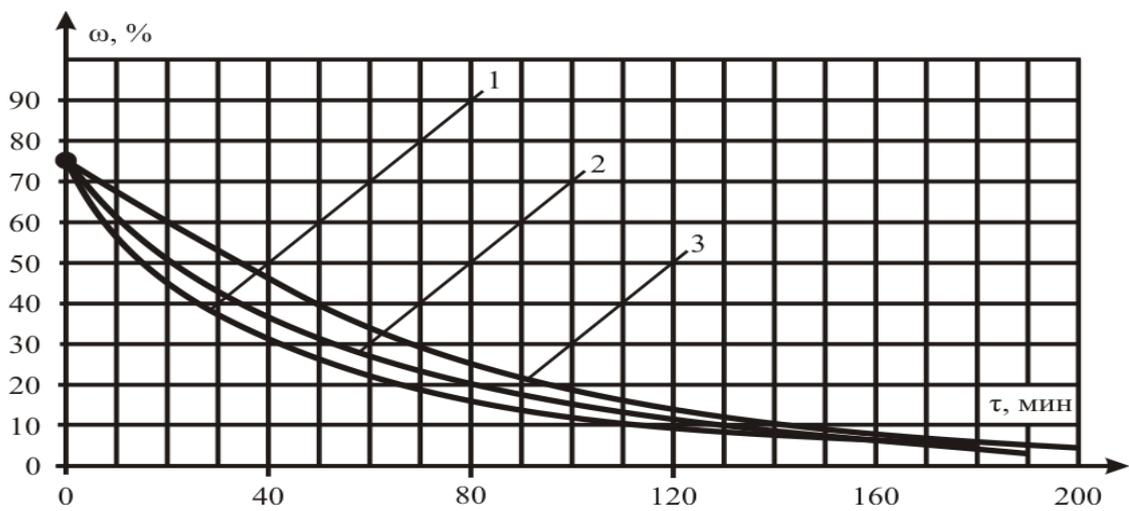


Рисунок 7 – Экспериментальные кривые сушки топинамбура

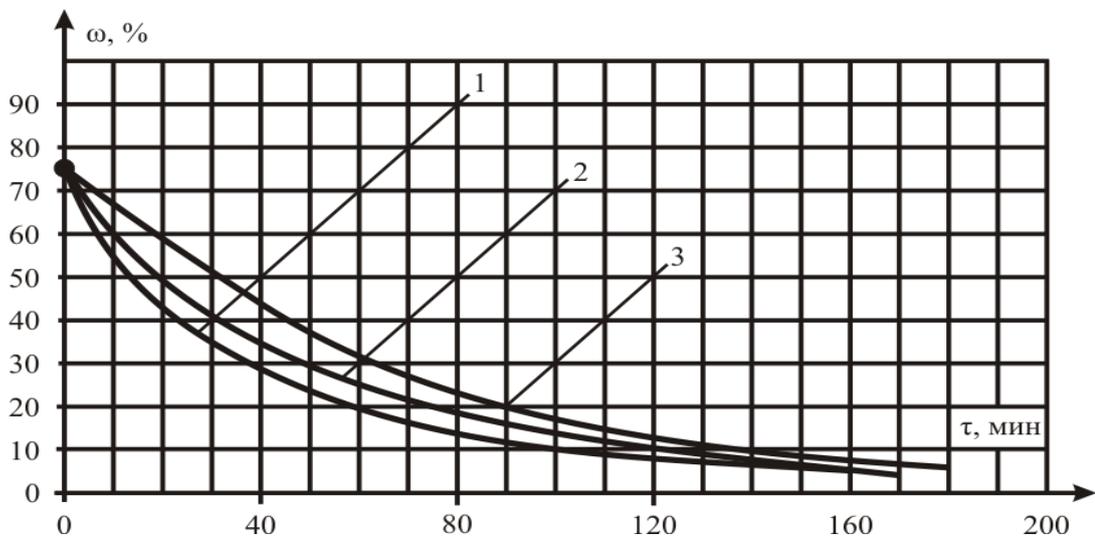


Рисунок 8 – Экспериментальные кривые сушки свёклы

С целью определения эффективных режимов энергоподвода проведена оценка влияния исследуемых параметров на энергозатраты и качественные показатели продуктов. Данные представлены в таблицах 2,3,4.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований по сушке корнеплодов моркови импульсно-прерывным ИК-облучением

Вид эксперимента	W, % до сушки	W, % после сушки	Содержание в абсолютно сухом веществе		Удельный расход энергии, кВт·ч/кг
			каротин, мг/кг	сахар, %	
С постоянным уровнем энергоподвода	87	13	201,4	64,25	1,4
С понижением уровня энергоподвода	87	12	217,5	63,21	1,2
С повышением уровня энергоподвода	87	13	200,1	65,72	1,6
Исходный материал	87	–	230	57,71	–

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований по сушке топинамбура импульсно-прерывным ИК-облучением

Вид эксперимента	W, % до сушки	W, % после сушки	Содержание в абсолютно сухом веществе		Удельный расход энергии, кВт·ч/кг
			витамин С мг/100гр	сахар, %	
С постоянным уровнем энергоподвода	74,0	3,0±0,06	45,82	44,95	1,2
С понижением уровня энергоподвода	74,0	4,63±0,3	57,81	69,67	0,92
С повышением уровня энергоподвода	74,0	3,8±0,19	49,65	44,2	1,1
Сырой материал	74,0	–	52,3	23,42	–

Таблица 4 – Результаты экспериментальных исследований по сушке свёклы импульсно-прерывным ИК-облучением

Вид эксперимента	W, % до сушки	W, % после сушки	Содержание в абсолютно сухом веществе		Удельный расход энергии, кВт·ч/кг
			витамин С мг/100гр	сахар, %	
С постоянным уровнем энергоподвода	74,9±1,3	4,16±0,02	5,82	61,67±0,88	1,1
С понижением уровня энергоподвода	74,9±1,3	3,96±0,16	11,61	56,0±4,9	0,9
С повышением уровня энергоподвода	74,9±1,3	5,42±0,2	9,65	63,5±1,1	1,0
Сырой материал	74,9±1,3	–	15,3	15,1±0,99	–

Полученные данные свидетельствуют о том, что режим сушки с понижением уровня энергоподвода и использованием импульсных керамических излучателей позволяет установить температурные порядки согласно биотехническим требованиям нагрева, максимально сохранить качественные показатели при минимальных энергозатратах. Данный режим можно считать эффективным.

Для оценки качественных показателей получаемых продуктов и возможности отнесения их к продуктам высокой биологической активности необходимо оценить качество по содержанию в них витаминов и микроэлементов после проведения процесса сушки. Данные исследования проводились в специализи-

рованных лабораториях. Содержание активно действующих веществ в корнеклубнеплодах после сушки представлено в таблице 5.

Таблица 5 – Содержание активно действующих веществ в корнеклубнеплодах после сушки

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Морковь	Свёкла	Топинамбур
1	Массовая доля сахара	%	63,21	56,0	69,67
2	Витамин А	мг/100г	0,001	0,008	5,29
3	Витамин В ₁	мг/100г	0,09	0,06	0,95
4	Витамин В ₂	мг/100г	0,24	0,27	2,45
5	Витамин В ₅	мг/100г	0,31	0,61	0,92
6	Витамин В ₆	мг/100г	0,07	0,49	0,42
7	Витамин Е	мг/100г	0,92	0,84	-
9	Витамин РР(ниацин)	мг/100г	1,85	1,09	-
10	Витамин С	мг/100г	12,21	11,61	57,81

Эффективные режимы энергоподвода позволяют получать продукты высокой биологической активности с большим содержанием витаминов.

Влияние продуктов высокой биологической активности на продуктивность животных проведено на различных молочно-товарных фермах в производственных условиях. Критериями оценки эффективности действия данных продуктов служит уровень надоев у коров при добавке в корм продуктов высокой биологической активности. Данные представлены по одному сельскохозяйственному предприятию (рис.9).

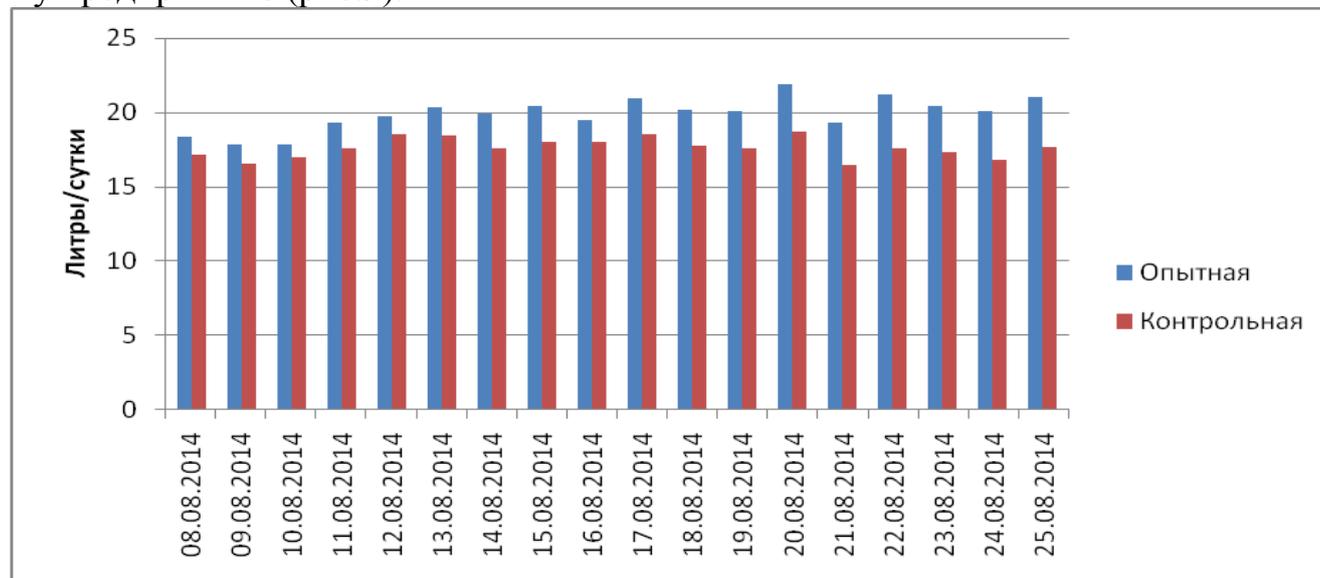


Рисунок 9 – Уровень надоев опытной и контрольной групп коров

Влияние продуктов высокой биологической активности выразилось в повышении среднесуточного надоя от 9,8% до 11,5%.

В пятой главе «Технология и техника переработки сахаросодержащих корнеклубнеплодов». Главным элементом данной технологии является установка, реализующая эффективные режимы импульсной инфракрасной сушки. В результате предварительных теоретических и экспериментальных исследований были составлены исходные требования и техническое задание на изготовление установки для сушки корнеклубнеплодов. Учитывая данные требования разработана и изготовлена лабораторно-производственная установка позволяющая

получать продукты высокой биологической активности. На данную установку получен патент (147771).

Установка включает корпус из стального уголка, облицованного листовой сталью, внутри которого размещаются нагревательные элементы. Содержит автоматические выключатели, электродвигатель с вентилятором, тепловую негорючую изоляцию для снижения тепловых потерь. Система управления источниками ИК-излучения, позволяет поддерживать необходимый температурный режим и устанавливать эффективные режимы работы ИК-излучателей. Учитывая вид продукции, его начальную влажность и биологические особенности, выбирается режим управления источниками ИК-излучения. В камере термообработки, с размерами 100×100 см, ИК-облучатели размещены таким образом, чтобы соблюдался принцип объемного облучения. Конструкция установки позволяет легко производить их замену. Температура в камере поддерживается системой управления и термопарами. Испаряемая влага удаляется вентилятором. Система управления температурным режимом представлена на рисунке 10.

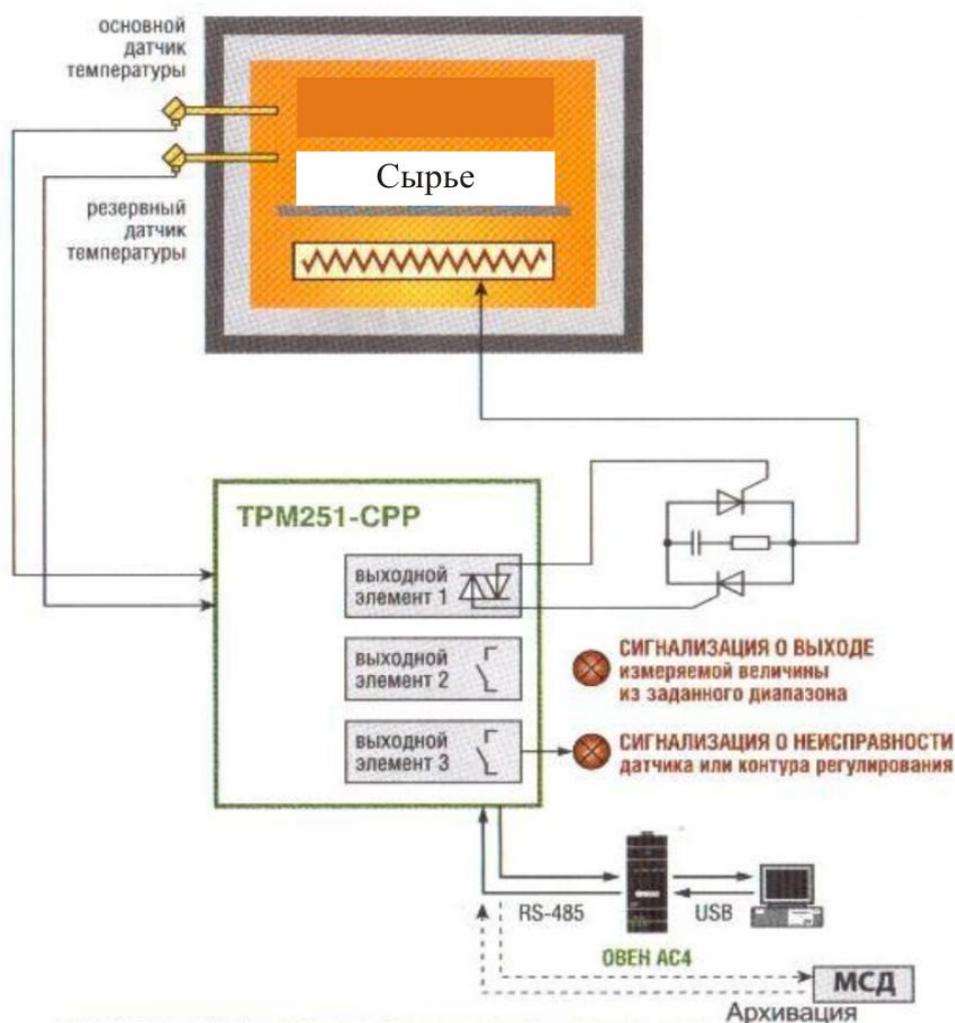


Рисунок 10 – Система управления температурным режимом

Процесс сушки длится до достижения заданной влажности по заранее определенному времени. Значение температуры сырья и ИК-излучателей при различных режимах архивируются на ПК. Для связи прибора с компьютером используется адаптер ОВЕН АС3, преобразующий сигналы интерфейса RS-485 в

RS-232 и обратно. Для визуального отображения параметров технологического процесса на экране ПК, мониторинга и архивации данных использовалась программа OPM (Owen Process Manager). Функциональная схема ПИД-регулятора ОВЕН ТРМ251 представлена на рисунке 11.

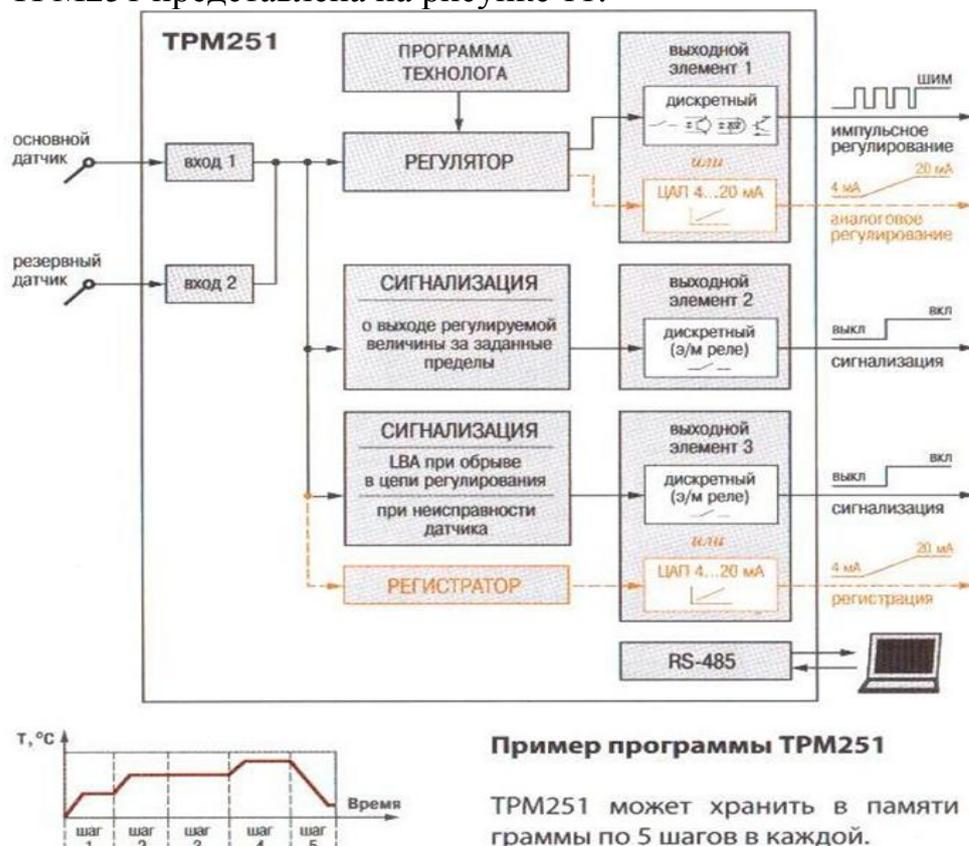


Рисунок 10 – Функциональная схема ПИД-регулятора ОВЕН ТРМ251

Перед началом работы определяются значения уставок регулятора по температуре нагрева сырья t_{max} и t_{min} . Опрос датчиков температуры задается с учетом необходимой точности измерения.

Для проведения замеров электротехнических параметров: напряжения, тока, мощности, расхода электрической энергии использовались отдельные электроизмерительные приборы, и электроизмерительный комплект К-505. Контроль температуры нагрева корнеклубнеплодов осуществлялся хромель-копелевыми термопарами диаметром 0,5 мм, подключенными к регистрирующему самопишущему потенциометру ПП-01.

Одной из главных задач, которые необходимо решить в диссертационной работе является, разработка эффективных режимов импульсной инфракрасной сушки для получения продуктов высокой биологической активности длительного хранения. Процесс переработки корнеклубнеплодов и установление технологических параметров данного процесса основывается на определении последовательности выполнения операций технологической цепочки, с учётом показателей сырья, свойств продуктов и характеристик энергоподвода.

Показатели и свойства корнеклубнеплодов, подвергаемых импульсной инфракрасной сушке с использованием технологических регламентов и характеристик ИК-энергоподвода, которые учитывались при обосновании эффективных режимов ИК-энергоподвода, представлены в таблице 5.

Таблица – 5 Показатели сырья, свойства обработанных продуктов и характеристики ИК-энергоподвода

Группы свойств	Показатели сырья, и характеристики ИК-энергоподвода
Показатели поступающего пищевого сырья	Содержание витаминов и микроэлементов
	Консистенция
	Запах
	Цвет
	Температура
Характеристики ИК-энергоподвода	Мощность излучателей
	Скорость нагрева, длительность обработки
	Длина волны инфракрасного нагрева
Параметры термообработки	Температура нагревательного элемента
	Теплофизические характеристики корнеклубнеплода
	Температура поверхности корнеклубнеплода
	Температура среды
	Длительность тепловой обработки корнеклубнеплода
Физико-химические показатели и свойства продукта	Геометрические размеры продукта
	Температура хранения
	Продолжительность хранения
	Состав витаминов и микроэлементов
	Остаточная влажность
Органолептические показатели продукта	Кормовые показатели
	Вкус
	Запах
	Цвет
	Внешний вид
	Плотность, консистенция, размер измельчённых частиц

Разработанные технологические принципы переработки сахаросодержащих корнеплодов при помощи импульсной инфракрасной сушки обеспечивают получение продуктов высокой биологической активности при минимуме энергозатрат.

Шестая глава. «Технико-экономический анализ оборудования импульсной инфракрасной сушки и применения продуктов высокой биологической активности» Эффективность от внедрения энергосберегающей технологии импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов представляется тремя составляющими. Первая составляющая отражает энергосбережение в результате минимальных затрат электроэнергии в процессах сушки корнеклубнеплодов при помощи импульсного инфракрасного нагрева. Вторая составляющая отражает оценку эффективности применения продуктов высокой биологической активности в производственных условиях. Третья составляющая показывает снижение затрат энергии в технологии хранения корнеклубнеплодов.

Технико-экономическая эффективность оценивалась по двум технически равноценным производственным установкам, предназначенным для процессов сушки сельскохозяйственного сырья, с ИК-облучателями, работающие в разных режимах. Использование оборудования импульсной инфракрасной сушки работающего в эффективном режиме ведёт к снижению затрат электроэнергии на 16,6 % и окупается в течении 1,4 года.

Одним из главных конкурентных преимуществ сельскохозяйственных предприятий является показатель себестоимости производимой продукции. Для

оценки второй составляющей технико-экономической эффективности был проведён ряд производственных экспериментальных исследований влияния продуктов высокой биологической активности на продуктивность коров черно-пестрой породы. Данные для оценки технико-экономических показателей приняты из годового отчёта сельскохозяйственного предприятия. Оценка эффективности произведена по продуктивности животных и влиянию данного фактора на себестоимость продукции. С этой целью были составлены рационы кормления и выполнена их оценка. В рационе с продуктами высокой биологической активности увеличивается концентрация энергии в 1 кг сухого вещества до 2,06 кормовых единиц. Использование сухих корнеклубнеплодов позволяет сбалансировать рацион кормления и снизить расход кормовых единиц, необходимых для получения 1 кг молока с 1,43 кг.к.е. до 1,03 кг к.е. При этом, за счет сбалансированности рациона кормления снижается расход кормов на производство 1 центнера молока на 0,12 ц.к.е. и составил 1,03 ц.к.е.. Это обстоятельство снижает затраты на корма на 74 руб.

Результаты применения продуктов высокой биологической активности в производственных условиях показали, что рацион с данными продуктами позволяет поддерживать продуктивность сельскохозяйственных животных и повышает надой молока на 9,8 -11,5 %. С учётом затрат на производство продуктов высокой биологической активности из сахаросодержащих корнеклубнеплодов, себестоимость молока снижается на 4,4%.

Сохранение корнеклубнеплодов вызывает необходимость поддержание в овощехранилище определённых параметров микроклимата. Создание и поддержание требуемых режимов хранения, комплексов системы искусственного охлаждения, вентиляции, технологического обогрева, искусственного увлажнения, осушения и регулирования газового состава воздуха требует значительных энергозатрат. При длительном хранении данные затраты значительно увеличивают себестоимость получаемой продукции.

Сушка сахаросодержащих корнеклубнеплодов и возможность их длительного использования позволяет сократить расходы, связанные с организацией хранения. Для оценки снижения затрат в технологии хранения корнеклубнеплодов рассмотрено типовое овощехранилище. Технология импульсной инфракрасной сушки предусматривает возможность переработки корнеклубнеплодов в период с сентября по январь, тогда возможное снижение затрат типового овощехранилища в технологии хранения корнеклубнеплодов составит за оставшийся период 81043,2 рубля.

Таблица 6 – Показатели экономической эффективности

	Показатель	контроль-ная	опытная
1	Стоимость установки, руб.	38500	46250
	Снижение энергозатрат, %	-	16,6
2	Себестоимость молока, руб.	1550	1482,1
	Снижения себестоимости молока, %	-	4,4
3	Стоимость электроэнергии при хранении, руб.	162086,4	81043,2

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Сохранение корнеклубнеплодов с высокими качественными показателями требует больших энергозатрат. Одним из перспективных методов сохранения корнеклубнеплодов и получения продуктов высокой биологической активности является применение эффективных режимов импульсной инфракрасной сушки с использованием специальных источников излучения позволяющих снижать время процесса и энергозатраты.

2. На основании разработанных моделей установлены скорости нагрева и постоянные нагрева корнеклубнеплодов, определяющие технологические параметры и эффективные режимы ИК-энергоподвода. Теоретические исследования позволили установить закономерности управления прерывным облучением. Описание этих закономерностей укладывается в теорию степенных рядов.

3. Теоретические положения метода Фурье позволили установить характер распределения температуры в сушильной камере, учитывающий граничные условия процесса и теплофизические свойства сырья. На основании проведённых численных экспериментов аналитически установлены режимы энергоподвода и паузы управляемого ИК-излучения.

4. Принятые исходные положения алгоритма проведения экспериментальных исследований процесса импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов легли в основу нахождения эффективных режимов управления ИК-энергоподводом.

5. Разработана и изготовлена лабораторно-производственная установка с системой управления ИК-энергоподводом (пат.147771). Данная установка в комплексе оборудования позволяет реализовать эффективные режимы импульсной инфракрасной сушки в технологии получения продуктов высокой биологической активности.

6. Результаты лабораторных исследований показали, что:

– при облучении коротковолновым ИК-излучением проникаемость корнеклубнеплодов при толщине слоя 5 мм в 1,5 раза выше, чем при облучении средневолновым ИК-излучением, однако, при увеличении толщины слоя данное отличие сглаживается;

– температурные поля на поверхности корнеклубнеплодов от импульсных ИК-излучателей носят куполообразный характер и подчиняются закону распределения Гаусса;

– предельно допустимая температура нагрева измельченных корнеклубнеплодов (размером 30×5×5 мм) составляет 60°C, при которой потери биологически активных веществ не превышают 5% от контроля;

– превышение температуры нагрева измельченных корнеклубнеплодов в процессе сушки от 60°C до 70°C приводит к потерям биологически активных веществ на 23,7%;

– для процессов сушки корнеклубнеплодов в области спектра от 2,8 мкм до 3,3 мкм, наблюдается интенсивное поглощение энергии ИК-излучения, в связи с чем можно констатировать, что практическое значение для сушки корнеклубнеплодов могут иметь средневолновые импульсные источники ИК-излучения, нагреваемые до температуры не выше 600°C и имеющие интегральный коэффициент излучения выше 0,8.

7. На основании полученного температурного поля излучателя установлен алгоритм технологических и конструкционных параметров для получения равномерного температурного поля излучения группой излучателей: расстояние от вершины излучателя до материала должно быть в 1,1 раза больше осевого расстояния между соседними излучателями (отсчитанного между их центрами) – $h = 1,1b$.

8. Результаты производственных исследований позволили установить, что:

– импульсные керамические преобразователи излучения, размещённые по алгоритму выбора технических и конструкционных параметров и работающие в режиме понижения уровня энергоподвода с плотностью мощности $0,8 \text{ кВт/м}^2$ и рабочей температурой поверхности излучения 500°C на расстоянии 225–250 мм, создают равномерное температурное поле на поверхности корнеклубнеплодов $40\text{--}60^\circ\text{C}$ и позволяют сохранить качественные показатели готового продукта;

– эффективные режимы импульсной инфракрасной сушкой сахаросодержащих корнеклубнеплодов позволяют сократить время процесса влагоудаления на 16-20%, снизить энергозатраты процесса сушки сахаросодержащих корнеплодов на 16,6%.

9. Техничко-экономический анализ результатов применения в производственных условиях показал, что рацион кормления с продуктами высокой биологической активности стимулирует увеличение надоев молока от 9,8 до 11,5 %. В данном рационе увеличивается концентрация энергии в 1 кг сухого вещества до 2,06 кормовых единиц. Применение сухих корнеклубнеплодов позволяет сбалансировать рацион кормления и снизить расход кормовых единиц, необходимых для получения 1 кг молока, с 1,43 кг к.е. до 1,03 кг к.е. Благодаря данным факторам снижается себестоимость получаемой продукции на 4,4%.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. *Алтухов И.В.* Анализ методов и средств определения оптических и терморadiационных характеристик сахаросодержащих корнеплодов [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Вестник АлтГАУ. – 2010. – № 3. – С. 68-72.

2. *Алтухов И.В.* Теплофизические характеристики как основа расчета постоянной времени нагрева сахаросодержащих корнеплодов в процессах тепловой обработки [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 4. – С. 134-139.

3. *Алтухов И.В.* Исследование процесса сушки корнеплодов моркови при ИК-энергоподводе [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Вестник ИрГСХА. – 2011. – № 42. – С. 26-31.

4. *Алтухов И.В.* Влияние импульсного ИК-энергоподвода на температуру нагрева корнеплодов моркови [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Вестник ИрГСХА. – 2011. – № 46. – С. 63-67.

5. *Алтухов И.В.* Определение скорости нагрева топинамбура в процессе сушки инфракрасным излучением [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров, В.А. Фе-*

дотов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2013. – № 1. – С. 14-15.

6. Алтухов И.В. Применение дискретного ИК-энергоподвода в технологии сушки сахаросодержащих корнеплодов [Текст] / И.В. Алтухов // Вестник ИрГСХА. – 2013. – № 55. – С. 100-104.

7. Алтухов И.В. Постоянная времени нагрева корнеплодов моркови [Текст] / И.В. Алтухов, В.Д. Очиров, С.М.Быкова, Н.И.Поздеева // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2013. – №2. – С. 10-11.

8. Алтухов И.В. Обоснование режимов сушки сахаросодержащих корнеплодов ИК-излучением [Текст] / И.В. Алтухов // Вестник ИрГСХА. – 2013. – № 56. – С. 87-97.

9. Алтухов И.В. Инфракрасная сушка сахаросодержащих корнеплодов для питания больных сахарным диабетом [Текст] /И.В.Алтухов// Достижения науки и техники АПК. – 2013. №12. – С 66-68.

10. Алтухов И.В. Результаты экспериментальных исследований инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеплодов [Текст] /И.В.Алтухов// Вестник КрасГАУ. – 2014. Выпуск 2. – С 162-167.

11. Алтухов И.В. Пропускательная способность корнеплодов [Текст] / И.В. Алтухов, В.Д. Очиров, В.А. Федотов, О.Н.Цыдыпова // Вестник ИрГСХА. – 2014. – № 60. – С. 101 – 105.

12. Алтухов И.В. Ресурсосберегающая технология получения продуктов высокой биологической активности путём инфракрасной сушки корнеплодов [Текст] / И.В. Алтухов // Вестник ИрГСХА. – 2014. – № 61. – С. 99 – 105.

13. Алтухов И.В. Скорость нагрева свёклы при ИК-энергоподводе [Текст]/ И.В. Алтухов, В.Д. Очиров// Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – №4 (114) – С.138 – 141.

14. Алтухов И.В. Применение продуктов высокой биологической активности для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных [Текст] /И.В.Алтухов, Н.В.Цугленок// Вестник КрасГАУ. – 2015. Выпуск 3. – С 111-114.

15. Алтухов И.В. Методика и алгоритм проведения экспериментальных исследований технологии инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов [Текст] /И.В.Алтухов, Н.В.Цугленок// Вестник ИрГСХА. – 2015. Выпуск 66. – С 105-111

Научные и учебные издания

16. Пат. 2168903 Российская Федерация, 7А 23 F 3/34. Способ производства целебного чая из лекарственных растений / И.А. Худоногов, А.М. Худоногов, Е.Г. Худоногова, И.В. Алтухов; заявитель и патентообладатель Иркутская ГСХА. – № 99110810/13; заявл.21.05.99; опубл.21.05.2001, Бюл. № 17.– 12 с.

17. Пат. 2493545 Российская Федерация, С2 МПК G01K 7/16 Устройство для определения температуры сахаросодержащих корнеплодов / И.А. Худоногов, И.В. Алтухов, В.Д. Очиров, В.А. Федотов; патентообладатель ФГОУ ВПО Иркутская государственная сельскохозяйственная академия. – №201110132/28; заявл. 12.01.2011; опубл. 20.09.2013, Бюл. 26. – 4 с.

18. Пат. 147771 Российская Федерация, F26B 9/06, F26B 3/30 Сушилка./И.В.Алтухов, В.В.Долгих, В.А.Федотов, В.Д.Очиров, Е.А.Алтухова Е.А., Н.К.Тантлевская; патентообладатель ФГБУ «НЦ проблем здоровья семьи и ре-

продукции человека» СО РАМН. – 2014123958/06. 10.06.2014; опублик. 20.11.2014, Бюл.32 – 4 с.

19. *Алтухов И.В.* Обоснование режимов ИК-энергоподвода в технологии сушки моркови [Текст]: монография / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров, В.А. Федотов*; Иркут. с.-х. акад. – Иркутск, 2013. – 97 с.

20. *Алтухов И.В.* Энергосбережение [Текст] : учеб. пособие для вузов / *И.В. Алтухов*; Иркут. гос. с.-х. акад. – Иркутск: ИрГСХА, 2004. – 104 с.

21. *Алтухов И.В.* Теплотехника [Текст]: учеб. пособие для вузов / *И.В. Алтухов, Г.В. Лукина*. – Иркутск, 2010. – 70 с

22. *Алтухов И.В.* Учебное пособие по электротехнологии [Текст]: учеб. пособие для вузов / *И.В. Алтухов*. – Иркутск, 2011. – 93 с.

Статьи в материалах международных, всероссийских и региональных конференций

23. *Алтухов И.В.* Использование электроэнергетических ресурсов Иркутской области для производства продовольствия [Текст] / *И.А. Худоногов, А.М. Худоногов, И.В. Алтухов, А.Д. Епифанов* // Интеллектуальные и материальные ресурсы Сибири / Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск, 1997. – С.49-50.

24. *Алтухов И.В.* Снижение энергозатрат в процессах термообработки растительного сырья ИК-электротехникой [Текст] / *И.А. Худоногов, А.М. Худоногов, И.В. Алтухов, Е.С. Рябец* // Интеллектуальные и материальные ресурсы Сибири / Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск, 1998. – С.13-18.

25. *Алтухов И.В.* Пути снижения энергозатрат в процессе термообработки растительного сырья ИК-электротехникой [Текст] / *И.А. Худоногов, А.М. Худоногов, И.В. Алтухов* // Вестник ИрГСХА. – 1999. – Вып. 16. – С. 11-22.

26. *Алтухов И.В.* Анализ энергозатрат в процессах сушки растительного сырья электрическими методами, способами и средствами [Текст] / *И.В. Алтухов, Г.А. Гончаров* // Электрификация и автоматизация агропромышленного комплекса в условиях Восточной Сибири: сб. науч. трудов. – Иркутск: ИрГСХА, 2001. – С. 10-11.

27. *Алтухов И.В.* Снижение энергозатрат в процессах сушки свёклы [Текст] / *И.В. Алтухов, Г.А. Гончаров* // Актуальные проблемы АПК: мат. регион. науч.-практ. конф. – Иркутск: ИрГСХА, 2001. – С. 8-9.

28. *Алтухов И.В.* Возможность повышения пищевой ценности кондитерских изделий за счет использования овощных порошков [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Ф. Илькова, Л.В. Сопин* // Актуальные проблемы АПК: мат. регион. науч.-практ. конф. – Иркутск: ИрГСХА, 2002. – С. 12-13.

29. *Алтухов И.В.* Снижение энергозатрат в процессах сушки растительного сырья / *И.В. Алтухов* // Актуальные проблемы АПК: мат. регион. науч.-практ. конф. – Иркутск: ИрГСХА, 2005. – С. 15-23.

30. *Алтухов И.В.* Энергосбережение в процессах сушки лекарственного и сельскохозяйственного растительного сырья [Текст] / *И.В. Алтухов* // Проблемы устойчивого развития регионального АПК: мат. науч.-практ. конф. (Иркутск, 6-9 февр. 2006 г.). – Иркутск, 2006. – С. 6-11.

31. *Алтухов И.В.* Влияние управляемого инфракрасного облучения на качественные характеристики растительного сырья [Текст] / *И.В. Алтухов* // Акту-

- альные вопросы развития регионального АПК: мат. науч.-практ. конф. (Иркутск, 12-15 февр. 2007 г.). – Иркутск: ИрГСХА. – С. 56-61.
32. *Алтухов И.В.* Анализ средств по оптимизации электротехнологии пищевых продуктов [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Вестник ИрГСХА. – 2009. – № 35. – С. 37-41.
33. *Алтухов И.В.* Анализ способов сушки пищевых продуктов [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Чтения И.П. Терских: мат. II-го регион. научн.-производ. сем. (Иркутск, 24-26 сент. 2009 г.). – Иркутск: ИрГСХА, 2009. – № 36. – С. 16-21.
34. *Алтухов И.В.* Оптические свойства сельскохозяйственных продуктов растительного и животного происхождения [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Достижения и перспективы развития энергетического факультета: мат. научн.-практ. конф., посвящ. 40-летию энерг. фак-та ИрГСХА (Иркутск, 24 дек. 2009 г.). – Иркутск: ИрГСХА, 2009. – № 37. – С. 43-49.
35. *Алтухов И.В.* Перспективная технология сушки моркови, обеспечивающая полное сохранение всех активно действующих веществ [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Достижения и перспективы развития энергетического факультета: мат. научн.-практ. конф., посвящ. 40-летию энерг. фак-та ИрГСХА (Иркутск, 24 дек. 2009 г.). – Иркутск: ИрГСХА, 2009. – № 37. – С. 49-55.
36. *Алтухов И.В.* Прибор для определения оптических характеристик сельскохозяйственных продуктов [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Мат. ежегод. науч. конф. препод., научн. работников и аспирантов ВСГТУ (Улан-Удэ, 5-9 апр. 2010 г.). – Улан-Удэ: ВСГТУ, 2010. – С. 129-133.
37. *Алтухов И.В.* Определение энергозатрат в процессах ИК-обработки плодов моркови по оптическим свойствам [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Рациональное природопользование и энергосберегающие технологии в агропромышленном комплексе: мат. международ. практ. конф. (Иркутск, 13-15 апр. 2010 г.). – Иркутск: ИрГСХА, 2010. – С. 252-255.
38. *Алтухов И.В.* Взаимосвязь между электрическими и оптическими свойствами ИК-излучателя как основа выбора эффективного источника ИК-излучения для термообработки сельскохозяйственных продуктов [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Повышение эффективности и использования энергии в условиях Сибири: мат. Всерос. научн.-практ. конф. с междунар. участием (Иркутск, 26-28 апр. 2010 г.). – Иркутск: ИрГТУ, 2010. – С. 468-472.
39. *Алтухов И.В.* Технология инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеплодов [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Engineering problems in agriculture and industry: мат. междунар. конф. (Улан-Батор, 2-4 июля 2010 г.). – Монголия, Улан-Батор: МГСХУ, 2010. – С. 87-92.
40. *Алтухов И.В.* Влияние температурного режима сушки на показатели качества моркови [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров* // Природа и сельскохозяйственная деятельность человека: сб. ст. междунар. научн.-практ. конф. (Иркутск, 23-27 мая 2011 г.). – Иркутск: ИрГСХА, 2011. – С. 176-179.
41. *Алтухов И.В.* Тепломассоперенос в корнеплодах моркови под воздействием ИК-энергоподвода [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров, В.А. Федотов* // Техника и технологии инженерного обеспечения АПК: мат. IV-го регион. на-

учн.-производ. сем. «Чтения И.П. Терских» (Иркутск, 26-27 сентября 2011 г.). – Иркутск: ИрГСХА, 2011. – С. 98-102.

42. *Алтухов И.В.* Общие принципы проектирования ИК-электротехники для сушки сельскохозяйственных продуктов [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров // Энергообеспечение и энергосбережение на предприятиях АПК: межвузов. научн. сб., посвящ. 80-летию Башкирского ГАУ.* – Уфа: БГАУ, 2011. – С. 8-9.

43. *Алтухов И.В.* Связь влаги с телом в продуктах растительного происхождения при термообработке [Текст] / *В.Д. Очиров, А.М. Худоногов, И.В. Алтухов // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: мат. междунар. научн.-практ. конф. мол. уч. ИрГСХА (Иркутск, 18-20 апр. 2012 г.)* – Иркутск: ИрГСХА, 2012. – С. 42-46.

44. *Алтухов И.В.* Выбор источника ИК-излучения для термообработки сырья растительного происхождения [Текст] / *И.В. Алтухов, В.Д. Очиров, В.А. Федотов, О.Н. Цыдыпова // Актуальные вопросы технического, технологического и кадрового обеспечения АПК: мат. междунар. научн.-практ. конф., посвящ. 80-летию со дня рождения д.т.н., проф., Заслуж. деят. науки и техники Терских И.П. (Иркутск, 25-26 сент. 2012 г.)*. – Иркутск: ИрГСХА, 2012. – С. 214-219.

45. *Алтухов И.В.* Применение эффективных режимов ИК-энергоподвода в технологии сушки свёклы с целью улучшения качественных показателей исследуемого продукта / *И.В. Алтухов, Д.Н. Бобов // Экологическая безопасность и перспективы развития аграрного производства Евразии: мат. междунар. научн.-практ. конф., посвящ. 60-летию аспирантуры ИрГСХА (Иркутск, 3-4 дек. 2013 г.)*. – Иркутск: ИрГСХА, 2013. – С. 132-135.

46. *Алтухов И.В.* Совершенствование методов оценки качества в технологии сушки свёклы ИК-излучением / *И.В. Алтухов, Д.Н. Бобов // Актуальные проблемы энергетики АПК: мат IV. междунар. научн.-практ. конф., ФГБОУ ВПО Саратовский гос. аграр. универ. им. Н.И.Вавилова.* – Саратов. 2013. – С. 16 – 19.

47. *Алтухов И.В.* Методы определения электрофизических показателей пищевых продуктов растительного происхождения в процессе сушки ИК-излучением / *И.В. Алтухов, Д.Н. Бобов // Актуальные проблемы энергетики АПК: мат. V междунар. научн.-практ. конф., ФГБОУ ВПО Саратовский гос. аграр. универ. им. Н.И.Вавилова.* – Саратов. 2014. – С. 45 – 50.

Лицензия на издательскую деятельность

ЛР № 070444 от 11.03.98 г.

Подписано в печать 16.03.2015 г.

Тираж 100 экз.

Издательство Иркутского государственного
аграрного университета им. А.А.Ежевского
664038, Иркутская обл., Иркутский р-н, пос. Молодежный