

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

БУХАРСКИЙ ИНЖЕНЕРНО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

УДК 664.047

Юлдашев Буранжан Насуллаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ТЫКВЫ ПОД
ВОЗДЕЙСТВИЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ**

Специальность:– 5А320311 Машины и агрегаты пищевых производств

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени магистра

Бухара - 2013

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

БУХАРСКИЙ ИНЖЕНЕРНО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет	Магистратура
Студент	Б.Н.Юлдашев
Кафедра	«СТ и АТП»
Научный руководитель	Х.Ф.Джураев
Учебный год	2012-2013
Специальность	5А 320311 Машины и агрегаты пищевой промышленности

АННОТАЦИЯ НА МАГИСТРСКУЮ ДИССЕРТАЦИЮ

Актуальность темы. Традиционные способы сушки чрезвычайно энергоемки и крайне не эффективны. Сушка, с использованием стандартных сушилок при высоком энергопотреблении, протекает продолжительное время и зачастую приводит к высокому проценту брака за счет перегрева или неравномерного высушивания

Решение же проблемы снижения потерь, улучшения качества получаемых продуктов требует разработки и внедрения новых высокоэффективных установок и технологий с оптимальным техническим воплощением.

Учитывая все эти обстоятельства, предлагаем нетрадиционные методы сушки овощей, которые включают в себя акустотермическое воздействие влажного материала. Повышение энергетической эффективности процесса производства сухопродуктов, а именно в процессе сушки и сохранение важнейших физиологических активных веществ-витаминов, углеводов и минералов может быть успешно решена, путём применения импульсно - акустического воздействия на высушиваемый продукт, позволяющих создавать рациональные схемы использования энергии, утилизировать вторичные энергоресурсы, применять нетрадиционные возобновляемые источники энергии.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является интенсификации процесса сушки тыквы с применением акустического воздействия на основе анализа закономерности перемещения частоты акустических колебаний во внутрь высушиваемого материала.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- критический анализ теории и практики сушки овощей;
- исследование физико-химических свойств и массообменных характеристик высушиваемого материала;

- разработка методики расчета интенсивности процесса инфракрасно-конвективной -ультразвуковой сушки с учетом переменности параметров сушильного агента;

- проведение комплексных исследований и установление закономерностей процесса перемещения тепла и влаги по слоям высушиваемого материала под воздействием акустического поля.

Объект и предмет исследования. Сельскохозяйственное сырье.

Метод и методика исследования. Определение основных параметров теоретическим и экспериментальным путями.

Новизна исследования. Установлены закономерности распространения акустических колебаний по толщине высушиваемого материала. Для равномерного удаления влаги по всему объему высушиваемого материала предложена специальная форма сушильной камеры, который обеспечивает максимальную фокусировку ультразвуковых колебаний на поверхности материала. Для равномерного удаления влаги по всему объему высушиваемого материала предложена специальная форма сушильной камеры которая обеспечивает максимальную фокусировку ультразвуковых колебаний. Изучены изменения температурных полей по толщине высушиваемого материала.

Практическая значимость. В Республике Узбекистан выращивается многомиллионов тонн сельхозпродуктов, в том числе фруктов и овощей. Из

этого числа только 10% продуктов перерабатываются. Поэтому данная тема магистерской диссертации является актуальной на сегодняшний день. Для внедрения в производство новейшей акустической сушильной установки.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводы и рекомендации, приложения, список использованной литературы. Приведены также использованные интернет сайты, близкие к теме диссертации.

Основные результаты диссертации. Разработан проект сушильной установки с малой производительностью. По данным результатам опубликована 1 статья в иностранном журнале, 1 тезис статья в конференции в Республиканском уровне.

Обобщение выводы и рекомендации. На основе экспериментальных данных исследован процесс сушки тыквы в АК поле. Определены оптимальные параметры влияющих факторов.

По результатам исследований, видно что наиболее эффективная сушка осуществляется для тонких слоев (порядка 2-мм). Наряду с уменьшением толщины пограничного слоя, предлагаемый метод сушки обладает еще одним важным преимуществом - колебания проникают в материал и создают в нем быстро сменяющиеся зоны повышенного и пониженного давления, что интенсифицирует процессы переноса влаги из глубинных слоев к поверхности. Скорость сушки по сравнению с известными и используемыми на практике способами выше в 2 – 5 раз. Акустическая сушка позволяет значительно сократить энергетические затраты.

Научный руководитель

Х.Ф.Джураев

Магистр

Б.Н.Юлдашев

Содержание

	Введение	1
1	ЛИТЕРАТУРНО – ОБЗОРНАЯ ЧАСТЬ	
1.1	Анализ процесса сушки продуктов пищевой промышленности.	6
1.2	Анализ инфракрасной сушильной установки.	7
1.3	Анализ сублимационной сушильной установки.	10
1.4	Анализ конвективной сушильной установки.	11
1.5	Анализ кондуктивной сушильной установки	12
1.6	Современное состояние теории и практики сушки сельскохозяйственных продуктов	13
1.7	Применение АК методов подвода энергии в процесс сушки тыквы	22
1.8	Химический состав тыквы и ее использование для сушки	24
1.9	Цель и задачи исследования	26
	Вывод по главе 1	28
2	ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	
2.1	Основы теории сушки тыквы под акустическим воздействием	29
2.2	Теоретическое обоснование акустической сушки.	33
2.3	Преимущества и особенности акустической сушки	40
2.4	Перспективы реализации акустической сушки.	42
	Выводы по главе 2	44
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	
3.1	Описание экспериментальных установок для исследования процесса сушки плодов	45
3.1.1	Применение акустических колебаний для обработки продуктов и материалов	47
3.1.2	Акустические характеристики пищевых продуктов и материалов	48
3.2	Массовлагообменные характеристики сельскохозяйственных продуктов	51
3.3	Исследование инфракрасного и акустического сушильного аппарата для интенсификации процесса сушки сельскохозяйственных продуктов	56
	Выводы по главе 3	62
	Список литературы	63
	Использованные сайты	65
	Опубликованные статьи и тезисы	67

ВВЕДЕНИЕ

Наша независимая Республика Узбекистан процветает! Причина этого процветания это уникальное природно-климатическое условие нашего региона, трудолюбие нашего народа и по этапный переход к рыночной экономики.

Один из основных требований рыночной экономики это модернизация производства экспортоспособной продукции и снижение себестоимости готового продукта. Чтобы всё это осуществит, у специалистов требуется знания высшего уровня.

По объему производства плодоовощной продукции, фруктов и винограда Республика Узбекистан занимает ведущее место среди стран СНГ. Природно-климатические условия нашей Республике позволяют получить в течении года несколько урожаев многих видов овощей и других культур.

В настоящее время в нашей Республике производится около 5 млн. тонн плодоовощной продукции. Однако достигнутый уровень урожайности садоводства и объем производства плодов не в полной мере отвечает требованиям экономических преобразований, проводимых в республике.

Дальнейшие меры, принятые правительством под руководством Президента Республики Узбекистан И.А.Каримова от 20 октября 2008 года выведут уровень производства и переработки сельскохозяйственного сырья на новый более высокий этап развития. Указ Президента Республики Узбекистан «О мерах по оптимизации посевных площадей и увеличению производства продовольственных культур», где говорится о расширении посевов на богарных землях масличных, кормовых и бахчевых культур.

На пример в течении 9 месяцев текущего года произведено 4 871,5 тысячи тонн овощей (111% соответствующему периоду прошлого года), 1 370,4 тысячи тонн картофеля (110,6%), 933,4 тысячи тонн бахчевых (109%), 1 256,5 тысячи тонн плодов (110,3%), 723,2 тысячи тонн винограда (112%).

В комментарии к указу №УП-4041 говорится, что «Весьма показательным считается тот факт, что мировые цены на зерно по сравнению с 2006 годом выросли в два раза, а на овощи более чем в двое. В этих условиях становится всё более актуальнее задача стабильного и надёжного насыщения внутреннего потребительского рынка отечественными продовольственными товарами, увеличения объёмов их производства, расширение ассортимента и повышения качества». Далее говорится: «У нас сегодня имеются все основания, с учётом уникальных возможностей, которыми располагает Республика по выращиванию отличающихся высоким качеством редких по вкусу сортов овощей, винограда и дынь, обеспечить существенный рост экспорта этих культур и продуктов их переработки. Для этого у нас в стране имеются все необходимые условия и возможности».

Экономическое развитие страны, определяется такими направлениями, как создание высокотехнологических, энергосберегающих установок и технологии с оптимальным техническим воплощением.

Известно что плоды садовых и бахчевых культур, а так же продукты их переработки, пользуются устойчивым спросом как во внутреннем, так и во внешнем рынках. Согласно физиологической норме питания один человек ежедневно должен употреблять 7,5-8г сухопродуктов.

Улучшение продовольственного обеспечения основывается на интенсификацию производства, способствующих сбережению энергетических ресурсов, снижения потерь сырья, улучшения качества получаемых продуктов, которые требует разработки и внедрения новых высокоэффективных установок, совершенствование переработки в том числе и сельскохозяйственного сырья. Повышение эффективности отраслей сельского хозяйства взаимосвязан: с переработкой, хранением и транспортировкой продуктов питания. Поэтому одной из основных принципов экономического развития является переработка и хранения сельскохозяйственных продуктов.

Одним из основных способов переработки продуктов является сушка, которая относится к энергоемким процессам. Анализ показывает, что существующие сушильные установки - весьма дорогостоящи, энергоемки и иногда малоэффективны для осуществления процесса сушки овощей и фруктов, являющихся незаменимым источником важнейших физиологически активных веществ - витаминов, углеводов и минералов, необходимых для нормальной жизнедеятельности организма человека.

Процесс сушки, заключающийся в удалении влаги из материала, с одной стороны, является одним из ключевых этапов различных технологических процессов, с другой стороны, одной из самых затратных стадий обработки материала. Качество и скорость реализации процесса сушки в значительной степени определяют качество и себестоимость конечного продукта.

Традиционные способы сушки чрезвычайно энергоемки и крайне неэффективны. Сушка, с использованием стандартных сушилок при высоком энергопотреблении, протекает продолжительное время и зачастую приводит к высокому проценту брака за счет перегрева или неравномерного высушивания

Решение же проблемы снижения потерь, улучшения качества получаемых продуктов требует разработки и внедрения новых высокоэффективных установок и технологий с оптимальным техническим воплощением.

Учитывая все эти обстоятельства, предлагаем нетрадиционные методы сушки овощей, который включает в себя акустотермической воздействию влажного материала. Повышение энергетической эффективности процесса производства сухопродуктов а именно в процессе сушки и сохранение важнейших физиологических активных веществ - витаминов, углеводов и минералов может быть успешно решена, путём применения импульсно - акустического воздействия на высушиваемый продукт, позволяющих создавать рациональные схемы использования

энергии, утилизировать вторичные энергоресурсы, применять нетрадиционные возобновляемые источники энергии.

Преимуществом акустотермического метода, обработки воздействием акустических колебаний является сокращение времени сушки и повышения производительности аппарата, снижение энергетических затрат и себестоимости готового продукта, улучшение качественных показателей и увеличение выхода высушенных продуктов и срока хранения готового продукта, за счет обеспечения низкотемпературного режима сушки.

Акустотермическая обработка является специфической разновидностью процесса сушки, используемого при реализации многих технологических процессов в промышленности, сельском хозяйстве и строительстве. Кроме того, обработка материала под воздействием ультразвуковых волн высокой интенсивности благоприятно сказывается на физико-химических и потребительских свойствах высушиваемого материала.

Преимущество акустического метода сушки материала заключается:
-удаление влаги происходит практически без нагревания материала;
-скорость сушки, по сравнению с известными и используемыми на практике способами сушки, выше в 2-2,5 раза; -акустическая сушка позволяет значительного сокращения энергетических затрат за счет ускорения время сушки до требуемой влажности.

Разработка оптимальных режимных параметров акустотермического метода сушки с импульсно – акустической обработкой влажного материала, позволяющей существенно сократить продолжительности процесса, снижения энергозатраты и повышения качество готового продукта, имеет важное значения для промышленного производства сухопродуктов.

Все это свидетельствует об актуальности задачи повышения эффективности процесса сушки овощей, основанного на применении прогрессивных методов энергоподвода с использованием последних достижений в области производства сухопродуктов. Решения этой задачи и посвящена настоящая диссертационная работа.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводы и рекомендации, приложения, список используемой литературы.

Цель магистерской диссертации. Цель диссертационной работы является интенсификации процесса сушки тыквы с применением акустическим воздействием на основе анализа закономерности перемещения частоты акустических колебаний во внутри высушиваемого материала.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- критический анализ теории и практики сушки овощей
- исследование физико-химических свойств и массообменных характеристик высушиваемого материала

- разработка методики расчета интенсивности процесса инфракрасно-конвективной -ультразвуковой сушки с учетом переменности параметров сушильного агента;

- проведение комплексных исследований и установление закономерностей процесса перемещения тепла и влаги по слоям высушиваемого материала под воздействием акустическом поле.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- установлены закономерности распространения акустических колебаний по толщине высушиваемого материала;

- для равномерного удаления влаги по всему объему высушиваемого материала предложена специальная форма сушильной камеры, который обеспечивает максимальная фокусировка ультразвуковых колебаний на поверхности материала;

- для равномерного удаления влаги по всему объему высушиваемого материала предложена специальная форма сушильной камеры который обеспечивает максимальна фокусировка ультразвуковых колебаний.

- изучено изменения температурных полей по толщине высушиваемого материала.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНО – ОБЗОРНАЯ ЧАСТЬ

1.1. Анализ процесса сушки продуктов пищевой промышленности.

Область применения сушильного оборудования в пищевой промышленности весьма обширна. На пример оборудование для сушки плодов и овощей, оборудование для сушки фруктов, зелени, грибов, ягод, дрожжей, зерна, круп, макарон и других продуктов пищевой промышленности.

В настоящее время для сушки таких продуктов, как овощи и фрукты, сушеная мясная и рыбная продукция применяется несколько различные (комбинированные или совмещенные) методы. Самыми распространенными являются следующие виды сушки продуктов:

-конвективная сушка продуктов;

-кондуктивная сушка продуктов;

-радиационная (инфракрасная и микроволновая)

-сублимационная сушка продуктов;

-акустическая сушка продуктов.

Инфракрасная сушка продуктов - современная экологически чистая технология сушки основана на использовании свойств инфракрасного излучения, безопасного для человеческого организма и окружающей среды. Высокая плотность инфракрасного излучения уничтожает вредную микрофлору в подвергающемся сушке продукте, благодаря чему сухопродукт сохраняется в течение длительного времени, без ухудшения потребительских свойств. Инфракрасная сушка продуктов с использованием инфракрасного излучения дает возможность осуществлять сушку в больших объемах и с высокой скоростью.

Микроволновая сушка продуктов - сушка таким методом позволяет решать актуальные задачи многих производств - сушить фрукты и овощи, зерно, лекарственные травы и др. продуктов. Кроме этого микроволновая технология позволяет повышать качество и получить пищевые красители,

размораживать мясо, рыбу, овощи, ягоды и другие продукты питания, проводить бестемпературное консервирование, сушку рыбы, мяса и всех уже перечислявшихся продуктов, а также многое другое.

Сублимационная сушка продуктов - основана на заморозке продукта и помещении его в вакуум. При этом происходит испарение льда, т.е. вода переходит из твердой фазы в газообразную, минуя жидкую фазу. Сублимационная сушка продуктов хорошо подходит для производства небольшого количества высококачественной продукции, если имеется возможность понести большие начальные затраты.

Конвективная сушка продуктов - предполагает подвод тепла к поверхности обрабатываемого продукта. Тепло может подводиться, как за счет продувки нагретым воздухом, так и за счет теплового излучения. В процессе конвективной сушки тепло от поверхностных слоев передается в глубь за счет теплопроводности продукта.

Кондуктивная сушка продуктов - основана на передаче тепловой энергии подвергаемому сушке продукту путем непосредственного контакта с нагреваемой поверхностью.

1.2. Анализ инфракрасной сушильной установки.

Наиболее актуальным и перспективным в промышленном применении в данный момент является сушильное оборудование осуществляющее сушку продуктов питания с применением инфракрасного излучения. Инфракрасное излучение твердых тел обусловлено возбуждением молекул и атомов тела вследствие их теплового движения. При поглощении инфракрасного излучения облучаемым телом в нем увеличивается тепловое движение атомов и молекул, что вызывает его нагревание. Перенос энергии происходит от тела с большим потенциалом к телу с меньшим потенциалом. Для пищевых продуктов глубина проникновения инфракрасных лучей достигает 6-12 мм. На эту глубину проникает небольшая часть энергии излучения, но температура слоя, лежащего на расстоянии 6-7 мм от поверхности материала,

растет значительно интенсивнее, чем при нагреве конвективным способом (см. конвективная сушка продуктов). Коротковолновые инфракрасные лучи оказывают более сильное воздействие на пищевые продукты как за счет большой глубины проникновения, так и более эффективного воздействия на молекулярную структуру продуктов.

Инфракрасная сушка продуктов питания, как технологический процесс, основана на том, что инфракрасное излучение определенной длины волны активно поглощается водой, содержащейся в продукте, но не поглощается тканью высушиваемого продукта (и материалами, из которых изготовлено оборудование сушки), поэтому удаление влаги возможно при невысокой температуре (40-60⁰C), что позволяет практически полностью сохранить витамины, биологически активные вещества, естественный цвет, вкус и аромат подвергающихся сушке продуктов.

Возможная область применения инфракрасного оборудования для сушки в пищевой промышленности так же обширна. Инфракрасное оборудование применяется для сушки овощей и фруктов, мясного и рыбного сырья; инфракрасное сушильное оборудование широко применяется для сушки и производства пищевых полуфабрикатов, закусок и готовых блюд, а также продуктов быстрого приготовления. Стоит отметить что широко это оборудование применяется и для сушки непищевых продуктов.

Сушка продуктов инфракрасным излучением по данной технологии позволяет сохранить содержание витаминов и других биологически активных веществ в сухом продукте на уровне 80-90% от исходного сырья. При непродолжительном замачивании (10-20 мин.) обработанный инфракрасными сушильными установками продукт восстанавливает все свои натуральные органолептические, физические и химические свойства и может употребляться в свежем виде или подвергаться любым видам кулинарной обработки. Сушка овощей и фруктов таким способом дает возможность производства разнообразных пищевых концентратов быстрого приготовления: первые, вторые, третьи блюда, закуски, каши, крупы,

овощные и фруктовые порошки, которые используются как компонент сухих смесей детского питания. По сравнению с традиционной сушкой (конвективная, кондуктивная сушка), овощи и фрукты, обработанные инфракрасной сушкой после восстановления обладают вкусовыми качествами, максимально приближенными к свежим. Кроме того, порошки, прошедшие инфракрасную сушку, обладают противовоспалительными, детоксирующими и антиоксидантными свойствами. Инфракрасная сушка дает продукты, не содержащие консервантов и других посторонних веществ, эти продукты не подвергаются воздействию вредных электромагнитных полей и излучений. Само инфракрасное излучение, применяемое в сушильном оборудовании безвредно для окружающей среды и человека.

Инфракрасное сушильное оборудование изготовленное по данной технологии позволяет получать продукт, не критичный к условиям хранения и стойкий к развитию микрофлоры. Благодаря приобретаемым продуктами свойствам значительно вырастают их сроки хранения. Инфракрасные сушильные установки (оборудование для сушки овощей, оборудование для сушки фруктов и др.) дают сухопродукты, которые до года могут храниться без специальной тары (при низкой влажности окружающей среды), при этом потери витаминов составляют 5-15%. В герметичной таре сухопродукт может храниться до двух лет. Сушка продуктов дает их уменьшение в объеме в 3-4 раза, а в массе в 4-8 раз по сравнению с исходным сырьем (в зависимости от его вида).

Однако внимания заслуживают не только свойства получаемых сухопродуктов, но особенности сушильного оборудования, применяемого для сушки пищевых продуктов с помощью инфракрасного излучения и технологических процессов, основанных на этом принципе. С помощью технологии инфракрасной сушки влажных продуктов инфракрасное сушильное оборудование позволяет практически на 100% использовать подведенную к сухопродукту энергию. Поскольку молекулы воды, находящиеся в продукте, поглощают инфракрасные лучи и, возбуждаясь,

нагреваются, то есть, в отличие от всех других видов сушки, энергия подводится непосредственно к воде продукта, чем достигается высокое КПД сушильного оборудования, то при таком подводе тепла нет необходимости значительно повышать температуру подвергающегося сушке продукта, и можно вести процесс сушки при температуре 40-60 градусов. Такая сушка продукта дает два преимущества: во-первых, при таких температурах в сушильных установках максимально сохраняется продукт: не рвутся клетки, не убиваются витамины, не карамелизируется сахар; во-вторых, низкие температуры не греют сушильное оборудование, то есть нет потерь тепла через стенки, вентиляцию. В то же время инфракрасное излучение при температуре 40-60 градусов позволяет уничтожить всю микрофлору на поверхности продукта, делая сухопродукт практически стерильным.

1.3. Анализ сублимационной сушильной установки.

Обезвоживание с помощью сублимации - самый щадящий метод сушки. Лед при низком давлении, минуя жидкую фазу, переходит непосредственно в пар. сублимация происходит ниже тройной точки при остаточном давлении 1 - 0,1 мм. рт. ст. Для лучшего сохранения ароматических веществ плодовоовощную пасту необходимо медленно охладить до точки замораживания и в заключении как можно быстрее довести до температуры от -30 до 40°C. в результате получается продукт с гомогенной структурой, повышенной пористостью поверхности и более высокой проницаемостью.

Обезвоживание быстрозамороженных соков с помощью сублимации - самый щадящий метод сушки. Лёд при низком давлении, минуя жидкую фазу, переходит непосредственно в пар. Сублимация происходит ниже тройной точки при остаточном давлении 1-0,1 мм рт.ст.

Для лучшего сохранения ароматических веществ соки необходимо вначале концентрировать щадящим методом, затем при постоянном помешивании медленно охладить до точки замораживания и в заключение как можно быстрее довести до температуры от - 30 до - 40 °С. В

результате получается продукт с гомогенной структурой, повышенной пористостью поверхности и более высокой проницаемостью.

Фруктово-ягодные соки с сильным, свойственным им запахом и вкусом, например апельсиновые, грейт фруктовые, черносмородиновые, дают лучшие сухие продукты, чем виноградные или даже яблочные с их тонкими ароматическими веществами.

Промышленная сублимационная сушка проводится в периодических, больших вакуум-камерах, или в непрерывно-действующих установках. Несмотря на хорошее качество порошков сублимационной сушки производство их ограничено высокой стоимостью процесса.

1.4. Анализ конвективной сушильной установки.

Этот способ сушки получил широкое распространение. Сушильный агент выполняет функции теплоносителя и влагопоглотителя. Преимуществом способа является простота и возможность регулирования температуры материала. А недостатки его заключается в том что:

- градиент температуры направлен противоположно градиенту влагосодержания, что тормозит удаление влаги из материала;

- небольшие величины коэффициента теплоотдачи от сушильного агента к поверхности материала [11,6-23,3 Вт/м² К].

Автором [1] предложен конвективный способ сушки вспененного продукта. Вспененный продукт слоем 3,2 мм наносится на перфорированную ленту. Продукт при обезвоживании проходит 5 зон сушки. В первой зоне воздух, подогретый до 60°C, продувается через ленту снизу и проходя через отверстия в нем, образует кратера в слое пены, что значительно увеличивает поверхность контакта продукта с теплоносителем. Во второй зоне происходит интенсивное удаление влаги. В третьей и четвертой зонах сушки удаляется оставшаяся влага до конечной влажности 2-5 %. В пятой зоне продукт охлаждается воздухом. Скорость ленты 2,75 м/мин. Продолжительность сушки, включая охлаждение 120 мин. Недостатком данного способа является то, что при обработке пены происходит

неравномерность прогрева и распределения влаги по высоте слоя, а также высокая продолжительность используемой техники.

1.5. Анализ кондуктивной сушильной установки.

Кондуктивный способ сушки основывается на передаче тепла материалу при соприкосновении с горячей поверхностью. Воздух служит только для удаления водяного пара из сушилки. Коэффициент теплоотдачи составляет 170-180 Вт/м² К. Контактная сушка имеет ограниченное применение. Отличается высокой интенсивностью и экономичностью.

В овощесушильном и консервном производствах применяется сушка под вакуумом.

Для сушки продуктов питания этот способ используется не часто. Высокого качества конечного сухопродукта достичь не удастся вследствие неравномерности влажности конечного продукта; продукт, контактирующий с нагретой поверхностью в период сушки, пересушивается, что приводит к необратимости процессов восстановления, а из-за высокой температуры (320-340 °С) в камере сушильного оборудования, конечный сухопродукт теряет 30-40% витаминов и биологически активных веществ и становится ломким.

При кондуктивной сушке продукта тепло сообщается влажному материалу только от греющей поверхности и передается к открытой поверхности продукта с последующей отдачей его в окружающую среду. Количество тепла, полученное от греющей поверхности, расходуется на испарение влаги на потери тепла лучеиспусканием и конвекцией открытой поверхностью сухопродукта в окружающую среду. Доля этих потерь в общем расходе тепла невелика и составляет максимально 3-5%, что делает сушильное оборудование достаточно эффективным. Однако потребительские качества сухопродуктов и содержание в них исходных веществ делают этот способ сушки продуктов редко используемым.

1.6. Современное состояние теории и практики сушки сельскохозяйственных продуктов

При переработке сельхозпродуктов в консервной и овощесушильной промышленности в основном применяются механические и тепломассообменные процессы. Механические процессы (например, измельчение сырья) осуществляются для придания определенной формы и интенсификации последующих процессов (выпаривание, прессование, сушка и т.д.). Тепловая обработка применяется с целью увеличения клеточной проницаемости сырья, инактивации ферментов, гидролиза протопектина, удаления воздуха из растительной ткани.

При консервации плодовоовощного сырья под действием тепломассообменных процессов в структуре сырья наблюдаются весьма сложные процессы. Плоды и овощи содержат углеводы, белки, жиры и другие ферменты. Поэтому в них протекает сложный комплекс биохимических процессов, ход которых оказывает значительное влияние на качество продуктов переработки сырья. Суммарное воздействие тепла и кислорода воздуха при переработке способствует активизации ферментной системы плода, что приводит к интенсивному протеканию нежелательных биохимических процессов – таких, как ферментативный гидролиз амигдалина, разрушение витаминов, которые, в свою очередь, обуславливают ухудшение свойств овощей а также отражаются на качестве получаемых продуктов.

В консервной промышленности для размягчения ткани плодовоовощного сырья, повышения клеточной проницаемости и выхода сока предложен способ первоначально–тепловой обработки. Продукт обрабатывается ионизирующим излучением. Однако применение более высоких доз часто вызывает значительное размягчение плодовоовощного сырья, а у винограда

тёмнеет сок и ухудшается вкус. Поэтому в настоящее время этот способ не нашел применения в промышленности.

В консервной, пищевом концентратной, мясомолочной промышленности широкое распространение получил процесс сушки. Способ сохранения плодов и овощей с помощью сушки известен ещё со времен глубокой древности. Сушка не только самый сложный нестационарный процесс тепло – и массообмена, но и технологический процесс безотходной переработки плодов сельскохозяйственных культур. Высушенный продукт, особенно пищевой, должен иметь высокие качественные показатели.

В данной главе нами проведен анализ современных способов переработки и основных тенденций безотходной переработки сельскохозяйственных продуктов при одновременной интенсификации тепло – и массообменных процессов.

Сушка овощей в зонах их произрастания осуществляется в основном традиционным воздушно-солнечным способом, а на перерабатывающих предприятиях – конвективным способом. Воздушно-солнечная сушка – один из способов уберечь сырьё от порчи без затрат топлива, который до сих пор применяется во многих регионах мира с жарким и сухим климатом. Сушат сырье на специально подготовленных площадках, расположенных в зоне выращивания и оборудованных навесами, сортировочными столами, котлами, камерами для окуривания.

Однако этот способ обладает рядом существенных недостатков. На больших площадях укладывают и убирают продукт. При сушке происходит значительное загрязнение продукта и заражение насекомыми, грызунами. В результате в целях улучшения товарного вида плоды нуждаются в последующей обработке, что приводит к дополнительным затратам, снижению сортности готовой продукции, затрудняющей её реализацию.

Изучение патентной и научно-технической информации о технике сушки в СНГ и за рубежом позволило определить основные тенденции развития техники и технологии сушки плодоовощных продуктов. В области

солнечной сушки – это повышение эффективности сушильных установок, использующих солнечную энергию за счет применения концентрированной солнечной радиации, аккумуляирования солнечной энергии, теплового насоса.

Существующие сушильные установки можно разделить на сушилки с использованием аккумуляированной солнечной энергии и камерные, солнечно-радиационные, комбинированные гелиосушилки. К первому типу относятся сушилки с параболическим зеркалом и сушилки с плоскими поверхностями.

Установка с использованием солнечной энергии представляет собой прямоугольное помещение с двухкаскадной крышей из лёгких панелей, которые хорошо пропускают солнечную радиацию. Задняя часть стены выполнена из металлических листов. Для продления сроков использования солнечной радиации здание ориентировано на юг.

В здании установлены круглые бункера, изготовленные из листовой стали, зачернённой снаружи, причём, в основание бункера засыпан гравий для аккумуляции тепла, верхняя часть бункера открыта. На поверхности гравия уложена металлическая сетка, а в основании имеются желоба, соединённые воздуховодом с вентилятором.

Под действием солнечной радиации металлические бункера, а также высушиваемый продукт нагреваются. Одновременно между стенкой и бункером нагревается поток воздуха, поступивший внутрь установки через регулируемые заслонки. Подогретый воздух направляется в верхнюю открытую часть бункера, где уложен продукт. Проходя через слой продукта, подогретый воздух удаляет влагу с его поверхности и отдаёт тепло гравию. Отработанный воздух всасывается через желоба воздуховодов вентилятором и отводится из сушильной установки в атмосферу. Аккумуляированное тепло используется в вечернее время.

Сушка ведется концентрированным потоком солнечной радиации при высокой эффективности использования солнечной энергии. Один из недостатков данного вида сушилок состоит в сложности аппаратного

оформления способа и необходимости в течение дня изменять ориентацию концентратором солнечной энергии.

Особенностью сушилок с аккумулирующими устройствами является то, что в дневное время продукт высушивается солнечной энергией и нагретым воздухом, а в вечернее и ночное время - за счет аккумулированной теплоты. При этом в качестве аккумулятора используют твердые наполнители (гравий, горные породы и др.) и вещества с фазовым переходом. Сочетание аккумулирующих устройств и теплового насоса обеспечивает высокую эффективность процесса сушки плодов и овощей и в гелиосушилке с тепловым насосом. Применение теплового насоса, уменьшающего затраты первичной энергии за счет более рационального способа ее преобразования расширяет возможности использования солнечной низкопотенциальной энергии для сушки плодов.

Применение тепловых насосов в процессе сушки заметно возрастает. На рынке появляются многочисленные установки, предназначенные для этих целей. Одна из лучших работ по применению тепловых насосов в сушильных процессах проведена электротехническим исследовательским центром в Англии. Она продолжается и в настоящее время.

Отсутствие высокоэффективных и энергосберегающих установок не позволяет многим хозяйствам повысить их производительность. В настоящее время существующие сушильные установки являются громоздкими, энергоёмкими и занимают много места. Для многих хозяйств транспортировка сельскохозяйственных продуктов к месту сушки является невыгодной. Часть продукта во время транспортировки теряет свое качество.

Кроме того, за рубежом также проведены исследования, разработаны способы и устройства для сушки плодов и винограда с использованием солнечной энергии. Эти простые в эксплуатации и экономичные сушилки предполагается эксплуатировать непосредственно в зоне произрастания сельхозпродуктов.

Следует отметить, что в настоящее время предложенные устройства не нашли широкого практического применения, и основная доля сушеных плодов и овощей, получаемая в республиках Средней Азии, высушивается обыкновенной солнечной сушкой [269], длительность которой составляет 4-10 суток.

Еще одним из физических методов является искусственная сушка - конвективная сушка. Она основывается на передаче тепла высушиваемому продукту за счет энергии нагретого сушильного агента (воздуха или парогазовой смеси). Удельные энергозатраты составляют от 1,6 до 2,5 кВт.ч /кг. Температура сушильного агента при сушке продуктов составляет 50-80 °С. Продолжительность процесса сушки нарезанных яблок при различных удельных нагрузках составляет: для туннельной сушилки 18-25ч., для паровой конвейерной сушилки 6-7 ч.

Гуляевой В.Н. предложен конвективный способ сушки вспененного продукта. Вспененный продукт слоем 3 мм наносится на перфорированную ленту, проходящую 5 зон. В первой зоне воздух, подогретый до 60°С, продувается через ленту снизу и, проходя через отверстия в нем, образует кратеры в слое пены, что значительно увеличивает поверхность контакта продукта с теплоносителем. Во второй зоне происходит удаление влаги. В третьей и четвертой зонах удаляется оставшаяся влага до конечной влажности 2-5%. В пятой зоне продукт охлаждается. Продолжительность сушки, включая охлаждение, составляет 14 минут.

Недостаток данного способа состоит в том, что при обработке пены имеет место неравномерность прогрева и распределения влаги по высоте слоя, а также высокая продолжительность обработки.

В овощесушильном и консервном производствах применяется сушка под вакуумом. Опыты проведены в Московском технологическом институте пищевой промышленности на экспериментальной одновальцевой вакуум-сушилке ВВС-2 с нижним расположением ножа. Это - установка с кондуктивным теплоподводом. Процесс сушки проходил в камере,

разрежение которой составляло 933-959 кПа. Производительность на 1 м² поверхности нагрева составляла 21,2 кг влажного материала в час.

При непрерывном методе пеносушки под вакуумом два или несколько замкнутых конвейера движутся по двум роликам в корпусе, сконструированном в виде трубы. Продолжительность пребывания в сушилке снижена до 15-30 мин. Остаточное содержание влаги 0,5-3 %. Пеносушка под вакуумом дает растворимые без осадка порошки высокого качества.

Процесс распылительной сушки исследован многими отечественными и зарубежными учеными и отражен в ряд работ. При распылительной сушке плодово-ягодных соков или гомогенатов из-за высокого содержания в них фруктозы порошок налипает на стенки сушильной башни. Добавляя большие количества вспомогательных сушильных агентов, которые в некоторых случаях могут составлять больше половины сухих веществ сока, или применяя дорогие дополнительные устройства, например, для охлаждения внешних стенок камеры холодным воздухом вентилятор или пневматическую досушку и охлаждение порошка, можно совсем или частично устранить трудности при сушке. Однако, несмотря на это, возникают большие потери ароматических веществ.

Щадящим методом сушки, распространившимся в начале 60-х годов прошлого века в лабораторных условиях, является высокочастотная сушка плодово-ягодных концентрированных соков. Путем применения переменного тока высокой частоты (5-27 МГц) получали под вакуумом (остаточное давление 25-50 торр) теплоту испарения диэлектрическим путем непосредственно в водной фазе высушиваемого плодово-ягодного концентрированного сока. Благодаря этому удается избежать перегрева от теплопередающих стенок и добиться равномерного нагревания продукта. Продолжительность сушки незначительна – 7-20 мин.

В области инфракрасного излучения существует способ воздействия селективного излучателя средне- и длинноволнового инфракрасного диапазона. В настоящее время данный способ обработки изучен недостаточно. Поэтому область его использования может быть оценена лишь в части видимой перспективы.

Следует отметить, что увеличение движущих сил процесса на всем этапе сушки плодов и овощей за счет повышения потенциала сушильного агента ограничивается их термоустойчивыми свойствами. Так, интенсивная высокотемпературная сушка плодов приводит к термической деструкции биологически активных веществ и к ухудшению качества продукции.

Другой путь интенсификации процесса сушки растительного материала - повышение его влагопроводных характеристик на основе изменения физико-химических свойств, что достигается применением различных способов предварительной обработки плодов и овощей. Последние можно разделить на биохимические, химические и физические.

Биохимические методы предполагают применение композиций, создающих микродефекты в оболочках растительных клеток. Из химических методов следует отметить обработку растворами кислот, щелочей, солями аммония, эфирными маслами, детергентами, буферными растворами, поверхностно-активными веществами и др. Биохимические и химические методы обработки применяют, в основном, для интенсификации сушки целых косточковых плодов (сливы) и винограда, что достигается за счет удаления воскового налета и повышения паропроницаемости поверхностного слоя.

Бланширование горячей водой или паром применяют при консервировании плодов и винограда. Однако для сушки половинчатых косточковых плодов и резанных бахчевых культур (дыня) этот процесс не находят широкого применения, и в технологической схеме производства некоторых видов сухофруктов (например, сушеных дынь) процесс бланширования не используется. Причиной тому служат, в основном,

большие потери водорастворимых, ценных питательных веществ при бланшировании, а также изменения, ухудшающие восстановление сушеного продукта. В результате бланширования (водой и паром) массовая доля сухих веществ в плодах уменьшается из-за диффузии, а также вымывания сухих веществ. По данным Я.М. Казимирского, при бланшировании картофеля водой потери экстрактивных веществ составляют 15-19%, витаминов - 34-37%, а при бланшировании паром – соответственно 12 и 27%. Каждый процент уменьшения содержания сухого материала вызывает фактически снижение количественного выхода продукции.

При сушке овощей сельскохозяйственных культур желательно предотвратить окисление фенолов, что способствует лучшему сохранению Р-витаминной активности, предотвращению потемнения материала и повышения товарной ценности готовой продукции. Для предотвращения окисления полифенолов, помимо бланширования, применяется химическая обработка плодов и овощей различными антиоксидантами (сернистым ангидридом, аскорбиновой кислотой и др.), которые подавляют деятельность окислительных ферментов. По технологической схеме производства сульфитированной продукции плоды перед сушкой окуривают сернистым газом в течение 1,5-2 часов или погружают на 3-4 минуты в раствор сернистой кислоты, содержащей 0,2-0,3% сернистого ангидрида. Остаточное содержание SO_2 в плодах перед сушкой должно быть 0,06-0,08%. Сульфитация придает продукции неприятный вкус, а остаточное содержание в плодах выше определенной нормы оказывает общее токсичное воздействие на организм человека. Кроме того, сернистая кислота разрушает витамин группы "В".

В связи с тем, что сернистая кислота оказывает вредное физиологическое воздействие на организм человека, а также придает неприятные вкусовые качества обработанному продукту, возникает вопрос о замене ее другими антиоксидантами для инактивации окислительных ферментов. Однако проведенные многочисленные исследования показали,

что полностью заменить сернистую кислоту в качестве средства антимикробного и антиоксидантного действия пока невозможно. Например, аскорбиновая кислота не является асептиком и обладая восстановительными свойствами при определенных условиях может оказать окислительное воздействие. При больших дозах аскорбиновая кислота, наоборот, усиливает потемнение продукта. Это объясняется тем, что аскорбиновая кислота разрушается, а продукты ее распада (в том числе оксиметилфурфулол) образуют темноокрашенные соединения. Необходимо подчеркнуть, что некоторые антиоксиданты и асептики, применяющиеся за рубежом для обработки пищевых продуктов, запрещены в СНГ по причине вредного воздействия на организм человека.

Производство сушёных фруктов, овощей и плодов - один из наиболее экономичных способов переработки сырья. Затраты на сушку более чем в 2 – 3 раза ниже затрат на консервирование 1 тонны овощей.

В настоящее время исследуются более эффективные методы сушки, в том числе ИК- конвективный способ. Методы сушки изучены и отражены в работах ряда ученых. Предварительная обработка и последующая ИК- сушка производится с целью повышения интенсивности протекания процесса сушки, поскольку при этом значительно повышается коэффициент диффузии влаги внутри материала. В связи с повышением интенсивности внутреннего переноса влаги появляется возможность создать более жесткий режим в сушильной камере.

Анализируя вышеизложенное, можно заключить, что в настоящее время вопросу подготовки овощей в том числе тыквы к процессу сушки уделяется недостаточное внимание. Однако, если задача повышения движущей силы процесса сушки плодов и овощей за счет сушильного агента ограничена термоустойчивыми свойствами материала, то интенсификация процесса обезвоживания может быть достигнута путем повышения его кинетических характеристик на основе применения эффективной безотходной

энергосберегающей технологии, ориентированной на акустическим воздействием.

1.7. Применение АК методов подвода энергии в процесс сушки ТЫКВЫ

Использование АК- воздействия в процессах сушки, позволяет существенно интенсифицировать внутренний и внешний тепло - и массоперенос в капиллярно-пористых материалах. Проникновение акустических колебаний глубь материала обуславливает интенсификацию процессов массопереноса и фазовых превращений, оказывает воздействие на структуру материала.

Метод акустического воздействия являющийся одним из перспективных физических методов обработки продуктов, находит все большее применение в различных отраслях пищевой промышленности, в частности, при переработке плодоовощного сырья.

Наибольшее применение, по сравнению с другими способами консервирования, получает метод ИК- энергоподвода для сушки плодов и овощей. Как указывает М. Дрибере, значительные преимущества сушки плодов и овощей ИК- лучами – простота конструкции установок и высокое качество продуктов - приводят к тому, что этот метод используется не только в странах с умеренным, но и с жарким климатом.

Наилучшим вариантом сушки плодов АК воздействием является применение АК в втором периоде сушки.

Из технологических и биохимических оценок продуктов, высушенных АК воздействием, следует, что потери органических кислот и общих сахаров не превышают потерь при конвективной сушке, а внешний вид продуктов улучшается. Установлено, что в получаемых продуктах в высокой степени сохраняются биологически активные вещества: витамины А, Е и группы В -

60-70%, витамин С - 50-65%, незаменимые аминокислоты и микроэлементы – около 100%. Предварительные расчеты показывают, что использование нагрева ИК-лучами снижает стоимость 1 кг сушеного продукта в 2 раза по сравнению с конвективной сушкой.

Широко используются также комбинированные методы сушки, сочетающие конвективный и терморadiационный энергоподвод. Внесение в псевдооживленный слой источника ИК-облучения создает благоприятное сочетание положительных свойств гидродинамического режима и радиационного нагрева. При этом продолжительность сушки овощей сокращается примерно в 1,7 раза по сравнению с длительностью сушки в псевдооживленном слое. Таким образом, по результатам исследований и литературным данным, применяемая технология переработки сельхозпродуктов не снижает пищевой ценности сушеных продуктов, уменьшает вероятность появления в продуктах канцерогенных веществ.

Акустический метод сушки продуктов основан на воздействии на обезвоживаемый продукт интенсивных ультразвуковых волн. Данный процесс сушки носит циклический характер, волна выбивает влагу, находящуюся на поверхности продукта, затем оставшаяся влага равномерно распределяется по капиллярам и процесс повторяется снова. Это происходит до тех пор, пока продукт не достигнет заданной влажности.

Акустический способ позволяет сушить широкий набор материалов: продукты сельского хозяйства (зерно, овощи, фрукты и другие), древесина, хлопок, лекарственные препараты и травы, бумага, продукция химической и других отраслей промышленности. При акустической сушке влага экстрагируется из подвергаемого сушке

продукта под действием звука с соответствующими характеристиками. Принципиальная особенность способа: сушка продуктов протекает без повышения температуры продуктов. Реализуется "холодная" сушка. Это обстоятельство снимает все негативные последствия, связанные с термическим воздействием на сухопродукт. Именно поэтому это

единственный способ сушки, пригодный для сушки термочувствительных и легко окисляющихся материалов. Обработка продуктов акустическими колебаниями высокой интенсивности благоприятно сказывается на физико-химических и потребительских свойствах сухопродукта (например, увеличивает всхожесть семян и др.).

Сушка продуктов акустическим способом отличается от обычных методов и по скорости выработки сухопродукта. Например, при сушке ферментов (разрушающихся при температуре в 40 градусов Цельсия) в акустическом поле скорость сушки продуктов в сравнении с вакуумным методом повышается в 3-4 раза.

1.8. Химический состав тыквы и ее использование для сушки

Еще в древнем Египте лакомством считались тонко нарезанная тыква с яблоками и медом, политая лимонным соком с добавлением молотых орехов.

Тушеная тыква, растертая с творогом и сахаром, приправленная ванилином, является вкусным диетическим блюдом. Кроме того, из тыквы готовят пудинги, оладьи и даже торты (Лебедева А.Т.,2000).

Содержание различных веществ в тыкве в первую очередь зависит от сорта и региона выращивания. Это теплолюбивая культура, и для условий Центрально-Черноземного региона не все сорта приемлемы.

Из тыквы в домашних условиях приготавливают большое количество различных блюд. Это тыква маринованная, пюре и повидло из яблок и тыквы, соки из тыквы, тыква пикантная, жареная ломтиками, тушеная, компоты, плов и т.д.

В настоящее время для производства консервов с использованием тыквы разработано ряд технологических условий и технологических инструкций. Например, для выработки продуктов лечебно-профилактического назначения с использованием тыквы, моркови и

фруктовых соков разработаны ТУ 61 РФ 01-246-2001 Консервы "Икра из овощей и плодов", ТУ 61 РФ 01-206-99 Консервы "Тыква протертая с сахаром", ТУ 61 РФ 01-218-2000 Консервы "Соки тыквенные с мякотью и сахаром" (нектары), ТУ 61 РФ 01-272-2001 Консервы "Соки с мякотью" и др. (Скрипников Ю.Г., Винницкая В.Ф., 2001).

Расход сырья на производство консервов зависит от содержания сухих веществ. Основной составной частью сухих веществ тыквы являются сахара и крахмал. В зависимости от сорта, зоны выращивания и степени зрелости в плодах тыквы содержание сухих веществ составляет 6-25%, сахаров - 2,5-12%, крахмала - 0-10% (статья Скрипникова Ю.Г., 2003).

При использовании плодов для консервирования и сушки наиболее перспективным является сорт Мичуринская. Неплохие показатели и у сорта Витаминная, но урожайность плодов этого сорта в отдельные годы бывает низкой. Поэтому использовать для этих целей мало целесообразно.

Известно, что тыква используется для приготовления варенья, повидла, пасты, фарша, маринадов, соков, пюре. Кроме того, она идет на сушку. По данным авторов Ивановой Е.И., Санниковой Т.А., Мачулкиной В.А. сушеная тыква является ценным продуктом питания (Иванова Е.И. и др., 2003).

Химический состав плодов тыквы

Таблица 1.1.

Сорт	СЭВ, %	Содержание сахаров, %			каротин, мг %	витамины С, мг %	пектин, %	Крахмал, балл, %
		моносахара	дисахара	суммарных сахаров				
Миндальная 35	13	5,1	7	12,1	1,5	14,1	0,8	0,5
Мичуринская	20	4,68	13,09	17,7	6,5	29	1,5	5
Целебная	8	6,31	0,79	7,11	1,0	11	0,7	0
Витаминная	12	7	4,5	11,5	6,0	15	1,1	0,5

Из данных таблицы видно, что по всем показателям наиболее качественные плоды тыквы у сорта Мичуринская. По сравнению с сортом

Миндальной 35 содержание сухих растворимых веществ превышает в 1,5 раза сумму сахаров, каротина, витамина С, крахмала выше в 1,4 раза по сравнению с другими сортами.

Самыми низкокачественными являются плоды сорта Целебная. По рассмотренным показателям качества плодов в 2,1-6,5 раза хуже по сравнению с сортом Мичуринская. Качество плодов сорта Витаминная по сравнению с сортом Миндальная 35 несколько лучше, а по сравнению с Мичуринской - ниже.

Выход сушеной тыквы, %

Таблица 1.2

Сорт	СВ	Отходы				Выход сушеной тыквы
		семена	плацента	кожура	всего	
Миндальная 35	13	2,5	1,3	24,2	28,0	10,4
Мичуринская	20,2	3,7	0,6	17,2	21,5	16,2
Целебная	8	3,0	0,8	21,3	32,3	6,4
Витаминная	12	3,1	1,7	24,0	27,1	9,6

Из данных таблицы видно, что общие отходы в наименьшем количестве имеются у сорта Мичуринская (21,5%), наибольший - у сорта Целебная (32,3 %). Выход сушеной тыквы у сорта Мичуринская составляет -16,2 %, у Миндальной 35 - 10,4 %, Витаминной -9,6% и Целебной- 6,4%. По этим показаниям можно судить, что наименьший выход составил у сорта Целебная.

1.9. Цель и задачи исследования

В настоящее время разработано и используется большое количество сушильных установок, в которых используются различные способы подвода тепла и отвода влаги из высушиваемого материала.

Достаточно широкое применение нашли конвективные, кондуктивные и др. виды сушилок. В последние 10 лет начато более широкое использование нетрадиционных методов обогрева высушиваемых изделий, в частности, используются СВЧ(сверх высоко частотный) и ИК- методы нагрева.

Современное развитие техники акустическая сушка свидетельствует о значительной перспективности использования их в сушильном деле.

Однако теоретические аспекты синтеза оптимальных процессов пока не дают достаточной возможности для исчерпывающего анализа сушки овощей сельскохозяйственных культур при нетрадиционных методов подвода тепла.

В настоящее время предложены балансовые уравнения для расчета процесса сушки на основе методов теории подобия и методов математического моделирования.

Актуальны дальнейшее решение вышеуказанных задач применительно к процессу сушки продуктов с целью сохранения питательных веществ и цвета продуктов в натуральном виде, а также реализация принципиально новых высокоэффективных сушильных установок, способствующих уменьшению энергозатрат, потерь сырья и повышению качества сушеного продукта.

Цель диссертационной работы является интенсификации процесса сушки тыквы с применением акустическим воздействием на основе анализа закономерности перемещения частоты акустических колебаний во внутри высушиваемого материала.

Вывод по главе 1

На основе литературных исследований анализировано процесс сушки сельскохозяйственных продуктов. Изучены способы сушки, конструкции и принцип работы сушильных установок.

В настоящее время вопросу подготовки овощей в том числе тыквы к процессу сушки уделяется недостаточное внимание. Однако, если задача повышения движущей силы процесса сушки плодов и овощей за счет сушильного агента ограничена термоустойчивыми свойствами материала, то интенсификация процесса обезвоживания может быть достигнута путем повышения его кинетических характеристик на основе применения эффективной безотходной энергосберегающей технологии, ориентированной на акустическим воздействием. Так как, проведенный анализ показывает, что по сравнению с другими способами консервирования, получает метод ИК- АК энергоподвода для сушки плодов и овощей.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Основы теории сушки тыквы под акустическим воздействием

Процесс сушки, заключающийся в удалении влаги из материала, с одной стороны, является одним из ключевых этапов различных технологических процессов, с другой стороны, одной из самых затратных стадий обработки материала. Качество и скорость реализации процесса сушки в значительной степени определяют качество и себестоимость конечного продукта.

Традиционные способы сушки чрезвычайно энергоемки и крайне не эффективны. Сушка, с использованием стандартных сушилок при высоком энергопотреблении, протекает продолжительное время и зачастую приводит к высокому проценту брака за счет перегрева или неравномерного высушивания.

Процесс сушки состоит из двух основных этапов, обычно называемых первым периодом, или периодом постоянной скорости, и вторым периодом, или периодом падающей скорости сушки (Ю.Я. Борисов, Н.М. Гынкина. Акустическая сушка. - в кн. Физические основы ультразвуковой технологии. Физика и техника мощного ультразвука. Книга 3, Под ред. Л.Д. Розенберга. М., "Наука", 1970, стр.579-641.)

В первом периоде процесс сушки характерен линейным изменением влагосодержания материала во времени. Этот линейный закон изменения влажности отражает тот факт, что влага, испаряющаяся с поверхности, непрерывно заменяется новой, поступающей из внутренних слоев. Вследствие того, что температура поверхности материала в этот период (обычно равная температуре внутренних слоев) остается постоянной, давление пара жидкости на поверхности оказывается равным давлению насыщения. Таким образом, процесс сушки в первом периоде эквивалентен испарению жидкости со свободной поверхности и определяется лишь внешними факторами, т.е. температурой, скоростью движения и влагосодержанием окружающего воздуха.

Процесс испарения влаги со свободной поверхности в изотермических условиях подчиняется закону Дальтона:

$$\frac{dm}{d\tau} = K S \frac{P_0 - P_{\infty}}{P_s} \quad (2.1),$$

m - масса испарившейся жидкости;

K - коэффициент;

K - коэффициент, учитывающий гидродинамические условия на поверхности;

S - площадь поверхности испарения материала;

P_0 - давление насыщенного пара на поверхности материала (при температуре поверхности);

P - парциальное давление пара в окружающей среде;

P_{∞} - барометрическое давление в окружающей среде.

По мере уменьшения влажности в материале наступает момент, когда скорость подачи влаги к поверхности оказывается недостаточной, чтобы обеспечить прежнюю скорость испарения с поверхности, вследствие чего скорость сушки начинает падать. Влажность, после которой зависимость влагосодержания от времени (кривая сушки) становится нелинейной, отделяет первый период от второго и называется критической влажностью. Критическая влажность, даже для одного материала, величина непостоянная и зависит от режима сушки. Начиная с критической влажности, кривая сушки асимптотически приближается к равновесной влажности, при которой убыль влаги прекращается.

Снижение скорости сушки при неизменных условиях испарения на поверхности материала объясняется перемещением зоны испарения с поверхности вглубь материала. При этом внутри тела влага продолжает перемещаться по капиллярам в виде жидкости до зоны испарения, а потом в виде пара, диффундирующего через сухие слои материала. Таким образом, во

втором периоде скорость сушки определяется скоростью перемещения жидкой и газообразной фаз внутри материала и зависит, главным образом, от структуры материала.

Перемещение влаги внутри материала происходит по закону, аналогичному закону теплопроводности и, общий поток влаги внутри материала может быть выражен равенством:

$$\frac{dm}{d\tau} = a_m \rho_0 \nabla U - a_m^T \rho_0 \nabla T - K_p \nabla P \quad (2.2),$$

a_m - коэффициент диффузии влаги;

∇U - градиент влажности;

a_m^T - коэффициент термодиффузии;

ρ_0 - плотность сухого тела;

∇T - градиент температуры;

K_p - коэффициент молярного переноса под действием градиента давления;

∇P - градиент давления.

Процесс сушки продолжается до тех пор, пока влажность материала не достигнет равновесного (при заданных условиях) значения, после чего процесс прекращается.

Рассмотренный механизм позволяет выявить пути интенсификации процесса сушки.

В первом периоде ускорение сушки материалов может быть достигнуто, как это видно из закона Дальтона (1), следующими путями:

а) увеличением разности давлений насыщенного пара у поверхности испарения и парциального давления пара в окружающей среде ($P_0 - P_\infty$);

б) снижение барометрического давления в окружающей среде P_∞ ;

в) увеличением площади поверхности испарения S ;

г) увеличением коэффициента K , учитывающего, в конечном счете, толщину пограничного диффузионного слоя.

Увеличение разности ($P_0 - P_\infty$) может быть достигнуто увеличением температуры окружающего воздуха и осушением окружающей атмосферы. Дополнительное осушение требует значительных энергозатрат. А дополнительный прогрев не всегда допустим, так как достаточно большое количество материалов теряет свои свойства при повышенных температурах.

Уменьшение барометрического давления окружающей атмосферы P_∞ - это, по существу, вакуумная сушка.

Коэффициент K , учитывающий гидродинамические условия на поверхности испарения, тем больше, чем выше скорость относительного движения поверхности испарения и окружающего воздуха. При увеличении скорости относительного движения становится тоньше пограничный слой над поверхностью испарения:

$$\delta_s = \frac{l}{\sqrt{Pe}} = \sqrt{\frac{Dl}{g}} \quad (2.3)$$

где δ_s - толщина диффузионного пограничного слоя;

l - характерный размер;

Pe - число Пекле;

D - коэффициент диффузии;

g - скорость потока.

Поэтому, как правило, процесс сушки проводят при обдувании сушеного материала потоком нагретого воздуха (конвективная сушка). Однако при сушке мелкодисперсных порошкообразных материалов увеличение скорости ограничено тем, что при больших скоростях воздуха начинается унос частиц. Поэтому, как правило, процесс сушки проводят при обдувании сушеного материала потоком нагретого воздуха (конвективная сушка). Однако при сушке мелкодисперсных порошкообразных материалов увеличение скорости ограничено тем, что при больших скоростях воздуха начинается унос частиц.

Кроме того, при сушке многих химических продуктов, биологических объектов, удобрений, нельзя проводить сушку при повышенных

температурах, так как вещества либо разлагаются, либо теряют свои важнейшие свойства. (фармацевтические характеристики лекарственных препаратов, биологическая активность семян и т.п.).

2.2. Теоретическое обоснование акустической сушки.

Из рассмотренного механизма сушки следует, что существует другой способ изменения величины диффузионного пограничного слоя - это акустическое воздействие, т.е. сушка материала в поле акустических или ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Толщина гидродинамического пограничного слоя определяется числом Рейнольдса:

$$\delta_r = \frac{l}{\sqrt{Pe}} = \sqrt{\frac{\nu l}{g}} \quad (2.4),$$

где ν - коэффициент кинематической вязкости.

В акустическом поле δ_r толщина зависимости от частоты звука ω :

$$\delta_r = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \quad (2.5),$$

Толщина гидродинамического пограничного слоя в акустическом поле может быть существенно снижена по сравнению с толщиной δ_r в реально применяемых скоростях потоков. При обдувании тела потоком воздуха толщина гидродинамического и диффузионного пограничных слоев приблизительно одинаковы. В акустическом поле гидродинамический пограничный слой может быть существенно меньше диффузионного. Это значит, что звуковые колебания проникают внутрь диффузионного слоя, турбулизируют его и тем самым ускоряют процесс испарения.

Механизмы ультразвуковой сушки очень сложны. Но очевидно, действующими факторами являются:

1. Уменьшение вязкости жидкости под действием акустических (УЗ) колебаний, способствующее ускоренному перемещению влаги по капиллярам из глубины тела на поверхность.

2. Выдавливание влаги из капилляров кавитационными пузырьками газа, возникающими и колеблющимися в жидкости, под действием УЗ колебаний.

3. Радиационное давление, направленное в капиллярах из жидкости в газ, перемещает столбик жидкости капилляра, перемещая его к поверхности (звукокапиллярный эффект).

Сушка в акустическом и ультразвуковом поле происходит без существенного прогрева материала. Именно поэтому это единственный способ сушки термочувствительных и легко окисляющихся материалов.

Анализ теоретических и экспериментальных работ по вопросам акустической сушки показывает, что процесс в первый период определяется в основном скоростью акустических течений, возникающих у поверхности обрабатываемого материала. Особенностью этих течений является малая толщина пограничного слоя (50-100 мкм), в результате чего акустические течения значительно эффективнее обычного воздушного потока. В этот период наиболее эффективными являются низкочастотные акустические колебания.

Во второй период процесс интенсифицируется в результате нагрева, обусловленного поглощением звука в порах и капиллярах материала, радиус которых больше толщины пограничного слоя. При сушке материала в слое возможен нагрев обрабатываемого продукта на 20-40° С (в зависимости от уровня звукового давления), однако этого можно избежать, применяя метод взвешенного слоя или пневмотранспортные сушилки. В этом случае наиболее эффективными являются акустические колебания высокой частоты (ультразвуковые колебания).

Кроме того, обработка материала акустическими колебаниями высокой интенсивности благоприятно сказывается на физико-химических и потребительских свойствах высушиваемого материала.

Удаление влаги происходит практически без нагревания материала (такая сушка не разрушает ценные биологические вещества в продуктах питания, травах и т.п.).

1. Скорость сушки, по сравнению с известными и используемыми на практике способами сушки, выше в 2-5 раз. Например, при сушке ферментов (разрушающихся при температуре в 40 °С) в акустическом поле, скорость сушки в сравнении с вакуумным методом повышается в 3-4 раза.
2. Акустическая сушка позволяет добиться значительного сокращения энергетических затрат.

Особенности акустической сушки

1. Существует нижняя граница интенсивности акустических колебаний (порядка 140- 150 Дб), при которой происходит резкая интенсификация процесса сушки в акустическом поле.
2. Отсутствует зависимость скорости сушки от частоты акустических колебаний в диапазоне от 2 до 25 кГц.
3. Наиболее эффективна акустическая сушка для тонких слоев (порядка 2-20 см).
4. Наряду с уменьшением пограничного слоя, акустическая сушка обладает еще одним преимуществом: на втором этапе сушки акустические колебания проникают в материал и создают в нем быстро сменяющиеся зоны повышенного и разряженного давления.
5. Скорость акустической сушки тем выше, чем выше интенсивность ультразвукового воздействия на высушиваемый материал, однако к.п.д. ультразвуковых излучателей не высок и, следовательно, наращивание интенсивности за счет увеличения мощности излучателя снижает экономический эффект способа.

В настоящее время вновь проявляется повышенный интерес к созданию акустических сушилок.

Проведенный патентный поиск, позволяет установить наличие исследований и разработок (в основном за рубежом - Америка, Финляндия и Испания).

В последние годы начинается интенсивное патентование работ зарубежных авторов и фирм в нашей стране. Особенно активны финны и испанцы.

К сожалению, все работы не несут большой оригинальности и представляют собой попытки практической реализации теоретических исследований, проводившихся у нас в 70 годы.

Что же происходит в нашей стране?

Свидетельством интереса к проблемам акустической сушки может служить появление информации об возобновлении исследований в различных организациях и все чаще выдвигаемые предложения по организации работ от различных предприятий.

Анализируя сегодняшнее положение в области технологии акустической сушки, можно выделить следующие характерные для большинства сушилок недостатки.

1. Неэффективное использование энергии акустических колебаний, создаваемых в технологическом объеме при помощи газоструйного преобразователя, обусловленное тем, что акустическое воздействие осуществляется вдоль поверхности высушиваемого материала. Хотя известно, что максимальная эффективность акустического воздействия обеспечивается при перпендикулярном воздействии. По этой причине снижается эффективность сушки глубоких слоев материала и возникает необходимость размещения высушиваемого материала в тонких слоях.

2. Неравномерное высушивание материала, обусловленное различной удаленностью участков высушиваемого материала от источника ультразвуковых колебаний. Известно, что процесс сушки ускоряется лишь при высоких уровнях звукового давления и существует "критический уровень звукового давления", до которого ультразвуковая сушка ничем не отличается от обычной конвективной сушки (от 140 до 150 дБ). По этой причине возникает необходимость обеспечения достаточной для

эффективной сушки интенсивности колебаний (более 150 дБ) на самых удаленных участках сушилки. Это может обеспечиваться только увеличением интенсивности излучаемых газоструйным излучателем колебаний (более 150...170 дБ), что технически реализуется очень сложно, требует специальных мер защиты обслуживающего персонала от акустических колебаний.

3. Нерациональное использование энергии акустических колебаний в существующих сушилках объясняется отсутствием концентрации акустической энергии на высушиваемом материале. Энергия от газоструйного преобразователя (излучателя) распространяется равномерно по всему объему сушильной камеры и не концентрируется на высушиваемом материале. Многократные отражения от стенок сушильной камеры приводят к появлению стоячих волн. В процессе сушки, в объеме сушилки и на поверхности высушиваемого материала появляются участки с различной интенсивностью акустического воздействия. На некоторых участках интенсивность может быть меньше "критического уровня", что приводит к неравномерности сушки и снижению качества высушиваемого материала.

4. Возможность недопустимого для различных материалов поверхностного нагрева, обусловленная формированием высушенного поверхностного слоя ("поверхностной корки"), особенно той части высушиваемого материала, которая располагается вблизи источника ультразвуковых колебаний.

Все вышеперечисленные недостатки снижают эффективность акустической (ультразвуковой) сушки, обуславливают снижение производительности технологической операции сушки капиллярно-пористых материалов, а в некоторых случаях делают его экономически невыгодным или практически недопустимым (из-за возможного поверхностного нагрева).

Целесообразность возврата к решению проблемы

Ситуация в акустической и ультразвуковой технике за последние годы изменилась кардинальным образом.

С одной стороны - изменению ситуации способствовало решение ряда научно-технических проблем по созданию новых конструкций акустических и ультразвуковых излучателей, применению новых материалов, созданию высокоэффективных малогабаритных источников сжатого газа . С другой стороны - необходимость создания малогабаритных акустических сушилок обусловлена появлением большого числа малых предприятий, перерабатывающих сельскохозяйственную продукцию, фармацевтических предприятий, работающих с растительным сырьем.

Очевидно, что массовое внедрение мобильных, малогабаритных сушилок позволит приблизить перерабатывающую сферу к производственной и значительно повысить рентабельность производства. Кроме того, во многих случаях, обработка материала акустическими колебаниями высокой интенсивности благоприятно сказывается на физико-химических и потребительских свойствах высушиваемого материала (например, сохраняет вкусовые качества сельскохозяйственной продукции, увеличивает всхожесть семян и др.).

Повышение эффективности акустической сушки.

К сожалению очевидно, что эффективность ультразвуковой сушилки на всегда является достаточной и может быть можно существенно увеличена за счет комбинирования акустического способа сушки с какими либо другими способами.

Исследование существующих способов повышения эффективности акустической сушилки позволил предложить в дополнение к акустическому воздействию использовать метод " вакуумного удара". Поэтому, было предложено в анализируемой сушилке, акустическое воздействие чередовать с вакуумными импульсами, заключающимися в резком снижении давления в объеме с высушиваемом материале.

Проведенные исследования позволили установить, что резкое снижение давления вокруг материала приводит к возникновению дополнительной движущей силы сушки - нерелаксируемому градиенту общего давления. В

результате падения давления происходит бурное парообразование по всему объему высушиваемого материала, и формирующийся молярный поток выносит из материала вместе с паром и часть влаги в жидкой фазе. Таким образом, механизм сушки оказывается аналогичным механическому обезвоживанию посредством прессования или центрифугирования. Использование вакуумных ударов обеспечивает как интенсификацию процесса, так и значительную экономию энергии. Действительно, так как значительная часть жидкости удаляется из материала в жидкой фазе без испарения, то не тратится энергия на фазовое превращение.

Технически резкий перепад давления организуется следующим образом. С использованием вакуумного насоса понижается до заданного значения давление в большем объеме 2. Затем объем 1 разгерметизируют и давления в объемах 1 и 2 выравнивается в течение короткого интервала времени и в связи с тем, что объем 2 значительно превышает объем 1, высушиваемый материал подвергается резкому перепаду давления.

Связь между первоначальными давлениями в объемах и в суммарном объеме может быть найдено из уравнений Менделеева - Клапейрона, записанных для объемов и определяется следующей зависимостью:

$$P_{12} = \frac{P_1 V_1 + P_2 V_2}{V_1 + V_2} \quad (2.6), \text{ где}$$

P_{12} - суммарное для объемов 1 и 2 остаточное давление;

P_1 - давление в объеме 1;

P_2 - давление в объеме 2;

V_1 - объем 1;

V_2 - объем 2.

Таким образом, достижение требуемого остаточного давления может обеспечиваться либо регулировкой глубины вакуумирования в объеме 1 (P_1),

либо варьированием отношения объемов камер 1 и 2, так как $P_{12} \sim \frac{V_2}{V_1}$.

Основные параметрические показатели сброса давления (начальное давление, остаточное давление, продолжительность сброса) могут широко варьироваться в зависимости от физико-химических свойств объекта сушки.

2.3. Преимущества и особенности акустической сушки

Преимуществам являются, удаление влаги происходит практически без нагревания материала (такая сушка не разрушает ценные биологические вещества в продуктах питания, травах и т.п.) и скорость сушки, по сравнению с известными и используемыми на практике способами сушки, выше в 2-5 раз. Например, при сушке ферментов (разрушающихся при температуре в 40 °С) в акустическом поле, скорость сушки в сравнении с вакуумным методом повышается в 3-4 раза. Акустическая сушка позволяет добиться значительного сокращения энергетических затрат.

Существует нижняя граница интенсивности акустических колебаний (порядка 140- 150 Дб), при которой происходит резкая интенсификация процесса сушки в акустическом поле.

1. Отсутствует зависимость скорости сушки от частоты акустических колебаний в диапазоне от 2 до 25 кГц.

2. Наиболее эффективна акустическая сушка для тонких слоев (порядка 2-20 см).

3. Наряду с уменьшением пограничного слоя, акустическая сушка обладает еще одним преимуществом: на втором этапе сушки акустические колебания проникают в материал и создают в нем быстро сменяющиеся зоны повышенного и разряженного давления.

4. Скорость акустической сушки тем выше, чем выше интенсивность ультразвукового воздействия на высушиваемый материал, однако к.п.д. ультразвуковых излучателей не высок и, следовательно, наращивание интенсивности за счет увеличения мощности излучателя снижает экономический эффект способа.

Свидетельством интереса к проблемам акустической сушки может служить появление информации об возобновлении исследований в

различных организациях и все чаще выдвигаемые предложения по организации работ от различных предприятий (Для примера, выдержка из рекламного предложения института Теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск).

"В настоящее время Институт ищет партнеров для организации производства акустических сушилок. Первый этап - проектирование, изготовление и отладка опытно-промышленного образца. Все расходы по реализации первого этапа (10-15 тыс. долларов, срок 6-8 месяцев) должен взять на себя партнер --- <http://itam.nsc.ru/win/patent/susnhka.html> ").

Эта, наиболее широко рекламируемая сегодня работа представляет собой классическое решение проблемы (газоструйный излучатель и формирование тонких слоев продукта сетками).

Почему же до сих пор не было создано столь эффективных устройств, почему акустический способ сушки не получил широкого распространения и имеющиеся отечественные и зарубежные сушилки не вышли за пределы лабораторий?

Причин тому несколько.

Принято считать, что основная проблема, ограничивающая применение акустических сушилок обусловлена высокой стоимостью звуковой энергии.

Действительно, все акустические и ультразвуковые преобразователи, используемые в акустических сушилках (для излучения в газовые среды), обладают сравнительно низким к. п. д. В частности, мощные газоструйные излучатели имеют к.п.д. менее 25%. Учитывая довольно малую эффективность компрессоров, обеспечивающих излучатели сжатым газом (не более 75%), очевидно, что стоимость акустической энергии весьма высока.

Поэтому целесообразность применения резонансных газоструйных излучателей упирается, главным образом, в их недостаточную экономичность, и становится очевидной необходимость как совершенствования газоструйных излучателей, так и поиска новых источников акустической (ультразвуковой) энергии.

Вторая проблема заключается в том, что ультразвуковые сушилки развивались только применительно к решению проблем крупных серийных производств, а мелкосерийное применение ультразвуковых технологий до настоящего времени практически не рассматривалось. Поэтому никогда не ставились задачи создания малогабаритных, передвижных акустических сушилок.

2.4. Перспективы реализации акустической сушки.

Перспективы практической реализации акустической сушки связаны с необходимостью достижения некоторых параметров, без которых не возможно достижение требуемой эффективности акустической сушки.

Что же может сегодня позволить создать акустическую сушилку, достаточно эффективную и пригодную для практического использования.

1. В первую очередь, это решение вопроса по созданию высокоэффективного источника акустической энергии. И в этом направлении возможны несколько путей.

а) Совершенствование существующих и создание новых конструкций газоструйных излучателей наиболее эффективным будет применение многорезонансных газоструйных излучателей с широкой полосой излучаемых акустических колебаний (А.С. №1789301, 1993, Широкополосные ультразвуковые газоструйные излучатели. НТ сборник "Передовой производственный опыт". - М.: 1991, №6, с.25-27.).

б) Решение проблемы согласования пьезоэлектрических преобразователей с газовой средой (т.е., применение высокоэффективных пьезоэлектрических колебательных систем, питаемых от электронных генераторов), и создание ультразвуковых сушилок, в которых будет обеспечена высокая интенсивность ультразвуковой энергии ($10-20 \text{ Вт/см}^2$) при минимальных экономических затратах по А.С. №1295333, 1987, Патентам РФ №2141386, №2059239, 1996. При прочих равных условиях пьезоэлектрические преобразователи, питаемые от электронных генераторов, предпочтительнее ввиду их долговечности и предсказуемости параметров.

Однако, их КПД будет ниже чем у газоструйных, и при принятии решения о необходимости проведения работ с пьезоэлектрическими преобразователями и созданием на их основе колебательных систем, необходимо разработать специализированные электронные генераторы.

2. Вторая проблема заключается в создании рациональных конструкций. Под рациональной конструкцией понимается конструктивная схема сушилки, в которой акустическая энергия используется с максимальной эффективностью. Анализ разработанных ранее конструктивных схем акустических сушилок (барабанная, туннельная, вибрационно - транспортерная) свидетельствует о нерациональном использовании акустической энергии. Необходимо предложить и разработать конструкции, в которых высушиваемый материал находился бы длительное время в зоне максимальной интенсивности, и, желательно, сфокусированных ультразвуковых колебаний.

3. Следующие проблемы являются уже дополнительными и их решение поможет обеспечить требуемую эффективность сушки при создании практических конструкций.

- применение акустической сушки в сочетании с такими методами, как высокочастотный, инфракрасный, конвективный или другой, может привести к существенному повышению производительности применяемого оборудования.

- создание системы непрерывного контроля и управления процессом сушки (контроль интенсивности ультразвука, влажности высушиваемого материала, работы всего оборудования)

- создание системы акустической защиты обслуживающего персонала (со 170 дБ снизить излучение до допустимых 80 дБ). При этом возникает необходимость в расчете и создании специальных резонансных поглотителей. Должна быть разработана система контроля излучения на поверхности сушилки и автоматическое выключение при отказе акустической защиты.

Выводы по главе 2

В данной главе рассмотрена математическая описания процесса сушки в акустическом поле. Определен механизм воздействия акустических колебаний. Расчеты показывает, что во время сушки продуктов снижение давления вокруг материала приводит к возникновению дополнительной движущей силы. В результате падения давления происходит парообразование по всему объему высушиваемого материала, и формирующийся молярный поток выносит из материала вместе с паром и часть влаги в жидкой фазе. Таким образом, механизм сушки оказывается аналогичным механическому обезвоживанию посредством прессования или центрифугирования. Использование акустической сушки обеспечивает как интенсификацию процесса, так и значительную экономию энергии. Действительно, так как значительная часть жидкости удаляется из материала в жидкой фазе без испарения, то не тратится энергия на фазовое превращение.

3. ЭКСПРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Описание экспериментальных установок для исследования процесса сушки плодов

Исследование процесса сушки плодов моркови и тыквы под воздействием акустического колебания звукового - диапазона проведено на экспериментальной установке, общий вид которой представлен на рис.3.1.

Установка состоит из рабочей камеры 1, калорифера 2, асилографа 3 для измерения интенсивности акустического излучения, усилитель звука 4.

Компьютер 5 работающей с контрольно - управляющим программой параметрами выходящего сигнала из акустического излучателя 6 который расположен верхнюю часть камеры и одновременная регистрация в программе "excel" влияние количеств факторов на продукт и их ежеминутных показания. Постоянное измерение и автоматическая регистрация температуры продукта и рабочей среды в ходе предварительной обработки осуществляется электронными самопишущими потенциометрами 7 типа КСП-4 с первичными измерительными преобразователями в виде термопар и манометрическим термометром 8. Чувствительные элементы и провода термопар защищены экранами и термоустойчивыми защитными оболочками и фарфоровыми чашками. Перед каждой серией опытов термопары градуировались путем термостатирования в диапазоне температур $0 \div 3000\text{C}$. Под камерой установки устанавливается весы 9 ВЛКТ-500М, предназначенные для измерения масса обрабатываемого материала. В камере акустический излучатель помещен так, что позволяет изменять расстояние с обрабатываемым продуктом.

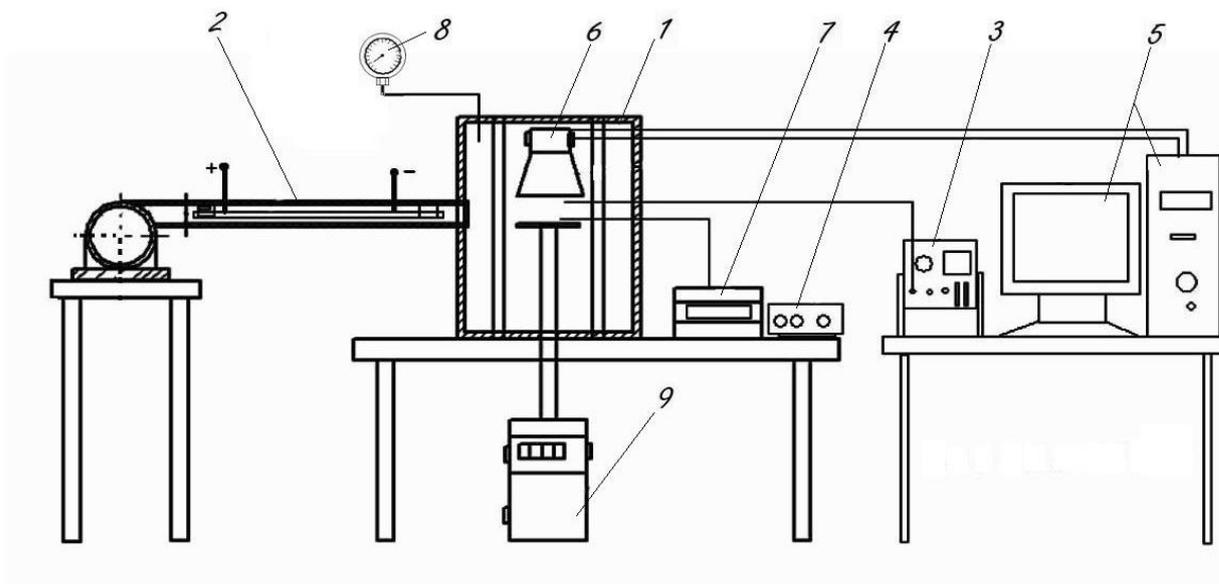


Рис.3.1. Схема лабораторно-экспериментальной установки для предварительной обработки сырья:

1 – камера; 2 – калорифер; 3 – измеритель интенсивности АК излучения ассилограф; 4 – усилитель звука; 5 – компьютер; 6 – АК излучатель; 7 – потенциометр КСП; 8 – манометрический термометр; 9 – весы ВЛКТ – 500;

Нагревательные устройства калорифера подключены к сети электропитания через ЛАТР, при помощи которого изменяется напряжение и, тем самым, регулируется температура и скорость входного воздуха. Для измерения напряжения и силы тока в сети установлены вольтметр и амперметр.

Для соблюдения норм техники безопасности, в схемах заземления всех контрольно-измерительных устройств предусмотрена блокировка, срабатывающая при открывании дверцы рабочей камеры, когда происходит автоматическое отключение всей установки.

Таким образом, лабораторная установка для предварительной обработки продукта с использованием АК-энергоподвода оснащена всей необходимой контрольно-измерительной и регулирующей аппаратурой. Это обеспечивает нам возможность изучать процессы внутреннего и внешнего тепло- и массообмена экспериментируемого продукта.

3.1.1 Применение акустических колебаний для обработки продуктов и материалов

Целый ряд основных и вспомогательных технологических процессов пищевых производств можно интенсифицировать с сохранением высокого качества продукции с помощью акустических методов воздействия звукового и ультразвукового диапазона упругих колебаний.

Некоторые возможности применения акустических методов показаны ниже.

Процесс	Продукты, материалы производства
Получение эмульсий	Смесь компонентов эмульсий:
Гомогенизация и диспергирование	жироводных, кондитерских, олеиновой кислоты и т. п.
Экстракция и диффузия	Молоко, мороженое, шоколад, детское питание, томат-паста, майонез, соки, известковое молоко
Кристаллизация	
Сушка	Хмель, душистые вещества, кофе и т. п.
Созревание	Вино, виноградный сок
Клеровка	Ферменты, гормоны, плесневые грибы, дрожжи, витамины
Пеногашение	Ликеры, вина, коньяки.
Охлаждение	Сахарное производство
Распыление, в том числе в вакууме	В производствах сахара, дрожжей, ферментов, спирта и т. п.
Мойка и очистка	Колбасное производство
Предохранение от накипи и инкрустаций	Сушка жидких продуктов, в том числе сублимационная
	Фигурная стеклотара, сильно загрязненная стеклотара, различные узлы оборудования и т. п.

Дегазация	Теплообменная аппаратура:
Стерилизация	подогреватель, нагреватели, выпарные аппараты, котлы низкого давления и т. п.
Осветление	Вина, вино материалы
Замораживание	Молоко, консервы, фруктовые соки
Увлажнение	Вино, соки
Сварка	Молоко
	Зерно
	Упаковка в полимерную тару всех видов
Получение тонкодисперсных аэрозолей	продуктов, соединение пластмассовых деталей с металлическими и т. п.
	В сельском хозяйстве, в медицинских и ветеринарных целях

Акустические методы различаются техническими средствами генерации колебаний, причем низкочастотная техника в большинстве случаев отличается простотой, однако ее возможности не всегда достаточны для осуществления некоторых процессов. Ультразвуковая техника в случае электрической системы генерации более сложна, но имеет большие энергетические и соответственно технологические возможности.

3.1.2. Акустические характеристики пищевых продуктов и материалов

Основными характеристиками акустического поля являются: частота упругих колебаний, скорость звука, амплитуда, волновое или удельное акустическое сопротивление среды и их производные - звуковое давление, интенсивность (или сила) звука, колебательная скорость и ряд других (табл. - 1). Кроме того, в средах происходит поглощение энергии волны, ее отражение и преломление. При воздействии на жидкие среды, как правило, достигается кавитационный режим обработки. При воздействии на твердые

изотропные тела в них могут возникнуть несколько форм упругой волны: продольные, поперечные, изгибные и ряд других.

Акустические колебания подразделяются на следующие диапазоны: инфразвуковой 0-20 Гц; звуковой 20 – 2*10⁴ Гц; ультразвуковой 2*10⁴— 10⁸ Гц; гиперзвуковой >10⁸ Гц.

Источниками ультразвуковых колебаний являются различные колеблющиеся системы, преобразующие электрическую или механическую энергию в упругие колебания.

Гармонические колебания частиц в звуковой волне описываются уравнением

$$a = A \sin \omega (t - x/c),$$

где a — смещение частицы относительно положения покоя, мкм; A — амплитуда смещения, мкм; ω — угловая частота, рад/с; t — время, с; x — расстояние частицы от излучающей поверхности, см; c — скорость звука, см/с.

Дифференцированием уравнения (1) определяется амплитуда колебательной скорости U_m частиц и ускорения B_m :

$$U_m = \omega A;$$

$$B_m = \omega^2 A;$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота.

Распространение ультразвуковых волн не связано с переносом вещества; общая энергия волны равна сумме потенциальной и кинетической энергии.

$$E = \left(\frac{1}{2}\right) \rho \omega^2 A^2,$$

где ρ — плотность среды.

Относительно хорошо (в зависимости от частоты звука и вязкости среды) ультразвук распространяется в жидкостях и еще лучше—в твердых телах.

*Основные параметры звукового поля бегущей волны в различных средах при
разных значениях силы звука*

Параметры	В воздухе при силе			В воде при силе			В стали при силе		
	звука, Вт/см ²			звука, Вт/см ²			звука, Вт/см ²		
	0,1	1	10	0,1	1	10	0,1	1	10
Плотность энергии, Дж/м ³	3,03	30,3	303,0	0,674	6,74	67,4	0,17	1,71	17,1
Звуковое давление p , МПа	0,00009	0,0029	0,0092	0,054	0,17	0,54	0,308	0,96	3,08
Давление излучения, Па	5,97	59,7	597,0	1,35	13,5	135,0	—	—	—
Колебательная скорость, см/с	216,5	685	2165	3,67	11,6	36,7	0,66	2,09	6,62
Амплитуда колебаний, A , мкм									
при 20 кГц	17,2	54,5	172	0,29	0,92	2,92	0,053	0,166	0,527
при 200 кГц	1,7	54	17,2	0,03	0,09	0,29	0,005	0,017	0,053
при 2000 кГц	0,2	0,5	1,7	0,003	0,009	0,03	0,0005	0,002	0,005
Амплитуда ускорения, B , см/с ²									
при 20 кГц	$2,7 \cdot 10^7$	$8,6 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^8$	$4,6 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^6$	$4,6 \cdot 10^6$	$8,3 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^5$	$8,3 \cdot 10^5$
при 200 кГц	$2,6 \cdot 10^8$	$8,6 \cdot 10^8$	$2,7 \cdot 10^9$	$4,6 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^7$	$4,6 \cdot 10^7$	$8,3 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^6$	$8,3 \cdot 10^6$
при 2000 кГц	$2,7 \cdot 10^9$	$8,6 \cdot 10^9$	$2,7 \cdot 10^{10}$	$4,6 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$	$4,6 \cdot 10^8$	$8,3 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^7$	$8,3 \cdot 10^7$

Произведение ρc является удельным акустическим сопротивлением среды и основным параметром, характеризующим свойства среды по отношению к проходящей через нее волне:

$$\rho c = \rho/u,$$

где p — эффективное значение звукового давления; u — колебательная скорость звука.

Для достижения эффекта обработки пищевых сред необходима определенная интенсивность звука (сила звука), характеризуемая как энергия звуковых колебаний, проходящая нормально к поверхности через единицу площади в 1 с.

Интенсивность звука определяется формулой

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

Иногда, особенно для слышимых звуков, величина интенсивности I оценивается по отношению к величине предела слышимости человеческого уха, т.е. определяется уровень силы звука, который измеряется в децибелах (дБ). $1 \text{ дБ} = 10 \lg(I/I_n)$, где I_n — предел слышимости, равный 10^{-12} Вт/м^2 .

Давление p , который изображено в формуле определяет при невысокой интенсивности, т. е. интенсивности, недостаточной для кавитации жидкости, можно измерить с помощью пьезочувствительных датчиков. При высокой интенсивности мощность, излучаемая преобразователем, измеряется калориметрическим путем по величине нагрева обрабатываемой среды.

В ультразвуковом поле в жидкости при действии источника звука высокой интенсивности возникают сверхвысокие ускорения частиц и кавитация в жидкости

3.2. Массовлагодобменные характеристики сельскохозяйственных продуктов

Значительная часть сельскохозяйственных продуктов подвергаемых сушке, являются влажными коллоидно-капиллярно-пористыми системами. Для определения рациональных режимов сушки используются изотермы сорбции и десорбции [1].

Исследованы изотермы десорбции тыквы в зависимости влияющих факторов. Определена конечная влажность исследуемого продукта,

достигаемая при различных температурах и относительной влажности воздуха. Изучены формы связи влаги с продуктом.

Характер изотерм сорбции и десорбции зависит от вида связи влаги с материалом. В гигроскопической области связь влаги зависит от структуры и свойств материалов.

В процессе удаления влаги с изменением условий сушки, окружающей среды, температуры, давления и т.д. условия равновесия изменяются. При этом градиент влагосодержания в продукте и дисперсной среде обуславливает перенос влаги изнутри плода к ее поверхности и испарению в окружающую среду.

Закономерность переноса влаги в процессе сушки сельскохозяйственных продуктов определяется характером взаимодействия молекул воды с их структурой. Перемещение влаги в овощах обусловлено наличием в них градиента потенциала переноса. Следовательно, потенциал переноса охватывает явления переноса тепла и перемещения влаги, и величина переноса увязывается с энергией связи влаги с материалом. Необходимо подчеркнуть, что всякий перенос жидкости и пара во влажном материале происходит от высшего к низшему потенциалу.

Массообменные характеристики овощей определяет интенсивность переноса влаги, а теплофизические характеристики – интенсивность переноса тепла.

Таким образом, перенос тепла характеризуется градиентом температуры $\nabla \theta$, потоком теплоты $\bar{q} = -\lambda \nabla \theta$ и коэффициентом температуропроводности $a = \lambda / (c \rho)$, а перенос массы (влаги) определяется градиентом потенциала вещества (влагосодержания) ∇U , потоком массы (влаги) $q_m = -(\lambda_m / c_m) \cdot \nabla U = -(\lambda_m \cdot / (c_p \rho_o)) \cdot \rho_o \cdot \nabla U = -Q_m \rho_o \cdot \nabla U$, коэффициентом массопереноса (диффузии влаги) $a_m = \lambda_m / (c_m \cdot S_o)$.

В работах ряда ученых [2,3] рассмотрены гигроскопические свойства различных видов плодовоовощных культур.

Однако в настоящее время внедрение в производство современных нетрадиционных методов обработки и способов сушки овощей с получением новых продуктов требует исследования и математического описания гигроскопических свойств исследуемого материала. Следует отметить, что сельскохозяйственные культуры, выращенные в Средней Азии, отличаются по свойствам и структуре от выращенных в других регионах. В связи с чем при воздействии нетрадиционных методов переработки протекают процессы, которые приводят к изменению клеточной структуры овощных культур. Поэтому для получения высококачественных сушеных продуктов, а также для длительного их хранения необходимо изучить массовлагодобменные характеристики и гигроскопические свойства последних.

С целью определения равновесной влажности сельскохозяйственных продуктов проведены эксперименты в климатической камере “Фойтрон”.

При этом образцы находятся в потоке воздуха определенной влажности. Заданная концентрация паров воды обеспечивается серной кислотой различной концентрации. После достижения равновесия образцы взвешиваются, и определяется их влагосодержание. Равновесие считалось достигнутым, если масса образца не изменялась на 0,0005 г. Все точки изотермы снимали для одного и того же образца. Контроль и запись влажности воздуха осуществлялись в пределах от 10 до 70 %, а температура среды от 20 до 60 °С в камере регулируется автоматически. При этом погрешность измерения температуры камеры составляла $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Постоянство температуры точки росы поддерживается с точностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

В настоящее время отсутствует полностью разработанная теория, описывающая изотермы сорбции и десорбции, поэтому нельзя дать аналитического решения зависимости равновесного влагосодержания от относительной влажности воздуха для коллоидных капиллярно-пористых тел. В связи с этим значительный интерес представляют уравнения изотермы

сорбции и десорбции, полученные путем математической обработки опытных данных.

Г.К.Филоненком предложено математическое описание изотерм сорбции и десорбции, которые описываются уравнениями:

$$W_{p1} = \frac{a + \varphi}{K}; \quad W_{p2} = \frac{B \cdot (\varphi - \varphi_m)}{b - (\varphi - \varphi_m)} + \varpi_m,$$

где a и b – коэффициенты, характеризующие вид материала

K и B – коэффициенты, определяющие зависимость равновесного влагосодержания от вида материала и температуры окружающей среды на соответствующих участках изотерм; φ_m и ϖ_m – равновесные параметры в точках сопряжения прямолинейного и криволинейного участков изотерм.

В реальной сушке, материала влага мономолекулярной адсорбцией не удаляется. Поэтому в нашем исследовании изотермы на участке переходе от мономолекулярной к полимолекулярной адсорбции не изучены.

Процесс изотермы десорбции изучены для продуктов на образцах тыквы и плодах абрикоса и персика.

Результаты проведенных исследований изотерм десорбции тыкву полученных при различной температуре ($t=20-60^{\circ}\text{C}$) показаны на рис. 1. Из рис.1 видно, что для тыквы и большинства других сельскохозяйственных продуктов равновесное влагосодержание с повышением температуры уменьшается.

Судя по графикам, изотермы десорбции овощей имеют типичную для коллоидных капиллярно-пористых материалов – «S» образную форму.

В результате обработки опытных данных и на основе методики Г.К. Филоненко и А.И. Чуприна и с помощью программы «MATLAB» для математического описания процесса, отражающего связь между равновесной влажностью овощей, относительной влажностью воздуха и температурой, было получено уравнение изотермы десорбции:

$$W_p = \left(\lg \frac{1}{1-\varphi} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (m - n \cdot t).$$

Коэффициенты m и n определяются для каждого вида продукта, например для тыквы $m = 43,5$, $n = 0,4$.

В табл. 3.1 представлены данные равновесного влагосодержания сельскохозяйственных продуктов, полученные путём экспериментальных исследований

Таблица 3.1

Равновесное влагосодержание образцов сельскохозяйственных продуктов

Продукты	t, °C	Относительная влажность воздуха, φ					
		20	30	40	50	60	70
Тыква	20	10,6	13,2	16,2	19,6	24,3	31,1
	25	8,2	11,3	14	17,5	21,5	26,1
	60	5,6	7,2	9,2	13,8	16,8	18,6
Лук	25	9,3	12,1	14,8	17,6	23,8	27,5
Персик	25	7,3	10,1	12,5	15,9	19,8	24,5
	60	5,1	6,5	8,3	12,0	15,0	16,8
Дыня	25	10,8	15,7	17,1	19	22,1	26,7
	60	8,3	11,8	14,6	16,4	20,8	24,3

Из результатов приведенных в табл. 1 видно, что для тыквы и других продуктов равновесное влагосодержание с повышением температуры уменьшается.

Однако, рядом исследованием нами было выяснено, что кривые изотерм не имеют четких границами перехода от одного состояния к другому. Примерно эта граница для тыквы и других продуктов в области гигроскопического состояния при комнатной температуре ($t=20-25$ °C) отражена в табл.3.1.

Граница перехода изотерм сорбции

Образцы продуктов	Вид связи		
	мономолекулярная адсорбция, %	Полимолекулярная адсорбция, %	Капиллярная связанная влага, %
Дыни	2	18	55 [3]
Лук	3,5	19	57
Тыква	4	16	51

Результаты исследования необходимы для практики сушки, так как позволяют:

-определить конечную влажность продуктов при различных температурах и относительной влажности воздуха, а также при различных способах обработки;

- изучить формы связи влаги с продуктом.

3.3. Исследование инфракрасного и акустического сушильного аппарата для интенсификации процесса сушки сельскохозяйственных продуктов

В данной разделе изложены, результаты исследований инфракрасно – акустической сушки. Разработана лабораторная сушильная установка для проведения экспериментов по сушке различных сельхозпродуктов, представлены результаты предварительных экспериментов по сушке тыквы. Для обеспечения оптимальной распределённости акустических волн в сушильной камере выбрана специальная форма отражателей, что позволяет сконцентрировать акустические волны по всей поверхности материала.

В настоящее время процесс переработки сельхозпродуктов является проблема увеличения срока хранения и сохранения ценных компонентов. В связи с этим процесс сушки является основным процессом в сельском хозяйстве. Известно, что сушка – заключительная стадия большинства технологических процессов, которая связана с получением готового продукта для его длительного хранения. В настоящее время наибольшее

распространение получила конвективная сушка. Однако, конвективная сушка неразрывно связана с повышением температуры высушиваемых материалов, что в некоторых случаях приводит к потере ценных компонентов готового продукта.

Возможным вариантом для интенсификации процесса сушки плодов сельскохозяйственных культур является замена или дополнения к конвективному способу сушки акустическим воздействием. Предлагаемый способ акустической сушки имеет следующие достоинства: высокая интенсивность процесса, обеспечение качественной и эффективной сушки при низких температурах, а также действующие факторы - ускоренное перемещение влаги из глубины материала на поверхность, турбулизация и снижение толщины пограничного слоя, перепады давления над поверхностью, выдавливание влаги из капилляров [1].

Для исследования процесса акустической сушки абрикоса, моркови, тыквы и др. продуктов нами разработана экспериментальная установка (рис. 1). Установка состоит из корпуса 1, верхнего и нижнего отражателя 2, пода 3, АК-излучателя 4, механизма для вывода паро-воздушной смеси 5, станины 6, механизма для подачи воздуха 7, ИК-излучателя 8.

Для максимального отражения акустических волн на поверхности высушиваемого материала установлены отражатели, нижний и верхний отражатели установки изготовлены в тороидальной форме. Использование тороидальной формы отражателей для сушки позволяет сконцентрировать акустическое воздействие за счет многократных отражений на поверхности высушиваемого материала [2].

Ряд исследований показывает, что акустическая сушка является всегда приемлемым методом и можно существенно его улучшить за счет комбинирования акустического способа сушки с каким - либо другим способом [3]. Исследование существующих способов нам позволило предложить в дополнение к акустическому воздействию использование метода вместе с ИК-излучениями. Поэтому было предложено в

анализируемой сушилке акустическое воздействие чередовать с ИК-излучениями импульсным воздействием, заключающимся в ускорение перемещения влаги с внутренних слоев материала на поверхность. Проведенные исследования позволили установить, что повышение давления внутри материала приводит к возникновению дополнительной движущей силы процесса сушки. В результате повышения давления происходит бурное парообразование по всему объёму материала, и образовавшийся молярный поток выдавливает влагу из капилляров. Таким образом, ИК- импульсное воздействие обеспечивает, как интенсификацию процесса, так и значительную экономию энергии. Для подтверждения эффективности ИК-АК сушки и определения их функциональных возможностей проведен ряд исследований.

Предлагаемая камера сушильной установки выполнена в виде цилиндра (рис.1), в центре камеры установлен дисковой излучатель, ИК-излучатели расположены под углом 45° . Мощность дисковых излучателей составляет 200 Вт, частота 22000 Гц, мощность ИК – излучателя 500 Вт. Непосредственно перед проведением опытов, связанных с исследованием инфракрасно-акустической сушки, были проведены измерения распределения звукового давления внутри сушильной камеры.

При проведении экспериментальных исследований в ИК-АК поле высушиваемый материал размещался на сетчатом поде на расстоянии 300 мм от излучателей. Интенсивность излучения над поверхностью пода составляла 155 дБ. Температура в сушильной камере $40-45^{\circ}\text{C}$, длина волны ИК-излучения 2,8 мкм. Для проведения экспериментов была взята тыква нарезанная в форме кубиков с толщиной $2\div 4$ мм. Начальная влажность тыквы составляла 76%. Кривые изменения влагосодержания и скорости сушки тыквы представлены на графиках 2 а,б.

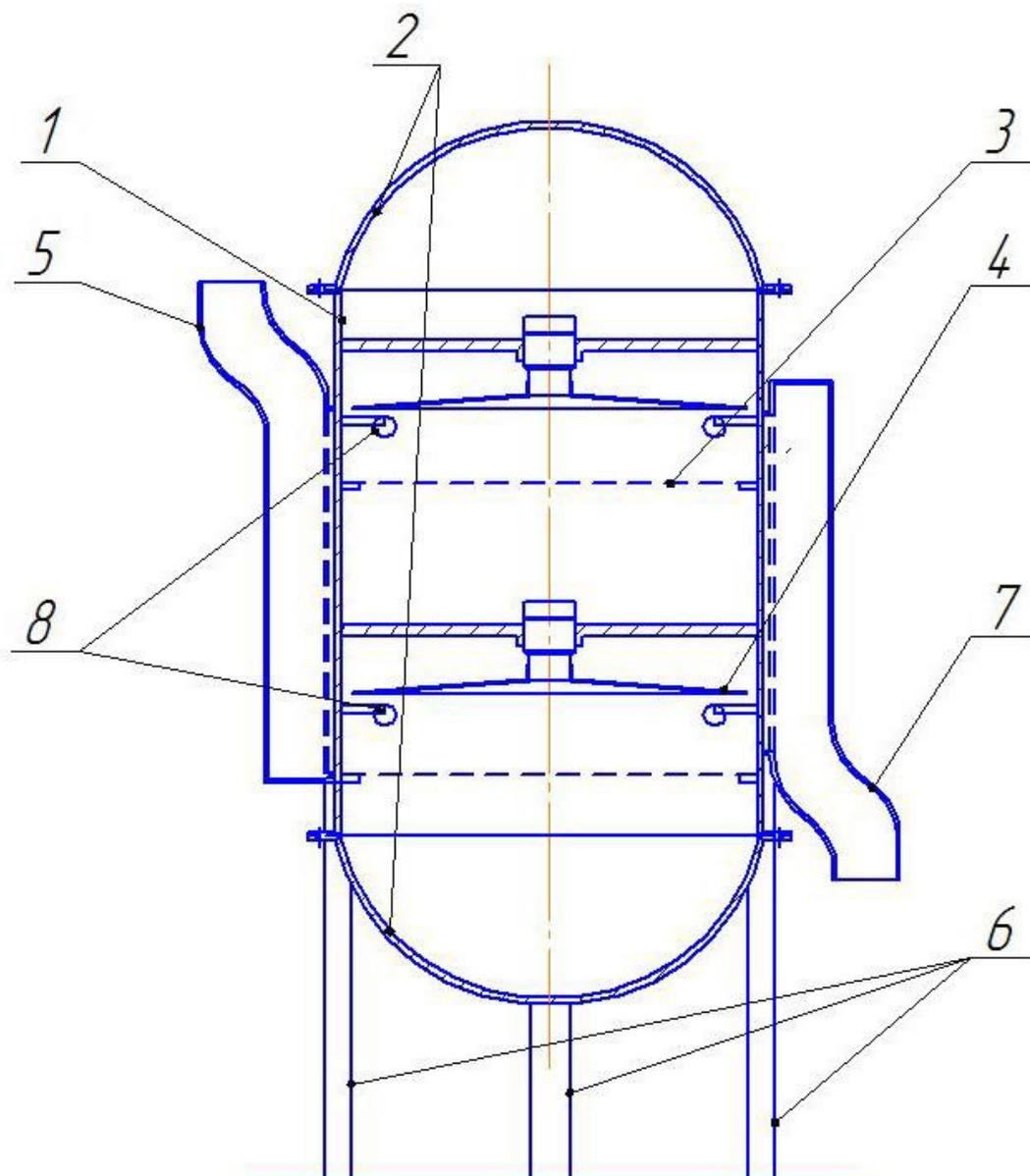


Рис. 3.1. Инфракрасно- акустическая сушильная установка

Из графика 3.2 а видно, что в течение 160 мин влажность материала при толщине материала 4 мм уменьшалась с 76 до 25%., а при толщине 2 мм конечная влажность составляла 18%. Однако, применение только ИК сушки по истечении некоторого времени после начала процесса поверхность материала покрывается тонкой сухой корочкой, что замедляет удаление влаги, а применение комбинированной ИК-АК сушки позволяет на поверхности материала появлению микротрещин, что увеличивает скорость сушки рис.3.2 б.

По полученным данным было проведено сравнение ИК-АК сушки с тепловой сушкой. КПД аппарата составляет 60%, излучаемая акустическая мощность рассчитывалась по следующей формуле . Мощность ИК-излучателей 500 Вт, КПД излучателя 40% .

Мощность тепловой сушилки 1000Вт [1]. Время ИК-АК сушки 160 мин, а тепловой сушки 50 мин.

Эффективность рассчитывалась согласно следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{N \cdot t}{m} \quad (1)$$

где N – излучаемая мощность, t- общее время сушки, m-масса удалённой влаги.

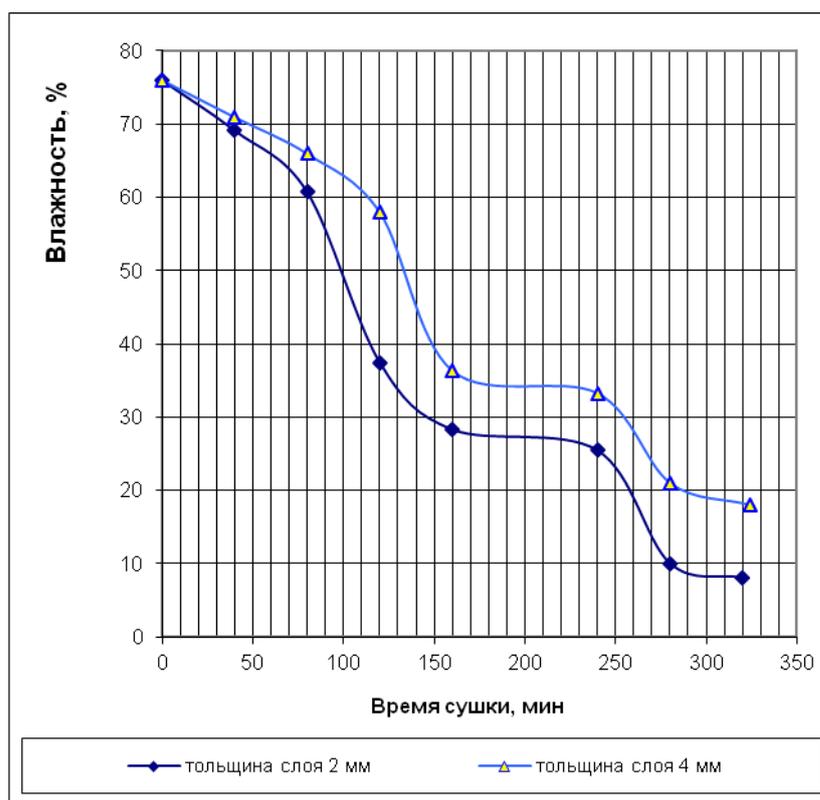


Рис.3.2а. Кривые сушки тыквы при различных толщинах слоя

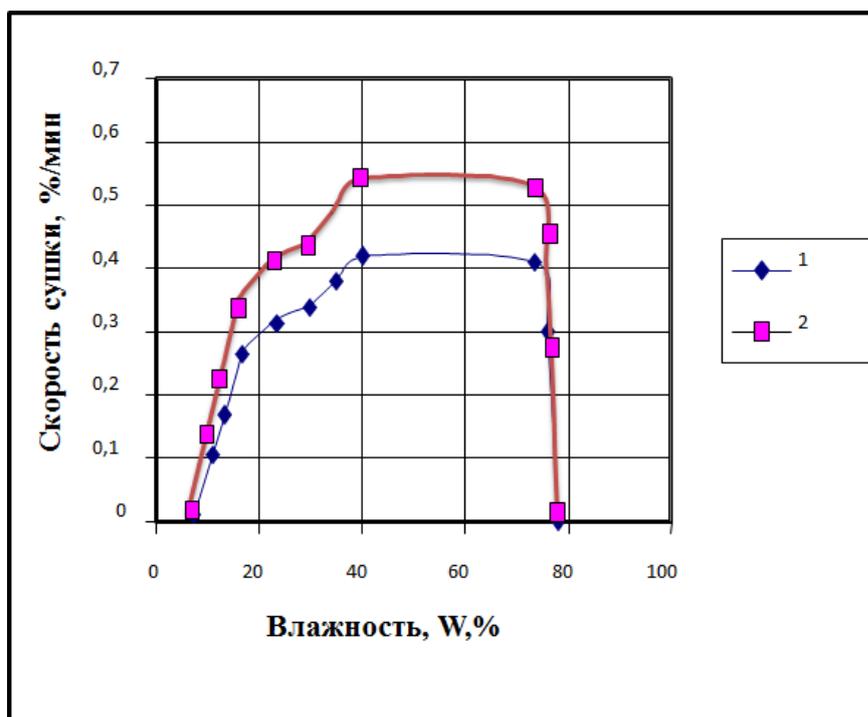


Рис.3.26. Кривая скорость сушки тыквы

1-при толщине слоя 4мм; 2- при толщине слоя 2мм;

Таким образом согласно формуле (1) показатель эффективности для ИК-АК сушки составил: , а для тепловой сушки: $351,3 \frac{\text{Вт} \cdot \text{мин}}{\text{г}}$.
Предлагаемый способ ИК-АК сушки эффективен чем тепловая в 2,2 раза.

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы:

- для сушки плодов сельскохозяйственных культур необходимо использовать комбинированные сушилки (инфракрасно – акустические) с оптимальным соотношением доли инфракрасной и акустической энергии;
- разработана и изготовлена лабораторная установка инфракрасно-акустической сушильной камеры цилиндрической формы;
- с уменьшением толщины пограничного слоя предлагаемый метод сушки обладает важным преимуществом - колебания проникают в материал и создают в нем быстро сменяющиеся зоны повышенного и пониженного давления, что интенсифицирует процесс переноса влаги из глубинных слоев к поверхности во второй зоне сушки.

Выводы по главе 3

На основе экспериментальных данных исследовано процесс сушки тыквы в АК поле. Определены оптимальные параметры влияющих факторов.

По результатам исследований, видно что наиболее эффективная сушка осуществляется для тонких слоев (порядка 2-мм). Наряду с уменьшением толщины пограничного слоя, предлагаемый метод сушки обладает еще одним важным преимуществом - колебания проникают в материал и создают в нем быстро сменяющиеся зоны повышенного и пониженного давления, что интенсифицирует процессы переноса влаги из глубинных слоев к поверхности. Скорость сушки по сравнению с известными и используемыми на практике способами выше в 2 – 5 раз. Акустическая сушка позволяет значительно сократить энергетические затраты.

Список литературы

1. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков; Алт.гос.техн.ун-т, БТИ.- Бийск: Издательство Алт.гос.техн.ун-та, 2010.-203с.
2. Джураев Х.Ф., Хабибов Ф.Ю, Абдурахмонов О.Р., Массовлагодобменные характеристики сельскохозяйственных продуктов.//Ж. «Научная жизнь», М.:2012, №2-С.128-132.
3. Устройство для сушки капиллярно – пористых сыпучих материалов [Текст]: пат. 20957. Российская Федерация: МПК⁶ F26B17/12/ В.Н. Глазнев; заявитель и патентообладатель Институт теоретической и прикладной механики СО РАН.-№95107580; заявл.11.05.95; опуб.10.11.97.
4. Л. Д. Розенберг, Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – 689 с.
5. S. Fuente-Blanco, E. Riera-Franco de Sarabia, V.M. Acosta Aparicio, A. Blanco-Blanco, J.A. Gallego-Juarez. Food drying process by power ultrasound. Ultrasonics, Elsevier USA, 2006, 44. – P. 523–527.
6. Глазнев В.Н. Устройство для сушки капиллярно-пористых сыпучих материалов. Патент РФ № 2095707
7. В. Н. Хмелев, Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов [и др.]. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – 416 с.
8. В. Н. Хмелев, Ультразвуковое оборудование для интенсификации химико-технологических процессов [Текст] / В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, М. В. Хмелев, С.Н. Цыганок // Энциклопедия инженера-химика. – 2010. – № 6. – С.7-11.
9. Хмелев, В. Н., И. И. Савин, Д. С. Абраменко, С. Н. Цыганок, Р. В. Барсуков, А. Н. Лебедев. Исследование процесса акустической сушки белья в макетном образце стиральной машины барабанного типа [Текст] / International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials

EDM'2006: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2006.

10. Gallego J. A. Juares, Rodríguez G. Corral, Acosta V.M. Aparicio, G. E. Andrés, A. Blanco, F. Montoya, "Ultrasonic Defoaming System Using Emitters Comprising A Stepped Vibrating Plate," Spanish Patent 200202113 (2002).

11. В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок, А. Н. Лебедев. Исследование эффективности ультразвуковой сушки. Электронный журнал "Техническая акустика", <http://ejta.org>, 2009, 6.

12. Л. Д. Розенберг Физические основы ультразвуковой технологии. М.: Наука, 1969. –689 с.

13. S. de la Fuente-Blanco, E. Riera-Franco de Sarabia, V. M. Acosta-Aparicio, A. Blanco-Blanco, J. A. Gallego-Juarez. Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, Elsevier USA, 2006, 44, p. 523–527.

14. Глазнев В. Н. Устройство для сушки капиллярно-пористых сыпучих материалов. Патент РФ № 2095707.

15. E. Riera-Franco de Sarabia, J. A. Gallego-Juarez, G. Rodríguez-Corral, V. M. Acosta-Aparicio, E. Andrés-Gallegos. Application of high-power ultrasound for drying vegetables. 19th International Congress on Acoustic, Madrid, Spain, 2007.

16. В.Н. Хмёлев, А.В. Шалунов и др. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности. Барнаул: АлтГТУ, 2007. 416 с.

Использованные сайты

1. www.google.com.ru
2. www.yandex.ru
3. www.yahoo.com
4. www.atkall rights ressedrved.com
5. WWW.UZ

Milliy ma'lumot qidiruv tizimi. Ushbu portalda internet saytlar katalogi mavjud.

6. Ziyonet.uz

ZiyoNET axborot ta'lim tarmog'i yoshlarni, murabbiylarni, shuningdek aholining turli qatlamini kerakli axborot bilan taminlash, AT sohasida kerakli ma'lumotlarni berish, muloqot qilish va tajriba almashinishlari uchun zarur imkoniyatlarni yaratib berishni o'z zimmasiga oladi.

7. Txt.uz

Elektron kitoblarning kutubxonasi. Komp'yuter adabiyoti fan va ta'lim. Texnik nashrlar. Uy va oila o'chog'i. Badiiy adabiyot. Jurnallar.

8. Uzsci.net

UzSciNet ilmiy va ta'lim tizim sayti

9. www.rambler.ru
10. www.mail.ru
11. www.google.ru