

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
ТАШКЕНТСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

---

---

На правах рукописи  
УДК 664.047

**Джураев Хайрулло Файзиевич**

**Сушка плодов сельскохозяйственных культур: моделирование, оптимизация,  
разработка высокоэффективных аппаратов**

**Специальность: 05.18.12 - «Процессы, машины и агрегаты  
пищевой промышленности»**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Ташкент -2005**

Работа выполнена в период прохождения целевой очной докторантуры на кафедре «Автоматизация производственных процессов и электротехника» Ташкентского химико-технологического института и на кафедре «Технологическое машины, оборудование и автоматизация производства» Бухарского технологического института пищевой и легкой промышленности.

**Официальные оппоненты:** академик АН РУз,  
доктор технических наук, профессор  
**З.С.САЛИМОВ**

доктор технических наук, профессор  
**Д.Н. МУХИДДИНОВ**

доктор технических наук, профессор  
**Х.С. НУРМУХАМЕДОВ**

**Ведущая организация:**  
**«УЗМЕВАСАБЗАВОТУЗУМСАНОАТ-ХОЛДИНГ»**

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2005 года в \_\_\_ часов на заседании специализированного совета Д 067.24.03 при Ташкентском химико-технологическом институте по адресу: 700011, г.Ташкент, ул. Навои, 32.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Ташкентского химико-технологического института по адресу: 700011, г.Ташкент, ул. Навои, 32.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2005 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
доктор технических наук, профессор Ю.К. Кадиров

### **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ**

**Введение.** Экономическое развитие Узбекистана, переход к рыночным отношениям требуют ускорения развития отраслей, целых комплексов, интенсификации процессов тепло – и массообмена (ТМО). Развитие экономики определяется такими направлениями, как создание научных основ и широкое использование комплексной технологии, способствующих сбережению энергетических ресурсов.

В Республике Узбекистан ежегодно производится около 5 млн. тонн. плодов и овощей. Однако большое количество теряется на поле, при сборе, транспортировке и хранении. Иногда потери составляют около 40%.

Вопросы уменьшения потерь сырья и продуктов, сохранения ценных компонентов плодоовощей, выпуска импортозамещающей и экспортоориентированной продукции, а также повышения экономичности транспортировки требуют развития перерабатывающих отраслей, особенно процессов и установок для сушки.

Производство сухофруктов и кишмиша основано преимущественно на естественной воздушно-солнечной сушке. Перед сушкой продукт окуривается сернистым газом и бланшируется в щелочи. Применяемые химикаты экологически нечисты, а бланширование сопряжено ещё и с потерями сухих веществ.

Решение трактуемой проблемы требует анализа, моделирования, синтеза оптимальных технологических процессов и на основе этого разработки новых высокоэффективных сушильных установок.

Перспективным методом интенсификации процесса сушки плодов сельскохозяйственных культур, отвечающим предъявляемым жестким требованиям, является применение физических методов подвода энергии в поле инфракрасного диапазона. Перспективность метода обусловлена:

- снижением энергетических затрат;

- улучшением качественных показателей высушенных продуктов за счет обеспечения низкотемпературного режима сушки;

- снижением эксплуатационных расходов и уменьшением потери сырья за счет разработки малогабаритных, маломощных установок сушки, их изготовлением и распространением по фермерским хозяйствам и малым предприятиям.

Это позволяет часть промышленных предприятий разместить на периферии, обеспечить работой людей, перерабатывать попадающую сельхозпродукцию.

В этой связи особую актуальность приобретает теоретическое и экспериментальное обоснование целесообразности применения ИК-предварительной обработки сырья с последующей ИК-конвективной и вакуумной сушкой, а также выявление закономерностей переноса влаги, тепла по слоям исследуемых объектов. Целесообразность реконструкции сушильного оборудования и реализации нетрадиционного способа сушки плодов в консервной и овощесушильной промышленности Республики Узбекистан продиктована:

- необходимостью обеспечения страны и зарубежных заказчиков сушеной продукцией;

- необходимостью выпуска конкурентоспособной высококачественной конечной продукции.

Решение рассматриваемой сложной научно - технической проблемы возможно путем целенаправленной разработки теоретических основ пищевой промышленности на основе системного анализа и разработки соответствующей методологии математического и компьютерного моделирования. Методология многоуровневой оптимизации, математического и компьютерного моделирования позволяет синтезировать высокоэффективные аппараты, установки и технологические линии, реализовывать рациональные режимы проведения тепломассообменных процессов, способствует снижению их энергоемкости, уменьшению потерь сырья и повышению качества конечной продукции.

Проблема комплексного, теоретического и экспериментального исследования сложного технологического процесса сушки с использованием нетрадиционных физических методов подвода энергии, базирующегося на методологии математического моделирования и разработка на этой основе высокоэффективной технологии и её аппаратурного воплощения отличается особой актуальностью и злободневностью.

Проведенные в рамках выполнения реферируемой диссертационной работы исследования и разработки являются составной частью госбюджетных НИР БухТИП и ЛП и Таш ХТИ и выполнены в соответствии с государственными научными программами Центра по науке и технологиям при Кабинете Министров Республики Узбекистан:

- 3.3.7.2 «Разработка технологической линии и высокоэффективного агрегата для получения плодоовощных порошков» (№ Гос. регистрации 01.010011267) (2000-2002гг.);
- 12.18 «Создание высокоэффективной технологии переработки плодов и овощей с целью получения сухофруктов и порошков с сохранением ценных компонентов» (2003-2005г.).

**Цель исследования.** Целью реферируемой диссертационной работы является разработка методологии моделирования и оптимизации процессов сушки плодов сельскохозяйственных культур на основе анализа распределения параметров в продукте и разработка на этой основе высокоэффективных энергосберегающих аппаратов. Такой подход требует реализации принципиально нового, основанного на стратегии многоуровневой оптимизации, математического и компьютерного моделирования, оптимального проектирования процесса сушки, ориентированного на использование нетрадиционных способов подвода энергии в поле инфракрасного диапазона излучения и создания высокоэффективных энергосберегающих сушильных аппаратов.

Решение этой сложной научно – технической проблемы требует дальнейшего развития теоретических основ процесса сушки с определением и установлением закономерностей перемещения тепла и влаги в исследуемых образцах. При этом перспективна разработка конкретных практических рекомендаций, позволяющих реализовывать высокоэффективные сушильные установки.

Данную проблему в реферируемой работе предлагается решать путем целенаправленного системного анализа и синтеза процесса сушки, построения математических и компьютерных моделей с использованием программного комплекса «MATLAB».

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие конкретные, взаимосвязанные и малоизученные научно-теоретические и методологические **задачи исследования:**

- обоснование перспективности использования нетрадиционного способа подвода энергии в поле инфракрасного диапазона излучения с последующей ИК- конвективной сушкой отдельных видов (дыни, абрикоса, персика, лука и т.д.) плодов;
- обоснование на основе стратегии системного анализа эффективных по своему конечному результату методик экспериментальных исследований процесса сушки;
- построение математических моделей процесса сушки;
- проведение экспериментов по уточнению зависимостей физико-химических показателей применительно к конкретным условиям сушки плодов, а также по установлению адекватности полученных моделей реальным процессам, протекающим в отдельных функциональных подсистемах и в собственно технологической системе;
- обоснование возможности применения нетрадиционных способов в технологиях обработки плодов сельскохозяйственных культур;
- проведение компьютерных исследований, направленных на определение основных закономерностей процессов сушки плодов;
- обоснование рациональных режимов проведения процессов предварительной ИК-обработки и сушки с учетом реальных параметров сушильного агента;
- обоснование эффективности использования режима автоматического регулирования мощности теплоисточника в разработанных сушильных установках;
- системная оптимизация технологического процесса сушки плодов;
- разработка рациональной конструкции аппаратов и установок для сушки плодов;
- проведение полупромышленных и промышленных испытаний выполненных разработок, установление достоверности и обоснованности научных положений, выводов и конкретных рекомендаций диссертационной работы;
- выработка рекомендации по применению маломощных сушильных установок в схемах промышленной переработки плодов.

**Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Выполненные комплексные теоретические и экспериментальные исследования базируются на корректном использовании методологии системного анализа, математического моделирования и оптимизации технологических процессов и производств и характеризуются достаточно полным подтверждением достоверности и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, совпадением с результатами аналитического решения конкретных математических моделей и задач. Конечные результаты экспериментов критически сопоставлены с известными литературными данными. Опытные данные получены в результате применения общепринятых и рекомендуемых отраслевых руководящих материалов и методик экспериментального исследования тепло – и массообменных процессов сушки плодов. В результате научно обоснованы способы и устройства для ИК-конвективной и вакуумной сушки продуктов; достоверно изучены закономерности распределения: лучистого потока по поверхности исследуемых продуктов; поля температуры и влаги в пространстве аппарата и в слое материала; плотности тепловых потоков в ходе предварительной обработки и сушки.

**Новизна работы.** В диссертации обоснована методология моделирования и расчета процесса сушки на основе определения распределения параметров по квазислоям высушиваемого материала в отличие от обычного расчета, где процесс сушки производится путем определения средних значений влажности и температуры продукта. Таким образом, анализ и синтез процесса сушки продуктов осуществляется на один уровень глубже. В работе обоснована концепция многоступенчатого системного анализа сложных тепло- и массообменных процессов переработки плодов сельскохозяйственных культур путем декомпозиции системы сушильного агрегата на функциональные подсистемы и т.д. Разработан подход к компьютерному моделированию процесса сушки, позволяющая определять закономерности протекания процессов перемещения влаги и тепла как по слоям высушиваемого материала, так и во времени. Обоснована стратегия многоуровневой оптимизации процесса сушки плодов. Она позволила определить оптимальные процессы для случая ИК- предварительной обработки и ИК- конвективной сушки плодов сельскохозяйственных культур и разработать высокоэффективные сушильные установки.

**Личный вклад автора в решение трактуемой научной проблемы.** В публикациях, составляющих основу диссертации, лично автору принадлежит общая постановка задач исследования, участие и проведения экспериментов, интерпретация, анализ и обобщение полученных результатов, выявления основных закономерностей и практическая реализация результатов работы в промышленности. Выводы и рекомендации диссертации сформулированы автором лично.

На публичную защиту выносятся следующие новые научные положения, полученные лично автором:

- методология системного анализа сложного тепломассообменного процесса сушки отдельных видов сельхозпродуктов (дыня, абрикос, персик, лук и т.д.) и теоретико-методологические аспекты экспериментального исследования процесса сушки;

- предложенные математические и компьютерные модели исследуемых процессов сушки плодов;

- результаты экспериментального изучения гигроскопических свойств и характеристик плодов сельскохозяйственных культур;

- выявленные терморadiационные характеристики ряда плодов сельскохозяйственных культур;

- методики инженерного расчета сушильных установок и определения закономерностей распределения лучистого потока по поверхности и в объеме высушиваемых изделий;

- стратегия многоуровневой оптимизации сложного технологического процесса сушки плодов;
- технологические разработки и рекомендации по комплексной переработке плодов сельскохозяйственных культур;
- конструктивно – технологическое оформление сушильных установок;
- результаты натуральных испытаний и технико-экономической оценки разработанных сушильных установок.

**Методы исследования.** Для целей интенсификации процессов сушки плодов обоснована перспективность и целесообразность использования нетрадиционных способов подвода энергии излучения в инфракрасном диапазоне. К выполнению работы привлечена методология системного анализа сложных тепло – и массообменных процессов. При изучении кинетики сушки и обосновании режимов регулирования технологических параметров сушильных установок использованы методы математического и компьютерного моделирования и многоуровневой оптимизации. Экспериментальные исследования выполнены на лабораторных, полупромышленных и промышленных сушильных установках. В процессе выполнения диссертационной работы широко использованы персональные компьютеры (Pentium-IV) и программный комплекс MATLAB.

**Научная и практическая значимость результатов исследования** состоит в следующем.

На основе выполненных комплексных теоретических и экспериментальных исследований получено новое решение актуальной научно-технической проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение и заключающейся в существенном повышении эффективности сушильных установок, позволяющих значительно улучшить качество получаемой продукцией. Предложенное решение проблемы призвано создать научные основы для автоматизированного проектирования высокоэффективных установок для сушки продуктов.

Выявлены оптимальные режимы процесса ИК- конвективной сушки плодов.

Предложен способ ИК- конвективной и вакуумной сушки с предварительной ИК- обработкой продуктов.

Разработана методика инженерного расчета сушильной установки и системы энергоподвода.

Обоснован импульсный режим ИК- предварительной обработки плодов сельскохозяйственных культур.

**Реализация результатов.** На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана опытно-промышленная ИК- конвективная сушильная установка, внедренная в АООТ «Опторг» Шахрисябзского района Кашка-Дарьинской области (2001-2002 гг.). Проведено испытание ИК- вакуумной сушилки в АООТ «Табиат саховати» Бухарской области. Экономический эффект от внедрения одной установки с производительностью 1,5 – 2 т. в сутки по сырью, а также реализации разработок и рекомендаций диссертационной работы составляет 14,3 млн. сумов в год (на 2003г.). Ожидаемый экономический эффект по Республике составляет около 140 млн. сумов в год.

Рекомендованные новые способы сушки сельхозпродуктов способствуют повышению качественных показателей конечной продукции за счет соблюдения низкотемпературного режима.

Бухарским центром стандартизации и сертификации выдан акт лабораторных испытаний, свидетельствующий о соответствии качественных показателей сушеных фруктов и овощей требованиям государственного стандарта.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также разработанные (ИК- конвективная и вакуумная) сушильные установки используются в

научно-исследовательской работе и в учебном процессе БухТИП и ЛП и ТашХТИ при подготовке бакалавров и магистров.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы доложены, обсуждены и получили поддержку и одобрение на научных, научно-практических конференциях и семинарах: «Школа - семинар» (г.Бухара, 2001 г.); ежегодная конференция профессорско-преподавательского состава ТашХТИ (г. Ташкент, 2001, 2002, 2005 г.г.); ФерПИ (г.Фергана, 2001 г.); Международная научно-практическая конференция «Кичик ва урта бизнесни ривожлантиришда янги техника ва технологияларни кўллаш, хамда уларнинг иктисодий самарадорлигини ошириш муаммолари» (г.Наманган, 2002 г.); XҮI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-16) (г.Санкт-Петербург, г. Ташкент 2003 г.); Международной конференции «Перспективы развития биологических технологий и безопасность» (Украинский научно-технологический центр, 2003г.); Международной конференции в Институте биоорганической химии имени академика Садыкова Академии Наук Республики Узбекистан (г. Ташкент, 2003 г.).

**Опубликованность результатов.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 34 работах , в том числе в 9 зарубежных, и 8 республиканских научных журналах и сборниках.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, основной части, состоящей из шести глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем работы без списка литературы и приложений составляет 228 страниц, содержит 60 рисунков, 6 схем и 14 таблиц. Список литературы насчитывает 304 источника отечественных и зарубежных авторов.

Диссертационная работа была выполнена в период прохождения автором целевой очной докторантуры.

---

---

Автор выражает глубокую признательность академику АН. РУз, д.т.н., проф. Юсупбекову Н.Р., д.т.н., проф. Артикову А.А. за всестороннюю помощь и консультации при выполнении данной диссертационной работы.

---

---

### **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, изложено современное состояние вопроса, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна полученных результатов, раскрыто теоретическое и практическое значение положений, выводов и конкретных рекомендаций, сформулированных в диссертации.

**В первой главе** проанализировано состояние и тенденции развития теории и техники переработки сельхозпродуктов. Систематизированы сведения о технологических свойствах плодов и овощей как объектов сушки. Приведены результаты исследований процесса сушки, способов и устройств для сушки плодов сельскохозяйственных культур. Данная глава носит обзорно – постановочный характер и направлена на формирование основной концепции исследования.

Консервная (овощесушильная и пищекоцентрированная) промышленность перерабатывает самое разнообразное сырье: овощи, плоды, ягоды и др., которые являются источником различных микроэлементов, крайне необходимых для жизнедеятельности человека. В них также содержатся углеводы (сахара, крахмалы), органические кислоты, ароматические и красящие компоненты, витамины и минералы. Содержание сухих веществ в них колеблется в пределах 85-94%, белка - 18-30%, сахара - 5-20%. Необходимо отметить и множество витаминов. Однако для максимального сохранения при комплексной переработке упомянутых элементов необходимо уменьшить их контакт с химическими растворами, устранить воздействие солнечных лучей и ограничить длительность воздействия высоких температур.

Анализируя сорта, химический состав всей номенклатуры сельхозпродуктов, выращиваемых в Средней Азии, необходимо отметить, что в настоящее время возросла потребность в высококачественных, экологически чистых сухофруктах, плодовых порошках и напитках. Однако у большинства плодов и овощей в ходе переработки и даже при кратковременном хранении под действием микроорганизмов ухудшаются качественные показатели. Это связано с низким уровнем условий хранения и переработки.

Один из основных путей эффективного хранения и уменьшения потерь сельхозсырья – сушка продукции. Сушка - не только сложнейший нестационарный процесс тепло- и массообмена, но и важнейший технологический прием безотходной переработки плодов сельскохозяйственных культур.

С этой точки зрения в данной главе выполнен критический анализ существующих способов переработки и основных тенденций развития безотходной технологии переработки плодов при одновременной интенсификации тепло- и массообменных процессов. В ней обоснованы рациональные пути повышения энергетической эффективности сушильных установок и определены задачи исследования.

Отмечено, что в настоящее время процесс сушки сельхозпродуктов в зонах их произрастания осуществляется в основном естественным (воздушно-солнечным) способом, а на перерабатывающих предприятиях – конвективным методом. Однако эти способы обладают целым рядом существенных недостатков. При сушке происходит значительное загрязнение продукта.

Солнечно - радиационная сушка, с точки зрения экономии топливно – энергетических ресурсов, является наиболее выгодной. Однако при этом имеет место зависимость от погодных условий, большая продолжительность процесса сушки, низкая эффективность использования концентрируемой солнечной энергии, в особенности резкое снижение результативности процесса сушки при отсутствии солнечного излучения, сложность аппаратного оформления способа и необходимость в течение солнечного дня изменять ориентацию концентраторов солнечной энергии.

Из физических методов подготовки плодов к сушке следует особо выделить контактный (кондуктивный) способ сушки. Основные недостатки рассматриваемого способа: высокая температура, неравномерность прогрева продукта по толщине слоя, перегрев нижних слоев, обуславливающий термическую деградацию основных показателей качества конечной продукции.

Теория сушки коллоидно-капиллярно-пористых материалов достаточно разработана большим отрядом ученых. Однако применительно к процессу сушки сельхозпродуктов с точки зрения запросов энергосберегающей технологии и их энергетической эффективности, а также знаний закономерностей перемещения влаги и тепла арсенал этой теории ещё недостаточен. Кроме того, сложность математического описания и необходимость систематического проведения специальных экспериментов требуют привлечения принципов, методов и практических приемов системного анализа и синтеза сложных химико-технологических процессов и систем к разработке адекватных математических моделей и алгоритмов оптимизации процесса сушки.

Нами на основе предшествующих исследований была обоснована целесообразность применения при сушке плодов сельскохозяйственных культур новых физических методов подвода энергии в поле инфракрасного диапазона излучения. Решаемая научно-техническая проблема предопределила необходимость обоснования методологии системного исследования сложного технологического процесса сушки и развития теоретических предпосылок математического моделирования и многоуровневой оптимизации, ориентированных на инструментарий пакета «MATLAB». Применение предложенных принципов и теоретических положений призвано создать необходимую научно-техническую основу для разработки маломощных, компактных энергосберегающих сушильных установок для малых, фермерских и средних перерабатывающих предприятий Республики Узбекистан.



**Вторая глава** диссертации посвящена проблеме системного анализа процессов сушки плодов, сельскохозяйственных культур. В ходе переработки продуктов протекают сложные процессы, которые воздействуют на количественные и качественные показатели готовой продукции.

Приступая к системному анализу технологической линии для переработки сельхозпродуктов, необходимо определить центр всей исследуемой системы и её функциональных составных подсистем, - с точки зрения стабильности, обуславливающей как производительность линии, так и качество конечной продукции. Успешное решение этой задачи обеспечивает достижение технологической линией и установкой более высокого уровня целостности, позволяет одновременно и в комплексе изучить условия и возможности развития исследуемой технологической системы. Такой подход позволяет в конечном итоге установить основные направления совершенствования техники и технологии данного производства. Следует подчеркнуть, что развитие технологической системы не сводится к непосредственному потоку изменений, а обязательно включает в себя рост стабильности и системной организованности, что требуется в соответствии с интегративными закономерностями конкретной техники и технологии.

С целью выявления и обоснования путей развития высокопроизводительных технологических линий для производства качественной продукции экспериментальными приемами определена стабильность отдельных функциональных подсистем типовой технологической линии для переработки плодов. Для определения уровня организованности и стабильности процессов переработки осуществлен расчет по выходам и параметрам сохранения ценных компонентов. При этом исходная система рассмотрена как состоящая из статистически зависимых функциональных подсистем. Расчет уровня стабильности и энтропии выполнен по методике В.А. Панфилова на основе формулы Клода-Шеннона.

$$P_i(CBA) = P_i(C) \cdot P_i(B/C) \cdot P_i(A/CB), \quad (1)$$

$$H_i(CBA) = H_i(C) \cdot H_i(B/C) \cdot H_i(A/CB),$$

где  $H_i$  -информационная энтропия,  $P_i$ -вероятность попадания случайной величины в интервале  $-x_{i1}; x_i$ , А - подсистема образования продукции со стандартными показателями; В - подсистема образования промежуточного продукта; С - подсистема, в которой реализуются подготовительные процессы (очистка плодов от примесей и очистка стандартных плодов).

Применение метода операторных представлений к анализу технологической линии позволило объективно определить и обосновать целесообразность совершенствования технологической линии, выявить ее наиболее «узкие» места и наметить пути развития исследуемого объекта.

На основе рассмотренного подхода нами разработана рациональная технологическая схема, которая призвана обеспечивать получение высококачественной сушеной продукции. При этом задача состоит в том, чтобы в ходе предварительной ИК-обработки и сушки в первую очередь максимально сохранить исходный состав обрабатываемой продукции. Качество высушиваемой продукции зависит от взаимодействия технологических аппаратов и протекающих в них процессов и явлений.

Результаты изучения тепло- и массообменных явлений, протекающих в продуктах при их обработке, а также выявление влияния различных факторов на конечные результаты позволили обосновать технологическую схему с детализацией ее многоступенчатой иерархии (рис.П.1).

Функциональная подсистема 2.5 – представляет собой аппарат для ИК-конвективной и вакуумной сушки плодов сельскохозяйственных культур. Рациональная организация процесса достигается за счет обоснованного выбора конструктивных параметров аппарата, а управление процессом осуществляется путем соответствующего

изменения технологических параметров. Конечными элементами системы здесь выступают: рабочая камера, вентилятор, фильтр и вакуум - насос. Подсистема 2.5.1 - сушильная камера - снабжена нагревательными элементами, отражателями лучей, сетчатым подом - в случае исполнения аппарата в варианте периодического действия. Выбор нагревательного элемента (подсистема - 2.5.1.1) осуществлен на основе изучения терморadiационных (ТРХ) характеристик плодов сельскохозяйственных культур. Процесс нагрева и сушки твердой фазы (подсистема 2.5.1.3) осуществляется в подсистеме 2.5 под действием подсистемы 2.5.1.1. Механизм действия излучения на облучаемые предметы (твердая фаза) выражается превращением лучистой энергии в тепловую.

Следует отметить, что при декомпозиции технологической линии на подсистемы по уровням иерархии процесс сушки рассмотрен протекающим в два этапа. Для разрушения клеточных пор и ускорения процесса перемещения влаги продукт предварительно обрабатывается в поле излучения инфракрасного диапазона в импульсных режимах при длине волны  $\lambda_{из}=1,1$  мкм, а в зоне сушки в непрерывном режиме при длине волны  $\lambda_{из}=2,8$  мкм. Поскольку в ходе сушки основная часть ИК – энергии поглощается водой, это интенсифицирует убыль влаги из материала.

В подсистеме 2.5.1.2 (газовая фаза) протекают процессы перемещения, поглощения влаги и теплообмена. Подсистема 2.5.1.4 является сетчатый под. Для обеспечения равномерного прохода и распределения воздуха по всей поверхности высушиваемого продукта под изготовлен в виде решетки. Коэффициент прохода воздуха составляет 0,8. Однако при загрузке материала коэффициент свободной поверхности варьирует от 0,3 до 0,5 при оптимальной сушке.

Проанализировано количественные изменения ценных компонентов - таких, как белки (подсистема-2.5.1.3.1.1), витамины (подсистема-2.5.1.3.1.2), минералы (подсистема-2.5.1.3.1.3).

Математическая модель процесса сушки плодов сельскохозяйственных культур, протекающего в масштабе аппарата в целом, включает в себя математические описания процессов и явлений, происходящих в рассмотренных выше подсистемах.

**Третья глава** посвящена вопросам математического и компьютерного моделирования процесса сушки.

Эффективное решение поставленной в диссертации задачи требует прежде всего выработки общей стратегии, систематизирующей и подчиняющей единой цели все промежуточные этапы и процедуры подготовки математического описания процесса сушки плодов. Эта стратегия определяет существо системного анализа исследуемого процесса и состоит из этапов качественного анализа структуры системы, синтеза функционального оператора и его идентификации, а также проверки адекватности модели реальному процессу. Основу первого этапа составляет обобщенная система уравнений с учетом физико-химических процессов, протекающих в технологическом аппарате. Эта система уравнений, во - первых, может служить исходным пунктом при переходе к математическому описанию частной инженерной задачи; во- вторых, она вскрывает структуру движущих сил и потоков, развивающихся в локальном объеме аппарата и отражающих специфику физико-химических процессов в нем.

Математическая модель процесса сушки плодов охватывает уравнения материального и теплового балансов, уравнения пространственного распределения температуры и влаги, а также молекулярной диффузии влаги.

При построении математического описания процесса нами проанализировано взаимодействие внешних и внутренних связей системы в целом. Установлена связь между температурой и влагосодержанием в различных точках элементарного слоя продукта в различные моменты времени.

Для построения математического описания поведения температуры в твердой фазе нами привлечено дифференциальное уравнение теплового баланса в слоях продукта.

Последнее, применительно к процессу сушки плодов сельскохозяйственных культур в поле инфракрасного диапазона излучения, можно записать в приращениях как:

$$dQ_{обл} = dQ_V + dQ_{нов} + dQ_{ном}, \quad (2)$$

где  $dQ_{обл}$  - энергия, сообщаемая материалу;  $dQ_V$  - энергия, поглощенная в объеме материала;  $dQ_{нов}$  - энергия обмена между поверхностью материала и окружающей средой.

Энергия  $dQ_V$  расходуется на нагрев материала и испарение влаги

$$dQ_V = dQ_m + dQ_{исп}. \quad (3)$$

Здесь  $dQ_m$  - энергия, затраченная на нагрев материала;  $dQ_{исп}$  - энергия, затраченная на испарение влаги.

В свою очередь, энергия, затраченная на нагрев материала, есть

$$dQ_m = G_m \cdot c_m \cdot dt_m, \quad (4)$$

где  $G_m$  - масса облучаемого материала;  $c_m$  - удельная теплоемкость материала, Дж/кг. К;  $dt_m$  - изменение температуры материала, К.

Энергия, поглощаемая поверхностью изделий за время  $d\tau$ :

$$dQ_{нов} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} A_{\lambda} \cdot q_{\lambda} \cdot F \cdot dt \quad (5)$$

Энергия, затраченная на испарение влаги

$$dQ_{исп} = q_m \cdot F \cdot r \cdot d\tau, \quad (6)$$

где  $q_m$  - средняя плотность потока влаги, кг/(м<sup>2</sup>.ч);  $r$  - удельная теплота парообразования, Дж/кг.

$$q_m = \frac{N \cdot R_v \cdot \rho}{100 \cdot r_{\phi}}; \quad (7)$$

$N$  - коэффициент сушки в период постоянной скорости, %/с;  $R_v$  - отношение объема тела к поверхности материала м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>;  $r_{\phi}$  - удельная теплота фазовых превращений, кДж/моль.

Камера сушильной установки снабжена отражателями, которые служат для равномерного распределения лучистого потока на поверхности материала. В данном случае:

$$dQ_{обл} = q_{обл} \cdot F_{обл} \cdot d\tau; \quad (8)$$

где  $q_{обл}$  - плотность потока излучения, кВт/м<sup>2</sup>;  $F_{обл}$  - площадь облучаемой поверхности, м<sup>2</sup>;  $\tau$  - время, с.

Определяя значения отдельных составляющих уравнения (3), можно записать:

$$q_{обл} \cdot F_{обл} \cdot d\tau = G_m \cdot c_m \cdot dt_m + q_m \cdot F \cdot r \cdot d\tau + (t_m - t_g) \cdot F \cdot d\tau. \quad (9)$$

Потери тепла:

$$dQ_{ном} = \alpha(t_m - t_g) \cdot F \cdot d\tau + \xi_{изл}(t_m - t_g)F \cdot d\tau, \quad (10)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи путем конвекции, Вт/(м<sup>2</sup>.К);

$\xi_{изл}$  - коэффициент излучения.

$F$  - площадь полной поверхности материала, м<sup>2</sup>

Для составления математического описания температуры продуктов рассмотрим тепловой баланс на элементарных участках образца. Разница между приходящим ( $Q_{вх}$ ) и уходящим теплом ( $Q_{вых}$ ) характеризуется скоростью накопления тепла:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}} ; \quad (11)$$

где  $Q_0$ - плотность лучистого потока

$$Q_0 = q_0 \left( 1 - e^{-S\Delta h} \right), \quad (12)$$

$q_0$  - плотность теплового потока, кВт/м<sup>2</sup>;  $s$ - коэффициент экстинкции;  $\Delta h$ - глубина поглощения лучей, мм.

Большинство сельхозпродуктов обладает значительной поглощательной способностью. Это обусловлено пористостью материала и наличием в нем влаги

$$Q_{\text{пр}} = \alpha \cdot F_s \cdot (t_g - t_1) . \quad (13)$$

$$\text{Имеем: } Q_{\text{вх}} = q_0 \cdot \alpha \cdot F_s \cdot (t_g - t_1), \quad (14)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, (Вт/м<sup>2</sup> К);  $F_s$ - площадь поверхности облучаемого материала, (м<sup>2</sup>);  $t_g$ -температура воздуха, (°С);  $t_1$  - начальная температура изделия, (°С).

Уходящее тепло:

$$Q_{\text{вых}} = -\frac{\lambda \cdot F_s}{h} \cdot (t_1 - t_2) , \quad (15)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, (Вт/м.К);  $t_1$ -температура слоя, (°С);  $h$  -толщина слоя, (мм).

Известно, что тепло в слое определяется следующим уравнением:

$$Q = m \cdot c \cdot t , \quad (16)$$

где  $m$  - масса материала, кг;  $c$  - теплоемкость материала, кДж/(кг °С);  $t$  – температура материала, °С.

Подставляя значения  $Q_{\text{вх}}$  и  $Q_{\text{вых}}$  в уравнения (13) и (14), получим:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\left[ q + \alpha \cdot F_s \cdot (t_g - t_1) - \frac{\lambda \cdot F_s}{\Delta h} \cdot (t_1 - t_2) \right] \cdot \Delta \tau}{m \cdot c} + t_2 \quad (17)$$

Скорость изменения температуры слоя в первом сечении

$$\frac{dt_1}{d\tau} = \frac{\left[ q_1 + \alpha \cdot F_s \cdot (t_g - t_1) - \frac{\lambda \cdot F_s}{\Delta h} \cdot (t_1 - t_2) \right] \cdot \Delta \tau}{m \cdot c} + t_2 - G \cdot it , \quad (18)$$

где  $G$ - испаряемая влага с поверхности изделий;  $it$ - энтальпия пара.

$$G = -\beta \cdot F_s \cdot (X_1 - X_p) . \quad (19)$$

Для  $i$ -ого слоя имеем:

$$\frac{dQ_i}{d\tau} = Q_{i-1} + Q_{i+1} . \quad (20)$$

Приходящее тепло в виде лучистой энергии описывается следующим уравнением:

$$Q_{i-1} = (q_i + q_{\text{пр}}) . \quad (21)$$

Здесь  $q_i$ -плотность потока в  $i$ -ом слое

$$q_i = q_s \cdot K_{\text{изл}} \cdot e^{-Si\Delta h} , \quad (22)$$

где  $K_{\text{изл}}$ - коэффициент излучения.

$$q_s = \frac{F_s}{F_0} \cdot q_0 , \quad (23)$$

$F_s$ - площадь поверхности облучаемого материала, м<sup>2</sup>;  $F_0$ -площадь пода, м<sup>2</sup>.

В результате имеем

$$Q_{i-1} = q_i - \frac{\lambda F_s}{dh} (t_{1i} - t_{1i-1}), \quad (24)$$

где  $t_{1(i-1)}$  - температура (i-1) - ого слоя

Тепло, переходящее в результате теплопередачи из одного слоя в другой, определяется как:

$$Q_{i-1} = q_{np} + q_{5-i}. \quad (25)$$

Здесь:

$$q_{np} = q_i = q_s \cdot \exp^{-S_i dh}$$

$$\text{Получим } q_{i+1} = -\frac{\lambda F_s}{dh} (t_{1i-1} - t_{2i-1}) \cdot q_{np}$$

Тогда скорость изменения температуры i-ого слоя:

$$\frac{dt_i}{d\tau} = \frac{\left[ q_i + \frac{\lambda \cdot F_s}{dh} \cdot (t_{i-1} - 2t_i + t_{i+1}) \right] \cdot \Delta \tau}{m \cdot c} + t_i. \quad (26)$$

Скорость изменения температуры в нижнем слое:

$$\frac{dt_5}{d\tau} = \frac{\left[ q_5 - \frac{\lambda \cdot F_s}{dh} \cdot (t_4 - t_5) - \alpha_n \cdot F_n (t_5 - t_n) \right] \cdot \Delta \tau}{m \cdot c}, \quad (27)$$

Скорость изменения температуры пода равна:

$$\frac{dt_n}{d\tau} = \frac{[\alpha_n \cdot F_n (t_5 - t_n)] \cdot \Delta \tau}{m_n \cdot c_n}, \quad (28)$$

где  $\alpha_n$  - коэффициент теплоотдачи пода, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $m_n$  - масса пода, кг;

$c_n$  - теплоемкость материала пода, кДж/(кг·°С),  $F_n$  - поверхность пода, м<sup>2</sup>.

В течение всего периода сушки плодов влажность изменяется до равновесного состояния - вследствие испарения влаги. Известно, что при небольшой влажности материала влага перемещается, в основном, в виде пара, т.е. сушка происходит за счёт молекулярного переноса пара, а при большой влажности влага частично перемещается в виде жидкости. При этом зона испарения приближается к поверхности материала, увеличивается поверхность высушиваемого материала, в связи с чем возрастает испарение влаги. Таким образом, под действием ИК - лучей за счёт градиента температуры влага перемещается от поверхностных слоев внутрь материала.

Изменение влажности плодов в процессе сушки влияет на процесс массообмена, осуществляемого путем влагопереноса.

Для построения математического описания процесса перемещения влаги нами рассмотрен математический баланс элементарного слоя:

$$\frac{dm_{вл}}{d\tau} = U_{вх}^1 - U_{вых}^1, \quad (29)$$

где  $U_{вх}$ ,  $U_{вых}$  - входящее и выходящее количество влаги в i-ом слое изделия. Количество влаги, прошедшей через поверхность F в единицу времени:

$$U_{вх}^1 = -\beta \cdot F_s \cdot (x_1 - x_p), \quad (30)$$

$$U_{вых}^1 = K D t^* (x_2 - x_1), \quad (31)$$

где  $\beta$  - коэффициент массоотдачи, (кг/м<sup>2</sup>с);  $x_1$ -начальное значение безразмерного влагосодержания материала;  $x_2$ -безразмерная концентрация влаги в слое изделия;  $KDt$ -коэффициент термодиффузии влаги, (кг/°С м<sup>2</sup>).

Здесь: 
$$KDt = \frac{Fs \cdot D \cdot \rho}{dh}, \quad (32)$$

$D$  - коэффициент диффузии, (м<sup>2</sup>/с);  $\rho$  - плотность изделия, (кг/м<sup>3</sup>);  
 $dh$  - толщина изделия,(м).

Подставив уравнения (30), (31) и (32) в (29), получим:

$$\frac{dm_{вн}}{d\tau} = (-\beta \cdot Fs \cdot (x_1 - x_p) + KDt \cdot (x_2 - x_1)) \quad (33)$$

Для формирования математического описания последующих  $i$ -ых слоев воспользуемся выражениями:

$$U_{вх}^i = KDt \cdot (x_{i-1} - x_i); \quad (34)$$

$$U_{вых}^i = KDt \cdot (x_i - x_{i+1}). \quad (35)$$

где  $x_{i-1}$ -безразмерная концентрация влаги в верхнем слое;  $x_{i+1}$ -безразмерная концентрация влаги в  $(i+1)$ -ом слое;  $x_i$ -безразмерная концентрация в  $i$ -ом слое.

Для расчета коэффициента внутренней диффузии было использовано следующие уравнение:

$$D_{вн} = \frac{l^2}{\pi^2 \cdot W} \cdot \frac{dw}{d\tau} \quad (36)$$

где:  $l$ -толщина слоя, мм;  $W$ -влажность продукта, %;  $\frac{dw}{d\tau}$  - скорость сушки (%/мин.).

Значения коэффициента внутренней диффузии при  $l=4$ мм, составляет  $D_{вн} = 2,08 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 / \text{с}$

Математическая модель представляется в виде дифференциальных уравнений:

а) скорости распределения влаги по поверхности слоя:

$$\frac{dw_k}{d\tau} = \frac{(-\beta * Fs * (X_k - X_p) + KDt \cdot F_s / dh * (X_1 - X_k))}{m_k}; \quad (37)$$

б) скорости распределения влаги в первом начальном слое:

$$\frac{dX_1}{d\tau} = \frac{(-\beta \cdot Fs \cdot (X_1 - X_p) + KDt \cdot (X_2 - X_1))}{m} \cdot (1 - X_1^2); \quad (38)$$

в) скорости распределения влаги в  $i$ -ом слое:

$$\frac{dX_i}{d\tau} = \frac{(KDt \cdot F_s / dh \cdot (X_{i-1} - 2X_i + X_{i+1}))}{m} \cdot (1 - X_i^2); \quad (39)$$

г) скорости распределения влаги в последнем слое:

$$\frac{dX_s}{d\tau} = \frac{KDt \cdot (X_{i+1} - X_s)}{m} \cdot (1 - X_s^2); \quad (40)$$

По методике С.Г. Ильёсова расчет теплообмена в поле инфракрасного диапазона излучения основывается на терморрадиационных характеристиках продукта. При произвольных условиях облучения поверхности тела  $S$  потоком излучения  $F_n$

суммарная величина поглощенной  $F_A$ , отраженной  $F_R$  и пропущенной  $F_T$  телом энергии в единицу времени есть:

$$F_n = F_R + F_T + F_A,$$

где  $A = \frac{F_A}{F_n}$  - коэффициент поглощения тела;  $R = F_R / F_n$  - отражательная способность

(коэффициент отражения);  $T = \frac{F_T}{F_n}$  - пропускательная способность (коэффициент пропускания).

Таким образом, скорость процесса сушки определяется состоянием окружающей среды и условиями сушки, а полный поток влаги можно выразить через объемный коэффициент массоотдачи:

$$\frac{d\mu}{d\tau} = j = \beta(x_r - x) = \beta(x^* - x), \quad (41)$$

где  $x_r$  - влагосодержание воздуха (кг/кг) на границе слоя, которое считается равновесным, т.е.  $x_r = x^*$ ;  $x$  - влажность воздуха в объеме сплошной фазы.

Обе величины находятся по показаниям психрометра. Значения  $J$  потока влаги (%/мин<sup>-1</sup>) определяются по экспериментальным данным. При различных температурах можно найти величину  $\beta$ , используя соотношение:

$$\beta = \frac{J}{x^* - x}. \quad (42)$$

Обработкой экспериментальных данных при различных температурах получена зависимость  $\beta = f(t)$ .

В нашем случае определяли  $x^*$  и  $x$  при  $t = 55-65^{\circ}\text{C}$  при влажности 6,5 - 78%. Имеем:  $x^* = 0,256$ ,  $x = 0,00715$

Замкнутая математическая модель процесса сушки плодов сельскохозяйственных культур также включает в себя уравнения расхода воздуха в сушильной установке в ходе сушки.

Точность описания условий равновесия, правильный учет закономерностей распределения влаги и тепла, химического превращения компонентов и их тепловых эффектов обуславливает адекватность математической модели, потенциальные её возможности.

Математическая модель построена на основе пакетного принципа компьютерного моделирования и включает в себя подмодели, описывающие кинетику сушки, изменение плотности теплового потока и влаги в зоне предварительной обработки и терморadiационной - конвективной сушки.

В разработанной математической модели процесса сушки плодов нашли отражение различные способы подвода энергии. В нашем случае особое внимание уделено подаче энергии путем одно- и двухстороннего облучения продукта в ходе сушки. Полученные на математической модели результаты отражают варьирование плотности теплового потока -  $q$ , толщины слоя -  $\delta$ , скорости подаваемого воздуха -  $v_b$ , причем,  $q$  изменяется от 900 до 2500 Вт/м<sup>2</sup>,  $\delta$  - от 2 до 8 мм, скорость воздуха - в пределах  $v_b = 1,4-1,7$  м/с.

Результаты двухсторонней терморadiационно-конвективной сушки плодов сельскохозяйственных культур приведены на рис.П.2. На рис.П.2. ( $a_1$ ,  $b_1$ ,  $v_1$ ) приведены кривые сушки. Здесь  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $v_2$  - изменение температуры плода дыни сорта «Кампир-чапан» с влажностью  $W_n=86,4\%$  в зависимости от плотности теплового потока, толщины слоя ломтя дыни, скорости потока воздуха. Из приведенных кривых видно, что при значении плотности теплового потока  $q=2500$  Вт/м<sup>2</sup> и толщины слоя  $\delta = 8$  мм время сушки

составляет 5 часов (рис.П.2 а<sub>1</sub>), средняя температура (рис.П.2а<sub>2</sub>) в подслоях ломтя составляет в пределах 96-102<sup>0</sup>С, для всего ломтя дыни в среднем 98<sup>0</sup>С. При этом конечная влажность плода дыни 22%. При толщине слоя  $\delta = 6$  мм время сушки варьировало до 4 часов (рис.П.2б<sub>1</sub>), средняя температура в слоях ломтя составляет в пределах 118-140<sup>0</sup>С, средняя для всего ломтя дыни температура равна 126<sup>0</sup>С (рис.П.2б<sub>2</sub>). Конечная влажность равна 22%. Однако с уменьшением толщины слоя ( $\delta = 4$  мм) наблюдается повышение температуры до 210<sup>0</sup>С (рис.П.2в<sub>2</sub>), при этом конечная влажность составляет 22%, а время сушки - 3,4 часов (рис.П.2в<sub>1</sub>).

По результатам исследования кинетики сушки нами построена обобщенная модель (рис.П.3), которая описывает процесс односторонней терморационно - конвективной сушки плодов сельскохозяйственных культур.

При односторонней терморационно - конвективной подаче тепла процесс сушки протекает в два этапа. Перед сушкой высушиваемый продукт обрабатывается в поле инфракрасного диапазона излучения с длиной волны  $\lambda=1,1$  мкм при плотности теплового потока  $q= 27$  кВт/м<sup>2</sup> в импульсном режиме, а собственно процесс сушки протекает в условиях ИК облучения с длиной волны  $\lambda=2,8$  мкм при плотности теплового потока от 800 до 2500 Вт/м<sup>2</sup> в непрерывном режиме.

На рис.П.4 приведены кривые сушки плода дыни (кривая-1), поля температуры (кривая-2), кривые равновесной влажности (кривая-4), а также плотности теплового потока и масштаба машинного времени в зоне импульсной обработки (кривая-5а,3а) и сушки (кривые-5б,3б).

Как видим, при односторонней терморационно - конвективной сушке обеспечивается низкотемпературная обработка плодов сельскохозяйственных культур. Например, в зоне импульса температура достигает 50<sup>0</sup>С (кривая -2), а в зоне сушки этот показатель составляет 65-67<sup>0</sup>С. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при низкотемпературном режиме продолжительность сушки составляет от 3,5 до 3,7 часов в зависимости от толщины слоя (сопоставительные результаты приведены в диссертации).

Математическая модель также описывает процесс протекания тепло- и массообмена в слоях каждого вида исследуемого продукта. На рис.П.5. приведена кривая изменения температуры и влаги в зависимости от теплового потока. Из кривых видно, что изменение температуры продукта между слоями в зоне импульса составляет от 46 до 53<sup>0</sup>С, а в зоне сушки средняя температура в подслоях от 62 до 66<sup>0</sup>С, предел отклонения влажности высушенного продукта между слоями составляет 0,5 ÷ 1,0%.

**Четвертая глава** диссертации посвящена обсуждению результатов, экспериментального исследования процесса сушки плодов сельскохозяйственных культур. Фактический материал этой главы призван дать ответ на вопрос, какой должна быть последовательность действий экспериментатора при выполнении исследования для получения необходимого конечного результата. Четкая регламентация действий на каждом этапе работы позволяет получить необходимые по надежности и точности конечные результаты.

Для экспериментального изучения терморационных характеристик (ТРХ) плодов взяты образцы: абрикосов с толщиной 2 – 6 мм, ломтей дыни 2 ÷ 10 мм, персиков 2 ÷ 6мм. При этом использованы спектрофотометры СФ-4Ф и «Пульсар». Эксперименты проведены по методике С.Г Ильасова.

Результаты показывают, что плоды в области длин волн 0,7÷1,1 мкм обладают наибольшей пропускательной способностью (табл. 1). Исходя из этого, для эффективной предварительной обработки выбран генератор КГТ 500,1000-220.

Таблица 1.

Терморационные характеристики плодов абрикоса и персика

Про-	$\lambda$ ,	Отражение, $R_\lambda$	Пропускание, $T_\lambda$	Поглощение, $A_\lambda$	W
------	-------------	------------------------	--------------------------	-------------------------	---



дукт	мкм	$\delta=6$ мм	$\delta=4$ мм	$\delta=2$ мм	$\delta=6$ мм	$\delta=4$ мм	$\delta=2$ мм	$\delta=6$ мм	$\delta=4$ мм	$\delta=2$ мм	, %
Абр- кос	1,1	16	10	7	20,5	72,5	90,4	63,5	17,5	2,6	82
	2,8	4,2	7,3	5,4	0,5	2,3	4,8	95,3	90,4	89,8	82
Пер- сик	1,1	-	12,1	-	-	74,5	-	-	13,3	-	86
	2,8	-	5,5	-	-	1,5	-	-	75-80	-	86

На основе анализа ТРХ плодов нами предложен процесс предварительной обработки продукта перед сушкой в поле инфракрасного диапазона излучения в области спектра  $\lambda=1,1$  мкм. Проникновение лучей внутрь слоя продукта обеспечивает раскрытые клеточных пор молекулами воды и интенсифицирует перемещение влаги. Далее в ходе сушки при длине волны излучения  $\lambda=2,8$  мкм удаляется основная часть влаги.

Значительная часть сельхозпродуктов является влажными коллоидно-капиллярно-пористыми системами. Поэтому для рациональной организации процесса сушки плодов необходимо знание их гигроскопических свойств. Закономерности переноса влаги определяются характером взаимодействия молекул воды со структурой материала. Потенциал переноса охватывает явления переноса тепла и влаги, а ее величина увязывается с энергией связи с материалом. В связи с этим для обоснованной разработки рациональных методов обработки и сушки требуется исследование, направленное на математическое описание гигроскопических свойств плодов. На основе экспериментальных исследований определены значения равновесной влажности плодов с помощью климатической камеры «Фойтрон».

Основываясь на методике Г.К. Филоненко и А.И. Чуприна, нами с помощью программного пакета «MATLAB» получено математическое описание процесса, отражающее связь равновесной влажности плодов, относительной влажности воздуха и температуры и представленное в виде уравнения изотермы десорбции:

$$W_p = \left[ \lg \frac{1}{1 - \varphi} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot (m - n \cdot t), \quad (43)$$

где  $m$  и  $n$  - коэффициенты, определяющие зависимость равновесного влагосодержания от вида материала и температуры на соответствующих участках изотерм.

Однако при реальной сушке материала мономолекулярная адсорбционная влага не удаляется. Поэтому в наших исследованиях изотермы на участке перехода от мономолекулярной к полимолекулярной адсорбции не изучены.

Средний участок кривых (рис. П.6а,б) дает представление об образцах плода дыни и абрикоса. Участок кривых изотермы десорбции, обращенный выпуклостью к оси относительной влажности, характеризует капиллярно связанную и осмотическую влагу. Как видно из кривых на рис.П.6а, при относительной влажности  $\varphi=70\%$  с повышением температуры равновесная влажность плода дыни уменьшается от 35,5% (кривая-1) до 28% (кривая-2). В зависимости от способа обработки плодов изотермы десорбции имеют характерный вид. Например, на рис.П.6б приведены изотермы десорбции плодов абрикосов, обработанных (кривые -2,4) и не обработанных ИК лучами (кривые -1,3). Из кривых видно, что при  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi=70\%$  в образцах (кривая-1) равновесная влажность составляет 26,1%, а в образцах (кривая-2) 22,8%. При температуре  $60^{\circ}\text{C}$  равновесная влажность при тех же условиях составляет 18,5% (кривая -3), а в образцах (кривая-4) 16,7%.

Таким образом, на основе исследований можно определить равновесную влажность плодов при определенных значениях температуры и относительной влажности воздуха.

Разработанные терморadiационно-конвективный и вакуумный сушильные установки для проведения экспериментальных исследований представляют собой

сушильную камеру, сетчатый под, вентилятор, измерительные приборы, вакуум - насос и воздуховоды. В диссертации приведены схемы и описан принцип работы сушильных установок.

Процесс сушки осуществляется в два этапа. На первом этапе продукт обрабатывается инфракрасными лучами в импульсном режиме с длиной волны  $\lambda=1,1\text{мкм}$ , далее за счет терморрадиационно – конвективного подвода энергии реализуется собственно процесс сушки. Суть импульсной обработки связана с тем, что при длине волны  $\lambda=1,1\text{мкм}$  обеспечивается более глубокое проникновение лучей в слой материала, что в свою очередь обеспечивает разрушение клеточных пор молекулами воды. Для ускорения перемещения влаги и её удаления процесс сушки осуществляется при длине волны  $\lambda=2,8\text{мкм}$ , когда поглощается большая часть воды и интенсифицируется сам процесс удаления влаги.

Применительно к процессу сушки исследованы температурные поля в слоях исследуемых образцов.

При прерывистом (импульсном) режиме картина выглядит иначе (рис.П.7). Когда плоды обрабатываются во II режиме (кривая -2), т.е когда продолжительность первого цикла составляет 45 с, после снятия облучения на определенном интервале до 50 с наблюдается повышение температуры продукта, что можно объяснить выделением энергии биохимического превращения, имеющего место под воздействием ИК- лучей в интервале температур  $48\div 57^{\circ}\text{C}$ . В итоге в ходе предварительной обработки температура материала достигает  $62^{\circ}\text{C}$ . В III режиме продолжительность первого цикла облучения составляет 60 с. Это приводит к резкому повышению температуры материала до  $90\div 95^{\circ}\text{C}$ , что обуславливает ухудшение качества материала и их составных компонентов. В I режиме не обеспечивается требуемый прогрев материала. Наиболее рациональным режимом является варьирование значений влияющих параметров плотности подающего теплового потока  $q=27\text{кВт/м}^2$  в прерывистом режиме:

$$\tau_{\text{общ}} = (\tau_{\text{обл}}; \tau_{\text{выд}}; \tau_{\text{обл}};) = (+45 - 20 + 25); \tau_{\text{общ}} = 90\text{с}.$$

На рис.П.8. приведены кривые сушки – изменения влажности плода абрикоса (половинки) во времени, построенная на основе экспериментальных данных. Начальная влажность абрикоса 78%. Установлено, что путем ИК – конвективной сушки влажность абрикоса можно довести до 18 – 20%. Видно, что на процесс сушки в большей степени влияет удельная нагрузка. Например, при удельной нагрузке  $\sigma=8\div 10\text{кг/м}^2$  (кривая-1) процесс сушки сокращается до 30-35 минут при  $\delta=2\text{мм}$ , по сравнению с  $\sigma=12\div 14\text{кг/м}^2$  (кривая -3,2). По полученным результатам, изображенным на рис П.9 (кривые -1,2), можно сравнить кинетические закономерности сушки абрикоса при различных удельных нагрузках. Скорость сушки при  $\sigma=8\div 10\text{ кг/м}^2$  составляет 0,61[%/мин], а для  $\sigma=14\text{ кг/м}^2$  – 0,42[%/мин]. Точка  $W_{\text{кр1}}$  для  $\sigma=8\div 10\text{кг/м}^2$  имеет место при  $W_{\text{ост}}=28\%$ , а для  $\sigma=14\text{кг/м}^2$  -  $W_{\text{ост}}=40\%$ . Рациональным параметром процесса сушки является параметр  $\sigma=8\div 10\text{кг/м}^2$  при скорости воздуха 1,4-1,7 м/с.

С целью получения математического выражения, отражающего зависимость скорости сушки и критической влажности продукта от влияющих факторов, процесс сушки исследован с применением метода планирования полного факторного эксперимента (табл.2).

Для оценки адекватности полученной зависимости использован критерий Фишера. Определены абсолютные отклонения экспериментальных данных от расчетных. Среднеквадратическое отклонение составляет 5-7%.

Основными влияющими факторами являются: плотность теплового потока, температура, скорость сушильного агента, толщина слоя и удельная нагрузка на единицу поверхности.

Таблица.2.

План эксперимента при натуральной размерности факторов ( $q, t_{\theta}, \sigma$ ) и в безразмерном выражении величин  $x_1, x_2, x_3$

№	Показатели	$q, \text{кВт/м}^2$	$x_1$	$t_{\theta}, ^\circ\text{C}$	$x_2$	$\sigma, \text{кг/м}^2$	$x_3$
1	Максимальные	2,5	+1	65	+1	12	+1
2	Минимальные	0,8	-1	50	-1	8	-1
3	Средние	1,2	0	57	0	10	0

Нами экспериментально исследованы закономерности кинетики сушки сельхозпродуктов (дыни, абрикосы, персики, лук и др.). Результаты сравнения терморрадиационно - конвективного и вакуумного способов с существующим способом приведены в диссертации.

Предложенная и реализованная методологическая последовательность и существо процедур проведения экспериментальных исследований в лабораторных, полупромышленных и промышленных условиях позволяет добиться необходимого уровня надежности конечных результатов.

Статистическую обработку полученных данных проводили по программе "MATLAB". Проверки адекватности математической модели реальному процессу осуществлены сопоставлением результатов вычислений с экспериментальными данными. Результаты приведены на рис.П.10.

**В пятой главе** рассмотрены вопросы многоуровневой оптимизации процесса сушки плодов. Функциональная декомпозиция задач оптимизации осуществлена, исходя из стратегии системного анализа сложного процесса сушки.

Вид и число ограничений, составляющих дополнительные условия задачи, выбраны в зависимости от конкретных условий технологического процесса. С целью совершенствования процесса сушки исследованы закономерности тепло – и массообменных, биохимических явлений, протекающих в структуре (абрикоса, персика дыни, лука) плодов; выявлено влияние различных факторов на качество сушеных продуктов и определена целевая функция.

Разрабатываемые технологические линии должны обеспечить определенный экономический эффект. При этом основными показателями выступают стоимость (Ц) выпускаемых продуктов, себестоимость (С) продукции и производительность (П) установок. Поэтому в качестве критерия эффективности можно принять доход (D) предприятий, который является функцией соответствующих факторов

$$D = (C - S) \cdot P \quad (44)$$

Здесь производительность установки имеет фиксированные значения. Ещё одним из существенных признаков при расчетах является форма высушиваемых изделий, поэтому правомочен критерий эффективности – массовая нагрузка  $[\sigma, (\text{кг/м}^2)]$ . Однако этот показатель целесообразно из числа критериев перевести в разряд ограничений, поскольку  $P \rightarrow \max, S \rightarrow \min$ .

Задача управления заключается в выборе таких параметров, при которых обеспечивается достижение наибольшей прибыли.

Нами рассмотрена комплексная технологическая линия, критерием оптимизации которой выступает себестоимость и её составляющие. В некоторых случаях они представляют собой затраты применительно к технологической системе:

$$Z_{\text{уст}} = Z_3 + Z_A + Z_{\text{тр}} + Z_{\text{пр}}; \quad Z_A = E_1 \cdot C_{\text{co}} + E_2 \cdot C_{\text{ст.с}}; \quad Z_3 = Z_{\text{нагр}} + Z_{\text{возд}} + Z_{\text{тр}} + Z_{\text{др}}$$

где:  $Z_3$  – затраты энергии;  $Z_A$  – амортизационные отчисления;  $Z_{\text{тр}}$  – затраты на транспортировку продукта;  $Z_{\text{пр}}$  – затраты на сырьё;  $C_{\text{co}}$  – стоимость оборудования;  $C_{\text{ст.с}}$  – стоимость строительных сооружений.

Задача оптимизации состоит в минимизации технологических затрат. Например, критерий оптимизации можно сформулировать в обобщенной форме в виде конечной температуры продукта:

$$T_k = f(E, \tau_{obl}, t_e, V_e, W_H, T_\lambda) \rightarrow \min.$$

Однако для строгого решения задачи оптимизации необходимо проанализировать процессы, протекающие в элементах установки и определить локальные критерии оптимизации для каждого подпроцесса. Рассматриваемая система состоит из нескольких взаимосвязанных аппаратов и подсистем от системы в виде аппарата в целом до детализации структурных изменений в высушиваемом образце. Стратегия декомпозиции и многоуровневой оптимизации технологического комплекса приведена на рис. П.11. Здесь вся система принята в качестве основного объекта оптимизации.

Таким образом, оптимизация процесса сушки плодов опирается на методологию многоуровневой многокритериальной оптимизации.

На первом уровне иерархии рассматриваются вопросы оптимизации процессов протекающих в отдельных элементах рабочей камеры, и сводятся к подбору конструктивных оптимальных параметров элементов аппарата. Здесь реализовано следующее расчленение рабочей камеры на: подсистему 3.1.1. и 3.2.1. (нагреватель); подсистему 3.1.2. и 3.2.2. (твердая фаза); подсистему 3.2.3. (газовая фаза).

Подсистема 3.1.1. и 3.2.1. (нагреватель). Здесь задача сводится к обеспечению равномерности распределения лучистого потока по поверхности продукта в процессе предварительной обработки и сушки, а также к интенсификации тепло- и массообмена при определенной длине волны излучения при соответствующем расположении излучателей.

Подсистема 3.1.2. и 3.2.2. (твердая фаза). Задача состоит в обеспечении равномерности нагрева и убыли влаги со всей поверхности продукта. Решение общей задачи связано с увеличением поверхности контакта фаз.

Подсистема 3.2.3. (газовая фаза). Задача состоит в обеспечении требуемых условий перемещения, поглощения влаги и тепломассообмена.

На втором уровне иерархии объектами выступают:

Подсистемы 4.1.1.1, 4.2.1.1 (отражатели лучей). Задача достижения равномерного распределения лучей решается путем соответствующего подбора отражающего материала.

Подсистемы 4.1.1.2, 4.2.1.2 (нагревательные элементы). Задача оптимизации здесь решается путем обеспечения равномерного распределения температур, подбора необходимой длины проникающих лучей, а также установления соответствующей длины волны излучения при предварительной обработке и ИК- конвективной сушке.

Подсистемы 4.1.2.1- 4.2.2.1, 4.1.2.2 - 4.2.2.2. (транспортёр, ситчатый под, а также собственно продукт). Задача здесь заключается в создании устройства, обеспечивающего максимальное попадание ИК-лучей на поверхность материала и равномерное перемещение продукта по всей поверхности транспортера и по сетчатому поду сушильной камеры. Транспортёр и под ИК- установки изготовлены из сетчатой ленты. Над транспортёром на определенном расстоянии друг от друга установлены блоки излучателей - для того, чтобы создать равномерный режим облучения. Ленточный сетчатый конвейер предназначен для последовательного перемещения сырья по возможности сплошным слоем по всей длине установки. При движении конвейер поочередно проходит зоны облучения. В подсистеме 4.1.2.2 - 4.2.2.2 объектом являются высушиваемые изделия, а задача оптимизации сводится к рассмотрению множества критериев – таких, как качество сушеного материала, равновесная влажность и температура в ходе сушки. Таким образом, для получения качественного продукта ( $K \rightarrow \max$ ) температура материала должна быть минимальной ( $T \rightarrow \min$ ),  $N \rightarrow \max$ ,  $\frac{dw}{dh} \rightarrow \min$ , и коэффициент диффузии, выступающий как ограничение  $D=f(W_n, W_k)$ .

В процессе сушки продукт и сушильный агент (воздух) образуют специфическую систему, где переход влаги из объема высушиваемого материала в воздух характеризуется

условиями равновесия. Таким образом, система 3.2.3 рассматривается как состоящая из двух подсистем: 4.2.3.1 и 4.2.3.2. Необходимо отметить, что влажность высушиваемых изделий и параметры сушильного агента характеризуют полностью процесс сушки.

На третьем уровне иерархии рассматриваются слои продукта. Исходя из этого, нами сделана попытка, анализировать количество измененных компонентов в лаборатории «Белок» в ИХРВ АН РУз. Элементами подсистемы данного уровня являются: белки, витамины и минералы. Результаты исследования приведены в диссертации.

При решении задачи оптимизации на этой ступени иерархии необходимо соблюдать ограничения, накладываемые на температуру процесса  $t_{пр} \rightarrow t_{зад}$ . При осуществлении процесса сушки температура продукта регулируется в зависимости от температуры и скорости подаваемого воздуха, а также продолжительности процесса.

Рассмотренные задачи многоуровневой оптимизации процесса сушки в систематизированном виде сведены в табл.3.

**Шестая глава** диссертации посвящена натурным исследованиям терморadiационно-конвективной сушки плодов сельскохозяйственных культур. Приведена методика инженерного расчета сушильных установок и обосновано рациональное расположение излучателей в сушильных установках. Излагаются результаты промышленных испытаний. Для натуральных экспериментальных исследований использованы: полупромышленная установка периодического действия, с одновременной загрузкой 1,5 - 2 тонн сырья, а также лабораторная установка периодического действия с загрузкой 35-40 кг сырья при вертикальном подводе энергии. Объектами сушки были выбраны дыни, персики, абрикосы, лук, и т.д.

Для разработки терморadiационной - конвективной сушильной установки нами изучены закономерности распределения тепла по поверхности высушиваемых изделий. На основе методики С.Г. Ильясова и Ю.М. Плаксина определена плотность теплового потока при одностороннем облучении:

$$E_i = \frac{E_э \cdot d_э \cdot Z_u}{2 \cdot \beta} = \left| \frac{x - v \cdot \tau}{(x - v \cdot \tau)^2 + \beta^2} + \frac{1}{\beta} \cdot \arctg \frac{x - v \cdot \tau}{\beta} \right|_{x_1}^{x_2} \quad (45)$$

где  $v$  - скорость движения конвейера, м/с;  $\tau$  - время, с.;  $x_1, x_2$  - координата начального и конечного расположения излучателя;  $i$  - порядковый номер излучателя в блоке;  $d_э$  - эквивалентный диаметр ИК - излучателя, м;  $E_э$  - энергетическая светимость излучателя, Вт/м<sup>2</sup>.

Плотность результирующего потока:

$$E_{pu} = B_э \cdot d_э \cdot K_{осв} \cdot \left( \frac{A}{1 - R \cdot R_p} \right), \quad (46)$$

где  $B_э$  - энергетическая яркость излучателя;  $A$  - интегральная поглощательная способность продукта;  $R$  - интегральная отражательная способность продукта;  $R_p$  - интегральная отражательная способность рефлектора;  $K_{осв}$  - коэффициент освещенности поверхности материала, определяемый как:

$$K_{осв} = \left( \frac{E}{B_э \cdot d_э} \right). \quad (47)$$

Таблица 3.

Многоступенчатая оптимизация процесса сушки плодов					
Уровни		Процессы	Критерии	Оптимизи-	Оптималь-

оптимизации	Система	в выбранных системах	оптимизации	зируемые параметры	ные параметры
III	Слой продукта и компоненты	Испарение влаги и изменение свойств продукта	$t_m = f(E, t_b, \vartheta_b, T_{\lambda} \dots) \rightarrow \min$	Температура	$t \leq 65^{\circ}\text{C}$
II	Твердая фаза – собственно ИК- лампы Отражатель Сетчатый под Продукт Твердая и газовая фаза	Процесс превращения лучистой энергии в тепловую, нагрев и испарение влаги, перемещение влаги и теплообмен	$W_k = f(E, \tau_{\text{обл}}, t_b, W_n \dots) \rightarrow \min$ $t_m = f(E, t_b, \vartheta_b, T_{\lambda} \dots) \rightarrow \min$ $\vartheta = f(N, Q(V), \tau) \rightarrow \min$ $G_{\text{мат}} = G_{\text{зад}}$	$\lambda, \sigma, K$ $E, G$	$\lambda = 1,1 \text{ мкм}$ , при предварительной обработке. Удельная нагрузка $\sigma = 8-10 \text{ кг/м}^2$ . $\lambda = 2,8 \text{ мкм}$ в зоне сушки. $\delta = 4 - 10 \text{ мм}$ $\vartheta = 1,4-1,7 \text{ м/с}$ $q = 27 \text{ кВт/м}^2$ $q = 0,8 - 2,0 \text{ кВт/м}^2$
I	Аппарат для предварительной обработки и сушки	Процесс вяления и сушки	$C = f(G_m, N_{\vartheta}, \tau, E, Q(V)) \rightarrow \min$	$A, E, G_b, N_{\vartheta}$	$C = C_{\min}$

Расчеты выполнены с привлечением программного пакета MATLAB. Установлено, что для выбранного способа переработки с новым физическим методом подвода энергии с учетом терморрадиационных характеристик высушиваемых продуктов необходимая плотность теплового потока (в зоне сушки) равна  $q = 1,5-2,0 \text{ кВт/м}^2$ , высота излучателей от продукта  $H = 0,17-0,20 \text{ м}$ , поверхностный рефлектор расположен на расстоянии  $h = 0,1 \text{ м}$  от излучателя.

Анализ свидетельствует о том, что при расположении ИК- излучателей с одинаковым шагом и применении сферического рефлектора не обеспечивается равномерное распределение лучистого потока на поверхности обрабатываемого материала (рис П.12). На краях конвейера плотность падающего потока составляет  $2-2,8 \text{ кВт/м}^2$ , а в центре - около  $7-7,5 \text{ кВт/м}^2$ . Это свидетельствует о том, что при таких распределениях лучистого потока в ходе предварительной обработки и сушки имеет место неравномерность удаления влаги со всей поверхности изделий, в результате чего растягивается собственно процесс сушки и ухудшается качество сушеного продукта.

Для обеспечения равномерного распределения потока излучения целесообразно использование плоского рефлектора и расположить ИК- излучателей с переменным шагом. Такое расположение излучателей обеспечивает равномерное распределение плотности потока на краях конвейера как в центре, так и на периферии; плотность потока на поверхности материала при этом составляет  $1,5-2,00 \text{ кВт/м}^2$  (рис.П.13).

Полученные данные использованы для инженерных расчетов ИК- конвективных сушильных установок непрерывного действия и создания полупромышленной сушильной установки.

Нами разработана опытно-промышленная установка для ИК- конвективной сушки сельхозпродуктов (дыни, абрикоса персика и лука). Промышленная установка изготовлена и испытана в АОООТ «Опторг» Шахрисябзского района Кашка-Дарьинской области.

Для названных выше продуктов выбрана двухступенчатая схема сушки: предварительная (импульсная) обработка и терморadiационно- конвективная сушка.

Исследованы кинетические закономерности процесса сушки, изучено влияние на длительность сушки: входных параметров рабочего агента, геометрических размеров, а также удельной нагрузки на единицу площади пода. Установлены значения остаточной (равновесной) влажности готовой продукции, позволяющие обеспечить их длительное хранение. Эксперименты проведены при удельной нагрузке на под  $\sigma = 8 - 12 \text{ кг} / \text{м}^2$ . Полученные результаты приведены в табл. 4.

Техническая характеристика промышленной сушильной установки:

Габаритные размеры: м, 6x3, 3x6

Масса единовременной загрузки продуктом: по дыне – 2000 кг; время сушки, ч. - 5 ÷ 7; температура камеры, °С - в центре 70°С, по периферии - 66°С.

Качественные показатели высушенной дыни:

цвет - натуральный, без изменения; вкус - первоначальный, сладкий; запах – натуральный, с собственным ароматом дыни; консистенция - мягкая но стойкая; конечная влажность - 22 ÷ 24 %.

Предусматривается упаковка изделий правильной формы в целлофановые обёртки весом 200, 300,400,500 г с размещением в коробках массой нетто 15 ÷ 20 кг.

Таблица 4.

Результаты промышленных испытаний

Продукт	Параметры				
	W <sub>н</sub> , %	W <sub>к</sub> , %	T°С	ϑ, м/с	τ, ч.
Дыня в ломтиках, 10x5x3 см	84,6	22-24	65-70	1,25	5,5 ÷ 6,0
Половинки абрикосов	78,0	22-24	65-70	1,25	3,5-4,0
Половинки персиков	82,0	20 ÷ 22	65-70	1,25	4,5 ÷ 5,0
Лук репчатый	88,0	20-22	65-70	1,25	3,2-3,5

Нами рекомендован ряд конструкций сушильных установок, основанных на терморadiационно – конвективном способе сушки. Процесс сушки в рекомендуемых сушильных установках по форме высушиваемых изделий осуществляется как сушка целых, половинчатых и кольцеобразных продуктов:

а). ИК- конвективная сушильная установка непрерывного действия (рис.П. 14) состоит из сушильной камеры 1, включающей в себя две секции, снабженные трехъярусным сетчатым конвейером 2, излучатели 3, для равномерного отражения лучей над излучателями установлены рефлекторы 4. Подача воздуха осуществляется вентилятором. Для ввода воздуха предусмотрены коммуникации 6; отвод парогазовой смеси осуществляется системой вытяжки 8. Подача высушиваемого продукта

производятся с помощью загрузочного устройства 7. Режим сушки контролируется с помощью щита управления 5.

Технические характеристики:

Производительность по сырью, кг/сутки-250-300; время сушки, ч. -5-6; количество испаренной влаги, кг/ч-20-30; габаритные размеры, м - 11,5x2,4x1,2; конечная влажность, % - 18-22.

Предлагаемая технологическая линия производительностью 20-25 кг/ч готовой продукции комплектуется ИК- конвективной сушильной установкой; установкой для предварительной обработки; ёмкостью для мойки сырья; столом для подготовки сырья; весами и т.д.

б). Сушильная установка периодического действия (рис.П.15). Установка представляет собой сушильную камеру 1, в которой на определенном расстоянии установлены сетчатые поды 2, источники тепла – излучатели 3, для равномерного распределения лучей над излучателями установлены рефлекторы 4. В сушильной установке предусмотрена система аэродинамики, позволяющая воздуху поступающему через пирамидальные коммуникации 5, равномерно распределяться по горизонтальному сечению камеры, отвод парогазовой смеси осуществляется устройством 6.

Технические характеристики:

Масса загрузки, кг – 50-70; время сушки, ч. 3,5-6; количество испаренной влаги, кг/ч – 6,5-7,4; производительность по сушеному продукту, кг/ч – 3,3-3,8; установленная мощность, кВт – 12; количество подов, шт. –8; размер пода, - 750x650x30; габаритные размеры, мм - 1000x850x2200.

В предлагаемых конвективных сушильных установках предусмотрена система аэродинамики (циркуляции воздуха) – в зависимости от температуры и влажности отработанного воздуха.

Разработанная сушильная установка успешно прошла испытания. В настоящее время она применяется для сушки ряда видов плодов и овощей. Практическая реализация сушильной установки на фермерских, частных предприятиях и в консервной промышленности позволит сократить расход энергии в 1,2-1,4 раза, сократить потери сырья, а также затраты на транспортировку на 25-30%. Удельные затраты энергии на испарение 1кг влаги составляют 1,09 кВт.ч/кг.вл.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.**

Организация выпуска высококачественных сушеных плодов имеет существенное значение в увеличении импорного и экспортного потенциала Республики Узбекистан. Проблемы сохранения биологической и товарной ценности сушеных продуктов, уменьшения производственных затрат на единицу высушиваемых продуктов требуют развития сушильной техники и технологии на основе дальнейшего развития теории и практики процессов и аппаратов сушки плодов. Современное развитие компьютерной техники, интенсивная разработка новых средств программного обеспечения позволяют на качественно новом, более высоком уровне развить методологию системного анализа, моделирования, расчета и синтеза процессов сушки сельхозпродуктов. Исследования, проведенные в процессе выполнения диссертации, позволили выработать новую методологию расчета процесса, новые аппараты и установки для сушки плодов.

Результаты комплексного теоретического и экспериментального исследования сложных тепло- и массообменных процессов сушки плодов сельскохозяйственных культур сводятся к следующему:

1. Разработаны научно - методологические основы системного анализа и синтеза сложных тепломассообменных процессов промышленного производства сушеных плодов. Выполненное исследование типовой технологической линии для переработки плодов с точки зрения стабильности как фактора целостности системы позволило обосновать необходимость и целесообразность совершенствования сушильной ветви технологической линии.



2. С целью синтеза оптимального процесса сушки плодов обоснована и реализована стратегия многоуровневого системного анализа, моделирования, расчета и синтеза исследуемой сложной системы на основе рассмотрения процессов, протекающих в функциональных подсистемах, включающие квазислой продукта, элементы рабочей камеры и аппарата в целом как автономного узла технологической линии.

3. Разработаны научно-технические основы компьютерного моделирования процесса сушки плодов. С применением программного комплекса MATLAB разработана компьютерная модель процесса, позволяющая адекватно отражать пространственное и временное распределение влаги и температуры, по толщине высушиваемых изделий и по координате продолжительности процесса сушки, что позволило получить ценную для синтеза оптимального процесса качественную и количественную технологическую информацию.

4. Проведены лабораторные, полупромышленные и промышленные эксперименты, что позволило обосновать условия обеспечения равномерности распределения лучистого потока по поверхности высушиваемых продуктов, и на этой основе предложена геометрия расположения инфракрасных излучателей в рекомендуемых сушильных установках.

Исследовано влияние основных параметров - таких, как: плотность теплового потока; скорость воздуха; толщина слоя; удельная нагрузка - на кинетику сушки. Определены рациональные режимы сушки плодов и овощей. Экспериментально определены терморadiационные характеристики плодов. Установлены гигроскопические свойства характерных плодов.

5. На основе комплексных экспериментальных и теоретических исследований обоснован способ предварительной обработки плодов в поле излучения инфракрасного диапазона, полноценно заменяющий экологически грязную химическую обработку – окуривание сернистым ангидридом. Предлагаемый метод позволил существенно интенсифицировать процесс сушки.

6. Обоснована методология многоуровневой оптимизации процесса сушки плодов сельскохозяйственных культур.

Проанализированы процессы, влияющие на качество продукта, в основном протекающие на молекулярном уровне. Здесь как параметры ограничения выступают температура высушиваемых изделий и продолжительность ее воздействия.

В системе твердой фазы для оптимизации рассматриваются процессы, протекающие в объеме высушиваемых изделий. Здесь определены влияния на критерий оптимальности: длины волны ИК-лучей, размера высушиваемых заготовок.

В системе газовой фазы определены условия, обеспечивающие оптимальную аэродинамическую обстановку и благоприятные условия для теплообмена в сушильной установке.

На уровне аппарата рассматриваются конструктивные параметры сушильных установок, позволяющие проводить процесс сушки при минимальных затратах с одновременным выпуском высококачественного высушиваемого продукта. Определены показатели исходной технологической системы, позволяющие добиться максимального дохода от оптимальной организации процесса сушки плодов.

На основе проведенных опытно-производственных испытаний ИК - конвективной сушилки установлена адекватность предложенных моделей реальным процессам (расхождение экспериментальных и расчетно-теоретических результатов лежит в пределах 5-7%).

На основе синтеза оптимальных процессов предложена новая технология переработки плодов сельскохозяйственных культур, разработаны конструкции аппаратов и установок для осуществления процесса сушки.

7. Обоснована целесообразность использования ИК – конвективного способа для интенсификации процесса сушки плодов сельскохозяйственных культур. Предложена методика инженерного расчета конструктивных параметров сушильных установок.

Разработаны полупромышленные и промышленные установки, нашедшие производственное применение.

**Результаты диссертационного исследования опубликованы  
в следующих работах**

**I. Статьи, опубликованные в научных журналах и сборниках**

1. Джураев Х.Ф., Мехмонов И.И., Хикматов Д.Н. ИК-конвективная сушка сельхозпродуктов. //Ж. «Хранение и переработка сельхозсырья», М.: 2001, №7- С.20-22.
2. Джураев Х.Ф., Додаев К.О., Чориев А.Ж. Технология переработки бахчевых культур. //Ж. «Хранение и переработка сельхозсырья», М.: 2001.№9- С.52-53.
3. Джураев Х.Ф., Базарбаева Д.Ш., Хикматов Д.Н. Системный анализ процесса переработки плодов. //Ж. «Хранение и переработка сельхозсырья». М.: 2001.№9. С.60-61.
4. Джураев Х.Ф., Юсупбеков Н.Р., Артиков А.А., Додаев К.О., Чориев А.Ж., Сафаров А.Ф., Хикматов Д.Н. Промышленное испытание способа сушки дыни по схеме вяление-конвективная сушка. //Ж. «Хранение и переработка сельхозсырья», М.: 2002.№3. С.36-37
5. Додаев К.О., Абдукадыров И.Т., Х.Ф. Джураев., Бабаяров Р.А. Чориев А.Ж., Рахимов Д.А., Иванова И.А. Особенности переработки бахчевых культур. //Ж. Пищевая промышленность. М.: 2002.№11. С.40
6. Djuraev H.F., Artikov A.A/, Safarova Sh. A. Methodology of Computer Modeling of the Fruit and Vegetables Drying Processes.// «3<sup>rd</sup>Asiya Pacific Drying Conference, 1-3 September 2003, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand»,Page B 5-3, 2003.
- 7.Джураев Х.Ф., Артиков А.А., Додаев К.О, Чориев А.Ж., Хикматов Д.Н., Сафаров О.Ф., Мехмонов И.И. Интенсификация процесса тепломассообмена при комплексной переработке сельхозпродуктов. //Ж. “Хранение и переработка сельхозсырья”. М.: 2003.№11. С.47
8. Джураев Х.Ф., Матякубова П.М. Абдуллаев А.Ш., Зайнутдинова М.Б. Исследование процесса сушки плодоовощных культур на вальцевых сушилках. // Ж. “Киме ва Киме технологияси”. Ташкент. 2003.№2. С.67-70.
9. Джураев Х.Ф. Закономерность переноса влаги в процессе сушки плодовых культур // Ж. «Вестник ТашГТУ». 2004. № 1. С 174-178.
10. Джураев Х.Ф. Многоступенчатая оптимизация процесса сушки. // Ж. «Вестник ТГТУ». 2004. № 2. С167-171.
11. Джураев Х.Ф. Теоретические основы рационального расположения источников ИК -излучателей в сушильной установке // Ж. «Вестник ТашГТУ». 2004. №1. С 56-61.
12. Джураев Х.Ф., Артиков А.А., Чориев А.Ж. Интенсификация сушки и сокращение потерь при комплексной переработке сельхозпродуктов// «Технология и техника пищевых производств: итоги и перспективы развития на рубеже XX и XXI веков», издание посвящено 300-летию Санкт-Петербурга, т.3, 2003 г. С.197-201.
13. Джураев Х.Ф. Исследование терморadiационных характеристик плодовых культур //Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук.: Межвуз.сб.науч.тр., вып.-2, ТашГТУ.-Ташкент,2003.С. 71-72.
14. Джураев Х.Ф. Математическая модель закономерности распределения влаги в процессе сушки сельхозпродуктов. //Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук.: Межвуз.сб.науч.тр. вып.-2. ТашГТУ.-Ташкент,2003.С. 73-74.
15. Джураев Х.Ф. Условия равновесия в процессе сушки сельхозпродуктов. //Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук.: Межвуз.сб.науч.тр. вып.-1. ТашГТУ.-Ташкент,2003.С. 78-79

16. Джураев Х.Ф. Вакуумная сушка плодоовощных культур в диапазоне инфракрасного излучения. //Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук.: Межвуз.сб.науч.тр. вып.-1. ТашГТУ.-Ташкент,2003.С. 77.

## **II. Авторские свидетельства и патенты на изобретения**

17. Сафаров О.Ф., Артиков А.О., Джураев Х.Ф. и др. Способ получения сушеных фруктов./ Положительное решение экспертизы Пат.Вед.РУз. № IAP. 2004. 0261. от 17.12.2004 г.

18. Сафаров О.Ф., Базарбаева Д.Ш., Джураев Х.Ф. и др. Способ получения плодоовощных порошков./ Положительное решение экспертизы Пат.Вед.РУз. № IAP. 2004. 0262. от 11.10.2004 г

## **III. Тезисы, депонированные научные работы и аннотации**

19. Джураев Х.Ф., Чориев А.Ж., Хикматов Д.Н. Изучение распределения влаги при сушке плодов на компьютерной модели.// XVI Международная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-16). Сборник трудов, т.-10. Санкт-Петербург, 2003г. С. 129.

20. Джураев Х.Ф., Артиков А.А. Методологические аспекты компьютерного моделирования процесса сушки плодов. // XVI Международная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-16) Сборник трудов, т.-3. Санкт-Петербург, 2003г.С. 129.

21. Джураев Х.Ф., Сафаров О.Ф. Математическая модель процесса тепловой обработки сельскохозяйственных культур.// Математическое и численное моделирование процессов тепло-и массообмена в многофазных средах. «Школа - семинар». Бухара, 2001г. с.66-68.

22.ДжураевХ.Ф., Додаев К.О., Сафаров О.Ф., Чориев А.Ж., Рустамов Б.Т. Методология сушки сельскохозяйственных продуктов и их отходов //Передовые технологии в пищевой промышленности: Сборник трудов научно-технической конференции, ТашХТИ, -Ташкент, 2001. с.96-98.

23. Чориев А.Ж., ДжураевХ.Ф., Артиков А.А. Додаев К.О., Экспериментальное исследование способов сушки коллоидно-капиллярно пористых материалов на примере дыни // Передовые технологии в пищевой промышленности: Сборник трудов научно-технической конференции. ТашХТИ, Ташкент, 2001. с.107-110.

24 Сафаров О.Ф., Джураев Х.Ф., Мехмонов И.И., Ямалетдинова М.Ф. Кишлок хужалик махсулотларини кайта ишлаш муаммолари // Кичик ва урта бизнесни, тадбиркорликни ривожлантиришда янги техника ва технологияни куллаш хамда уларнинг иктисодий самарадорлигини ошираш муаммолари: Тез.докл. Межд.науч.конф. Наманган 2002, с.196-198.

25. Джураев Х.Ф., Сафаров О.Ф.,Мехмонов И.И. Анализ и синтез процессов переработки сельхозсырья.//Междун. науч. практ. конф. по проблемам интенсификации технологических процессов и энергосберегающих технологий в условиях национальной экономики: Тез. докл.- Бухара, 20-22 ноября 2003. с. 33-35.

26. Артиков А.А., Джураев Х.Ф., Ибрагимов С.Х., Мехмонов И.И. Оптимизация процесса сушки плодовых культур. // Междун. науч. практ. конф. по проблемам интенсификации технологических процессов и энергосберегающих технологий в условиях национальной экономики: Тез. докл.- Бухара, 20-22 ноября 2003. с. 47-49.

27. Джураев Х.Ф., Ямалетдинова М.Ф. Гигроскопические свойства плодовых культур //Междун. науч. практ. конф. по проблемам интенсификации технологических процессов и энергосберегающих технологий в условиях национальной экономики: Тез. докл.- Бухара, 20-22 ноября 2003. с. 49-50.

28. Хикматов Д.Н. Джураев Х.Ф., Температурани куришиш жараенига таъсири. // Междун. науч. практ. конф. по проблемам интенсификации технологических процессов и энергосберегающих технологий в условиях национальной экономики: Тез. докл.- Бухара, 20-22 ноября 2003. с. 139-140.

29. Джураев Х.Ф., Усмонов А.У., Ибрагимов Р. Нетрадиционный способ сушки сельхозпродуктов//Междун. науч. практ. конф. по проблемам интенсификации технологических процессов и энергосберегающих технологий в условиях национальной экономики: Тез. докл.- Бухара, 20-22 ноября 2003. с. 149-150.

30. Джураев Х.Ф. Анализ процесса сушки на основе методологии математического моделирования // Республика илмий-техника анжумани. «Киме ва кимевий технологиянинг замонавий муаммолари» Фергона. 22-24 апрел 2004 й. С. 187-188.

31. Джураев Х.Ф. Комплексная переработка плодов в области сушки // Республика илмий-техника анжумани. «Кимё ва кимёвий технологиянинг замонавий муаммолари» Фарғона. 22-24 апрел 2004 й. С.127-129.

32. Джураев Х.Ф. Исследование равновесной влажности и кинетики сушки плодов // Республика илмий-техника анжумани. «Кимё ва кимёвий технологиянинг замонавий муаммолари» Фарғона. 22-24 апрел 2004 й. С.156-157.

33. Джураев Х.Ф., Сафаров О.Ф., Холиков А. Сушильные установки с использованием тепловых труб // 4-я Международная научно-практическая конференция «Проблемы и тенденции развития пищевой и легкой промышленности в XXI веке», Алматы, 15-16 октября 2003.с.250-251.

34. Джураев Х.Ф., Хикматов Д.Н., Сафаров О.Ф. Современные методы моделирования процесса сушки сельхозпродуктов. //4-я Международная научно-практическая конференция «Проблемы и тенденции развития пищевой и легкой промышленности в XXI веке», Алматы, 15-16 октября 2003.С.247-249.

## РЕЗЮМЕ

диссертации Джураева Хайруллы Файзиевича на тему: «Сушка плодов сельскохозяйственных культур: моделирование, оптимизация, разработка высокоэффективных аппаратов» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 –«Процессы, машины и агрегаты пищевой промышленности».

**Ключевые слова:** процесс, тепло – и массообмен, диффузия, система, анализ, иерархическая структура, сушка, конвекция, терморрадиация, теплопроводность, теплоотдача, поверхность, испарение, инфракрасные (ИК) –лучи, десорбция, пропускательная способность, поглощательная способность, отражательная способность, равновесная влажность, кинетика, энтальпия, вакуум, сельскохозяйственное сырье, аппарат, установка, многоступенчатая оптимизация, плотность теплового потока, теплопередача, влагосодержание, модель, слой, отражатель, предварительная обработка, перемещение тепла.

**Объекты исследования:** В качестве объектов исследования взяты различные виды сельскохозяйственных продуктов: абрикос, персик, дыня, лук и т.д.

**Цель работы:** Целью диссертационного исследования является разработка методологии моделирования и оптимизации процессов сушки плодов сельскохозяйственных культур и на основе анализа распределения параметров в продукте и разработка на этой основе высокоэффективных энергосберегающих аппаратов.

**Методы исследования:** Для целей интенсификации процессов сушки плодов обоснована перспективность и целесообразность использования нетрадиционных способов подвода энергии излучения в инфракрасном диапазоне. К выполнению работы привлечена методология системного анализа сложных тепло – и массообменных процессов. При изучении кинетики сушки и обоснования режимов регулирования технологических параметров сушильных установок использованы методы математического и компьютерного моделирования и многоуровневой оптимизации. Экспериментальные исследования выполнены на лабораторных, полупромышленных и

промышленных сушильных установках. В процессе выполнения диссертационной работы широко использованы персональные компьютеры (Pentium-IV) и программный комплекс MATLAB.

**Полученные результаты и их новизна:** В диссертации разработана методология моделирования и расчета процесса сушки на основе определения распределения параметров по квазислоям высушиваемого материала в отличие от обычного расчета, где процесс сушки производится путем определения средних значений влажности и температуры продукта. Таким образом, анализ и синтез процесса сушки продуктов осуществляется на один уровень глубже. В работе обоснована методология многоступенчатого системного анализа сложных тепломассообменных процессов переработки плодов сельскохозяйственных культур путем декомпозиции системы сушильного агрегата на функциональные подсистемы и т.д. Разработана методология компьютерного моделирования процесса сушки, позволяющая определять закономерности протекания процессов перемещения влаги и тепла как по слоям высушиваемого материала, так и во времени. Обоснована концепция многоуровневой оптимизации процесса сушки. Она позволила определить оптимальные процессы для случая ИК- предварительной обработки и ИК- конвективной сушки плодов сельскохозяйственных культур и разработать высокоэффективные сушильные установки.

**Практическая значимость:** На основе выполненных комплексных теоретических и экспериментальных исследований получено новое решение актуальной научно-технической проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение и заключающейся в существенном повышении эффективности сушильных установок. Предложенное решение проблемы призвано создать научную базу для автоматизированного проектирования высокоэффективной технологии сушки и её аппаратного оформления и повысить качество готовой продукции.

Выявлены оптимальные режимы процесса ИК- конвективной сушки плодов.

Предложен способ ИК- конвективной и вакуумной сушки с предварительной ИК- обработкой продуктов. Обоснован импульсный режим ИК- предварительной обработки плодов сельскохозяйственных культур.

Разработана методика инженерного расчета сушильной установки и системы энергоподвода.

**Степень внедрения и экономическая эффективность:** На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана опытно-промышленная ИК- конвективная сушильная установка, внедренная в АООТ «Оппторг» Шахрисабзского района Кашка-Дарьинской области (2001-2002 гг.). Проведено испытание ИК- вакуумной сушилки в АООТ «Табиат саховати» Бухарской области. Экономический эффект от внедрения одной установки с производительностью 1,5 – 2 т. в сутки по сырью, а также от реализации разработок и рекомендаций диссертационной работы составляет 14,3 млн. сум в год. Ожидаемый экономический эффект по Республике составляет около 140 млн. сумов в год.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также разработанные (ИК- конвективная и вакуумная) сушильные установки используются в научно-исследовательских работах и в учебном процессе БухТИП и ЛП и ТашХТИ при подготовке бакалавров и магистров.

**Область применения:** Результаты научных исследований будут использованы в пищевой промышленности, в частности, в консервной и перерабатывающей отраслях производства.

Техника фанлари доктори илмий даражасига талабгор Джураев Хайрулла Файзиевичнинг 05.18.12 – «Озиқ-овқат саноати жараёнлари, қурилмалари ва агрегатлари» ихтисослиги бўйича «Қишлоқ хўжалик экинлари меваларини қуритиш: моделлаштириш, оптималлаштириш, юқори самарали қурилмаларни ишлаб чиқиш» мавзусидаги диссертациясининг

## Қ И С Қ А Ч А    М А З М У Н И

**Калитли сўзлар:** жараён, иссиқлик ва моддаалмашинув, диффузия, система, таҳлил, иерархик структура, қуритиш, конвекция, иссиқликнинг нурланиши, иссиқлик ўтказиш, иссиқлик бериш, инфрақизил нур, десорбция, нурларни ўтиши, нурларни қайтарилиши, нурларни ютилиши, мувонозат ҳолат намлик, кинетика, энтальпия, вакуум, қишлоқ хўжалик хом ашёси, қурилма, агрегат, кўп поғонали оптималлаш, иссиқлик оқими зичлиги, иссиқлик ўтказувчанлик, нам сақлаш, модель, қатлам, нур қайтаргич, дастлабки ишлов, иссиқликнинг кўчиши.

**Тадқиқот объектлари:** Тадқиқот объектлари сифатида турли хилдаги қишлоқ хўжалик хом ашёлари олинган, жумладан ўрик, шафтоли, қовун, пиез ва бошқалар.

**Ишнинг мақсади:** Диссертация тадқиқотларининг мақсади меваларни қуритиш жараенини моделлаштириш, оптималлаштириш, асосида тежамкор ва юқори самарадорликка эга бўлган қуритиш қурилмасини ишлаб чиқиш.

**Тадқиқот методи:** Мева ва сабзавотларни қуритиш жараёнини жадаллаштириш учун энергияни ноанъанавий, яъни инфрақизил нурлар ёрдамида узатиш услубини қўллаш асосланган. Илмий тадқиқотларда мураккаб иссиқлик - моддаалмашинув жараёнларини системали таҳлил қилиш услуби қўлланилган. Қуритиш жараёни кинетикасини ўрганиш ва қурилмадаги технологик параметрларни ростлаш режимларини асослашда математик ва компьютерли моделлаштириш қўлланилган. Тадқиқотлар лаборатория, ярим саноат ва саноат қуритиш қурилмаларида олиб борилди. Диссертацияни бажаришда «MATLAB» комплекс дастури қўлланилиб, замонавий компьютерлардан фойдаланилди.

**Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги:** Қуритиш жараёнининг тўла таҳлили, моделлаштириш ва оптималлаштириш масаласини яна бир поғона юқори даражада амалга ошириш имкониятини пайдо қилди. Ваҳоланки, қуритиш жараёнида маҳсулотлардаги намлик, температура ўзгаришлари яхлит ҳисобланган бўлса, эндиликда бу кўрсаткич маҳсулотнинг қатламларидаги ўзгаришларни ҳисобга олиб амалга ошириш мумкин бўлди. Жараён кўрсаткичларини маҳсулот координаталарида тақсимланишини инобатга олиш жараёни янада аниқроқ ҳисоблаш имкониятини беради. Диссертацияда меваларни қайта ишлашда содир бўладиган мураккаб иссиқлик ва моддалмашинув жараёнларини системали таҳлил методологияси асосланган, тадқиқ қилинаётган қуритиш технологик жараёнининг иерархик структураси, математик модели ишлаб чиқилган, ҳамда жараёни кўп босқичли оптималлаштириш масаласи ечилган.

Назарий ва амалий тадқиқотларнинг ишлаб чиқилган методологиясини қўллаш, қуритилаётган маҳсулот қатламларида иссиқлик ва намликнинг тарқалиши ва инфрақизил нурларнинг таъсир қилиши ҳамда унинг фазовий силжиш қонуниятларини таҳлил қилиш имкониятини беради.

Қишлоқ хўжалик хом ашёларига дастлабки ИҚ-ишлов беришда, ИҚ-конвектив, ИҚ- вакуум қуритишда иссиқлик ҳамда намликнинг қатламлараро силжиш қонуниятлари, меваларни терморрадиацион хусусиятлари ўрганилган.

Қишлоқ хўжалик хом ашёларини қуритиш жараёни давомида маҳсулот қатламлари температураси, намлиги ва таркибий хусусиятларининг ўзгариш қонуниятларини таҳлил қилиш имкониятини берувчи математик модель ишлаб чиқилди. .

**Амалий аҳамияти:** Олиб борилган назарий ва амалий тадқиқотлар асосида қуритиш қурилмаларининг самарадорлиги ошишини таъминловчи ҳамда иқтисодиётнинг долзарб илмий-техник муаммоларини ҳал қилишнинг янги ечими олинди.

Муаммонинг тавсия қилинаётган ечими қишлоқ хўжалик хом ашёларини юқори самарадорликка эга бўлган қуритиш технологияларини автоматик лойихалашнинг илмий базасини яратишга қаратилган. Мева ва сабзавотларни ИҚ-конвектив қуритишнинг оптимал режимлари аниқланган. Жараёни жадаллаштириш мақсадида маҳсулотга ИҚ-нурлар билан дастлабки ишлов бериш ҳамда ИҚ-конвектив ва ИҚ-вакуум усулида қуритиш жараёни тавсия қилинди. Дастлабки ишлов беришнинг импульсли режими асосланилди.

Қуритиш қурилмаси ва уни энергия билан таъминлаш системасининг муҳандислик ҳисоблаш услуги ишлаб чиқилган.

**Тадбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги:** Назарий ва амалий тадқиқотлар натижалари асосида ИК-конвектив усулда ишловчи саноат қуритиш қурилмаси ишлаб чиқилиб 2001-2002 йилларда Қашқадарё вилоят Шахрисабз шаҳридаги ҳиссадорлик жамиятида тадбиқ қилинди. Бухоро вилоятидаги «Табиат саҳовати» ҳиссадорлик жамиятида ИҚ-вакуум услубда ишловчи қуритиш қурилмаси синовдан ўтказилди. Бажарилган илмий-тадқиқотлар натижаларини ишлаб чиқаришга жорий қилишдан олинган иқтисодий самара, иш унумдорлиги хом ашё буйича 1,5 – 2 тонна бўлган битта қурилма учун бир йилда 14,3 млн.сўмни ташкил қилади. Республика бўйича қутиладиган бир йиллик иқтисодий самара 140 млн.сум.

Олинган натижалар ва ишлаб чиқилган тажриба қуритиш қурилмалари Бух ОО ва ЕСТИ ҳамда Тош КТИ да олиб борилаётган илмий тадқиқот ишларда, бакалавр ҳамда магистрлар тайёрлашнинг ўқув жараёнида қўлланилмоқда.

**Қулланиш соҳаси:** Илмий тадқиқот натижалари озиқ-овқат саноатида, жумладан қишлоқ хўжалик хом ашёларини қайта ишлаш ва консервация тармоқларида қўлланилади.

## RESUME

**Teses of KH.F.Dzhuraeva to subjects: “Drying of fruits of agricultural cultures: modeling, optimization, development of high effective devices” on the academic degree doctor of the technical science, speciality 05.18.12 – “Processes, machines and aggregates of food industry”**

**Key words:** process, heat and mass exchange, diffusion, system, analysis, hierarchical structure, drying, convection, thermo radiation, heat conductivity, heat output, surface, evaporation, infrared - rays, desorbtion, capacity, absorptive - ability, reflectance, balanced moisture, kinetics, enthalpy, vacuum, agricultural raw material, device, installation, poly stepped optimization, density of the heat flow, heat transmission, moisture content, model, layer, reflector, preprocessing, regularity, expenses, effect, mixing the heat.

**Subjects of the investigation:** As objects of the study are take different types of the agricultural products. In particular: apricot, peach; the melon; the onion and etc.

**Aim of investigation:** Purpose of dissertation work is a modeling and optimization of the technological processes of the drying of fruit of agricultural cultures and working out on this base high effective energy saving installation and device.

**Method of investigation:** For aims of intensification of processes of the drying of fruit and vegetables is motivated prospects and practicability of the use of untraditional ways of supply of energy radiation in infrared range. To the execution of the work are attracted methodology of the system analysis of complex heat - and mass exchange processes. At study of the kinetics of the drying and motivation of mode regulations of technological parameters of dry installations methods of mathematical and computer modeling and multy levelled optimization are used. The experimental studies were run for laboratory, semi industrial and industrial dry installation. In process of the execution of dissertation work personal computers (Pentium-IV) and programmer complex MATLAB are broadly used.

**The achieved results and their novelty:** In thesis it is designed methodology of modelling and calculation of the process of the drying on base of the determination of the distribution parameter on as layer of drying material unlike usual calculation, where process of the drying is produced by determinations of average importance's of moisture and temperature of the product. Thereby, analysis and syntheses of the process of the drying the products is realized on one level deeper. In work it is motivated methodology of the multistage system analysis of complex heat mass exchange processes of the conversion of the fruit crops by way to decompositions of the system of the dry unit on functional subsystems and etc. The methodology of computer modelling of the process of the drying is designed, which allows to define the regularities of running of processes of the displacement of moisture and heats as on layer of drying material, so and at

time. The methodology to layered optimization of the process of the drying of the fruit crops is designed. It has allowed to define the optimum processes for event IK- pre-processing and IK-convective drying of the fruit crops and develop the high effective drying devices.

**Practical value:** On base of executed complex of theoretical and experimental studies a new decision of the actual research problem, having important economic importance and concluding in essential increasing of efficiency of the dry installation is received. The offered decision of the problem is called to create the scientific base for computer aided design of high effective technologies of the drying of agricultural products and its apparatus of the registration.

The optimum modes of the process of infra red convective of the drying of fruit and vegetables is revealed.

Method of infra red convective and vacuum drying with preliminary infra red processing of the products is offered. Impulses mode of infra red preprocessing materials vegetable origin is motivated.

Method of the engineering calculation of the dry installation and systems of energy transmission is worked out.

**Degree of introduction and economical effectiveness:** On base of results of theoretical and experimental studies experienced-industrial of infra red convective dry installation, introduced in Joint-stock company "Opptorg" of SHahrisabzs region of Kashka-Daya viloyat (2001-2002) is designed. Test of infra red vacuum dryer in Joint-stock company "Tabiat sahovati" of Bukhara is held. The Total economic effect from introducing the installation with capacity 1,5 - 2 ton. on raw material, as well as the realization of one developments and recommendations of dissertation work forms 14,3 million sums a year. Expected economic effect on Republic forms beside 140 million sums.

The Results of theoretical and experimental studies, as well as designed (infra red convective and vacuum) drying installation are used in research works and in educational process Bukhara technological institute of food and industry and Tashkent chemical technological institute in preparing bachelors and masters.

**Sphere of usage:**

The Results of the scientific studies are applying in food industry, in particular in tin and processing branches of production.

Соискатель:

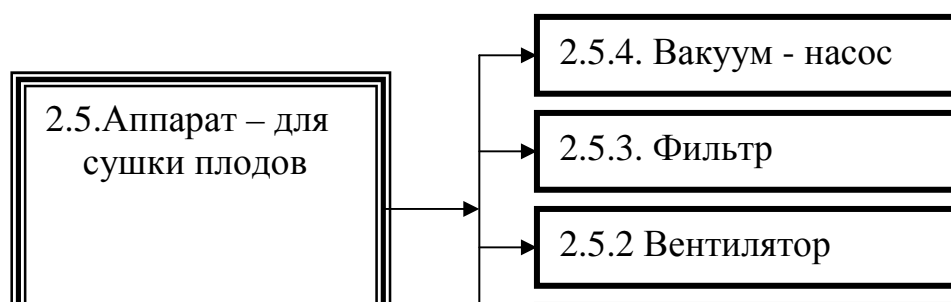

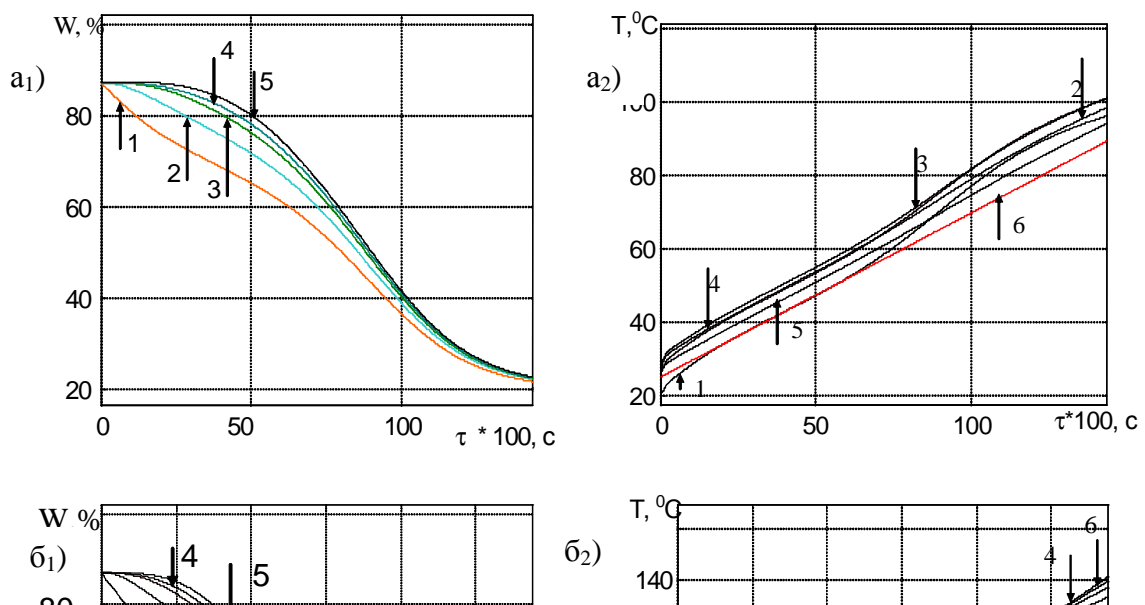




Рис.П.1. Иерархическая структура процесса сушки плодов.



в<sub>1</sub>)

Рис. П.2. Изменение влаги ( $a_1, b_1, v_1$ ) и температуры ( $a_2, b_2, v_2$ ) плода сорта дыни «Кампир-чапан» при различных условиях (цифры у кривых показывают слой материала).  $W_k = 86,4\%$ ,  $W_k=22\%$ :

- $a_1, a_2$  – при  $q=2500$  Вт,  $\delta=8$  мм,  $\tau=300$  мин (5 ч.);
- $b_1, b_2$  – при  $q=2500$  Вт,  $\delta=6$  мм,  $\tau=240$  мин (4 ч.);
- $v_1, v_2$  – при  $q=2500$  Вт,  $\delta=4$  мм,  $\tau=220$  мин (3,4ч.);

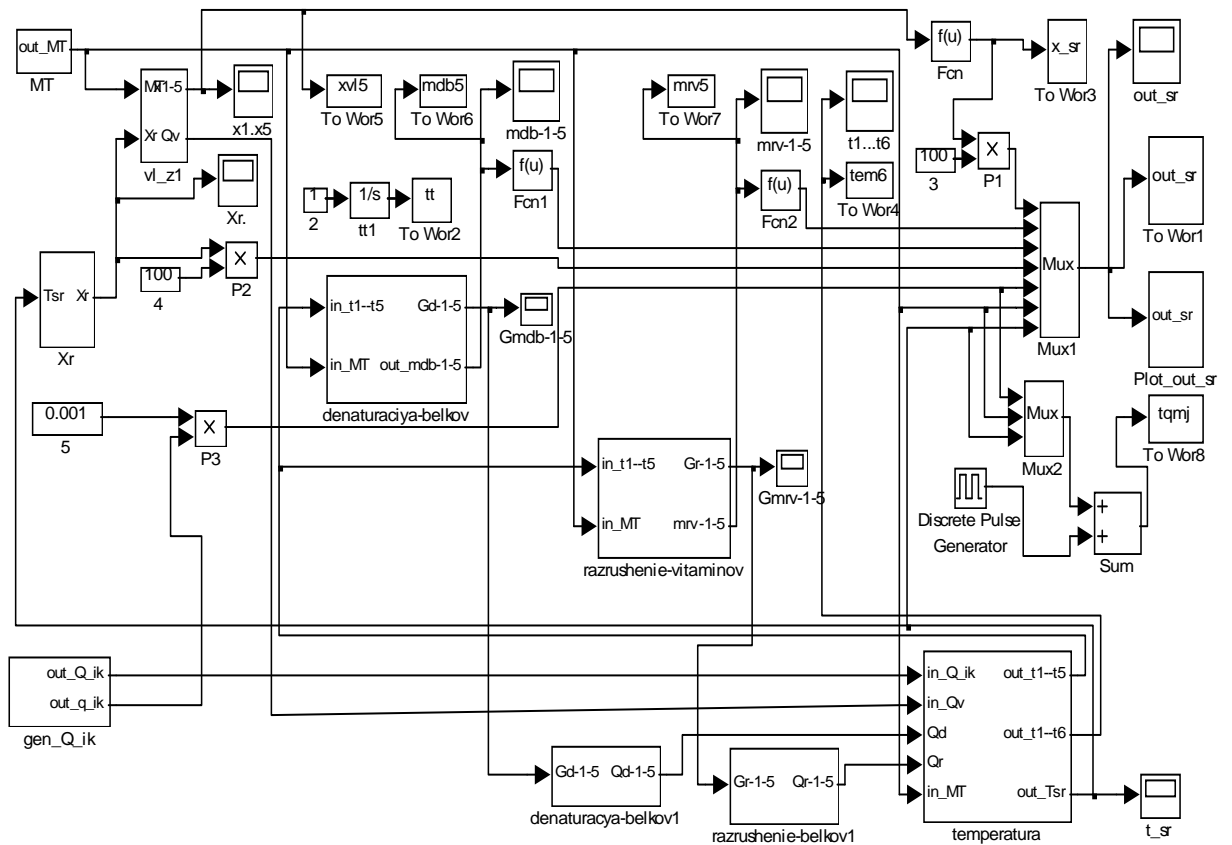


Рис. П.3. Обобщенная компьютерная модель процесса сушки плодов.

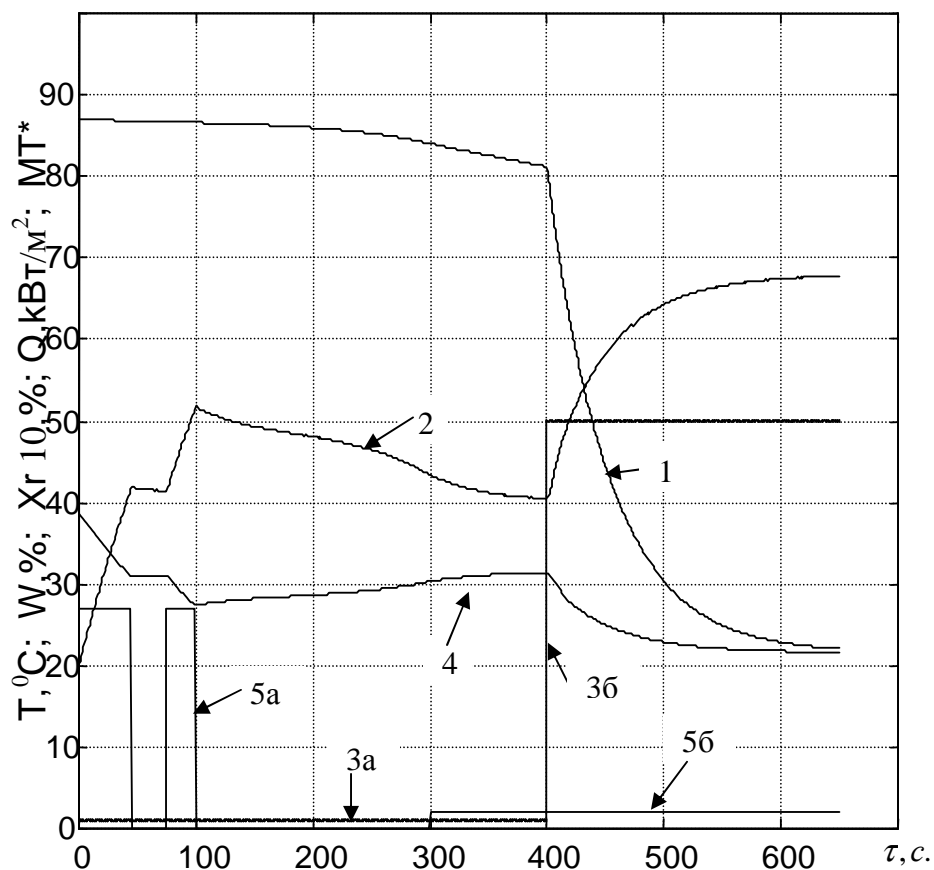


Рис. П.4. График изменения плотности теплового потока и масштаба времени в зоне предварительной (импульсной) обработки (5а,3а), сушки (5б,3б) и кривая сушки (1), температура (2), равновесная влажность (4) по средним значениям в зависимости от времени сушки и от влияющих факторов ( $q=2000\text{Вт}/\text{м}^2$ ,  $\delta=10\text{мм}$ ) (для плода дыни сорта – «Хмырваки»  $W_{н=87\%}$ ).

MT\*-масштаб

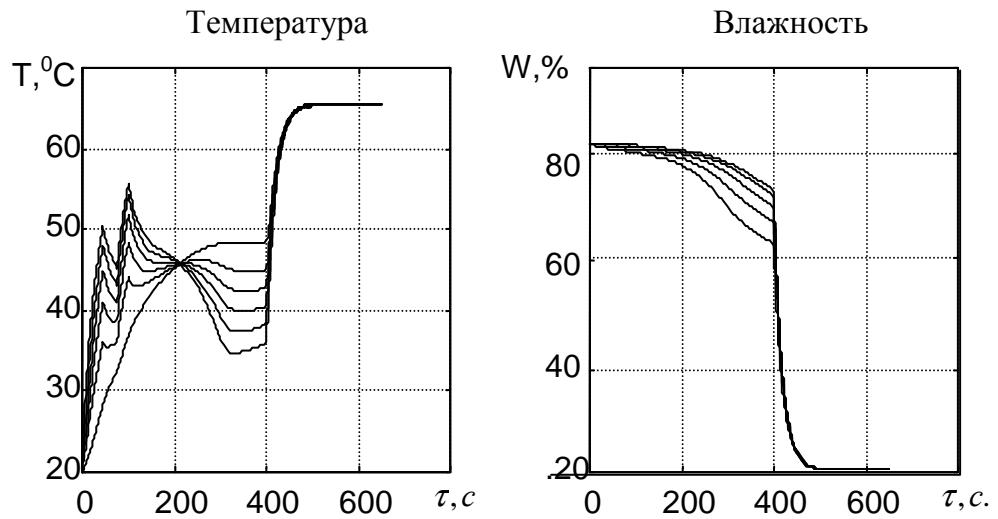
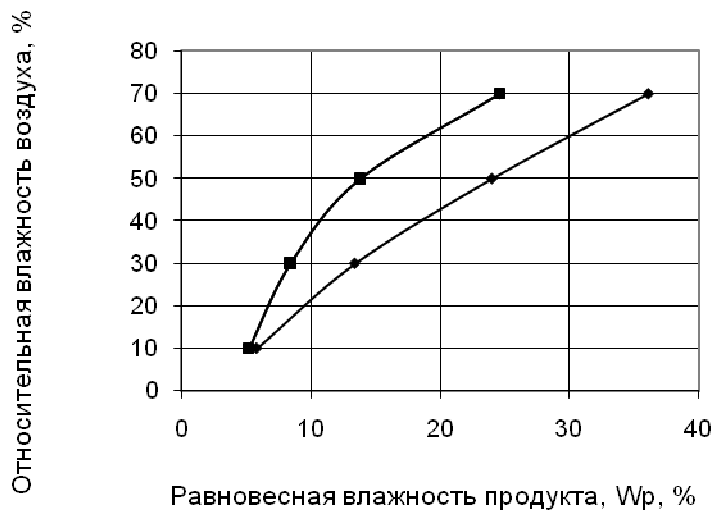
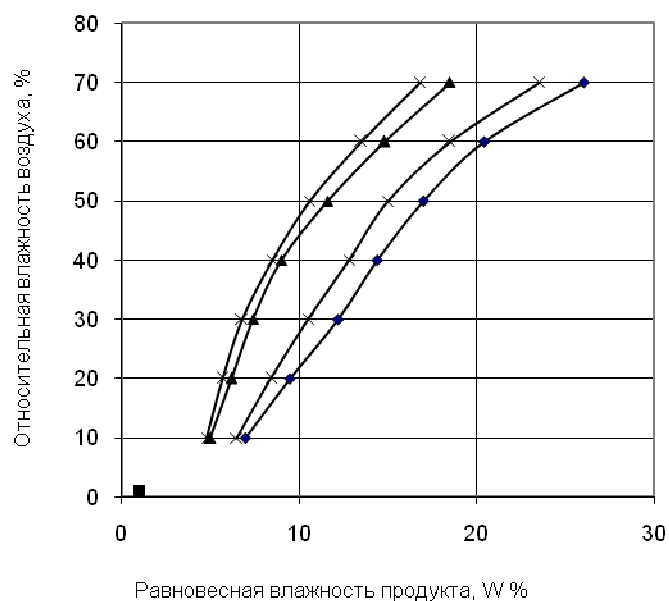


Рис.П.5. График изменения температуры и влажности в слоях продукта в зависимости от времени сушки при различных влияющих факторов ( $q=800\text{Вт/м}^2$ ,  $\delta=4\text{мм}$ ), (плода абрикоса сорта – «Исфарак»  $W_H=81\%$ )



а)



б)

Рис.П.6. Изотермы десорбции плодов дыни (а) и абрикоса (б) в зависимости от способа обработки:

- а) 1. Продукт, обработанный ИК-лучами и предварительно выдержанный в сахарном сиропе;
2. Продукт, обработанный ИК-лучами;
- б) 1,2 при  $t=25^{\circ}\text{C}$ , 3,4 при  $t=60^{\circ}\text{C}$ . 1,3- не обработанный;
- 2,4 – предварительно обработанный под ИК- воздействием

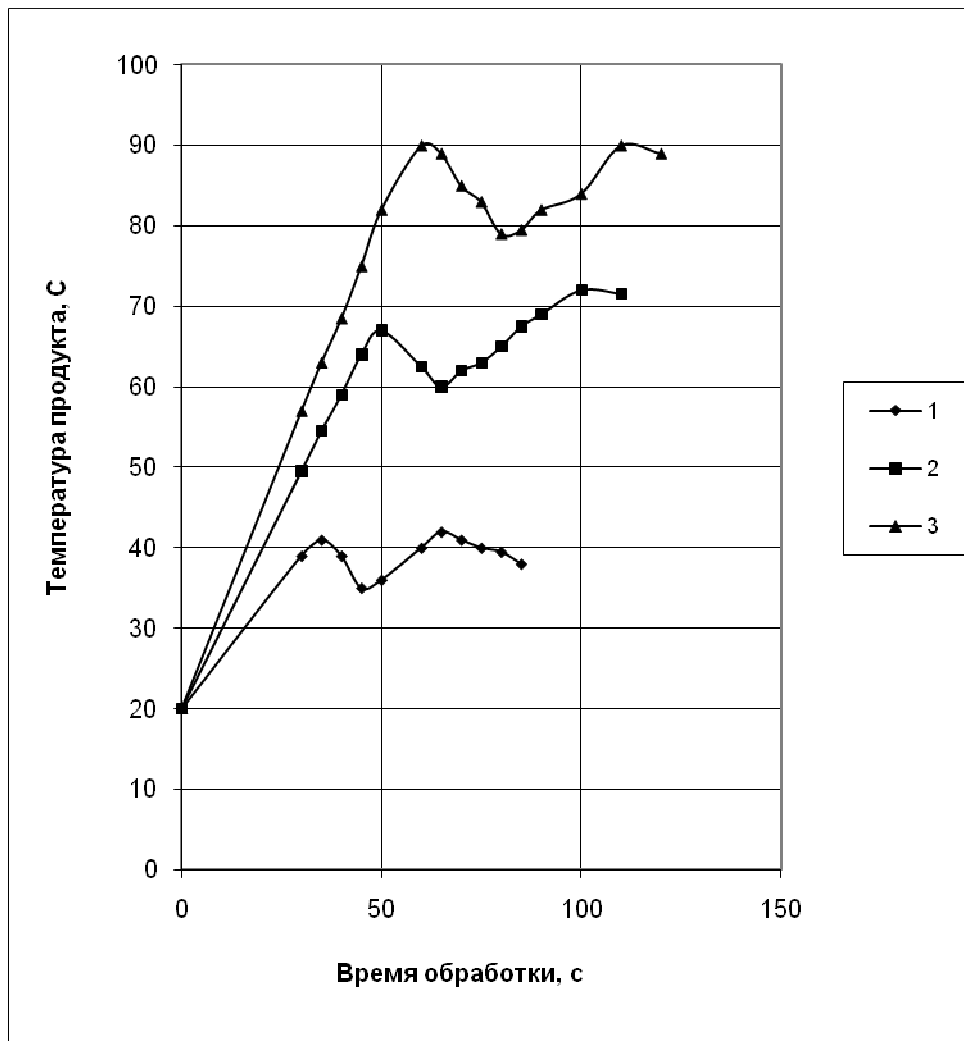


Рис. П.7. Изменение температуры плода абрикоса при различных режимах ИК- облучения:  
 1)  $\tau_1 = +30 - 20 + 25$ ; 2)  $\tau_2 = +45 - 20 + 25$ ; 3)  $\tau_3 = +60 - 20 + 25$

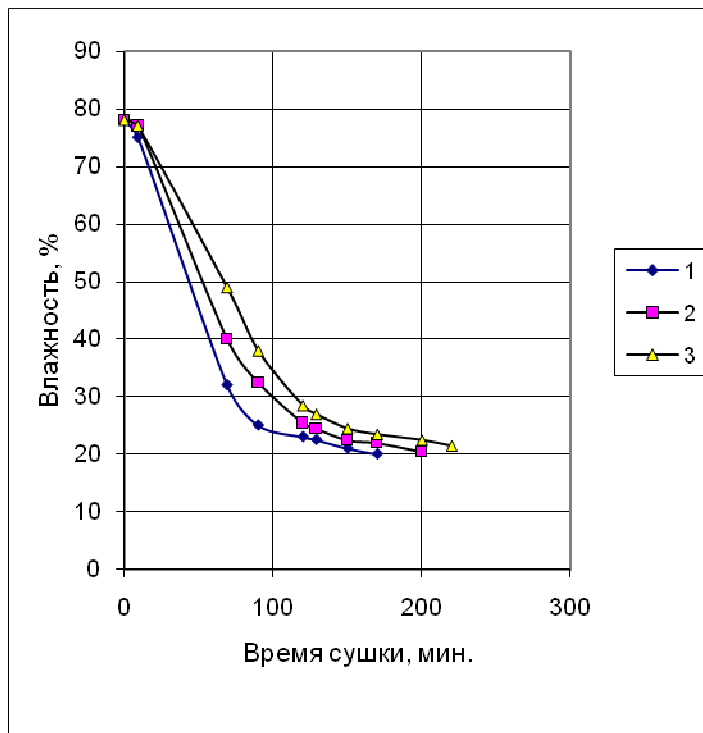


Рис. П.8. Кривые сушки плодов абрикоса при различных удельных нагрузках:

1)  $\sigma = 8 \div 10 \text{ кг} / \text{м}^2$ , 2)  $\sigma = 12 \text{ кг} / \text{м}^2$ , 3)  $\sigma = 14 \text{ кг} / \text{м}^2$ ;  
 $q = 1,25 \text{ кВт} / \text{м}^2$ .

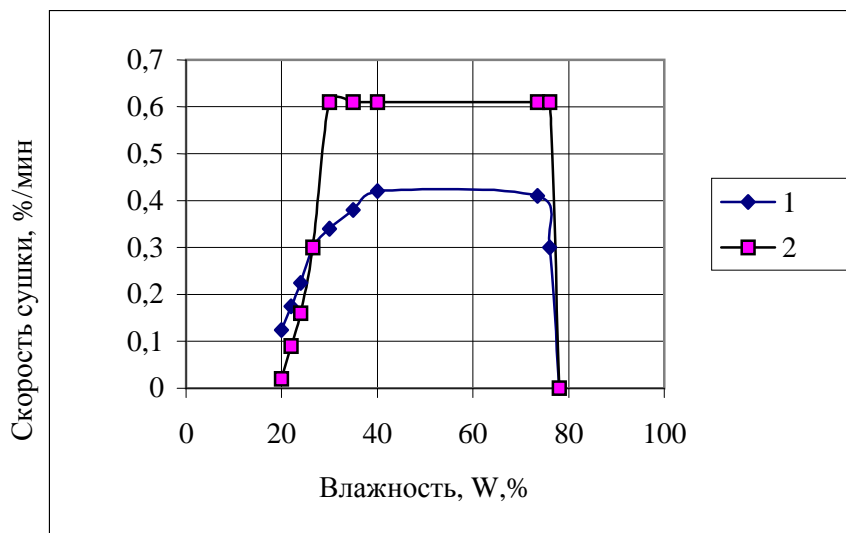


Рис П.9. Кривая скорости сушки плодов абрикоса:

1)  $\sigma = 14 \text{ кг} / \text{м}^2$ ; 2)  $\sigma = 8 \div 10 \text{ кг} / \text{м}^2$ ,  
 $q = 1,25 \text{ кВт} / \text{м}^2$ .

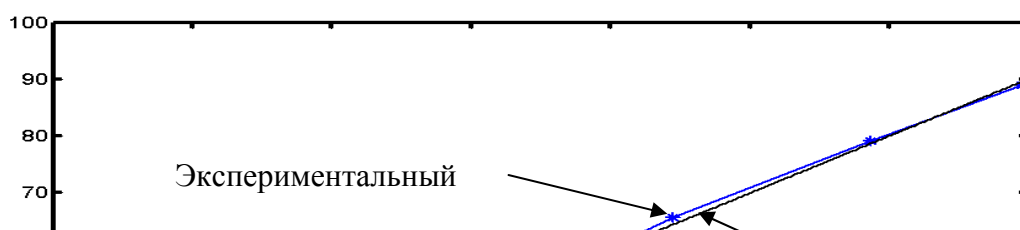




Рис.П.10. Сравнительные результаты экспериментов с расчетными данными, полученными на математической модели процесса сушки плодов сельскохозяйственных культур

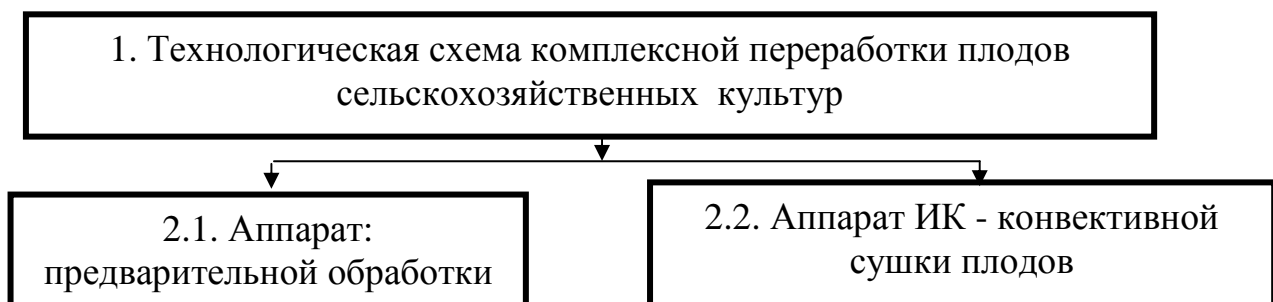


Рис П.11. Стратегия последовательной оптимизации  
процесса сушки плодов.

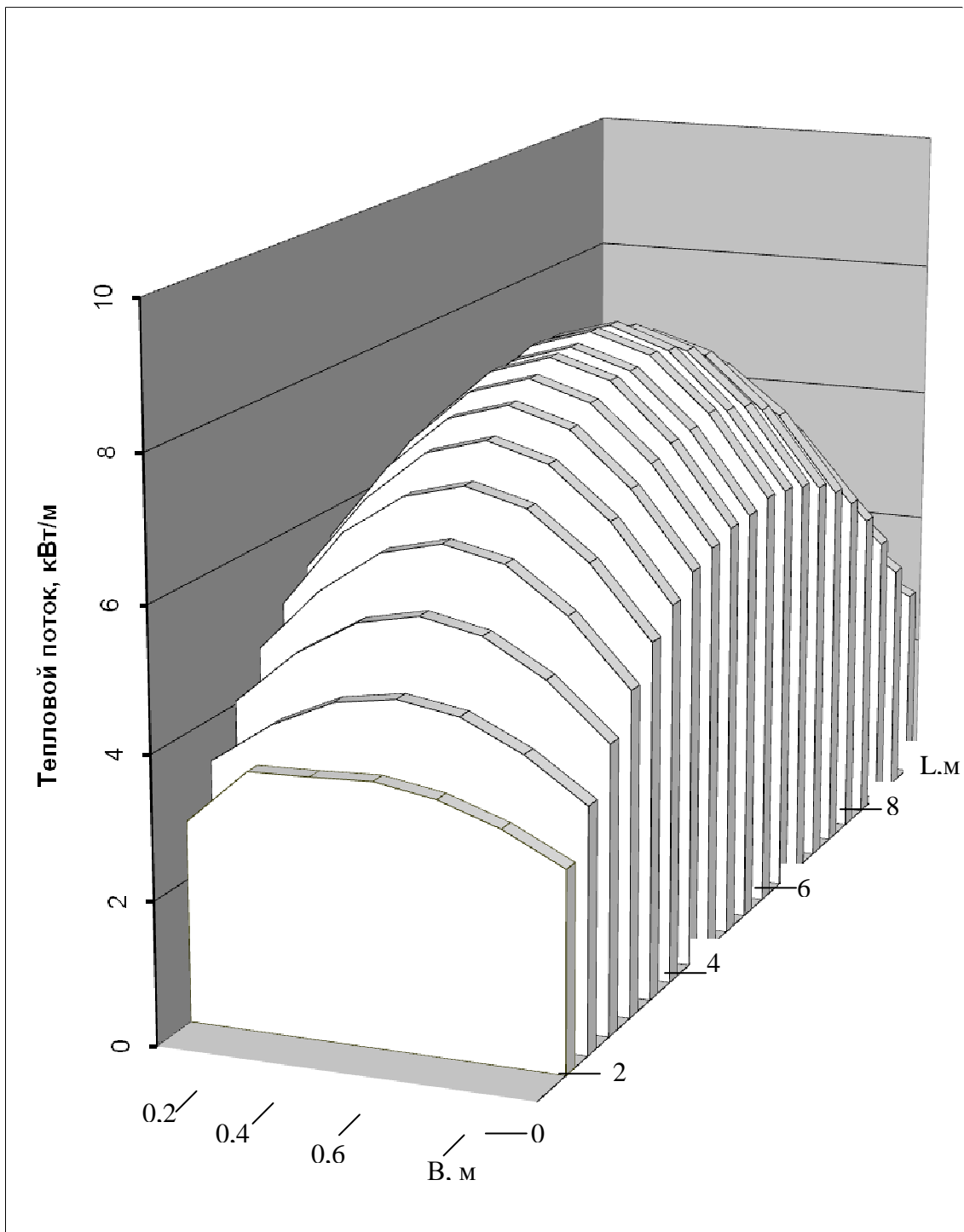


Рис.П.12. Распределение плотности лучистого потока на поверхности высушиваемого материала при расположении излучателей с одинаковым шагом ( $B$ - ширина конвейера;  $L$ - длина конвейера).

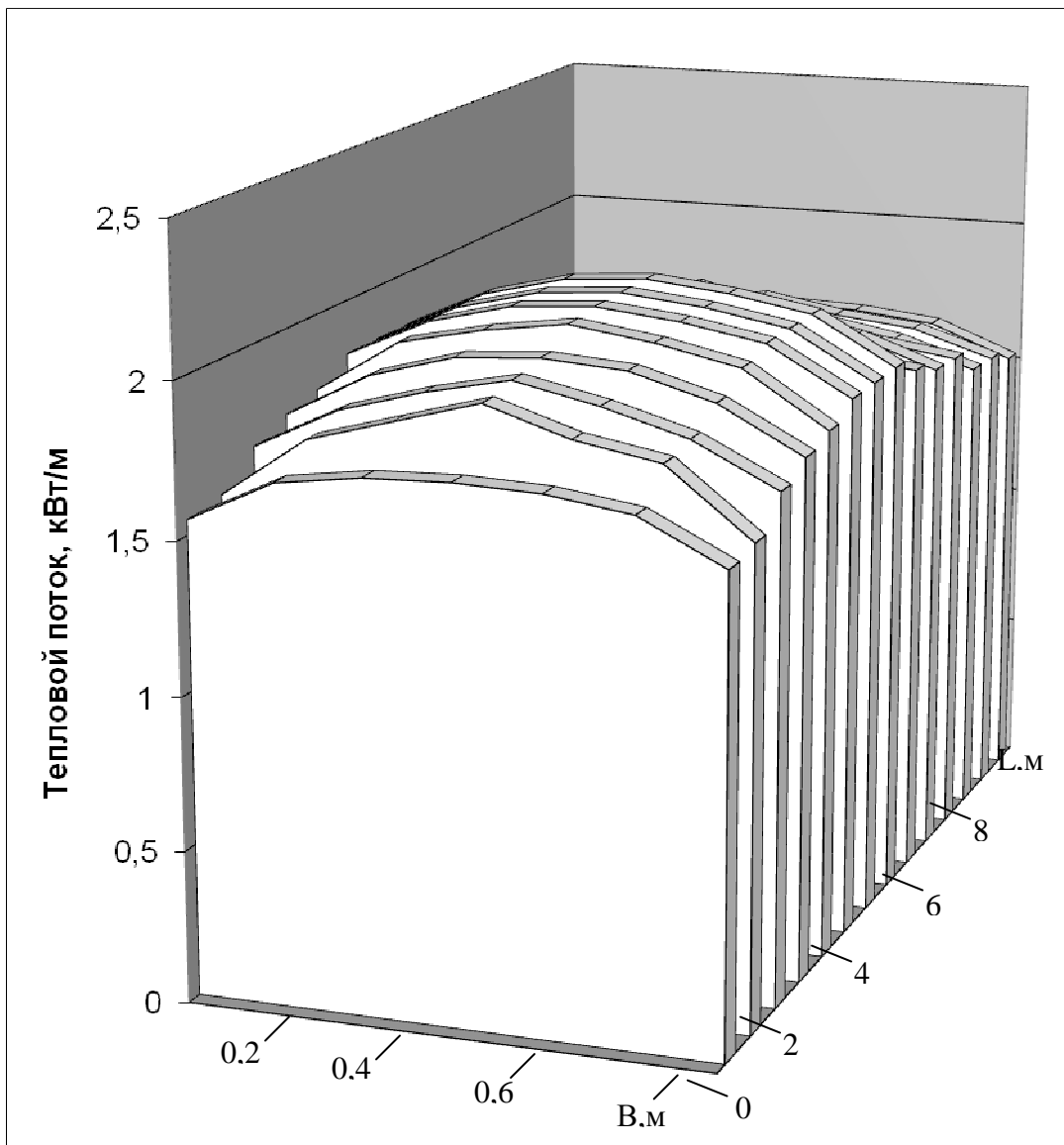
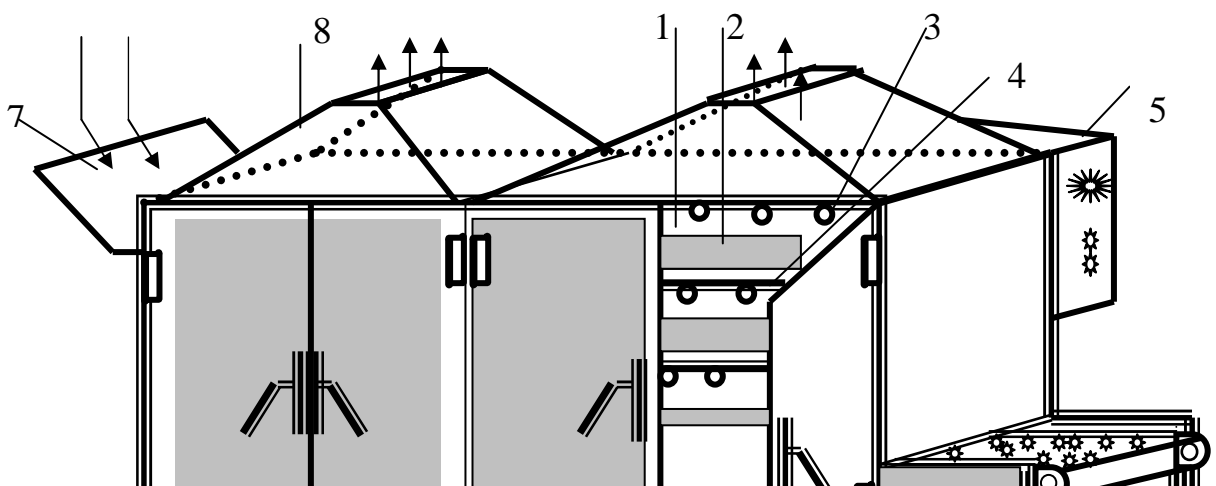


Рис.П.13. Распределение плотности лучистого потока на поверхности высушиваемого материала при расположении излучателей с переменным шагом (*B*- ширина конвейера; *L*-длина конвейера).



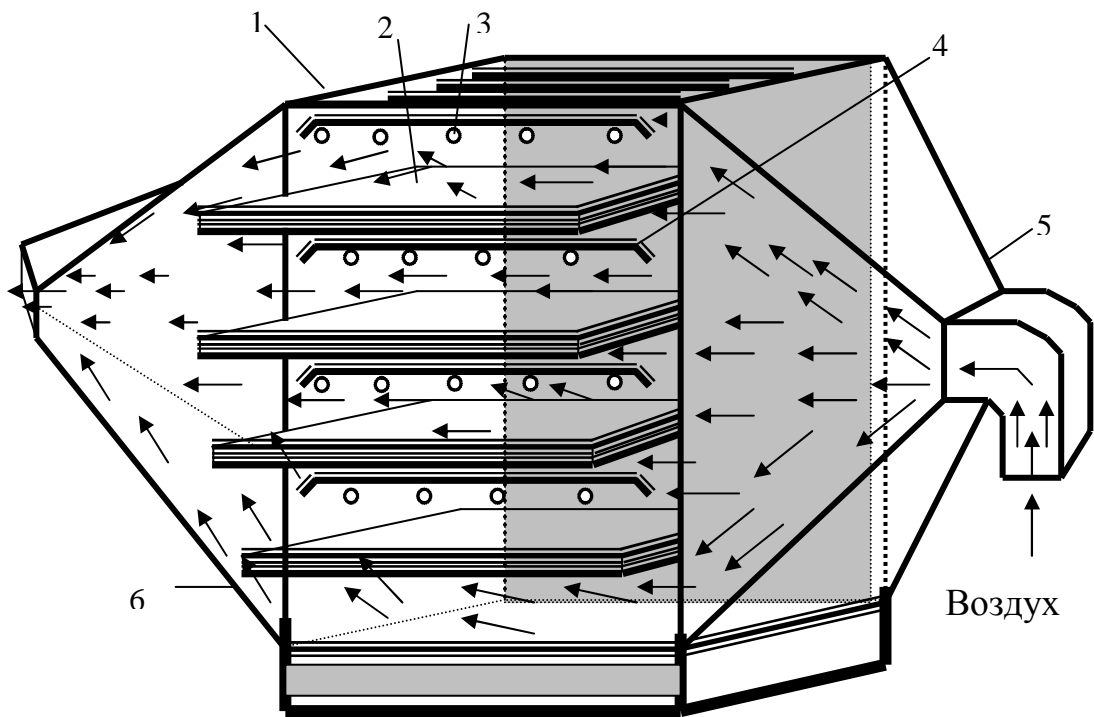


Рис.П.15. ИК- конвективная сушильная установка периодического действия) 1-камера; 2-под; 3-ИК-ламп; 4-рефлектор; 5,6-коммуникация