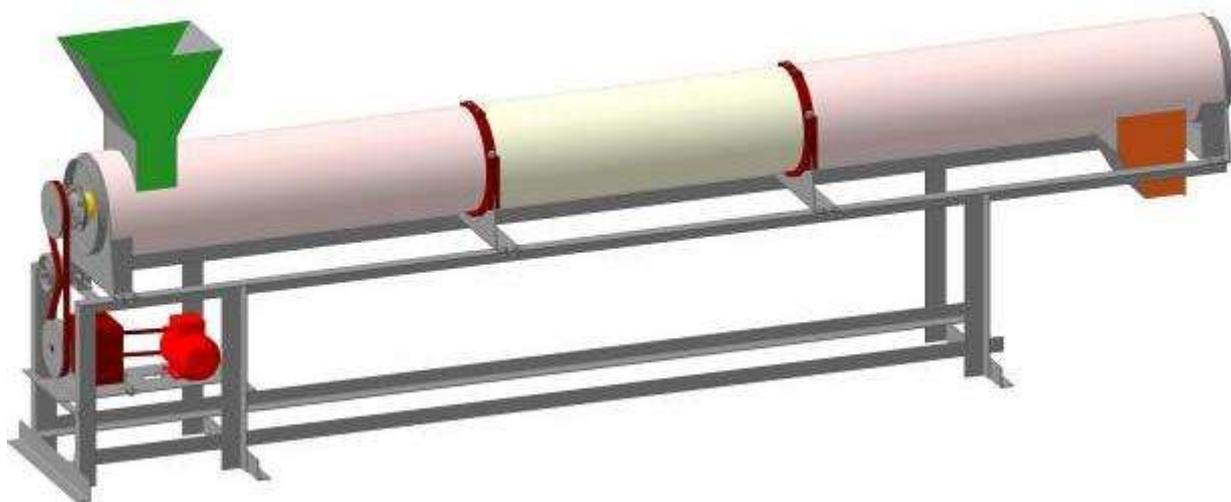


**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина»

**В.И. КУРДЮМОВ, А.А. ПАВЛУШИН,
Г.В. КАРПЕНКО, С.А. СУТЯГИН**

**ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА
В УСТАНОВКАХ КОНТАКТНОГО ТИПА**



Ульяновск - 2013

УДК 631.365

ББК 36

Курдюмов. В.И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин. - Ульяновск: УГСХА имени П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.

Рецензенты:

В.Ф. Некрашевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, заведующий научно-исследовательской лабораторией энергоресурсосберегающих технологий и средств механизации в растениеводстве и животноводстве, ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева»;

М.Н. Чаткин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины им. профессора А.И. Лещанкина» института механики и энергетики, ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва».

В монографии рассмотрены процессы тепловой обработки зерна, в частности, сушки зерна. Изложена подробная классификация средств механизации данных процессов.

Выполнен анализ конструктивных особенностей наиболее распространённых установок для сушки зерна. Представлены теоретические и эмпирические зависимости, отражающие влияние основных действующих факторов на эффективность процесса сушки зерна.

Обоснованы оптимальные режимы процессов тепловой обработки зерна и конструктивные параметры установок контактного типа.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, аспирантов и студентов агроинженерного профиля подготовки.

Печатается по решению научно-технического совета
ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина».
Протокол № 3 от 25 июня 2013 года.

ISBN 978-5-905970-22-1

© Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Карпенко Г.В., Сутягин С.А., 2013
© ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина», 2013

СОДЕРЖАНИЕ		стр.
ВВЕДЕНИЕ.....		5
1 ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ.....		7
1.1 Технологии и средства механизации тепловой обработки зерна.....		7
1.2 Особенности процесса сушки зерна.....		17
1.2.1 Свойства зерна и зерновой массы как объекта сушки.....		17
1.2.2 Анализ способов сушки зерна.....		30
1.3 Требования, предъявляемые к зерносушильной технике.....		39
1.4 Анализ конструкций и классификация средств механизации сушки зерна.....		41
1.5 Условия и режимы сушки зерна.....		87
1.5.1 Особенности сушки зерна и семян в зерносушилках различных конструкций.....		87
1.5.2 Особенности сушки зерна различных культур.....		97
1.6 Исторические этапы развития теории сушки зерна и конструкций зерносушилок.....		106
Заключение.....		114
2 КОНЦЕПТУАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗЕРНОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК КОНТАКТНОГО ТИПА.....		118
2.1 Основы проектирования зерносушильных установок.....		118
2.2 Основы системного анализа и моделирования процессов сушки зерна и зерносушильных установок.....		127
2.3 Методы исследования процесса сушки зерна.....		131
Выводы.....		140
3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА.....		141
3.1 Основы статики и кинематики процесса сушки зерна.....		141
3.2 Механизм воздействия теплоты на зерно.....		150
3.3 Механизм тепловлагообмена в процессе сушки зерна.....		154
3.3.1 Перемещение влаги внутри зерновки.....		155
3.3.2 Испарение влаги с поверхности зерна.....		159
3.4 Аналитические аспекты процесса тепловлагопереноса при контактной сушке зерна.....		170
3.4.1 Физическая интерпретация процесса сушки зерна.....		171
3.4.2 Температурное поле в зерновом материале в первый период сушки...		174
3.4.3 Температурное поле в зерновом материале во второй период сушки..		177
3.5 Материальный и тепловой баланс сушилки. Определение затрат энергии на процесс сушки зерна.....		181
3.6 Методы определения интенсивности сушки.....		183
Выводы.....		186

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА В УСТАНОВКАХ КОНТАКТНОГО ТИПА.....	187
4.1 Конструктивно - технологические схемы установок контактного типа для тепловой обработки зерна и принцип их работы.....	187
4.2 Исследование процесса тепловой обработки зерна в лабораторных условиях.....	194
4.2.1 Программа и методика исследований установок контактного типа для тепловой обработки зерна.....	194
4.2.2 Методика обработки результатов основного эксперимента.....	196
4.2.3 Реализация плана эксперимента и его результаты.....	198
4.3 Исследование процесса тепловой обработки зерна в производственных условиях и его экономическая эффективность.....	228
4.3.1 Программа и методика исследований.....	228
4.3.2 Результаты исследований установок для тепловой обработки зерна в производственных условиях.....	229
4.3.3 Экономическая эффективность процессов тепловой обработки зерна в предлагаемых установках для тепловой обработки зерна.....	235
4.3.4 Особенности эксплуатации разработанных УТОЗ.....	236
Выводы.....	238
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	239
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	242
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	259

ВВЕДЕНИЕ

Значение тепловой обработки в сельскохозяйственном производстве огромно. Нет такой отрасли сельского хозяйства, в которой не применялась бы обработка материалов теплотой.

В настоящее время примерно 15 % от всего потребления энергии в агропромышленном комплексе развитых стран приходится на процессы тепловой обработки сельскохозяйственных материалов. Поэтому проблема снижения энергоёмкости этих процессов актуальна во всем мире.

Несоответствие имеющейся технической базы условиям сельскохозяйственного производства (различные формы собственности, действие рыночных механизмов) обуславливает необходимость коренных изменений в техническом обеспечении процессов тепловой обработки сельскохозяйственных материалов.

Тепловая обработка сельскохозяйственных материалов сопровождается комплексом одновременно протекающих и взаимосвязанных теплофизических, физико-химических и биохимических процессов. Основная цель тепловой обработки сельскохозяйственных материалов - повышение их стойкости при хранении или временной консервации.

Одним из наиболее необходимых и энергоёмких в сельскохозяйственном производстве видов тепловой обработки сельскохозяйственных материалов является процесс сушки.

Сушка обеспечивает возможность длительного хранения готовой продукции, а также эффективную предварительную обработку сырья для большинства технологических операций процессов производства и переработки сельскохозяйственной продукции.

В результате сушки многие сельскохозяйственные продукты значительно улучшают качество.

Наряду с отечественными производителями сельскохозяйственной техники более десяти иностранных фирм представляют свое оборудование для тепловой обработки сельскохозяйственных материалов на российском рынке. Однако импортная техника адаптирована под европейские условия производства, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции, которые отличаются от условий российского производства. Поэтому чтобы довести сырьё российских производителей до базисных кондиций, используя импортную технику, требуется несколько раз выполнять одну и ту же операцию, нарушая при этом поточность всего процесса, а, вследствие, и повышая затраты энергии на этот процесс [16, 17, 23].

Следует отметить, что, как и прежде, одной из главных задач сельского хозяйства для решения проблемы продовольственной безопасности страны остаётся увеличение производства зерна. Для решения этой задачи особое значение приобретает совершенствование организации хранения, обработки и переработки зерна. Прогрессивные в технологическом и экономическом отношении способы обработки, хранения и переработки зерна обеспечивают снижение потерь, способствуют сохранности и улучшению его качества, позволяют эффективнее использовать этот важнейший продукт питания.

Продукты из зерна содержат почти всё, что необходимо человеку для питания. Они богаты углеводами (82...83 %), белками (14...15 %), в них есть жиры (2,0...2,5 %), соли фосфора, калия, магния, кальция и другие необходимые для жизни людей элементы. В выпеченном хлебе содержатся витамин В₁, рибофлавин (витамин В₂), никотиновая кислота (РР), токоферол (Е) и др. Почти треть дневной нормы в пище человек удовлетворяет хлебными и крупяными изделиями. При этом через хлебные изделия человек получает от 30 до 50 % всей необходимой для жизнедеятельности энергии, до 40 % потребности в белке, до 60 % витаминов группы В и до 80 % витамина Е. Человек, используя хлеб, практически удовлетворяет свои физиологические потребности при минимальных затратах на продукты питания. Кроме того, растительные белки намного дешевле животных. Белок пшеничного хлеба в 4...9 раз дешевле белка мяса, в 1,4...3,8 раза - белка рыбы и в 2,7 раза - белка молока [235]. Зерно является также сырьём для выработки таких ценных продуктов, как крахмал, пищевые концентраты и др. Оно - основной компонент комбикормов.

Сохранность зерна, его обработка и переработка в масштабах нашей страны - сложное и дорогостоящее дело, требующее современной материально-технической базы. В то же время опыт передовых хозяйств показывает, что производство высококачественного зерна выгодно - уровень рентабельности не менее 40 %. В ближайшие годы можно прогнозировать рост спроса на новую технику для обработки и хранения зерна. Увеличение валовых сборов зерна и уменьшение удельных затрат на его производство возможно лишь путём разработки и внедрения высокоэффективных технологических средств мирового уровня, созданные на основе концептуальных положений их развития.

Кроме того, согласно Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 – 2020 годы [67], одним из приоритетных направлений является развитие малых форм хозяйствования - крестьянских (фермерских) хозяйств. Для успешной реализации данного направления необходимо прежде всего сформировать высокоэффективную, конкурентоспособную материально-техническую базу предприятий подобных форм хозяйствования. С учётом реальных объёмов производимой ими продукции, существующие сушильные комплексы производительностью свыше 100 тонн в час в этом случае будут просто экономически неэффективны.

Таким образом, создание и адаптация средств механизации тепловой обработки зерна к условиям российского сельскохозяйственного производства является актуальной и важной научно-технической проблемой. При этом выбор и обоснование оптимальных технологических параметров процесса тепловой обработки зерна и режимов работы средств механизации этого процесса должны быть выполнены на основе всестороннего анализа физической и математической моделей этого процесса с учетом основных конструктивных особенностей и условий функционирования соответствующих устройств.

1 ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Технологии и средства механизации тепловой обработки зерна

Значение тепловой обработки в сельскохозяйственном производстве огромно. На этот процесс затрачивают около 15 % добываемого в стране топлива, а на сушку зерна на хлебопекарных предприятиях - около 700 тыс. тонн жидкого топлива в год [33, 73, 84, 253].

При тепловой обработке изменяются структурно-механические, физико-химические и органолептические свойства продукта, определяющие его конечное качество.

Тепловая обработка зерна находит широкое применение в различных технологических процессах производства, переработки и хранения продукции растениеводства. Тепловую обработку применяют для сушки продовольственного и семенного зерна, подготовки кормов к скармливанию, подготовки сырья к хранению, его переработке и т.д.

Тепловая обработка зерна – это процесс воздействия на него температуры, как индивидуального физического фактора. Возможно также и совместное влияние температуры с влагой или давлением (гидротермическое, баротермическое воздействие). Выбор способа тепловой обработки зависит от технологических свойств обработанного зерна.

На рисунке 1.1 представлены основные виды тепловой обработки зерна в различных процессах его переработки в кормовые и продовольственные продукты.

Пропаривание – один из важных этапов тепловой обработки зерна в процессе его подготовки к переработке в крупу. Его проводят при высокой температуре (свыше 100 °С) и избыточном давлении до 0,3 МПа. Сущность химических преобразований в процессе пропаривания заключается в частичной клейстеризации крахмала, образовании небольшого количества декстринов, обладающих клеящими свойствами, и т.д.



Рисунок 1.1 - Виды тепловой обработки зерна

В мукомольном производстве пропаривание зерна используют при его гидротермической обработке. Основная цель гидротермической обработки - направленное изменение исходных технологических свойств для стабилизации их на оптимальном уровне.

Структурно-механические свойства эндосперма и оболочек поступающего на предприятия зерна отличаются незначительно. Вследствие этого разделить их сложно, перерабатывать такое зерно трудно. При проведении гидротермической обработки, прежде всего, стремятся усилить различие свойств оболочек и эндосперма (ядра). Процесс на мельнице ведут так, чтобы снизить прочность эндосперма и повысить прочность оболочек, а на крупозаводе - наоборот: повысить прочность ядра и уменьшить прочность оболочек (плёнок). При этом, чем заметнее пройдут изменения, тем выше будет эффективность переработки зерна в муку и крупу.

Степень изменения технологических свойств зерна определяется конкретным способом гидротермической обработки и особенностями взаимодействия зерна с водой. Например, гидротермическая обработка зерна гречихи включает операции пропаривания, отлёжки, сушки и охлаждения. В результате упрочняется эндосперм, улучшаются потребительские свойства крупы и её усвояемость.

На рисунке 1.2 представлен общий вид пропаривателя крупы ПК-0,2.

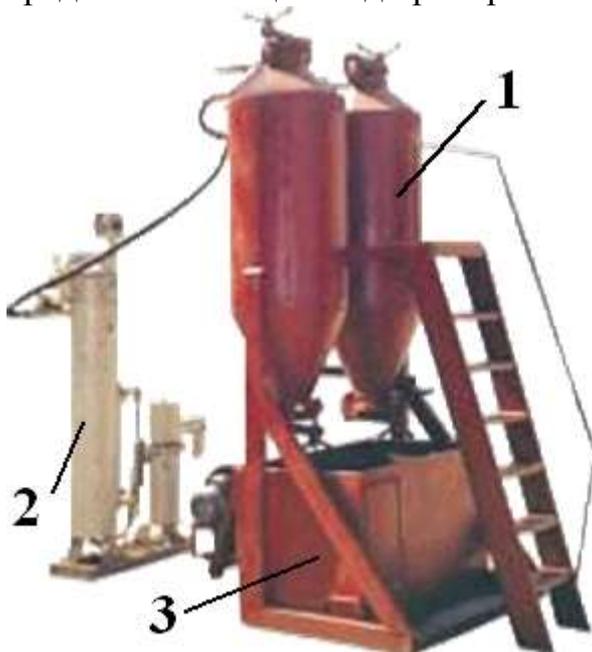


Рисунок 1.2 – Пропариватель крупы ПК-0,2:

1 – зерновые бункеры; 2 – электрический парогенератор; 3 – бункер охладитель

Стационарный пропариватель крупы ПК-0,2 – периодического действия, предназначен для гидротермической обработки зерна, крупяных культур с целью создания оптимальных условий процесса производства крупы, улучшения её пищевых и вкусовых достоинств и повышения стойкости при хранении.

Принцип действия пропаривателя основан на одновременном воздействии давления, температуры и влажности водяного пара на зерно, в результате которого оно изменяет свои технологические, вкусовые качества и становится

пригодным для приготовления круп. В таблице 1.1 приведены основные технические характеристики пропаривателя.

Таблица 1.1 – Технические характеристики пропаривателя крупы ПК-0,2

Показатели	Значение
Производительность, т/ч	0,2
Максимальная потребляемая мощность, кВт	90
Максимальное давление пара в системе, МПа	0,2
Время пропаривания, мин	10...15
Габаритные размеры, мм	
- длина	3000
- ширина	1500
- высота	2900
Масса, кг	500

В технологической линии производства варёно-сушёных круп основным процессом производства является тепловая обработка (варка, сушка). В настоящее время разработаны технологические режимы производства трёх видов круп, не требующих варки, - перловой, гречневой и пшеничной. Гидротермическую обработку этих круп проводят по режимам, указанным в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Режимы гидротермической обработки круп, не требующих варки [12]

Крупа	Давление пара в аппарате, МПа	Продолжительность варки, мин	Влажность сваренной крупы, %
Гречневая	0,18...0,20	30	32...38
Перловая	0,18...0,20	40	35...38
Пшеничная	0,18...0,20	50	35...38

Технологическая линия производства кукурузных хлопьев включает в себя тепловую обработку (варку) крупы, сушку варёной крупы, темперирование, пропаривание крупы и обжарку хлопьев.

Большинство тепловых процессов по обработке зерна в кормопроизводстве осуществляют с помощью тепловых агрегатов, называемых кормозапарниками. Тепловые кормоприготовительные аппараты бывают огневые и электрические.

Огневые кормозапарники подразделяют: по конструкции - на кормозапарочные агрегаты, запарочные чаны, запарники-мялки и запарники-смесители; по роду использования - на стационарные и передвижные; по характеру действия - на запарники периодического (рисунок 1.3) и непрерывного действия (рисунок 1.4); по емкости и производительности.

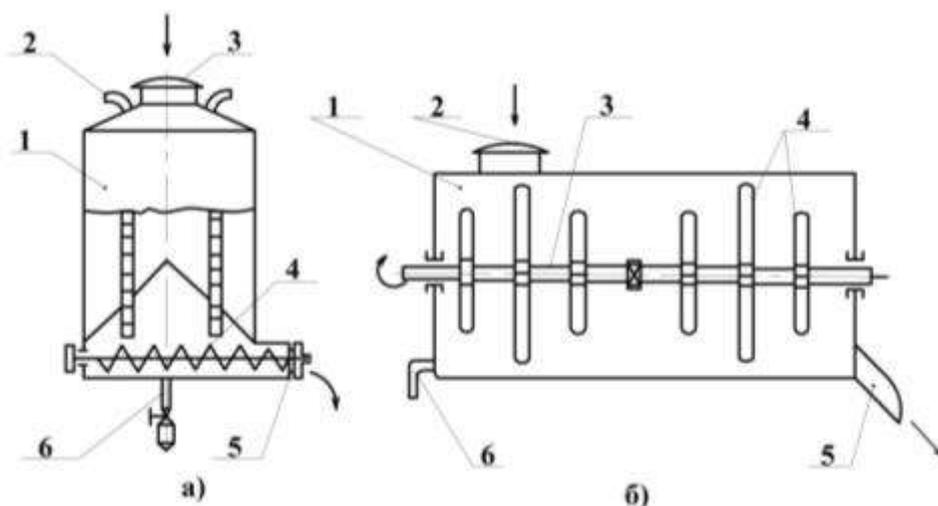


Рисунок 1.3 – Кормозапарники периодического действия:

а) запарник-мялка: 1 – вертикальный цилиндр; 2 – паропровод; 3 – крышка; 4 – винтовой транспортёр; 5 – решётка; 6 – патрубок; б) запарник-смеситель: 1 – цилиндрический котёл; 2 – крышка загрузочного люка; 3 – вал; 4 – лопасти; 5 – выгрузное окно; 6 - паропровод

Электрические кормозапарники могут быть двух типов: с нагревательным элементом, расположенным внутри запарного чана, и с электродным котлом-парообразователем.

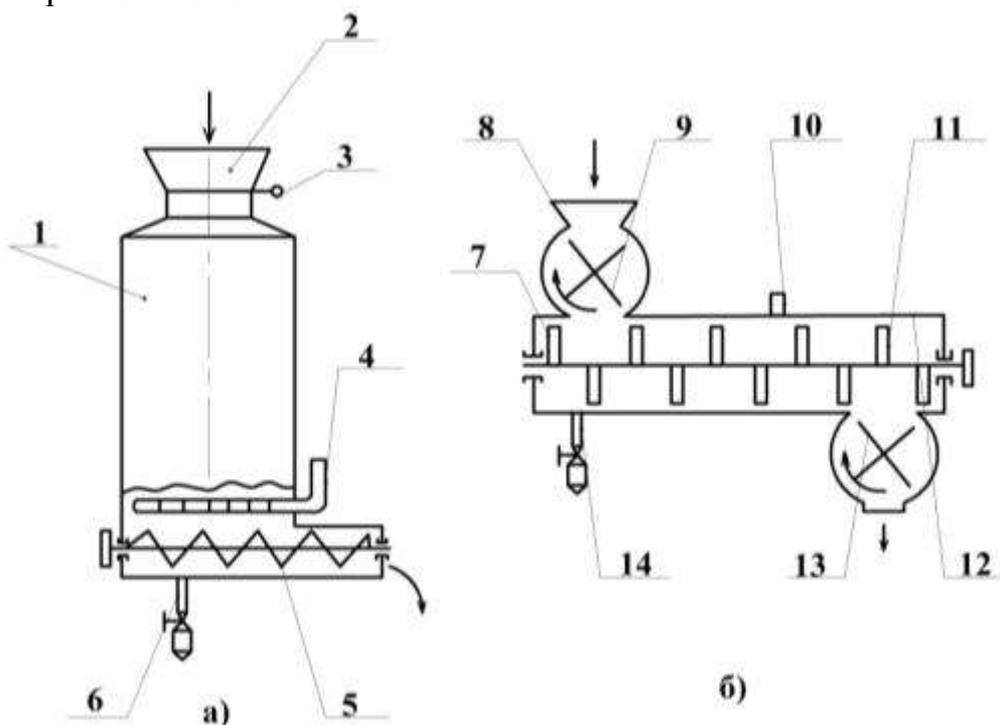


Рисунок 1.4 – Кормозапарники непрерывного действия:

а) с вертикальным цилиндром; б) с горизонтальным цилиндром: 1, 7 - цилиндры; 2, 8 – загрузочные воронки; 3 – задвижка; 4, 10 – пароподводящие трубы; 5 – выгрузной шнек; 6, 14 – патрубки для выхода конденсата; 9 – верхний шлюзовой затвор; 11 – лопасть; 12 – вал; 13 – нижний шлюзовой затвор

В последние годы возросли объемы производства и использования в рационах животных зерна сои как эффективного белкового компонента. Одно из

необходимых и обязательных условий его использования - предварительная влаготепловая обработка, осуществляемая в специальных пропаривателях [5, 119, 126, 136].

Поджаривание зерна применяют при производстве комбикормов для молодняка животных, у которых недостаточно развита ферментативная система (крахмал злаковых культур для них трудно переварим). При этом виде теплового воздействия нагрев зернового слоя происходит при обдувании его горячим воздухом или непосредственном контакте зерна с сильно нагретыми поверхностями. Зерно подогревают при постоянном помешивании до светло-коричневого или коричневого цвета. Крахмал в результате теплового воздействия превращается в более простые углеводы – декстрины, мальтозу, кроме того, высокая температура убивает различные патогенные грибки.

Поджаренное зерно скармливают поросятам-сосункам с 5...7-го дня жизни и до отъёма, давая в сутки от 30...50 г до 120...150 г на поросёнка (в зависимости от возраста). Иногда поджаренное зерно дают телятам для улучшения пищеварения.

Данный способ тепловой обработки зерна, кроме кормопроизводства, получил широкое распространение и в процессах пищевой промышленности. Так, фрагмент линии производства растительного масла из семян подсолнечника состоит из стадий – сушка семян, пропарка и жарение мезги. При этом в процессе тепловой обработки влажность семян уменьшается с 9...15 % до 2...7 %. Температура семян во время обработки - около 50 °С. В жаровне за счёт тепловой обработки достигается оптимальная пластичность продукта и создаются условия для облегчения отжима масла на прессах. При жарении влажность мезги снижается до 5...7 %, а температура повышается до 105...115 °С [135].

В технологических линиях производства жареного и растворимого кофе используют операции обжаривания и сушки. При обжарке кофе в кофейных зёрнах происходят значительные химические изменения. Зерна увеличиваются в объёме, масса их уменьшается в результате испарения влаги и разложения сахаров и клетчатки органических веществ зёрен под воздействием высокой температуры. Сахар при нагреве преобразуется в карамелен – вещество, придающее кофе коричневую окраску. От степени обжаривания зависит количественное накопление карамелена, а, следовательно, и интенсивность окраски зерен.

Клетчатка в результате высокой температуры подвергается сухой перегонке с образованием уксусной и других органических кислот и ацетона.

Разложению подвергаются и пентозаны, содержание которых в кофе достигает 6...7 %. Разлагаясь, они образуют фурфурол и фурфуриловый спирт.

Жир кофе, состоящий в основном из олеиновой кислоты, которого содержится в зёрнах 10...13 %, при обжаривании изменяется мало, количество его несколько уменьшается из-за частичного разложения с образованием акролеина.

Равномерное обжаривание сырья является важным фактором получения продукта с хорошим вкусом, цветом и ароматом. Каждый вид кофе, а также цикория обжаривают отдельно. Режимы обжаривания кофе и цикория приведены

в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Режимы обжаривания кофе и цикория

Сырье	Температура нагрева, °С	Продолжительность обжаривания, с
Кофе натуральный	180...215	480...1200
Цикорий	140...160	1800...2400

Кофе обжаривают в основном в ростерах. На рисунке 1.5 представлены ростеры типа TN-1 и TN-2 (Италия), а в таблице 1.6 приведены их технические характеристики.



Рисунок 1.5 – Кофе-ростеры периодического действия (обозначения в тексте)

Таблица 1.6 – Технические характеристики машин для обжарки кофе

Показатели	Ростер	
	TN-1	TN-2
Производительность, кг/ч	до 2	до 8
Потребляемая мощность, кВт	1,5	2,83
Габаритные размеры, мм	670x440x680	950x450x820
Масса, кг	65	80

Зёрна кофе из загрузочного бункера 1 (рисунок 1.4) поступают во вращающийся цилиндр (барабан) 2, через который продувают нагретый воздух, поджаривающий зёрна кофе. После обжарки зёрна кофе выгружают на металлический перфорированный лист 3, обдуваемый холодным воздухом. Этот способ обжарки широко используют не только для обработки зёрен кофе, но и какао-бобов и орехов.

Микронизация – обработка зерна инфракрасными лучами. Быстрый прогрев зерна осуществляют с помощью СВЧ-полей и инфракрасного (ИК) излучения. Микронизация зерна в последнее время начала быстро распространяться в сельскохозяйственной практике США, Англии, Японии и других стран [213]. Термин «микронизация» был введен в связи с обработкой зерна под действием микроволн. Сущность метода состоит в том, что зерно, в том числе и с повышенной влажностью, по мере продвижения по транспортеру подвергается ин-

фракрасному облучению. На перерабатывающих предприятиях России для этой цели применяют кварцевые галогенные лампы КГИ-220-1000. Инфракрасные лучи проникают в зерно и вызывают интенсивную вибрацию молекул. Под действием трения быстро вырабатывается внутренняя теплота, и за счет испарения воды повышается давление. За время прохождения под инфракрасными лучами зерно становится мягким, разбухает и растрескивается. Биополимеры зерна (углеводы, белки) подвергаются тем же структурным изменениям, которые происходят при гидротермической и баротермической обработке. Удельные затраты энергии на микронизацию зерна составляют в среднем 0,2...0,25 кВт·ч/кг [162, 163].

На рисунке 1.6 приведён общий вид микронизатора зерна. Технические характеристики микронизатора представлены в таблице 1.4.

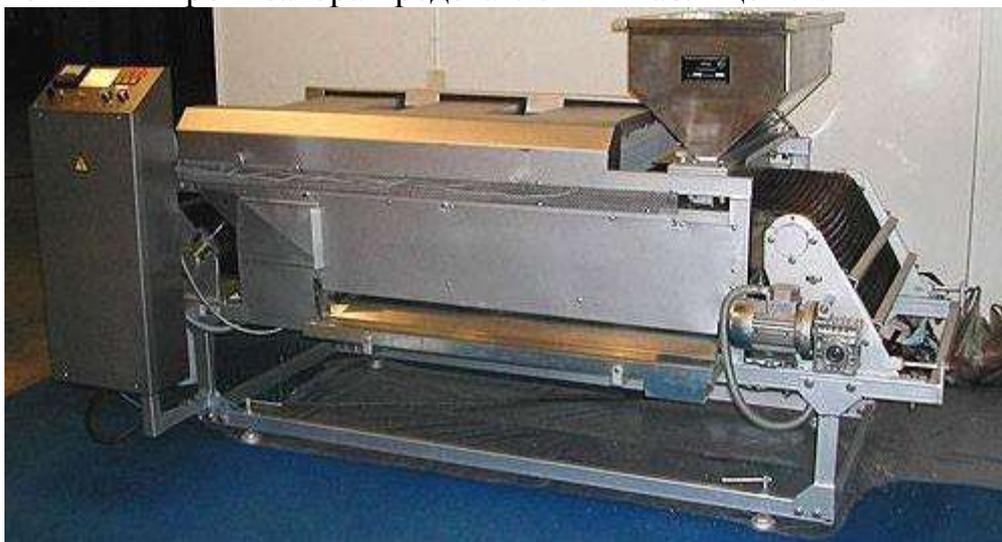


Рисунок 1.6 – Микронизатор зерна

Данное устройство предназначено для тепловой обработки зерна и продуктов его переработки.

Таблица 1.4 – Технические характеристики микронизатора

Показатели	Значение показателей
Производительность, кг/ч	до 250
Потребляемая мощность, кВт	24,5
Масса, кг	350

Микронизация, как и другие способы тепловой обработки, наиболее эффективна для зерна с целью повышения санитарных качеств кормов. Микронизация уничтожает вредную микрофлору зерна и уменьшает общее количество микроорганизмов в 5...6 раз. При длительности облучения более 45 секунд в зерне полностью погибают многие бактерии, более 60 секунд - плесневые грибы. Микронизация предупреждает заражение зерна амбарными вредителями. Наилучший эффект достигают при облучении зерна в течение 50...60 секунд. Установлено, что использование микронизированного зерна для подкормки поросят способствует ускорению их роста и повышению прироста живой массы до 16 % за счет лучшей переваримости и усвоения питательных веществ кормов рациона.

Экструдирование – способ обработки зерна при совместном воздействии на него высокого давления и температуры.

Для экструдирования зерна используют выпускаемые отечественной промышленностью пресс-экструдеры ПЭК-125Х8, ПЭ-КМЗ и их модификации, а также пресс-экструдеры серии Е марки «BRONTO» производства Украины, хорошо зарекомендовавшие себя в комбикормовой и пищевой промышленности. На рисунке 1.7 представлен общий вид пресс-экструдера Е – 250.

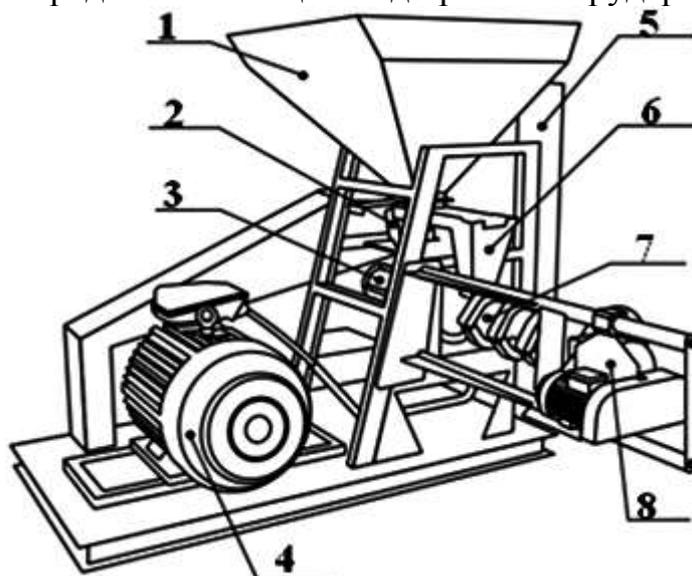


Рисунок 1.7 – Пресс-экструдер «BRONTO» Е – 250:

1 – загрузочный бункер; 2 – вибропитатель; 3 – шпиндель; 4 – электропривод; 5 – шкаф управления; 6 – магнитоулавливатель; 7 – винтовой рабочий орган (шнек); 8 - отсекатель

Экструдер предназначен для экструзионной обработки зерна пшеницы, ячменя, кукурузы, гороха, ржи, бобов и сои при получении высококачественных комбикормов для свиней и жвачных животных [82, 83, 203].

Технические характеристики экструдеров фирмы «BRONTO» серии Е приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Технические характеристики пресс-экструдеров серии Е

Показатели	Значение показателей		
	Е - 250	Е - 500	Е - 1000
Производительность, кг/ч	250	500	1000
Температура экструдирования, °С	137...144		
Мощность привода, кВт	50	55	92,5
Длина, м	2525	2000	2500
Высота, м	2140	1700	2000
Ширина, м	1574	2300	2600
Масса, кг	900	1400	2000

При экструдировании зерно доводят до влажности 12...16 %, измельчают и подают в специальный аппарат (экструдер), где его подвергают сжатию шнеками ($P = 3,5 \dots 5$ МПа). В шнеках зерно прогревается до температуры 120...180 °С в результате подвода внешней теплоты и теплоты, выделенной при механической обработке. При механических воздействиях и воздействии теплоты происходят существенные физико-химические изменения основных компонентов зерна: денатурация белка, клейстеризация и декстринизация крахмала. При этом значительно улучшается санитарное состояние продукта. Под действием высокой температуры и давления почти полностью уничтожаются

патогенная микрофлора и плесневые грибы. Всё это в значительной степени повышает усвояемость питательных веществ. Экструдированные корма животные поедают охотнее, при этом уменьшаются случаи желудочно-кишечных заболеваний, повышается продуктивность. Однако экструдирование является весьма энергоёмким процессом (0,1...0,3 кВт·ч/кг готового продукта) [118, 119].

Сушка - один из самых распространенных способов тепловой обработки зерна. Основное предназначение сушки – снижение влажности зерна до кондиционной. По многолетним статистическим данным до 60 % свежесобранного зерна находится во влажном состоянии и требует сушки.

Сушка - процесс удаления влаги из продукта, связанный с использованием тепловых и диффузионных процессов. Процесс удаления влаги из материала сопровождается разрушением ее связи со «скелетом» высушиваемого материала, на что затрачивается определенная энергия [204].

Термическое обеззараживание является профилактической и истребительной мерой борьбы с вредителями зерна (рисунок 1.8) и продуктов его переработки [78, 166].

Эффективность обеззараживания зерна от вредителей зависит также от времени пребывания его в сушильной установке при максимальной температуре нагрева. Есть основание считать, что при термическом обеззараживании температура вредителей (или их яиц) близка к температуре зерна, а полная их гибель зависит как от температуры нагрева, так и от потери влаги самими вредителями.



Рисунок 1.8 – Зерно, повреждённое суринамским мукоедом
Особую трудность с точки зрения сохранения качества зерна представля-

ет термическое обеззараживание зерна пшеницы, температура нагрева которой, например, в шахтных сушилках, не должна превышать 50 °С. Неравномерность нагрева зерна сильно влияет на эффективность обеззараживания, так как в слоях, в которых температура нагрева выше допустимой, возможна порча зерна, а там, где она ниже, вредители не погибают.

Незначительная выдержка нагретого зерна не обеспечивает полной гибели вредителей как в подвижной, так и в неподвижной стадиях развития. Так, например, в шахтных сушилках продолжительность пребывания зерна при температуре максимального нагрева составляет 5...10 минут, что недостаточно.

Для усиления эффективности термического способа обеззараживания создана зона выдержки (отлежки) зерна между сушильной и охлаждающей камерами сушки.

Как отмечалось выше кроме основных видов тепловой обработки зерна, также известен баротермический способ теплового воздействия. Основным показателем качества обработки зерна при этом считают степень желатинизации крахмала. Это явление происходит частично и при гранулировании комбикормов и кормосмесей, включающих зерновую часть (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Степень желатинизации крахмала зерна при различных режимах баротермической обработки [82]

Способ обработки		Давление, МПа	Температура, °С	Экспозиция, мин	Степень желатинизации, %
Плющение при:	замачивании водой	–	15...25	1440	до 20
		0,03...0,06	90...95	15...20	40...45
	обработке паром	0,3...0,5	110...125	3...5	50...60
Уплотнение в гранулы		40...50	90...98	0,5...1	20...30
Экструзия		1,8...2,2	160...170	до 0,5	50...80

Увеличение эффекта обработки сопровождается возрастанием затрат тепловой и механической энергии.

Таким образом, обобщая вышеизложенное, можно заключить, что тепловая обработка зерна имеет важное технологическое значение. Наряду с применением данного вида обработки для удаления избыточной влаги из материала (сушка), тепловую обработку в сельском хозяйстве применяют для борьбы с заражённостью вредителями и микроорганизмами (термическое обеззараживание), при производстве концентрированных кормов для сельскохозяйственных животных. В мукомольном и крупяном производстве применяют гидротермическую обработку зерна с целью изменения исходных технологических свойств в заданном направлении для стабилизации их на оптимальном уровне. Также тепловую обработку материалов широко применяют в пищевой промышленности. Эффективность применения данного вида обработки главным образом зависит от уровня развития технологии и соответствующих средств механизации тепловых процессов.

Главной научно-практической проблемой в тепловой обработке является отсутствие современных средств механизации данного процесса относительно небольшой пропускной способности, которые способны максимально обеспечить технологические требования и существенно сократить энергозатраты. Это и более полное использование потенциала подводимой теплоты, и соблюдение

экологических норм.

Перспективным направлением является разработка установок для тепловой обработки зерна, в которых передача теплоты происходит при минимальных потерях, когда подводимая энергия практически полностью затрачивается на нагрев и испарение влаги из высушиваемого материала.

Один из перспективных вариантов компоновки таких установок сочетает в себе применение контактного способа передачи теплоты в сушильной камере с хорошей теплоизоляцией. В этом случае материал нагревается от непосредственного контакта с греющей поверхностью. Для нагрева предпочтительнее применять электрические нагреватели, так как они обладают более высокой экономичностью и экологичностью процесса, а также позволяют минимизировать стоимость и упростить конструкции установок для тепловой обработки, так как пропадает необходимость в таком оборудовании как теплогенератор, топка и т. д.

1.2 Особенности процесса сушки зерна

1.2.1 Свойства зерна и зерновой массы как объекта сушки

Сушка зерна - это сложный технологический процесс, поэтому для создания конструкций зерносушилок, обеспечивающих не только сохранность, но и улучшение качества зерна, необходимо знать свойства зерна как объекта сушки. Правильное использование свойств зерна при сушке снижает расходы по приведению его в стойкое для хранения состояние.

К основным физическим, физико-химическим и теплофизическим свойствам зерна относят следующие: влажность, гигроскопичность, форму зерна, линейные размеры и крупность, объём, выполненность и щуплость, выравненность, массу 1000 зёрен, стекловидность, плёнчатость и лузжистость, натуру, всхожесть семян, энергию прорастания, механические свойства, содержание белковых веществ в зерне, содержание и качество клейковины, теплоемкость, теплопроводность, скважистость, сыпучесть, аэродинамическое сопротивление и скорость витания.

По строению и структуре зерно представляет капиллярно-пористое коллоидное тело с большим количеством капилляров, по которым влага в процессе сушки поступает изнутри зерна к поверхности, с которой и испаряется.

Влажность зерна может быть выражена в процентах ко всей зерновой массе или в процентах к массе абсолютно сухого вещества, т. е.

$$\omega = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{з}}} \cdot 100; \omega_{\text{с}} = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{сз}}} \cdot 100,$$

где ω - влажность зерна, % по отношению ко всей массе влажного зерна; $\omega_{\text{с}}$ - влажность зерна, % по отношению к массе абсолютно сухого вещества; $m_{\text{в}}$ - масса влаги, содержащейся в массе влажного зерна, кг; $m_{\text{з}}$ - масса влажного зерна, кг; $m_{\text{сз}}$ - масса абсолютно сухого вещества зерна, кг.

В практике сушки зерна и при расчете сушилок пользуются обычно влажностью ω , но при лабораторных исследованиях процесса сушки часто удобнее вести расчеты по влажности $\omega_{\text{с}}$. Пересчет ω и $\omega_{\text{с}}$ (%) можно сделать по следующим формулам:

$$\omega = \frac{100\omega_c}{100+\omega_c}; \omega_c = \frac{100\omega}{100-\omega}.$$

По влажности, т. е. содержанию влаги в процентах к общей массе, зерно подразделяют на сухое, средней сухости, влажное и сырое (таблица 1.7).

Таблица 1.7 – Классификация зерна различных культур в зависимости от влажности [86]

Культура	Влажность зерна, %			
	сухого (не более)	средней сухости	влажного	сырого (более)
Пшеница, рожь, ячмень, рис, гречиха	14,0	14,0...15,5	15,5...17,0	17,0
Овёс, горох, кормовые бобы, кукуруза	14,0	14,0...16,0	16,0...18,0	18,0
Кукуруза в початках, фасоль	16,0	16,0...18,0	18,0...20,0	20,0

Влажное и сырое зерно не может храниться длительное время, так как в нём быстро развиваются вредные микроорганизмы и повышается интенсивность его дыхания. Это приводит к самосогреванию и порче зерна. В сухом зерне жизнедеятельность почти приостанавливается, что позволяет сохранять его длительное время без ухудшения качества. Однако в некоторых районах Российской Федерации период уборки зачастую совпадает с наступлением дождливой погоды, и убранный хлеб может содержать до 32 % влаги. Влажность зерна, предназначенного для длительного хранения, не должна превышать 14 % (таблица 1.8). По данным французских экспертов, ежегодные потери зерна в мире только из-за несоблюдения этого условия составляют около 10 млн. т.

Таблица 1.8 - Рекомендуемая влажность зерна и семян после сушки [91]

Культура	Влажность зерна или семян, %					
	на переработку		на хранение		на длительное хранение (> 1 года)	
	не выше	не ниже	не выше	не ниже	не выше	не ниже
Пшеница	14,5	13,5	15	14	14	13
Рожь	15,5	14,5	15	14	14	13
Ячмень	14,5	13,5	15	14	14	13
Овёс	13,5	12,5	14	13	14	13
Просо	13,5	12,5	14	13	13	12
Гречиха	14,5	13,5	15	14	14	13
Рис	15,5	14,5	14	13	14	13
Кукуруза	15	14	14	13	13	12
Подсолнечник	8	7	7	6	-	-
Горох	15	14	16	15	15	14
Соя	14	13	14	13	-	-

Влага в зерне - это среда, при участии которой совершается обмен веществ. Если содержание влаги невелико, она находится в связанном состоянии. С увеличением влажности зерна в его клетках появляется свободная влага, которая способствует развитию активности ферментов. Задача сушки заключается, прежде всего, в снижении влажности до кондиционной.

Гигроскопичность, т. е. способность поглощать и отдавать влагу, является одним из важных свойств зерна и зависит от его строения и химического состава. Наибольшую гигроскопичность имеют зародыш и ближайшая к нему часть зерна.

Влагообмен между зерновой массой и соприкасающимся с ней воздухом в той или иной степени идет непрерывно. В зависимости от параметров воздуха

(его влажности и температуры) и состояния зерновой массы влагообмен происходит в двух противоположных направлениях:

- передача влаги от зерна к воздуху; такое явление (десорбция) наблюдается, когда парциальное давление водяных паров у поверхности зерна больше парциального давления водяных паров в воздухе;

- увлажнение зерна вследствие поглощения (сорбции) влаги из окружающего воздуха; данный процесс происходит, если парциальное давление водяных паров у поверхности зерна меньше парциального давления водяных паров в воздухе.

Влагообмен между воздухом и зерном прекращается, если парциальное давление водяного пара в воздухе и над зерном одинаково. При этом наступает состояние динамического равновесия. Влажность зерна, соответствующую такому состоянию, называют равновесной.

Для достижения полного равновесия требуется стационарный режим в течение довольно длительного времени (9 суток, иногда и больше). Естественно, подобного в производственных условиях не бывает, наружные участки насыпи зерновой массы, соприкасающиеся с воздухом, непрерывно изменяют свою влажность в зависимости от его параметров. Однако закономерности влагообмена сохраняются. При длительном хранении зерновых масс повышенной влажности в условиях низкой относительной влажности воздуха влажность зерна постепенно снижается. Наоборот, сухая зерновая масса при хранении в складе с воздухом, более насыщенным водяными парами, увлажняется, ее масса увеличивается. Подобные изменения носят и сезонный характер, так как насыщенность воздуха влагой в разные месяцы неодинакова. Это особенно заметно при хранении партий зерна и семян насыпью небольшой высоты (1...2 м) или в мягкой таре (тканевых мешках).

В связи с различными условиями созревания и разной сорбционной емкостью влажность зерна и семян при уборке урожая и перед их хранением колеблется от 7 % до 32...36 %. В таблице 1.8 приведены данные о равновесной влажности зерновых злаковых и бобовых, а на рисунке 1.9 - кривые, характеризующие равновесную влажность масличных культур.

Таблица 1.9 – Равновесная влажность зерна различных культур, (%) [18]

Зерно	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %							
		20	30	40	50	60	70	80	90
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Пшеница	30	7,4	8,8	10,2	11,4	12,5	14	15,7	19,3
Рожь	30	7,8	9	10,4	11,5	12,8	14,3	16,5	20,3
Ячмень	30	7,6	9,1	10,4	12,2	12,2	14,3	16,6	19
Овёс	30	6,2	7,9	8,7	9,8	11,6	13,8	16,2	19
Рис – зерно	30	7,1	8,5	10	10,9	11,9	13,1	14,7	17,1
Рис ошелушенный	30	7,6	9,2	10,6	11,7	12,5	13,9	15,4	17,7
Просо	30	7,2	8,7	10,2	11	12,1	13,6	15,3	17,7
Кукуруза	30	7,9	9	10,1	11,2	12,4	13,9	15,9	18,3
Соя	30	5	5,7	6,4	7,2	8,9	10,6	14,5	20,2
Пшеница	20	7,8	9,2	10,7	11,8	13,1	14,3	16	20
Рожь	20	8,3	9,5	10,9	12,2	13,5	15,2	17,4	20,8
Ячмень	20	8,3	9,5	10,9	12	13,4	15,2	17,5	20,5
Овёс	20	6,7	8,3	9,4	10,8	12	14,4	16,8	19,9

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рис – зерно	20	7,5	9,1	10,3	11,4	12,5	13,7	15,2	17,6
Рис ошелушенный	20	8	9,6	10,9	12	13	14,6	16	18,7
Просо	20	7,8	9,1	10,5	11,6	12,7	14,3	15,9	18,3
Кукуруза	20	8,2	9,4	10,7	11,9	13,2	14,9	16,9	19,2
Соя	20	5,4	6,5	7,1	8	9,5	11,6	15,3	20,9
Пшеница	0	8,7	10,1	11,2	12,4	13,5	15	16,7	21,3
Рожь	0	8,9	10,4	11,6	12,7	13,9	15,8	18,3	21,9
Ячмень	0	9,2	10,6	12,1	13,1	14,4	16,4	18,3	21,1
Овёс	0	7,8	9,1	10,5	11,8	12,9	15,2	17,9	20,7
Рис – зерно	0	8,2	9,9	11,1	12,3	13,3	14,5	16,6	19,2
Рис ошелушенный	0	8,7	10,3	11,5	12,6	13,6	15,2	17,4	20
Просо	0	8,7	10,2	11,7	12,5	13,6	15,2	17,1	19,1
Кукуруза	0	9,4	10,5	11,6	12,7	13,8	15,6	17,6	20,1
Соя	0	5,8	7	7,7	8,7	9,6	12	16,2	21,5

Равновесная влажность семян масличных культур намного ниже, чем злаковых и бобовых. Это объясняется меньшим содержанием в них гидрофильных коллоидов.

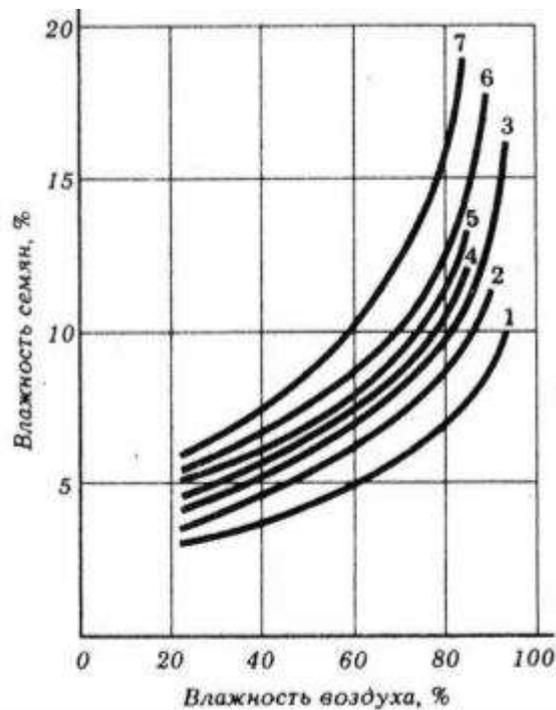


Рисунок 1.9 – Равновесная влажность семян масличных культур:

1 – клещевина; 2 – подсолнечник; 3 – горчица сизая; 4 – лён; 5 – рыжик; 6 – хлопчатник; 7 – соя

Максимальная равновесная влажность зерна, устанавливающаяся при его пребывании в воздушной среде, насыщенной водяными парами (относительная влажность $\phi = 100\%$), – тот предел, до которого зерно может сорбировать пары воды из воздуха. Дальнейшее увлажнение происходит только при впитывании капельножидкой влаги. Установить точно равновесную влажность зерна при $\phi = 100\%$ довольно трудно, так как при длительном выдерживании в воздухе, насыщенном водяными парами, оно подвергается активному воздействию микроорганизмов и покрывается плесенью. Равновесная влажность зерна и семян зависит также от температуры воздуха: с понижением последней величина равновесной влажности возрастает. При снижении температуры с $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

равновесная влажность увеличивается на 1,4 %.

Равновесная влажность отдельных зерен или семян в зерновой массе неодинакова вследствие различия их размеров, формы и т. д. Даже отдельные анатомические части зерновки или семени характеризуются неодинаковой влажностью. Так, у семянки подсолнечника наименее гигроскопично ядро, а наиболее - лuzга. У зародыша всех злаковых более высокая влажность, чем у эндосперма, и т. д.

Процессы сорбции и десорбции протекают в зерновой массе и в связи с различной исходной влажностью входящих в нее компонентов. Это особенно заметно в свежесобранной зерновой массе, где зерна основной культуры и семена сорных растений резко различны по влажности. Имеются многочисленные данные, показывающие быстрое перераспределение влаги между основным зерном и сорняками (таблица 1.9). Они свидетельствуют также о необходимости немедленной очистки зерновой массы.

Таблица 1.10 – Передача влаги от сорняков зерну пшеницы в свежесобранной зерновой массе

Время анализа		Влажность, %	
		основного зерна	семян сорных растений
Сразу после уборки прямым комбайнированием		15,2	58,2
На току, через (ч):	12	15,7	50,8
	24	16,1	41,3
	48	16,9	28,0
	72	17,8	23,1

При изучении равновесной влажности зерна обнаружено явление сорбционного гистерезиса. У зерна и продуктов его переработки изотерма десорбции в системе координат располагается выше, чем изотерма сорбции. Поэтому равновесная влажность зерна, характеризуемая изотермой сорбции, всегда меньше, чем характеризуемая изотермой десорбции, при одной и той же относительной влажности воздуха. Наибольшее расхождение между изотермами сорбции 1 и десорбции 2 наблюдается на участке с относительной влажностью воздуха 20...70 % (рисунок 1.10).

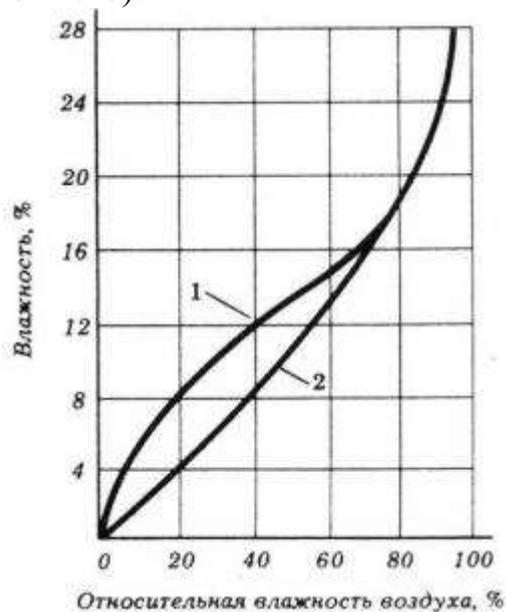


Рисунок 1.10 – Изотермы сорбции (1) и десорбции (2) зерна пшеницы

Явление сорбции и десорбции влаги и изменение равновесной влажности зерна и семян хорошо наблюдаются в полевых условиях. Так, влажность отдельных зерен в колосе в уборочный период сильно варьирует по часам суток, достигая максимума в ранние утренние часы и снижаясь до минимума к полудню и началу второй половины дня, если нет осадков.

Учитывая изменение влажности зерна по часам суток, если позволяют организационные возможности (достаточное количество техники и рабочей силы), целесообразно убирать семенные участки в наиболее благоприятные часы, когда влажность зерновой массы наименьшая и часто не требуется специального досушивания. Величинами равновесной влажности пользуются при активном вентилировании зерновых масс и их сушке.

Зерно и семена разных культур и их сортов разнообразны по форме. В пределах каждой культуры и отдельной партии зерна по форме также наблюдают различия вследствие неодинаковой степени физиологической зрелости и других причин.

Существуют следующие **формы** зерна: шарообразная, чечевицеобразная, эллипсоид вращения; форма с различными размерами в трёх направлениях.

Зерно, более приближающееся по форме к шару, даёт больший выход муки, поскольку при такой форме на оболочечные частицы приходится относительно меньшая доля, чем при любой другой форме. Зерно шарообразной формы имеет более высокую натуру, так как плотнее укладывается в мерке.

Под **линейными размерами** (рисунок 1.11) понимают длину, ширину и толщину зерна. Длинной называют расстояние между основанием и верхушкой зерна, шириной - наибольшее расстояние между боковыми сторонами, толщиной – расстояние между спинной и брюшной стороной. Совокупность линейных размеров определяет **крупность** зерна.

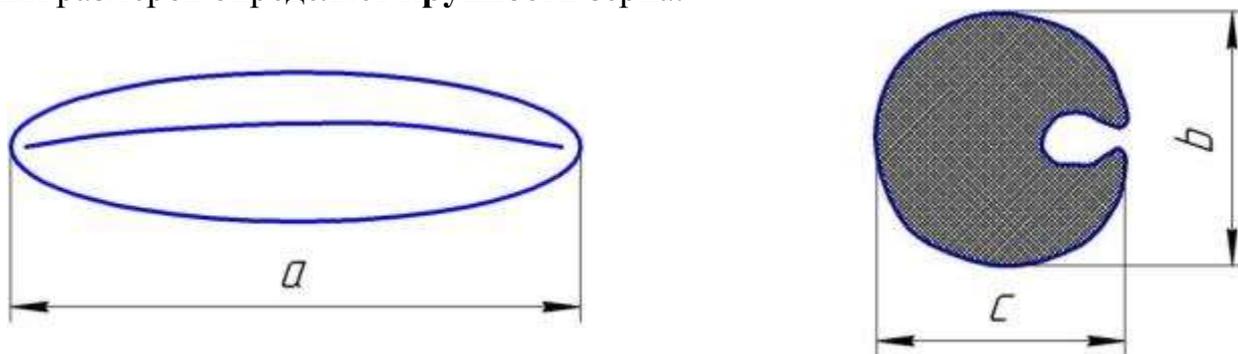


Рисунок 1.11 – Линейные размеры зерновки:

a – длина зерновки, мм; b – ширина зерновки, мм; c – толщина зерновки, мм

Крупное зерно даёт больший выход готовой продукции, так как в нём больше эндосперма и меньше оболочек.

Объём зерна имеет значение для расчёта скважистости зерновой массы, насыпной плотности, определения режима переработки зерна, величины выхода готовой продукции. Средний объём одного зерна определяют погружением навески зерна в мерную стеклянную колбу, в которую предварительно налит определенный объём жидкости, не вызывающей набухания зерна (ксилол, толуол и др.). В таблице 1.11 приведены средние значения объёма отдельных зер-

новок различных зерновых культур.

Таблица 1.11 - Средние значения объёма отдельных зерновок различных зерновых культур

Зерно	Объём, мм ³
Пшеница	11...56
Рожь	10...30
Кукуруза	140...260
Ячмень	20...40
Овёс (без плёнок)	9...16
Просо	5...6
Гречиха	9...20
Горох	114...320
Подсолнечник	22...60

Выполненными называют зёрна, достигшие при полном созревании формы с максимальной выравненностью всех структур, характерных для сорта, линии, гибрида. Выполненным может быть также мелкое, нормально развитое зерно. Такое зерно уступает по качеству крупному зерну, но даёт доброкачественные продукты переработки, хотя и в значительно меньшем объёме.

Щуплым называют зерно недостаточно выполненное, неестественно сморщенное вследствие неблагоприятных условий его развития. Щуплое зерно мелкое, с ограниченным запасом питательных веществ, иногда состоящее почти из одной оболочечной ткани.

Между выполненными и щуплыми зёрнами находятся промежуточные формы зерна различных размеров с неодинаковой выполненностью.

Степень щуплости зависит от стадии налива зерна, в которую стали проявляться неблагоприятные условия созревания.

Выравненностью называют степень однородности отдельных зёрен, составляющих зерновую массу, по влажности, размерам, химическому составу, цвету и другим показателям. Наибольшее значение для сушки имеет выравненность по влажности.

Масса 1000 зёрен показывает количество вещества, содержащегося в зерне, его крупность. Более крупное зерно имеет более высокую массу 1000 зёрен. В крупном зерне количество оболочек и масса зародыша по отношению к ядру наименьшие.

Зерно имеет разную **структуру**, т. е. определённую взаимосвязь, взаиморасположение тканей, придающее определённое строение её тканям. Структура зерна может быть стекловидной и мучнистой.

Мучнистым называют зерно, имеющее непрозрачную консистенцию с рыхломучнистой структурой. Мучнистое зерно на поперечном разрезе имеет белый цвет и вид мела.

Стекловидное - зерно, имеющее почти прозрачную консистенцию с роговидной структурой в разломе. Поперечный разрез стекловидного зерна сходен с поверхностью осколка стекла и создаёт впечатление прозрачной поверхности монолитного плотного вещества.

Различают также частично стекловидное зерно - зёрна с частично просвечиваемым или частично непросвечиваемым эндоспермом. В частично стекловидном зерне стекловидная структура может быть несплошной, или занимать

часть поверхности поперечного среза, или в виде мелких пятен, в беспорядке разбросанных по поверхности среза. В этом случае срез становится пёстрым.

Всхожесть семян - это способность семян образовывать нормально развитые проростки, то есть стебли растения в самом начале его развития из семени (ростки) вместе с развившимися зародышевыми корешками. Всхожесть определяют проращиванием семян в течение 7...10 дней при оптимальных условиях, установленных для каждой культуры.

Энергия прорастания - это способность семян быстро и дружно прорасти. Энергию прорастания определяют в тех же условиях и одновременно со всхожестью (в первые 3...4 дня). Энергию прорастания считают важным показателем посевных качеств семян. Она характеризует одновременность роста и развития растений, а также созревания и налива зерна, что улучшает его качество и облегчает уборку. Количество нормально развитых проростков подсчитывают за сутки, отчётную запись выполняют в виде дроби, в которой числитель - это энергия прорастания, знаменатель - всхожесть.

Плёнчатостью называют процентное содержание в зерне цветковых оболочек (ячмень, просо, рис, овёс), плодовых (гречиха), или семенных оболочек (клешевина). При характеристике семян масличных культур (подсолнечника, сафлора) плёнчатость заменяют **лузжистостью**.

Содержание оболочек характеризует ценность зерна для переработки. Чем больше содержание оболочек, тем относительно меньше в нём питательных веществ. Наличие оболочек усложняет и удорожает переработку плёнчатых культур. От плотности и массы оболочек зависит выход крупы. Плёнчатость изменяется по культурам. Она неодинакова у разных сортов одной и той же культуры, а в пределах сорта колеблется по районам произрастания и годам.

Натурой зерна называют массу 1 литра семян в граммах. Натуру определяют с помощью литровой пурки с падающим грузом - её выражают в граммах на литр или 20- литровой пурки, выражая в килограммах одного гектолитра зерна.

На величину натуры влияют: примеси, состояние поверхности зерна, форма зерна, крупность, плотность, влажность, плёнчатость, зрелость и выполненность зерна, масса 1000 зёрен, выравненность.

Натура приближённо показывает степень выполненности зерна. Зерно выполненное, полновесное имеет повышенную натуру.

Под **механическими свойствами** зерна понимают способность его сопротивляться разрушению с одновременным изменением формы, т. е. упруго деформироваться под действием внешних механических сил.

Содержание белковых веществ в зерне, содержание и качество клейковины - наиболее важные показатели качества зерна.

Содержание белковых веществ в зерне определяет биологическую полноценность и пищевое достоинство зерна. Как правило, более крупные, нормально созревшие зёрна имеют большее абсолютное и относительное содержание белка, чем мелкие. Щуплые зёрна при меньшем абсолютном количестве белка в процентном отношении его всегда содержат больше, чем нормально созревшие.

Клейковина - это высокогидратированная растягивающаяся (резиноподобная) масса, отмываемая водой из мелко размолотого зерна. Клейковина в основном состоит из набухших белков (70...80 % на сухое вещество), крахмала (около 20 %) и небольшого количества других веществ (жира, клетчатки и др.).

Количество клейковины связано с количеством белковых веществ. Под качеством клейковины понимают совокупность её физических свойств: растяжимость, упругость, эластичность, вязкость, связность, способность сохранять физические свойства во времени. На количество и качество клейковины оказывают влияние неблагоприятные условия созревания в колосе и при хранении.

Стандартным способом является отмывание клейковины вручную из куска теста, полученного из 25 г или более (30, 35, 40 г) размолотого зерна и соответственно 14 мл или (17, 20, 22 мл) воды.

Количество и качество пшеничной клейковины нормируются стандартом (таблица 1.12).

Таблица 1.12 - Содержание и качество клейковины по классам

Класс	Содержание клейковины	Качество клейковины
1	36 %	I группа
2	28...32 %	I группа
3	23...27 %	II группа
4	18...22 %	II группа
5	не ограничен	

Теплофизические характеристики любого материала, в т. ч. и зерна, необходимы при расчетах тепловых процессов нагрева, сушки, охлаждения. Особенностью теплофизических характеристик зерна является их зависимость от влажности, температуры, культуры, от размера зерен, от плотности зернового слоя.

В таблице 1.13 приведены ориентировочные значения теплофизических характеристик зерна и продуктов его переработки.

Таблица 1.13 – Ориентировочные значения теплофизических характеристик зерна и продуктов его переработки при температуре 20 °С [252]

Продукт	Влажность ω , %	Удельная теплоёмкость c , Дж/(кг·°С)	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С)	Коэффициент температуропроводности a , м ² /с	
Пшеница	10	1587	0,121	8,87	
Рожь	15	1836	0,148	8,93	
Овёс	10	1637	0,129	13,63	
Ячмень	10	1666	0,145	9,20	
Кукуруза	10	1650	0,119	14,25	
Рис	12	1660	0,097	9,90	
Гречиха	13	1561	0,098	10,10	
Подсолнечник	10	1938	0,089	10,44	
Горох	9,5	1440	0,105	8,90	
Соя	5,8	1558	0,110	9,10	
Мука пшеничная	13,0	1900	0,110	9,35	
Крупы	овсяная	11,8	1610	0,140	7,65
	пшено	10,0	1590	0,083	8,57
	гречневая	10,0	1428	0,115	7,80
	рис	11,0	1690	0,094	8,51
	перловая	10,0	1527	0,105	8,87

Применительно к расчетам процесса тепловой обработки рассмотрим следующие теплофизические свойства зерна.

Теплоемкость характеризует затраты теплоты на нагрев зернового материала. При расчетах чаще всего используют величину удельной теплоемкости, которая равна количеству теплоты, затраченной на нагрев 1 кг зерна на 1 градус по шкале Цельсия [251].

Удельную теплоемкость можно выразить уравнением:

$$c = \frac{\lambda}{\rho a},$$

где: c – удельная теплоёмкость зернового материала, кДж/(кг·°С); λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); ρ - плотность, кг/м³; a - коэффициент температуропроводности, м²/ч.

Теплопроводностью называют способность зерновой массы передавать теплоту при непосредственном соприкосновении зерна друг с другом, или в результате конвекции, которая состоит в перемещении нагретых частиц воздуха межзерновых пространств в верхние слои занимаемого объёма. Оценивают теплопроводность зерна и зернового слоя коэффициентом теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности - это количество теплоты, проходящее через единицу площади материала при градиенте температур, равном единице.

Коэффициент теплопроводности зерна пшеницы изменяется в пределах 0,120...0,140 Вт/(м·°С). Теплопроводность в значительной степени зависит от влажности зерна. Теплопроводность отдельной зерновки в 2...3 раза выше, чем зернового слоя.

Температуропроводность - это теплофизическая величина, характеризующая скорость изменения температуры в материале или другими словами, - характеризующая теплоинерционные свойства материала.

Зерновая масса характеризуется низким коэффициентом температуропроводности $1,7 \cdot 10^{-7} \dots 1,9 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Температуропроводность зерновой массы незначительно зависит от влажности и температуры зерна. С повышением влажности температуропроводность снижается.

Температуропроводность единичного зерна выше, чем зернового слоя. Температурная волна в зерновой массе распространяется очень медленно, со скоростью примерно 0,14 мм/с.

С увеличением коэффициента теплопроводности коэффициент температуропроводности возрастает, а при увеличении удельной теплоемкости зерна и плотности зерновой массы уменьшается (таблица 1.14).

Таблица 1.14 – Коэффициенты теплопроводности зернового слоя пшеницы Саратовская 29 [51, 52]

Влажность зерна, %	Температура зерна, °С				
	0	20	30	40	60
1	2	3	4	5	6
10	0,115	0,122	0,125	0,129	0,135
11	0,118	0,125	0,128	0,132	0,138
12	0,121	0,128	0,131	0,135	0,141
13	0,124	0,130	0,134	0,137	0,144
14	0,126	0,132	0,136	0,139	0,146
15	0,127	0,134	0,137	0,141	0,147
16	0,129	0,135	0,139	0,142	0,149

1	2	3	4	5	6
17	0,129	0,136	0,139	0,143	0,149
18	0,129	0,136	0,139	0,143	0,149
19	0,129	0,136	0,139	0,143	0,149
20	0,129	0,135	0,139	0,142	0,149
21	0,128	0,134	0,138	0,141	0,148
22	0,126	0,133	0,136	0,139	0,146
23	0,124	0,131	0,134	0,138	0,144
24	0,122	0,128	0,132	0,135	0,142
25	0,119	0,125	0,129	0,132	0,139
26	0,116	0,122	0,126	0,129	0,136
27	0,112	0,119	0,122	0,125	0,132
28	0,108	0,115	0,118	0,121	0,128
29	0,103	0,110	0,113	0,117	0,123
30	0,098	0,105	0,108	0,112	0,118

Термовлагопроводность - это перемещение влаги по направлению теплоты. Движущей силой этого явления является градиент температур.

Явление термовлагопроводности часто наблюдается в зерновой массе. Если теплое зерно положить на холодную асфальтированную площадку, то влага будет мигрировать по направлению теплоты, т. е. слой зерна, непосредственно соприкасающийся с асфальтом, будет увлажняться. Явление термовлагопроводности при работе с зерном носит как положительный, так и отрицательный характер. Например, при рециркуляционной сушке зерна термовлагопроводность способствует более интенсивному испарению влаги. При сушке зерна в шахтных сушилках, наоборот, термовлагопроводность тормозит процесс испарения влаги.

Термоустойчивость - это способность зерна сохранять в процессе сушки свои семенные, продовольственные и другие свойства. Различают несколько видов термоустойчивости.

1. Термоустойчивость зерна семенного назначения. Под этим понятием подразумевают такую температуру нагрева семян при сушке, при которой полностью сохраняются всхожесть и энергия прорастания семян. Дальнейшее повышение температуры приводит к уменьшению или к полной потере этих показателей.

2. Термоустойчивость зерна продовольственного назначения. Как правило, этот вид термоустойчивости характеризуется более высокой температурой нагрева зерна при сушке, при которой полностью сохраняются количество и качество клейковины у пшеницы, хотя всхожесть и энергия прорастания при этом ухудшаются.

3. Термоустойчивость зерна гречихи по выходу ядрицы. Этот вид термоустойчивости характеризуется такой температурой нагрева зерна гречихи при сушке, при которой выход ядрицы после шелушения зерна не уменьшается. Дальнейшее повышение температуры приводит к снижению выхода ядрицы и увеличению выхода продела и муки [3, 279].

4. Термоустойчивость подсолнечника по содержанию масличной примеси (т.е. по содержанию обрубленных зерен) характеризуется максимальной температурой нагрева семян, при которой не увеличивается масличная примесь.

5. Термоустойчивость бобовых культур характеризуется целостностью оболочек и ядра. Эта термоустойчивость значительно ниже, чем по показателю денатурации белка и даже по показателю всхожести.

Следовательно, термоустойчивость зерна характеризуется максимальной температурой нагрева зерна, при которой сохраняются те или иные заданные показатели зерна или семян.

Применительно к технологии сушки термоустойчивость зерна зависит не только от температуры нагрева зерна, но и от продолжительности воздействия теплоты, от способа или технологии сушки, от влажности зерна. Термоустойчивость зерна является главным показателем при разработке режимов сушки.

С увеличением влажности зерна возрастает и его теплоемкость. Теплоемкость влажного зерна с известным допущением можно рассчитать как среднюю величину между теплоемкостью абсолютно сухого зерна и воды по формуле:

$$c_3 = \frac{\omega}{100} c + \frac{100-\omega}{100} c_c,$$

где c – удельная теплоёмкость воды, $c = 4,19$ кДж/(кг·°С); ω – влажность зерна, %; c_c – удельная теплоёмкость сухого вещества зерна, $c_c = 1,32$ кДж/(кг·°С).

При характеристике зерновой массы следует отметить, что в ней существуют межзерновые пространства - скважины, заполненные воздухом. Они составляют значительную часть объема насыпи (таблица 1.15) и существенно влияют на другие физические свойства и физиологические процессы.

Таблица 1.15 - Скважистость зерновой насыпи и её насыпная плотность [281]

Культура	Насыпная плотность, кг/м ³	Скважистость, %	Культура	Насыпная плотность, кг/м ³	Скважистость, %
Подсолнечник масличный	325...440	60...80	Лён	580...680	35...45
Овёс	400...550	50...70	Кукуруза	680...820	35...55
Рис (зерно)	440...550	50...65	Просо	680...730	30...50
Гречиха	560...650	50...60	Рожь	680...750	35...45
Ячмень	580...700	45...55	Пшеница	730...840	35...45
Горох и люпин	750...840	40...45	Клевер красный	780...850	30...40

Воздух, циркулирующий по скважинам, конвекцией способствует передаче теплоты и перемещению паров воды. Значительная газопроницаемость зерновых масс позволяет использовать названное свойство для продувания их воздухом (при активном вентилировании) или вводить в них пары химических препаратов для обеззараживания (дезинсекции).

Скважистость зависит в основном от факторов, влияющих на натуру зерна. С увеличением влажности уменьшается сыпучесть, а следовательно, и плотность укладки. Крупные примеси обычно увеличивают скважистость, мелкие легко размещаются в межзерновых пространствах и уменьшают ее. Зерновые массы, содержащие крупные и мелкие зерна, обладают меньшей скважистостью. Выравненные зерна, а также шероховатые или со сморщенной поверхностью укладываются менее плотно.

В связи с самосортированием скважистость в различных участках зерновой массы может быть неодинаковой, что приводит к неравномерному распределению воздуха в отдельных участках. При большой высоте насыпи последняя

уплотняется и скважистость уменьшается. Зная объём, занимаемый зерновой массой, и ее скважистость, легко установить объем находящегося в скважинах воздуха. Данное количество воздуха при активном вентилировании принимают за один объём. Скважистость S (%) определяют по формуле:

$$S = \frac{V_0 - V_{и}}{V_0} 100,$$

где V_0 - общий объём зерновой массы, m^3 ; $V_{и}$ - истинный объём твердых частиц зерновой массы, m^3 .

От сыпучести зерновой массы до и после сушки зависит выбор угла наклона рабочих органов зерносушилок (коробов, выпускных устройств, самотечных труб и др.). Показателем сыпучести зерновой массы служит угол естественного откоса, который измеряют между основанием и образующей конуса зерновой насыпи при свободном падении зерна на горизонтальную плоскость. Этот угол зависит от величины, формы и шероховатости поверхности зерна, от влажности и засоренности зерна (таблица 1.16). Чем больше сыпучесть зерна, тем меньше угол его естественного откоса. Для обеспечения свободного скатывания зерна углы наклона плоскостей и патрубков обычно принимают больше углов естественного откоса на 20...25 %.

Таблица 1.16 – Зависимость угла естественного откоса различных культур от их влажности

Показатели	Пшеница		Ячмень		Рожь		Семена подсолнечника		Кукуруза	
	Влажность зерна, %	15	22	11	18	11	18	7	25	15
Угол естественного откоса, град	30	38	28	32	23	24	31	42	30	40

Толщина зернового слоя, продуваемая агентом сушки, в сушилках различных конструкций колеблется в значительных пределах. Сопротивление, оказываемое воздуху при сушке или охлаждении зерна, зависит от толщины и плотности зернового слоя, а также от скорости воздуха. Аэродинамическое сопротивление слоя зерна H , Па, определяют по формуле:

$$H = 9,81 A b v^n,$$

где A и n – коэффициенты, зависящие от культуры зерна; b – толщина зернового слоя, м; v – скорость воздуха, отнесённая условно ко всей площади зернового слоя, м/с.

В таблице 1.17 приведены значения величин A и n для различных культур.

Таблица 1.17 – Значения коэффициентов A и n

Коэффициент	Зерновой материал						
	Пшеница	Рожь	Овёс	Ячмень	Гречиха	Кукуруза	Рис
A	1,41	1,76	1,64	1,44	1,76	0,67	1,76
n	1,43	1,41	1,42	1,43	1,41	1,55	1,41

Приведенные значения A и n относят к воздуху, имеющему плотность $1,2 \text{ кг/м}^3$ (температура $20 \text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность 50 %, атмосферное давление $101,3 \text{ кПа}$).

Скорость витания - это скорость, при которой зерно под воздействием воздуха находится во взвешенном состоянии. Для пшеницы скорость витания при температуре воздуха $20 \text{ }^\circ\text{C}$ равна $9,0 \dots 11,5 \text{ м/с}$, для ржи – $8,5 \dots 10,0 \text{ м/с}$, для

овса – 8,0...9,0 м/с, для ячменя – 8,5...10,5 м/с, для семян подсолнечника – 7,0...8,5 м/с, для кукурузы – 12,5...14,0 м/с. При увеличении температуры воздуха скорость витания увеличивается вследствие уменьшения его плотности. Скорость витания учитывают при расчёте пневмогазовых сушилок и сушилок, работающих по принципу «кипящего» слоя.

Следовательно, зерно как объект сушки в зависимости от культуры имеет различные размерно-массовые, а также теплофизические свойства. Причём эти свойства различаются не только в зависимости от культуры, но и от исходной влажности, температуры и других внешних факторов. Зная и учитывая свойства зерна и зерновой массы, можно добиться на практике обеспечения требуемого качества процесса сушки.

1.2.2 Анализ способов сушки зерна

Значимость режима хранения зерновых масс в сухом состоянии привела к распространению различных способов сушки зерна. Зерносушение - специальная отрасль знаний, так как только технически и биологически грамотное проведение данного приема обеспечивает технологическую эффективность при минимальных затратах топлива, электрической энергии, труда и т. д.

Все способы сушки зерна и семян основаны на их сорбционных свойствах. Если зерновую массу или отдельные зерна и семена поместить в среду, где будет происходить отдача влаги в виде пара или даже жидкости (что бывает реже), то можно наблюдать процесс высушивания.

Сушка зерна - не только теплофизический, но и технологический процесс, цель которого - получить продукт с оптимальными свойствами.

Этой целью и определяется выбор способа сушки, конструкции сушильной установки и режима её работы. Свойства зернового материала, конструкцию сушилки, режим её работы следует рассматривать в неразрывной связи.

Влажное зерно сушат различными способами (рисунок 1.12), которые можно свести к двум основным принципам:

- удаление влаги из зерна без изменения её агрегатного состояния, т. е. в виде жидкости;
- удаление влаги из зерна с изменением её агрегатного состояния, т. е. путём превращения её в пар [87, 88, 120, 167].

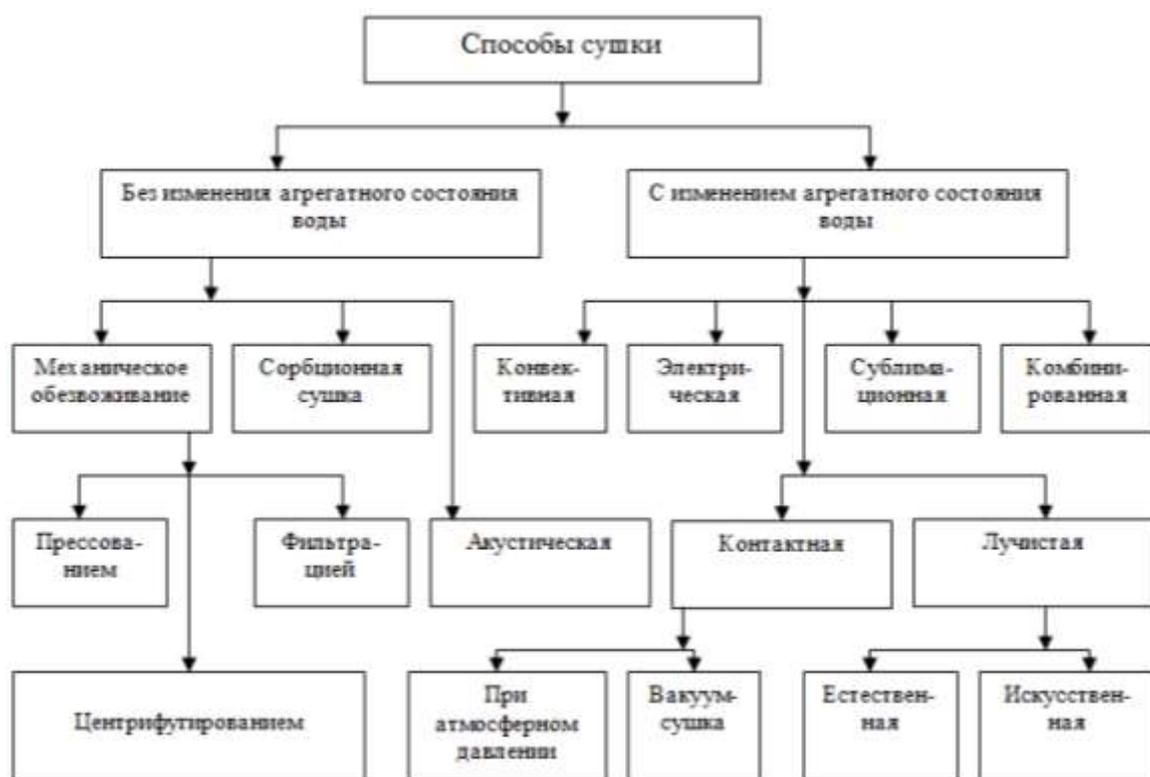


Рисунок 1.12 - Классификация способов сушки

Применение отдельных способов сушки обусловлено энергией связи влаги с зерном. При удалении свободной влаги без изменения её агрегатного состояния нужно преодолеть лишь гидравлическое сопротивление твёрдого скелета тела. При удалении связанной влаги с изменением её агрегатного состояния энергия расходуется как на преодоление силы этой связи, так и на теплоту парообразования. Таким образом, механическое обезвоживание требует меньших затрат энергии, чем тепловая сушка. Недостатком механического способа обезвоживания является его ограниченная применимость.

Первый принцип обезвоживания можно осуществить механическим (фильтрация, прессование, центрифугирование) или сорбционными способами при непосредственном контакте влажного материала с более гигроскопичными веществами (силикагелем, опилками, сухим зерном и др.).

Механический способ обезвоживания применяют при наличии свободной влаги. При этом способе свободную влагу удаляют путём механического воздействия на зерно вследствие действия на влагу силы тяжести или совместного действия силы тяжести и центробежной силы.

Сорбционный способ обычно применяют для зерна, которое не переносит термической сушки или же теряет при нагревании какие-либо ценные свойства, например, семена фасоли, сои, вики, чечевицы и др. При сорбционной сушке влажное зерно смешивают с влагопоглотителем и выдерживают в течение определённого времени. Влагопоглотитель выбирают с таким расчётом, чтобы впоследствии его можно было легко отделить от высушенного зерна. Этот же принцип используют и при смешивании влажного зерна с более сухим зерном той же культуры. При этом часть влаги переходит от более влажного зерна к менее влажному и влажность всей зерновой массы выравнивается.

Сорбционная сушка не требует расхода теплоты на нагрев и энергии на вентиляцию и обеспечивает сохранение качества материала, в частности зерна (особенно семенного). Однако сушка смешиванием идёт очень медленно (1...2 недели) и требует дополнительных помещений для выделения и регенерации (высушивания) влагопоглотителя.

При акустической сушке влага экстрагируется из обрабатываемого зерна под действием ультразвуковых волн. Сушка протекает без повышения температуры высушиваемого материала, зерно при этом сохраняет исходные биологические свойства.

Процесс акустической сушки состоит из двух периодов. Первый - удаление влаги, которая находится на поверхности зерновки, а оставшаяся распределяется по капиллярам равномерно и этот процесс постоянно повторяется, что позволяет уменьшить толщину пограничного слоя. Второй период начинается с того момента, когда зерно доходит до заданной влажности путем испарения, т.е. влага начинает перемещаться на поверхность, выдавливается пузырьками, которые возникают в жидкости из-за колебаний, при этом вязкость жидкости уменьшается.

Если механическое обезвоживание целесообразно применять для удаления свободной влаги, то тепловую сушку - для удаления более прочно связанной влаги. Поэтому тепловая сушка связана с затратами теплоты на изменение агрегатного состояния воды, превращение её из жидкого состояния в газообразное. Для испарения влаги к объекту сушки подводят теплоту.

В зависимости от того, как передаётся теплота объекту сушки, различают следующие способы тепловой сушки: конвективный, контактный (кондуктивный), лучистый (радиационный), электрический (токами высокой частоты), молекулярный (сублимацией). Кроме того, в настоящее время всё большее распространение получают высокопроизводительные и экономичные комбинированные способы сушки материалов: конвективно-лучистый, лучисто-высокочастотный, сублимационно-лучистый и другие [200...202].

Конвективный способ широко используют для сушки зерна. Теплота, необходимая для нагрева и испарения из него влаги, передаётся от движущегося газообразного теплоносителя - агента сушки (нагретого воздуха или его смеси с топочными газами) (рисунок 1.13).

Агент сушки не только передаёт теплоту материалу, но также поглощает и уносит испарённую из него влагу. Направление движения агента сушки может совпадать с направлением движения материала (прямоток), иметь противоположное направление (противоток) или быть перпендикулярным ему (перекрёстный ток). Выбор направления движения агента сушки зависит от свойств материала, подвергающегося сушке.

Сушка зерна подогретым воздухом исключает возможность попадания в сушильную камеру и соприкосновения с зерном продуктов сгорания топлива. Однако при подогреве воздуха в паровых или газовых калориферах удельный расход топлива на сушку в 1,5 раза больше по сравнению с сушилками, работающими на смеси топочных газов с воздухом. Это объясняется большими по-

терями теплоты, уходящей с дымовыми газами в атмосферу из топки парового котла или из газового калорифера.

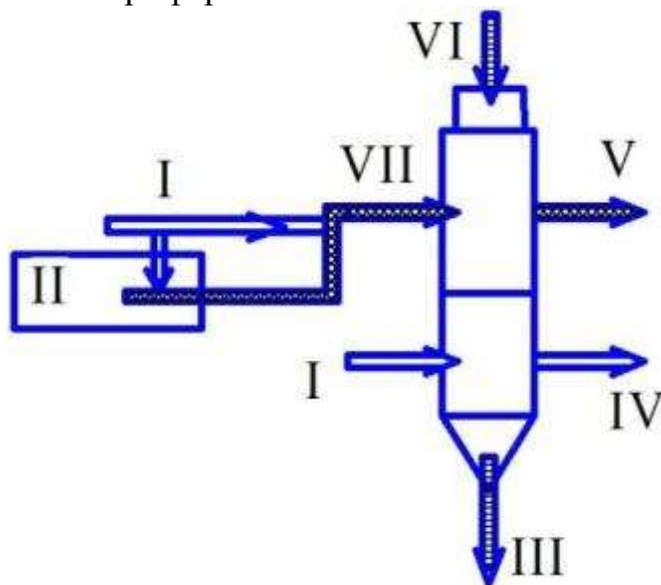


Рисунок 1.13 - Схема процесса сушки зерна конвективным способом:

I - атмосферный воздух; II - топочные газы; III - просушенное зерно; IV - отработавший воздух; V - отработавший агент сушки; VI - зерно на сушку; VII - агент сушки

В топках современных зерносушилок, работающих на жидком или газообразном топливе, при правильном их обслуживании достигают полного сгорания топлива, и конвективная сушка смесью воздуха с топочными газами не вызывает ухудшения качества, цвета и запаха просушиваемого зерна.

При конвективной сушке зерновой слой может находиться в разных состояниях - плотном, разрыхленном, пересыпающемся, падающем. При сушке зерна в плотном, медленно движущемся вертикальном слое толщиной 100...200 мм (в сушилках шахтного типа) зерно находится в сушильной камере 30...60 мин. в зависимости от режима сушки. За это время при скорости агента сушки в зерновом слое около 0,3 м/с и температуре 120...150 °С зерно нагревается до 45...55 °С, влажность его снижается на 5...6 %. В охлаждающей камере, расположенной обычно непосредственно под сушилкой, в течение 15...20 мин. влажность зерна дополнительно снижается на 0,5...1,0 %.

Учитывая зависимость термоустойчивости зерна от его влажности, в шахтных зерносушилках обычно применяют так называемые двухступенчатые режимы, т. е. в верхнюю часть шахты (первую ступень сушки) подают агент сушки с более низкой температурой, чем в нижнюю часть шахты (вторую ступень) [47].

Конвективную сушку в разрыхленном или «кипящем» слое осуществляют на сетке. Через сетку зерно продувают агентом сушки, имеющим скорость 10...12 м/с. Вследствие малого снижения влажности при быстром нагревании зерна сушилки с кипящим слоем не нашли широкого практического применения.

Конвективную сушку пересыпающегося слоя зерна применяют в сушилках барабанного типа, в которых зерно поднимается лопастями в медленно

вращающемся барабане (цилиндре). Производительность таких сушилок не более 8 плановых т/ч, а съём влаги за один пропуск составляет 3...5 %.

Конвективную сушку осуществляют также в падающем слое, скорость движения зерна в котором в сотни раз выше, чем в плотном движущемся слое. В современных зерносушилках применяют противоточный падающий слой с искусственно замедленным движением зерен (в камерах нагрева так называемых противоточных рециркуляционных сушилок). Свободное падение зёрен ограничивают потоком агента сушки, движущимся снизу вверх навстречу падающему зерну, а также с помощью решетчатых, трубчатых и других элементов. Зерно в камере нагрева таких сушилок находится несколько секунд, поэтому можно использовать агент сушки с высокой температурой (350...400 °С). За это время зерно нагревается до температуры 50...60 °С, а влажность уменьшается в среднем на 0,7 %.

Для доведения зерна до сухого состояния применяют рециркуляцию, т. е. возврат части подсушенного зерна снова в камеру нагрева после смешивания с сырым зерном. Циклы нагрева зерна, отлежки его в тепловлагообменнике, промежуточного и окончательного охлаждения многократно повторяются.

В последние годы получил широкое распространение рециркуляционно-изотермический способ сушки зерна как наиболее прогрессивный. При этом применяют предварительный нагрев вновь поступающего сырого зерна.

При данном способе сушки значительно сокращается число циклов рециркуляции, что уменьшает затраты электроэнергии на транспортирование зерна. Кроме того, этот способ снижает травмирование поверхности зерна, что особенно важно для семенного зерна, бобовых культур, риса. Способ рециркуляционно-изотермической сушки позволяет лучше сохранить качество зерна и одновременно уменьшить затраты на топливо и электроэнергию по сравнению с другими разновидностями конвективной сушки.

Конвективную сушку неподвижного зернового слоя (насыпи) можно проводить на площадках и в складах атмосферным воздухом при помощи устройств активного вентилирования.

В зависимости от температурных режимов процесса можно также выделить три принципиально различающихся способа конвективной сушки.

1. Циркуляционная сушка, при которой температуру теплоносителя на входе в сушилку принимают высокой, а экспозицию снижают.

2. Сушка с использованием средних температур (например, в барабанных сушилках), при этом температура сушильного агента находится, приблизительно, в диапазоне 400...600 °С.

3. Сушка при низких температурах (в сушилках с наклонными решётками, шахтных и спирально-конических); здесь температура сушильного агента находится в пределах 100...200 °С. Этот способ сушки пригоден для установок небольшой производительности.

Контактным или кондуктивным, называют способ сушки, при котором влажный материал (объект сушки) соприкасается с нагретой поверхностью и получает теплоту непосредственно от этой поверхности путём теплопроводности.

сти (кондукции). Воздух при этом способе требуется только для удаления водяного пара из сушилки, являясь влагопоглотителем. Коэффициент теплоотдачи a_T при этом способе значительно выше, чем при конвективной сушке, и составляет 170...180 Вт/(м²·°С) (при конвективном способе передачи теплоты $a_T = 35...115$ Вт/(м²·°С).

Температура в разных слоях материала различная: наибольшая у слоя, контактирующего, с греющей поверхностью, наименьшая у наружного слоя. Влагосодержание в процессе контактной сушки постепенно уменьшается от слоев, соприкасающихся с нагретой поверхностью, к наружным слоям. Таким образом, скорость контактной сушки определяется только градиентом температуры ∇t . Градиент влагосодержания ∇u оказывает тормозящее действие на перемещение влаги к поверхности материала. Градиенты влагосодержания ∇u и температуры ∇t совпадают только в слоях вблизи открытой поверхности материала, ускоряя перенос влаги.

Высокий коэффициент теплоотдачи обеспечивает преимущество контактной сушки перед конвективной. Поэтому при небольшой температуре зернового слоя можно добиться хорошего качества высушиваемого материала при меньших энергозатратах.

Горячая поверхность чаще всего обогревается водяным паром температурой выше 100 °С, поэтому контактирующие слои материала могут достичь этой температуры, в результате чего качество готового продукта ухудшится. Обязательное условие при этом способе сушки - хороший контакт материала с горячей поверхностью.

Контактным способом можно сушить при нормальном давлении или в вакууме. Чем больше вакуум, тем интенсивнее испарение влаги из материала. Скорость сушки в вакуумных сушилках возрастает с увеличением вакуума и повышением температуры высушиваемого материала.

К контактному способу относят и сушку в жидких средах, при которых теплота, необходимая для нагрева материала и превращения влаги в пар, берётся от горячей жидкости (олифы, петролатума, расплавленной серы), смачивающей материал. При температуре этой жидкости свыше 100 °С влага выпаривается из материала. Вследствие интенсивного испарения влаги по толщине материала возникает устойчивый градиент давления пара, направленный от центра к поверхности материала, под действием которого влага переносится к поверхности. Диффузионный перенос вещества, обусловленный термовлагопроводностью материала, в данном случае заменяется молекулярным движением пара, обусловленным градиентом давления.

При сушке влажных материалов в жидких средах вследствие замены диффузионного переноса влаги молярным движением пара, скорость сушки возрастает в 5...10 раз по сравнению с конвективной, а расход теплоты на 1 кг испарённой влаги оказывается несколько выше. Этот способ обычно используют для сушки древесины.

Основной недостаток контактного способа сушки - неравномерный нагрев материала: слой материала, соприкасающийся с нагретой поверхностью,

перегревается, в то время как слои, удалённые от поверхности, слабо нагреваются и медленнее просушиваются.

Следует также отметить, что применение конвективного способа подвода теплоты в установках сравнительно небольшой производительности для фермерских хозяйствах нерентабельно, так как сушильные установки, в которых реализуют этот принцип, обладают высокой стоимостью. Использование же контактного способа передачи теплоты с одновременным транспортированием исходного материала при хорошей термоизоляции установок для тепловой обработки зерна позволяет снизить затраты на сушку зерна.

При лучистом (радиационном) способе сушки теплота к влажному материалу подводится в виде лучистой энергии.

Такой вид сушки можно подразделить на естественную (солнечными лучами) и искусственную (инфракрасными лучами, создаваемыми спиральными нагревательными элементами (ТЭН) и керамическими нагревателями).

Солнечная сушка зерна не утратила своего значения во многих районах страны при сушке небольших партий семян. Во время воздушно-солнечной сушки влага испаряется только через поверхность насыпи зерновой массы. Чем тоньше слой зерна, тем интенсивнее оно высушивается. Однако при малой толщине слоя требуется большая площадь для размещения зерна. Рекомендуют следующую толщину насыпи зерна: основных зерновых культур - 10...20 см, зернобобовых – 10...15 см, проса – 4...5 см.

Важный фактор при солнечной сушке - характер основания, на котором находится зерновая масса. Нельзя сушить зерно на бетонных площадках (если они не изолированы от грунта), прямо на грунте или с подстилкой брезентов на грунт. Только деревянная или асфальтированная площадка достаточно изолирует зерно от увлажнения снизу (от грунта) и предохраняет от возникновения большого температурного градиента. Такие площадки располагают на территории тока или между складами, хорошо изолируют от грунта и делают небольшой уклон (6°) к югу. При подобном наклоне зерновая масса лучше прогревается, а с незагруженных площадок быстрее стекает дождевая вода.

Зерновая масса, рассыпанная на площадке тонким слоем (лучше с гребнями, что увеличивает ее поверхность и создает разницу в давлении), нагревается с поверхности до температуры 25...50 °С, а иногда и больше. Это приводит к интенсивному испарению влаги из зерен, находящихся в верхнем слое насыпи [15].

Особенно успешно сушка происходит в ветреную погоду, так как выделяющиеся пары воды не задерживаются над поверхностью насыпи.

Наряду с перемещением влаги к поверхности наблюдается и обратный процесс - перемещение ее во внутренние, самые нижние слои насыпи с образованием конденсата, что заметно даже на ощупь. Подобное явление происходит вследствие термовлагопроводности. Для успешной сушки зерновую массу необходимо периодически, через каждые 2...3 ч, перелопачивать, перемешивая нижние слои с верхними.

При соблюдении указанных выше правил влажность зерна в хорошую по-

году за день снижают на 1...3 % и более. Чем влажнее зерновая масса, тем больше влаги при благоприятных условиях можно удалить из нее. При необходимости (учитывая прогноз погоды на следующие сутки) воздушно-солнечную сушку продолжают и на следующий день, собирая зерновую массу на ночь на площадке в ворох и укрывая её гидроизоляционными материалами.

Воздушно-солнечная сушка способствует дозреванию свежесобранного зерна и делает его более устойчивым при хранении, так как под действием солнечных лучей в зерновой массе частично уничтожаются микроорганизмы. После такой сушки часто не обнаруживают грибы родов *Aspergillus* и *Penicillium*. В южных районах страны при воздушно-солнечной сушке и нагреве насыпи до температуры 38...40 °С достигается частичное, а в некоторых случаях и полное обеззараживание зерновой массы от клещей и насекомых. Для повышения эффективности обеззараживания зерно насыпают слоем 4...5 см [111, 224].

Инфракрасные лучи (ИКЛ) - невидимые тепловые лучи с длиной волны 0,74...2000 мкм [215].

Плотность теплового потока ИК - излучения может быть определена из соотношения:

$$q = \varepsilon_m C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где q - плотность теплового потока, Вт/м²; $\varepsilon_m = 0,7...0,8$ - степень черноты излучающего элемента; C_0 - коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴), для абсолютно черного тела $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴); T - абсолютная температура излучающего элемента, К.

Коэффициент полезного действия ИК - излучателей составляет 0,65...0,8.

Для сушки растительных пищевых материалов практическое применение получили коротковолновые ИКЛ (длина волны 1,6...2,5 мкм). При сушке ИКЛ к материалу подводится тепловой поток в несколько десятков (от 30 до 70) раз мощнее, чем при конвективной сушке.

Скорость сушки инфракрасными лучами увеличивается по сравнению с конвективной, но не пропорционально увеличению теплового потока. Например, для плодов и овощей сушка ИКЛ ускоряется по сравнению с интенсифицированными методами конвективной сушки на 25...95 %. Это можно объяснить тем, что скорость сушки зависит не столько от скорости передачи теплоты, сколько от скорости перемещения влаги внутри материала. В целях сохранения качества высушенного продукта применение мощных потоков ИКЛ не рекомендуется.

По характеру излучателей ИКЛ различают сушилки с электрическим и газовым обогревом. Сушилки с электрическим обогревом компактны, просты в обращении и эксплуатации, безынерционны. Однако высокий расход электроэнергии и неравномерность сушки ограничивают их применение.

Сушилки с газовыми панельными излучателями более экономичны и обеспечивают более равномерную сушку, чем сушилки с электрообогревом.

Искусственная сушка ИКЛ, излучаемыми генераторами инфракрасного излучения (специальными электролампами, керамическими и металлическими панелями, нагреваемыми электротокотом или газом), характеризуется высокими

тепловыми напряжениями, возникающими на поверхности облучаемого материала. В результате создаётся значительный температурный градиент, препятствующий перемещению влаги из толщи материала к поверхности. Поэтому применение этого вида сушки ограничивается свойствами материалов, являющихся объектами сушки. Целесообразно применять прерывистое облучение (импульсную сушку), при которой в период облучения поверхность материала быстро нагревается и обезвоживается, а в период отволаживания влага от внутренних слоёв материала перемещается к наружным. Несмотря на ряд преимуществ (простота оборудования, гибкость управления и др.), сушка ИКЛ в чистом виде не получила достаточного распространения вследствие неравномерного нагрева материала, низкого коэффициента полезного действия генераторов инфракрасного излучения и значительного расхода электрической энергии (не менее 1,5 кВт·ч на 1 кг испаренной влаги) [46, 113, 220].

Сублимация или молекулярная сушка осуществляется в условиях глубокого вакуума (13,3...133,3 Па). Процесс протекает следующим образом. Вначале теплота, необходимая для испарения влаги, отнимается от высушиваемого материала, вследствие чего его температура значительно понижается, а оставшаяся в нём влага замораживается и выходит на поверхность в виде кристалликов льда. В дальнейшем при подводе теплоты извне лед испаряется, т. е. превращается в водяной пар, минуя жидкую фазу. Молекулярная структура материала при этом полностью сохраняется.

Сушку сублимацией (молекулярную сушку) применяют в тех случаях, когда требуется сохранить молекулярную структуру и первоначальные свойства материала. Этот способ применяют для сушки фруктов, овощей, мяса, различных биологических препаратов. Объём, цвет, вкус, запах и биологическая ценность материалов, высушенных методом сублимации, сохраняются в значительно большей степени, чем при других способах сушки. Резкое снижение гигроскопичности обеспечивает возможность длительного хранения, а почти полное сохранение объёма (усадка всего 3...4 %) и высокая пористость высушенного материала - восстановление его первоначальных свойств при увлажнении. Однако широкого распространения этот способ не получил вследствие сравнительно низкой производительности сублимационных сушилок, сложности оборудования и высокой стоимости сушки.

При электрической сушке токами высокой и сверхвысокой частот (соответственно ТВЧ и СВЧ) материал, являющийся диэлектриком, помещают в электрическое поле между двумя пластинами (обкладками конденсатора). Молекулы материала поляризуются и приводятся в колебательное движение, сопровождающееся трением частиц и нагревом. Выделившуюся в результате нагрева и испарения влагу удаляют вместе с поглотившим её воздухом. Так как нагрев начинается в центре, температурный градиент совпадает с градиентом влажности, усиливая миграцию влаги к периферии. Материал нагревается очень быстро (в течение нескольких секунд) и равномерно по всей толщине.

Сушка сельскохозяйственных материалов в поле высоких и сверхвысоких частот несмотря на ряд преимуществ (быстрый нагрев материала, очень высо-

кая интенсивность сушки), не находит широкого применения вследствие большого расхода электрической энергии (2,5...5 кВт·ч на 1 кг испарённой влаги), а также в связи со сложностью оборудования и обслуживания установок с высоким напряжением.

В настоящее время неоспоримы преимущества применения различных комбинированных способов сушки: конвективного в сочетании с контактным, лучистым или электрическим; лучистого - с высокочастотным, сублимационного - с лучистым и др. Использование комбинированных способов позволяет значительно ускорить сушку, сократить расход энергии, добиться более гибкого управления процессом, сохранить ценные качества высушиваемого материала. Например, применение конвективно - высокочастотного способа подвода теплоты, сочетающего быстрый нагрев в поле ТВЧ с интенсивным испарением влаги, уносимой потоком нагретого воздуха, позволяет более чем в два раза сократить расход электроэнергии (по сравнению с конвективным способом сушки) при снижении градиента температуры, обуславливающего сохранение, а иногда и улучшение свойств высушиваемых материалов.

Обобщая результаты анализа способов сушки, можно сделать следующие заключения.

1. Предпочтительно использовать комбинированный способ сушки, что позволяет интенсифицировать процесс сушки, снизить металлоёмкость сушильной установки до 30 %.

2. Для зерносушилок относительно небольшой производительности предпочтительно использовать контактный способ подвода теплоты с обдуванием слоя высушиваемого материала воздушным потоком. При реализации этого способа сушки необходимо организовать постоянное перемешивание зернового слоя, так как сушка зерна контактным способом в плотном неподвижном слое характеризуется большой неравномерностью нагрева зерна и удаления влаги.

1.3 Требования, предъявляемые к зерносушильным установкам

Качество продовольственного зерна оценивают наличием трещин, количеством и качеством (плотностью) содержащейся в нём клейковины, а также определяют по цвету и запаху. Основные показатели качества семенного зерна - всхожесть и энергия прорастания.

Для сохранения качества зерна необходимо поддерживать оптимальный режим его сушки, т. е. устанавливать наивыгоднейшие при данных условиях температуру, влажность и скорость движения сушильного агента. Следовательно, конструкция зерносушилки должна обеспечивать регулирование указанных параметров процесса.

Во всём объёме сушильной камеры должна быть одинаковая скорость сушки; допустимая неравномерность сушки ± 1 % (при конечной влажности 14 %), а допустимая неравномерность нагрева зерна - 3...4 °С.

Ухудшение качества зерна на выходе из зерносушилки свидетельствует о нарушении оптимальных значений того или иного параметра процесса сушки вследствие неправильной регулировки, недостатков конструкции или неисправности сушилки. Уменьшение содержания и ухудшение качества клейкови-

ны в пшенице является следствием перегрева зерна. Запаривание зерна свидетельствует о низкой температуре теплоносителя или недостаточном его количестве.

Съём влаги за один проход через зерносушилку не должен превышать 6 % для большинства злаковых и 3...4 % для бобовых, а также кукурузы, риса, проса и гречихи. При несоблюдении этого требования зерна сморщиваются или растрескиваются [18, 114, 115].

Современные зерносушилки должны обладать универсальностью - обеспечивать возможность сушки зерна различных культур, резко различающихся физико-химическими, биологическими, структурно-механическими и другими технологическими свойствами.

Производительность зерносушилок выражают в плановых тоннах. Под плановой тонной сушки принято понимать снижение влажности 1 т зерна пшеницы с 20 % до 14 %. При этом коэффициент перевода физических тонн в плановые равен единице (таблица 1.18).

Таблица 1.18 - Коэффициенты k_n перевода количества просушенного зерна в плановые тонны

Влажность зерна, %		k_n	Влажность зерна		k_n
до сушки	после сушки		до сушки	после сушки	
16	13	0,74	25	15	1,43
16	14	0,54	25	16	1,28
17	13	0,87	25	17	1,13
17	14	0,67	25	18	1,00
18	13	1,00	25	19	0,89
18	14	0,80	26	16	1,39
18	15	0,62	26	17	1,27
19	13	1,08	26	18	1,13
19	14	0,92	26	19	0,99
19	15	0,74	26	20	0,88
20	13	1,15	27	17	1,39
20	14	1,00	27	18	1,24
20	15	0,87	27	19	1,12
21	13	1,24	27	20	0,99
21	14	1,10	27	21	0,87
21	15	0,97	28	18	1,37
22	13	1,34	28	19	1,24
22	14	1,20	28	20	1,12
22	15	1,08	28	21	0,97
22	16	0,96	28	22	0,86
23	13	1,49	29	19	1,37
23	14	1,31	29	20	1,24
23	15	1,17	29	21	1,10
23	16	1,05	29	22	0,97
23	17	0,93	29	23	0,85
24	14	1,46	30	20	1,37
24	15	1,29	30	21	1,22
24	16	1,15	30	22	1,10
24	17	1,01	30	23	0,97
24	18	0,91	30	24	0,85

Суммарную производительность зерносушилок Q_c , пл. т./ч, определяют по формуле:

$$Q_c = \frac{m_z k_o k_{\Pi}}{t_c \Pi_p},$$

где m_z - масса зерна, поступающего на предприятие за расчётный период заготовок, т; k_o - коэффициент очистки зерна от примесей, колеблется от 0,6 до 0,99; k_{Π} - коэффициент перевода физических тонн в плановые (определяют по таблице 1.19); t_c - время работы сушилок в сутки, ч; Π_p - расчётный период заготовок зерна, сут.

Для различных регионов нашей страны расчётный период заготовок зерна составляет по нормам: для восточных районов - 30 суток, центральной части - 20 суток, южных районов - 15 суток.

Общие требования к зерносушильным установкам можно сформулировать следующим образом. Зерносушилки должны:

- обеспечивать высокое качество просушенного зерна при полном сохранении, в зависимости от его назначения, семенных, пищевых, технологических достоинств;

- иметь возможность одновременной сушки зерна различной влажности, что позволяет формировать партии зерна по природным и технологическим достоинствам;

- иметь возможность высушивать зерно любой начальной влажности до заданной за минимальное количество проходов;

- иметь возможность сушки зерна без его очистки от легких примесей;

- обладать универсальностью (позволять сушить зерно различных культур);

- иметь высокие технико-экономические показатели;

- иметь высокую надежность в работе, простоту и безопасность в обслуживании;

- иметь возможность автоматизации управления процессом сушки.

- удовлетворять современным требованиям по защите окружающей среды от вредных выбросов.

1.4 Анализ конструкций и классификация средств механизации процесса сушки зерна

Для освоения опыта создания конструкций зерносушилок и оценки соответствия их основным технологическим и экономическим требованиям необходимо классифицировать зерносушилки. В основу классификации сушилок в зависимости от задач анализа могут быть положены различные показатели: пропускная способность, металлоёмкость, конструктивные особенности, способ подвода энергии, способ удаления влаги и др. На рисунке 1.14 приведена классификация установок для сушки зерна, сгруппированных по ряду основных признаков.

Установки классифицируют по следующим признакам:

- по способу действия: с механическим обезвоживанием, сорбционные, тепловые, сублимационные, пневматические;
- по способу нагрева теплоносителя: с огневым теплогенератором, с водным калорифером, с паровым калорифером, с электронагревом, комбинированные;
- по способу интенсификации процесса: с псевдоожижением, с вибропобуждением рабочих органов; с рециркуляцией; с применением электроактивированного воздуха (ЭАВ); комбинированные и другие;
- по принципу действия: периодического или непрерывного;
- по величине давления воздуха: вакуумные (100...900 Па); атмосферного давления (0,1 МПа); с повышенным давлением (более 0,1 МПа); с высоким давлением (более 0,2 МПа);
- по конструкции рабочей камеры: шахтные, барабанные, камерные, лотковые, трубчатые, бункерные, конвейерные, стеллажные, платформенные, ленточные и другие;
- по направлению движения зерна и теплоносителя: прямоточные, противоточные, с поперечным потоком, со смешанным потоком, реверсивные;
- по назначению: специализированные, универсальные;
- по мобильности: стационарные и передвижные;
- по способу нагрева сырья: воздушные, газовые, газо-воздушные, с нагретой поверхностью, с лучистой энергией;
- по состоянию зернового слоя: с плотным малоподвижным, пересыпающимся, пересыпающимся разрыхленным, псевдоожигенном (кипящим) и взвешенным слоем;
- по способу подвода теплоты: конвективные, контактные, лучистые, электрические, комбинированные;
- по способу удаления влаги из сушильной камеры: с применением агента сушки, с использованием сорбентов, с химическим поглощением влаги.

Основным признаком, по которому можно классифицировать установки для сушки зерна и который оказывает большое влияние на их конструктивно-технологическую схему и эффективность использования энергии, является реализуемый способ подвода теплоты.

Конвективный способ подвода теплоты наиболее распространен. На рисунке 1.15 дана классификация зерносушилок конвективного действия. В таких установках агент сушки одновременно является теплоносителем и влагопоглотителем.

Сушка зерна в неподвижном слое характеризуется тем, что скорость зерна равна нулю, а скорость теплоносителя значительно меньше скорости вращения зерна.

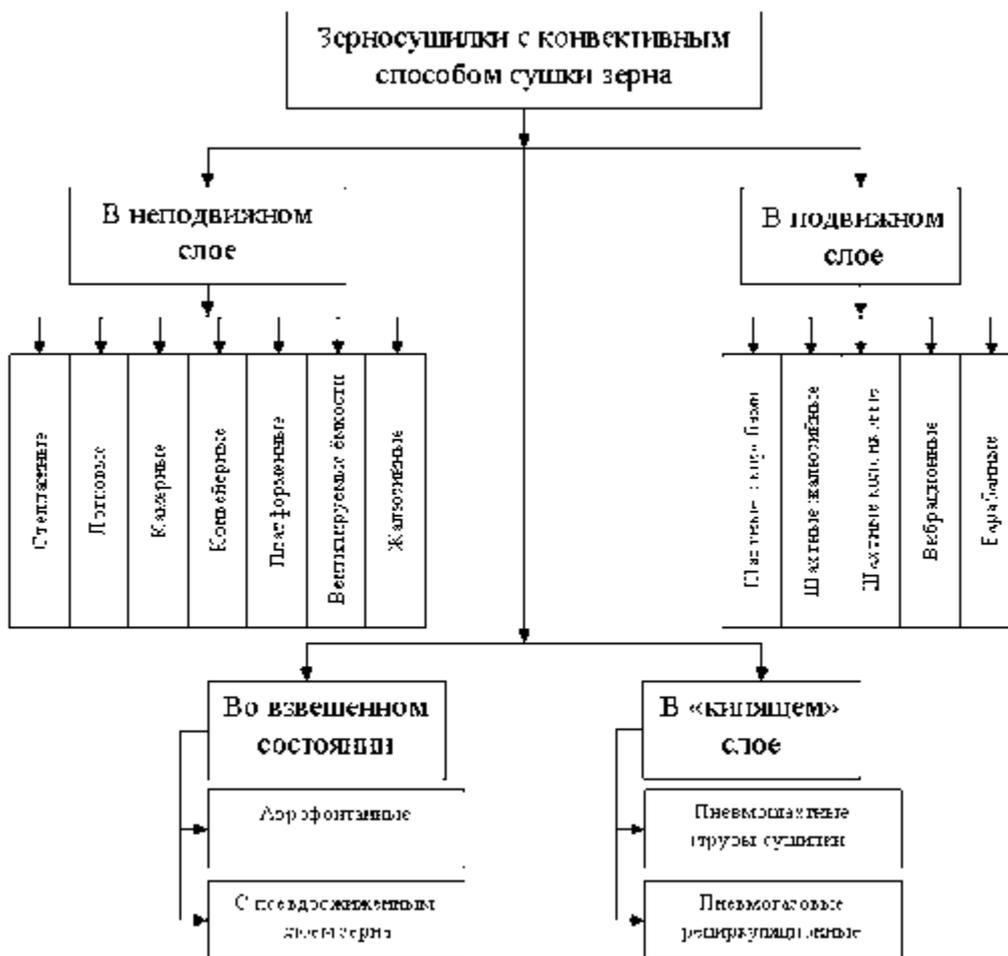


Рисунок 1.15 - Классификация зерносушилок конвективного действия

Все сушилки, осуществляющие сушку зерна в неподвижном слое, - установки периодического действия. Они просты по устройству. Однако вследствие неравномерности нагрева зерна, низкого теплового коэффициента полезного действия, повышенных эксплуатационных расходов и невозможности организовать поточный технологический процесс эти зерносушилки не нашли широкого применения. К этой группе относят стеллажные, лотковые, камерные, конвейерные, платформенные, вентилируемые емкости и жалюзийные зерносушилки (рисунок 1.16, а, б, в, г, д, е, ж).

При сушке в подвижном слое скорость зерна больше нуля, а скорость теплоносителя несколько меньше скорости витания зерна. Установки для сушки зерна в подвижном слое наиболее распространены как в нашей стране, так и за рубежом. К ним относят шахтные (рисунок 1.16, ж, з, и), барабанные (рисунок 1.16, к) и вибрационные (рисунок 1.16, л) зерносушилки.

Сушка в «кипящем» слое возможна в аэрофонтанных сушилках (рисунок 1.16, н) и в сушилках с псевдооживленным состоянием зерна (рисунок 1.16, м). К недостаткам таких сушилок можно отнести неравномерность сушки.

Сушка зерна во взвешенном состоянии осуществляется в трубах-сушилках (рисунок 1.16, о), пневмогазовых рециркуляционных сушилках (рисунок 1.16, п) и характеризуется тем, что скорость теплоносителя значительно больше скорости витания зерна.

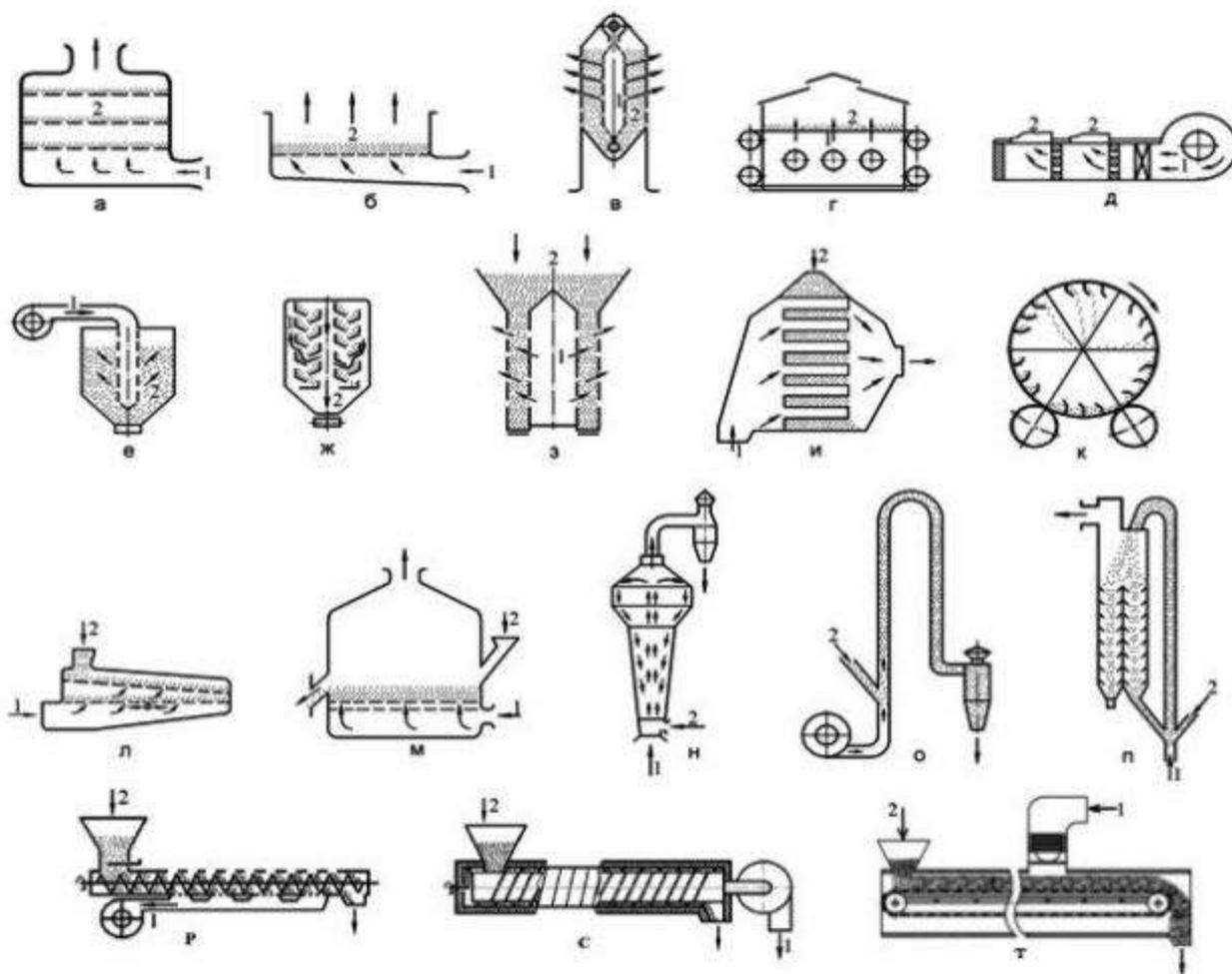


Рисунок 1.16 – Схемы сушильных установок:

а – стеллажная; б – лотковая; в – камерная; г – конвейерная; д – платформенная; е – вентилируемая емкость; ж – жалюзийная; з – колонковая; и – шахтная с коробами; к – барабанная; л – вибрационная; м – с псевдоожиженным состоянием зерна; н – аэрофонтанная; о – труба-сушилка; п – пневмогазовая рециркуляционная; р, с – спирально-винтовые; т – сушилка с рабочим органом, выполненным в виде скребкового транспортёра; 1 – агент сушки; 2 – зерно

Контактный способ сушки можно осуществлять в зерносушилках с рабочими органами, выполненными в виде спирально винтовых или скребковых транспортёров. При этом обеспечивается сушка зерна с одновременным его транспортированием (рисунок 1.16, р, с, т).

Рассмотрим конструктивные особенности наиболее распространённых сушилок.

Барабанные зерносушилки получили широкое распространение для сушки зерна злаковых культур, подсолнечника и др. В системе хлебопродуктов и в сельском хозяйстве применяют сушилки барабанного типа как стационарные, так и передвижные. К стационарным барабанным относят зерносушилки СЗСБ-8 и СЗСБ-8М, к передвижным - барабанную сушилку СЗПБ-2,5.

Основным элементом барабанных сушилок является горизонтальный или чуть наклоненный вращающийся со скоростью $2...6 \text{ мин}^{-1}$ цилиндрический барабан, внутри которого перемещается по длине и сушится зерно. Внутри барабана в зависимости от высушиваемого продукта установлены различного типа

насадки или продольные лопасти, способствующие интенсификации процесса сушки.

Основная характеристика барабанных сушилок - влагонапряжение объема барабана, т. е. количество испаренной влаги с 1 м³ объема барабана. Величина влагонапряжения колеблется от 6 до 44 кг исп. вл/ (м³·ч) и зависит от типа, степени заполнения и частоты вращения барабана, теплофизических свойств и размеров зерна, а также от температуры, влажности и скорости агента сушки внутри барабана. Расход теплоты составляет 5,23...12,5 кДж/кг исп. влаги, а расход электроэнергии - 0,1...0,2 кВт·ч/кг исп. вл.

Зерносушилка стационарная барабанная СЗСБ-8 предназначена для сушки различных зерновых и масличных культур любой степени влажности и засоренности без предварительной их очистки.

Зерносушилка СЗСБ-8 состоит из топki, загрузочной камеры, сушильного барабана, разгрузочной камеры, охладительной колонки, разгрузочной норii, вентилятора охладительной колонки, вентилятора сушильного барабана, загрузочной норii и приводного механизма.

Топка зерносушилки работает на жидком топливе. Она состоит из камеры сгорания, топливной системы питания, вентилятора распыливания топлива, станины, дымовой трубы и блокировочного устройства [170, 171].

Загрузочная камера установлена рядом с передним торцом сушильного барабана и служит для подачи агента сушки и сырого зерна в барабан сушилки. На верхней стенке камеры установлен патрубок, соединяющий камеру с трубопроводом подачи агента сушки. Дно камеры конусное и заканчивается клапаном-мигалкой, через который излишек влажного зерна можно удалять из камеры.

Сушильный барабан - шестисекционный, с подъемно-лопастной системой. Крестовина съемная, из четырех частей. В передней конусной части барабана находятся шесть винтовых дорожек, подводящих зерно к секторам. Винтовые дорожки в конце барабана предназначены для его отвода.

Сушильный барабан заканчивается конусным патрубком, к наружному фланцу которого присоединено съемное подпорное кольцо с шестью люками, и имеет два бандажа, которыми опирается на металлические ролики, приводящие барабан в движение.

Разгрузочная камера служит для отвода отработавшего агента сушки и высушенного зерна. Зерно из камеры выводится непрерывно при помощи шлюзового затвора, установленного в конце конусного днища камеры. Шлюзовой затвор приводится от электродвигателя через редуктор. Отработавший агент сушки удаляется вентилятором, расположенным над камерой.

Охладительная колонка - вертикальная, образована из двух цилиндров, основная часть которых (нижняя) перфорированная, а верхняя часть выполнена из сплошного листа. Кольцевое пространство между цилиндрами служит емкостью для зерна, в которой оно охлаждается благодаря прохождению воздуха через слой зерна. Воздух для охлаждения подается через отверстия наружного цилиндра.

К верхней части внутреннего цилиндра присоединен всасывающий патрубок вентилятора, который отводит отработавший воздух. Дно колонки конусное и заканчивается шлюзовым затвором с приводом от электродвигателя. Работает он периодически: включается датчиком верхнего уровня зерна, когда зерно достигает максимального уровня. Выключает затвор датчик нижнего уровня, который расположен в верхней части охлаждающей колонки. Колонка установлена на станине, в которую вмонтирован бункер для накопления зерна.

Принципиальная технологическая схема работы сушилки представлена на рисунке 1.17.

Зерно поступает через загрузочную камеру в сушильный барабан зерносушилки СЗСБ-8, где лопатки барабана и крестовины подхватывают зерно и поднимают его вверх, затем оно ссыпается вниз и далее перемещается вдоль барабана.

Агент сушки, проходя через барабан, омывает ссыпавшееся с полок зерно и высушивает его. Зерносушилка работает под разрежением во избежание утечки агента сушки через неплотности.

Отработавший агент сушки удаляет вентилятор, расположенный под разгрузочной камерой сушилки. Высушенное зерно непрерывно через шлюзовой затвор отводится из разгрузочной камеры норией в охлаждающую колонку.

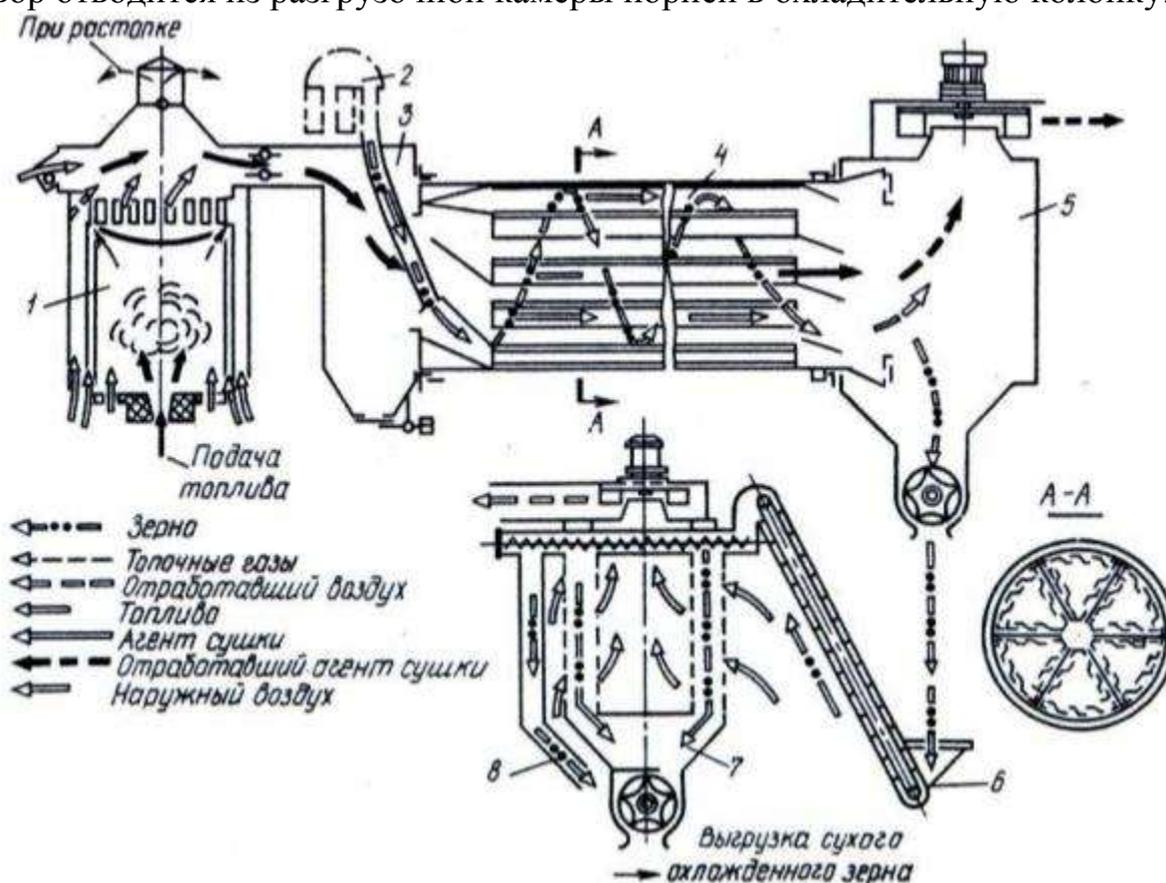


Рисунок 1.17 – Технологическая схема зерносушилки СЗСБ-8:

1 - топка; 2 - загрузочная нория; 3 - загрузочная камера; 4 - барабан; 5 - разгрузочная камера; 6 - разгрузочная нория; 7 - охлаждающая колонка; 8 - труба контрольной сыпи

Здесь зерно перемещается сверху вниз, по пути продувается атмосферным воздухом и охлаждается. Воздух для охлаждения поступает снаружи по всей высоте перфорированной части колонки, проходит через слой зерна во внутренний цилиндр и выбрасывается вентилятором в атмосферу [174].

Отработавший агент сушки удаляет вентилятор, расположенный под разгрузочной камерой сушилки. Высушенное зерно непрерывно через шлюзовой затвор отводится из разгрузочной камеры норией в охлаждающую колонку. Здесь зерно перемещается сверху вниз, по пути продувается атмосферным воздухом и охлаждается. Воздух для охлаждения поступает снаружи по всей высоте перфорированной части колонки, проходит через слой зерна во внутренний цилиндр и выбрасывается вентилятором в атмосферу.

Движение зерна в колонке – порционно-периодическое. При достижении верхнего уровня зерно давит на мембрану датчика верхнего уровня, который включает электродвигатель шлюзового затвора, выпускающего охлажденное зерно. В тот момент, когда уровень зерна снижается до датчика минимального уровня, электродвигатель выключается и разгрузка прекращается. Уровень зерна начинает повышаться, и цикл повторяется.

Режимы сушки продовольственного, кормового и семенного зерна, а также семян масличных культур приведен в таблице 1.19.

Таблица 1.19 – Режимы сушки зерна в сушилке СЗСБ-8

(температура агента сушки 200 °С) [109, 110]

Культура	Исходная влажность зерна, %	Предельная температура нагрева, °С	Культура	Исходная влажность зерна, %	Предельная температура нагрева, °С
Режим сушки продовольственного и кормового зерна			Режим сушки семенного зерна		
Пшеница	До 18	55	Пшеница	До 18	48
	18...22	52	Рожь, ячмень	До 21	48
	Свыше 22	50	Овёс	До 27	45
Рожь, ячмень	До 18	65		Свыше 27	43
	18...22	62	Гречиха, просо	До 18	40
	Свыше 22	60		18...21	38
Овёс	До 18	60		21...27	38
	18...22	55		Свыше 27	34
	Свыше 22	52	Горох, вика, чечевица	До 18	45
Просо	До 18	42	Фасоль, люпин	До 21	45
	18...22	40		21...27	43
	Свыше 22	38	Рис	Свыше 27	40
Гречиха	До 18	50	Клеверная пыжина	До 25	45
	18...22	48		Режимы сушки маслосемян	
			Подсолнечное семя	-	55
			Рапс	-	45
Свыше 22	45				

На рисунке 1.18 представлен общий вид и технологическая схема работы барабанной зерносушилки СЗСБ-8.

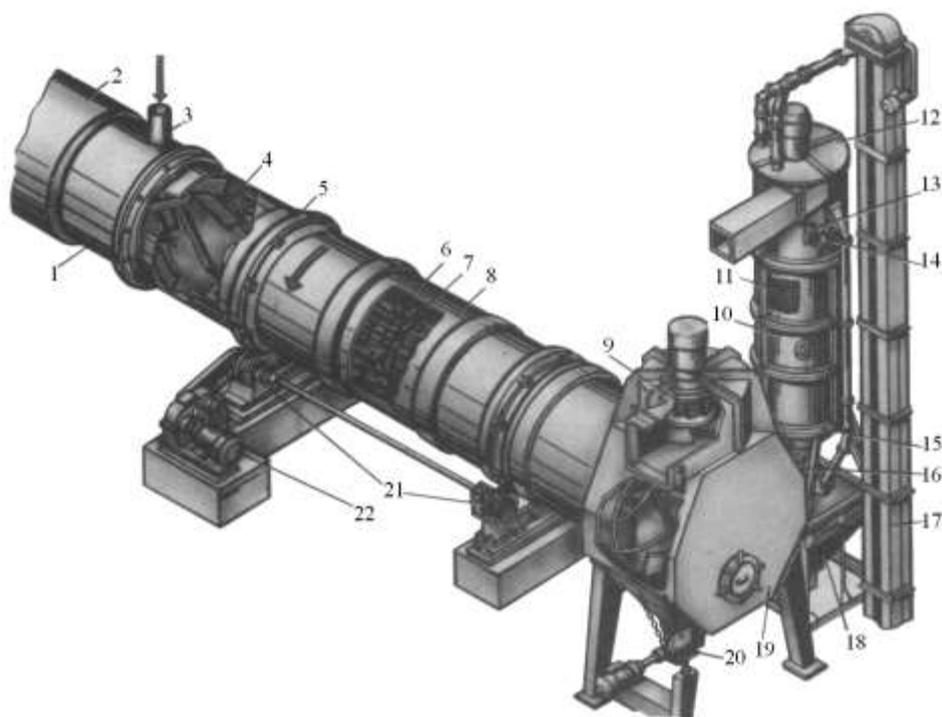


Рисунок 1.18 – Зерносушилка СЗСБ – 8:

1 – переходник; 2 – топочный блок; 3 – загрузочная труба; 4 – лопасти; 5 – кольцо; 6 – крестовина; 7 – полочка; 8 – сушильный барабан; 9 и 12 вентиляторы; 10 и 11 – цилиндры; 13 и 14 датчики уровня; 15 – конус; 16 и 20 – шлюзовые затворы; 17 – нория; 18 – бункер; 19 – выгрузная камера; 21 – ролики; 22 – приводная станция

Барабанная зерносушилка СЗПБ-2,5 (рисунок 1.19) – универсальная. Её можно использовать для сушки зерна различных культур любой исходной влажности и засорённости, семян трав и овощей, различных кусковых материалов, измельчённой травы.

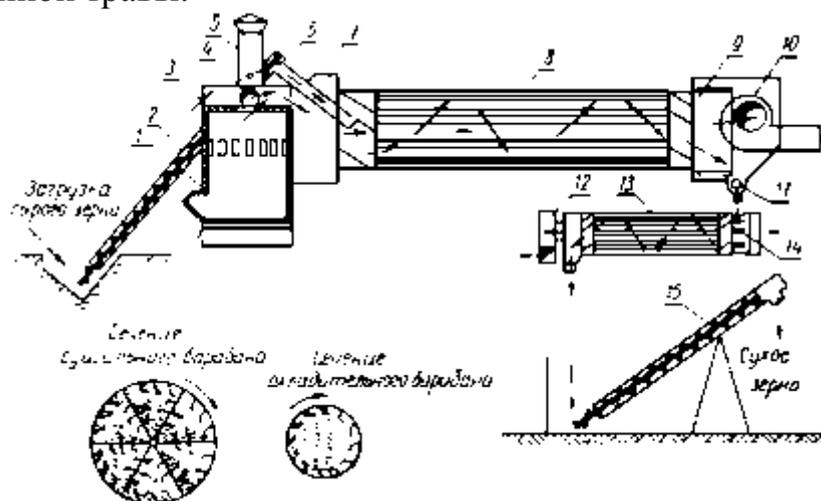


Рисунок 1.19 - Барабанная зерносушилка СЗПБ-2,5:

1 - топка; 2 - загрузочный шнек; 3 - дверка для регулируемого впуска воздуха; 4 - патрубков для впуска воздуха; 5 - дымовая труба; 6 - самотёчная труба; 7 - подводящая камера; 8 - сушильный барабан; 9 - отводящая камера; 10 - вентилятор сушильного барабана; 11 - шнек; 12 - вентилятор охладительного барабана; 13 - охладительный барабан; 14 - ковши; 15 - передвижной шнек

Зерносушилка работает на жидком топливе и представляет собой сочетание двух барабанов - сушильного и охлаждающего. Сушильный барабан опирается на ролики. Внутри барабан разделен на шесть секторов (секций) с лопастями и полками, предназначенными для лучшего перемешивания и распределения зерна по его поперечному сечению.

В передней и задней торцевых сторонах барабана находятся камеры: в одну из них (подводящую) попадает агент сушки, а другая (отводящая) служит для отвода отработавшего агента.

Охлаждающий барабан вращается с частотой 27 мин^{-1} . На его поверхности со стороны поступления зерна из сушильного барабана расположено восемь ковшей, из которых оно сыпается внутрь охлаждающего барабана, имеющего по окружности изогнутые лопасти для подъема зерна.

Сырое зерно подают в сушильный барабан из приемного устройства или из насыпи винтовым конвейером через самотечную трубу, а из нее оно попадает на шесть винтообразных дорожек, подводящих зерно к секторам барабана. Продвигаясь вдоль него, зерно в конце попадает на винтообразные дорожки, служащие для отвода его через шнек в охлаждающий барабан.

Для смешивания топочных газов с воздухом установлена смесительная коробочка. Шнеки, подающие сырое и убирающие сухое зерно, приводятся в движение от отдельных электродвигателей.

В таблице 1.20 приведены основные технические характеристики зерносушилки СЗПБ-2,5.

Таблица 1.20 – Технические характеристики зерносушилки СЗПБ-2,5

Показатели	Значения показателей
Производительность пл. т/ч	2,5
Удельный расход условного топлива, кг/ч	12
Установленная мощность электродвигателей, кВт	10
Число электродвигателей, шт	5
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/пл. т	3,24
Масса, кг	4000

При эксплуатации сушилки СЗПБ-2,5 зерно высокой влажности может запрессовываться в верхней части наклонного шнека; поэтому для очистки от такого зерна головку шнека делают разборной. Система управления обеспечивает автоматическое управление пуском электродвигателей в заданной технической последовательности, автоматический розжиг топки, контроль и поддержание заданной температуры агента сушки, контроль за работой электродвигателей и форсунки.

Барабанные зерносушилки более просты в обслуживании и менее, чем другие виды зерносушилок требовательны к очистке зернового материала от посторонних примесей. Но они, как правило, металлоемки, малопроизводительны, отличаются повышенным расходом топлива.

Шахтные зерносушилки подразделяют на прямоточные и рециркуляционные.

По способу образования зернового слоя шахтные сушилки могут быть колонковыми, жалюзийными или с коробами.

Различные группы сушилок по способу подвода агента к зерновому слою

можно разбить на подгруппы:

а) с односторонним направлением движения потока теплоносителя (по отношению к толщине зернового слоя);

б) с изменением направления потока теплоносителя на обратное (по отношению к толщине зернового слоя);

в) с изменением направления потока теплоносителя (по отношению к ширине зернового слоя);

г) с принудительным перемешиванием зернового слоя по толщине.

Шахтные прямоточные зерносушилки - непрерывного действия, и применяют их для сушки пшеницы, ржи, ячменя, кукурузы, семян подсолнечника и других культур продовольственного и семенного назначения. В сушильной шахте под действием силы тяжести зерно движется сверху вниз и пронизывается агентом сушки. Зерно движется в шахте сплошной массой со скоростью, определяемой работой выпускного механизма периодического или непрерывного действия. Шахтные зерносушилки наиболее удобны, просты и нашли широкое распространение для сушки зерна. Производительность шахтных зерносушилок колеблется от 1 т/ч до 50 т/ч.

Наиболее распространены шахтные конвективные зерносушилки: стационарные ДСП-16, ДСП-32, ДСП-24, ДСП-32-ОТ, А1-ДСП-50 и передвижные К4-УСА и К4-УС2-А, работающие на смеси топочных газов с воздухом, а также А1-УСШ, ЛСО-11, М-819, работающие на чистом нагретом воздухе. Для сушки крупяных культур применяют кондуктивно-конвективные шахтные сушилки ВС-10-49М.

Принципиальные схемы работы шахтных зерносушилок, работающих на смеси топочных газов с воздухом, представлены на рисунке 1.20 а, а на чистом нагретом воздухе – на рисунке 1.20 б.

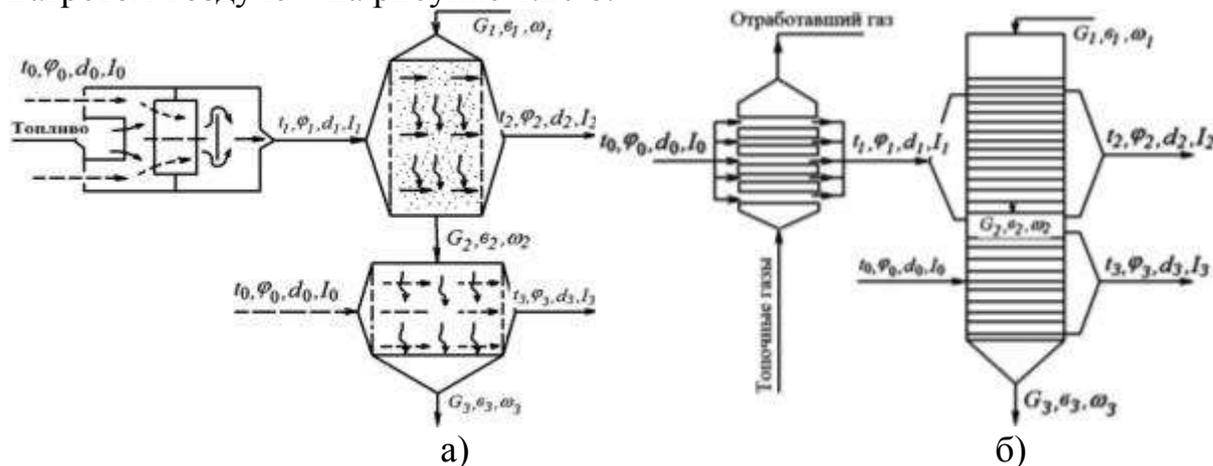


Рисунок 1.17 – Принципиальные схемы работы шахтных зерносушилок:

а) при использовании смеси топочных газов с воздухом; б) использовании чистого нагретого воздуха: t' – температура зерна, °С; ω – влажность зерна, %; t – температура агента сушки, °С; φ – относительная влажность воздуха, %; d – влагосодержание, кг/(кг сух. вещества); J – энтальпия, кДж/(кг сух. вещества); индексы: 0 – соответствует параметрам на входе в топку и охлаждающую шахту; 1 – на входе в сушильную шахту; 2 – на выходе из сушильной шахты; 3 – на выходе из охлаждающей шахты

Основные узлы шахтной прямоточной зерносушилки - сушильная и охлаждающая шахты, которые по устройству и конструкции аналогичны.

Сушильная и охлаждающая шахты (рисунок 1.21) имеют прямоугольное сечение, внутри них установлены короба рядами в шахматном порядке. Между коробами располагается зерно. Агент сушки поступает с одной стороны шахты в подводящие короба, проходит слой зерна и выходит с противоположной стороны шахты через отводящие короба [37, 236...238].

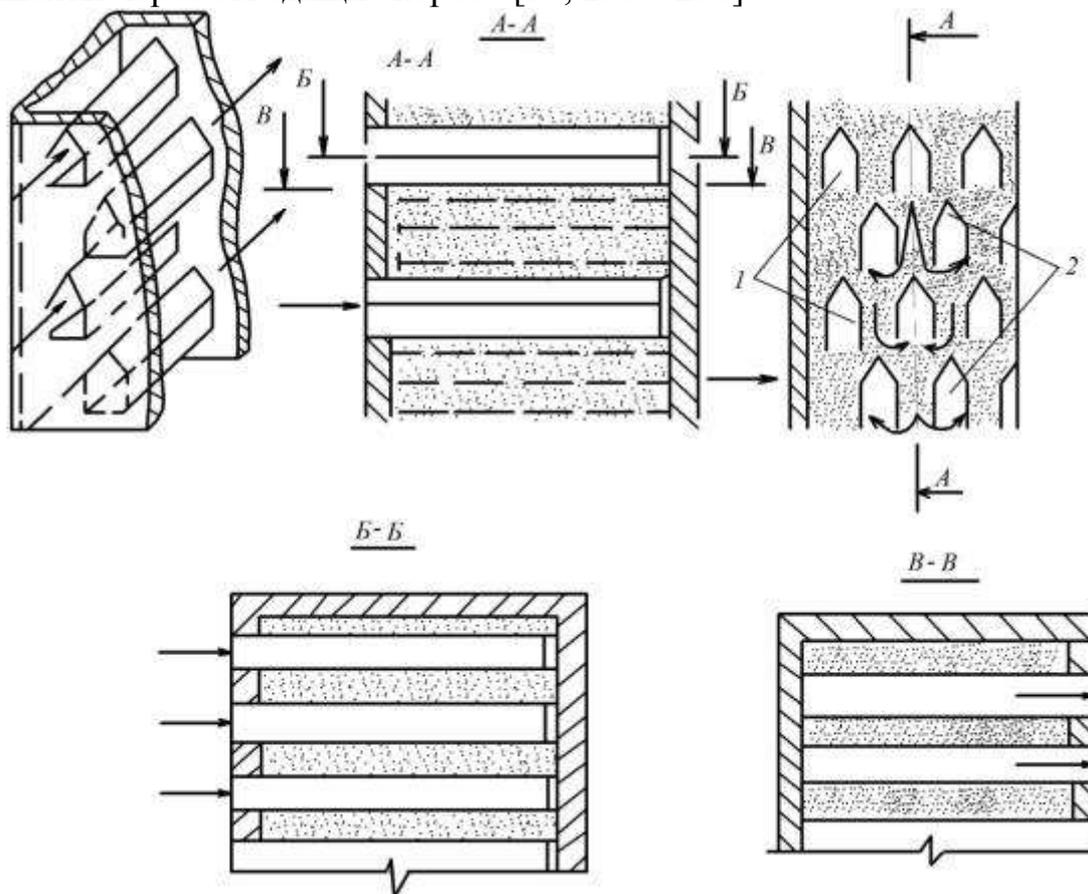


Рисунок 1.21 – Шахта зерносушилки:

1 – подводящие короба; 2 – отводящие короба

Для подвода свежего и отвода отработавшего агента сушки внутри шахты по всей ее высоте устанавливают систему подводящих и отводящих коробов или стальные стенки делают перфорированными (жалюзийными). В сушилках с сетчатыми или жалюзийными стенками толщину продуваемого зернового слоя определяет расстояние между стенками. Обычно оно находится в пределах 200...500 мм. При заполнении шахты зерно располагается слоями между коробами. Толщина каждого слоя равна расстоянию между подводящими и отводящими коробами. В современных зерносушилках это расстояние принимают равным 100...200 мм.

Короб представляет собой канал с открытой нижней стороной, через которую агент сушки входит в зерновой слой или выходит из него. Под нижней открытой стороной короба зерно располагается под углом естественного откоса. Для более интенсивного продувания зернового слоя стенки коробов иногда делают жалюзийными [216...219].

Одна из торцевых сторон каждого короба открыта, другая заглушена. Подводящие короба открыты со стороны входа агента сушки и заглушены со стороны его выхода из шахты. Отводящие короба, наоборот, закрыты со стороны входа и открыты со стороны выхода агента сушки из шахты. Короба изготавливают из листовой стали толщиной 1,5...2 мм. На стенки отводящих коробов с внутренней стороны наносят антикоррозийное покрытие, так как на них может конденсироваться водяной пар отработавшего агента сушки [22, 105].

Наиболее распространены короба пятигранной формы; применяют треугольные короба, а в некоторых зерносушилках используют многогранные короба более сложной формы. Широкое распространение получили короба с жалюзи. Для лучшего скольжения зерна по коробу угол между его верхними гранями не должен быть более 70° . Радиус закругления верхнего ребра короба делают не более 5 мм во избежание задержки зерна и скопления сора на коробе. Короба пятигранной формы обычно имеют ширину 100 мм и общую высоту 125...232 мм. Схемы коробов различных типов зерносушилок представлены на рисунке 1.22.

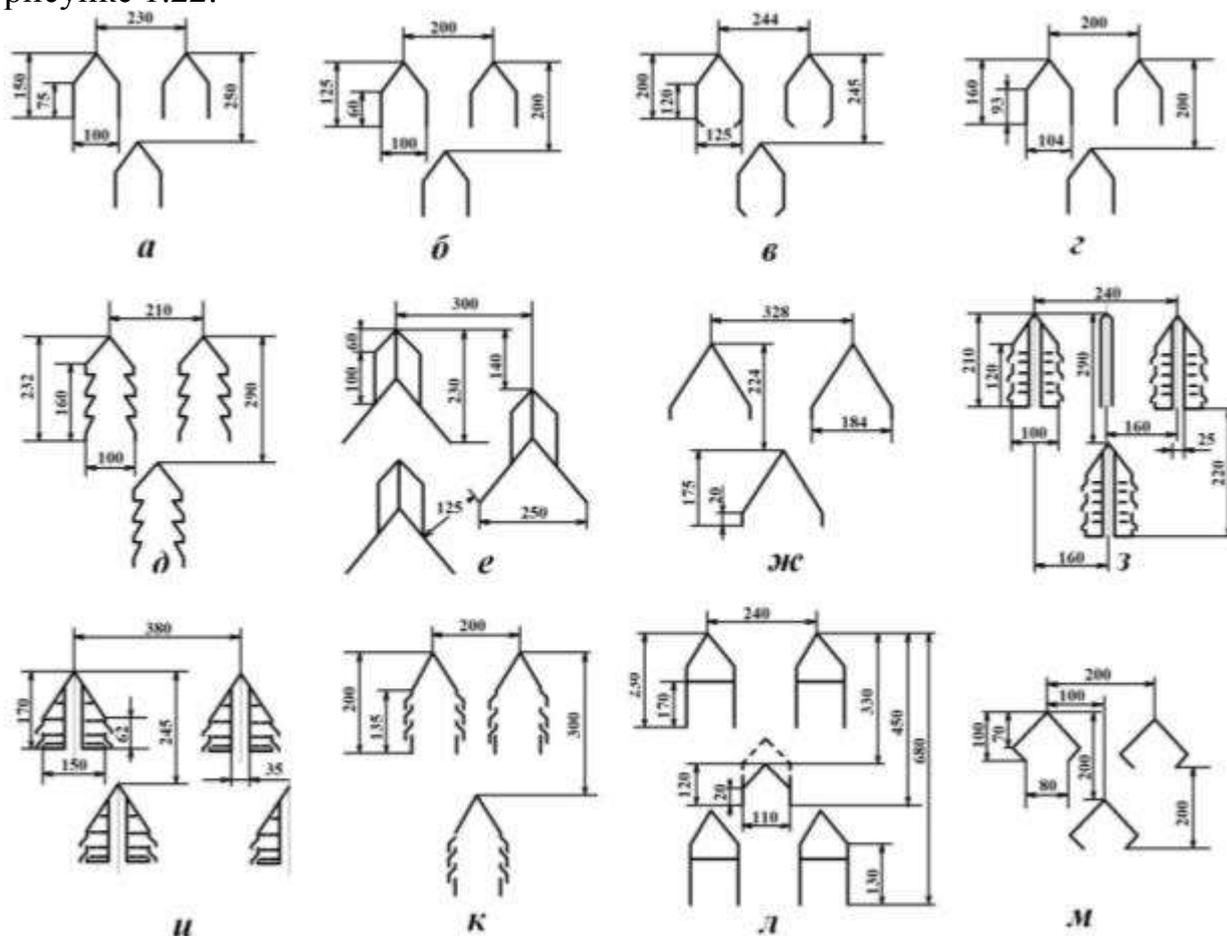


Рисунок 1.22 – Расположение и конструкции воздухораспределительных коробов в различных типах зерносушилок:

a – ВТИ; *б* – ДСП; *в* – СЗШ-16; *г* – СЗС-8; *д* – ЗСПЖ-8, К4-УСА; *е* – РД-2х25, У2-УЗБ-50; *ж* – СЗШ-16М; *з* – УЗМ, А1-ДСП-50, А1-УСШ; *и* – К4-УС2-А; *к* – ЛСО; *л* – ЛАВ; *м* – М-819

Подводящие и отводящие короба в шахте чередуют рядами (ряд отводя-

щих коробов - ряд подводящих коробов) или чередуют в ряду (подводящий короб - отводящий короб) (рисунок 1.23).

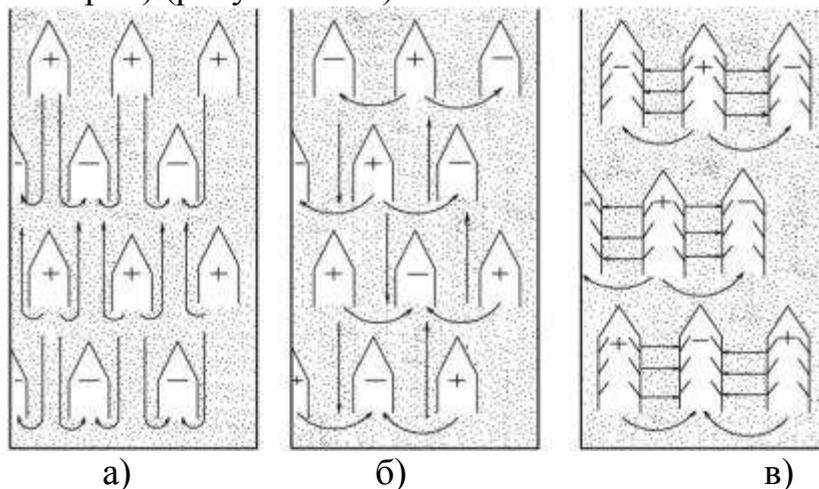


Рисунок 1.23 – Размещение подводящих и отводящих коробов:

а – в разных рядах, б и в – через один в каждом ряду

Шахтные зерносушилки типа СЗШ (СЗК-8-1; СЗШ-8Т-1; СЗШ-16; СЗШ-20; СЗК-8-1; СЗШ-8Т-1; СЗШ-16; СЗШ-20) предназначены для сушки как продовольственного, так и семенного зерна различных сельскохозяйственных культур.

В таблице 1.21 приведены технические характеристики зерносушилок типа СЗШ [49].

Таблица 1.21 – Технические характеристики зерносушилок типа СЗШ

Наименование характеристики	СЗК-8Т-1	СЗШ-16Г	СЗШ-16Ж	СЗШ-20Г	СЗШ-20Ж	СЗК-8Т-1	СЗШ-16
Производительность, пл. т/ч	8	16	16	20	20	8	8
Мощность, кВт	500	1600	1600	1600	1600	700	700
Максимальная установленная электрическая мощность, кВт	45	74	74	115	115	51	51
Удельный расход топлива, м ³ /ч (кг/пл. т), не более	4,5	9	17,8	9	17,8	5,4	4,5
Масса, кг	9840	25100	25100	26100	26100	8500	8500

На рисунке 1.23 представлен общий вид зерносушилки СЗШ-16, а на рисунке 1.24 - технологическая схема её работы. Данная зерносушилка может работать как при параллельной, так и при последовательной подаче зерна в шахты.

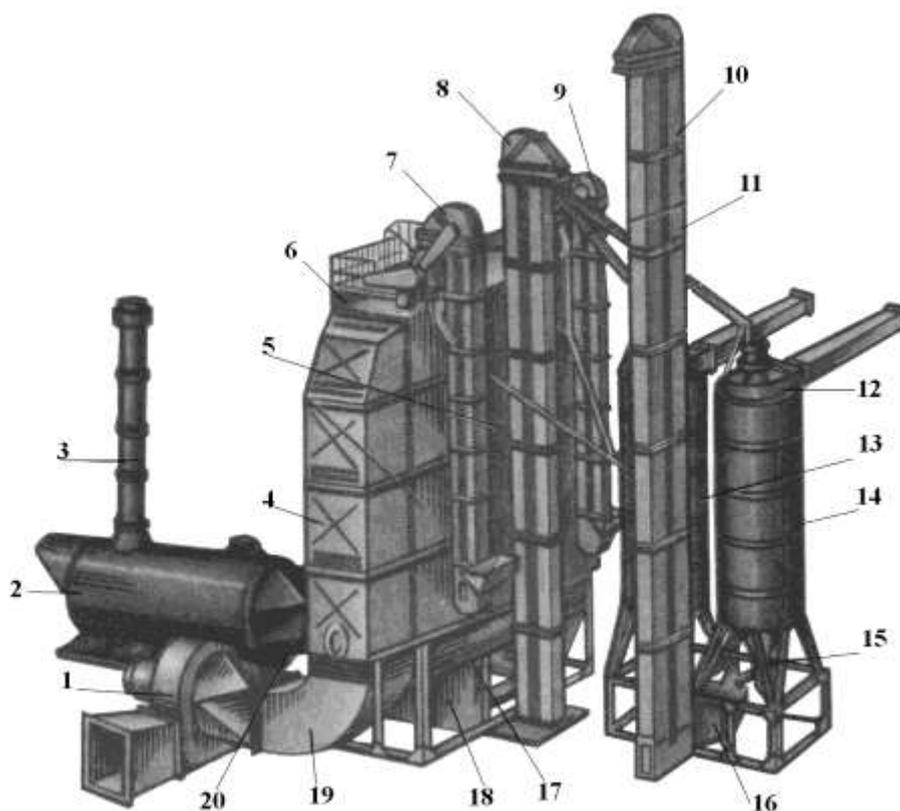


Рисунок 1.23 – Зерносушилка СЗШ -16А:

1 и 12 – вентиляторы; 2 – топка; 3 – выпускная труба; 4 – диффузор; 5 – сушильные камеры; 6, 16 и 18 – бункеры; 7, 8, 9 и 10 – нории; 11 – зернопроводящие трубы; 13 и 14 – охладительные колонки; 15 – шлюзовой затвор; 17 – разгрузочное устройство; 19 – патрубок; 20 – трубопровод

Зерносушилка состоит из двух колонковых шахт, разделённых на камеры нагрева, сушки и охлаждения зерна, надсушильного бункера, роторных выпускных устройств, загрузочной и разгрузочной норий, топочного агрегата, системы воздухопроводов с вентиляторами, электрооборудования и средств автоматического контроля за работой сушилки.

Каждая шахта зерносушилки снабжена выпускным устройством, обеспечивающим равномерность движения зерна по поперечному сечению шахты, что, в свою очередь, обеспечивает равномерность нагрева, сушки и охлаждения зерна. Неудовлетворительная работа выпускного устройства ведет к тому, что часть зерна проходит через шахту с высокой скоростью, т.е. за меньший промежуток времени, а другая часть, наоборот, долго задерживается в шахте. В результате одна часть зерна будет недосушенной, а другая - пересушенной. Сигналом неудовлетворительной работы выпускного устройства является повышенная температура зерна после сушки. Проверить работу выпускного устройства можно по равномерности движения зерна в одном ряду отводящих коробов, предварительно выключив вентилятор. Для этого используют поплавки из картона со шпагатом длиной 1 м. Помещая поплавок через торец короба в движущую зерновую массу, и замеряя время опускания поплавка в каждом коробе, оценивают работу выпускного устройства.

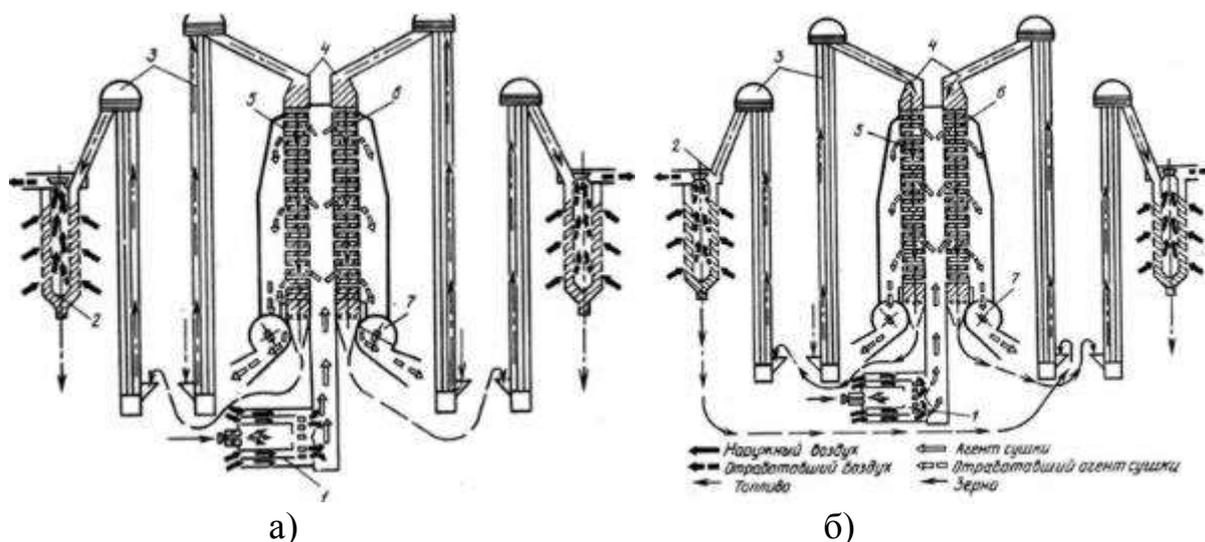


Рисунок 1.24 – Технологическая схема зерносушилки СЗШ-16:

а – при параллельной работе шахт; б – при последовательной работе шахт; 1 – топка, 2 – охлаждающая колонка; 3 – нория; 4 – надшахтный бункер; 5, 6 – шахты; 7 – вентиляторы

Выпускные устройства могут быть периодического и непрерывного действия. В первом случае устройство обеспечивает выпуск зерна через определенный промежуток времени, во втором - выпуск зерна осуществляется непрерывно. Некоторые зерносушилки комплектуют выпускными устройствами комбинированного действия, обеспечивающими выпуск зерна одновременно в режиме непрерывного и периодического действия. Это позволяет более равномерно выпускать зерно из шахты.

Для подачи в шахты агента сушки и атмосферного воздуха используют вентиляторы низкого ($H < 1000$ Па) и среднего ($H = 1000 \dots 3000$ Па) давления. В топках для подачи воздуха в форсунку используют вентиляторы высокого давления ($H = 10000 \dots 12000$ Па).

При эксплуатации зерносушилки особое внимание уделяют работе вентиляторов. Вентиляторы должны эксплуатироваться при соблюдении паспортных значений частоты вращения, так как ее снижение ведет к значительному уменьшению расхода агента сушки и воздуха, что резко снижает производительность зерносушилки.

Шахтная прямоточная зерносушилка ЛСО-11 (рисунок 1.25) предназначена для сушки всех основных зерновых культур, включая кукурузу и ячмень пивоваренный. Включает в себя две шахты, смонтированные на общей станине.

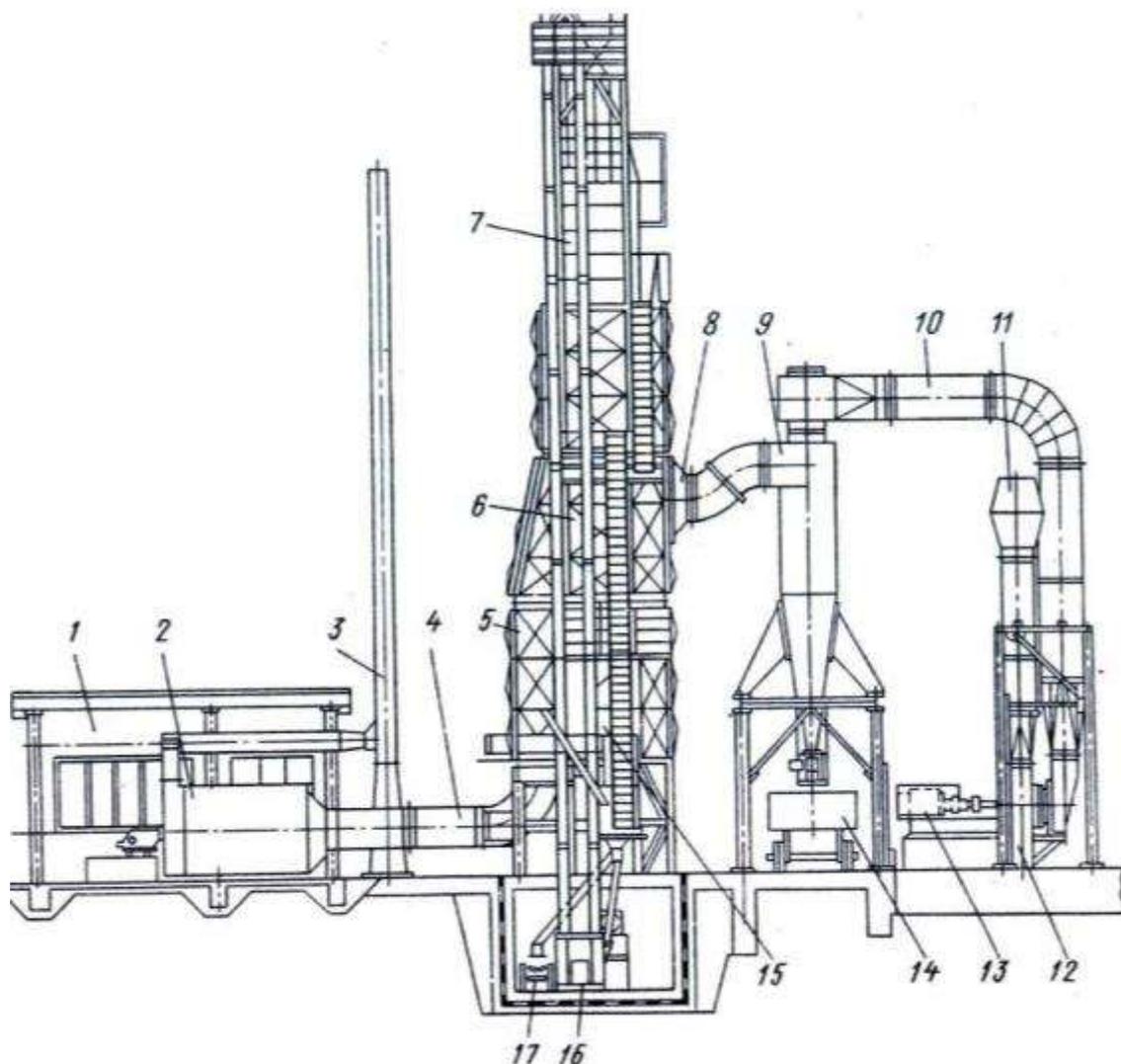


Рисунок 1.25 – Зерносушилка ЛСО-11:

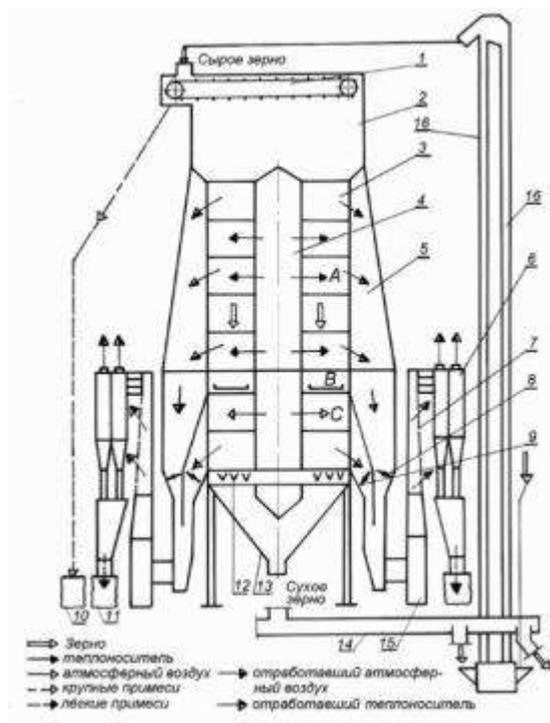
1 – топочное помещение; 2 – топка; 3 – дымовая труба; 4, 10 – воздухопроводы; 5 – диффузор; 6 – сушильные шахты; 7 – надсушильный бункер; 8 – конфузор; 9 – циклоны; 11 – глушитель; 12 – вентилятор; 13 – электродвигатель; 14 – тележка для отходов; 15 – охладительные шахты; 16 – нория; 17 – конвейер

Зерносушилка работает по принципу всасывания на чистом подогретом воздухе. Зерно после предварительной очистки поступает в распределительный бункер, где делится на две части и по нориям подаётся в надсушильные бункера. При этом зерно последовательно проходит вначале первую шахту, а затем – вторую.

Шахтная зерносушилка М-819 (рисунок 1.26) состоит из топки с дымовой трубой, загрузочного скребкового конвейера, нории, двух параллельно расположенных на станине шахт с напорно-распределительной камерой между ними и общим надсушильным бункером, диффузором и конфузуром, выпускного устройства с общим для обеих шахт подсушильным бункером устройства для очистки отработавшего агента сушки и воздуха [214].



а)



б)

Рисунок 1.26 – Зерносушилка М-819:

а) общий вид; б) технологическая схема: 1 –скребковый транспортёр; 2 –надсушильный бункер; 3 – шахта; 4 – напорно-распределительная камера; 5 – диффузор; 6 – мультициклон; 7 – инерционный пылеотделитель; 8, 9 - заслонки; 10, 11 мешки для примесей; 12 – выпускной механизм; 13 – подсушильный бункер; 14 – выгрузной шнек; 15 – вентилятор; 16 – нория; А, Б, С – сушильная, промежуточная и охлаждающая секции соответственно

Сушилка работает следующим образом: предварительно очищенное зерно норией подается в надсушильный бункер. Из надсушильного бункера зерно поступает в сушильные шахты, а из них - в охлаждающие шахты. В сушильных и охлаждающих шахтах зерно соответственно сушится и охлаждается. Затем оно поступает в подсушильный бункер, откуда транспортируется в склад. Недосушенное зерно возвращают на повторную сушку.

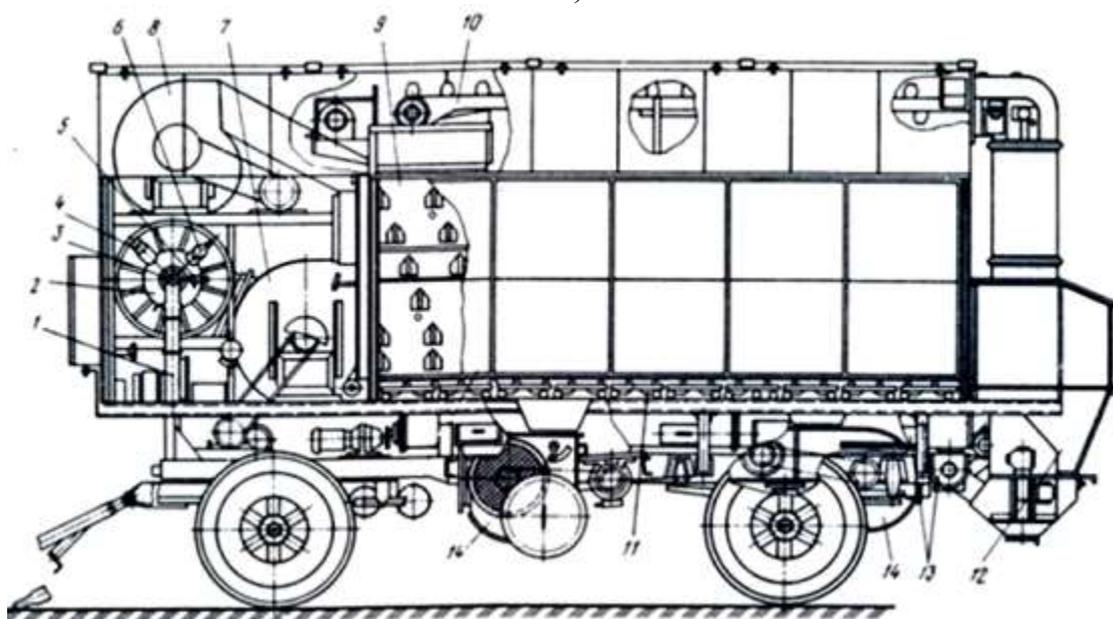
Агент сушки засасывается вентиляторами из топки через напорно-распределительную камеру и сушильные шахты (наполненные зерном), конфузоры и подается в инерционный пылеотделитель с мультициклонами, откуда отработавший очищенный агент сушки удаляется в атмосферу.

Передвижная шахтная зерносушилка К4-УС2-А (рисунок 1.27) предназначена для сушки сравнительно небольших партий зерна [87, 88, 228].

В таблице 1.22 приведены основные технические характеристики данной зерносушилки.



а)



б)

Рисунок 1.27 – Передвижная зерносушилка К4-УС2-А:

а) общий вид; б) конструктивная схема: 1 – вентилятор; 2 – топка; 3 – форсунка; 4 – электророзжиг; 5 – топливопровод; 6 – прибор контроля пламени; 7 – вентилятор второй сушильной зоны; 8 – вентилятор первой сушильной зоны; 9 – шахта сушильная и охлаждающая; 10 – ковшовый конвейер; 11 – выпускной механизм; 12 – бункер; 13 – шнеки; 14 – вентиляторы охлаждающей шахты

Основной недостаток данной зерносушилки - высокие энергозатраты на процесс сушки.

Таблица 1.22 – Технические характеристики передвижной зерносушилки К4-УС2-А [205, 229]

Показатели	Значения показателей
Производительность	10 пл. т/ч
Потребление дизельного топлива (при температуре наружного воздуха и температуре зерна 15 °С)	не более 73 кг/ч
Потребление электроэнергии	не более 37 кВт/ч
Диапазон регулирования рабочих температур агента сушки (температура окружающей среды 15 °С)	60...160 °С

Передвижная зерносушилка СЗП-0,7 (рисунок 1.28) с принудительным двусторонним подводом теплоносителя предназначена для сушки семенного и продовольственного зерна.

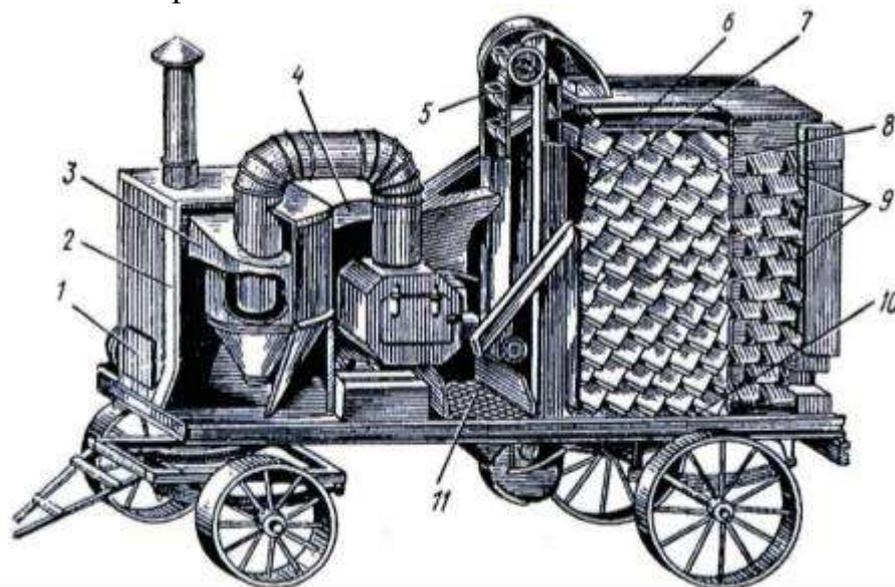


Рисунок 1.28 – Передвижная зерносушилка СЗП-0,7:

1 – топка; 2 – камера циклона; 3 – циклон; 4 – диффузор; 5 - нория сырого зерна; 6 - распределительный транспортер; 7 - лоток обратной сыпи; 8 - коробка шахты; 9 - распределительные каналы; 10 - каретка выпускного аппарата; 11 - загрузочный бункер

Сушилка смонтирована на шасси и состоит из следующих основных частей: шахты со сборными коробами и системой газопроводов, топки с циклоном, вентилятора среднего давления с диффузором для подачи теплоносителя, передаточных механизмов и электродвигателя.

Теплоноситель образуется в смесительной камере. Топочные газы смешиваются с атмосферным воздухом и воздухом, отработавшим в охлаждающей камере. Теплоноситель подается вентилятором в диффузор, откуда направляется в каналы, расположенные вдоль двух параллельных сторон шахты. Из каналов теплоноситель с двух сторон поступает в короба шахты, а оттуда – в слой зерна.

Пройдя зерновой слой, отработавший теплоноситель попадает в специальный короб, а затем направляется в сборные короба и удаляется в атмосферу.

Охлаждающий (атмосферный) воздух отсасывается вентилятором через слой зерна, расположенный в нижней части шахты.

Сырое зерно засыпают в загрузочный бункер, откуда ковшами элеватора оно подается на верхний скребковый транспортер, который сбрасывает его в шахту сушилки. После заполнения шахты транспортер разравнивает зерно, излишки которого сбрасываются через лоток обратно в загрузочный бункер.

Зерно высушивается, проходя через горячую камеру шахты, и охлаждается в охлаждающей камере.

Производительность данной зерносушилки составляет 1 т/ч, потребляемая мощность 4 кВт, масса – 2000 кг.

Вертикальная шахтная паровая сушилка ВС-10-49 (рисунок 1.29) предна-

значена для сушки и поджаривания крупяных культур и готовой крупы.

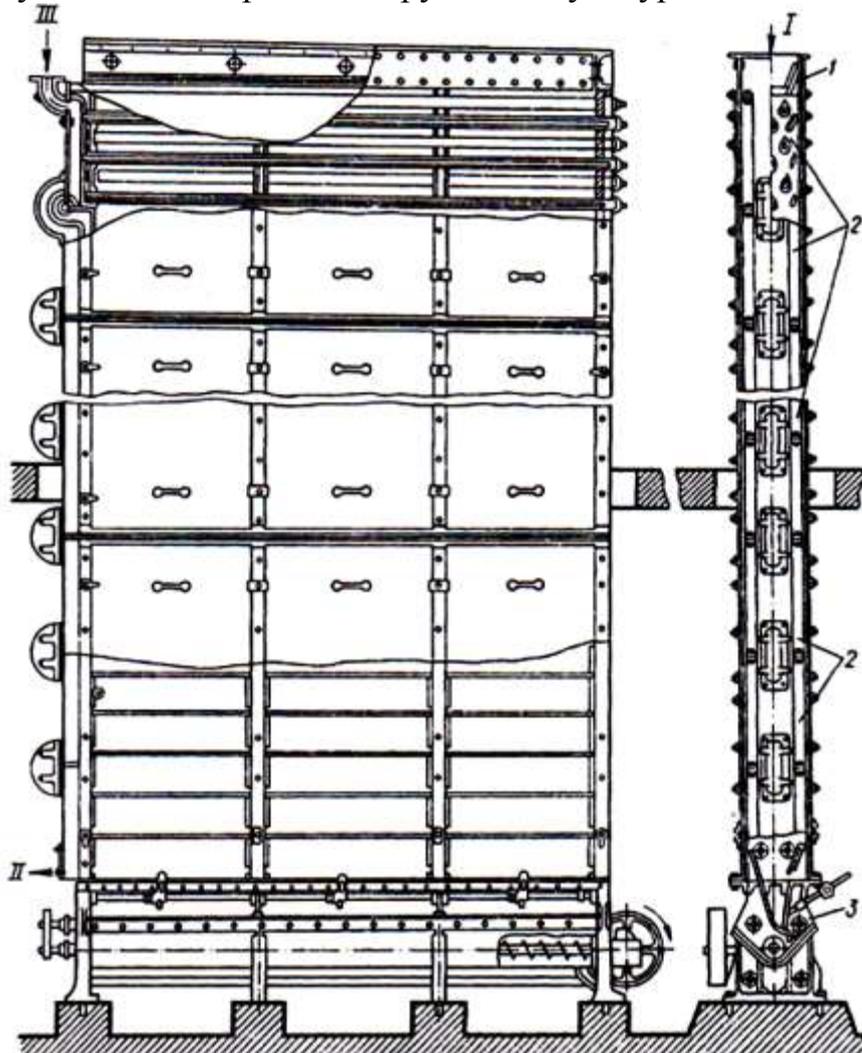


Рисунок 1.29 – Сушилка ВС-10-49:

1 – загрузочный короб; 2 – тепловые секции; 3 – основание с выпускным устройством и шнеком; I – зерно; II – выпуск пара; III – впуск пара

Представленная сушилка (непрерывного действия с паротрубной системой подогрева) представляет собой сборную конструкцию шахтного типа с прямоугольным поперечным сечением и состоит из комплекта тепловых секций; основания с выпускным устройством и шнеком для вывода продукта; загрузочного короба и съёмных металлических щитов, выполняющих роль ограждения и кожуха.

Сушилка работает следующим образом. Продукт через загрузочный короб поступает в тепловые секции и под действием собственной массы медленно движется вниз, омывая горячие трубы и нагреваясь. В процессе движения по тепловым секциям слой продукта пронизывается в поперечном направлении воздушным потоком, который уносит выделяющуюся влагу. Высушенный продукт поступает на лоток выпускного устройства и лопастями валика сбрасывается в шнек, который выводит его из сушилки. Продолжительность пребывания продукта в сушилке регулируют задвижкой.

Для пуска сушилки нужно загрузить ее полностью продуктом, подать пар и пустить вентилятор и выпускной механизм. Продукт, поступивший в сушил-

ку в начале ее загрузки, выходит недостаточно просушенным, поэтому его необходимо вторично пропустить через сушилку. Давление пара, а следовательно, и его температуру регулируют редукционным вентилем, установленным непосредственно перед впуском пара в сушилку.

Техническая характеристика сушилки представлена в таблице 1.23 [68, 207, 208, 209].

Таблица 1.23 – Технические характеристики зерносушилки ВС-10-49

Показатели	Значения показателей
Площадь нагрева, м ²	45
Производительность, т/ч	0,6...1,6
Расход пара, кг/ч	225
Расход воздуха, м ³ /ч	420
Потребляемая мощность электродвигателя, кВт	0,5
Масса, т	7

Шахтные рециркуляционные зерносушилки предназначены для сушки зерна как продовольственного, так и семенного назначения и отличаются от шахтных прямоточных зерносушилок способом подвода теплоты, наличием рециркуляции зерна и конструкцией отдельных узлов зерносушилки.

Технические характеристики рециркуляционных зерносушилок приведены в таблице 1.24.

Таблица 1.24 – Технические характеристики рециркуляционных зерносушилок

Параметры	Зерносушилки			
	«Целинная-50»	«Целинная-30»	РД2х25-70	У2-УЗБ-50
Производительность, пл. т/ч	50	30	50	50
Мощность электродвигателей, кВт	46	22	40	28
Расход условного топлива, кг/пл. т	11,5	11,5	11,5	11,5
Расход электроэнергии, кВт·ч/пл. т	2,1	3,1	2,4	2,3

Достоинства рециркуляционных зерносушилок состоит в следующем: возможность сушки зерна различной начальной влажности, в связи с этим отпадает необходимость формирования партий зерна по влажности; обеспечение конечной заданной влажности за один проход через зерносушилку (съем влаги за одну сушку в несколько циклов достигает 12...14 %) [4, 209, 210].

Технологическая схема работы рециркуляционных зерносушилок включает предварительный нагрев сырого зерна, смешивание его с подсушенным (рециркулирующим), контактный влагообмен между этим зерном, сушку и охлаждение зерна [69, 89, 211].

Предварительный нагрев сырого зерна позволяет испарять из него около 1/4 общего количества влаги, снижая тем самым количество циклов рециркуляции, что повышает эффективность влагопередачи, ускоряет процесс сушки, так как ее можно проводить при предельных температурах нагрева. Кроме того, циркулирующее зерно не подвергается промежуточному охлаждению, т. е. экономится теплота и т. д.

Рециркуляционная шахтная зерносушилка ДСП-32-ОТ (рисунок 1.30) в 50-х годах XX века получила наибольшее распространение в нашей стране из-за компактности, надёжности, низкой стоимости, возможности сушки практически всех зерновых культур. Её изготавливали в заводских условиях в виде отдельных секций и узлов, которые собирали на месте строительства.

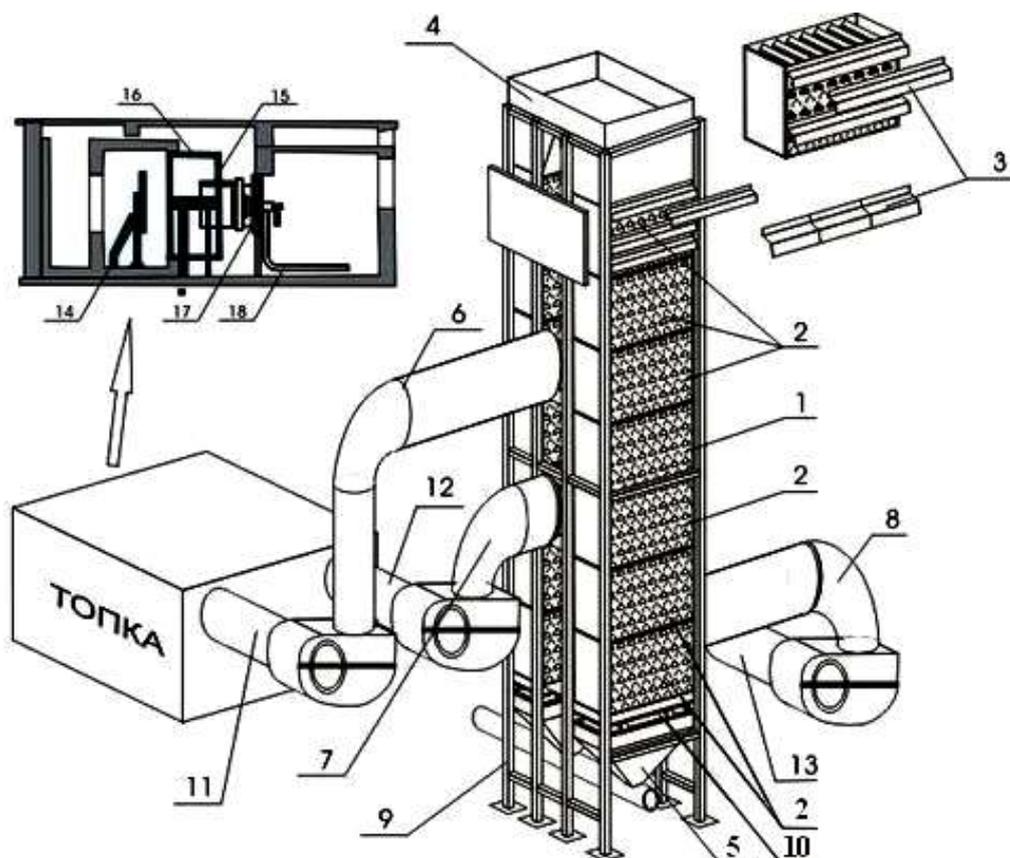


Рисунок 1.30 – Зерносушилка ДСП-32-ОТ:

1 – секция обратная; 2 – секция прямая; 3 – козырьки; 4 – бункер надсушильный; 5 – бункер подсушильный; 6 – диффузор 1-й ступени горячей зоны; 7 – диффузор 2-й ступени горячей зоны; 8 – диффузор холодной зоны; 9 – каркас шахты; 10 – выпускной затвор; 11, 12 – всасывающие воздуховоды вентиляторов 1-й и 2-й зон сушки соответственно; 13 - всасывающий патрубок вентилятора холодной зоны; 14 – отражатель; 15 - кожух форкамеры; 16 – кольцевой кожух; 17 – рама; 18 – воздуховод с отводом

В настоящее время взамен данной модели зерносушилки выпускают зерносушилку А1-ДСП-50. В таблице 1.25 приведены технические характеристики зерносушилки ДСП-32-ОТ.

Таблица 1.25 – Технические характеристики зерносушилки ДСП-32-ОТ [244]

Показатели	Значения показателей
Производительность, пл. т/ч	32
Масса зерна в шахтах при натуре 750 г/л, т	39,7
Расход агента сушки, м ³ /ч	122000
Расход воздуха, м ³ /ч	40000
Удельный расход топлива, кг. усл. топл./пл. т	12,2
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/пл. т	3,0

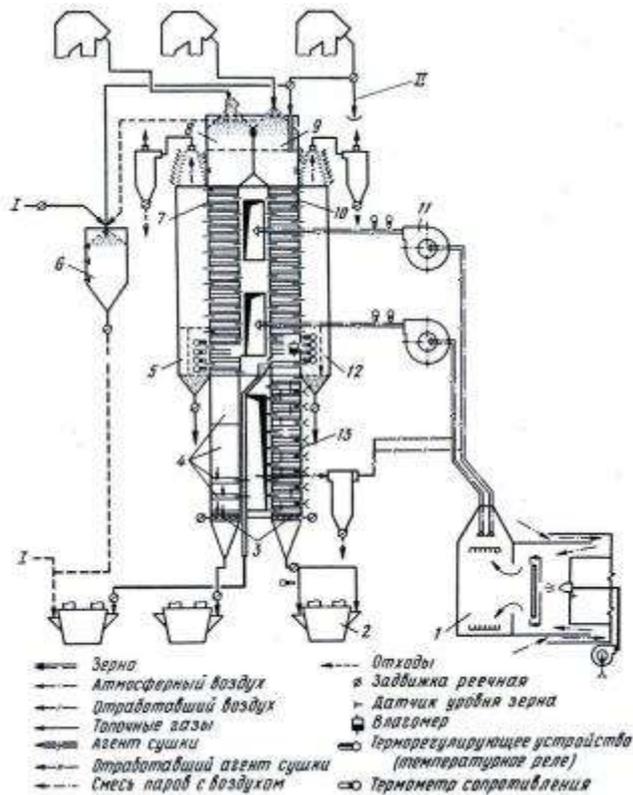
Зерносушилка А1-ДСП-50 предназначена для сушки различных зерновых культур, обеспечивая высокий сьем влаги и очистку отработавшего агента сушки и воздуха от легких примесей и пыли.

Сушильная шахта сушилки работает на нагнетание, охладительная - на всасывание. Зерносушилка А1-ДСП-50 работает на смеси топочных газов с воздухом и может быть снабжена топкой, работающей как на жидком, так и на газообразном топливе.

Зерносушилка А1-ДСП-50 (рисунок 1.31) состоит из двух вертикальных сушильных шахт 7, 10 и составляет единую конструкцию из металлических секций, теплообменника с регулируемым охлаждением, охлаждающей шахты 13, выпускных механизмов 3, надсушильных бункеров 8, 9, вентиляторов 11, норий 2, топки 1 и шкафа управления.

Сырое зерно подают из оперативного бункера 6 и смешивают его с сухим нагретым зерном, которое поступает из второй сушильной шахты 10. Смесь зерна подают норией в надсушильный бункер (он же служит теплообменником) и далее в первую сушильную шахту и теплообменник с регулируемым охлаждением.

Затем зерно поступает во вторую рециркуляционную норию, которая подают его в надсушильный бункер, вторую сушильную шахту и далее в охлаждающую шахту. Кроме того, часть зерна после второй сушильной шахты отбирают на смешивание с сырым зерном. Просушенное и охлажденное зерно выпускают механизмом периодического действия.



а)

б)

Рисунок 1.31 - Зерносушилка А1-ДСП-50:

а) общий вид; б) конструктивно-технологическая схема зерносушилки: 1 - топка; 2 - нория; 3 - выпускные механизмы; 4 - теплообменник; 5, 12 - осадочные камеры; 6 - оперативный бункер; 7 - первая сушильная шахта; 8 - надсушильный бункер первой сушильной шахты; 9 - надсушильный бункер второй сушильной шахты; 10 - вторая сушильная шахта; 11 - вентилятор; 13 - охлаждающая шахта; I - сырое зерно; II - сухое зерно

Агент сушки из топки и отработавший воздух из охлаждающей шахты засасывается вентиляторами первой и второй сушильной зон. Затем их смешивают и подают через диффузор и напорно-распределительную камеру в подво-

дящие короба сушильных шахт.

Рециркуляционная шахтная зерносушилка А1-УЗМ-50 - открытого типа. В сушилке предусмотрен предварительный нагрев зерна и два контура рециркуляции. В ней можно сушить зерно и без рециркуляции. Сушилка представляет собой единую металлоконструкцию, образованную двумя сушильными шахтами с распределительной камерой, топкой и воздухом [74, 75, 90, 245...247].

В сушильных шахтах 10 установлены жалюзийные короба в шахматном порядке (рисунок 1.32). Теплообменник 18 по высоте разделен на три зоны коробами, через которые к зерну подводится атмосферный воздух для удаления влаги.

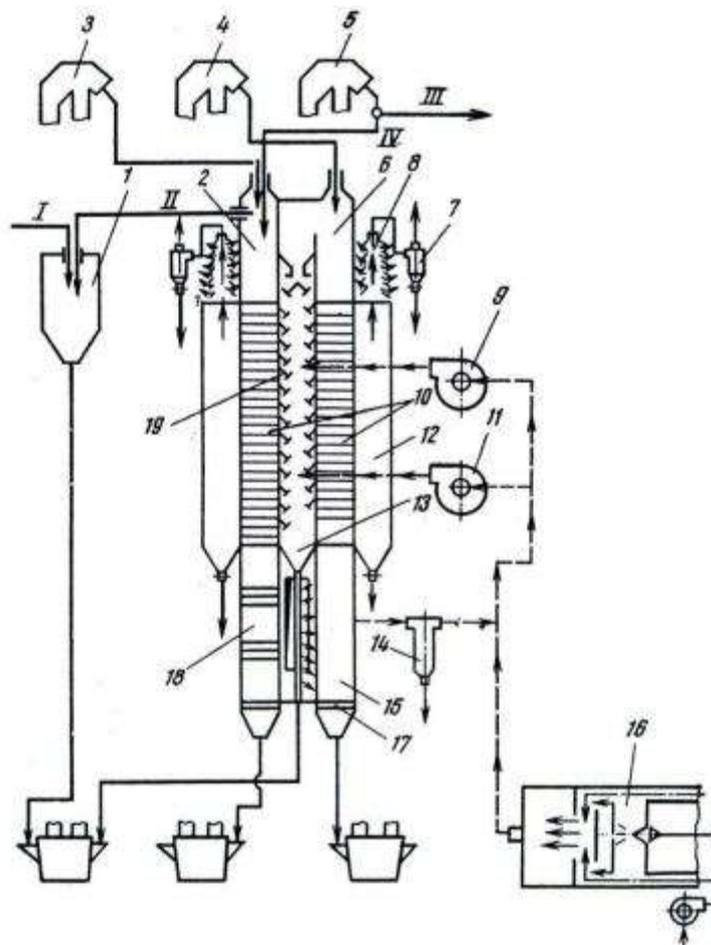


Рисунок 1.32 - Схема рециркуляционной зерносушилки А1-УЗМ-50:

1 - бункер сырого зерна; 2, 6 - надсушильные бункера; 3, 4, 5 - норрии; 7 - циклон; 8 - жалюзийный пылеотделитель; 9, 11 - вентиляторы; 10 - сушильные шахты; 12, 14 - осадочные камеры; 13 - напорная камера; 15 - шахта охлаждения; 16 - топка; 17 - комбинированное выпускное устройство; 18 - теплообменник; 19 - подогреватель зерна; I - сырое зерно; II - слив сырого зерна; III - сухое зерно; IV - слив сухого зерна

Шахта 15 охлаждения колонкового типа, с подводящими и отводящими перфорированными каналами переменного сечения. Подогреватель, размещенный в напорной камере 13 сушильных шахт, конструктивно состоит из набора наклонно расположенных пластин, по которым зерно пересыпается по всей высоте шахт.

В бункере над подогревателем установлено загрузочное устройство. Под загрузочным отверстием находится рассекатель (для разделения зернового потока на две равные части). Внизу напорной камеры расположен бункер для сбора и вывода подогретого зерна.

Подогреватель, сушильные шахты и шахту охлаждения обслуживают два параллельно расположенных вентилятора 9 и 11. Воздух, необходимый для получения агента сушки требуемой температуры, в результате разрежения, создаваемого вентиляторами, проходит перед поступлением в смесительную камеру топки 16 последовательно через шахту охлаждения 15 (охлаждая при этом зерно и повышая свою температуру) и осадочную камеру 12.

Топку зерносушилки, работающую на жидком топливе, располагают в отдельном здании. Там же устанавливают и пульт управления зерносушилкой.

Зерносушилка работает следующим образом. Сырое зерно I из оперативного бункера 1 поступает в башмак нории 3. В эту же норию подают зерно из подогревателя. Далее смесь направляют в надсушильный бункер 2.

Опускаясь в шахте в плотном подвижном слое, зерно вначале подвергается воздействию агента сушки, прошедшего через напорную камеру подогревателя. Затем через тепло-влагообменник (испаритель) и бесприводное выпускное устройство зерно поступает в норию 4, которая подает его в надсушильный бункер 6. При этом меньшая часть зерна поступает в сушильно-охладительную шахту, а большая - в подогреватель.

Из шахты охлаждения 15 (где организован односторонний подвод воздуха к охлаждаемым слоям зерна) зерно через комбинированное выпускное устройство, сочетающее непрерывный и периодический выпуск, поступает в норию 5 и вновь по самотечной трубе направляется в бункер 2. При этом излишки зерна в количестве, равном количеству поступающего сырого зерна, направляют в зернохранилище.

Технические характеристики сушилки А1-УЗМ-50: производительность 50 т/ч; мощность электродвигателей 136,5 кВт; удельный расход: электроэнергии - 2,4 кВт·ч/пл. т; условного топлива - 11,5 кг/пл. т; масса 50 т.

Рециркуляционная зерносушилка РД 2х25-70 (рисунок 1.33) спроектирована ГИ «Промзернопроект». Она состоит из двух сушилок производительностью по 25 пл. т/ч каждая. Компоновка сушилок позволяет сушить одновременно как однородные партии (совместная работа), так и различные по качеству партии зерна (работа каждой сушилки в отдельности).

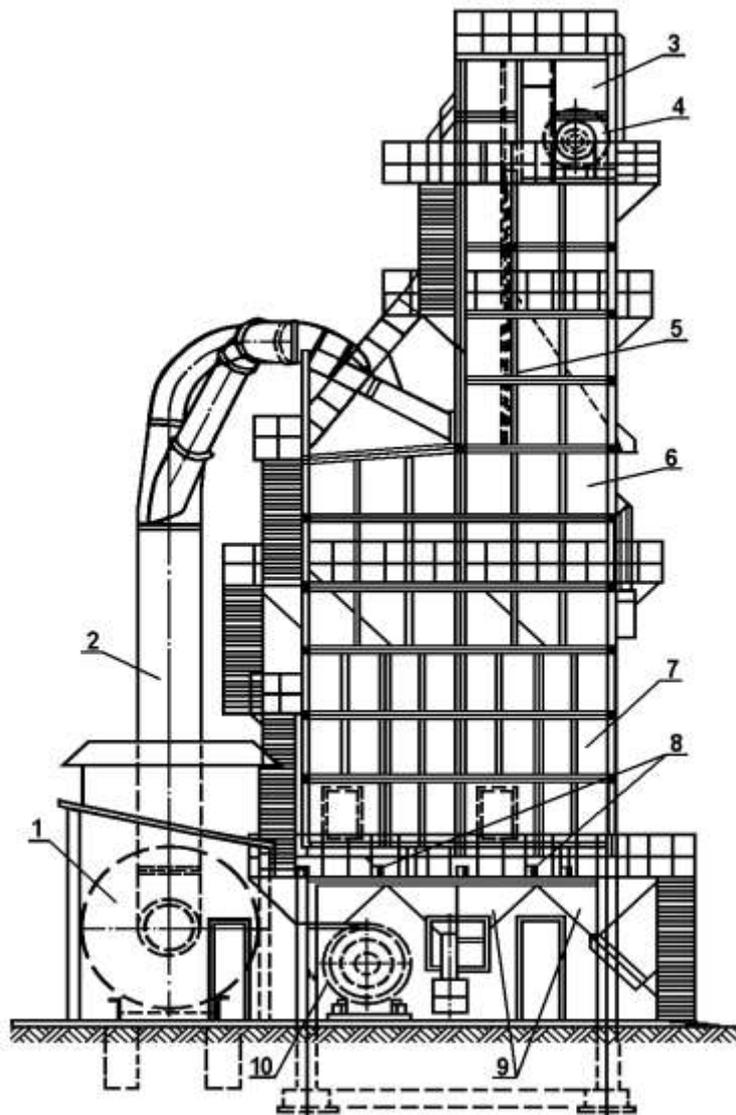


Рисунок 1.33 - Рециркуляционная зерносушилка РД-2х25-70:

1 - топка; 2 - воздухопровод теплоventилиционной системы; 3, 9 - бункеры; 4 - вентилятор камеры нагрева; 5 - камера нагрева; 6 - тепло-влагообменник; 7 - шахта охлаждения; 8 - выпускные устройства; 10 - вентилятор шахт охлаждения

Практически каждую сушилку можно использовать только по первому варианту. Как правило, зерносушилку РД 2х25-70 привязывают к рабочей башне элеватора и монтируют вне помещения. Особенностью данной конструкции является компоновка всех узлов сушилки из отдельных металлических секций, унифицированных по высоте.

Зерносушилка РД 2х25-70 не достигает паспортной производительности из-за несовершенства камеры нагрева и необоснованной компоновки шахт охлаждения [230...234].

В рециркуляционных зерносушилках типа «Целинная» сушат пшеницу, рожь, ячмень и другие зерновые культуры. При сушке кукурузы и семян подсолнечника производительность зерносушилок снижается [30, 45, 101, 102].

Рециркуляционные зерносушилки данной серии состоят из оперативного бункера, норий рециркуляционной 1 (рисунок 1.34) и сухого зерна 9, над-

шахтного бункера 2, загрузочного устройства 3, камеры нагрева 4, тепло- и влагообменника 5 со сливным устройством, шахт 6 промежуточного и окончательного 8 охлаждения зерна, выпускных устройств 7, циклона 14, бункера отходов 15, топки 16, вентиляторов 10, 11, 12, 13 и форсунки 17.

Влажное зерно поступает в приемник или бункер сырого зерна, называемый оперативным. Оперативный бункер служит промежуточной емкостью как для приема сырого зерна перед сушкой, так и для сброса излишков зерна из теплообменника 5. Нижняя часть бункера заканчивается выпускным отверстием.

Из приемника или оперативного бункера зерно поступает в рециркуляционную норию 1, которая служит для подъема зерна в надшахтный бункер 2 и для предварительного смешивания рециркулирующего (сухого) и сырого зерна. Бункер должен быть постоянно заполнен зерном.

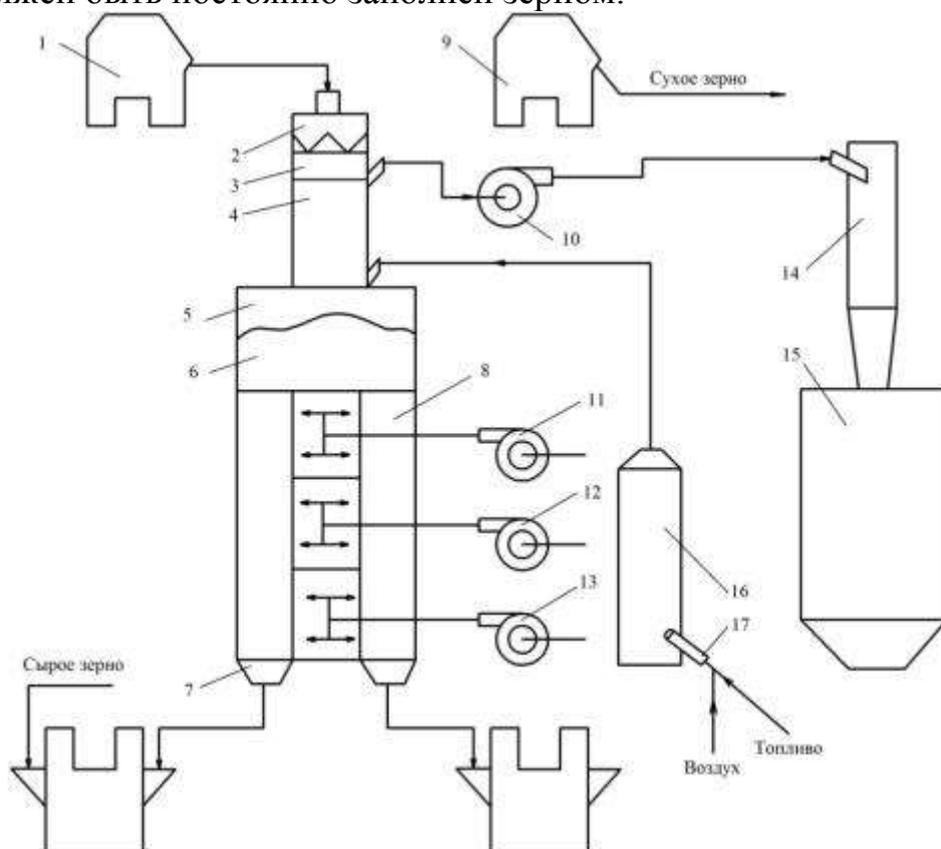


Рисунок 1.34 – Технологическая схема зерносушилки серии «Целинная» (обозначения в тексте)

Бункер 2 над камерой нагрева предназначен для накопления зерна и создания зерновой «подушки», препятствующей подосу атмосферного воздуха в камеру нагрева. В нижней части бункера 2 смонтировано загрузочное устройство 3, предназначенное для равномерного ввода зерна по поперечному сечению камеры.

Входящий поток зерна поступает в камеру нагрева 4. Между двойными стенками камеры помещен теплоизоляционный материал. Корпус снабжен двумя патрубками. Нижний патрубок служит для подвода агента сушки, верхний - для отвода отработанного агента сушки. В верхней части установлена решетка с прикрепленными к ней тормозящими элементами, которые уменьшают

скорость движения потока зерна и рассеивают его равномерно по всему сечению камеры.

Нагрев зерна в камере 4 происходит в противотоке агенту сушки, подаваемому из топки 16. Сопротивление встречного потока агента сушки также уменьшает скорость движения зерна. Температуру агента сушки на входе в камеру 4 и на выходе из нее контролируют по показателям дистанционных термометров.

Выносимые с отработанным агентом сушки примеси поступают в циклон 14 и далее - в бункер отходов 15. Днище бункера отходов выполнено конусообразным и заканчивается отверстием с реечной задвижкой.

Из камеры нагрева зерно подается в тепло- и влагообменник, где происходит полное выравнивание температуры зерна и частичное перераспределение влаги от сырого к рециркулирующему зерну.

Далее зерновой поток поступает в две шахты 6 и 8, каждая из которых последовательно продувается атмосферным воздухом. Шахты 6 и 8 служат для испарения влаги из зерна и его охлаждения при продувке малоподвижного зерна атмосферным воздухом, подаваемым в шахту вентиляторами 11, 12, 13.

Равномерный выпуск зерна из шахт и равномерное движение зерна по всему сечению шахты обеспечивают выпускные устройства.

В установившемся режиме рециркуляционная зерносушилка работает следующим образом. Сырое зерно из оперативного бункера поступает в норию 1 и смешивается с рециркулирующим зерном. Смесь сырого и сухого зерна направляется через бункер 2 и загрузочное устройство 3 в камеру нагрева 4, где в противотоке нагревается агентом сушки. Отработанный агент сушки выносит из камеры нагрева легковесные примеси и направляет их в циклон 14 и, далее, в бункер отходов 15. Нагретая смесь зерна поступает из камеры нагрева в тепло- и влагообменник, в котором полностью выравнивается температура отдельных зерен и частично перераспределяется влага между сырым и сухим зерном. После тепло- и влагообменника зерно разделяется на два неравномерных потока. Один поток (меньший) поступает в шахту охлаждения 8, где высушивается, охлаждается и норией 9 направляется в склад сухого зерна. Другой поток поступает в шахту предварительного охлаждения зерна, где высушивается, частично охлаждается и направляется затем в норию 1. Здесь рециркулирующее зерно смешивается с сырым зерном и снова через бункер 2 и загрузочное устройство 3 поступает в камеру нагрева. Процесс повторяется.

На рисунке 1.35 представлена схема шахтной зерносушилки колонкового типа, выпускаемой американской фирмой GSI.

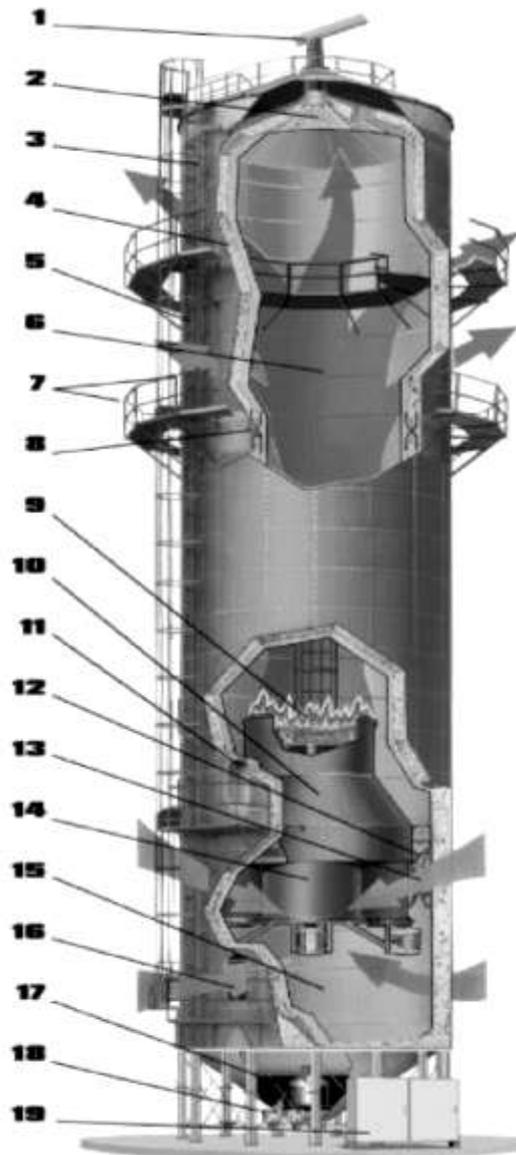


Рисунок 1.35 - Колонковая сушилка:

1 – приемное отверстие; 2 – самоочищающийся распределяющий ящик; 3 - корпус; 4 – колонна зерна; 5 – ребро жесткости корпуса; 6 – нагретый воздух; 7 – лестницы; 8 – зерновые инвенторы; 9 – горелка; 10 – конусный преобразователь скорости потока воздуха; 11 - технологическое отверстие для очистки горелки; 12 – делительный бункер; 13 – холодный воздух; 14 – центробежные вентиляторы; 15 – секция рециркуляции теплоты от охлажденного зерна; 16 – приточные отверстия для холодного воздуха; 17 – система выгрузки высушенного зерна; 18 – механизм подачи топлива; 19 – щит управления

На российском рынке в настоящее время широко представлены шахтные зерносушилки с коробами типа С (С-5, С-10, С-15, С-20, С-30, С-40, С-60). На рисунке 1.36 представлена схема работы шахтной модульной зерносушилки типа С, предлагаемые фирмой «Агропромтехника» г. Киров.

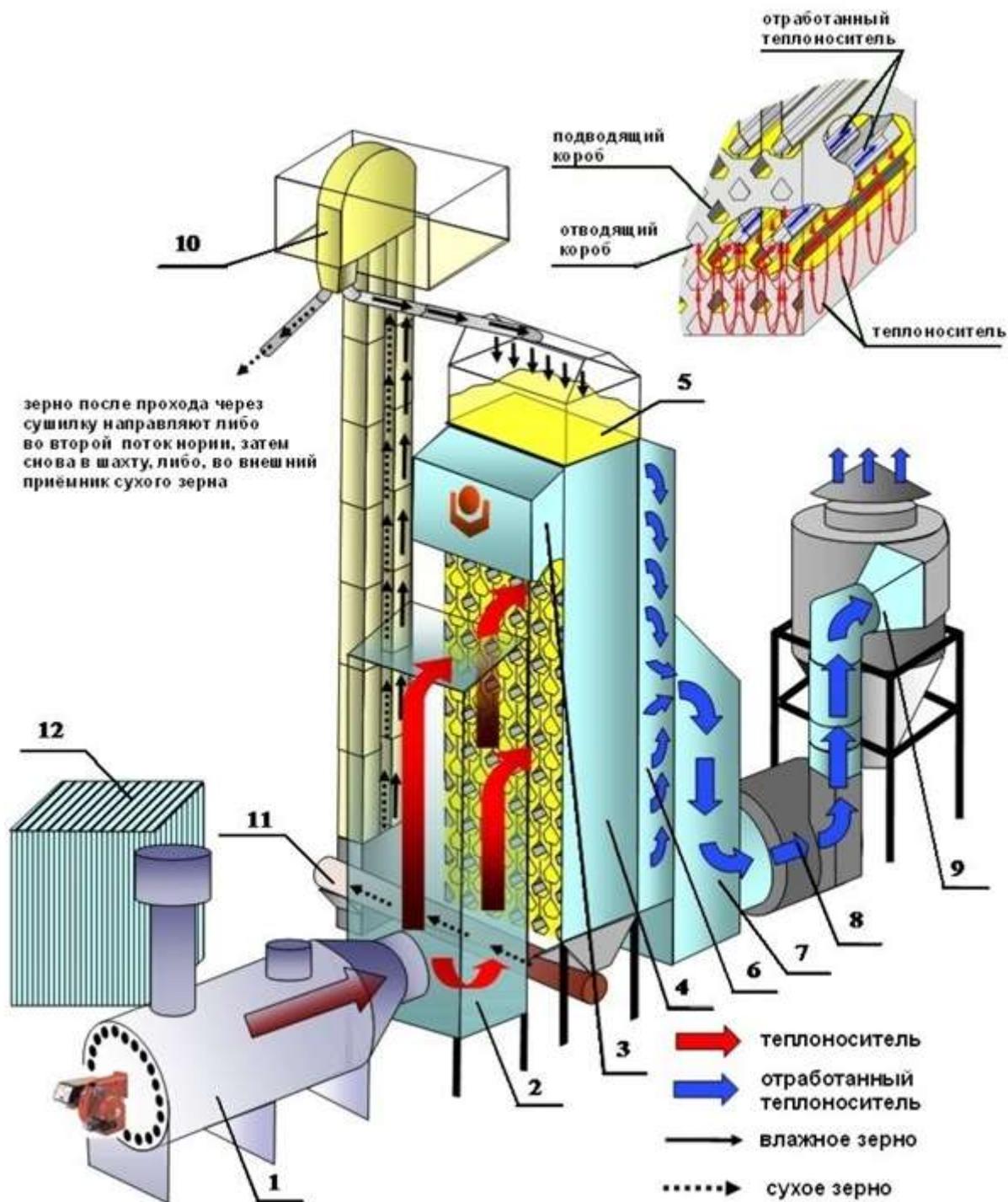


Рисунок 1.36 – Схема работы зерносушилки типа С:

1 – теплогенератор; 2 – подводящий канал; 3 – канал подвода теплоносителя; 4 – шахта; 5 – надсушильный бункер; 6 – канал отвода теплоносителя; 7 - соединительный канал; 8 – вентилятор; 9 – аспирационная система; 10 - двухпоточная нория; 11 – выгрузной винтовой конвейер; 12 – рабочее место оператора

Принцип работы сушилки заключается в следующем. Предварительно очищенный зерновой материал подается двухпоточной норией в шахту (шахты) сушилки. В шахте через зерновой слой проходят потоки подогретого теплоблоком воздуха, засасываемые вентилятором и равномерно поступающие из подводящих коробов. Над каждым рядом подводящих воздух коробов находится ряд отводящих коробов. Короба расположены в шахматном порядке, выполне-

ны шатрообразными и открытыми снизу. Вертикальные перегородки, установленные над коробами, разбивают поступающее зерно на отдельные потоки, что обеспечивает равномерное движение по высоте шахты и исключает образование застойных зон. Оработанный теплоноситель отсасывается вентилятором через отводящие короба и направляется в циклон. Время нахождения зерна в шахте регулируется разгрузочным устройством на выходе. Зерно из сушилки винтовым конвейером подается во второй поток нории и далее направляется либо в емкость для сухого зерна, либо повторно в шахту. В зависимости от исходной влажности зерна его сушка может осуществляться тремя способами (рисунок 1.37).

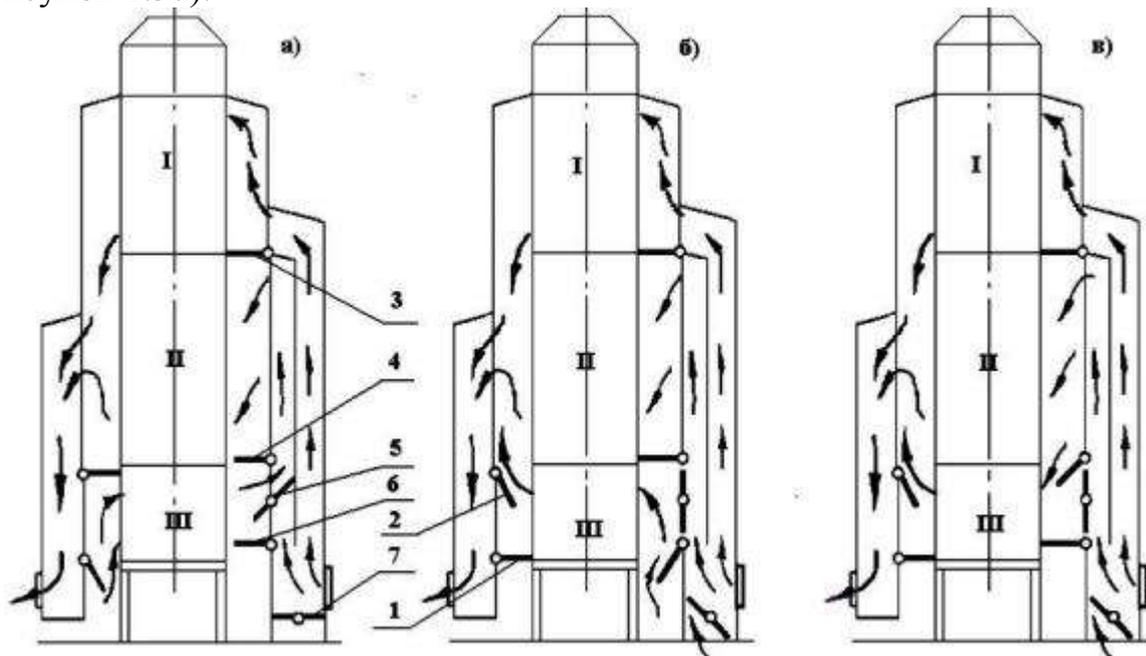


Рисунок 1.37 – Технологические схемы работы зерносушилки типа С:

а - сушка материала с рециркуляцией воздуха из зоны охлаждения, с включением его в поток теплоносителя; б - сушка материала с выбросом воздуха из зоны охлаждения с оработанным теплоносителем; в - сушка материала при неоднократном проходе через сушилку или охлаждении его в вентилируемых бункерах, зону охлаждения переводят в зону сушки; I - зона предварительного нагрева; II - зона сушки; III - зона охлаждения; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 - заслонки

Шахта разделена по вертикали на три зоны: две зоны сушки (I и II) и одну зону охлаждения (III). В первой зоне сушки регулировка температуры теплоносителя осуществляется форсункой теплоблока. Здесь с увлажненного зерна удаляется, в основном, поверхностная влага. Во второй зоне из зерна удаляется уже капиллярная влага при меньшей, чем в первой зоне температуре, которая регулируется открытием заслонок в подводящем канале. В третьей зоне происходит охлаждение зерна после сушки. Данную зону, при помощи нескольких заслонок, можно перевести в зону сушки, что позволяет увеличить производительность сушилки почти на 25 %.

Наиболее распространенная сушилка данной серии С-20 представляет собой две вертикальные шахты, разделенные на три зоны: две сушильные 5 (рисунок 1.38, а) и одну охлаждения 10.

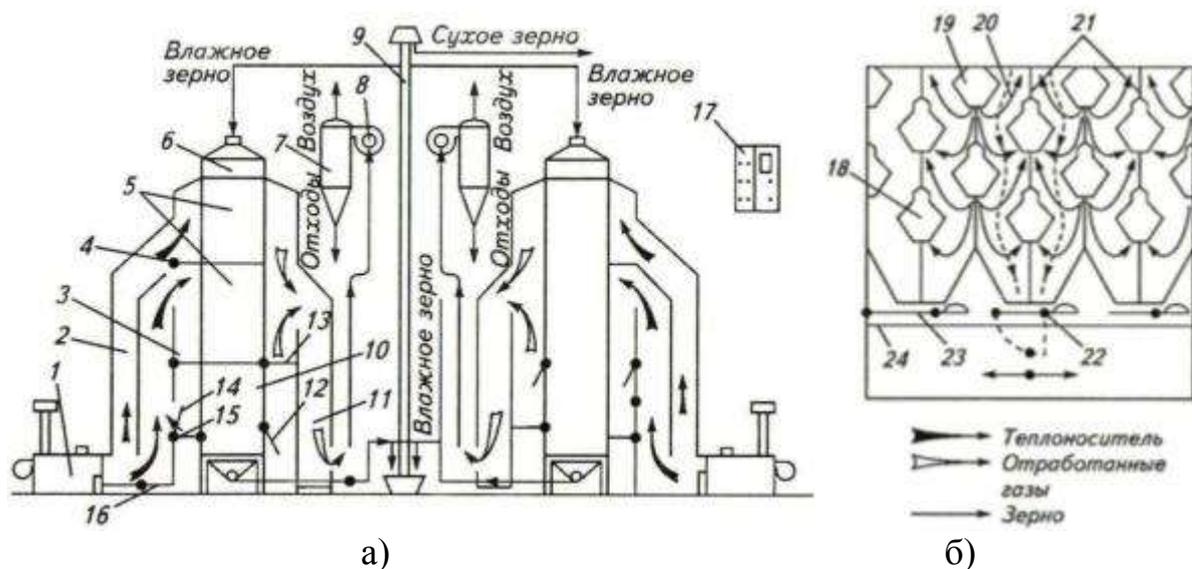


Рисунок 1.38 - Шахтная сушилка С-20:

а) схема сушилки; б) схема движения зерна и теплоносителя в шахте: 1 - топочный блок ТБ-0,75; 2 - канал подвода теплоносителя; 3, 12...16 - заслонки; 4, 21 – перегородки; 5 - сушильные секции; 6 - загрузочный бункер; 7 - циклон; 8 - вентилятор; 9 - нория; 10 - секция охлаждения; 11 - канал отвода теплоносителя; 17 - пульт управления; 18 и 19 - отводящий и подводящий короба; 20 - канал; 22 - шарнир; 23 - горизонтальная полка; 24 - подвижная каретка

Шахта сушилки представляет собой несущую стальную объемную конструкцию. В верхней части сушилки расположен загрузочный бункер 6 с патрубком, в котором предусмотрено смотровое окно и отверстия для датчиков контроля уровня заполнения шахты зерном.

В секциях шахты в шахматном порядке расположены подводящие 19 (рисунок 1.38, б) и отводящие 18 теплоноситель короба, над которыми установлены вертикальные перегородки 21, разбивающие шахту на отдельные каналы 20.

Над каналами размещены металлические листы для направления зерна. Они равномерно распределяют высушиваемый материал по высоте шахты, предотвращая образование застойных зон в секциях. По каналу 2, соединенному с топочным блоком 1, в шахту подводится теплоноситель, а по каналу 11 он отводится.

Между стенками каркаса каналов 2 и 11 размещен теплоизолирующий слой. В канале подвода теплоносителя расположена перегородка 4, разделяющая шахту на две сушильные секции 5. Между секциями 5 и 10 предусмотрены две перегородки с заслонками 14 и 15, позволяющими изменять схему работы сушилки.

В канале отвода агента сушки также выполнены перегородки между секциями 5 и 10 с заслонками 12 и 13. К фланцу канала 11 отвода теплоносителя через соединительный воздуховод присоединен всасывающий патрубок вентилятора 8 среднего давления. Нагнетательный патрубок вентилятора соединен с циклоном 7.

В нижней части каждой шахты установлено разгрузочное устройство в

виде подвижной каретки 24. Горизонтальные полки 23 каретки перекрывают и открывают нижнее отверстие каналов 20. Для экстренного вывода материала из шахт предусмотрен поворот горизонтальных полок вокруг шарнира 22. Разгрузочное устройство позволяет равномерно выгружать зерно из сушиллки по всей ее ширине, предотвращая сводообразование.

За рабочий цикл разгрузочное устройство выдает одинаковое количество зерна. По числу рабочих циклов можно определить количество высушенного зерна. Затем высушенное зерно поступает в шнек, который подает зерно во второй поток двухпоточной нории 9.

В процессе работы нории 9 одна из ее ветвей подает предварительно очищенное зерно в сушиллку. Сушиллка считается полностью загруженной зерном, когда его уровень в загрузочном бункере достигнет верхнего датчика. При этом включается сигнальная лампочка на пульте управления, после чего подачу зерна в шахту прекращают, закрывают крышку циклона и включают вентилятор. Затем приоткрывают крышку циклона и наблюдают, чтобы не было выхода полноценных зерен из циклона, включают топочный блок и прогревают сушиллку.

Температура агента сушки в период подогрева должна быть на 20 °С ниже рекомендуемой для сушки данной партии зерна. После достижения данной температуры теплоносителя включают разгрузочное устройство шахты, предварительно настроив сушиллку при помощи распределителя зерновых потоков по схеме «сама на себя», и работают до достижения кондиционной влажности зерна. Затем, распределяя потоки, высушенное зерно направляют на очистку, а влажное зерно после предварительной его очистки - в сушиллку. После этого устанавливают рекомендуемую для данного зерна температуру агента сушки.

После заполнения шахт и выбора способа сушки зерна, в том числе температурного режима и числа рабочих циклов, сначала включают электродвигатели вентиляторов шахт, а через 5 минут вводят в работу горелку топочного блока.

В процессе сушки по показаниям приборов контролируют температуру зерна по высоте шахты на трех уровнях, параметры агента сушки на входе в шахту и на выходе из нее, атмосферного воздуха, а также влажность высушенного материала. Если температура отработавшего агента сушки в одной из шахт отклоняется от заданной, то проверяют открытие заслонок в соединительных каналах и при необходимости регулируют их. При отклонении влажности от кондиционной необходимо изменить пропускную способность сушиллки.

Зерно в шахтах под действием силы тяжести перемещается сверху вниз и продувается агентом сушки, который из топочного блока по подводящему каналу подается в шахту. Агент сушки, проходя через зерновой слой, нагревает зерно, поглощает испаряющуюся влагу и выводит ее по отводящему каналу наружу. В зоне охлаждения атмосферный воздух, проходя через зерновой слой, охлаждает зерно. Скорость движения зерна в шахте регулируют разгрузочным устройством, изменяя продолжительность работы планочного разгрузителя и

амплитуду его колебаний. Возможны три варианта работы сушилки: первый - рециркуляция воздуха, отработавшего в секции охлаждения, в составе агента сушки; второй - выброс отработавшего воздуха из секции охлаждения в атмосферу; третий - перевод секции охлаждения в секцию сушки.

Конвейерные сушилки представляют собой камеры, внутри которых расположены конвейеры, снабженные вентиляционным оборудованием. Сушка зерна в них осуществляется чистым, нагретым в паровых или огневых калориферах воздухом, температура которого зависит от вида высушиваемого продукта и влажности.

Имеются одноярусные и многоярусные конвейерные сушилки, в которых высушиваемый материал перемешивается, пересыпаясь с одной ленты на другую.

На рисунке 1.39 а приведена схема работы зерносушилка УСК-2.

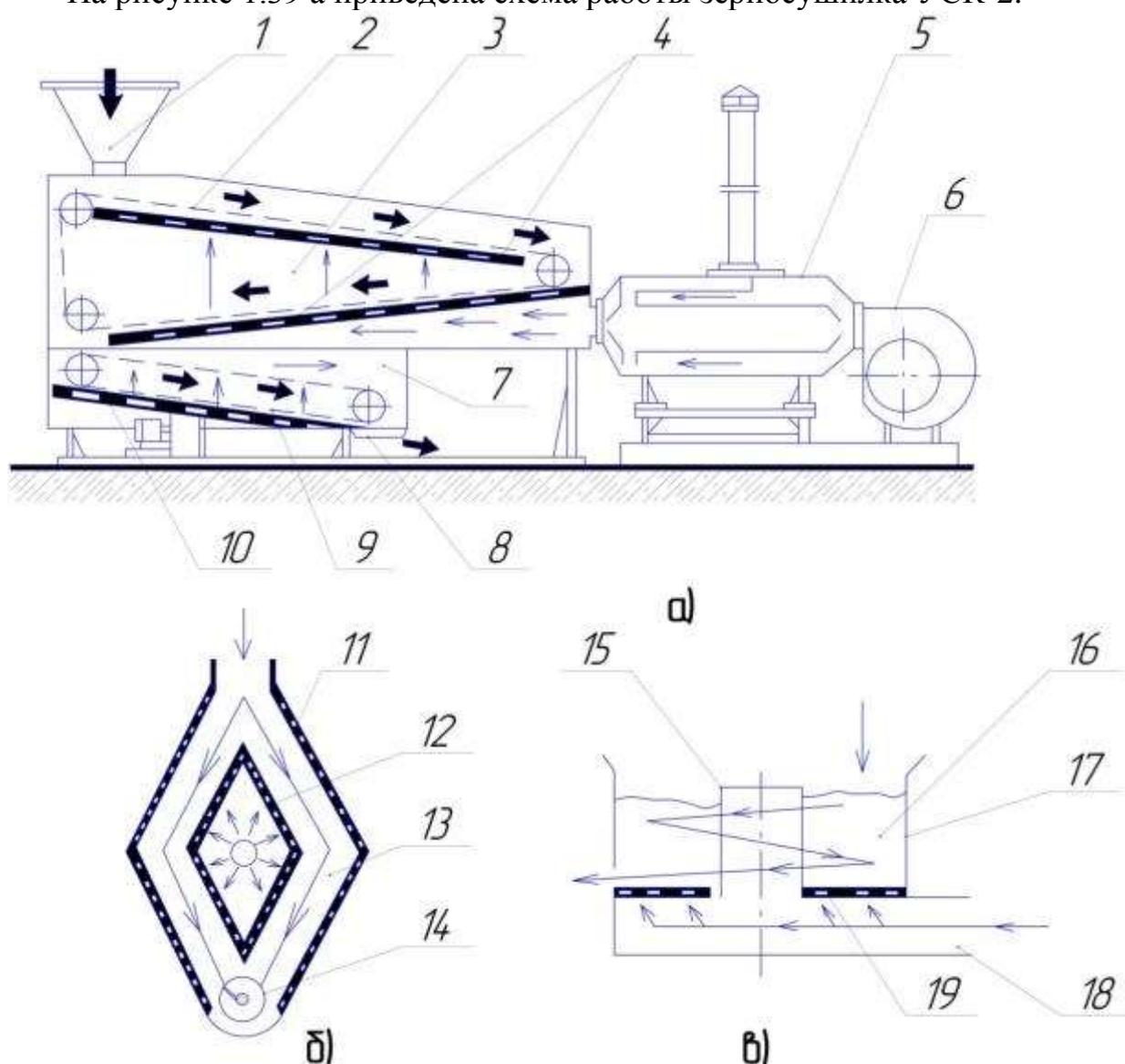


Рисунок 1.39 - Схемы рабочих процессов зерносушилок - конвейерной (а), ромбической (б) и карусельной (в):

1 - бункер; 2, 9 - транспортеры; 3, 13, 16 - сушильные камеры; 4, 10 - решета; 5 - теплогенератор; 6 - вентилятор; 7 - охлаждающая камера; 8 - выгрузной ка-

нал; 11, 12 - стенки; 14 - шнек; 15, 17 - ограждения; 18 - воздухопровод; 19 - решетчатая платформа

Данная сушилка предназначена для сушки продовольственного и фуражного зерна, зернобобовых, масличных, крупяных и других культур. Рабочий процесс конвейерной зерносушилки заключается в следующем. Зерно подают загрузочным транспортером в бункер 1. Из бункера оно самотеком высыпается на верхнюю ветвь транспортера 2, распределяется по ленте транспортёра тонким слоем и перемещается по поверхности сначала верхнего, а затем нижнего решета 4. Агент сушки, подогреваемый в теплогенераторе 5, вентилятором 6 нагнетается под нижнее решето, проходит сначала через нижний, а затем через верхний слой зерна, нагревает его и удаляет испарившуюся влагу. При перемещении зерна планки транспортера ворошат зерновой слой, обеспечивая необходимую равномерность сушки. Высушенное зерно поступает на транспортер 9 охладительной камеры, который перемещает его по решету 10 к выгрузному каналу 8. Атмосферный воздух, подаваемый вентилятором, проходит через слой зерна и охлаждает его. Режим сушки регулируют, изменяя температуру агента сушки и скорость движения транспортера в сушильной камере [76].

Производительность зерносушилки УСК - 2 при сушке фуражного зерна пшеницы составляет 4 пл. т/ч.

На рисунке 1.39 б приведена схема рабочего процесса ромбической сушилки. Данная сушилка снабжена сушильной камерой 13, выполненной в форме ромба с двойными перфорированными стенками 11 и 12. При сушке зерно движется сверху вниз между стенками, продувается агентом сушки, нагревается и теряет излишки влаги. В процессе движения по верхнему и нижнему наклонным каналам зерновой слой перемешивается. Ромбические сушилки бывают передвижного и стационарного исполнения.

Производительность этих сушилок зависит главным образом от длины сушильной камеры и составляет 5...25 т/ч.

Карусельная зерносушилка СКЗ - 8 предназначена для сушки зерна зерновых и зернобобовых культур с исходной влажностью до 35 % (рисунок 1.39 в). Сушилка снабжена цилиндрической камерой 16, в которой слой высушиваемого зерна вращается вместе с решетчатой платформой 19 вокруг вертикальной оси и продувается агентом сушки. Производительность зерносушилки СКЗ - 8 на сушке продовольственного зерна пшеницы составляет 5 пл. т/ч.

Для сушилки кукурузы в початках применяют камерные сушилки коридорного и секционного типов. Сортные семена кукурузы в початках сушат в камерных сушилках в плотном, неподвижном слое, который непрерывно или прерывисто продувают смесью топочных газов с воздухом (агентом сушки). Сушилки коридорного и секционного типов различаются конструкцией и расположением сушильных шахт, распределительных коридоров, вентиляционного оборудования, топок и схемой движения агента сушки [8, 10].

Сушилки могут состоять из четырех, шести, восьми или десяти сушильных камер. Производительность зависит от числа камер, степени их загрузки и количества подаваемого агента сушки. Початки кукурузы загружают в сушиль-

ные камеры и сушат в неподвижном слое, пропуская через него агент сушки попеременно снизу вверх и сверху вниз. Продолжительность сушки кукурузы в початках достигает пяти суток при начальной влажности зерна 42...45 % и конечной 13...13,5 %.

Все сушилки коридорного типа (рисунок 1.40) состоят, как правило, из сушильного и топочного помещения (собственно сушилки и топки) и представляют собой отдельные сооружения, оснащенные вентиляционным, энергетическим (топочным), транспортным и другим оборудованием.

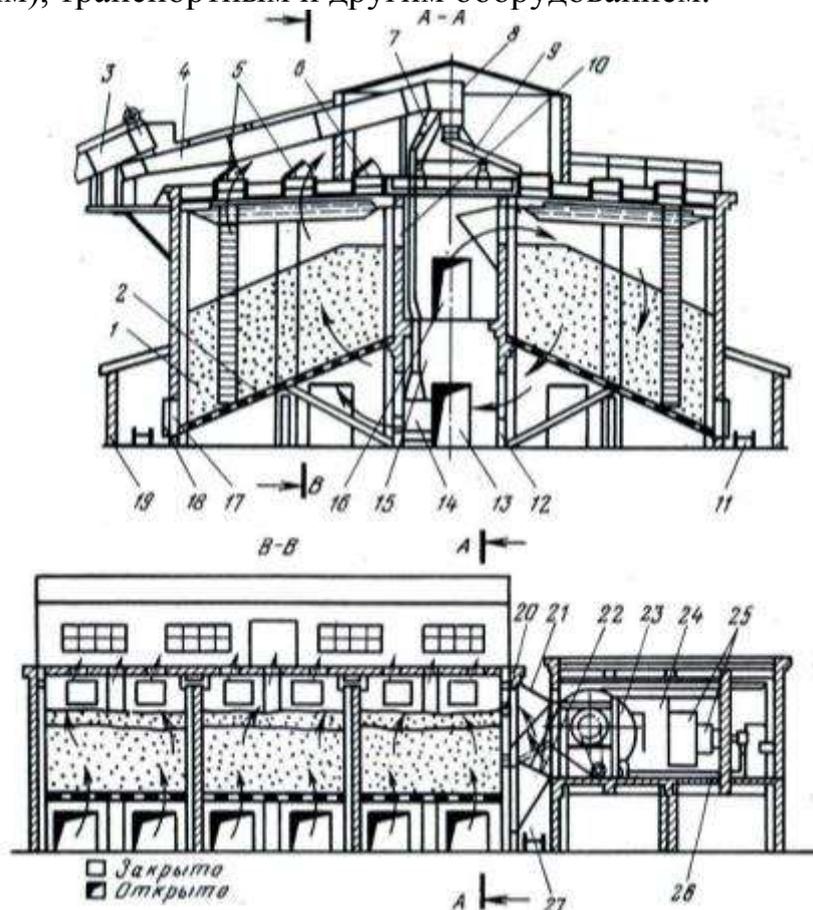


Рисунок 1.40 – Камерная сушилка СКП-6 коридорного типа:

1 - сушильная камера; 2 - ситовое днище; 3 - скребковый конвейер; 4 - ленточный конвейер; 5 - люки для выхода отработавшего агента сушки; 6 - загрузочный люк; 7 – разделитель потока высушиваемого материала; 8 - реверсивный конвейер; 9 - загрузочный лоток; 10 - люк; 11 - разгрузочный конвейер; 12, 13 - двери; 14 - передвижная сушилка; 15 - нижний распределительный коридор; 16 - верхний распределительный коридор; 17 - разгрузочный люк; 18 - крышка люка; 19 - галерея; 20 - лебедка; 21 - диффузор; 22 - клапан; 23 - вентилятор низкого давления; 24 - топка; 25 - цилиндры топки; 26 - жалюзийная решетка

Основным достоинством данных сушилок является простота и дешевизна их изготовления. Однако, несмотря на это, технология сушки в таких аппаратах очень несовершенна. Процесс сушки происходит при подаче агента через перфорированную стенку в слой зерна и отводе отработанного агента через другую перфорированную стенку. При такой сушке зерно, прилегающее к стенке со

стороны подвода агента, пересушивается, а у противоположной стенки не досушивается. Для снижения неравномерности сушки используют агент с более низкой температурой, а это, в свою очередь, приводит к повышенному расходу топлива и электроэнергии.

Сушка зерна во взвешенном слое реализуется в пневмогазовых и пневмогазовых с рециркуляцией зерна сушилках (рисунок 1.41) [50].

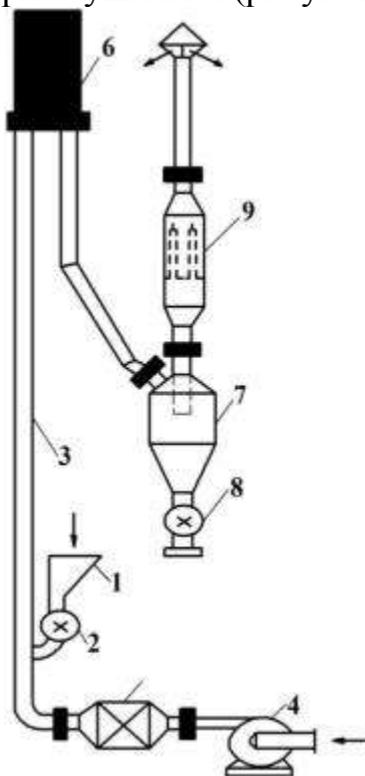


Рисунок 1.41 – Пневмогазовая сушилка:

1 – бункер; 2 – питатель; 3 – труба-сушилка; 4 – вентилятор; 5 – калорифер; 6 – сборник; 7 – циклон; 8 – разгрузочное устройство; 9 - фильтр

Они представляют собой трубу, в которую с большой скоростью вентилятор подает агент сушки, а в нижнюю часть трубы подают влажное зерно. Газовым потоком в течение нескольких секунд оно нагревается до необходимой температуры и поднимается в шахту. В верхней части трубы зерно выдерживается некоторое время, после чего выводится из сушиллки.

Вибрационные зерносушиллки состоят из ряда решет, расположенных одно под другим. Для перемещения и лучшего перемешивания зерна решета приводят в колебательное движение. Движущееся на решетке зерно пронизывает нагретый агент сушки, подаваемый снизу вверх.

Вибрационная зерносушилка (рисунок 1.42) включает рабочий орган, состоящий из желоба 1, на котором размещены кронштейн 2, патрубки подвода воздуха 3, патрубков выгрузки продукта 4 и крышка 5. Крышка снабжена патрубком загрузки продукта 6 и патрубком отвода воздуха 7. Внутри рабочего органа установлены перфорированный лист 8, выполняющий функцию газораспределительной решетки, а также заслонка 9. Рабочий орган смонтирован на раме 10 на пружинах 11. Для вибропобуждения рабочего органа на кронштейне 2 установлен привод 12.

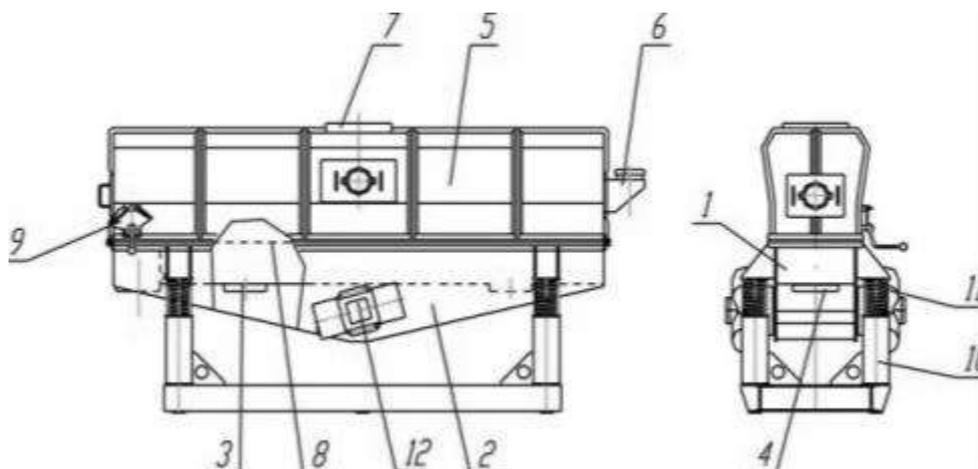


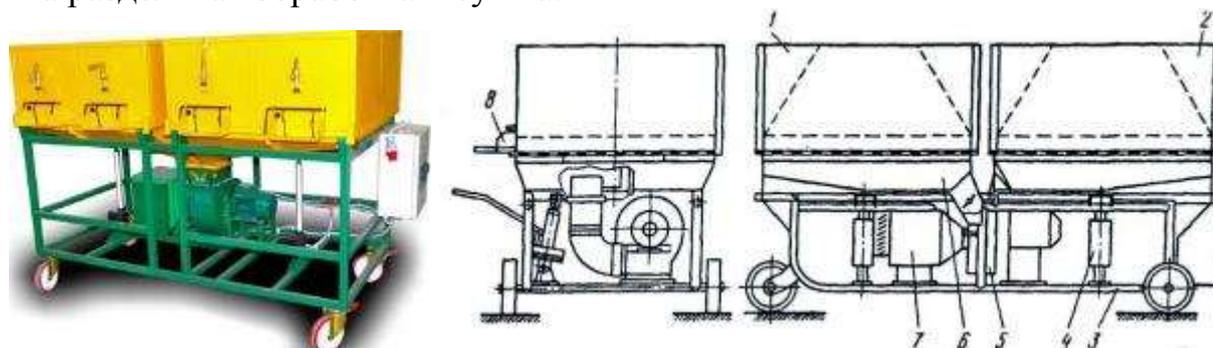
Рисунок 1.42 - Вибрационная конвективная сушилка (обозначения в тексте)

Зерносушилка работает следующим образом: исходный продукт загружается через патрубок 6 внутрь рабочего органа, где под воздействием вибрации, создаваемой приводом 12, равномерно распределяется на перфорированном листе 8 и транспортируется в сторону патрубка разгрузки 4.

Горячий воздух, поступивший через патрубки 3 внутрь сушилки, проходит затем через отверстия в перфорированном листе и слой находящегося на нем продукта, который при этом приходит в псевдооживленное состояние. В результате интенсивного теплообмена между воздухом и частицами продукта осуществляется его сушка. Отработанный воздух через патрубок 7 отводится из сушилки.

Время пребывания в зерносушилке зерна, а, следовательно, и его конечное влагосодержание, регулируется параметрами вибрации привода 12, а также изменением высоты слоя с помощью заслонки 9. Сушилка может работать как в периодическом, так и непрерывном режимах.

Лотковая сушилка СЛ-0,3х2 (рисунок 1.43) – селекционная, предназначена для сушки семян с контрольных питомников, делянок предварительного размножения или другого небольшого количества семян, для которых необходима отдельная обработка и сушка.



а)

б)

Рисунок 1.43 – Лотковая зерносушилка СЛ-0,3х2:

а) общий вид; б) конструктивная схема: 1, 2 – сушильные камеры; 3 – рама; 4 – гидropодъёмник; 5 – вентилятор; 6 – бункер; 7 – воздухоподогреватель; 8 – выпускное устройство

Сушилка состоит из двух лотков, сушильных камер, смонтированных на общей раме с колесами. Дно камер сделано из металлической сетки, под кото-

рую по коробам вентилятор подает нагретый в электрокалорифере горячий воздух.

Вентилятор приводится в действие от электромотора, запуск его и включение электрокалорифера производится пускателем, смонтированного на пульте управления, на котором имеются автоматические выключатели и сигнальные лампы.

Предварительно очищенные семена загружают в сушильные камеры, оборудованные подвижными боковыми стенками. При наклонном положении этих стенок слою зерна может быть придана форма усеченной призмы. В процессе сушки воздух, нагнетаемый вентилятором, пронизывает слой зерна снизу вверх и уходит в атмосферу. При этом в первую очередь высыхают семена, которые находятся ближе к сетке. По мере увеличения толщины слоя скорость воздушного потока возрастает, что и приводит к уменьшению неравномерности высыхания семян по толщине слоя.

После окончания сушки калорифер выключают, и зерно охлаждают атмосферным воздухом.

Выгружают зерно из камер через разгрузочные люки; для полного освобождения камер от зерна их гидropодъемником переводят в наклонное положение.

Зерносушильные установки, в которых нагрев зерна осуществляется в поле токов высокой и сверхвысокой частот (ТВЧ и СВЧ), в настоящее время реализованы в виде опытно-экспериментальных установок. При такой сушке зерно прогревается по всей толщине слоя сразу.

На рисунке 1.44 представлена СВЧ-сушильная установка (патент РФ № 2380632.).

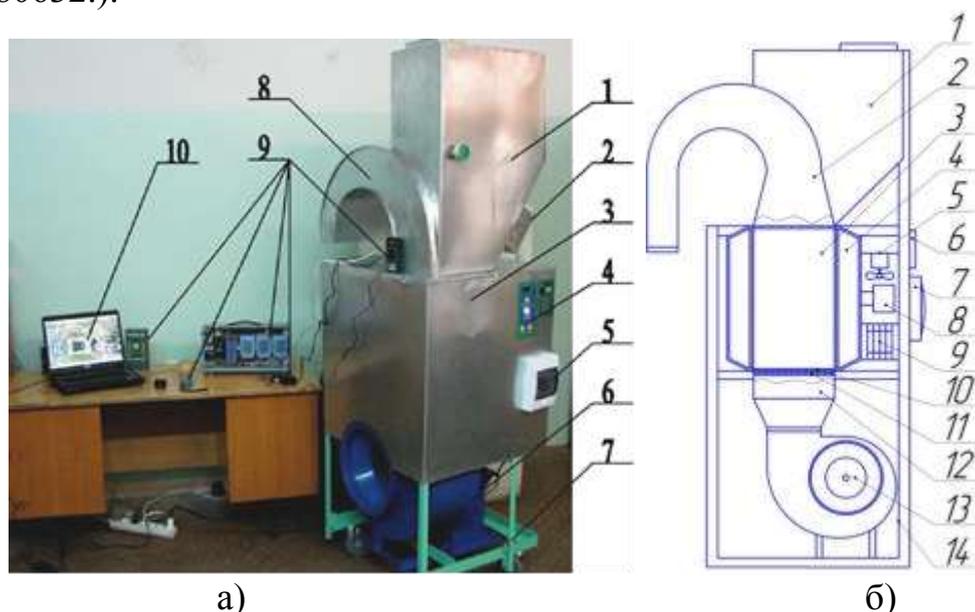


Рисунок 1.44 - СВЧ установка для сушки зерна:

а) общий вид экспериментальной установки: 1 – загрузочный бункер; 2 – механизм загрузки; 3 – корпус; 4 – пульт управления; 5 – пускозащитный блок; 6 – нагнетательный вентилятор; 7 – несущая рама; 8 – выгрузное устройство; 9 – контрольно-измерительная аппаратура; 10 – персональный компьютер для

обработки данных; б) схема установки: 1 – загрузочный бункер; 2 – выгрузное устройство; 3 – сушильная камера; 4 – резонаторная камера; 5 – система охлаждения магнетрона; 6 – пульт управления; 7 – пускозащитный блок; 8 – магнетрон с волноводом; 9 – инвертор; 10 – беспроводная радиопрозрачная сетка, 11 – экранирующая сетка; 12 – воздухораспределительный канал; 13 – нагнетательный вентилятор; 14 – рама

Недостатками данной зерносушилки, как уже отмечалось выше, являются большой расход электроэнергии, периодичность процесса и небольшая производительность.

Недостаточное внимание уделяют в настоящее время воздушно-солнечному способу сушки. Используя площадку с твёрдым покрытием, за один солнечный день можно снять 3...4 % влаги при полном сохранении семенных достоинств зерна. Недостатками такой сушки являются полная зависимость процесса от погодных условий и отсутствие средств механизации данного вида работ (рисунок 1.45) [27].



Рисунок 1.45 – Сушка зерна с использованием солнечной энергии

Сушилки с контактным способом подвода теплоты не нашли широкого распространения в зерносушении. Это связано в первую очередь с тем, что при сушке зерна на нагретой поверхности оно нагревается неравномерно: нижние слои пересушиваются, а верхние недосыхают. Однако в настоящее время обосновано, что данный вид сушки получает преимущество перед другими видами при обеспечении единичного зернового слоя и постоянном перемешивании или ворошении высушиваемого материала. Технически это можно осуществить, применяя в сушильных установках соответствующие рабочие органы. При этом более перспективными представляются рабочие органы, позволяющие одновременно совмещать процессы сушки и транспортирования исходного материала.

В Ульяновской ГСХА им. П.А. Столыпина созданы и апробированы несколько перспективных экспериментальных образцов зерносушилок с контактным способом подвода теплоты.

На рисунке 1.46 представлена схема зерносушилки контактного типа вы-

полненной по патенту РФ № 1742603.

Зерносушилка состоит из токонепроводящего цилиндрического кожуха 1, имеющего отверстия 2 и 3 для охлаждения зерна, диаметр которых увеличивается к разгрузочному окну 4, спирально-винтового транспортирующего рабочего органа 5, расположенного по оси цилиндра с возможностью вращения и подключенного к источнику тока при помощи коллекторов 6 и щеток 7.

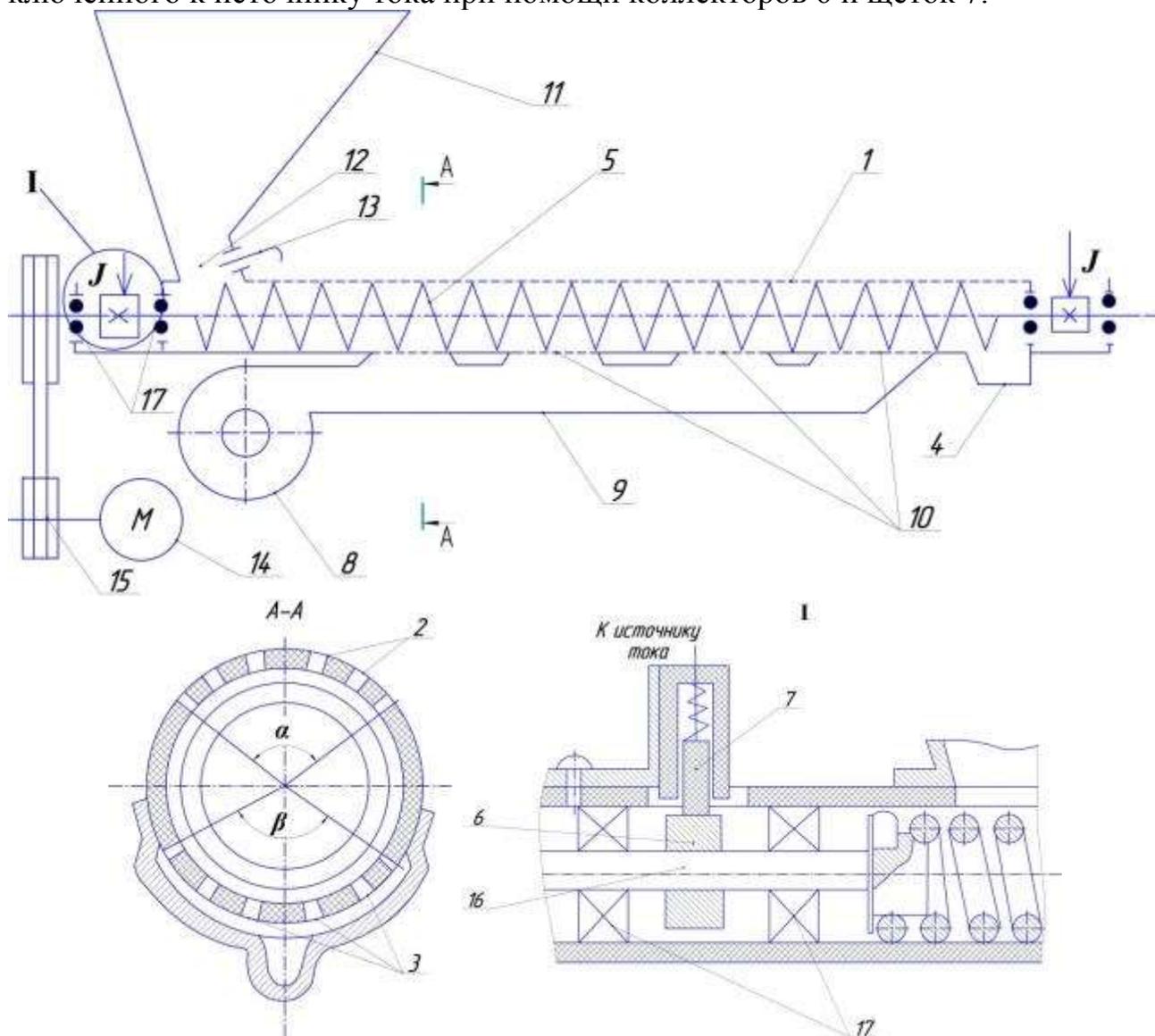


Рисунок 1.46 – Зерносушилка контактного типа (обозначения в тексте)

Кожух снабжен устройством охлаждения, включающим вентилятор 8 и воздухопровод 9 с окнами 10, соединенный с нижней перфорированной частью кожуха по углу β . Площадь окон 10 увеличивается по направлению движения зерна. Бункер 11 расположен над загрузочным 10 окном и снабжён заслонкой 13. Спирально-винтовой транспортирующий рабочий орган 5 получает привод от электродвигателя 14 посредством ременной передачи 15 через вал 16, который опирается на подшипники 17.

Отверстия для удаления влаги расположены по верхней образующей кожуха по углу α от загрузочного до разгрузочного окон.

Температуру нагрева зерна регулируют изменением напряжения и силы

тока, частоты вращения транспортирующего рабочего органа, а также подачи материала из бункера.

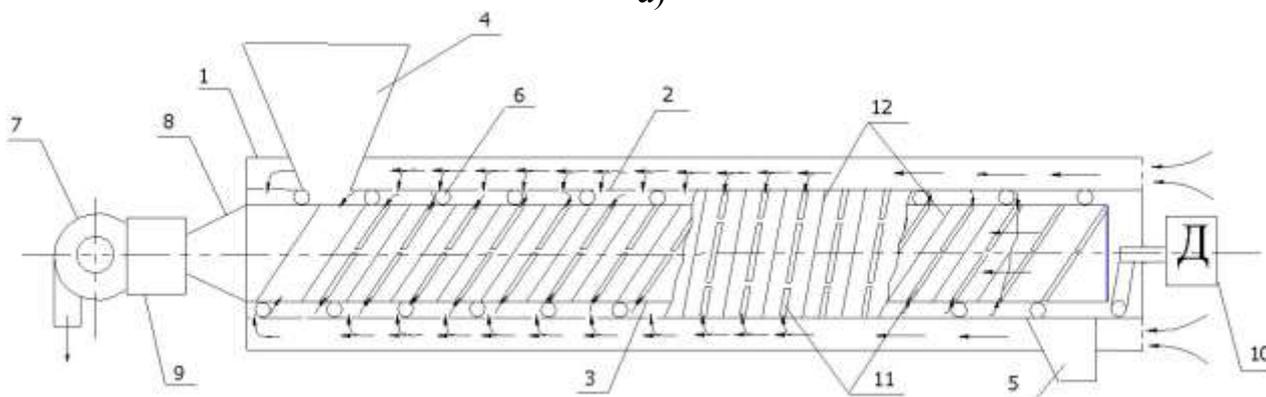
По итогам исследования опытного образца выявлено, что суммарный удельный расход энергии у предлагаемой сушилки составляет 4,3 МДж/кг испаренной влаги.

Пропускная способность данной зерносушилки составляет 82 кг/ч [14].

Зерносушилка контактного типа по патенту РФ № 2297582 (рисунок 1.47) работает следующим образом.



а)



б)

Рисунок 1.47 – Зерносушилка контактного типа:

а) общий вид: 1 – мотор-редуктор; 2 – загрузочное окно; 3 – погрузчик; 4 – теплообменник; 5 – выгрузное окно; 6 – вентилятор; 7 – фильтр; б) конструктивная схема: 1 - теплоизоляционный корпус; 2 - цилиндрический перфорированный кожух; 3 - перфорированный стакан; 4 - загрузочный бункер; 5 - выгрузное окно; 6 - транспортирующий спирально-винтовой рабочий орган; 7 - вентилятор; 8 - воздуховод; 9 - фильтр; 10 - привод; 11 - прорези; 12 - нагревательные элементы; стрелками показано направление движения воздуха

При попадании зерна из загрузочного бункера в кольцевой зазор между перфорированным кожухом и стаканом, оно захватывается транспортирующим

спирально-винтовым рабочим органом. Контактная поверхность перфорированного кожуха и стакана, зерно теряет влагу. При движении воздух охлаждает внешнюю поверхность кожуха, нагревается и поступает через перфорацию кожуха в зону сушки, где дополнительно подогревает зерно.

Пропускная способность представленной зерносушилки достигает 250 кг/ч.

Бункера активного вентилирования для снижения влажности зерна впервые начали широко использовать вследствие возникновения необходимости заготовки больших объемов зерна, которое можно обрабатывать без тепловой сушки. Оказалось, что зерно с определенной влажностью можно постепенно подсушивать, охлаждать, консервировать, аэрировать в зависимости от его состояния и назначения. Этот технологический прием обеспечивает, во-первых, существенное снижение энергозатрат в сравнении с тепловой сушкой. Во-вторых, повышается качество семян или зерна за счет «мягкого» завершения биохимических процессов, связанных с созреванием и стабилизацией белково-ферментного комплекса. В-третьих, прием не требует сложного оборудования или больших капитальных вложений. Поэтому активное вентилирование широко применяют при обработке основных объемов высококачественного зерна в ряде аграрно-развитых стран (США, Канаде, Австралии).

Вентилируемые бункера (рисунок 1.48) состоят из бункера и вентилятора с воздухоподогревателем и воздухопроводом. Подогретый воздух пронизывает находящееся в бункере влажное зерно, высушивая его. Эти установки применяют также для вентилирования зерна наружным воздухом при его охлаждении и консервации.

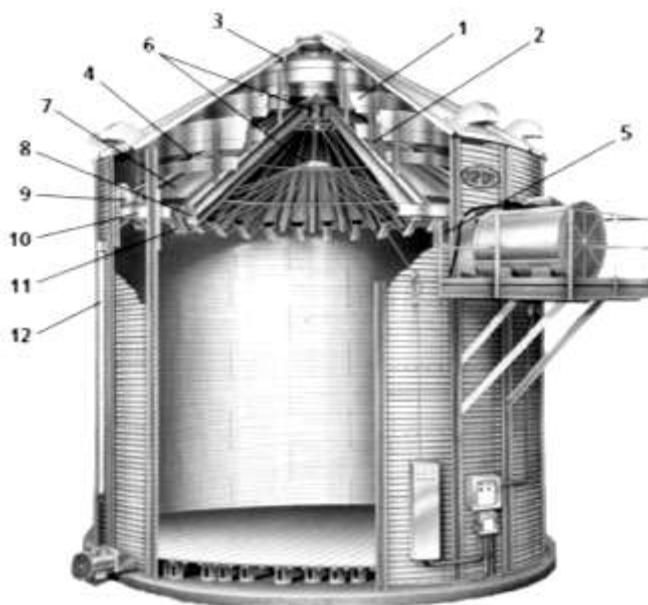


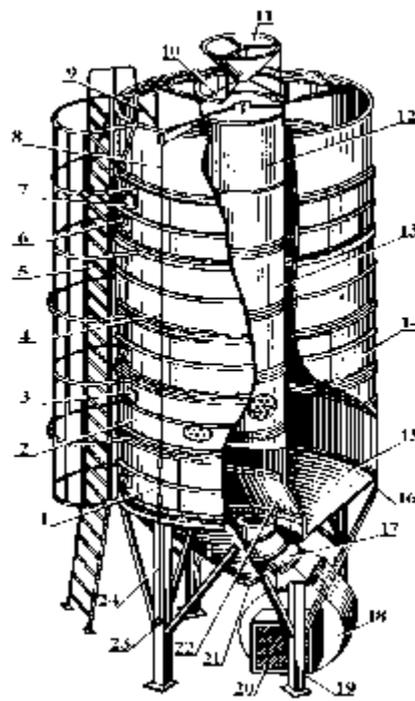
Рисунок 1.48 - Бункер активного вентилирования GSI:

1 – распределитель влажного зерна; 2, 4 – стойка распределителя влажного зерна; 3 – приемный бункер; 5 – вентилятор с электронагревателем; 6 - система вывода влажного воздуха; 7 – дно сушильной секции бункера; 8 – лотковый канал; 9 – шиберная заслонка; 10 – основание лотковой системы бункера; 11 – шлюз; 12 – воздушный канал

На рисунке 1.49 представлена схема бункера БВ-40 отечественного производства. Зерно поступает в приёмный бункер 11 и равномерно заполняет пространство между корпусом 10 и воздухораспределительной трубой 13. При подсушивании зерна воздух, подогретый на 3...5 °С выше температуры окружающей среды, нагнетается вентилятором 18 в воздухораспределительную трубу 13, пронизывает слой зерна и уходит в атмосферу. Когда зерно охлаждается, электрокалорифер 20 отключают.



а)



б)

Рисунок 1.49 – Вентилируемый бункер БВ-40:

а) общий вид; б) схема: 1 - тяга цилиндра; 2 - корпус бункера; 3 - влагурегулятор; 4 - трос; 5 - лестница наружная; 6 - пробоотборник; 7 - датчик уровня зерна; 8 - трособлочная система; 9 - лестница внутренняя; 10 - корпус; 11 - бункер приемный; 12 - клапан плавающий; 13 - труба воздухораспределителя; 14 - секция корпуса; 15 - корпус; 16 - рама; 17 - патрубок; 18 - вентилятор; 19 - стойка; 20 - электрокалорифер; 21 - шибер; 22 - конус обратный; 23 - лебедка ручная; 24 - тумба

Перед началом активного вентилирования необходимо убедиться в целесообразности и возможности проведения этой операции, т. е. нужно знать, можно ли снизить температуру зерна и его влажность. Для этого следует определить температуру и влажность зерна и воздуха. Нельзя вентилировать зерно в тех случаях, когда может произойти увлажнение зерна, т. е. вентилировать холодное зерно более теплым воздухом или продувать сухое зерно теплым и очень влажным воздухом.

Минимальная удельная подача воздуха в зависимости от культуры, влажности и максимальной высоты насыпи приведена в таблице 1.26 [7, 9, 11, 158, 159].

Семенное зерно лучше сначала вентилировать теплым воздухом с температурой 18...36 °С, чтобы не затормозить его послеуборочное дозревание.

Охлаждать и промораживать это зерно следует до температуры 0 °С, но не ниже минус 3...5 °С.

Таблица 1.26 – Зависимость удельной подачи воздуха от вида

высушиваемой культуры и её исходной влажности

Исходная влажность зерна, %	Максимальная удельная подача воздуха, м ³ /(т·ч)	Максимальная высота насыпи, м			Зернобобовые культуры
		Пшеница, рожь, ячмень, овёс, зерно кукурузы	Семена подсолнечника	Просо	
16	30	3,5	3,0	2,0	3,5
18	40	2,5	2,5	2,0	2,5
20	60	2,0	2,0	1,8	2,0
22	80	2,0	2,0	1,6	1,7
24	120	2,0	1,5	1,5	1,5
26	160	2,0	1,5	1,5	1,2

Таким образом, в настоящее время в сельскохозяйственном производстве применяют разнообразное зерносушильное оборудование, которое отличается конструктивно-технологическими схемами исполнения.

Проведенный анализ конструкций существующих устройств для тепловой обработки зерна показывает, что они рассчитаны на пропускную способность в среднем более 2,5 т/ч и их применение для обработки малых партий зерна не эффективно. Известные устройства, которые позволяют обрабатывать более мелкие партии зерна до 0,3 т/ч, также неэффективны, так как в них резко увеличиваются суммарные удельные затраты теплоты на нагрев зерна и на испарение из него влаги.

Более низкие показатели удельных затрат энергии в установках иностранного производства достигаются, преимущественно, за счет внедрения элементов современных систем автоматического управления и регулирования процессом тепловой обработки зерна. При этом способы реализации в них процесса, а также конструктивно-технологические схемы качественно не отличаются от аналогичных установок российского производства.

Небольшие зернопроизводящие и зерноперерабатывающие сельскохозяйственные предприятия, фермерские (крестьянские) хозяйства, которые все больше распространяются на территории России, нуждаются в устройствах для тепловой обработки небольших партий зерна. Поэтому целесообразно разрабатывать конструкции устройств относительно небольшой пропускной способности, которые смогли бы обеспечить требуемое качество обработанного зерна с минимальными затратами энергии.

Для исключения неравномерности нагрева зерновой массы, присущей контактной тепловой обработке, необходимо создать непрерывное движение единичного слоя зерна по греющей поверхности. При тепловой обработке единичного слоя зерна тяжело добиться высокой пропускной способности. Однако при оптимальном сочетании конструктивных и режимных параметров таких устройств можно достичь пропускной способности, удовлетворяющей потребностям мелких сельскохозяйственных предприятий и фермерских хозяйств.

1.5 Условия и режимы сушки зерна

1.5.1 Особенности сушки зерна и семян в зерносушилках различных конструкций

Зерно различных культур используют для производства разнообразных продуктов питания, а также для кормовых и технических целей. Пищевая ценность продуктов питания и качество продукции, вырабатываемой из зерна, в значительной мере зависят от способов и режимов его сушки.

Своевременно и правильно проведенная сушка не только повышает стойкость зерна в хранении, но и улучшает его продовольственные и семенные достоинства. В результате сушки ускоряется послеуборочное дозревание, происходит выравнивание по влажности, улучшаются цвет, внешний вид и другие технологические свойства зерна. Сушка положительно влияет на выход и качество продукции при переработке зерна в муку и крупу. Она улучшает технологические свойства дефектного зерна: проросшего, морозобойного, поврежденного клопом-черепашкой.

Режимы сушки зерна в зерносушилках различных типов и конструкций ограничены основным фактором - предельно допустимой температурой нагрева зерна.

Предельно допустимая температура нагрева зерна и семян зависит от их исходной влажности, так как чем больше в объектах сушки свободной воды, тем они менее термоустойчивы. Поэтому при содержании в них влаги более 20 % и особенно 25 % снижают температуру агента сушки и нагрева семян. При исходной влажности гороха и риса 18 % допустимая температура нагрева равна 45 °С, а температура агента сушки - 60 °С. Если исходная влажность этих семян 25 %, то допустимая температура соответственно 40 °С и 50 °С. Снижение температуры приводит к уменьшению испарения (съема влаги). Еще более сложно сушить крупносеменные бобовые. При их большой влажности (30 % и выше) сушку проводят при низкой температуре агента сушки (30 °С) и нагреве семян не выше 28...30 °С с незначительным съемом влаги за первый и второй пропуски.

Кроме того предельно допустимая температура нагрева зерна зависит от вида высушиваемой зерновой культуры и характера использования зерна (целевого назначения). Это связано в первую очередь с тем, что зерна и семена различных растений обладают неодинаковой термоустойчивостью. Одни из них при прочих равных условиях выдерживают более высокие температуры нагрева и более длительное время. Другие и при более низких температурах изменяют свое физическое состояние, технологические и физиологические свойства. Например, семена кормовых бобов и фасоли при повышенной температуре теряют упругость оболочек и растрескиваются. Зерно пшеницы, предназначенное для выработки хлебопекарной муки, можно нагревать до температуры 48...50 °С, а зерно ржи - до 60 °С. При нагреве пшеницы выше указанных пределов резко снижается количество клейковины, и ухудшается ее качество. Очень быстрый нагрев также отрицательно влияет на рис, кукурузу и многие зернобобовые: семена растрескиваются, что затрудняет их дальнейшую перера-

ботку, например, в крупу.

При сушке обязательно учитывают целевое назначение партий зерна. Предельная температура нагрева семенного зерна пшеницы - 38 °С, продовольственного - 50 °С. Еще больше разница температуры нагрева ржи: для посевного материала - 40 °С, для продовольственного (на муку) - 60 °С. Партии зерна и семян, в которых необходимо сохранить жизнеспособность, нагревают до более низкой температуры. Поэтому ячмень для пивоварения, рожь для солода и т. д. сушат в режимах для посевного материала.

Особенности конструкций зерносушилок разных типов определяют возможности их использования для сушки семян различных культур. Так, например, в барабанных сушилках не сушат бобовые, кукурузу и рис. Характер перемещения зерна в них и температура агента сушки (110...130 °С) таковы, что зерна и семена указанных культур растрескиваются и сильно травмируются.

Рассматривая вопросы тепловой сушки в зерносушилках, нужно помнить о неодинаковой влагоотдающей способности зерна и семян различных культур. Если влагоотдачу зерна пшеницы, овса, ячменя и семян подсолнечника принять за единицу, то с учетом применяемой температуры агента сушки и съема влаги за один пропуск через зерносушилку коэффициент K равен: для ржи 1,1; гречихи 1,25; проса 0,8; кукурузы 0,6; гороха, вики, чечевицы и риса 0,3...0,4; кормовых бобов, фасоли и люпина 0,1...0,2.

Вследствие определенной влагоотдающей способности зерна и семян почти все сушилки, применяемые в сельском хозяйстве, за один пропуск зерновой массы обеспечивают съем влаги только до 6 % при режимах для зерна продовольственного назначения и до 4...5 % для посевного материала. Поэтому зерновые массы с повышенной влажностью пропускают через сушилки два-три или даже четыре раза.

При выборе режима сушки зерна необходимо не только полностью сохранить, но и улучшить его качество. Кроме того, решают важную задачу - ускорение процесса сушки. Чем выше скорость сушки, тем меньше размеры зерносушилки, следовательно, ниже ее стоимость, а, в конечном итоге, и общие затраты на сушку.

Режим сушки, при котором обеспечивается высокое качество зерна и достигаются наилучшие технико-экономические показатели работы сушилки, называют оптимальным. Чем рациональнее конструкция сушилки, тем ближе режим, создаваемый в ней, к оптимальному.

Условно различают мягкий и жесткий режимы сушки. Первый характеризуется сравнительно невысокой температурой и скоростью агента сушки. При мягком режиме нагрев и сушка зерна протекают с относительно невысокой скоростью. Второй характеризуется повышенной температурой и скоростью агента сушки.

С экономической точки зрения процесс сушки желательно проводить при жестком режиме - в более короткий срок. Сократить время теплового воздействия на зерно лучше также и в технологическом отношении. Чем меньше находится зерно в нагретом состоянии, тем больше гарантия сохранения его ка-

чества.

Вместе с тем при жестком режиме сушки вследствие интенсивного нагрева и обезвоживания зерна возможно ухудшение его качества из-за деформации тканей и их микрорастрескивания. Особенно губительно сказывается скоростная сушка на крупяных бобовых культурах, а также на зерне семенного назначения. Однако и мягкий режим сушки сам по себе еще не гарантирует сохранение качества зерна. Если сушка продолжается слишком долго, например, в вентилируемых бункерах или в неподвижном слое, то зерно плесневеет [287...292].

При неблагоприятных условиях сушка может отрицательно повлиять на содержание питательных веществ в зерне. При перегреве зерна теряются витамины, происходят нежелательные изменения в белках, аминокислотах, углеводах и жирах.

Большое влияние на выбор режима сушки оказывают способ уборки и степень зрелости зерна. Свежеубранное зерно отличается от зерна, прошедшего отлежку в валках. В нем всегда содержатся зерна разной степени зрелости и разной влажности, которые обладают разной термоустойчивостью.

Влагопроводность оболочек свежубранного зерна, так же как эндосперма и зародыша, довольно низкая. При жестком режиме сушки оболочки могут быстро подсохнуть, при этом влагопроводность их еще более снижается. В пограничном слое эндосперма скапливаются водяные пары, выход которых затруднен. Возникает так называемое явление закала зерна, приводящее иногда к разрыву оболочек и эндосперма.

Большое влияние на термоустойчивость оказывает состояние белкового комплекса. Зерно с крепкой клейковиной выдерживает меньший нагрев, чем зерно со слабой клейковиной. Поэтому при выборе режима сушки необходимо учитывать исходное качество клейковины [254...265, 293...295].

При выборе режимов сушки необходимо также уделять внимание сохранению биологически активных веществ (липидов и веществ липидной природы), имеющих важное значение в оценке питательной ценности зерна. Поэтому рекомендуется сушить зерно пшеницы при мягких температурных режимах.

Следует учитывать также довольно прочную связь влаги с сухим веществом зерна. Повышение температуры и скорости агента сушки, как правило, не приводит к желаемым результатам: зерно быстро нагревается до предельно допустимой температуры, не успевая отдать требуемое количество влаги. Во избежание растрескивания зерен стремятся к наиболее равномерной сушке при минимальных перепадах влажности внутри зерна. Этого достигают при мягких режимах.

Качество высушиваемого зерна зависит от механизма переноса влаги. Идеальным можно считать такой режим сушки, при котором зона испарения находится около поверхности зерна. Влага в этом случае перемещается внутри зерна в виде жидкости, исключается перегрев поверхности, что гарантирует сохранение его качества. Соответствующим подбором параметров процесса сушки можно замедлить углубление зоны испарения внутрь зерна и тем самым создать условия для равномерной сушки.

Интенсивность сушки определяют в первую очередь скоростью подвода влаги изнутри зерна к его поверхности. Чем выше температура зерна, тем с большей скоростью перемещается внутри него влага. Для ускорения процесса сушки весьма эффективен предварительный нагрев зерна. Его проводят при повышенной относительной влажности воздуха, с тем, чтобы подводимая теплота расходовалась только на нагрев. Далее зерно высушивают при температуре, близкой к предельно допустимой, что обеспечивает высокую скорость его сушки.

Для шахтных сушилок с плотным, гравитационно движущимся слоем зерна температуру агента сушки принимают 70...160 °С (в зависимости от высушиваемой культуры). При превышении этих значений увеличивается неравномерность нагрева и сушки зерна и возможны его загорания в шахте [266...269, 296...311].

Скорость агента сушки в шахтных сушилках ограничена условиями уноса зерна из отводящих коробов. Обычно она равна 0,2...0,5 м/с, и при установившейся работе сушилки ее не изменяют. Постоянна также и относительная влажность агента сушки, поступающего в шахту. Поэтому, характеризуя режим сушки в шахтной сушилке, обычно указывают температуру агента сушки и предельно допустимую температуру зерна.

В нашей стране применяют режимы, при которых температуру агента сушки изменяют постепенно. Такие ступенчатые режимы особенно благоприятны при сушке свежееубранного зерна пшеницы, отличающегося пониженной термоустойчивостью, а также для риса-зерна, кукурузы и других культур.

Различают также режимы сушки с непрерывным и пульсирующим (импульсным) подводом теплоты, с постоянными и переменными параметрами. В шахтных сушилках обычно применяют режимы сушки с непрерывным подводом теплоты, с постоянными или переменными в процессе сушки параметрами. Для ускорения сушки в шахтных и камерных сушилках применяют режимы с импульсным подводом теплоты (так называемый осциллирующий способ сушки) в двух вариантах: с чередующейся подачей агента сушки и атмосферного воздуха в сушильную зону или с прерывистой подачей в нее только агента сушки. Перерывы в подаче агента сушки, или охлаждение зерна, способствуют выравниванию температуры и влажности внутри него. Периодичность подачи агента сушки в шахтных сушилках - 20...40 с в зависимости от влажности зерна. Поэтому температура агента сушки должна быть в пределах 180...200 °С.

В камерных сушилках при сушке семенной кукурузы в початках периодичность подачи агента сушки и атмосферного воздуха принимают соответственно 6 мин. и 2 мин. Температуру агента сушки повышают до 55...60 °С (вместо 40...45 °С). Производительность сушилки при этом возрастает на 30 %. Режимы сушки с чередованием циклов «нагрев - охлаждение зерна» применяют в сушилках с рециркуляцией зерна.

Большое значение для повышения эффективности сушки и сохранения качества зерна имеют так называемые изотермические режимы. Такие режимы получают все более широкое применение в современных рециркуляционных

сушилках.

Режимы в рециркуляционных сушилках типа «Целинная» и РД отличаются более высокой температурой агента сушки, подаваемого в камеру нагрева. Обычно ее поддерживают в пределах 220...350 °С в зависимости от просушиваемой культуры. Скорость восходящего потока агента сушки в камере нагрева выбирают из условий устойчивости ее работы и предотвращения выноса зерна. Обычно ее принимают на 10...15 % меньше скорости витания зерна, а при установившейся работе сушиллки ее не изменяют. Постоянна и относительная влажность агента сушки, поступающего в камеру нагрева. Поэтому, характеризуя режим сушки в рециркуляционной сушилке с нагревом зерна в падающем слое, указывают только температуру агента сушки и предельно допустимую температуру нагрева зерна, которую принимают с учетом его начальной влажности. В рециркуляционных сушилках с нагревом зерна в падающем слое и изотермическим режимом сушки в рециркуляционной шахте, кроме этого, указывают еще и температуру агента сушки, подаваемого в рециркуляционную шахту.

Режимы сушки крупяных культур отличаются значительно более низкими температурами агента сушки и нагрева зерна. Технологическая ценность крупяных культур характеризуется, прежде всего, выходом и качеством крупы. На эти показатели решающим образом влияет трещиноватость зерна. С увеличением количества трещин значительно снижается общий выход крупы высоких сортов и увеличивается выход дробленой крупы. Поэтому при выборе режима сушки за основу принимают условие минимального образования трещин. Растрескивание зерна может начаться при температуре, значительно более низкой, чем температура, при которой происходит необратимая тепловая денатурация белков.

В таблице 1.27 приведены режимы сушки зерна продовольственного и кормового назначения в прямоточных шахтных зерносушилках, указаны высшие пределы температуры агента сушки и нагрева зерна.

Таблица 1.27 – Предельная температура агента сушки и нагрева зерна в шахтных прямоточных зерносушилках [39, 40, 53]

Культура		Начальная влажность зерна, %	Пропуск через сушилки	Предельная температура нагрева зерна, °С	Предельная температура агента сушки, °С		
					при одноступенчатом режиме	при двухступенчатом режиме	
					первая	вторая	
1		2	3	4	5	6	7
Пшеница продовольственная	С крепкой клейковиной (до 45 ед. ИДК*)	менее 20	-	45	120	110	130
		более 20	Первый	40	90	80	100
			Второй	45	110	100	120
	С хорошей клейковиной (от 45 до 80 ед. ИДК)	менее 20	-	50	140	130	150
		более 20	Первый	45	110	100	120
			Второй	50	130	120	140
	Со слабой клейковиной (свыше 80 ед. ИДК)	менее 20	-	60	150	140	160
		более 20	Первый	55	120	110	130
			Второй	60	140	130	150

Продолжение таблицы 1.27

1	2	3	4	5	6	7	
Пшеница сильная, твёрдая и ценных сортов	менее 20	-	50	100	100	110	
	более 20	Первый	45	90	90	100	
		Второй	50	100	100	110	
Ячмень пивоваренный	менее 19	-	45	70	70	80	
	более 19	Первый	40	60	60	70	
		Второй	45	70	70	80	
Рожь продовольственная, ячмень продовольственный и кормовой	Независимо от начальной влажности	-	60	160	130	160	
Семена подсолнечника	менее 15	-	55	120	120	135	
	15...20	-	55	115	115	130	
	более 20	Первый	55	110	110	125	
		Второй	55	115	115	110	
Кукуруза	для крахмалопаточной промышленности	Независимо от начальной влажности	-	45	120	130	60
	для пищекоцентрационной промышленности	менее 19	-	35	60	60	50
		более 19	Первый	30	50	50	60
			Второй	35	60	60	
кормовая	Независимо от начальной влажности	-	50	150	130	160	
Овёс	Независимо от начальной влажности	-	50	140	130	160	
Просо	Независимо от начальной влажности	-	40	80	80	100	
Рис-зерно	Независимо от начальной влажности	-	35	70	70	60	
Гречиха	Независимо от начальной влажности	-	40	90	90	110	
Бобы (кроме гороха и сои)	менее 20	-	40	70	70	80	
	более 20	-	35	60	60	70	
Горох	менее 20	-	45	80	80	100	
	более 20	-	40	70	70	90	
Соя	менее 19	-	30	60	60	80	
	более 19	-	25	50	50	70	

* - для зерна пшеницы одним из важных показателей является качество клейковины. Данный показатель оценивают по упругим свойствам зерна. На практике для определения качества клейковины зерна пшеницы применяют серию приборов типа ИДК (измерители деформации клейковины) - ИДК - 1М; ИДК - 3М; ИДК - 4; ИДК - 5. Согласно полученным значениям прибора определяют группу и характеристику клейковины зерна (таблица).

Таблица - Показатели качества клейковины

Показания прибора ИДК, условные единицы	Группа клейковины	Характеристика клейковины
0...20	3	неудовлетворительная, крепкая
20...45	2	удовлетворительная, крепкая
45...80	1	хорошая
80...100	2	удовлетворительная, слабая
100 и более	3	неудовлетворительная, слабая

На хлебоприемных предприятиях, располагающих достаточной сушильной мощностью, рекомендуется при сушке зерна с высокой влажностью для сохранения его качества несколько смягчить режим сушки, снижая температуру агента сушки по зонам на 10...20 °С и температуру нагрева зерна - на 3...5 °С. При этом производительность сушилки снижается на 10...15 % по сравнению с паспортной.

При указанных в таблице 1.27 режимах сушки допускается снижение влажности зерна за один пропуск через сушилку не более чем на 6 % (за исключением риса-зерна). При поступлении зерна с высокой влажностью и необходимости её снижения более, чем на 6 %, зерно направляют в рециркуляционные сушилки. При их отсутствии зерно сушат в шахтных прямоточных сушилках не менее чем за два пропуска или в нескольких сушилках последовательно, снижая температуру агента сушки до 100...110 °С и предельную температуру нагрева зерна до 45...50 °С.

В таблице 1.28 приведены режимы сушки зерна продовольственного и кормового назначения в рециркуляционных сушилках. Так же как и в прямоточных шахтных сушилках, режимы сушки дифференцированы в зависимости от начальной влажности зерна, а для пшеницы - еще и в зависимости от исходного качества клейковины [24, 43, 54, 140].

Таблица 1.28– Предельная температура агента сушки и нагрева зерна в рециркуляционных сушилках с нагревом зерна в падающем слое

Культура		Начальная влажность зерна, %	Предельная температура нагрева зерна, °С	Предельная температура агента сушки в камере нагрева, °С
1		2	3	4
Пшеница продовольственная	С крепкой клейковиной (до 45 ед. ИДК)	менее 20	50	300
		более 20	45	250
	С хорошей клейковиной (от 45 до 80 ед. ИДК)	менее 20	60	350
		более 20	55	330
Со слабой клейковиной (свыше 80 ед. ИДК)	менее 20	65	370	
	более 20	60	350	
Пшеница сильная, твёрдая и ценных сортов		менее 20	55	330
		более 20	50	300
Ячмень пивоваренный		менее 19	60	350
		более 19	50	300
Рожь продовольственная		независимо от начальной влажности	45	280
Ячмень продовольственный и кормовой		менее 20	60	350
		более 20	55	330
Овёс		независимо от начальной влажности	55	330
Просо		менее 20	50	300
		20...25	45	250
		более 25	40	210
Гречиха		менее 20	60	350
		20...25	55	330
		более 25	50	320

Продолжение таблицы 1.28

1	2	3	4
Рис-зерно	менее 20	55	330
	20...25	45	280
	более 25	40	250
Семена подсолнечника	менее 15	55	250
	15...20	55	250
	более 20	55	220

Режимы сушки приведены для наиболее распространенных рециркуляционных сушилок типов «Целинная» и РД с нагревом зерна в падающем слое. В них предельная температура нагрева зерна более высокая, чем применяемая при сушке зерна в прямоточных шахтных сушилках. Это объясняется кратковременностью и большей равномерностью нагрева зерна в падающем слое [21].

В рециркуляционных сушилках с нагревом зерна в падающем слое, переведенных на изотермический режим сушки, температуру агента сушки, поступающего в рециркуляционную шахту, поддерживают в пределах 60...80 °С [148...150, 275...278].

В таблице 1.29 приведены режимы сушки для шахтных рециркуляционных сушилок, не имеющих специальных нагревателей зерна.

Таблица 1.29 – Температура агента сушки и нагрева зерна

в шахтных рециркуляционных сушилках [56]

Культура		Начальная влажность зерна, %	Предельная температура нагрева зерна, °С		Предельная температура нагрева зерна, °С
			первая зона	вторая зона	
1		2	3	4	5
Пшеница продовольственная	С крепкой клейковиной (до 45 ед. ИДК)	менее 20	110	130	45
		более 20	100	120	45
	С хорошей клейковиной (от 45 до 80 ед. ИДК)	менее 20	130	150	50
		более 20	120	140	50
Со слабой клейковиной (свыше 80 ед. ИДК)	менее 20	140	160	60	
	более 20	130	150	60	
Пшеница сильная, твёрдая и ценных сортов	менее 20	100	110	50	
	более 20	90	100	50	
Ячмень пивоваренный		менее 19	70	80	45
Рожь продовольственная, ячмень продовольственный и кормовой		Независимо от начальной влажности	130	160	60
Семена подсолнечника		менее 20	120	135	55
		более 20	110	125	55
Кукуруза	для крахмалопаточной промышленности	Независимо от начальной влажности	130	110	45
		менее 19	60	60	35
	для пищевого концентрата промышленности	более 19	50	50	30
кормовая		Независимо от начальной влажности	130	160	50
Овёс		Независимо от начальной влажности	130	160	50

Продолжение таблицы 1.29

1	2	3	4	5
Просо	Независимо от начальной влажности	80	100	40
Рис-зерно	Снижение влажности не более чем на 10 % за один пропуск	70	60	35
Гречиха	Независимо от начальной влажности	90	110	40
Горох	менее 20	80	100	45
	более 20	70	90	40
Соя	менее 19	60	80	30
	более 19	50	70	25
Другие бобовые	менее 20	70	80	40
	более 20	60	70	35

В сушилках, переведенных на рециркуляционно-изотермический режим сушки, температура агента сушки и нагрева зерна должна соответствовать значениям, указанным в таблице 1.30. В сушильную зону подают агент сушки с температурой не выше 100 °С, а при сушке пивоваренного ячменя - не выше предельно допустимой температуры нагрева зерна. В рециркуляционных сушилках с каскадным нагревателем температуры агента сушки на входе в нагреватель не должна превышать 200 °С.

В настоящее время полностью доказана целесообразность сушки семенного зерна, если влажность его в момент уборки выше, чем допускается для стойкого хранения. При правильно выбранных режимах сушки полностью сохраняются такие семенные свойства зерна, как энергия прорастания, всхожесть, жизнеспособность и сила роста.

Семена зерновых культур сушат в шахтных сушилках всех типов, за исключением ЗСПЖ-8. Не рекомендуется сушить семенное зерно в барабанных сушилках, но это можно делать в рециркуляционных. Кроме того, семена пшеницы, ячменя, гороха и подсолнечника сушат в камерных сушилках. Семенное зерно всех культур сушат также в складах на установках для активного вентилирования атмосферным или подогретым воздухом [44, 57, 151].

Шахтные зерносушилки, предназначенные для сушки семенного зерна, соответствующим образом подготавливают. Прежде всего, устраняют причины, влияющие на неравномерность движения зерна в шахте; принимают меры к снижению самосортирования зерна при загрузке его в надсушильный бункер; регулируют работу выпускного устройства. Перед началом работы сушилки проверяют внутреннее состояние шахты, плотность установки коробов, заделывают обнаруженные неплотности и щели. Шахту и транспортные механизмы очищают от сора, пыли и остатков зерна предыдущей партии. Нельзя использовать шнеки при работе с семенным зерном.

Для снижения самосортирования зерна надсушильный бункер загружают самотечными трубами, установленными под углом 45...60°. Выпускают зерно из шахты непрерывно, сочетая с периодическим дополнительным выпуском при полном открытии выпускного затвора. Это способствует разрушению за-

стойных зон. До направления на сушку семенное зерно очищают. Засоренность зерна, направляемого в шахтную сушилку, не должна превышать 1,5 % [25, 58].

При сушке семян пшеницы, ржи, ячменя, овса, подсолнечника, гречихи и проса влажностью до 19 % температура агента сушки должна быть не выше 70 °С, а предельно допустимая температура нагрева зерна - 40 °С. При сушке семян гороха, вики, чечевицы, фасоли, люпина и риса-зерна температура агента сушки должна быть не выше 60 °С, а предельно допустимая температура нагрева зерна - 35 °С [116, 117].

Снижение влажности всех семян за один пропуск не должно превышать 5...6 %, при сушке гороха и фасоли - 3...4 %, при сушке риса-зерна - 2...3 %.

Первую партию зерна сушат в режиме полной рециркуляции. Сушилку в этом случае заполняют сырым зерном и высушивают до конечной влажности. Процесс нагрева и сушки зерна в пусковом периоде протекает в более жестких условиях по сравнению с установившимся режимом, поэтому зерно надо нагревать на 3...5 °С ниже температуры, рекомендованной для установившегося режима.

Хотя мягкие режимы сушки способствуют ускорению послеуборочного дозревания зерна и, как следствие этого, повышению его всхожести, иногда отмечают случаи снижения всхожести просушенного зерна, определяемой сразу же после сушки. Снижение всхожести объясняется тем, что при сушке зерна повышенной влажности при умеренной температуре нагрева происходит частично обратимая денатурация белковых веществ зародышевой ткани. Со временем происходит ее восстановление, и всхожесть зерна повышается [59, 60, 61, 106, 107].

Из-за неравномерного созревания свежееубранное зерно содержит значительное количество недозревших зерен. Поэтому сразу же после уборки зерно нередко имеет низкие показатели по энергии прорастания и всхожести. После сушки такого зерна и хранения его в течение 15...30 дней всхожесть его повышается. Энергия прорастания и всхожесть семян, просушенных в рециркуляционных сушилках, при последующем хранении повышаются быстрее, чем у семян, просушенных в шахтных сушилках. Режимы сушки семенного зерна пшеницы приведены в таблице 1.30.

Таблица 1.30 – Режимы сушки зерна пшеницы

в рециркуляционных сушилках (семенной режим) [94]

Начальная влажность зерна (не более), %	Температура агента сушки, °С	Температура нагрева зерна, °С
20	300	40
26	250	39
30	220	38

При сушке семенного зерна в камерных сушилках следует учитывать, что аэродинамическое сопротивление слоя гороха, ячменя, пшеницы и семян подсолнечника значительно выше, чем кукурузы в початках. Поэтому высота насыпи семян не должна превышать 1,85 м (таблица 1.31).

Таблица 1.31 – Режимы сушки зерна в камерных зерносушилках (семенной режим) [151, 153]

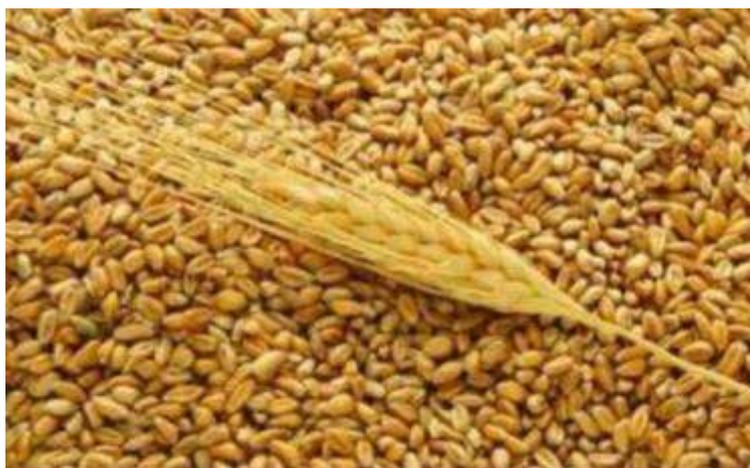
Культура	Исходная влажность семян, %	Температура агента сушки, °С	Высота насыпи, м	Экспозиция, ч
Пшеница и ячмень	16	53	0,8	3,5
	18	52	0,8	5,5
	20	49	0,8	8,0
	22	45	0,8	10,0
	24	42	0,8	13,0
	26	39	0,8	17,0
Горох	16	46	1,5...1,6	5...8,5
	18	43	1,45...1,55	10...14
	20	41	1,40...1,45	15...20
	22	38	1,30...1,40	19...25
	24	36	1,15...1,30	20...28
	26	33	1,00...1,25	24...30
Семена подсолнечника	9	60	0,75...0,85	3...3,5
	10	59	0,75...0,85	4...5
	12	56	0,75...0,80	7...8
	14	54	0,70...0,75	9,5...11
	16	51	0,65...0,70	12...13,5
	18	48	0,60...0,65	14...15,5
	20	45	0,55...0,60	15,5...16,5

При работе сушилки агент сушки пропускают через все камеры одновременно в одном направлении. Чтобы равномерно просушить всю насыпь по высоте, необходимо реверсивно продувать её агентом сушки. Общая продолжительность подачи агента сушки в одном и другом направлениях должна быть примерно одинаковой [156...158].

Правильно подобранные режимы сушки при эксплуатации той или иной зерносушилки позволяют обеспечить требуемое качество продукта при минимальных затратах энергии.

1.5.2 Особенности сушки зерна различных культур

Пшеница. Это важная продовольственная культура, распространенная почти на всей территории Российской Федерации. Влажность зерна при уборке нередко достигает 25...32 %. Пшеницу влажностью свыше 22 % сушат сразу же после поступления ее на хлебоприемное предприятие. Зерно влажностью ниже 22 % до сушки можно кратковременно разместить в складах или на площадках, оборудованных установками активного вентилирования.



При сушке пшеницы в прямоточных шахтных сушилках часто происходит снижение количества клейковины в просушенном зерне на 1...2 % и более. Это объясняется неравномерностью нагрева зерна по сечению шахты. При

сушке пшеницы происходят укрепление клейковины и повышение натуры зерна. Укрепление клейковины является результатом теплового уплотнения белков. Оно проявляется тем сильнее, чем больше влажность и выше температура нагрева зерна. В среднем клейковина укрепляется на 5...10 единиц прибора ИДК-1.

Натура зерна увеличивается вследствие изменения размеров зерен, их формы, а также состояния поверхности. Чем выше влажность сырого зерна, тем больше возрастает натура просушенного зерна. Она зависит также от способа сушки и конструкции сушилки. После рециркуляционных сушилок натура зерна увеличивается в большей степени, чем после прямоточных шахтных сушилок. В рециркуляционных сушилках из-за многократного циркулирования зерна происходит шлифовка его поверхности, поэтому возрастает плотность укладки зерен.

Пшеницу влажностью свыше 20 % в прямоточных шахтных сушилках сушат за два пропуска. После первого зерно направляют во вторую сушилку или в склад, оборудованный установками активного вентилирования.

Свежеубранную пшеницу повышенной влажности и с большим содержанием зеленых и недозревших зерен просушивают при более мягких режимах, снижая температуру агента сушки на 25...30 °С.

При сушке сильной и твердой пшеницы необходимо устанавливать контроль за соблюдением рекомендованных режимов сушки, чтобы полностью сохранить ее качество. Слабую пшеницу сушат при жестких режимах с повышенной температурой нагрева зерна.

При неблагоприятных погодных условиях выращивания, созревания и уборки на хлебоприемные предприятия поступает зерно пшеницы пониженного качества, с повышенным содержанием проросших, морозобойных, поврежденных клопом-черепашкой зерен. Проросшее зерно хранить значительно труднее, чем нормальное.

Для улучшения качества проросшего зерна его сушат при более высокой температуре, чем нормальное. Важно, однако, при этом не допустить ухудшения качества клейковины. Морозобойное зерно пшеницы неустойчиво в хранении, легко подвергается самосогреванию. Его сушат при режимах, рекомендуемых для пшеницы с крепкой клейковиной.

В зерне пшеницы, поврежденном клопом-черепашкой, снижается количество и ухудшается качество клейковины. Сильная пшеница, например, при повреждении клопом-черепашкой только на 3...4 % уже переходит в группу слабой. Качество клейковины зерна, поврежденного клопом-черепашкой, может быть улучшено в процессе сушки при нагреве зерна до 70 °С [31].

При сушке пшеницы применяют двухступенчатые режимы с повышающейся по ходу процесса температурой агента сушки. В первой зоне при пониженной температуре агента сушки зерно прогревается. Его удельная подача в первой зоне выше, чем во второй. Это предотвращает «запаривание» зерна. Повышение температуры агента сушки во второй зоне создает интенсивный прогрев зерна.

Рожь. Почти во всех районах производства свежееубранное зерно ржи нуждается в сушке. В сырую погоду часто на хлебоприемные предприятия поступает проросшее зерно. Рожь сушат в шахтных прямоочных и в рециркуляционных сушилках [246]. Скорость сушки у ржи меньше, чем у пшеницы, поскольку влага в зерне ржи более прочно связана с сухим веществом. Для предотвращения перегрева зерна применяют ступенчатый режим сушки с повышающейся температурой агента сушки.



Рис-зерно. Свежееубранный рис-зерно, как правило, имеет высокую влажность, что объясняется специфическими условиями его выращивания и сравнительно поздними сроками уборки. Для сушки риса-зерна используют те же сушилки, что и для большинства зерновых культур. По условиям сохранения качества риса-зерна снижение его влажности за один пропуск через сушилку не должно превышать 2,0...2,5 %.



Невыполнение этого требования приводит к резкому ухудшению качества зерна. При мягких режимах со снижением влажности до 2,5...3,0 % трещиноватость зерна удовлетворительная. При большем снижении влажности и непрерывной сушке зерно нагревается выше предельно допустимой температуры и качество риса резко снижается.

Для риса-зерна лучше использовать ступенчатый режим сушки с понижающейся температурой агента сушки [97].

Кукуруза. Свежееубранная кукуруза имеет, как правило, высокую (35...45 %) влажность. Даже при полной спелости початка влажность зерна может достигать 25...30 % [19]. В пределах одного початка влажность отдельных зерновок колеблется в широких пределах. Плотные и гладкие оболочки зерна кукурузы затрудняют подвод влаги к его поверхности и при интенсивной сушке лопаются. В эндосперме зерна также образуются макро- и микротрещины, которые появляются



при влажности 14...19 %. С повышением скорости сушки снижается натура зерен, что свидетельствует об образовании внутри них пустот. Быстрое охлаждение высушенного зерна также способствует образованию трещин.

Для снижения образования трещин за рубежом практикуют метод сушки, известный под названием «драй-эрейшн». Суть его состоит в том, что процесс тепловой сушки прерывают при влажности зерна на 2 % большей, чем требуемая конечная влажность.



Нагретое зерно кукурузы выпускают из сушилки и направляют в бункер, где его выдерживают в течение 4...8 ч, а затем медленно охлаждают и досушивают при активном вентилировании атмосферным воздухом.

При обмолоте початков часть зерен травмируется. Это обстоятельство также необходимо учитывать при сушке. Особое внимание уделяют сушке зерна кукурузы, для крахмалопаточной промышленности. Поэтому сушку проводят при мягких режимах и нагреве зерна не выше 43 °С.

При поступлении кукурузы в початках продовольственного и кормового назначения ее обмолачивают и затем сушат зерно, либо высушивают початки и затем их обмолачивают. Для этого используют шахтные прямоточные зерносушилки или такие же сушилки, но переведенные на рециркуляционный метод сушки. При сушке в прямоточных сушилках применяют 2...3 - кратный пропуск зерна. В рециркуляционных сушилках высушивают сырое зерно кукурузы за один пропуск.

На перерабатывающих предприятиях в сушильную камеру загружают партию кукурузы одного гибрида или сорта с влажностью в пределах одной партии 15 %. При загрузке камер нужно, чтобы початки не падали на днище или на поверхность насыпи. Для этого используют гибкие рукава или направляющие лотки. Все места, где происходят удары початков при транспортировании, обшивают прорезиненной лентой или резиной. Обрушенные зерна удаляют из массы початков до загрузки камеры. Наличие таких зерен затягивает процесс сушки и нарушает его равномерность, приводит к перерасходу топлива и электроэнергии, снижает производительность сушилки. Обрушенные зерна выделяют на решетчатых горках, установленных перед поступлением початков на транспортер, подающий их в камеры.

Насыпь початков в камере разравнивают так, чтобы поверхность ее была параллельна днищу. При полной загрузке камеры высота насыпи початков влажностью до 20 % достигает 3,5 м. Кукурузу с большей влажностью загружают слоем меньшей толщины, при повышении начальной влажности зерна на 1 % высоту насыпи при загрузке камеры снижают на 0,2...0,3 м. При поступлении на сушку партий кукурузы различной влажности, требующих разной про-

должительности сушки, соответствующим образом регулируют режим работы каждой камеры в зависимости от исходной влажности зерна.

Насыпь початков просушивается равномерно при реверсивном продувании. Свежий агент сушки пропускают сверху вниз через те камеры, в которых сушка близится к завершению, а отработавший агент сушки пропускают снизу вверх через остальные камеры. Продолжительность сушки при продувании камер снизу вверх и сверху вниз принимают одинаковой (таблица 1.32), а влажность семенной кукурузы снижают до 13 %.

Таблица 1.32 – Режимы сушки семенной кукурузы в камерных сушилках

Влажность зерна в початках, %	Высота насыпи, м	Температура агента сушки, °С	Экспозиция, ч
20	3,5...4,0	50	27...29
25	3,5	47	39
30	3,5	43	56
35	3,0	40	72
40	2,5	36	90
45 и более	2,0	35	95 и более

Влажность зерна определяют по истечении половины продолжительности сушки. Одновременно изменяют направление продувания насыпи.

Подсолнечник. При сушке семян подсолнечника температуру агента сушки ограничивают из-за противопожарных требований. При повышении температуры агента подсолнечник может загореться, хотя термоустойчивость семян подсолнечника характеризуется более высокой температурой по сравнению с основными зерновыми культурами (пшеница, рожь) [123, 124].



Свежеубранные семена подсолнечника отличаются очень низкой стойкостью при хранении, особенно при высокой влажности, температуре и засоренности. При хранении семян химическим изменениям сначала подвергаются жиры, а затем белковые вещества.

Семена подсолнечника влажностью выше 12 % необходимо сушить немедленно. Семена подсолнечника, идущие на переработку, сушат до влажности 7...8 %, а предназначенные для длительного хранения – до 6...7 % [98].

Режимы сушки семян подсолнечника зависят от их начальной влажности и способа сушки. Высшие предельные значения температуры поверхности нагрева, сушильного агента и нагрева семян подсолнечника при различных способах сушки в шахтных прямоточных и рециркуляционных сушилках приведены в таблицах 1.25; 1.26; 1.27 и 1.29.

Поскольку семена подсолнечника можно сушить в сушилках различных типов, рассмотрим кратко их особенности.

В шахтных зерносушилках сушат до 90 % заготавливаемых семян под-

солнечника. Высоковлажные семена в них подвергают двух-, а иногда и трехкратной сушке, но при этом нарушается поточность обработки, что значительно затрудняет работу с вновь поступающими семенами. Из-за неравномерности движения семян по сечению шахт при их продувке агентом сушки наблюдается большая неравномерность нагрева семян: у стенок шахт они движутся медленнее, чем в середине, при этом неравномерность нагрева иногда превышает 10 °С. Если же семена содержат примеси, то возможно засорение шахт и нередко загорание сушилки. Поэтому сушку семян подсолнечника без их предварительной очистки не допускают.

Рециркуляционные зерносушилки по сравнению с прямоточными обеспечивают возможность одновременной сушки семян различной влажности за один пропуск и имеют более высокие технико-экономические показатели.

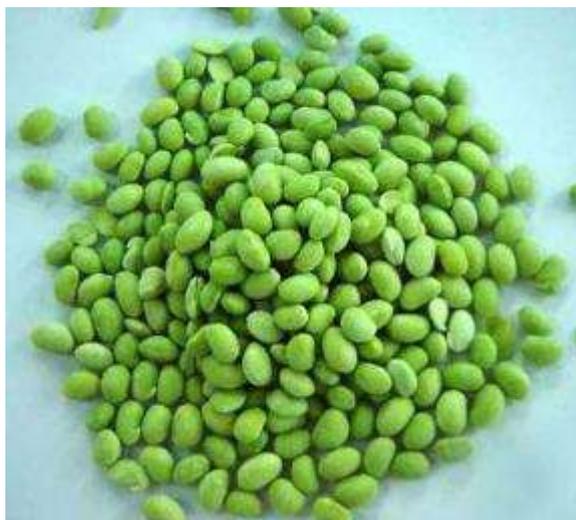
Высокотемпературная сушка семян подсолнечника в рециркуляционных зерносушилках благотворно сказывается на показателях качества масла. Так, по данным [98], при нагреве семян в сушилке до 60...70 °С происходит снижение кислотного числа, а при более низких температурах нагрева (до 50 °С) - некоторое увеличение кислотного числа масла. Однако, при более высоких температурах нагрева семян происходит увеличение их травмируемости из-за пересушивания плодовой оболочки. Семена подсолнечника с нарушенной плодовой оболочкой плохо хранятся и быстро портятся.

Для сушки семян подсолнечника можно применять барабанные зерносушилки. В барабанной сушилке сушка протекает быстрее, чем в шахтной, но коэффициент заполнения объема барабана семенами составляет 20...25 %, в связи с чем количество влаги, испаряемой в 1 м³ пространства барабана, меньше, чем в шахтной зерносушилке.

Жесткие режимы сушки, различное время пребывания семян подсолнечника в барабанных сушилках вызывают неравномерный нагрев и сушку, увеличение лузги и кислотного числа жира, повышенный расход топлива [99, 100].

Кроме того недостатками применения барабанных сушилок являются обрушивание семян и низкая производительность.

Соя. В основных районах производства сои ее убирают поздней осенью. Влажность свежесобранных семян нередко достигает 20...25 %, тогда как надежно хранить их можно только при влажности 12...13 %. Особенности семян сои как объекта сушки - низкая термоустойчивость и подверженность трещинообразованию. При сушке сои продовольственного и кормового назначения в непрерывно действующих шахтных сушилках температуру агента сушки поддерживают в пределах 60...80 °С, а семена нагревают до температуры 30 °С при влажности сои до 19 %. При влажности сои более 19 %



температура агента сушки должна быть 50...70 °С, а нагрева зерна - 25 °С.

Клещевина. Особенность сушки клещевины в том, что она ядовита. Поэтому ее сушат в отдельных сушилках. Влажность свежесобранных семян клещевины часто бывает 20...25 %, а ее хранение возможно при влажности 7,0...7,5 %.

В большинстве случаев клещевину высушивают в насыпи с помощью установок активного вентилирования. Для равномерного высушивания воздухораспределительные решетки в складах располагают сплошным настилом или с промежутками не более 500 мм, а высота насыпи должна быть 0,4...0,8 м в зависимости от влажности клещевины. Температура агента сушки - 45...50 °С. При влажности клещевины до 15 % удельная подача агента сушки должна составлять 300 м³/(ч·т), при влажности до 20 % - 600 м³/(ч·т), а при влажности до 25 % - 900 м³/(ч·т).



Клещевину сушат немедленно по заполнении каждой секции клада. При неполной загрузке склада вентилируемый участок ограждают щитами. Температуру агента сушки проверяют постоянно, а температуру в различных участках насыпи - через 5...6 ч. Сушку заканчивают, когда влажность клещевины в верхнем слое насыпи для плодов достигнет 9...11 %, а для семян - 8...9 %. После сушки клещевину охлаждают атмосферным воздухом.

Мелкосеменные культуры. Сушка горчицы, рыжика, рапса, семян трав (клевер, люцерна) имеет свои особенности по сравнению сушкой семян других зерновых культур из-за их различных физико-механических свойств (таблица 1.33). Размеры таких культур значительно меньше, скорость витания ниже, а аэродинамическое сопротивление выше. По характеру протекания процесса сушки мелкосеменные культуры близки между собой, и их можно сушить при одном и том же режиме.

Таблица 1.33 – Режимы сушки семян рапса в шахтных и барабанных зерносушилках [285, 286]

Исходная влажность семян, %	Предельная температура нагрева, °С		Исходная влажность семян, %	Предельная температура нагрева, °С	
	агента сушки	семян		агента сушки	семян
Продовольственный режим			Семенной режим (только для шахтных сушилок)		
До 10	85	60	До 17	65	40
15	83	56	19	60	37
20	80	52	Свыше 19	55	35
25	78	50			
Свыше 25	75	48			

Из-за небольшого размера этих семян и их повышенной текучести сушилки особенно тщательно проверяют на отсутствие щелей в местах установки

коробов и других стыков. Зазоры выпускного устройства уменьшают, они не должны превышать 3..5 мм. Уменьшают подачу агента сушки и атмосферного воздуха в сушильную и охладительные шахты. Влажность семян после сушки и охлаждения не должна превышать 8 %.

Зернобобовые культуры весьма специфичны как объект сушки. В них более высокое содержание белка, чем в злаках, так как белки связывают влагу более прочно, чем крахмал. Скорость сушки бобовых культур ниже, чем злаковых.

Семена большинства зернобобовых культур крупнее, чем у злаковых, следовательно, удельная поверхность их меньше. Это также предопределяет меньшую скорость испарения влаги. Все зернобобовые культуры склонны к растрескиванию. Поэтому приходится применять мягкие режимы сушки, с тем, чтобы обеспечить медленное испарение влаги из семян.



Белки зернобобовых культур очень чувствительны к нагреву; предельно допустимая температура нагрева большинства зернобобовых (продовольственный режим) не превышает 50 °С. Однако из-за образования трещин эту температуру принимают 35...40 °С.

Сушка зернобобовых культур нередко продолжается несколько часов. Поэтому перед направлением в шахтную сушилку зерновую массу очищают от сорных примесей. Наличие сора может создать застойные зоны, вызвать пересушку семян и даже их загорание. Зернобобовые культуры сушат в шахтных зерносушилках небольшой производительности: СЗШ-8, ВТИ-8, СЗС-8 и др.

Семена гороха, вики, чечевицы и фасоли сушат за один или несколько пропусков. Снижение влажности зерна за один пропуск через сушилку не должно превышать 3...4 %. При первом пропуске через сушилку семена нагревают до температуры 25...30 °С. После снижения влажности до 18...20 % температуру нагрева семян повышают до 35...40 °С. После каждого пропуска делают 5...6 - часовой перерыв для перераспределения влаги внутри семян.

Тщательно следят за температурой агента сушки и семян, а также за подачей агента сушки, особенно в начальный период. Она должна быть достаточной, чтобы предотвратить запаривание семян. Одновременно проверяют, чтобы при чрезмерной подаче агента сушки не происходило выноса семян из отводящих коробов сушилки.

При сушке наблюдают за состоянием поверхности семян. Даже при нагреве бобовых до 30...35 °С происходит сморщивание или растрескивание

оболочек семян. При обнаружении таких семян снижают температуру агента сушки или ускоряют пропуск семян через сушилку, что уменьшает время пребывания их в шахте, а следовательно, и нагрев.

Семена гороха, кормовых бобов и чечевицы просушивают до 14 % в южных районах страны и до 15,5 % - в других районах. Если фасоль предназначена на продовольственные цели, то во избежание растрескивания её сушат до влажности 16...17 %. Фасоль, предназначенную для длительного хранения, просушивают до влажности 13...14 %. Наиболее целесообразный способ сушки фасоли - активное вентилирование.

Сорго. У зернового сорго крупное и крахмалистое зерно, по химическому составу оно близко к зерну кукурузы. Зерновое сорго, как правило, убирают



прямым комбайнированием при влажности семян 20...22 %. В отдельные годы влажность семян достигает 25 %. Сорго сушат до влажности 12... 13 % в вентилируемых бункерах, в шахтных сушилках и в насыпи на установках активного вентилирования.

При сушке в бункерах обычно используют атмосферный воздух. При повышенной влажности его подогревают, с тем чтобы относительная влажность составляла 60...70 %. Для сокращения продолжительности сушки используют воздух, нагретый до 30...42 °С.

При сушке сорго влажностью выше 20 % в начальный период во избежание слеживания необходимо перемещать зерно по замкнутому циклу. Перед загрузкой в бункер семена должны быть очищены. Не рекомендуется загружать в бункера семена влажностью более 22 %. Если же других средств сушки нет, то следует загружать бункер на 1/2 или на 2/3 его высоты. В шахтной сушилке сорго сушат при температуре агента сушки 65...70 °С, предельно допустимая температура семян не должна превышать 45 °С. При влажности сорго свыше 19 % следует применять два или три пропуска через сушилку.

Овёс. Зерновая масса овса отличается значительной сквашиваемостью, достигающей 45...50 %. Оболочка и ядро овса имеют более рыхлое строение, чем у других колосовых культур. Поэтому скорость сушки овса значительно выше. Однако цветковые оболочки овса, быстро подсыхая, легко отделяются от ядра. Скапливаясь в шахте сушилки и перегреваясь, они могут быть причиной загорания зерна. Поэтому при сушке овса в шахтных зерносушилках



необходимо обеспечить равномерность и своевременность выпуска зерна.

Гречиху сушат в шахтных прямоточных и рециркуляционных сушилках. Однако под воздействием высокой температуры происходит быстрое подсушивание оболочек и шелушение зёрен. При этом ядро становится хрупким, что приводит к его дроблению. Поэтому в шахтных зерносушилках температуру агента сушки поддерживают в пределах 90...110 °С, при нагреве зерна до 40 °С. Натура и плотность зерна гречихи меньше, чем у других злаковых культур, что следует учитывать при выборе скорости движения агента сушки с целью предотвращения уноса зерна из отводящих коробов сушилки.



Ячмень пивоваренный. Один из главных показателей качества пивоваренного ячменя – способность прорастания, что в конечном итоге характеризует пригодность ячменя для соложения. В связи с этим сушку пивоваренного ячменя осуществляют на режимах сушки семенного зерна.



В основном для сушки пивоваренного ячменя применяют шахтные прямоточные зерносушилки. Температуру агента сушки поддерживают в пределах 60...80 °С, зерно при этом нагревается до 40 °С.

Таким образом, зерно каждой культуры различно по строению и особенностям сушки. Зная эти особенности можно реализовывать процесс сушки без снижения требуемых свойств зерна.

1.6 Исторические этапы развития теории сушки зерна и конструкций зерносушилок

Уровень развития техники зерносушения на всех этапах ее истории определялся общим состоянием производительных сил и социально-экономическими условиями. С расширением зернового производства и появлением молотилок от сушки в снопах стали постепенно переходить к сушке зернового слоя на подовых сушилках. В это время создают сушилки с принудительным продуванием зернового слоя нагретым воздухом. В начале XIX века в России уже были созданы зерносушилки с подвижным слоем зерна. Хотя в дореволюционной России появлялись отдельные оригинальные конструкции сушилок, а метод сушки смесью топочных газов с воздухом был применен еще в 1832 г., в целом техника зерносушения не получила должного развития. К 1917 г. общая мощность зерносушилок в России едва достигала 700 т/сутки.

Техническая база была ничтожно мала, а технология сушки весьма примитивна [63, 283].

Первая зерносушилка, описание которой можно встретить в литературе, была устроена во Франции в 1750 годах Дюгамелем-дю-Монсо по модели, привезённой ему из Италии, где такая сушилка была в то время в употреблении в некоторых провинциях.

В России сушку зерна использовали с давних времен. В крестьянских хозяйствах зерно сушили в снопах, сложенных в овины (рисунок 1.50). Под овинном размещали яму для костра. Дым от костра поступал в овин, подсушивал снопы. Несмотря на большие недостатки, овинный способ применяли на всей территории царской России, что объясняется низким уровнем техники того времени. В условиях нищенских крестьянских хозяйств это был единственный способ по спасению зерна.

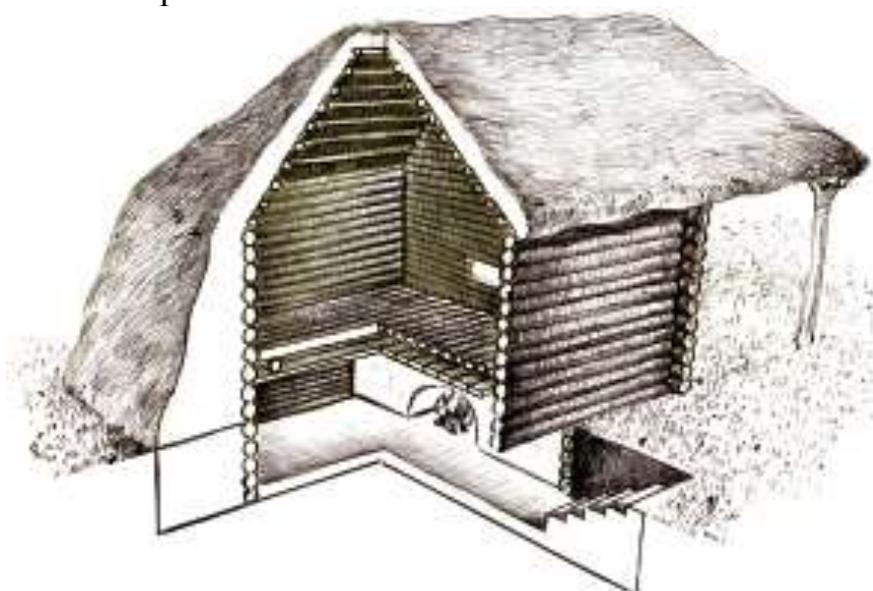


Рисунок 1.50 – Овин для сушки зерна

С изобретением молотилок возникла проблема сушки обмолоченного зерна. В это время стали появляться подовые зерносушилки. Подовая зерносушилка состояла из длинной поверхности с горизонтально размещенными дымоходами с одной или двумя печами. Дым нагревал поверхность (под), на который помещали зерно. Этот способ также крайне несовершенен. На одном квадратном метре пода можно было просушить 0,5 т зерна в сутки при съеме 3 % влаги.

Более совершенными были ситовые зерносушилки, или стеллажные, появившиеся после подовых. В них сырое зерно размещали на стальных листах с отверстиями и пускали через него горячий воздух. Их производительность составляла 0,5...0,7 тонн в сутки при снижении влажности на 3 %.

В начале XIX века в России появились механизированные зерносушилки.

В 1832 году была построена зерносушилка Майера с принудительной подачей горячего воздуха через слой зерна при помощи мехов. Впервые были даны рекомендации по применению для сушки зерна смеси топочных газов с воздухом, что значительно повлияло на экономию топлива.

Майер не только поднял вопрос о сушке зерна, но он и более, чем кто-либо другой, способствовал практической его разработке в России. Затем в 1848 г. он устроил другую, ситовую сушилку с вентилятором.

С этого времени зерносушением заинтересовались сельскохозяйственные общества. В 1844 г. Вольно-экономическое общество назначило конкурс на лучший и наиболее дешёвый способ сушки хлеба. В 1850 г. было устроено уже несколько зерносушилок различных систем. Однако вопрос о том, какие условия должна соединять в себе зерносушилка, оставался нерешённым. Для разъяснения его в 1866 г. при Московском обществе сельского хозяйства был организован комитет по устройству овинов и зерносушилок с целью способствовать их усовершенствованию.

В 1854 году Бахтеяров предложил мешковую зерносушилку. Зерно засыпали в мешки с простеганными на расстоянии двух вершков один от другого швами. Заполненные зерном мешки подвешивали к потолку на сутки. Однако такая сушка не получила широкого распространения, так как требовала большого количества мешков, которые быстро выходили из строя.

В восточных районах России была распространена зерносушилка, созданная Симбирским изобретателем Растригиным Н.П. (рисунок 1.51). Она работала следующим образом. Дым из печи 1 по трубе 2 поступал в зерносушилку куполообразной формы. Зерно для сушки засыпали через воронку 3 на решето 4. В воронке была поставлена крыльчатка для подачи зерна в сушилку (на схеме не показана). Внутри сушилки проходил вертикальный вал 5, приводимый в движение коническими шестернями, который вращал горизонтальный вал 6 для перемешивания зерна и подачи его к центру зерносушилки, где был размещен рукав, по которому высушенное зерно поступало наружу. Дым удалялся через трубу 7.

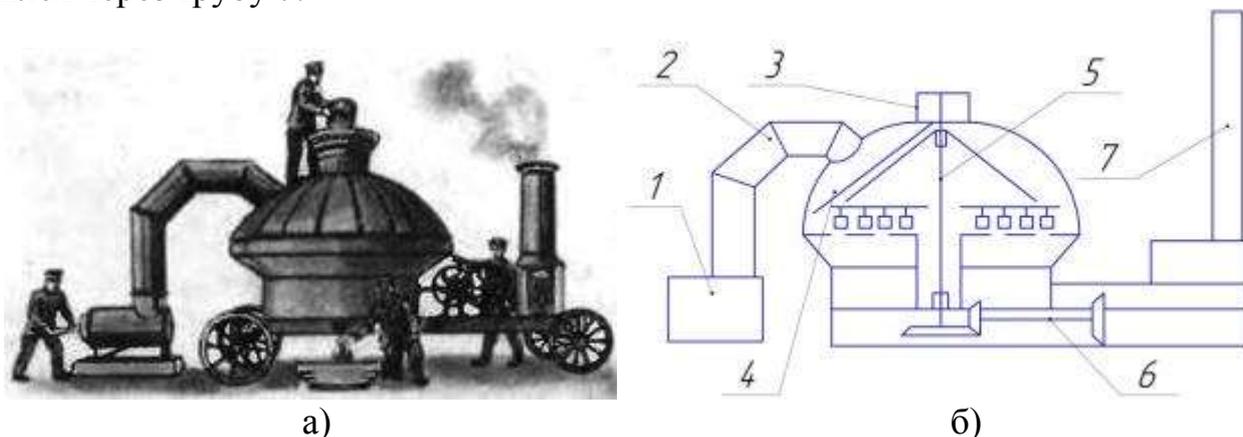


Рисунок 1.51 - Зерносушилка Растригина (обозначения в тексте):

а – общий вид; б – технологическая схема

Зерносушилку оригинальной конструкции в 1858 году предложил Мясоедов. Зерно в ней сушилось в вертикальном канале, образованном двумя жалюзийными решетками, при этом одна решетка могла отодвигаться или приближаться к другой. Когда решетки сближены, то нижний промежуток перекрывался жалюзийными пластинками, и зерно в канале оставалось неподвижным; открывая же этот промежуток, можно было достичь перемещения зерна тонким

слоем с одной жалюзийной пластинки на другую периодически или непрерывно. Принцип Мясоедова был изменен Бергом и Дютилем в 1894 году и позднее использован в американских сушилках Хесса. Они вытеснили другие конструкции и в больших количествах устанавливались на элеваторах.

Зарождение и плановое развитие промышленного зерносушильного хозяйства началось после окончания гражданской войны в 1924...1925 годах XX-го века, когда были построены первые сушилки «Успех» и «Рандольф» производительностью 3...6 т/ч.

Коллективизация сельского хозяйства вызвала значительное увеличение производства, заготовок и темпов поступления зерна на хлебоприемные пункты. Потребовались более мощные зерносушилки, способные высушивать зерно в потоке. С 1930 г. начали строить сушилки ВТИ (Всесоюзного теплотехнического института) производительностью 4, 8 и 15 т/ч, а с 1932 г. - сушилки ВИСХОМ (Всесоюзного института сельскохозяйственного машиностроения) производительностью 1... 1,2 т/ч. В период с 1924 по 1941 г. в стране было построено более 1000 новых зерносушилок с общей мощностью, превышающей 100000 т/сутки.

Сушка становится наиболее важным звеном в цепи мероприятий, обеспечивающих не только сохранность зерна, но и улучшение его качества при хранении, а также при переработке на мельницах и крупозаводах. Углубляется подход к зерну как объекту сушки.

Уже в начале 30-х годов XX века, когда при элеваторах начали строить первые высокопроизводительные по тому времени зерносушилки ВТИ, потребовалась разработка для них научно обоснованных режимов сушки. Применявшиеся до этого рекомендации по сушке зерна носили случайный характер и были основаны главным образом на ограниченном опыте отдельных специалистов.

На основе результатов научных исследований и опыта эксплуатации сушилок в 1936 г. впервые были разработаны режимы сушки зерна разных культур, и издана первая инструкция по сушке зерна.

В годы Великой Отечественной войны зерносушильному хозяйству страны был нанесен значительный урон. Потребовались огромные усилия по восстановлению разрушенных и строительству новых зерносушилок. В послевоенный период получили широкое распространение передвижные зерносушилки «Кузбасс» производительностью 1,5 т/ч. Широко внедрялись также стационарные зерносушилки ВИСХОМ производительностью 2 т/ч и 8 т/ч.

В послевоенные годы ведущую роль по проектированию зерносушилок для хлебоприемных предприятий и элеваторов занял ГИ ПЗП (Государственный институт Промзернопроект). В 1949 г. в нём была разработана зерносушилка ЗСЗ-8 производительностью 8 т/ч, встраиваемая в силосный корпус элеватора. Развивая работы в области зерносушения, ГИ ПЗП к 1953 г. спроектировал стационарные железобетонные сушилки ДСП-12 и ДСП-24 производительностью соответственно 12 т/ч и 24 т/ч.

Освоение целинных и залежных земель, потребовали резкого увеличения

мощности зерносушильного парка и создания новых высокопроизводительных агрегатов, способных высушивать зерно повышенной влажности.

В 1955 г. ГИ ПЗП разработал конструкцию зерносушилки ДСП-24СН производительностью 20 т/ч для установки ее в сушильно-очистительных башнях (СОБ), которые в большом количестве строили в районах освоения целинных земель.

В 1956 г. ВНИИЗ и ЦНИИпродмаш (Центральный научно-исследовательский институт продовольственного машиностроения) разработали передвижную зерносушилку ЗСП-8 производительностью 8 т/ч, которой после перевода на жидкое топливо была присвоена марка ЗСПЖ-8.

В 1957 г. ГИ ПЗП создал проект железобетонной зерносушилки ДСП-32 для групповой установки при крупных заготовительных элеваторах и в СОБ. Позднее была разработана металлическая сушилка ДСП-32 ОТ для установки вне здания. С 1960 г. топки зерносушилок начали переводить на сжигание жидкого и газообразного топлива, что значительно облегчило условия эксплуатации зерносушилок, позволило автоматизировать сжигание топлива, стабилизировать температурный режим и повысить качество сушки.

С начала 60-х годов XX века при активном участии Института тепло- и массообмена АН БССР им. А.В. Лыкова развернулись научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы по созданию новых типов зерносушилок. Внимание специалистов было сосредоточено на изыскании и разработке интенсифицированных способов сушки зерна с переходом от традиционной сушки в плотном малоподвижном слое к комбинированным способам тепловой обработки зерна в разрыхленном, псевдоожиженном слое и во взвешенном состоянии. Важнейшим этапом на этом пути явилось создание и внедрение рециркуляционных зерносушилок, в основу работы которых положена цикличность сушки.

Большая технологическая и экономическая эффективность внедрения рециркуляционных сушилок обусловлена тем, что они позволяют непрерывно и с высокой производительностью высушивать сырое зерно с любой начальной влажностью до сухого состояния, освобождают от необходимости подбора и формирования партий зерна по влажности, обеспечивают лучшее качество зерна, существенно сокращают затраты на сушку.

Рециркуляционный метод сушки широко внедрялся как путем реконструкции устаревших шахтных сушилок типа ВТИ, ВИСХОМ и ДСП, так и путем строительства современных сушилок. Для нового строительства ЦНИИПЗП в 1965 г. разработал рециркуляционную зерносушилку РД-2Х25, которая была модернизирована в 1970 г. Эти зерносушилки входили в комплекс элеваторов.

В сельском хозяйстве нашла широкое применение зерносушилка СЗШ-16, выпуск которой начался в 70-х годах XX века.

В 90-х годах XX века появилась зерносушилка А1-ДСП-50 шахтного типа с рециркуляцией зерна производительностью 50 т/ч.

Принципиально новым направлением в зерносушении явилось создание рециркуляционных зерносушилок типа «Целинная». Начиная с 60-х годов, они

стали незаменимыми при сушке высоковлажного зерна. Первая зерносушилка «Целинная-50» была создана в 1959 году путем реконструкции зерносушилки ДСП-24. В 60-х годах была внедрена зерносушилка «Целинная-20» на базе двух передвижных агрегатов ЗСПЖ-8, начат выпуск зерносушилки «Целинная-30», а в 70-х годах - РД-2х25-70. В 80-х годах была создана зерносушилка «Целинная-100».

В 80-х годах появилась серия рециркуляционных шахтных зерносушилок А1-УЗМ, А1-ДСП-50, А1-УСШ, отличительной особенностью которых является отсутствие камеры нагрева.

В настоящее время производят множество зерносушилок различных по конструкции и производительности, как отечественного, так и зарубежного производства. Практически все зерносушилки обладают высокой степенью автоматизации процесса, что полностью исключает появление некачественного продукта сушки.

Решению проблем, возникающих в процессе сушки, большое внимание уделено в фундаментальных исследованиях и разработках Н.П. Булыгина, А.В. Лыкова, А.П. Ворошилова, М.Ю. Лурье, Н.М. Михайлова, А.С. Гинзбурга, И.М. Фёдорова, В.В. Красникова, Д.М. Левина, П.Д. Лебедева, И.Л. Любошица, Н.И. Денисова, Б.В. Даммана, В.И. Жидко, В.Л. Кретовича, Н.П. Козьминой, Л.Н. Любарского, И.И. Ленарского, Е.Д. Казакова, Н.И. Соседова, С.Д. Птицына, Л.А. Трисвятского, Г.А. Егорова, В.А. Резчикова, А.П. Гержоя, В.И. Атаназевича, А.П. Журавлёва, А.Е. Баума, В. Мальтри, Г.К. Филоненко, В.И. Анискина, В.Ф. Самочётова, С.П. Рудобашты, Н.И. Малина, В.Ф. Некрашевича, В.И. Курдюмова и многих других учёных. Ими рассматривались теоретические особенности процесса сушки, вопросы совершенствования, как технологии сушки, так и средств ее механизации. Тем не менее, несмотря на большое число выполненных работ, в теории и практике тепловой обработки зерна есть не разрешенные полностью актуальные вопросы и задачи.

Начало развития теории сушки относится к 1900...1911 годам и характеризуется созданием основ гидродинамики и термодинамики влажного газа.

Одна из первых номограмм статического расчета процесса сушки ($I-d$ - диаграмма) впервые была предложена Л.К. Рамзиным в 1918 г. В 1923 г. аналогичная диаграмма была опубликована в Германии Р. Молие. В дальнейшем $I-d$ - диаграмма Рамзина была расширена и дополнена в сушильной лаборатории Всесоюзного теплотехнического института им. Ф.Э. Держинского М.Ю. Лурье и др. Д.М. Левин уточнил построение линий $t_m = \text{const}$ и предложил применять $I-d$ - диаграмму для любого барометрического давления. Значительные исследования в области развития $I-d$ - диаграммы проведены И.В. Кречетовым, В. Хойслером, Я. Салиным и др.

Метод сушки топочными газами совершенствовался, благодаря исследованиям А.П. Ворошилова, М.Ю. Лурье, Н.М. Михайлова.

Дальнейшее развитие теории сушки относится к периоду проведения исследований по кинематике и динамике сушки. Большой вклад в развитие теории сушки внес академик А.В. Лыков, который в 1934 году открыл и научно

обосновал перенос влаги под влиянием термовлагопроводности. Большим вкладом в развитие теории сушки стало создание научных основ технологии сушки. Здесь следует отметить работы П.А. Ребиндера, С.М. Липатова, А.В. Думанского.

В первой половине 70-х годов XX-го века начался новый этап развития теории сушки. Он характеризуется исследованиями в области воздействия на зерно комплексных методов - консервации влажного зерна с применением нейтральных газов, холода и последующей сушки.

По своей природе зерно является коллоидным, а по структуре - капиллярно-пористым телом со сложным химическим составом. Общие закономерности распределения воды в таком материале разработаны С.М. Липатовым, Г.А. Ребиндером, А.В. Лыковым, Ю.А. Кавказовым. Учение о формах связи влаги в зерне, о процессах внутреннего влагопереноса расширено трудами А.С. Гинзбурга, Е.Д. Казакова, Г.А. Егорова.

Первые русские исследователи процесса сушки зерна (И. Чернопятков, 1867 г., Н. Румянцев, 1896 г.) обратили внимание на то, что зерно под действием высоких температур теряет всхожесть. Ими также было замечено, что высокая температура особенно пагубно действует на сырое зерно. По мере подсыхания зерна высокие температуры менее опасны.

При сушке зерна большое значение имеет не только температура нагрева зерна, но и продолжительность воздействия теплоты.

Важнейшей характеристикой зерна являются его теплофизические свойства. До последнего времени методы математического расчёта процессов сушки не получили должного развития, что в значительной степени объясняется недостаточными сведениями о теплофизических свойствах зерна. Изучению этого вопроса посвящены исследования Г.И. Красовской, Г.А. Егорова, Е.Н. Сизаковой, В.А. Казаряна и др.

Исследования теплофизических характеристик единичного зерна и зернового слоя показали, что коэффициенты теплопроводности, температуропроводности единичного зерна значительно отличаются от тех же показателей неподвижного слоя зерна.

Весьма значительные работы по применению инфракрасного излучения при сушке зерна ведутся в России, США, Франции, Италии, Японии, Швеции, Швейцарии и Германии. Например, в США к концу 1957 г. насчитывалось 70 фирм, принимающих то или иное участие в создании приборов инфракрасной техники. В 1959 г. число таких фирм увеличилось до 170.

Исследования процесса сушки зерна в «кипящем» слое проводилось в советских институтах (ВТИ, ВНИИЗ, Одесском технологическом институте и др.), а также зарубежными исследователями (Циборовским, Матуром и Гишлером, Гофманом).

Изучение процесса сушки зерна комбинированным методом (периодический нагрев инфракрасными лучами в сочетании с сушкой конвекцией), проведённое в Челябинском институте механизации и электрификации сельского хозяйства, показало, что сушку можно проводить при высокой температуре зерна,

начиная с 45 °С и доводя её постепенно в конце сушки до 72...73 °С для пшеницы и 75...78 °С для овса. Скорость сушки при дифференцированном нагреве почти в два раза больше, чем при сушке конвекцией.

Кафедра садоводства во Вроцлаве провела опыты по сушке семян (хлебных злаков, бобовых, мелких семян трав и овощных растений) и пришла к выводу о возможности проектирования лучевой механизированной сушилки промышленного типа, причём опыты с комбинированным воздействием на семена ведут к более интенсивному удалению влаги и значительно уменьшают расход электроэнергии на 1 кг испарённой влаги.

В работах В.П. Ржехина исследованы важнейшие химические процессы, протекающие в измельчённых масличных семенах при воздействии теплоты. Эти работы показали, что в процессе технологической обработки в масличных семенах одновременно происходит ряд химических реакций и фазовых превращений веществ.

Представляющие большой теоретический и практический интерес работы В.Л. Кретовича, А.И. Стародубцевой, С.В. Рушковского, А.Г. Малышевой, В.М. Копейковского, В.Г. Щербакова, Л.В. Романовой, Н.А. Сазыкиной, М.И. Рязанцевой и других авторов посвящены исследованию биохимических процессов, происходящих в зерне в процессе сушки и хранения.

Отдельное место занимают исследования в области термического обеззараживания зерна. Наиболее эффективным оказался метод замочки поражённых семян в горячей воде. Были предложены два метода такой обработки: двухфазный и однофазный. В производстве нашёл более широкое применение однофазный метод.

Впервые термическое обеззараживание было применено в Германии и США в тот период, когда 50 % посевов зерновых было заражено пыльной головнёй. В 1888 г. Генсен применил против пыльной головни нагрев семян в горячей воде. Аппель внёс изменения и дополнения в эту методику, её признали единственным методом борьбы с пыльной головнёй.

В 1918 г. в США были организованы пункты на мельницах, консервных заводах и других производствах, где имелись паросиловые установки. Зерно прогревали в воде в мешках или во вращающихся барабанах, изготовленных из проволочных сеток, затем охлаждали и сушили.

В нашей стране термическое обеззараживание впервые было применено на Верхнянской селекционной станции. Предварительно зерно замачивали в течение 4...5 ч при температуре воды 30 °С. Затем семена прогревали в горячей воде в резервуарах, куда опускали корзины с зерном. Корзины с целью равномерного прогрева зерна до температуры 52...53 °С периодически вынимали и опускали, затем выдерживали 7 минут, при 54 °С - 6 минут и 55 °С - 5 минут. После этого зерно охлаждали и высушивали.

Исследованием процесса сушки и дезинсекции зерна занимались П.С. Воробьёв и А.А. Климов, которые установили, что инфракрасные лучи эффективно уничтожают клещей и долгоносиков в заражённом зерне.

Многочисленными наблюдениями (В.Л. Кретовича и Я.И. Раутенштейна

и др.) доказано, что сушка зерна в зерносушилках при распространённых в настоящее время режимах не оказывает существенного стерилизующего действия, т. е. не приводит к массовой гибели микроорганизмов. В результате тепловой сушки происходят лишь некоторые изменения в количественном и качественном составе и состоянии микрофлоры. Эти изменения зависят от исходной влажности зерна, состояния самой микрофлоры (наличия вегетативных клеток или спор), температуры агента сушки, температуры и продолжительности нагрева зерновой массы.

Опыты в лабораторных и производственных условиях показали, что сушку всех партий зерна нормального качества со свойственной ему эпифитной микрофлорой следует рассматривать лишь как процесс, в результате которого повышается концентрация субстрата (зерна) и удаляется свободная вода, в связи с чем понижается жизнедеятельность зерна и микроорганизмов.

Иные результаты получают в процессе тепловой сушки зерновых масс, в которых наблюдается активное развитие микроорганизмов и самосогревание. В этих случаях обильно развившаяся микрофлора в значительной степени подвергается действию агента сушки, наблюдается сильное снижение общей численности микроорганизмов, в том числе плесневелых грибов. Так, по данным О.П. Подъяпольской, после тепловой обработки количество зародышей плесени снижалось с 400...500 тыс. до нескольких тысяч в 1 г зерна.

Опыты по сушке зерна в пневмогазовых сушилках, когда температура агента сушки достигает 400...600 °С и более, показали, что в этих условиях наблюдается заметное снижение численности микрофлоры даже в зерне с влажностью 16 %. По данным ВНИИЗ в таком зерне число бактерий по сравнению с первоначальным (до пропуска через сушилку) снижалось в 3 раза, а плесневелых грибов - в 7...8 раз.

Подытоживая вышесказанное, следует отметить, что, благодаря многочисленным экспериментальным исследованиям теория тепловой обработки зерна достаточно развита. Однако это не исключает появления нового в этом направлении. С развитием технологий сушка зерна постоянно совершенствуется, постоянно появляются новые средства механизации данного процесса. Но актуальность проблемы реализации высокотехнологичного, с минимальными энергозатратами процесса сушки зерна с каждым годом возрастает.

Заключение

Сушка сырья, как один из видов тепловой обработки сельскохозяйственных материалов, является наиболее распространённым технологическим процессом. В частности, на сушку зерна в нашей стране на хлебопекарных предприятиях затрачивают более 700 тыс. тонн топлива.

Во многих регионах России период уборки совпадает с выпадением осадков, вследствие чего убранное зерно имеет повышенную влажность. Поэтому сушка зерна является одной из главных технологических операций послеуборочной обработки зерна.

Проведенный анализ технологий и средств механизации процесса сушки зерна позволяет сделать заключение, что имеющиеся конструкции устройств,

использующих различные способы обработки, не совершенны и имеют ряд недостатков (повышенные затраты теплоты на процесс сушки, повышенную металлоемкость, неравномерность нагрева зерновой массы, низкий тепловой коэффициент полезного действия и т.д.).

К тому же, описанные выше устройства для сушки зерна, рассчитаны на большую пропускную способность, которая может достигать 120 т/ч. Но в современных условиях развития сельского хозяйства в России целесообразно создавать и устройства относительно небольшой пропускной способности, обеспечивающие потребности отдельного крестьянского (фермерского) хозяйства.

Для решения проблемы создания конкурентоспособной, рентабельной в условиях современной экономики зерносушильной техники имеются два пути:

1) создать материально-техническую базу по обработке зерна у производителя;

2) найти приемлемые условия на взаимовыгодной основе для обработки зерна на бывших элеваторах и хлебоприемных предприятиях.

Для реализации первого направления в настоящее время необходимо обеспечить производство зерносушилок сравнительно небольшой производительности, позволяющих соответствовать тем объемам переработки зерновой массы, которые производят реальные хозяйства.

В настоящее время доказана возможность эффективного применения электрического нагрева для сушки зерновых. Сконструированы, испытаны и даже применены на практике инфракрасные и высокочастотные зерносушилки. Зерно, подвергаемое сушке в таких установках, соответствует всем технологическим требованиям, а в ряде случаев превосходит по качеству зерно, просушенное традиционным, конвективным способом. Однако, обладая высокой энергонасыщенностью и необходимостью применения дополнительных устройств для отвода образовавшейся влаги и специфического формирования зернового слоя при малых объемах переработки, эти способы представляются так же малоприменимыми. Экономические изменения в нашей стране выявили спрос на минизерносушилки, обладающие относительно невысокой потребляемой мощностью, высокоэкономичные, простые в употреблении и обслуживании, а главное - достаточно дешевые.

Зерносушилки большой производительности имеют преимущественно огневой, а не электрический способ получения теплоты, что объясняется следующим образом. Скрытая теплота парообразования составляет около 2,5 МДж/кг, а 1 кВт·ч электроэнергии эквивалентен 3,6 МДж. Таким образом только на испарение 1 кг влаги теоретические затраты электроэнергии составляют 0,7 кВт·ч/кг. Учитывая дополнительный расход теплоты на нагрев зерна и потери ее в окружающую среду, фактический расход электрической энергии больше теоретического. Кроме того, для больших объемов переработки зерна и высокой производительности сушилок необходимо применение дополнительных устройств для создания термовлажностного градиента. Поэтому электронагрев (контактный, ИК, СВЧ) вследствие большого расхода электроэнергии на сушку зерна в установках большой производительности неэкономичен и не нашел

широкого применения.

Однако при создании минизерносушилок ситуация резко меняется. При небольшой производительности сушилки, особенно в случае, когда зерно расположено в установке в один слой, несколько меняется характер протекания процесса удаления влаги. Так как тепловому воздействию подвергается небольшой объем зерна, то появляются более широкие возможности для создания градиента влажности, который достаточен для удаления влаги из зернового слоя небольшой толщины. Поэтому эффективность процесса сушки в этом случае можно обеспечить при оптимизации соответствующей конструктивно-технологической схемы сушилки.

Ограниченное распространение контактного способа передачи теплоты связано с тем, что на протяжении всей истории развития средств механизации сушки зерна требовалось создавать установки большой производительности, применение в которых данного способа не обеспечивало требуемых экономических показателей. Однако накопленный опыт показывает, что минисушилки на основе применения контактного способа передачи теплоты зерну от электрического нагревательного устройства востребованы в настоящее время.

Энергозатраты на технологический процесс сушки зерна распределяются следующим образом: 10 % - на перемещение зерна и вентиляцию, 90 % составляет тепловая энергия. Тепловая энергия же при конвективной сушке расходуется в следующих пропорциях: на испарение влаги - 40 %, на нагрев зерна - 10 %, на нагрев зерна и нагрев воды до температуры агента сушки - 20 %, потери в теплообменнике через стенки газопроводов и рабочей камеры - 30 %.

В то время как применение конвективного способа подвода теплоты в зерносушилках связано с большими потерями тепловой энергии в окружающую среду, использование, к примеру, контактного способа передачи теплоты с одновременным транспортированием исходного материала, при хорошей термоизоляции установок для сушки зерна позволяет большую часть от общих затрат теплоты передать на нагрев и испарение влаги из зерна.

Создание огневых минизерносушилок является бесперспективным направлением развития зерносушильной техники из-за невозможности организовать на низкопотенциальном уровне тепловые конвекционные процессы. Поэтому основным способом нагрева зерна в минизерносушилках должен служить электрический. Как уже отмечалось выше, лучистый и высокочастотный нагрев на небольших объемах переработки также малорациональны. Следовательно, косвенный электронагрев в этом случае остается достойной альтернативой традиционным способам подвода теплоты к объекту сушки.

Применение электронагрева и контактного, или комбинированного способов передачи теплоты зерну позволит добиться максимального соответствия создаваемых на этой основе установок технологическим требованиям и требованиям, предъявляемым при эксплуатации в условиях небольших фермерских хозяйств (экологичность, универсальность и т.д.). Следовательно, перспективным направлением развития средств механизации процесса сушки зерна является создание малогабаритных контактных установок для тепловой обработки

зерна, позволяющих проводить предпосевную обработку, сушку, прокаливание, прожаривание и обеззараживание зерна.

Таким образом, создание малогабаритных энергосберегающих средств механизации тепловой обработки зерна, адаптированных к условиям российского сельскохозяйственного производства, обеспечивающих требуемое качество готового продукта, является актуальной и важной научно-технической проблемой.

2 КОНЦЕПТУАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗЕРНОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК КОНТАКТНОГО ТИПА

2.1 Основы проектирования зерносушильных установок

К основам проектирования зерносушильных установок относят физические законы и физико-химические соотношения, которым подчиняется технологический процесс сушки зерна, а также общие методы исследования и расчета этого процесса. Сушка зерна является нестационарным и обратимым процессом, протекающим в общем случае с переменной (убывающей) скоростью, и поэтому расчет кинетики процесса представляет значительные трудности. В результате этого расчета должна быть определена продолжительность сушки (экспозиция), которая при заданной производительности установки и установленном режиме процесса определяет габариты сушильной камеры. В ряде случаев практический интерес представляет также решение обратной задачи, т. е. расчетное определение параметров оптимального режима, обеспечивающих заданную производительность установки и соответствующие технологические требования (температура нагрева зерна на выходе из сушильной камеры, разовый влагосъем, конечную влажность зерна и т. д.).

Анализируя процесс сушки зерна в общем виде, можно выделить пять уровней иерархий физико-химических явлений, протекающих в данном процессе, и соответственно пять уровней их исследования:

I - исследование на атомарно-молекулярном уровне;

II - исследование надмолекулярных и глобулярных структур, что очень важно для биохимических и биофизических объектов сушки;

III - анализ физических и физико-химических явлений, протекающих в объектах сушки, и, в частности, явлений межфазного энерго- и массопереноса;

IV - исследование явлений, протекающих в пограничных слоях между объектом сушки и источником теплоты;

V - анализ совокупности процессов, определяющих макрогидродинамическую и макроэнергетическую обстановку в сушильной установке.

Первые три уровня иерархии относят к внутреннему тепло- и массопереносу, а IV и V - к внешнему обмену.

В настоящее время расчет процессов сушки и сушильных установок ведут в основном на макроскопическом уровне, что соответствует III и IV уровням иерархии системного анализа, однако уже имеются определенные данные и перспективы более глубокого проникновения в механизм процесса сушки на атомарно-молекулярном уровне, т. е. на I уровне иерархии.

До недавнего времени процесс сушки в основном изучали как макропроцесс и объекты сушки рассматривали как непрерывные модели, в которых отдельные фазы представлены в виде сплошной среды, равномерно распределенной в объеме высушиваемого материала. В настоящее время, в связи с широким использованием новых физических эффектов в условиях воздействия внешних полей целесообразно более глубоко проникнуть в существо микропроцессов и рассматривать объекты сушки как корпускулярные модели, физические свой-

ства которых обусловлены молекулярной структурой тел и силами взаимодействия между образующими влажные материалы молекулами, атомами и ионами.

Такой подход к изучению процессов сушки уже дает положительные результаты при анализе явлений, развивающихся внутри материала при взаимодействии влаги с высушиваемым материалом, образовании различных форм связи влаги, воздействии поверхностно-активных веществ на влажный материал, а также при вскрытии специфических особенностей влияния различных способов подвода теплоты к объектам сушки.

В связи с этим на современном этапе сушку зерна следует рассматривать как процесс разделения фаз в гетерогенных системах в условиях взаимодействия внешних и внутренних полей, причем определяющее влияние имеет начальная стадия этого взаимодействия – импульс.

Развивая эту аналогию, целесообразно использовать также понятие «импульс силы», который представляет собой произведение движущей силы процесса F на время ее воздействия τ , т. е. импульс начального воздействия на объект сушки учитывает как начальную действующую силу процесса, так и продолжительность её приложения (экспозицию).

В соответствии с универсальным физическим принципом Ле-Шателье-Брауна, чем сильнее внешнее воздействие на объект сушки в начальный момент, тем интенсивнее протекают внутренние процессы, стремящиеся вернуть систему в состояние равновесия. По существу, все методы обобщения кривых сушки и расчета продолжительности процесса базируются на использовании скорости сушки в первый период (или скорости сушки в начале второго периода, если первый период отсутствует), которая является количественной мерой начального импульса.

В связи со значительной термолабильностью и влагоинерционностью влажного материала, необходимо подготовить его к восприятию начального импульса. Поэтому особенно важны различные технологические способы предварительной подготовки материалов к сушке (центрифугирование, выпаривание, предварительный нагрев и др.), а также совмещение сушки с другими технологическими операциями (перемещение внутри материала водорастворимых минеральных веществ, ферментов и т. п., окисление, восстановление и пр.).

Таким образом, при проектировании зерносушильных установок необходимо создать условия, обеспечивающие эффективное протекание как внешнего тепло- и массообмена в сушильной камере, так и тепло- и массопереноса внутри объекта сушки (зерна).

При проектировании современных зерносушильных установок учитывают ряд требований, которые можно разбить на следующие группы (рисунок 2.1):



Рисунок 2.1 – Требования к проектированию зерносушильных установок

1. Технологические - обеспечение высокой эффективности и равномерности сушки при получении однородного высококачественного продукта во всем объеме сушильной камеры, с заранее заданными свойствами (конечные влажность и температура); совмещение процесса сушки с другими технологическими процессами (обжаривание, термическое обеззараживание и т. д.);

2. Конструктивные - минимальная металлоёмкость, компактность, максимально возможное использование стандартных деталей и узлов, удобство монтажа и т. д.;

3. Эксплуатационные - безопасность, соответствие санитарным нормам, непрерывность процесса сушки, удобство обслуживания и ремонта;

4. Кибернетические - соответствие требованиям автоматизации контроля, регулирования и управления процессом сушки и работой установки [45];

5. Техничко-экономические, которые, по существу, являются итогом реализации перечисленных выше требований, к ним относят целый ряд показателей, причем некоторые из них желательно в определенных пределах максимизировать (max), а другие, наоборот, минимизировать (min) (рисунок 2.2).

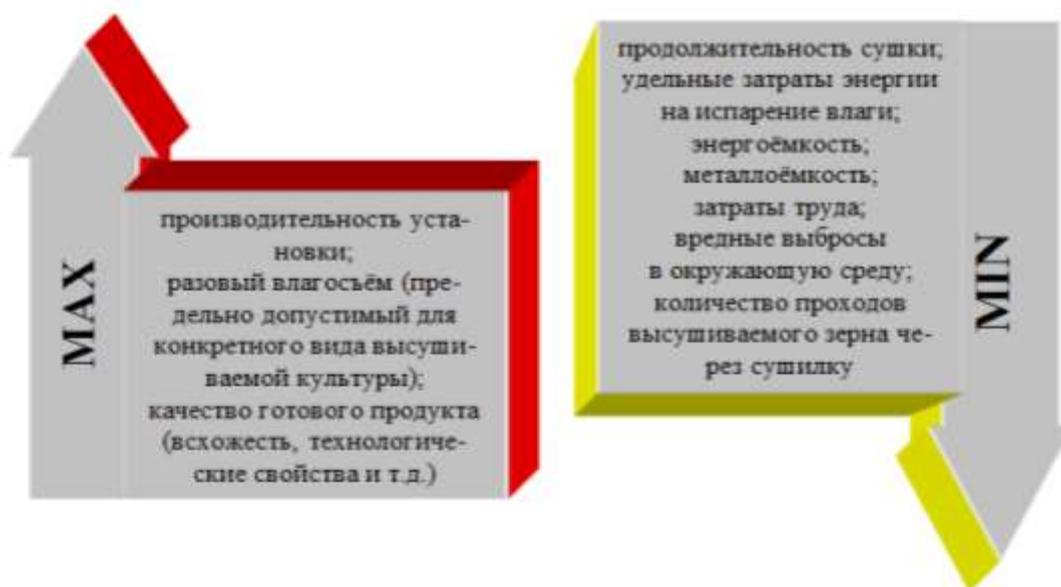


Рисунок 2.2 – Техничко-экономические показатели сушильных установок

В целом, максимально улучшая технико-экономические показатели зерносушильной установки, можно достичь минимума удельных приведенных затрат на испарение влаги (руб./кг).

Все указанные выше требования должны быть реализованы в процессе проектирования и расчета зерносушильных установок. При этом обычно применяют следующий примерный порядок выполнения отдельных этапов проектирования (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Этапы проектирования установок для сушки зерна

Для зерносушильных установок с контактным способом подвода теплоты особенности расчета состоят в следующем.

Зерносушилку рассчитывают на основании требований, которые обычно содержат следующие исходные данные:

а) *по установке в целом:* 1) пропускная способность; 2) способ нагревания контактной поверхности (электронагрев, пар и т.п.); 3) способ загрузки и выгрузки зерна, наличие и тип транспортирующего рабочего органа;

б) *по высушиваемому зерну:* 1) начальная и конечная влажность; 2) начальная и максимально допустимая температура (предельная); 3) размерно-массовые характеристики; 4) теплофизические свойства; 5) допустимый разовый влагосъём;

в) *по режиму сушки:* 1) с обдувом или без обдува агентом сушки; 2) температура и влажность подаваемого агента сушки; 3) скорость движения агента сушки в сушильной камере; 4) направление движение агента сушки в сушильной камере (противоток, прямоток и т. д.)

Продолжительность сушки зерна в установке может быть задана или её следует вначале рассчитать по уравнениям кинетики процесса [48].

Рассмотрим примерную схему основных расчетов зерносушильной установки с контактным способом подвода теплоты.

Расчет сушильной камеры: 1) расчет массы испаренной влаги; 2) расчет расхода агента сушки; 3) расчет габаритов сушильной камеры; 4) расчет потерь теплоты в окружающую среду; 5) расчет остальных потерь теплоты в сушильной камере; 6) расчет общего расхода теплоты [6].

Расчёт привода транспортирующего рабочего органа: 1) выбор типа электродвигателя [121, 122]; 2) выбор и расчёт предающих элементов (вариато-

ра, муфты и т. д.).

Расчет нагревательного элемента: 1) выбор типа (огневой, электрический, паровой и т. д.) и вида (керамический, плёночный, трубчатый и т. д.) нагревательного элемента; 2) расчёт требуемой мощности нагревательного элемента; 3) определение коэффициента теплопередачи; 4) определение площади поверхности нагрева.

Расчет системы вентиляции: 1) разработка схемы воздуховода [38, 112]; 2) расчет аэродинамических сопротивлений в сушильной установке; 3) выбор вентилятора и расчет мощности электродвигателя.

Расчёт теплоизоляции: 1) обоснование расчётной температуры наружной поверхности теплоизоляционного слоя; 2) выбор типа теплоизолирующего материала; 3) расчёт толщины теплоизолирующего слоя.

Расчет технико-экономических показателей зерносушильной установки. На основании расчетных данных составляют таблицу указанных выше основных технико-экономических показателей установки (рисунок 2.2) для сравнения с показателями действующих зерносушильных установок. При этом апробируют выбранные на предварительном этапе проектирования тип зерносушильной установки, способ подвода теплоты, параметры режима сушки и т. п. Предпочтение отдают наиболее рациональному экономическому варианту [72].

В частности, при сушке зерна в установках с контактным способом подвода теплоты значительного экономического эффекта можно добиться, обеспечивая единичный слой движения зернового материала в сушильной установке при электронагреве контактирующей с зерном поверхности с хорошей теплоизоляцией кожуха установки.

Интенсификацию внешнего тепло- и массообмена при контактной сушке достигают за счет увеличения движущей силы обмена, т. е. градиента (разности) температуры греющей поверхности и материала. Этот градиент в большей мере зависит от режима сушки, в частности, от скорости движения зерна в установке, скорости движения агента сушки (в случае сушки зерна с обдувом воздухом) и площади поверхности их контакта.

Выбор рационального способа сушки зерна, типа зерносушильной установки, а также теплового режима её работы представляет собой сложную задачу, решение которой требует достаточных знаний в области теории, технологии и техники зерносушения [70, 137, 138].

Все вышеназванные требования к проектированию зерносушильной технике можно представить в виде концептуальной схемы создания зерносушилок (рисунок 2.4).

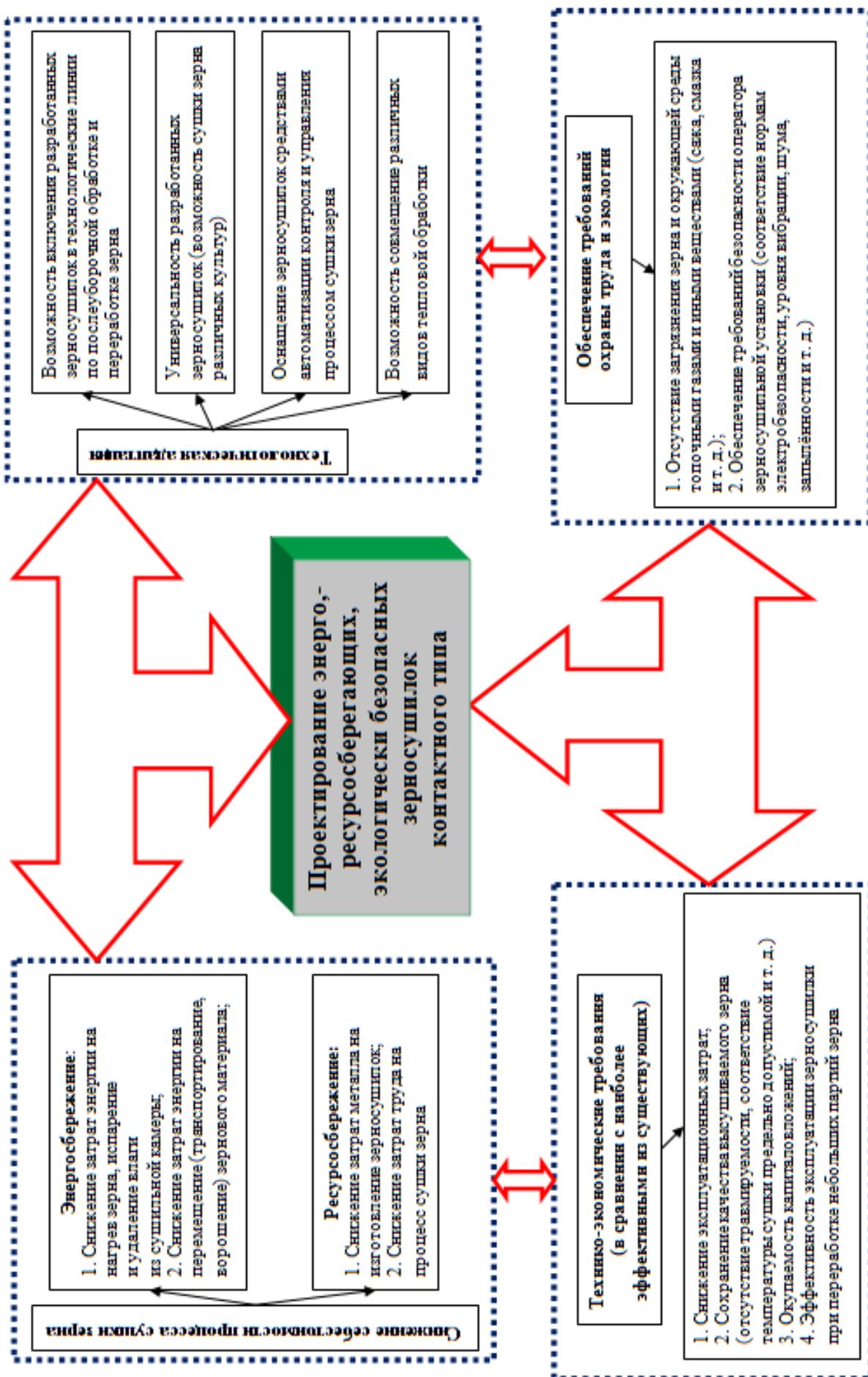


Рисунок 2.4 – Схема концептуального проектирования зерносушилок контактного типа

Каждый их указанных блоков данной схемы включает технико-экономические, энерго-, ресурсосберегающие, экологические аспекты, а также требования технологической адаптации. Реализация данных условий при проектировании зерносушильной техники позволит разработать новые, эффективные средства механизации, причём необходимо учитывать влияние на процесс сушки зерна, как каждого из блоков по отдельности, так и их взаимосвязи [129, 131, 154].

Как известно, сушка зерна - это сложный технологический процесс, поэтому проектирование зерносушильных установок базируется на основных законах, которые можно разбить на три группы.

1. Законы, устанавливающие количественные соотношения – фундаментальные законы сохранения массы и энергии. На основании этих законов составляют материальные и энергетические балансы зерносушильной установки. Например, для сушильной камеры уравнение материального баланса (по объекту сушки) имеет вид:

$$m_{31} = m_{32} + m_{вл}, \quad (2.1)$$

где m_{31} , m_{32} - масса сырого и высушенного зерна соответственно, кг; $m_{вл}$ - масса испаренной влаги, кг.

Уравнение энергетического баланса сушильной камеры для зерносушильной установки контактного типа можно представить в виде:

$$A_{вх} = A_{ух} = \text{const}, \quad (2.2)$$

где $A_{вх}$, $A_{ух}$ - соответственно энергия, внесенная в сушильную камеру зерном, греющей поверхностью и воздухом, и энергия, уходящая из сушильной камеры, кДж.

Так как

$$A_{ух} = A_{пол} + A_{пот}, \quad (2.3)$$

где $A_{пол}$ - полезно использованная энергия, кДж; $A_{пот}$ - потери энергии, кДж, то в общем виде энергетический коэффициент полезного действия (КПД) сушильной установки

$$\eta_{эн} = A_{пол}/(A_{пол} + A_{пот}). \quad (2.4)$$

По существу, полезным расходом теплоты в сушильной установке являются затраты энергии на испарение влаги, тогда приближенно можно принять, что

$$\eta_{эн} \approx (q + q_{св})/q_{общ}, \quad (2.5)$$

где q – удельные затраты энергии на испарение, кДж/(кг·влаги); $q_{св}$ - удельные затраты энергии на разрыв связи влаги с материалом, кДж/(кг·влаги); $q_{общ}$ - общий расход энергии, кДж/(кг·влаги).

2. Законы, устанавливающие равновесные соотношения.

Сушка – процесс, при котором влажность высушиваемого материала стремится к значению равновесной влажности. При достижении равновесия процесс сушки прекращается. Знание равновесных соотношений дает возможность оценить движущую силу процесса: чем больше начальная влажность материала, т. е. чем дальше она от равновесного влагосодержания, тем интенсивнее протекает внешний массообмен в процессе сушки. Точнее эту зависимость

можно представить в виде соотношения парциальных давлений пара над поверхностью высушиваемого материала p_m и в окружающем воздухе p_n :

если $p_m > p_n$, протекает процесс десорбции (сушки); движущая сила процесса $p_m - p_n$;

при $p_m < p_n$ протекает процесс сорбции (увлажнения);

при $p_m = p_n$ достигается состояние динамического равновесия - процесс прекращается.

Знание равновесных соотношений необходимо для оценки гигроскопических свойств и термодинамических характеристик материала, что важно для выбора оптимальных режимов сушки, а также условий хранения высушенного зерна.

Обычно гигроскопические свойства зерна характеризуются изотермами сорбции и десорбции.

В связи с тем, что влага в зерне находится в различных формах связи с их сухим скелетом, аналитическое получение общего уравнения изотерм затруднительно и в инженерной практике для расчета равновесной влажности используют эмпирические формулы, полученные путем обработки опытных данных.

Для расчета удельных затрат энергии на разрыв связи влаги с материалом ($q_{св}$) применяют термодинамические методы, используя при этом зависимость между равновесной влажностью зернового материала и влажностью воздуха.

Наибольшее практическое применение имеет метод акад. П.А. Ребиндера, который определяет энергию связи $q_{св}$ или работу отрыва единицы массы воды от зерна A , кДж, в виде выражения уменьшения свободной энергии – ΔA , кДж, при температуре t , °С, так как в результате связывания воды с зерновым материалом снижается давление пара воды над его поверхностью и свободная энергия соответственно понижается:

$$q_{св} = A = - \Delta A = Rt \cdot \ln(p_n/p_u) = - Rt \ln A_v, \quad (2.6)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·°С); p_n - давление насыщенного пара свободной воды, Па; p_u - парциальное давление равновесного пара воды над зерновым материалом с влагосодержанием и в любой среде: воздухе, инертном газе или вакууме, Па; A_v – активность воды, $A_v = p_n/p_u$.

Чем прочнее вода связана с зерновым материалом, тем меньше p_u , и наоборот, для свободной воды $p_u = p_n$, $A_v = 1$, $q_{св} = 0$. В процессе сушки материала по мере уменьшения его влагосодержания $q_{св}$ увеличивается, так как повышается доля влаги, более прочно связанной с материалом (влаги микрокапилляров и адсорбционно связанной влаги) [72, 125].

3. Законы, определяющие скорость процессов - их кинетику и динамику. К этой группе относят законы нестационарного теплообмена и теплопереноса. Сушка зерна (после первой критической влажности) протекает с убывающей скоростью: чем ближе текущая влажность зернового материала к значению равновесной влажности, тем меньше скорость процесса. Поэтому в расчете зерносушильной установки учет кинетики процесса имеет решающее значение.

В конце процесса обычно удаляется влага, прочно связанная с сухим ске-

летом зерна, что обуславливает не только уменьшение скорости сушки, но и требует дополнительных энергетических затрат на преодоление энергии связи.

В общем виде уравнение внешнего массообмена может быть представлено следующим образом:

$$i_m = a_{mp}(p_m - p_n) V_{\text{норм}}/B, \quad (2.7)$$

или

$$i_m = a_{mu}\rho_0(u_n - u_p), \quad (2.8)$$

где i_m - интенсивность испарения влаги, кг/(м²·ч); a_{mp} , a_{mu} - коэффициенты внешнего влагообмена, отнесенные к разности парциальных давлений пара, или к разности влагосодержаний соответственно, Вт/(м²·°С); $V_{\text{норм}}$, B - нормальное барометрическое давление и фактическое общее давление в сушильной камере соответственно, Па; ρ_0 - плотность абсолютно сухого зернового материала, кг/м³; u_n , u_p - соответственно влагосодержание на поверхности материала и равновесное, кг влаги/(кг сух. вещества).

Следует учесть, что в связи со сложной зависимостью коэффициентов влагообмена от влажности зернового материала, а также из-за интенсивного углубления поверхности (зоны) испарения внутрь материала во второй период сушки эти коэффициенты изменяются в процессе сушки, и поэтому использование формул (2.7), (2.8) в инженерных расчетах ограничено. Лучшее приближение к реальности дает расчет кинетики процесса сушки по зонам, при этом влажкоэффициенты считают постоянными только в пределах зоны [71, 92, 225...227].

Вышеуказанные условия относят к первому классу прямых способов расчета.

В практических расчётах важное значение имеет второй класс, к которому относят обратные задачи расчета, когда при ограничениях, накладываемых на характеристики объекта сушки технологическими требованиями (например, максимально допустимые значения температуры нагрева, поверхностного градиента влажности и т. п.), определяют параметры оптимального режима процесса, обеспечивающие наиболее высокие технико-экономические показатели сушильной установки, т. е. наибольшую эффективность процесса в соответствии с принятым критерием оптимизации.

В соответствии с изложенным выше общие методы расчета зерносушильных установок можно разделить на четыре группы.

1. Приближенные инженерные расчеты по нормативам или эмпирическим формулам применяют при выборе типового оборудования. Например, при расчете барабанных или распылительных зерносушилок объем сушильной камеры определяют по нормативному коэффициенту - напряжению по влаге A_v [кг вл./(м³·ч)] [93, 270...272].

2. Статические инженерные расчеты относят к постоянной (средней) скорости процесса сушки U , кг вл./ч. Обычно эти расчеты проводят на основании балансовых уравнений с использованием $I-d$ - диаграммы (где I - энтальпия влажного воздуха, кДж/кг сухого воздуха; d - влагосодержание влажного воздуха, кг/кг сухого воздуха), что правомочно при протекании процесса сушки

зерна в первый период или с определенным приближением при незначительном изменении скорости процесса во второй период. Следует также учесть, что $I-d$ - диаграмма построена для влажного воздуха, и она не учитывает свойства зерна, как объекта сушки и кинетику процесса. Поэтому большое практическое значение имеют работы по развитию $I-d$ -диаграммы и нанесению на нее линий, характеризующих гигроскопические свойства высушиваемой зерновой культуры, создание I_m-d -диаграмм влажного материала и комбинированной $I-u-d$ – диаграммы (где I_m и u – соответственно энтальпия влажного зернового материала, кДж/кг сухого зерна и влагосодержание влажного зерна, кг влаги/кг сухого вещества).

3. Кинетические расчеты отражают кинетику процесса сушки в реальных условиях переменного режима в сушильной камере. Эти расчеты базируются, с одной стороны, на балансовых уравнениях теплоты и влаги и, с другой стороны, на уравнениях кривых сушки в первом и втором периодах.

4. Динамические расчеты основаны на системах дифференциальных уравнений, описывающих изменение температуры и влагосодержания в локальных точках объекта сушки.

Таким образом, кинетические и динамические методы дают возможность аналитически определить продолжительность сушки и уточнить расчет габаритов зерносушильной установки или определить параметры оптимального режима процесса. Расчет и проектирование зерносушильных установок являются заключительным этапом всего длительного процесса изучения свойств зерна как объекта сушки, исследования и математического анализа явлений, протекающих при сушке, и прежде всего процессов тепло- и массопереноса, а также исследований и расчетов по оптимизации процесса сушки. Наиболее полно последовательность указанных стадий и их взаимосвязь можно выявить при использовании современных методов системного анализа.

2.2 Основы системного анализа и моделирования процессов сушки зерна и зерносушильных установок

Разработка и проектирование новых методов и способов реализации процесса сушки зерна заключается в решении комплекса взаимосвязанных задач, к которым относят исследование и учет свойств зерна, выбор способа подвода теплоты и обоснование (расчет) оптимального режима, расчеты тепло- и массопереноса и тепло- и массообмена, конструктивное оформление зерносушильных установок, оснащение их контрольно-измерительной аппаратурой и системами автоматического регулирования и управления.

При системном анализе указанные задачи решают с широким использованием моделирования, что дает возможность обосновать не только параметры оптимального режима процесса, но и выбрать наиболее целесообразный способ управления процессом сушки в производственных условиях.

Моделирование представляет собой метод изучения динамических систем и процессов, происходящих в них. Понятие моделирования тесно связано с понятием информации, характеризующей воздействия, получаемые системой и её отдельными элементами, а также изменения, происходящие в системе в резуль-

тате этих воздействий.

При расчёте и конструировании зерносушильной техники могут быть использовано физическое, информационное и математическое моделирование.

Физическое моделирование осуществляют различными способами. Принципиальной особенностью такого моделирования является полное или частичное сохранение физической природы изучаемого процесса. Физическая модель процесса, системы может быть представлена в виде опытной установки, позволяющей получить идентичную копию реальной динамической системы и процессов, протекающих в ней при сушке зерна. Некоторые элементы системы на установке могут воссоздаваться моделями, обладающими и отличительной физической природой.

Физическое моделирование зерносушильной техники начало применяться значительно раньше, чем математическое моделирование. Это можно объяснить тем, что аналитические методы расчёта зерносушилок и процесса сушки зерна очень сложны.

Процесс сушки зерна в установках с контактным способом передачи теплоты, как процесс со сложной физико-химической системой можно представить в виде следующей функциональной физической модели параметрических зависимостей данного процесса (рисунок 2.5).

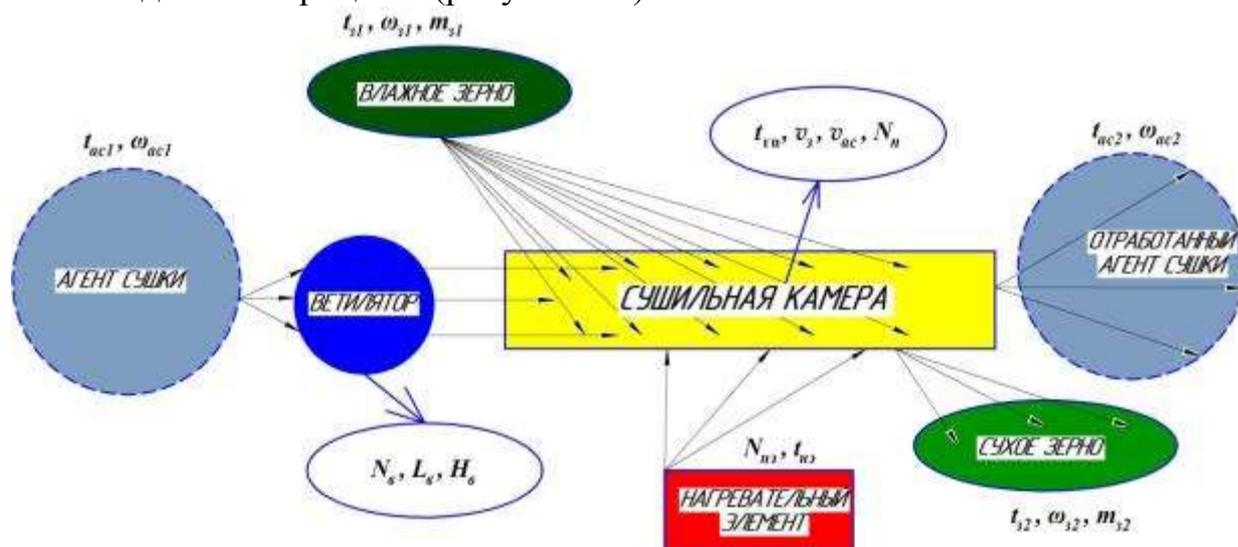


Рисунок 2.5 – Функциональная физическая модель устройства контактного типа для сушки зерна:

t_{ac} – температура агента сушки, °С; ω_{ac} – влажность агента сушки, %; t_3 – температура зерна, °С; ω_3 – влажность зерна, %; m_3 – масса зерна, кг; $t_{гп}$ – температура греющей поверхности, °С; v_3 – скорость движения зерна, м/с; v_{ac} – скорость движения агента сушки, м/с; $N_{п}$ – мощность, требуемая на привод транспортирующего рабочего органа, кВт; $N_{нэ}$ – мощность, потребляемая нагревательным элементом, кВт; $t_{нэ}$ – температура нагревательного элемента, °С; $N_{в}$ – мощность, потребляемая вентилятором, кВт; $L_{в}$ – производительность (подача) вентилятора, м³/ч; $H_{в}$ – давление (напор), создаваемое вентилятором, Па

В рассматриваемом случае на зерно, находящееся в сушильной установке, воздействуют воздушный поток (агент сушки), создаваемый вентилятором и

теплота, передающаяся от нагревательных элементов. В конечном итоге эта схема характеризуется такими параметрами, как пропускная способность устройства для сушки зерна Q , кг/ч, и энергозатраты на процесс испарения влаги q , МДж/кг.

Для изучения технологического процесса сушки зерна в установке контактного типа представим её в виде информационной модели, построенной по типу «вход-выход» (рисунок 2.6).

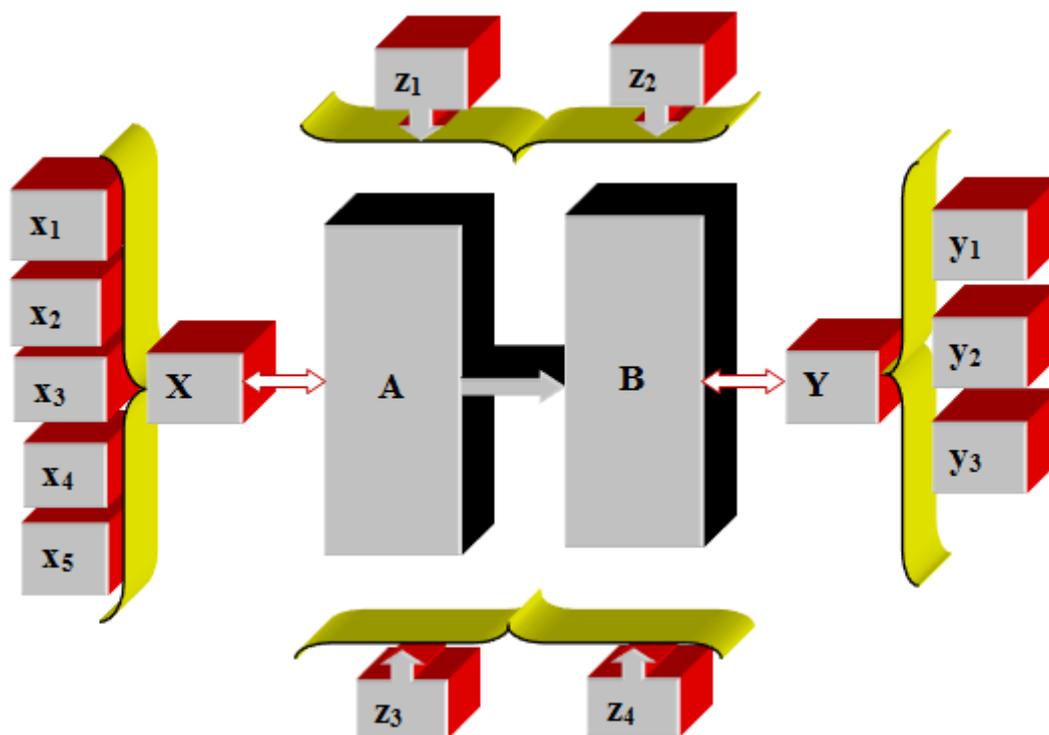


Рисунок 2.6 – Информационная модель процесса сушки зерна в установке контактного типа

Процесс сушки зерна - это система мероприятий и средств, направленная на преобразование исходного состояния зерна (массив А) в продукцию различного назначения: продовольственное, фуражное и семенное зерно (массив В).

Массив А (вход модели) характеризует вектор-функция внешних факторов (возмущений):

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}, \quad (2.9)$$

где x_1 – исходная влажность зерна; x_2 – исходная температура зерна; x_3 – вид зерновой культуры; x_4 – температура окружающего воздуха; x_5 – влажность окружающего воздуха.

В качестве выходной переменной (массив В) принимаем вектор-функцию качественных показателей процесса сушки:

$$Y = \{y_1, y_2, y_3\}, \quad (2.10)$$

где y_1 – конечная влажность зерна; y_2 – температура зерна на выходе из сушильной камеры; y_3 – травмируемость зерна.

Управляющими воздействиями в модели являются скорость движения зерна в установке z_1 , средняя температура греющей поверхности z_2 , скорость движения агента сушки в сушильной камере z_3 , направление движения агента сушки в сушильной камере по отношению к направлению движения высушива-

емого материала (противоток, прямоток и т. д.) Z_4 .

Для математического моделирования зерносушилок и процесса зерносушения исходными являются системы уравнений, связывающие выходные переменные с входными воздействиями, или взаимосвязь параметра оптимизации процесса сушки зерна с независимыми действующими факторами.

Этапы математического моделирования при планировании эксперимента можно представить в виде следующей схемы (рисунок 2.7):

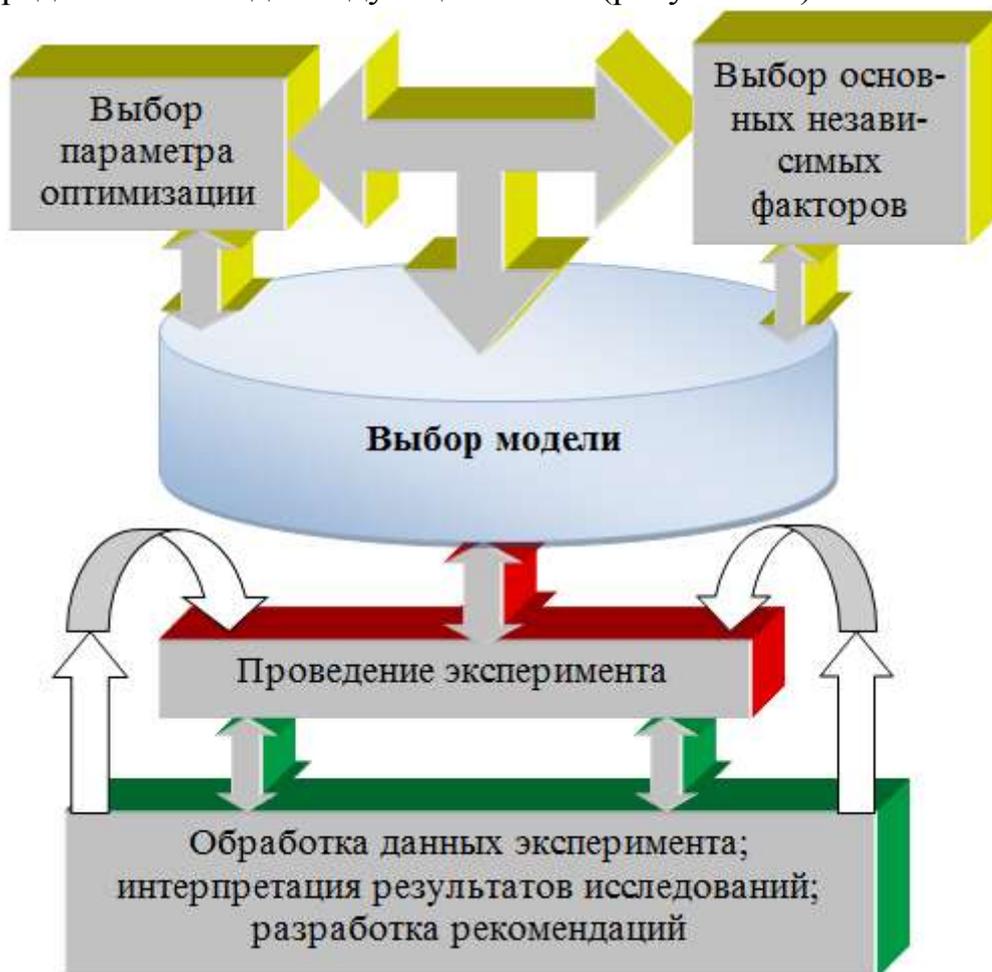


Рисунок 2.7 – Этапы математического моделирования при планировании эксперимента по исследованию процесса сушки зерна

Параметры оптимизации, в зависимости от объекта и цели исследования могут быть разнообразными. Для характеристики процесса сушки зерна основными параметрами являются технико-экономические (пропускная способность, затраты энергии на процесс испарения и удаления влаги из зерна и т. д.) и технологические, определяющие качество готового продукта (температура зерна на выходе из сушильной камеры, травмируемость зерна и т. д.).

Параметр оптимизации должен быть: эффективным с точки зрения достижения цели, универсальным, статистически эффективным, имеющим физический смысл, легко вычисляемым.

Выбранные независимые факторы процесса должны непосредственно воздействовать на объект исследования. Различают количественные и качественные факторы. В совокупности действующие факторы должны обладать

совместимостью и отсутствием линейной корреляции.

После выбора параметра оптимизации и действующих факторов переходят к выбору математической модели исследуемого процесса, под которой понимают вид функции отклика. Выбрать модель – значит выбрать вид этой функции, записать уравнение. Основное требование к модели - это способность предсказать направление дальнейших опытов, причём предсказывать с требуемой точностью, добиться адекватности модели.

Эксперимент, в котором реализуют все возможные сочетания действующих факторов, называют полным факторным экспериментом. Важным требованием при проведении эксперимента является уменьшение ошибок опыта, как случайных, так и систематических. Особое внимание следует уделять проверке однородности дисперсий, так как это одна из предпосылок, лежащих в основе регрессионного анализа. Для проверки однородности дисперсий используют критерии Кохрена или Бартлета.

Обработку полученных результатов эксперимента осуществляют различными статистическими методами – методом наименьших квадратов, регрессионным анализом. При этом необходимо проверить адекватность полученной модели по критерию Фишера и значимость коэффициентов полученных регрессий по критерию Стьюдента.

Методология системного анализа, которая базируется на комплексном использовании принципов математического моделирования и математической теории больших систем, а также достижениях современной вычислительной техники дают возможность перейти от сложной реальной модели сушки как нестационарного и обратимого процесса к его формализованной математической модели.

В данном случае на вход формализованной физико-химической системы поступают потоки сплошной среды, характеризующиеся вектором входных переменных (состав и параметры состояния отдельных фаз), которые в процессе обработки под действием технологических факторов преобразуются в вектор выходных переменных.

Реальная зависимость заменяется её математической моделью, в которой отображают зависимость вектора выходных переменных от входных переменных и переменных состояния объекта сушки во времени. В явном виде модель является замкнутой системой аналитического описания процесса в виде дифференциальных, интегральных и дифференциально-интегральных уравнений с соответствующими краевыми условиями и эмпирическими соотношениями.

2.3 Методы исследования процесса сушки зерна

Исследование процесса сушки зерна проводят с целью научного обоснования выбора рациональных методов и оптимальных режимов процесса, а также получения необходимых формул для проектирования и расчета сушильных установок. Как и для других технологических процессов, методы исследования процессов сушки можно разбить на три основные группы: аналитические, экспериментальные и синтетические.

Аналитическое исследование протекает в три этапа: а) математическое

описание задачи; б) формулировка краевых условий; в) решение задачи. Необходимость формулировки краевых условий вызвана тем, что уравнения кинетики тепло- массопереноса в частных производных второго порядка описывают целый класс явлений и имеют бесчисленное множество решений. Для однозначного решения уравнений необходимо сформулировать начальное и граничное условия, отражающие конкретную обстановку протекания процесса.

По характеру постановки задачи функциональные математические модели могут быть построены различно, в связи с чем различают информационные и имитационные модели.

При построении информационных моделей рассматривают распределение вероятностей исследуемых факторов в новом состоянии при известном начальном состоянии. Однако для вывода и обоснования таких уравнений в случае сложных процессов необходим не только достаточно высокий уровень развития теоретических представлений о процессе, но и большой объем надежной эмпирической информации о состоянии элементов системы.

Причинная модель в форме графа причинно-следственных отношений может использоваться не только для анализа, но и для решения различных задач оптимального управления [243].

В последнее время при проектировании сложных технологических процессов, о характере протекания которых отсутствует достаточно полная информация, для построения функциональной модели используют имитационные модели. В этих моделях моделирующий алгоритм приближенно воспроизводит функционирование процесса во времени, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания. Моделирующий алгоритм позволяет по исходным данным, содержащим сведения о начальном состоянии процесса (входная информация) и его параметрах, получить сведения о состоянии процесса в произвольные моменты времени.

Имитационные модели применимы к исследованию сложных процессов, но обладают существенным недостатком. Так, полученное решение носит частный характер, отвечая фиксированным значениям параметров системы, входной информации и начальных условий.

В зависимости от степени влияния случайных факторов функциональные модели классифицируют на детерминированные (при которых для данной совокупности входных значений на выходе системы может быть получен единственный результат) и стохастические (условия функционирования и характеристики состояния моделируемого объекта представлены случайными величинами и связаны стохастическими (т. е. случайными, нерегулярными) зависимостями).

В детерминированных моделях состояние системы в заданный момент времени однозначно определяют через параметры системы, входную информацию и начальные условия.

В стохастических моделях определяют (тоже однозначно) лишь распределение вероятностей для каждого конкретного состояния системы при задан-

ных распределениях вероятностей для начальных условий, параметрах системы и известной входной информации.

Информационные и имитационные модели бывают преимущественно стохастическими. Поэтому проектирование процесса с помощью моделей этого типа принято называть стохастическим моделированием, хотя имитационные модели могут применяться и как детерминированные.

По способу реализации математических моделей аналитические методы расчета можно разделить на следующие группы:

- аналитическое решение, когда стремятся получить в общем виде зависимости для искомых величин;
- численное решение, когда отсутствует возможность решения имеющихся уравнений в общем виде, но всё же возможно получить численные результаты при конкретных начальных данных;
- качественное исследование, когда, не имея решения в явном виде, по структуре модели можно найти некоторые свойства, например, оценить устойчивость системы;
- графоаналитическое решение, когда математическая модель системы реализуется в виде соответствующего набора номограмм;
- алгоритмическое описание, когда моделирующий алгоритм заменяет математическую модель процесса.

Аналитическое решение удается получить лишь для сравнительно простых систем. Если же рассматриваемая система достаточно сложна, то аналитическое решение наталкивается на значительные, а часто и непреодолимые трудности. В этом случае, стремясь все же получить аналитическое решение, нередко идут на умышленное упрощение исходной модели, чтобы иметь возможность изучить некоторые общие свойства системы.

Численные методы по сравнению с аналитическими практически применимы к значительно более широкому классу функциональных уравнений, однако полученные решения носят частный характер. Использование численных методов стало особенно эффективным в связи с внедрением современных средств вычислительной техники.

Графоаналитические методы, по-существу, являются синтезом аналитических и численных методов реализации математических моделей. Они позволяют обойти трудности, связанные с решением трансцендентных уравнений, просты и удобны в практической работе и потому получили наиболее широкое распространение в инженерной практике проектирования сушильных процессов.

Широкое применение и развитие в разных странах диаграммы влажного воздуха (*I-d* - диаграммы) свидетельствует о том большом значении, которое имеет диаграмма для расчета параметров влажного воздуха при протекании различных процессов и, в частности, процесса сушки.

Вместе с тем можно наметить пути дальнейшего развития диаграммы, что будет способствовать уточнению указанных расчетов.

Диаграмма составлена, исходя из предположения, что материал отдаёт

столько влаги, сколько может поглотить влагопоглотитель определенных параметров. Между тем для зерна процесс сушки лимитируется внутренним переносом влаги и вследствие этого протекает с переменной (убывающей) скоростью.

Естественно, что эти явления обусловлены свойствами зернового материала и формами связи влаги в нем. Поэтому, как было сказано выше, диаграмму влажного воздуха необходимо увязать с гигроскопическими характеристиками высушиваемых материалов путем нанесения на диаграмму соответствующих изотерм сорбции (которые могут характеризовать процесс сушки при очень малой скорости влагоотдачи) или линий термодинамических характеристик влажных материалов (что дает более полное представление о свойствах материалов), а также с действительной скоростью процесса сушки определенных групп материалов, т. е. увязать графоаналитический статический расчет с кинетикой процесса сушки.

Аналитические методы исследования и расчета по своей сущности являются дедуктивными. Они учитывают основные закономерности процессов, протекающих в моделируемом объекте, качественно более правильно характеризуют его даже при наличии недостаточно точных в количественном отношении параметров модели. Поэтому с их помощью можно разрабатывать общие методы расчета. При возможности их полной реализации, по существу, отпадает необходимость в эксперименте, который в этом случае применяют для определения кинетических констант модели и для проверки адекватности полученных математических решений.

В ряде случаев целесообразно использовать принцип суперпозиции, когда задачу со сложными краевыми условиями и переменными физическими характеристиками раскладывают на алгебраическую сумму простых задач, решения которых известны (например, в виде расчетных графиков, номограмм и т. п.).

Хорошие практические результаты дает зональный расчет с применением метода кусочно-ступенчатой аппроксимации.

Однако применение аналитических методов расчета не всегда возможно. В частности, когда отсутствует или весьма ограничен объем теоретических сведений об изучаемом процессе, вследствие чего неизвестен ориентировочный вид соотношений, описывающих этот процесс. Даже если аналитические зависимости получены, из-за их громоздкости и сложности их часто трудно применять в практических инженерных расчетах.

В связи с этим важное практическое значение имеет экспериментальный метод исследования (рисунок 2.8).

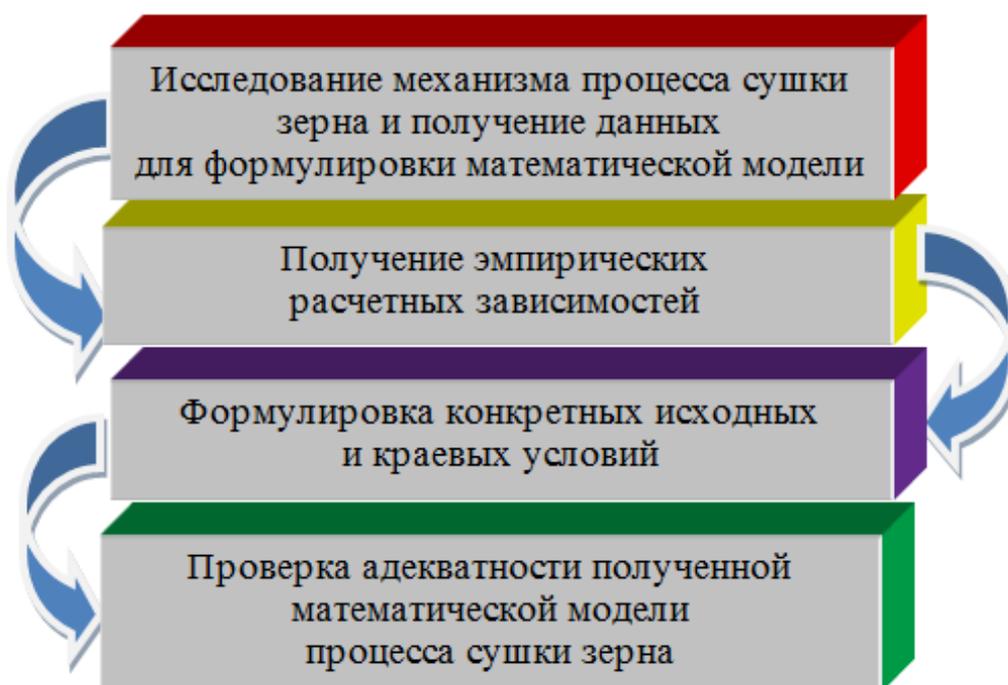


Рисунок 2.8 – Цели экспериментального метода исследования

При проведении экспериментального исследования важно:

- а) определить минимально необходимое число опытов и правильно поставить эксперимент; при решении этой задачи широко применяют методы планирования многофакторных экспериментов;
- б) оценить погрешность проведения опытов и точность получаемых данных с использованием методов математической статистики;
- в) создать экспериментальные установки, которые должны быть физическими моделями будущих производственных (серийно выпускаемых) установок;
- г) обобщить экспериментальные данные с целью получения эмпирических расчетных формул.

Решение двух последних задач реализуется в третьем - синтетическом методе исследования, который базируется на теории подобия и анализе размерностей, а также на статистических методах математического планирования экспериментов.

Рассмотрим примерную схему проведения экспериментального исследования процессов сушки, в которой сочетаются этапы исследования и вопросы проектирования зерносушильной установки (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Этапы экспериментального исследования

Приведенную схему применяют при разработке и создании новых оригинальных конструкций зерносушильных установок. Если речь идет о модернизации действующих установок или разработке новых конструкций установок, реализующих известный способ сушки, количество этапов экспериментальных работ может быть соответственно сокращено.

Получаемые при экспериментальном исследовании расчетные зависимости имеют вид корреляционных или регрессионных соотношений между входными и выходными величинами, которые носят частный характер и справедливы для сравнительно узкой области изменения параметров модели.

Синтетический метод исследования объединяет аналитический и экспериментальный методы исследования. Как было сказано, он базируется на методах обобщенного анализа (теории подобия и методе анализа размерностей) и на математических методах планирования экспериментов.

Теория подобия позволяет сократить число переменных в рассматриваемых задачах за счет перехода к удобным и легко интерпретируемым безразмерным комплексам (критериям или числам подобия) и, кроме того, определяет условия и искомые параметры при проведении экспериментальных исследований. При исследовании выбирают функциональную форму эмпирического уравнения в критериальном виде, стремясь ввести необходимое количество параметров и коэффициентов, чтобы в дальнейшем, определив их численные значения из экспериментальных данных, обеспечить необходимую точность расчетов по формуле.

При этом возможно результаты (закономерности), полученные экспериментальным путем на пилотной установке, перенести на промышленную установку, если соблюдены условия однозначности, определяемые третьей теоремой подобия. Этот метод нашел широкое применение в инженерной практике.

Теория подобия относится к явлениям, характеризующимся постоянством свойств изучаемого объекта во времени, так как кинетические коэффициенты, учитывающие эти свойства (теплофизические, массообменные, термодинамические, структурно-механические, физико-химические и пр.), рассматриваются в критериях подобия как константы. В реальных процессах эти коэффициенты

обычно изменяются.

В приложении А представлены основные критерии подобия процесса сушки зерна и их физический смысл.

Для получения данных критериев подобия необходимы уравнения математического описания процесса, а для выявления функциональной связи между ними - большой объем экспериментальных исследований, хотя бы на пилотной установке. Если математическое описание процесса отсутствует, то критерии могут быть получены методом анализа размерностей.

Дальнейшим шагом в развитии синтетических экспериментально-аналитических методов расчета является применение методов математического планирования экспериментов, позволяющих получить уравнение регрессии между входными и выходными параметрами, описывающее изучаемый процесс.

При анализе процесса методом кибернетической системы или методом «черного ящика» исследуют реакции процесса на различные стандартные возмущения. Достаточно представительный набор реакций дает возможность отнести рассматриваемый процесс к одному из хорошо изученных классов объектов, что позволяет, используя метод аналогий, подобрать форму эмпирического уравнения, хорошо описывающего ход исследуемого процесса, и определить его коэффициенты с помощью математической статистики.

Этот метод в своем первоначальном виде оказался весьма эффективным лишь при решении задач расчета оптимальных условий ведения процесса применительно к имеющемуся типу оборудования, на котором эти уравнения были получены.

Большим шагом в развитии экспериментально-аналитических методов расчета явилась идея совмещения методов теории подобия и математического планирования эксперимента, т. е. получение уравнений регрессии в виде функциональной связи между обобщенными переменными. Этот подход в настоящее время получает все большее применение.

Однако при всей его простоте трудности, связанные с расчетом переменных режимов обработки, коррелирующих с изменением текущих свойств объекта, до последнего времени оставались непреодолимыми, так как существующие методы планирования эксперимента позволяют получить уравнения регрессии, описывающие процесс только в статике. Если же разбить процесс на ряд зон, в каждой из которых рассматривать процесс сушки в статике за счет осреднения кинетических параметров по зонам, то в этом случае применение методов планирования эксперимента оправдано. Чем больше зон, тем выше точность получаемых результатов.

Применение метода аналогий характерно для современного этапа развития науки и техники как эффективного средства решения актуальных научных и практических задач.

В расчетах кинетики и особенно динамики процесса сушки зерна широко используют аналогию процессов тепломассообмена и тепломассопереноса.

Практическое использование методов аналогии при исследовании и рас-

чете процессов сушки является сложной задачей, так как использование данных, полученных на пилотной модельной установке, к проектированию и расчету промышленной установки связано с трудностями масштабного перехода. Это, в частности, обусловлено различной гидродинамической обстановкой, которая может быть создана в натуре и модели. Так, известно, что одним из условий однозначности является равенство соответствующих критериев. На практике часто проектируют многосекционные установки, состоящие из отдельных секций, размеры которых соответствуют пилотной модели.

Рассмотрим некоторые критериальные уравнения (уравнения подобия), полученные методами обобщенного анализа, которые используются в расчетах процессов сушки зерна и зерносушильных установок.

При конвективной сушке коэффициент теплообмена (теплоотдачи) a_T определяют по критерию Нуссельта:

$$Nu = f[Re, Gr, Pr, (u/u_{к1})], \quad (2.11)$$

где Re , Gr , Pr - критерии Рейнольдса, Грасгофа и Прандтля; $u/u_{к1}$ - критерий (симплекс), введенный П.Д. Лебедевым, выражающий отношение среднего влагосодержания материала в любой момент времени к среднему критическому влагосодержанию $u_{к1}$.

В первый период сушки, когда $u > u_{к1}$, критерий Nu при постоянном аэродинамическом режиме можно считать постоянной величиной.

Таким образом, в первый период сушки на величину a_T могут оказать влияние только величины, входящие в выражение для критерия Нуссельта:

$$Nu = a_T l / \lambda,$$

где a_T - коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°С); l - линейный характерный размер высушиваемого материала, определяют вдоль направления движения агента сушки, м; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С),

и, в частности, характерный размер l , который уменьшается в результате усадки материала при сушке.

Так как $Nu = \text{const}$, то при уменьшении l a_T увеличивается. Действительно, размеры зерна изменяются именно в первый период сушки. Для зерновых продуктов поверхность теплообмена F , так же как и величина l , уменьшается. Таким образом, a_T и F изменяются в противоположных направлениях. Во многих случаях изменение a_T и F за первый период сушки незначительно; поэтому с большой степенью приближения можно считать, что при неизменных параметрах агента сушки произведение $a_T F (t_c - t_{гп})$, а следовательно, и скорость сушки остаются постоянными. Здесь t_c и $t_{гп}$ соответственно температура в сушильной установке и температура греющей поверхности, °С.

Период постоянной скорости сушки заканчивается в тот момент, когда влажность на поверхности материала становится равной максимальной гигроскопической. Это приводит к интенсификации углубления зоны испарения внутрь материала. При этом также прекращается охлаждающее действие процесса испарения на поверхность высушиваемого материала, и температура этой поверхности стремится к температуре среды сушильной камеры t_c . Вместе с тем в связи с уменьшением влагосодержания зерна ($u/u_{к1} < 1$) число Nu , а следова-

тельно, и a_T начинают уменьшаться.

Все это приводит к уменьшению количества теплоты, передаваемой от теплоносителя к высушиваемому зерну.

В самом деле, если зона испарения влаги находится внутри материала, а не на его поверхности, то влага материала из его центральных слоев доходит до зоны испарения в жидком виде, а от зоны испарения до поверхности она уже движется в парообразном состоянии. Находясь в достаточно длительном контакте со стенками пор, пар успевает прогреться до температуры стенок. Другими словами, можно принять, что с поверхности материала влага в виде пара уходит в среду сушильной камеры при температуре равной температуре греющей поверхности $t_{гп}$, которая, в свою очередь во второй период сушки выше, чем температура испарения влаги ($t_{исп}$).

Таким образом, характерной особенностью процесса во второй период сушки является убывающая (падающая) скорость. В самом начале этого периода она равна постоянной скорости первого периода; затем по мере углубления зоны испарения внутрь материала и повышения температуры его поверхности скорость сушки уменьшается, снижаясь до нуля, когда температура на поверхности становится равной температуре среды сушильной камеры. При этом влажность материала становится равной равновесной влажности, соответствующей параметрам среды сушильной камеры, и сушка прекращается.

Внутренний влагоперенос в процессах сушки описывается критериальными уравнениями, полученными А.В. Лыковым и Ю.А. Михайловым в результате аналитических и экспериментальных исследований. В частности, уравнения для поля температур и поля влагосодержаний внутри материала в процессе сушки имеют общий вид:

при граничных условиях третьего рода

$$\frac{[\theta(\xi; \tau) - \theta(\xi; 0)]}{[t_c - \theta(\xi; 0)]} = f(Lu; Bi; Ko; Pn; \varepsilon; Fo; \xi/l); \quad (2.12)$$

при граничных условиях второго рода

$$\frac{[\theta(\xi; \tau) - \theta(\xi; 0)]}{[t_c - \theta(\xi; 0)]} = f(Lu; Ki; Ko; Pn; \varepsilon; Fo; \xi/l); \quad (2.13)$$

где $\theta(\xi; \tau)$ - температура в точке зернового материала с координатой ξ в момент времени τ ; $\theta(\xi; 0)$ - то же, в начальный момент времени (при $\tau = 0$); ξ/l - безразмерная координата, которая даёт возможность анализировать процессы, протекающие в сходных точках природы и модели (l - определяющий размер высушиваемого материала);

при граничных условиях третьего рода

$$\frac{[u(\xi; \tau) - u(\xi; 0)]}{[u(\xi; 0) - u_p]} = f(Lu; Bi_m; Ko; Pn; \varepsilon; Fo_m; \xi/l); \quad (2.14)$$

при граничных условиях второго рода

$$\frac{[u(\xi; \tau) - u(\xi; 0)]}{[u(\xi; 0) - u_p]} = f(Lu; Ki_m; Ko; Pn; \varepsilon; Fo_m; \xi/l); \quad (2.15)$$

где u , u_p - соответственно влагосодержание и равновесное влагосодержание материала, кг/(кг сух. вещества).

Развернутые формулы для расчета переноса теплоты и влаги в процессе

сушки, полученные на основе аналитического решения соответствующих дифференциальных уравнений, также представлены в критериальной форме:

1) период постоянной скорости сушки:

$$\frac{(t-t_0)}{t_0} = 1 - (1 - \varepsilon)KoLu(Ki_m/Bi_m) - (1/2)\varepsilonKoLuKi_m \left(1 - x^2 + 2/Bi \right);$$

$$\frac{(u_0-u)}{u_0} = Ki_m[(\Gamma + 1)LuFo - (1/2)(1 + \varepsilonKoPnLu)(l - x^2)];$$

где $(t - t_0)$ потенциал теплопереноса, t – температура зерна на выходе из сушильной установки, °С; t_0 – температура зерна на входе в сушильную установку, °С; x – критерий, характеризующий линейный размер сушильной камеры; $x = r/l$; r – толщина зернового слоя в сушильной камере, м; Γ – фактор формы.

Для греющей поверхности, выполненной в форме пластины $\Gamma = 0$, $x = r/l$; для греющей поверхности, выполненной в форме цилиндра $\Gamma = 1$.

2) период падающей скорости сушки

$$\frac{(t-t_0)}{t_0} = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^2 B_{ki}^q Q_{ki} = f_1(Ki_m; Ki; Pn; Lu; \varepsilon; Fo);$$

$$\frac{(u_0-u)}{u_0} = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^2 B_{ki}^m Q_{ki} = f_2(Ki_m; Ki; Pn; Lu; \varepsilon; Fo);$$

В зависимости от способа и режима процесса сушки те или иные критерии тепло- и массопереноса приобретают доминирующее значение.

Выводы

Непрерывное совершенствование конструкций зерносушильной техники, интенсификация режимов работы с одновременным улучшением качества готового продукта и минимизацией удельных затрат энергии на процесс испарения влаги из зерна в конечном итоге, разработка и внедрение средств автоматического управления существенно усложняют методы расчёта структуры и параметров зерносушильных установок при их проектировании. Применение методов моделирования даёт возможность существенно снизить сроки создания установок для сушки зерна, а также повысить эффективность их функционирования.

Установленные требования и критерии, предъявляемые к созданию зерносушильной техники, а также основные зависимости по моделированию процесса сушки зерна позволят разработать новые зерносушилки, эффективные с точки зрения получения качественного готового продукта при минимальных затратах энергии.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА

Процесс сушки зерна является не только теплофизическим, но и технологическим процессом, в характере протекания которого решающую роль играет форма связи влаги с высушиваемым материалом.

Основой теории сушки зерна являются закономерности переноса теплоты и влаги в зерновке при взаимодействии её нагретыми газами, с горячими поверхностями, а также в процессах облучения тепловыми и электромагнитными волнами при наличии фазовых превращений.

Теория сушки зерна является одним из разделов науки о тепло- и массообмене. В процессе сушки зерна происходят структурно-механические, технологические и биохимические изменения свойств высушиваемого материала. Изменение этих свойств обусловлено изменением форм связи влаги с зерном и её частичным удалением путем испарения.

Приведённые теоретические исследования имеют цель установить количественные и качественные связи между параметрами, изменяющимися в процессе сушки зерна.

3.1 Основы статики и кинематики процесса сушки зерна

В статике процесса сушки зерна рассматривают изменения, в результате которых наступает равновесное состояние влажного материала, т. е. прекращается внешний обмен влагой между материалом и воздухом. Влажность материала, соответствующую состоянию равновесия, является равновесной влажностью ω_p .

Равновесное состояние высушиваемого материала может быть достигнуто путем поглощения водяного пара из окружающего воздуха (сорбции) или же путем испарения влаги из материала (десорбции).

Условия протекания процессов сорбции и десорбции подробно приведены в главе 2 монографии.

Зерно по своей структуре является капиллярнопористым телом. При этом удаление влаги из подобных тел сопровождается нарушением её связи с высушиваемым материалом, на что затрачивается энергия. В приложении Б представлена классификация форм связи влаги с высушиваемым материалом по основным признакам. Следует отметить, что сушка зерна в основном затрагивает физико-механическую связь влаги с материалом и частично физико-химическую.

Равновесная влажность, ω_p высушиваемого зерна зависит от парциального давления пара в воздухе p_n , а, следовательно, и от его относительной влажности φ , так как

$$\varphi = p_n / p_n^*$$

где p_n^* - давление насыщенного пара при данной температуре, Па.

Подобные зависимости для зерна графически можно представить в виде плавных кривых S-образной формы. Если кривая получена в результате увлажнения материала, то ее называют изотермой сорбции; если кривая получена в результате испарения воды из материала - изотермой десорбции. Изотермы

сорбции и десорбции несколько не совпадают (при $\varphi = \text{const}$ ω_p сорбции меньше, чем ω_p десорбции) - явление сорбционного гистерезиса.

На рисунке 3.1 представлена изотерма десорбции (кривая равновесной влажности), типичная для процесса сушки зерна, как капиллярно-пористого коллоидного материала. Каждая точка этой кривой соответствует равновесному состоянию материала при определенной влажности воздуха. При изменении влажности воздуха равновесие нарушается. Так, например, при относительной влажности воздуха φ_1 высушиваемый материал имеет равновесную влажность ω_1 .

Если же влажность воздуха увеличится до значения φ_2 , то равновесное состояние нарушится, влажность материала начнет возрастать за счет сорбции влаги из воздуха. Равновесие восстановится лишь при новой равновесной влажности зерна ω_2 , соответствующей влажности воздуха φ_2 .

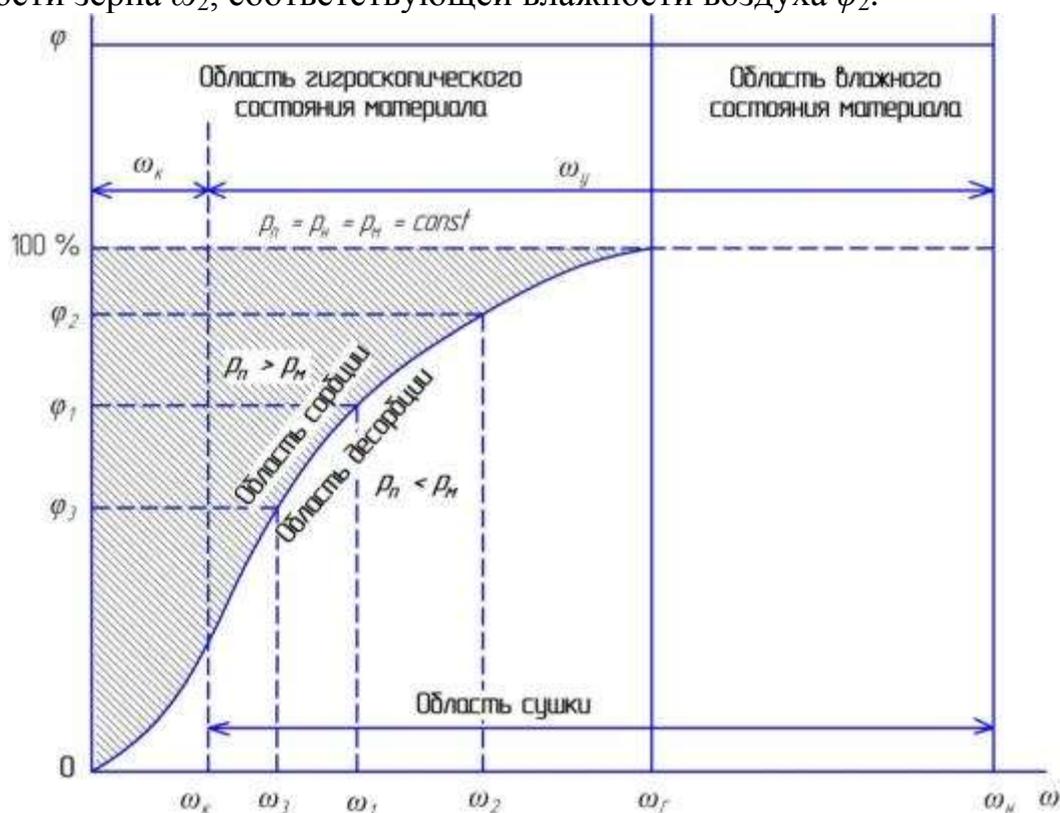


Рисунок 3.1 – Изотерма десорбции:

φ – относительная влажность воздуха, %; ω_n , ω_g , ω_k – начальная, гигроскопическая и критическая (конечная) влажности зерна соответственно, %; ω_y – удаляемая влага, %; p_n и p_m – парциальное давление пара в окружающем воздухе и у поверхности зерна соответственно, Па; p_n – давление насыщенного пара, Па

Зерно может поглощать влагу путем сорбции из окружающего воздуха лишь до гигроскопической влажности ω_g , под которой понимают равновесную влажность материала при полном насыщении воздуха ($\varphi = 100\%$). Дальнейшее увлажнение зерна происходит лишь при непосредственном его контакте с водой [13, 55].

При понижении влажности воздуха до φ_3 влажность материала уменьшится до ω_3 вследствие десорбции влаги из материала. Обезвоживание зерна

путем десорбции влаги происходит до тех пор, пока не удалится вся свободная влага. Критическая влажность материала ω_k (конечная равновесная влажность) соответствует наличию в зерне лишь связанной влаги, которую нельзя удалить путем десорбции.

Таким образом, кривая равновесной влажности (изотерма десорбции) разделяет площадь графика на две части: верхнюю, заключенную между кривой, осью ординат и прямой $\varphi = 100\%$, её называют областью сорбции; нижнюю, ограниченную кривой, осью абсцисс и прямыми $\omega = \omega_r$ и $\omega = \omega_k$, - областью десорбции.

Характерна на этом графике гигроскопическая точка ($\omega = \omega_r, \varphi = 100\%$): слева от неё располагается область гигроскопического, справа - область влажного состояния материала.

Область от ω_n до ω_k (ниже изотермы десорбции) называют областью сушки. Так как при сушке зерна нагретым воздухом с определенными параметрами (влажность воздуха, температура и скорость движения) можно удалить не всю влагу, а только довести высушиваемый материал до равновесной влажности ω_p , вводят понятие удаляемой влаги, максимальное количество которой можно определить из выражения:

$$\omega_y^{\max} = \omega_n - \omega_k.$$

На равновесную влажность зернового материала существенное влияние оказывает температура воздуха (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Зависимость равновесной влажности зерна ржи от температуры агента сушки при конвективном способе теплоподвода [43]

Температура нагрева агента сушки $t, ^\circ\text{C}$	Равновесная влажность $\omega_p, \%$ при влажности воздуха $\varphi, \%$				
0	10,8	13	17,6	21,42	27,32
20	10,16	12,59	16,7	20,29	26,33
30	9,75	12,12	16,06	19,69	24,26

Как следует из таблицы 3.1, при возрастании температуры агента сушки равновесная влажность зерна уменьшается, а при уменьшении - увеличивается.

Внутренний и внешний тепло-, массообмен в процессах тепловой обработки зерна – процесс сложный, многокомплексный, представляющий значительные трудности для экспериментального исследования, поэтому изучен недостаточно.

Одним из надежных методов изучения механизма перемещения массы внутри зерна в процессе его сушки и тепловой обработки является исследование полей влагосодержания и температуры. Особенности процесса, зависящего не только от вида и качества обрабатываемого зерна, но и от способа его обработки выявляет детальное описание и изучение кривых сушки и скорости сушки.

Под кинетикой процесса сушки обычно понимают изменение среднего влагосодержания $u(\tau)$ и средней температуры зерна $t_{\text{зср}}$ с течением времени. Эти закономерности кинетики процесса сушки позволяют рассчитать количество испаренной влаги из зерна и расход теплоты, затрачиваемой на сушку.

Сушка - процесс нестационарный, т. е. и влажность, температура материала и скорость его обезвоживания изменяются во времени. В теории кинетики

сушки зерна эти изменения принято иллюстрировать графически, в виде кривых сушки (в координатах влажность материала - время), кривых скорости сушки (в координатах скорость сушки - влажность материала) и температурных кривых (в координатах температура материала - влажность материала).

Данные для построения таких графиков получают при сушке небольших партий зерна, определяя в соответствующие моменты времени его влажность и температуру.

При этом такие параметры, как температуру, скорость и относительную влажность агента сушки при конвективной сушке, или температуру греющей поверхности при контактной сушке поддерживают постоянными.

Влажность зерна в процессе сушки обычно находят расчетным путем по убыли массы влаги. Для этого через определенные промежутки времени взвешивают высушиваемое зерно.

Скорость сушки - это изменение влажности высушиваемого зерна в единицу времени (dw/dt , %/ч). Кривые скорости сушки обычно строят методом графического дифференцирования по кривым сушки. Скорость сушки в данный момент времени определяют как тангенс угла наклона касательной ($\text{tg } \psi$), проведенной через точку кривой сушки (рисунок 3.2), соответствующую определенной влажности зерна.

Вначале процесса влажность материала уменьшается незначительно по кривой линии AB : он интенсивно прогревается (рисунок 3.2). Продолжительность прогрева зависит от размеров высушиваемого зерна и от режима сушки. Так, для мелкозерновых культур при жестких режимах стадия прогрева настолько кратковременна, что ее на кривой сушки практически не обнаруживают.

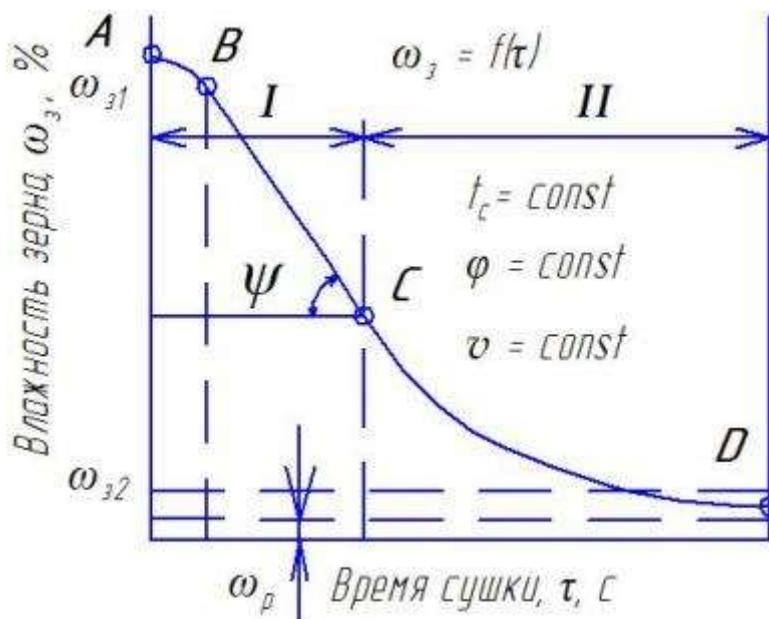


Рисунок 3.2 – Кривая скорости сушки:

ω_3 – влажность зерна, %; (индексы 1 и 2 – соответственно параметры зерна до и после сушки); t_c – температура в сушильной установке, °С; φ – относительная влажность воздуха в сушильной установке, %; v – скорость движения воздуха в сушильной установке, м/с

По мере прогрева зерна испарение влаги из него все более усиливается, и далее влажность изменяется по прямой линии BC . Это – первый период сушки. Он характерен линейным законом изменения влажности материала. После достижения некоторого значения влажности (так называемая первая критическая влажность, точка C на рисунке 3.2) процесс испарения замедляется. С этого момента времени и до конца процесса сушки влажность зерна уменьшается по кривой линии. Это второй период сушки. В конце процесса кривая сушки приближается к линии равновесной влажности ω_p . При ее достижении сушка прекращается.

Интерпретировать процесс сушки также можно с помощью кривых сушки, характеризующих изменение скорости сушки в зависимости от изменения влажности зерна (рисунок 3.3 а) и разового влагосъёма (рисунок 3.3 б).

Так, в стадии прогрева скорость сушки увеличивается от 0 до максимального значения N^c .

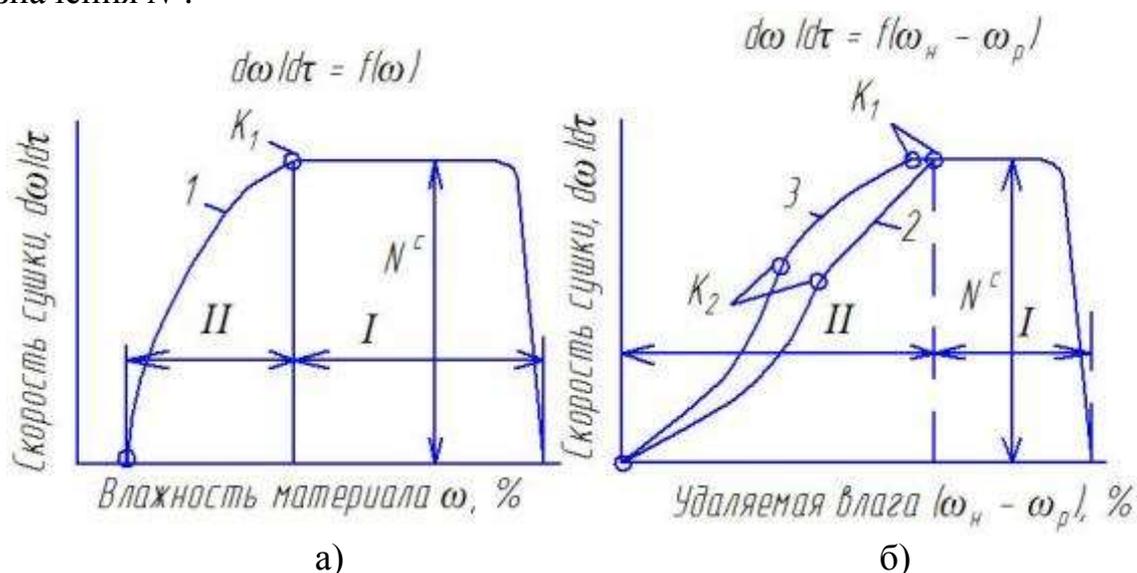


Рисунок 3.3 – Кривые сушки:

1 – коллоидные материалы (прессованное макаронное тесто, крахмал);
2, 3 – сложные системы – коллоидные капиллярно-пористые материалы (зерно, хлеб)

На протяжении первого периода (I) скорость сушки постоянна, поэтому его называют периодом постоянной скорости сушки. Затем, начиная от первой критической влажности, на протяжении всего второго периода скорость сушки снижается. Второй период (II) поэтому называют периодом падающей (убывающей) скорости сушки. При достижении равновесной влажности скорость сушки равна нулю.

Различные материалы имеют разную форму кривой в периоде убывающей скорости сушки. Ее форма зависит от структуры материала, его размеров, форм связи влаги с ним, от режима сушки. Некоторые материалы имеют сравнительно простую форму кривой скорости сушки во втором периоде. Другие имеют более сложную форму кривой (на ней имеется вторая критическая точка K_2). Зерно относят к материалам, для которых процесс сушки описывается кривой 2. Она вначале имеет вид прямой, а затем, после второй критической точки

K_2 кривая обращена выпуклостью к оси абсцисс.

Изменение средней (интегральной) температуры материала t в процессе сушки характеризует температурная кривая (рисунок 3.4).

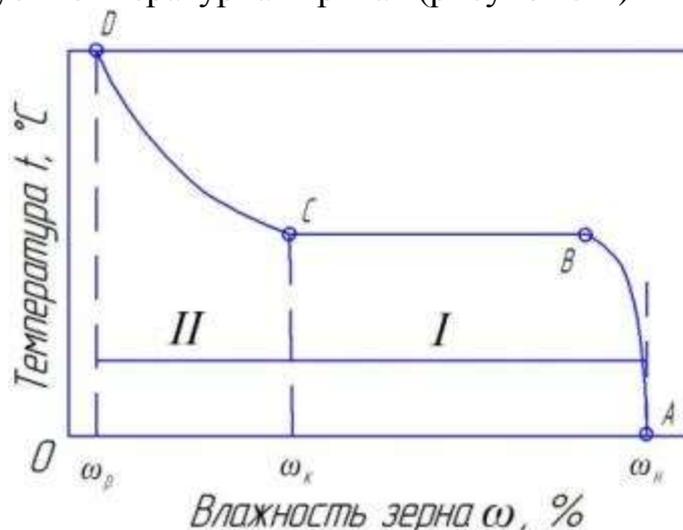


Рисунок 3.4 – Температурная кривая

В начале процесса в стадии прогрева зерна температура его поверхности быстро повышается, достигая температуры мокрого термометра психрометра. В дальнейшем на всем протяжении первого периода сушки температура материала постоянна. В этот период испарение влаги происходит с наибольшей скоростью. Вся теплота, сообщаемая зерну, расходуется на испарение влаги. Таким образом, первый период сушки характерен не только постоянством скорости сушки, но и постоянством температуры высушиваемого зерна.

Начиная с первой критической точки, температура высушиваемого зерна повышается, при достижении равновесной влажности она будет равна температуре агента сушки. В соответствии с закономерностями изменения скорости сушки и температуры зерна второй период сушки называют периодом убывающей скорости сушки и возрастающей температуры материала.

Первая критическая точка разделяет весь процесс сушки на два периода, отличающихся между собой и скоростью сушки, и температурой зерна. Таким образом, в первом и втором периодах создаются разные условия сушки зерна, по-разному влияющие на его качество.

Критическая влажность зерна ω_k , колеблется в довольно широких пределах (17...24 %) и зависит от таких факторов, как начальная влажность зерна, режим сушки и т.д.

Чем выше начальная влажность, тем больше скорость сушки в первый период, но тем он короче, т. е. больше первая критическая влажность. Такая закономерность может быть объяснена различной связью влаги с белками и крахмалом зерна. Гигроскопичность белкового комплекса зерна значительно выше гигроскопичности крахмала, а скорость сушки белков соответственно ниже. Поэтому в более влажном зерне влага связана белками прочнее. В результате удаления влаги из крахмала скорость сушки в начале процесса значительна, однако первый период быстро заканчивается, и характер процесса определяется сушкой белкового комплекса. Поскольку сушка белков происхо-

дит с меньшей скоростью, наступает период убывающей скорости.

При сушке зерна нередко весь процесс протекает с убывающей скоростью испарения влаги. Это наблюдается и при современных интенсивных способах и режимах сушки, а также при сушке зерна сравнительно невысокой влажности.

Подбором соответствующих режимов можно обеспечить протекание процесса с постоянной скоростью сушки. Если, например, при конвективной сушке, после наступления периода убывающей скорости сушки прервать подачу агента сушки и осуществить отлёжку зерна, то после возобновления сушки снова наблюдается период постоянной скорости влагоотдачи.

Для совместного анализа описанных выше закономерностей процесса сушки зерна удобно пользоваться совмещенным графиком кривой сушки 1, скорости сушки 2 и температурной кривой 3 (рисунок 3.5). Здесь и средняя влажность зерна, и его температура, и скорость сушки представлены как функции времени.

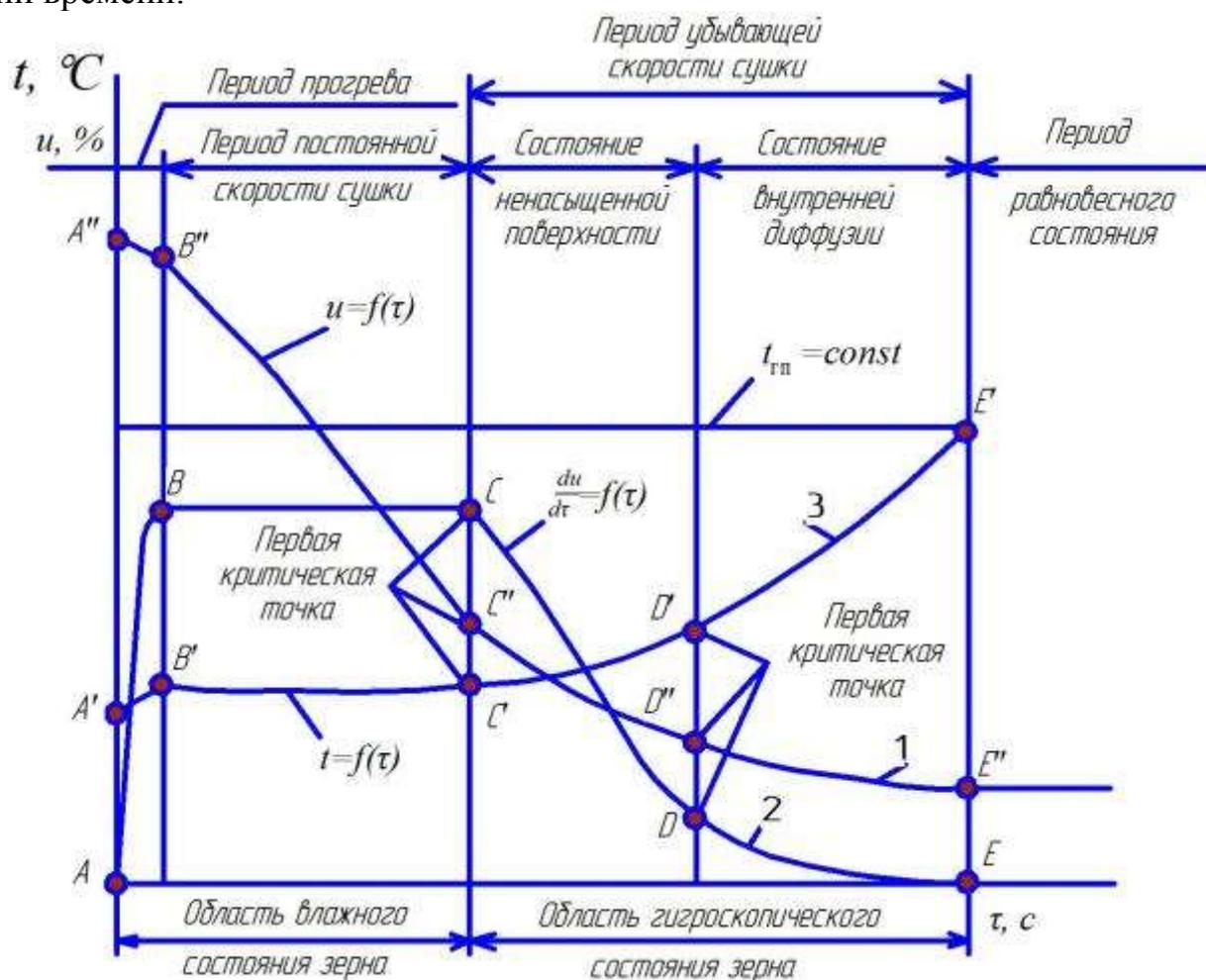


Рисунок 3.5 – Кинетика процесса сушки зерна (обозначения в тексте)

Выбор способа передачи теплоты зерну обуславливается, в основном, свойствами зерна как объекта сушки и характеризуется двумя основными требованиями: чтобы высушенный продукт имел заданное стандартами качество, и чтобы эффективность процесса сушки была как можно выше.

В связи с этим возникает большой интерес к более подробному изучению контактной сушки зерна в тонком слое, которая успешно может быть реализо-

вана в установках с небольшой пропускной способностью.

Рассмотрим отдельные периоды процесса контактной сушки единичного зерна, находящегося в неподвижном состоянии относительно греющей поверхности (рисунок 3.5).

В начальный период процесса сушки (период прогрева) температура зерна повышается (участок A'B'), что сопровождается испарением влаги (участок A"B") с его поверхности и возрастанием скорости сушки (участок АВ). В этом периоде испарение влаги с поверхности зерна создает перепад влагосодержания между поверхностным и последующими слоями, что вызывает обусловленное диффузией перемещение влаги из слоев зерна, непосредственно контактирующих с греющей поверхностью, к поверхностным слоям. Однако при контактной обработке наличие температурного градиента внутри зерна осложняет механизм переноса влаги, способствуя ее перемещению внутрь зерна. Это обусловлено влиянием перепада температуры (температура поверхности зерна больше температуры центральных слоев, и под влиянием термодиффузии влага перемещается по направлению потока теплоты - внутрь зерна).

Пар, проникающий внутрь зерна, встречаясь с еще не нагретым слоем, конденсируется вблизи контактного слоя и передает свою теплоту следующему слою, за счет чего последний прогревается более интенсивно.

Таким образом, следующие порции пара все глубже проникают внутрь зерна и тоже конденсируются. В конце начального периода зерно прогревается до температуры, при которой пар, не конденсируясь, преодолевает сопротивление его переносу, доходит до внешней поверхности зерна и покидает его. Происходит переход к периоду постоянной скорости сушки, который характеризует примерно постоянная скорость сушки (участок ВС). При этом теплота, сообщаемая зерну, расходуется в основном на испарение влаги, и влажность зерна уменьшается по прямой линии B"C". Температура зерна увеличивается незначительно по прямой B'C'.

В этот период на границе соприкосновения слоя влажного зерна с греющей поверхностью кожуха установки возникают два одновременно протекающих и взаимосвязанных процесса.

1. Контактный теплообмен между греющей поверхностью и влажным зерном, который сопровождается переносом влаги. Такой теплообмен наиболее эффективен в период постоянной скорости сушки, поскольку он протекает при достаточно хорошем и устойчивом тепловом контакте зерна с поверхностью, обеспечивающем интенсивную передачу теплоты теплопроводностью.

2. Процесс изменения агрегатного состояния влаги (парообразования), который сопровождается поглощением теплоты фазового превращения и переносом теплоты внутри зерна паром.

Интенсивность тепло,- массообмена, происходящего в зоне парообразования на границе соприкосновения зерна с греющей поверхностью, зависит от температуры греющей поверхности, а также от плотности зерна, его влагосодержания, силе прижатия к поверхности и пористости зерна.

Важной особенностью периода постоянной скорости контактной сушки

является наличие в обрабатываемом зерне двух зон парообразования: одной – у греющей поверхности кожура и другой – у открытой поверхности зерна.

Пар, образовавшийся у греющей поверхности и переносимый через зерно, удаляется с открытой поверхности вместе с паром, образовавшимся вблизи нее. Следовательно, интенсивность сушки определяют потоки пара, образовавшегося в двух зонах парообразования, благодаря чему интенсивность процесса контактной сушки в первый период выше, чем интенсивность обычной конвективной сушки.

Однако существование устойчивых зон парообразования возможно только в том случае, если в самих зонах и внутренних слоях сосредоточено достаточное количество влаги. Поэтому перепад влагосодержания внутри зерна является следствием переноса влаги изнутри зерна в виде жидкости, как к его открытой поверхности, так и к зоне парообразования у греющей поверхности сушильной установки. Такое перемещение жидкости вызывается непрерывным уменьшением влагосодержания в периферийных слоях зерна, что обусловлено фазовым превращением, происходящим в зонах парообразования, и выделением образовавшегося пара в окружающую среду.

Таким образом, в периоде постоянной скорости сушки влага внутри зерна переносится в виде пара и в виде жидкости, причем в контактном слое наблюдается дифференциация их потоков. Поток жидкости направлен из контактного слоя к зоне парообразования в этом слое, а поток пара – из зоны парообразования к открытой поверхности зерна.

После завершения периода постоянной скорости зерно достигает определенной влажности (первая критическая точка С), и наступает период убывающей скорости сушки. В начале этого периода на поверхности зерна появляются отдельные не насыщенные влагой участки, а зона парообразования у греющей поверхности смещается вглубь зерна. При этом контактная поверхность «подсыхает», температура зерна снижается, и подвод к нему теплоты от греющей поверхности резко сокращается. Наступает состояние ненасыщенной поверхности зерна. В этот период влага перемещается только к открытой поверхности, поэтому скорость сушки зависит в большей степени от условий внешней диффузии.

После достижения влажности зерна второй критической точки D происходит внутренняя диффузия влаги. Вся поверхность зерна становится сухой, а интенсивность испарения определяется только внутренней диффузией влаги.

Период равновесного состояния наступает, когда скорость сушки будет равна нулю (точка E). Однако на практике этот период отсутствует, поскольку тепловую обработку завершают до его наступления.

Распределение влагосодержания в процессе сушки неравномерно и несимметрично: в контактном слое, прилегающем к греющей поверхности, влагосодержание на протяжении всего процесса минимально, в центральных слоях – максимально, а у открытой поверхности влагосодержание ниже, чем в центральных слоях, но выше чем в контактном слое. Такой характер распределения влаги – результат особого механизма переноса вещества при контактной сушке.

Поле температур характерно в том отношении, что температура слоя зерна непрерывно убывает по мере удаления от греющей поверхности.

Таким образом, анализ кривых кинетики нагрева и сушки, скорости сушки и температурных кривых позволяет сделать следующие выводы:

1) процесс сушки протекает в несколько периодов: период прогрева, период постоянной скорости сушки (первый период) и период убывающей скорости сушки (второй период), при этом последний делится на две части;

2) первый период сушки, составляющий до 60 % общей длительности процесса, характеризуется примерно постоянной скоростью сушки, неизменной или медленно понижающейся со временем средней температурой зерна, которая значительно выше температуры мокрого термометра психрометра и зависит от температуры греющей поверхности;

3) второй период контактной сушки характеризуется убывающей скоростью сушки, наличием второй критической точки, резко выраженной на кривой скорости сушки и температурной кривой в отличие от конвективной сушки;

4) температурные кривые и кривые кинетики нагрева при контактной сушке имеют специфическую форму, отличную от известных кривых, соответствующих другим методам сушки, что объясняется особенностями механизма тепломассообмена контактной сушки;

5) сравнение соответствующих кривых контактной и конвективной сушки показывает, что характер этих процессов одинаков, а имеющиеся качественные и количественные различия между ними определяются методом подвода теплоты (граничными условиями), что отражается на внутреннем тепломассопереносе.

Таким образом, в процессе сушки происходит непрерывный подвод влаги из внутренних слоев зерна к его поверхностным слоям, вследствие чего уменьшается влажность, как на поверхности, так и во внутренних слоях зерна. В простейшем случае испарение происходит на поверхности материала, а образующийся пар диффундирует в окружающую среду. В более сложных случаях испарение происходит внутри зерна, в определенной его зоне или во всей массе, причем перемещение влаги внутри зерна происходит как в виде жидкости, так и в виде пара. Скорость перемещения влаги внутри зерна зависит от формы связи её с зерном.

3.2 Механизм воздействия теплоты на зерно

При воздействии на зерно теплоты, независимо от способа её подвода в нём происходят качественные преобразования. Любое изменение содержания влаги в зерне в процессе сушки сказывается на его физико-химических свойствах и термодинамических характеристиках состояния, а через них и на технологических свойствах зерна. Не меньшее значение имеет также изменение температуры, в результате которого изменяется состояние поглощённой тканями зерна влаги, степень её «связанности». Чем заметнее в результате данного процесса изменились свойства влаги, тем существеннее это сказалось на свойствах биополимеров (белков, углеводов, липидов). Также не стоит забывать, что зерно представляет собой живой организм, в обычных условиях хранения находя-

щийся в состоянии покоя. Жизнедеятельность зерна, которая проявляется при содержании влаги в зерне и температурных условиях, близких к оптимальным для его прорастания.

Рассмотрим подробнее аспекты указанных изменений.

При конвективном способе подвода теплоты наибольшее влияние на процесс оказывают параметры сушильного агента, толщина и состояние зернового слоя.

Механизм конвективной сушки зерна в элементарном слое, когда создаются равные условия теплового нагрева для каждого зерна можно представить следующей зависимостью.

$$\frac{t_B - t}{t_B - t_0} = \exp\left(-\frac{a_T f_G}{c\rho} \tau\right) + \frac{k_c^r (\omega_H - \omega_K)}{(a_T f_G - k)(t_B - t_0)} \exp\left[\left(-\frac{a_T f_G}{c\rho} - k\right) \tau\right],$$

где t_B , t и t_0 – соответственно температура агента сушки, температура зерна на выходе из сушильной камеры и температура зерна на входе в сушильную камеру, °С; a_T – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°С); f_G – удельная поверхность зерна, м²/кг; c – удельная теплоёмкость зерна, Дж/(кг·°С); ρ – насыпная плотность зерна, кг/м³; τ – время сушки, с; k – коэффициент сушки; r – теплота парообразования, Дж/кг; ω_H , ω_K – соответственно начальная и конечная влажности зерна, %.

При сушке зерна в слое, толщина превышающей толщину единичного слоя внешний теплообмен состоит из передачи теплоты от агента сушки к зерну конвекцией, излучением и теплопроводностью от одной частицы слоя к другой.

При этом систему уравнений, определяющую теплообмен при сушке в толстом слое можно представить в следующем виде:

$$c_B \left[\frac{dt_B}{d\tau} + v \frac{t_B}{dz} \right] = \alpha (t_B - t_0),$$

$$c_3 \frac{dt_3}{d\tau} = \alpha (t - t_0),$$

где c_B , c_3 – соответственно удельная теплоёмкость агента сушки и зерна, Дж/(кг·°С); v – скорость движения агента сушки, м/с.

Проведённые исследования В.А. Афанасьева [20] о влиянии конвективного теплового воздействия на зерно ячменя позволили выявить следующую закономерность. В проводимых исследованиях за основной критерий оценки режимов тепловой обработки зерна была выбрана степень декстринизации крахмала. При этом на всех исследуемых параметрах агента сушки содержание декстринов в зерне возрастает с увеличением длительности обработки и достигает наибольшего значения при температуре агента сушки 300 °С и экспозиции сушки 150 с. Исходная влажность зерна оказывает влияние на декстринизацию крахмала и перевариваемость протеина при повышении температуры (таблица 3.1).

Также выявлено, что степень декстринизации крахмала зерна ячменя вначале возрастает с увеличением его исходной влажности до 13 %...16 %, а при увеличении влажности зерна до 22 %...32 % степень декстринизации уменьшается (рисунок 3.6).

Таблица 3.1 – Влияние конвективного нагрева на изменение содержания декстринов в зерне ячменя [20, 104]

Исходная влажность зерна, %	Содержание декстринов, %	Сырой протеин, %	Перевариваемый протеин, %	Коэффициент перевариваемости протеина, %
13	25,4	12,12	9,29	77
16	39,7	12,38	9,3	75
22	33,8	12,6	9,51	75
32	24	12,11	9	74

Наибольшее улучшение углеводного комплекса ячменя достигается при его конвективном нагреве агентом сушки с температурой 300 °С и экспозиции теплового воздействия $\tau = 2 \dots 2,5$ мин. При этом переваримость крахмала максимальная.

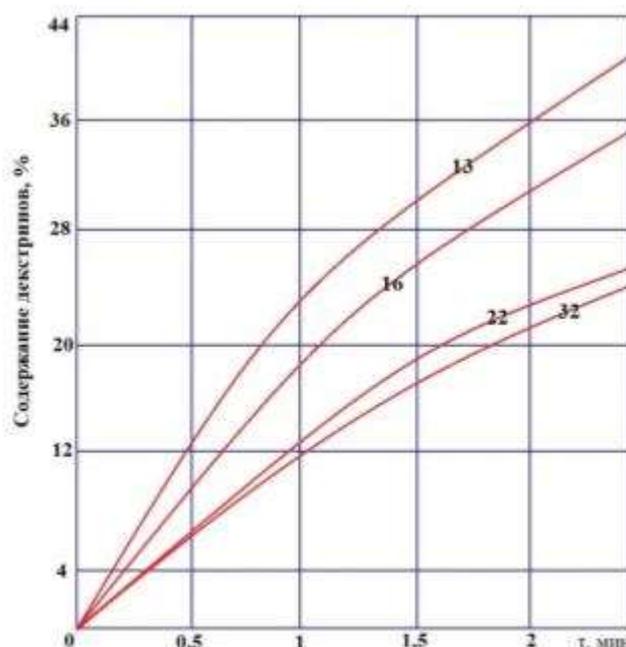


Рисунок 3.6 – Изменение содержания декстринов в зерне ячменя различной влажности

При контактном способе теплопередачи нагрев зерна можно рассматривать как процесс передачи теплоты посредством теплопроводности. Интерпретировать данный процесс можно следующей зависимостью:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (3.1)$$

где $\theta = [t_{(z,\tau)} - t_n]$ – разность между переменной температурой зерна $t_{(z,\tau)}$ и температурой греющей поверхности t_n ; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Решение уравнения 3.1 (по Лыкову А.В.) имеет вид:

$$\frac{d\theta_{(z,\tau)}}{dz} = \frac{a_T}{\lambda} (t_n - t_0) \exp \left[\frac{a_T}{\lambda} \left(z + \frac{a_T}{\lambda} \right) \right] \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{a_T}{\lambda} \sqrt{a\tau} \right) \right], \quad (3.2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; z – толщина высушиваемого зернового слоя, м.

На рисунке 3.7 представлено изменение градиента температуры во времени и по толщине слоя согласно зависимости 3.10.

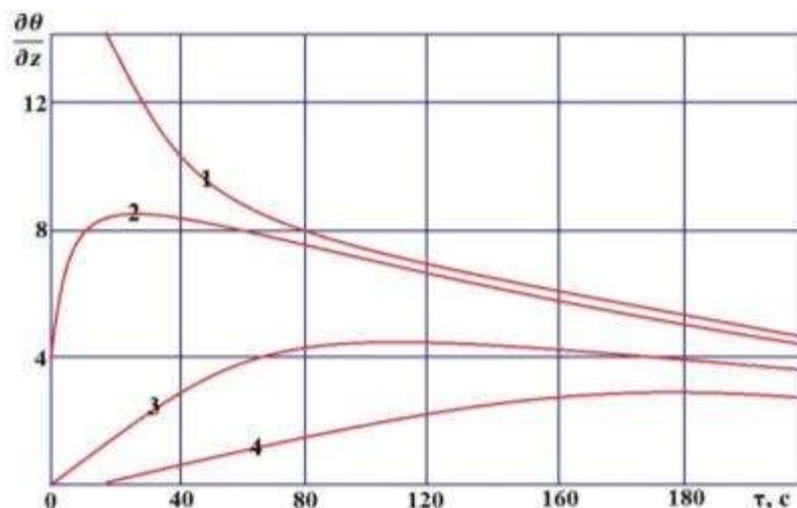


Рисунок 3.10 – Изменение градиента температуры при контактном способе нагрева зерна:

1 – ($z = 0$ мм) - единичный слой высушиваемого материала, 2 – ($z = 15$ мм), 3 - ($z = 45$ мм), 4 - ($z = 75$ мм)

Градиент температуры достигает максимального значения в начальный период у поверхности зернового слоя и затем убывает в направлении увеличения толщины слоя высушиваемого материала. Следовательно, при контактном способе подвода теплоты нагрев зернового слоя толщиной, превосходящей толщину единичного слоя, протекает медленно, хотя значение коэффициента теплопередачи в данном случае превосходит значение аналогичного показателя при конвективной сушке. Это и предопределяет эффективность применения контактного способа передачи теплоты при сушке зерна в единичном слое. Важным фактором при этом является необходимость осуществления постоянного движения и перемешивания зернового слоя, чтобы избежать локальных перегревов зерна, находящегося в непосредственном контакте с греющей поверхностью [108].

Исследования процесса термического обеззараживания зерна в лабораторных и производственных условиях позволили прийти к следующим выводам:

- смертность клещей или долгоносиков зависит, главным образом, от температуры нагрева зерна и продолжительности выдержки (отлежки) его при этой температуре;

- применение режимов конвективной тепловой обработки с температурой агента сушки 110...150 °С и нагрева зерна до 45...50 °С при снижении его влажности до 14 % без отлежки не обеспечивает полной гибели вредителей в подвижной стадии развития и особенно их яиц;

- сушка с отлежкой зерна, зараженного как в явной, так и в скрытой формах, обеспечивает гибель вредителей в подвижной стадии развития и их яичек без снижения качества продовольственного зерна (таблица 3.2);

- при сушке зараженного зерна в сушилках (без отлежки) рекомендуется придерживаться высших пределов температуры и особенно тщательно добиваться равномерного нагрева;

- при тепловом обеззараживании следует принимать меры, предупреждающие повторное заражение просушенного зерна;
- во избежание рассеивания клещей по территории необходимо оборудовать сушилки приспособлениями для улавливания пыли и отходов, уносимых с отработавшими газами.

Таблица 3.2 – Режимы сушки заражённого зерна в зерносушилках конвективного типа

Вредители	Пшеница, овёс, кукуруза			Рожь, ячмень, подсолнечник
	температура нагрева зерна, °С			
	45	47	50	55...60
	Продолжительность жизни в минутах			
Клещи (мучной, удлинённый, волосатый) во всех стадиях развития, кроме гипопуса	55	27	24	10
Гипопусы* волосатого клеща	–	–	120	20...90
Хищные клещи	–	–	120	45...60
Амбарные долгоносики во всех стадиях развития	–	–	60	10...25

* - непитающаяся нимфальная стадия у некоторых видов клещей, которая служит для расселения или переживания неблагоприятных условий.

В процессе термического обеззараживания под влиянием высокой температуры большинство микроорганизмов, находящихся на зерне, погибает, в результате чего стойкость его при хранении повышается.

Уменьшение микрофлоры при термическом обеззараживании более заметно в зерне с повышенной исходной влажностью. Исследованиями состава микрофлоры свежесобранной пшеницы до и после ее термического обеззараживания было установлено, что общее количество микроорганизмов на зерне уменьшается главным образом за счет бактерий.

На обработанном зерне остается незначительное количество микроорганизмов, относящихся к числу наиболее термоустойчивых спор, которые не погибают во время термической обработки (обеззараживания).

3.3 Механизм тепловлагообмена в процессе сушки зерна

Одной из характерных особенностей процесса контактной сушки в первом периоде является постоянство скорости сушки и температуры в каждом сечении зерна. Эта особенность обусловлена тем, что при контактной сушке теплота сообщается влажному зерну только от греющей поверхности и передается к открытой поверхности зерна с последующей отдачей ее в окружающую среду. Количество теплоты, полученное от греющей поверхности, в первом периоде сушки расходуется на испарение влаги и на потери теплоты лучеиспусканием и конвекцией открытой поверхностью зерна в окружающую среду. Доля этих потерь в общем расходе теплоты невелика и составляет максимально 3...5 %, так что ими можно пренебречь [36, 81, 141].

Необходимо отметить, что наличие диффузии скольжения в макрокапиллярах зерна вызывает циркуляцию парообразной влаги в замкнутых порах, что приводит к перераспределению влаги, в результате чего влага частично перемещается от поверхностных слоев внутрь зерновки.

Изучение процесса сушки зерна может быть ограничено рассмотрением

явлений перемещения влаги внутри материала, парообразования и диффузии паров влаги с поверхности зерна в окружающий воздух. Данные процессы в основном раскрывают механизм процесса сушки.

3.3.1 Перемещение влаги внутри зерновки

Сушка, нагрев и охлаждение зерна - типичные нестационарные процессы тепло,- влагопереноса, т. е. такие процессы, которые сопровождаются изменением температуры и влажности зерна, а также плотности потоков теплоты и влаги во времени. При сушке в зерне возникают градиенты температуры и влагосодержания, под действием которых происходит перенос теплоты и влаги внутри зерна, появляются термические и объемные напряжения.

В общем случае механизм удаления влаги из зерна при конвективной сушке схематически может быть представлен следующим образом (рисунок 3.6).

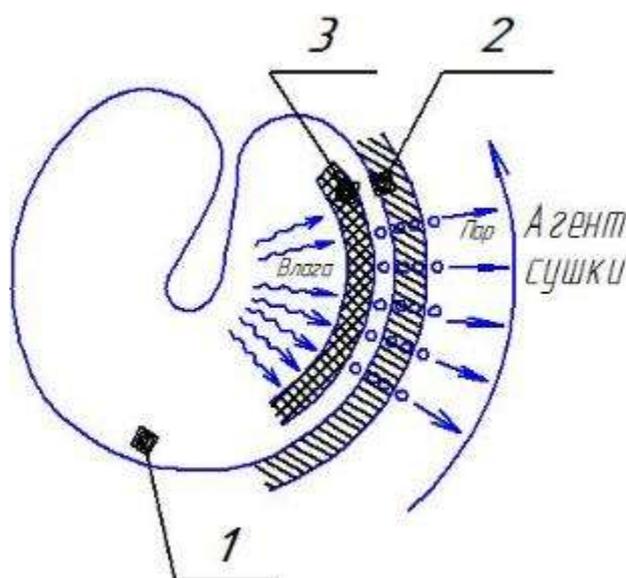


Рисунок 3.6 – Схема механизма удаления влаги при сушке зерна:

1 – зерновка; 2 – пограничный слой; 3 – зона испарения

Вдоль поверхности влажной зерновки движется агент сушки с определенными параметрами. Теплота от агента сушки конвективным способом передается зерновке; ее поверхность нагревается, и часть влаги, находящейся у поверхности, испаряется. В результате по толщине зерновки создаются перепады влагосодержания, температуры и давления, под действием которых влага непрерывно подводится к поверхности, где и испаряется. Молекулы пара диффундируют через пограничный слой и поглощаются агентом сушки. Обязательное условие процесса удаления влаги с поверхности зерновки - это наличие разности между парциальным давлением у ее поверхности p_m и в агенте сушки p_n .

Влага испаряется не с поверхности зерновки, а из некоторой зоны 3, расположенной в периферийной части зерновки. Более того, положение этой зоны не остается неизменным: она постепенно перемещается внутрь зерновки. Начало углубления зоны испарения многие исследователи связывают с началом удаления из зерна связанной влаги. При углублении зоны испарения поверх-

ность зерновки остается обезвоженной, лишенной защитного фактора и поэтому может нагреваться до высоких температур.

Интенсификация переноса теплоты и влаги способствует ускорению сушки, но возникающие при этом напряжения могут привести к ухудшению качества зерна - образованию трещин, раскалыванию, снижению выхода целой крупы и т. д. Поэтому важно установить оптимальный режим сушки.

Тепловлагоперенос при сушке зерна подчиняется общим законам тепло-массопереноса и является его частным случаем. Теоретической основой для них служит единая теория тепло-массопереноса. На основе этой теории процессы переноса теплоты и влаги в зерне могут быть описаны аналитически. Такое описание позволяет определить температуру и влагосодержание в любой точке зерна или зернового слоя в каждый конкретный момент времени, найти их градиенты и изменение во времени, рассчитать плотность потоков теплоты и влаги, прогнозировать дальнейшее развитие этих процессов. Вместе с тем при математическом описании процессов в зерне и зерновом слое возникают определенные трудности, так как зерно неоднородно по структуре и составу. Вследствие этого различные участки зерна имеют разную проводимость и обладают анизотропными свойствами.

Зерно имеет сложную геометрическую форму, а зерновой слой представляет собой дисперсную среду, в которой зерновки ориентированы в пространстве произвольно. Кроме того, процессы переноса теплоты и влаги внутри зерна взаимосвязаны и влияют один на другой, а теплофизические и влагообменные свойства зерна зависят от его влажности и температуры, вследствие чего дифференциальные уравнения тепло-влагопереноса носят нелинейный характер.

Закон перемещения влаги внутри высушиваемого зерна в общем виде можно выразить следующим образом:

$$q_m = -(a_m \rho_0 \nabla u + a_m^T \rho_0 \nabla t + a_{mp} \nabla P), \quad (3.3)$$

где q_m – интенсивность потока внутренней влаги в зерне, кг/(м²·ч); a_m – коэффициент влагообмена, Вт/(м²·кг); ρ_0 – плотность абсолютно сухой части материала, кг/м³; a_m^T – коэффициент термодиффузии, (°C)⁻¹, ∇u – градиент влагосодержания, кг/(кг сухого вещества·м); ∇t – градиент температуры, °C/м; a_{mp} – коэффициент влагообмена, отнесенного к ∇P , Вт/(м²·кг); ∇P – градиент давления, Па/м.

Знак минус в уравнении 3.3 означает, что движение влаги направлено в сторону уменьшения влажности (от центра к поверхности зерновки).

Аналогично переносу электрических зарядов или переносу теплоты движение жидкости и пара во влажном зерне происходит от высшего потенциала к низшему. Совокупность точек высушиваемого материала, имеющих одинаковые потенциалы переноса влаги, образует изопотенциальные (изотермические, изоконцентрационные и т. д.) поверхности, а пересечение этих поверхностей плоскостью - изопотенциальные линии (рисунок 3.7).

Движущей силой процесса, потенциалом переноса влаги внутри материала является общее давление внутри высушиваемого материала, осмотическое

давление, парциальное давление пара и др. Однако основными законами внутреннего массообмена (перемещение влаги внутри материала), служат законы влагопроводности и термовлагопроводности.

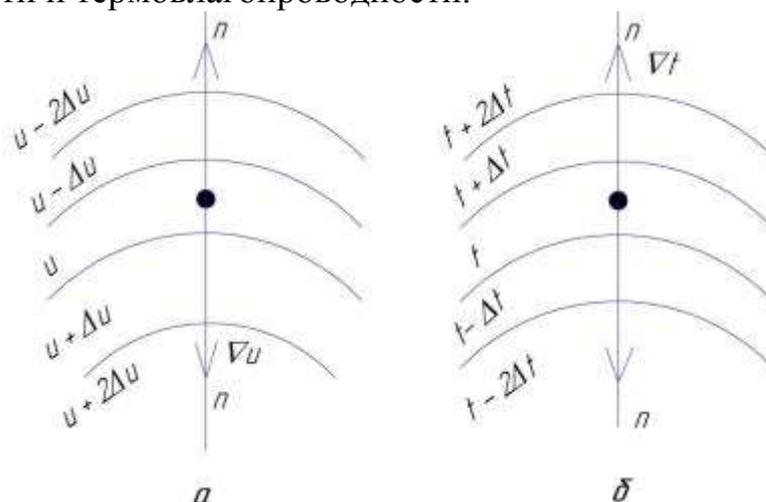


Рисунок 3.7 - Изопотенциальные линии тепло-, влагопереноса:

а - изоконцентрационные (соединяющие точки с одинаковой концентрацией влаги (влажностью)); б - изотермические (соединяющие точки с одинаковой температурой); u – влагосодержание зерна, кг влаги/(кг сух. вещества); t – температура нагрева зерна, °С; ∇u – градиент влагосодержания, кг влаги/(кг сух. вещества·м); ∇t – градиент температуры, °С/м.

На рисунке 3.7 изображены изоконцентрационные и изотермические линии, построены нормали ($n - n$) к ним, показаны направления векторов градиента влагосодержания (∇u), градиента температуры (∇t). Под градиентом концентрации влаги понимают векторную величину, численно равную приращению влагосодержания на единицу длины нормали и направленную по нормали в сторону большей концентрации влаги. Градиент температуры - вектор, численно равный изменению температуры на единицу длины нормали и направленный по нормали в сторону увеличения температуры. Плотность потока влаги - вектор, направленный в сторону, противоположную градиенту концентрации влаги (в случае влагопроводности), или градиенту температуры (в случае термовлагопроводности), и численно равный количеству влаги, переносимой в единицу времени через единицу изопотенциальной поверхности.

Учитывая явления влагопроводности и тепло-, и влагопроводности, основной закон внутреннего влагопереноса можно записать следующим образом:

$$i = i_u + i_t = -k\rho_0\nabla u - k\rho_0\nabla t; \quad (3.4)$$

$$i = -k\rho_0(\nabla u + \nabla t); \quad (3.5)$$

где i , i_u и i_t - плотности потока влаги общая, вызванная действием градиента концентрации влаги и действием градиента температуры соответственно, кг/(м²·ч); k - коэффициент влагопроводности материала, м²/ч; δ - коэффициент тепло-, влагопроводности материала, (°С)⁻¹; ρ_0 - плотность абсолютно сухого материала, кг/м³; ∇u - градиент концентрации влаги (влажностности), кг/(кг сухого вещества·м), ∇t – градиент температуры, °С/м.

Коэффициент тепло-, влагопроводности $\delta = \nabla u/\nabla t$ показывает, какой гра-

диент концентрации влаги создается в высушиваемом материале при градиенте температуры 1 град./м. Знак «-» в формулах (3.4, 3.5) показывает, что i_u и i_t направлены в одну, а ∇u и ∇t в противоположную сторону.

Если градиент концентрации влаги ∇u и градиент температуры ∇t направлены в противоположные стороны при влажности наружных слоев материала меньшей, чем внутренних (а температура наоборот), то ∇u и ∇t в формулах (3.4, 3.5) будут иметь противоположные знаки, а направление общего потока влаги определит градиент, создающий более интенсивный поток влаги. Направление потока влаги чаще определяет градиент концентрации влаги, а градиент температуры создает лишь дополнительное сопротивление перемещению влаги внутри материала от более влажных слоев к менее влажным. Такое явление наблюдают, например, при конвективном способе сушки [35, 95, 142...147].

При контактном способе передачи теплоты градиент температуры является основной характеристикой процесса сушки.

При нагреве зерна инфракрасными лучами влагопроводность и термовлагопроводность направлены также в разные стороны, но процесс сушки протекает иначе. Вследствие быстрого и сильного нагрева поверхности материала в начальный период сушки термовлагопроводность оказывается более интенсивной, чем влагопроводность, и, следовательно, влага перемещается в направлении потока теплоты. Перемещение влаги от поверхности к центру зерна, вызывающее увеличение градиента концентрации влаги, постепенно увеличивает «тормозящее» действие влагопроводности и, наконец, приводит к равновесному состоянию – теплопроводность полностью уравнивается влагопроводностью. Начиная с этого момента, влажность центральных слоев остается постоянной, а сушка происходит путем испарения влаги из материала с постепенным углублением зоны испарения.

При электрическом способе сушки токами высокой частоты (поток теплоты движется от внутренних слоев материала к поверхности) температурный градиент и градиент концентрации влаги направлены в одну сторону и, следовательно, потоки влаги, обусловленные влаго-, и теплопроводностью, совпадают, что, в конечном счете, значительно увеличивает скорость сушки.

Тепловые свойства любого материала определяют его теплофизические характеристики: удельная теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность и коэффициент теплоусвоения (тепловой активности).

Процесс переноса теплоты внутри твердого тела, не осложненный массопереносом и без внутренних источников теплоты, можно охарактеризовать дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье [26, 96]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 t, \quad (3.6)$$

где t - температура, °С; τ – время, с; $\frac{\partial \theta}{\partial \tau}$ - скорость изменения температуры, °С/с; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); ρ - плотность, кг/м³; c - удельная теплоёмкость, кДж/(кг·°С); $\frac{\lambda}{\rho c} = a$ – коэффициент температуропроводности, м²/с;

x, y, z – текущие координаты, м; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор второй производной (оператор Лапласа), м⁻².

Из данной зависимости следует, что скорость изменения температуры, прогрева или охлаждения зерна прямо пропорциональна его температуропроводности. Напомним, что дифференциальное уравнение (3.6), выраженное в частных производных, имеет бесчисленное множество решений. Чтобы решить задачу однозначно, т. е. выделить из множества одно единственное решение, в каждом случае формулируют конкретные условия однозначности (краевую задачу): геометрические, граничные, начальные и др. Уравнение (3.6) можно решить методом разделения переменных, интегральных преобразований Лапласа, Фурье или другим операционным методом, численным методом, методами моделирования и т.д. Для упрощения вычислений в отдельных случаях зерновой слой можно условно рассматривать как сплошное тело.

3.3.2 Испарение влаги с поверхности зерна

Скорость процесса сушки при внешней диффузии, т. е. движение влаги в виде водяных паров с поверхности влажного зерна в окружающую среду зависит в основном от разности давления паров, находящихся на поверхности высушиваемого зерна и в окружающей среде. При наличии внутренней диффузии, т. е. движения влаги в виде воды или водяных паров из внутренних слоёв зерновки к её поверхности, скорость процесса во многом зависит от вида и свойств высушиваемой зерновой культуры. При сушке обычно имеют место оба вида диффузии влаги, однако в отдельные периоды процесса степень влияния каждого из этих видов различна.

В первый период сушки (рисунок 3.2), когда поверхность высушиваемого зерна насыщена влагой и процесс ее удаления подчиняется законам испарения влаги со свободной поверхности, скорость перемещения влаги из глубинных слоёв к поверхности зерна не влияет на скорость сушки. Следовательно, скорость сушки в первый период определяется интенсивностью испарения влаги с поверхности зерна. Так как в этот период вся теплота, подводимая к зерну, затрачивается на испарение влаги, то скорость сушки определяют скоростью подвода теплоты или, в конечном счете, условиями протекания теплообмена [103].

Скорость передачи теплоты I_Q от стенки кожуха сушильной установки к материалу зависит от коэффициента теплообмена a_T площади поверхности контакта подвергающихся сушке частиц материала с греющей поверхностью F ($F = \sum_{i=1}^n F_i$) и разности температур греющей поверхности и высушиваемого зерна $t_{гп} - t_3$ (температурного напора). Это выражается уравнением Ньютона:

$$I_Q = \alpha F (t_{гп} - t_3), \quad (3.7)$$

где I_Q – интенсивность передачи теплоты от стенки кожуха сушильной установки к высушиваемому материалу, Дж/ч; a_T коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°С); F – площадь поверхности контакта подвергающихся сушке частиц материала с кожухом, м²; $t_{гп}, t_3$ – соответственно температура кожуха и материала, °С.

Коэффициент теплообмена (теплоотдачи) a_T характеризует интенсивность протекания процесса и зависит от свойств материала, формы и размеров его частиц, скорости движения агента сушки и др. Коэффициент теплоотдачи a_T при конвективном способе подвода теплоты зависит от условий обтекания частиц материала агентом сушки. Для установок с контактным способом подвода теплоты основным фактором, влияющим на a_T , является площадь поверхности контакта частиц высушиваемого материала с кожухом (поверхности теплообмена F). Чем меньший объём материала приходится на единицу его поверхности, тем благоприятнее его форма для более интенсивного теплообмена. При измельчении материала площадь теплообмена, естественно, возрастает. Однако при сушке материала в неподвижном слое не вся поверхность его частиц участвует в процессе теплообмена. Увеличение активной площади теплообмена до величины, близкой к общей поверхности материала, достигается сушкой во взвешенном состоянии или в кипящем (псевдооживленном) слое, а также при сушке зерна единичном слое, особенно при вращении частиц материала.

Следовательно, повышения скорости передачи теплоты от кожуха сушильной установки к материалу можно добиться использованием установки для тепловой обработки зерна контактного типа, в которой зерно движется с вращением слоем, толщина которого не превышает размеры единичного зерна, а греющая поверхность представляет собой бесконечную плоскость (цилиндр).

Процесс тепловлагообмена между влажным зерном и агентом сушки настолько сложен, что невозможно оценить его количественную сторону, используя рассмотренные положения. Действительно, толщина пограничного слоя у поверхности влажного зерна и закономерности изменения в пограничном слое градиентов скорости, температуры агента сушки и парциального давления пара при непрерывном их изменении трудноопределимы. Далее, толщина и местоположение зоны испарения не поддаются учету. Наконец, при сушке зерна интенсивность удаления влаги в значительное время процесса сушки определяют не параметры агента сушки, а внутреннее перемещение влаги. При этом интенсивность потока влаги непрерывно уменьшается вследствие удаления из зерновки все более прочно связанной влаги. Кроме того, зерновки имеют сложную форму, различное строение и химический состав на отдельных участках. Это сильно осложняет получение числовых значений тепловых и влагообменных коэффициентов.

В связи с этим при определении интенсивности влагообмена с окружающей средой при сушке решают задачу внутренней теплопроводности с учетом граничных условий в зоне испарения.

Упрощённо принимают, что испарение влаги с поверхности зерна аналогично её испарению со свободной поверхности.

Интенсивность испарения влаги при этом, кг/(м²·ч):

$$q_m = a_m (p_M - p_{II}) \frac{p_0}{p}, \quad (3.8)$$

где a_m – коэффициент влагообмена между поверхностью влажного материала и окружающим воздухом, Вт/(м²·кг), зависящий главным образом от скорости и

направления движения воздуха; p_M и p_{II} - парциальные давления водяного пара соответственно у поверхности материала и в окружающей среде (воздухе), Па; p_0 - нормальное атмосферное давление, равное $1,013 \cdot 10^5$ Па; p - барометрическое давление, Па.

Так как при контактном способе сушки температурный градиент невелик, и влага внутри материала перемещается вследствие влажопроводности, на основании закона сохранения вещества (количество влаги, подведённой в единицу времени к поверхности материала, равно количеству влаги, диффундирующей в единицу времени с поверхности материала в окружающую среду), можно записать:

$$k\rho_0(\nabla u)_{II} F = a_m(p_M - p_{II}) \frac{p_0}{p} F = \frac{dm_{вл}}{d\tau}, \quad (3.9)$$

где F – площадь поверхности испарения, m^2 ; $(\nabla u)_{II}$ - градиент влагосодержания у поверхности высушиваемого зерна, $кг/(кг \text{ сухого вещества} \cdot м)$; $m_{вл}$ - масса испарённой влаги, $кг$.

Уравнение (3.9) выражает в общем виде зависимость скорости сушки от скорости перемещения влаги у поверхности высушиваемого зерна и скорости диффузии пара через пограничный слой.

Скорость испарения влаги со свободной поверхности, $кг/(м^2 \cdot ч)$, на основе исследований сушильной лаборатории ВТИ (Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт) можно определить по следующей формуле (для случая движения воздуха параллельно поверхности зерна):

$$\frac{W}{F} = c(p_n - p_n) \frac{5,7 \cdot 10^{-3}}{b}, \quad (3.10)$$

где W - количество испарённой влаги, $кг/ч$, с поверхности F , m^2 ; p_n и p_n - соответственно давление водяных паров в окружающей среде и давление насыщенных водяных паров, Па; b - коэффициент испарения жидкости; c - коэффициент,

$$c = 22,9 + 17,4 v, \quad (3.11)$$

или

$$c = 26,3 + 21,7 \gamma v \quad (3.12)$$

где v - скорость движения воздуха у поверхности зерна, $м/с$; γ - плотность воздуха, $кг/м^3$.

При движении воздуха перпендикулярно к поверхности зерна скорость испарения увеличивается примерно вдвое против величины, вычисленной по формуле.

Таким образом, скорость испарения влаги со свободной поверхности увеличивается:

- с увеличением разности парциальных давлений насыщенных паров и паров в окружающем воздухе;
- с увеличением скорости движения омывающего воздуха;
- с уменьшением общего (барометрического) давления окружающего воздуха.

При испарении влаги со сводной поверхности частицы верхнего слоя вла-

ги при определённой температуре, обладая большой подвижностью, отрываются от поверхности и проникают (диффундируют) через пограничный слой воздуха в окружающую среду. Часть из них, сталкиваясь с частицами воздуха, отбрасывается назад и поглощается водой.

Чем выше температура нагрева, тем подвижнее частицы и тем быстрее происходит процесс диффузии этих частиц в окружающую среду. Это видно и из формулы (3.10), так как при повышении температуры возрастают величины p_n и $(p_n - p_n)$. При увеличении давления окружающего воздуха число столкновений увеличивается, и большое количество частиц пара отбрасывается назад, что замедляет процесс испарения. Наконец, чем больше скорость движения воздуха, тем тоньше пограничный слой воздуха, и тем легче происходит диффузия паров в окружающую среду.

Установим зависимость между температурой материала и скоростью сушки.

Теплота, необходимая для испарения влаги и нагревания влажного материала, поступившая от кожуха сушильной установки к частице материала в единицу времени может быть определена из выражения 3.7.

При этом часть теплоты затрачивается на испарение влаги, а часть - на прогрев влажного материала:

$$Q = \int_{(v)} c\gamma \frac{dt}{d\tau} dv + r \frac{dm_{вл}}{d\tau}, \quad (3.13)$$

где r – теплота парообразования, Дж/кг.

При влажности агента сушки больше гигроскопической теплота десорбции может быть принята равной скрытой теплоте испарения.

Интегрирование происходит по объёму V единичного слоя высушиваемого зерна. Преобразуем соотношения (3.7) и (3.13):

$$Q = F \cdot \frac{1}{F} a_T (t_k - t_m) dF = F a_T (t_{zn} - t_z)_{cp}, \quad (3.14)$$

где индекс cp указывает на то, что взято среднее значение выражения $a_T (t_{zn} - t_z)$ по поверхности зерна.

$$Q = V \cdot \frac{1}{V} \int_{(v)} c\gamma \frac{\partial t}{\partial \tau} + r \frac{dm_{вл}}{d\tau}. \quad (3.15)$$

Обозначим через c и γ средние значения удельной теплоемкости и плотности по объёму, вынося их за знак интеграла, получим:

$$Q = c\gamma V \frac{dt_{cp}}{d\tau} + r \frac{dm_{вл}}{d\tau}, \quad (3.16)$$

где t_{cp} - средняя по объёму температура зерна, находящегося в сушильной камере, °С; V – объём зерна до сушки, м³.

$$\gamma = \frac{m_c}{V_0}, \quad (3.17)$$

где m_c - масса абсолютно сухого материала, кг; V_0 – объём зерна после сушки, м³.

Если пренебречь усадкой материала в процессе сушки, т. е. $V = V_0$, то последнее соотношение можно переписать так:

$$Q = \left(c + \frac{m_{\text{вл}}}{100}\right)m_c \frac{dt_{\text{cp}}}{d\tau} + rm_{\text{вл}}. \quad (3.18)$$

Количество теплоты (3.7) равно количеству теплоты (3.17), т. е.

$$r \frac{dm_{\text{вл}}}{dt} + \left(c + \frac{m_{\text{вл}}}{100}\right)m_c \frac{dt_{\text{cp}}}{d\tau} = a_T(t_{\text{zn}} - t_3)F. \quad (3.19)$$

После преобразования получим:

$$r \frac{d\omega}{d\tau} \frac{1}{100} + \left(c + \frac{\omega}{100}\right) \frac{dt_{\text{cp}}}{d\tau} = \frac{a_T F}{m_c} (t_{\text{zn}} - t_3)_{\text{cp}}, \quad (3.20)$$

где ω – влажность зерна, %.

Соотношение (3.20) является основным уравнением сушки; оно связывает скорость сушки $\left(\frac{d\omega}{d\tau}\right)$, скорость прогрева $\left(\frac{dt_{\text{cp}}}{d\tau}\right)$ и температуру поверхности высушиваемого зерна t_3 .

Если известна зависимость между температурой и влажностью, то уравнение (3.20) можно переписать в виде:

$$\left[r + (100c + m_{\text{вл}}) \frac{dt_{\text{cp}}}{dm_{\text{вл}}} \right] \frac{d\omega}{d\tau} \cdot \frac{1}{100} = \frac{a_T F}{m_c} (t_{\text{zn}} - t_3). \quad (3.21)$$

Чтобы воспользоваться уравнениями (3.20) и (3.21), необходимо определить скорость сушки, скорость прогрева и среднюю температуру на поверхности материала или градиент температуры на поверхности.

Определение скорости сушки не представляет труда, поскольку потеря массы зерна при его сушке даёт непосредственно изменение средней (интегральной) влажности в единицу времени.

Чтобы определить $(t_{\text{zn}} - t_3)$, необходимо найти t_{cp} . Пусть в каком-либо избранном направлении температура высушиваемого зерна представлена в виде:

$$t = t(x). \quad (3.22)$$

Разложим функцию $t(x)$ в ряд Маклорена и ограничимся тремя первыми членами:

$$t = t_0 + Ax + Bx^2. \quad (3.23)$$

Для одномерной симметричной задачи при граничных условиях

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0,$$

$$t(0, \tau) = t_{\text{zn}},$$

$$t(l, \tau) = t_3,$$

уравнение (3.23) примет вид:

$$t = t_{\text{zn}} + \zeta^2 (t_{\text{zn}} - t_3), \quad (3.24)$$

где $\zeta = \frac{x}{l}$ – безразмерная координата, выбираемая в соответствии с формой вы-

сушиваемой зерновой культуры.

Пусть мы измеряем температуру в m точках единичного слоя зерна, соответствующим m безразмерным координатам, т. е.

$$\begin{aligned} t_1 &= t_{zn} + \zeta_1^2(t_{zn} - t_3), \\ t_2 &= t_{zn} + \zeta_2^2(t_{zn} - t_3), \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ t_m &= t_{zn} + \zeta_m^2(t_{zn} - t_3). \end{aligned}$$

Средняя арифметическая температура:

$$t_{c.a} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_m}{m} = t_{zn} + \phi(t_{zn} - t_3), \quad (3.25)$$

где

$$\phi = \frac{\zeta_1^2 + \zeta_2^2 + \zeta_3^2 + \dots + \zeta_m^2}{m}. \quad (3.26)$$

Если $\phi = 1/3$ то $t_{c.a} = t_{cp}$, то есть при $\phi = 1/3$ средняя арифметическая температура равна средней интегральной по объёму.

При любом значении ϕ мы имеем:

$$t_{cp} = t_{zn} + \frac{1}{3\phi}(t_{c.a} - t_{zn}). \quad (3.27)$$

Температура поверхности зерна, подвергаемого сушке:

$$t_m = \frac{t_{c.a} - (1 - \phi)t_{zn}}{\phi}. \quad (3.28)$$

Поверхностный температурный градиент:

$$(\nabla t)_n = \left(\frac{\partial t}{\partial \zeta} \right)_n = \frac{2}{\phi}(t_{c.a} - t_{zn}). \quad (3.29)$$

Таким образом, зная температуру греющей поверхности и среднюю арифметическую температуру в сушильной камере, можно определить t_{cp} , t_3 и $(\nabla t)_n$, т. е. все необходимые величины, входящие в основное уравнение сушки.

Анализ уравнения (3.20) показывает, что если температура греющей поверхности постоянна ($t_{zn} = \text{const}$), и температура в сушильной камере не изменится с течением времени $\left(\frac{dt_c}{d\tau} = 0 \right)$, то скорость сушки будет постоянной:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{100a_T F}{m_c}(t_{zn} - t_3). \quad (3.30)$$

Если температура материала, включая и температуру поверхности, будет увеличиваться, то скорость сушки будет уменьшаться (период падающей скорости).

Таким образом, по температурному полю высушиваемого зернового материала можно определить скорость сушки - в этом основное преимущество уравнения (3.21). По уравнению (3.21) можно подсчитать коэффициент тепло-

обмена a_T для зерна с различной исходной влажностью. Скорость сушки берут при этом из соответствующей кривой сушки, а t_3 и t_{cp} подсчитывают по формулам и температурным кривым. Условную скорость прогрева $\frac{dt_{cp}}{d\tau}$ определяют графоаналитическим методом как тангенс угла касательной к кривой и $t_{cp} = f(\tau)$.

Результаты расчётов обычно представляют в виде графика: «коэффициент теплообмена - влажность материала» (рисунок 3.8), из которого видно, что в начале процесса сушки коэффициент теплообмена является величиной постоянной, а затем с некоторой критической точки уменьшается. Уменьшение коэффициента a_T происходит по двум причинам: вследствие повышения температуры поверхности материала (коэффициент теплообмена уменьшается с уменьшением $\Delta t = t_{гп} - t_3$) и благодаря углублению зоны испарения вглубь зернового материала (в этом случае к термическому сопротивлению пограничного слоя добавляется термическое сопротивление сравнительно сухого слоя материала, расположенного выше поверхности испарения). В пользу последнего предположения говорит то обстоятельство, что при сушке капиллярно-пористых тел уменьшение коэффициента a_T наблюдается только с момента достижения второй критической точки [145, 239...241].

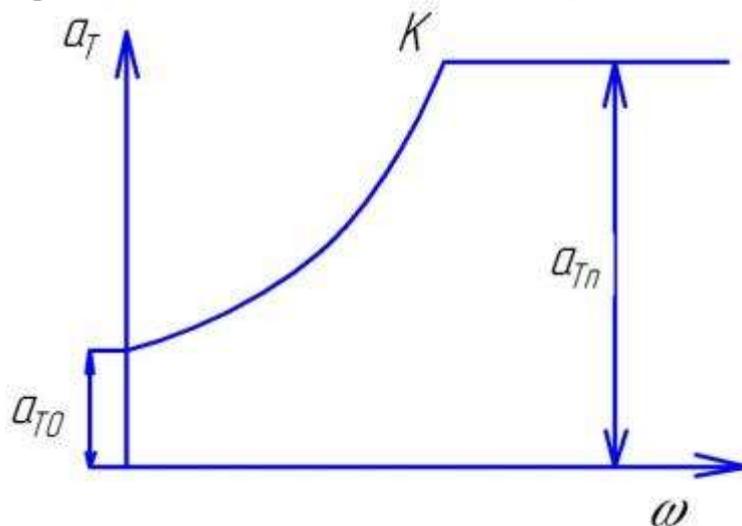


Рисунок 3.8 - Изменение коэффициента теплообмена в процессе сушки

Между первой и второй критической точкой коэффициент a_T остаётся почти постоянным, несмотря на уменьшение Δt . Если считать, что изменяется не температура поверхности материала, а температура материала, на границе раздела между зоной испарения и зоной перемещения влаги в виде жидкости, то коэффициент a_T приобретает значение коэффициента теплообмена через слой зоны испарения. В этом случае

$$\frac{1}{a_T} = \frac{1}{a_{Tn}} + \frac{\xi}{\lambda}, \quad (3.31)$$

где a_{Tn} - коэффициент теплообмена, характеризующий интенсивность теплообмена между поверхностью кожуха сушильной установки и поверхностью материала, Вт/(м²·°С); ξ - толщина слоя зоны испарения, м; λ - коэффициент теп-

лопроводности этого слоя, Вт/(м·°С) [146].

При этом можно считать, что к концу процесса сушки при жёстком режиме ($\omega_0 = 0$) t_3 будет равна t_{2n} , т. е. $t_3 = t_{cp} = t_{2n}$, $\xi = l$ (l – линейный характерный размер высушиваемого материала, определяют вдоль направления движения агента сушки, м, а коэффициент λ – коэффициенту теплопроводности сухого зерна, т. е.:

$$\lambda_0 = \frac{a_{T_0} a_{T_n} l}{a_{T_n} - a_{T_0}}, \quad (3.32)$$

где a_{T_0} , λ_{T_0} – значения данных коэффициентов для абсолютно сухого материала.

Многие исследователи получали значение коэффициента λ_{T_0} вычисленное по формуле (3.32), близко совпадающее с табличными данными коэффициента теплопроводности для сухого материала.

Рассмотрим решение уравнений тепло- и влагопереноса.

Система дифференциальных уравнений тепло- и влагопереноса во влажных материалах имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \varepsilon \frac{r}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau}; \quad (3.33)$$

где $a = \lambda/(c\gamma)$ – коэффициент температуропроводности, м²/с; ε – критерий фазового перехода; u – влагосодержание материала в любой точке, кг/(кг сух. вещества); c – удельная теплоёмкость материала, кДж/(кг·°С).

Средние интегральные по объёму значения температуры t и влагосодержания u определяются соотношениями:

$$t = \frac{1}{V} \int_{(v)} t dv; \quad u = \frac{1}{V} \int_{(v)} u dv. \quad (3.34)$$

Если считать, что коэффициенты переноса a_m , a_T и термодинамические параметры r , c , ε не изменяются по объёму высушиваемого материала, то

$$V \frac{dt}{d\tau} = a \int_{(v)} \nabla^2 t dV + V \varepsilon \frac{r}{c} \frac{du}{d\tau} = a \int_{(F)} \nabla t dF + V \varepsilon \frac{r}{c} \frac{du}{d\tau}. \quad (3.35)$$

Воспользуемся граничным условием:

$$-\lambda(\nabla t)_n + q_n(\tau) - r j_{2n}(\tau) = 0, \quad (3.36)$$

где $j_{2n}(\tau)$ – интенсивность потока влаги на поверхности зерна, кг/(м³·ч).

Уравнение (3.34) для $i = 2$ (жидкообразная влага) можно написать следующим образом:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} = -\text{div} j_2(\tau) + \varepsilon \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (3.37)$$

где ρ_0 – радиус мениска жидкости в капилляре, м.

Так как $u = u_1 + u_2$, то

$$\int_F \nabla t dF = \frac{1}{\lambda} \int_F [q_n(\tau) - r j_{2n}(\tau)] dF = \frac{1}{\lambda} \int_{(F)} q_n(\tau) dF - \frac{r}{\lambda} \int_{(v)} \text{div} j_2 dv. \quad (3.38)$$

Обозначим средний удельный поток теплоты на греющей поверхности:

$$q(\tau) = \frac{1}{F} \int_{(F)} q_{II}(\tau) dF. \quad (3.39)$$

Принимая во внимание соотношение (3.38), будем иметь:

$$V \frac{dt}{d\tau} = \frac{F}{c\rho_0} q(\tau) + \frac{rdu}{cd\tau} (1 - \varepsilon)V + \varepsilon \frac{r}{c} V \frac{du}{d\tau},$$

откуда получим:

$$c\rho_0 R_v \frac{dt}{d\tau} = rR_v \rho_0 \frac{du}{d\tau} + q(\tau). \quad (3.40)$$

В процессе сушки величина $du/d\tau$ отрицательна, поэтому будем её считать по абсолютному значению. Тогда интегральное уравнение тепло- и влагообмена будет иметь вид:

$$q(\tau) = r\rho_0 R_v \frac{du}{d\tau} + \rho_0 R_v c \frac{dt}{d\tau}, \quad (3.41)$$

где $R_v = V/F$ - отношение объёма материала к площади его поверхности, м.

Этот вывод справедлив для общего случая, когда источник влаги $\varepsilon\rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}$ будет функцией времени, т. е. можно $\varepsilon\rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}$ заменить на $I_2(\tau)$.

Интегральное уравнение (3.41) показывает, что подведённая к влажному телу теплота $q(\tau)$ затрачивается на испарение влаги - $r\rho_0 R_v \frac{du}{d\tau}$ и на его нагревание - $\rho_0 R_v c \frac{dt}{d\tau}$.

Система дифференциальных уравнений тепловлагопереноса в обобщённых переменных для одномерной задачи (неограниченная пластина или цилиндр) имеет вид [147]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(X, Fo)}{\partial Fo} = (1 + \varepsilon K_0 Pn Lu) & \left[\frac{\partial^2 T(X, Fo)}{\partial X^2} + \right. \\ & \left. + \frac{\Gamma}{X} \frac{\partial T(X, Fo)}{\partial U} \right] - \varepsilon K_0 Lu \left[\frac{\partial^2 U(X, Fo)}{\partial X^2} + \right. \\ & \left. + \frac{\Gamma}{X} \frac{\partial U(X, Fo)}{\partial X} \right]; \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U(X, Fo)}{\partial Fo} = Lu & \left[\frac{\partial^2 U(X, Fo)}{\partial X^2} + \frac{\Gamma}{X} \frac{\partial U(X, Fo)}{\partial X} \right] - Lu Pn \times \\ & \times \left[\frac{\partial^2 T(X, Fo)}{\partial X^2} + \frac{\Gamma}{X} \frac{\partial T(X, Fo)}{\partial X} \right], \end{aligned} \quad (3.43)$$

где $X = x/l$ - безразмерная координата; $T = (t - t^*)/\Delta t^*$ - безразмерная температура; $U = (u^* - u)/\Delta u^*$ - безразмерное влагосодержание; Fo - число Фурье; K_0 - критерий Коссовича; Pn - критерий Поснова; Lu - критерий инерционно-

сти; Γ - постоянный коэффициент: для пластины $\Gamma = 0$, для цилиндра $\Gamma = 1$; Δt^* и Δu^* - соответственно фиксированные значения температуры и влагосодержания.

Граничные условия можно написать в виде:

$$\frac{\partial T(1, Fo)}{\partial X} + Ki_q Fo - (1 - \varepsilon) Lu Ko Ki_m(Fo) = 0; \quad (3.44)$$

где K_i - коэффициент теплопередачи.

$$-\frac{\partial U(1, Fo)}{\partial X} + Pn \frac{\partial T(1, Fo)}{\partial X} + Ki_m(Fo) = 0; \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial T(0, \partial Fo)}{\partial X} = \frac{\partial U(0, Fo)}{\partial X} = 0. \quad (3.46)$$

Начальные условия принимаем следующие:

$$\left. \begin{aligned} U(X, 0) = U_0 = const; \\ T(X, 0) = T_0 = const. \end{aligned} \right\} \quad (3.47)$$

Решение уравнений (3.42) и (3.43) при условиях (3.44 – 3.47) имеет вид:

$$T(X, Fo) = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^2 B_{ki}^q Q_{ki}; \quad (3.48)$$

$$U(X, Fo) = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^2 B_{ki}^m Q_{ki}, \quad (3.49)$$

где B_i - критерий Био.

$$B_{1i}^q = (-1)^i \frac{1 - v_i^2}{v_1^2 - v_2^2}; \quad B_{1i}^m = (-1)^i \frac{Pn}{v_1^2 - v_2^2}, \quad (3.50)$$

где v_1, v_2, v_i – значения характеристических чисел при различных состояниях влаги, соответственно – пара, жидкости и равновесного состояния.

$$B_{2i}^q = (-1)^i \frac{(v_i^2 - 1 + \varepsilon) Ko Lu}{v_1^2 - v_2^2}; \quad (3.51)$$

$$B_{2i}^m = (-1)^i \frac{Lu(1/Lu - v_i^2) - (1 - \varepsilon) Ko Pn Lu}{v_1^2 - v_2^2}; \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned} Q_{ki} = & (\Gamma + 1) \int_0^{Fo} Ki_k(Fo^*) dFo^* + 2 \sum_{n=1}^{\infty} C_{\Gamma}^Q \Phi_{\Gamma}(\mu_n X) \times \\ & \times \exp(-\mu_n^2 v_i^2 Lu Fo) \int_0^{Fo} Ki_k(Fo)^* \exp(\mu_n^2 v_i^2 Lu Fo^*) dFo^*. \end{aligned} \quad (3.53)$$

Для неограниченной пластины $\Gamma = 0$:

$$C^Q = (-1)^n; \quad \Phi_0(\mu_n X) = \cos \mu_n X; \quad \mu_n = n\pi \quad (n = 1, 2, 3 \dots). \quad (3.54)$$

Для неограниченного цилиндра $\Gamma = 1$:

$$C^Q = \frac{1}{J_0(\mu_n)}; \quad \Phi_1(\mu_n X) = J_0(\mu_n X), \quad (3.55)$$

где C^Q - теплоёмкость теплоносителя, Дж/(кг·град); μ_n - корни характеристического уравнения $J_1(\mu) = 0$.

Решим уравнения тепло- и влагопереноса при интегральных граничных условиях.

Обозначим безразмерные температуру через T , влагосодержание - U , координату - X ($X = x/R$). Тогда дифференциальные уравнения влагопереноса для одномерной задачи будут иметь вид [145]:

$$\frac{\partial T(x, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(X, Fo)}{\partial X^2} + \frac{\Gamma}{X} \frac{\partial T(X, Fo)}{\partial X} - \varepsilon Ko \frac{\partial U(X, Fo)}{\partial Fo}; \quad (3.56)$$

$$\frac{\partial U(X, Fo)}{\partial Fo} = Lu \left[\frac{\partial^2 U(X, Fo)}{\partial X^2} + \frac{\Gamma}{X} \frac{\partial U(X, Fo)}{\partial X} \right] - Lu Pn \left[\frac{\partial^2 T(X, Fo)}{\partial X^2} + \frac{\Gamma}{X} \frac{\partial T(X, Fo)}{\partial X} \right]. \quad (3.57)$$

Задачи будем считать симметричными, т. е.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T(0, Fo)}{\partial X} = \frac{\partial U(0, Fo)}{\partial X} = 0 \\ T(0, Fo) \neq \infty; \\ U(0, Fo) \neq \infty. \end{aligned} \right\} \quad (3.58)$$

Граничные условия имеют вид:

$$\frac{\partial T(1, Fo)}{\partial X} - Bi_q [1 - T(1, Fo)] + (1 - \varepsilon) Ko Lu Ki_m (Fo) = 0; \quad (3.59)$$

$$-\frac{\partial U(1, Fo)}{\partial X} + Pn \frac{\partial T(1, Fo)}{\partial X} + Ki_m (Fo) = 0. \quad (3.60)$$

Воспользуемся приближённым уравнением кривой скорости сушки:

$$j(\tau) = \rho_0 R_v \frac{du}{d\tau} = \rho_0 R_v N (u - u_p), \quad (3.61)$$

где R_v - отношение объёма тела к его поверхности, м; N - скорость сушки в I периоде, %/ч; ρ_0 - радиус мениска жидкости в капилляре, м; u - среднее влагосодержание зерна, кг/(кг сух. вещества), определяемое по соотношению:

$$\frac{u}{\omega_0} = (1 + \Gamma) \int_0^1 X \Gamma U(X, Fo) dX \quad (3.62)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (3.56) и (3.57) при условиях (3.59) - (3.62) имеет вид:

$$T(X, Fo) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 c_{ni} \Phi_{\Gamma}(v_i, \mu_n X) \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (3.63)$$

$$U(X, Fo) = 1 + \frac{1}{\varepsilon Ko} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 c_{ni} (1 - v_i^2) \Phi_{\Gamma}(v_i, \mu_n X) \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (3.64)$$

где

$$v_1^2 = \frac{1}{2} \left[\left(1 + Ko Pn + \frac{1}{Lu} \right) + (-1)^i \sqrt{\left(1 + Ko Pn + \frac{1}{Lu} \right)^2 - \frac{4}{Lu}} \right]; \quad (3.65)$$

Таким образом, динамика процесса сушки базируется на современных представлениях тепло- влагообмена в капиллярно-пористых телах, согласно которым закономерности протекания процесса сушки различны в разных периодах. Эти качественные изменения происходят скачкообразно (наличие критиче-

ских точек) и обусловлены скрытым количественным изменением механизма перемещения влаги.

3.4 Аналитические аспекты процесса тепловлагопереноса при контактной сушке зерна

В качестве примера рассмотрим задачу о нагреве зерна, соприкасающегося с греющей поверхностью зерносушилки (контактный способ передачи теплоты). Под теплофизическими характеристиками зернового слоя в этом случае следует понимать его среднестатистические показатели.

Сформулируем модель процесса. В зерносушилке контактного типа зерновой слой соприкасается с греющей поверхностью кожуха и нагревается путем теплопроводности. Одновременно он обдувается агентом сушки для удаления влаги из сушильной камеры, то есть присутствует конвективная составляющая процесса сушки. Однако конвективные потоки в сушильной камере установки относительно невелики. Поэтому в данной модели примем, что эти два процесса друг на друга не влияют, и рассмотрим только явление теплопроводности. Тепловой контакт между зерновым слоем и кожухом зерносушилки будем считать идеальным, без переходного сопротивления. Ввиду незначительного изменения влажности и слабовыраженного влияния температуры на теплофизические характеристики зернового слоя примем их постоянными.

Слой зерна, движущийся в камере зерносушилки контактного типа вполне определенных размеров можно условно заменить моделью в виде полуограниченного тела, для которого решение уравнения (3.21) имеет наиболее простой вид [165]:

$$\frac{t_{\text{гп}} - t_3}{t_{\text{гп}} - t_0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int e^{-u^2} du, \quad (3.66)$$

где $t_{\text{гп}}$ - температура греющей поверхности, °С; t_3 - температура зерна на расстоянии x от греющей поверхности в момент времени τ , °С; t_0 - начальная температура зерна, одинаковая по всему объёму, °С; $u = x / 2\sqrt{a\tau}$ - аргумент подынтегральной функции.

Правая часть выражения (3.66) является специальной функцией ошибок (функция Лапласа) [248]:

$$\operatorname{erf} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int e^{-u^2} du.$$

Тогда уравнение (3.66) можно представить в виде

$$t = t_{\text{гп}} - (t_{\text{гп}} - t_0) \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}. \quad (3.67)$$

Как было отмечено выше плотность теплового потока можно определить из зависимости:

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} \right) = -\lambda \nabla t, \quad (3.68)$$

где $\nabla = \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z}$ - оператор первой производной (градиент).

Пользуясь уравнениями (3.67) и (3.68), можно определить количество теплоты $\Delta Q_{\text{п}}$ (Дж), которое передается от греющей поверхности зерносушилки зерновому слою за любой промежуток времени от τ_1 до τ_2 (с) через поверхность

площадью F (м^2).

Для этого надо уравнение (3.67) проинтегрировать по x и подставить полученную производную в уравнение (3.68), после чего последнее выражение проинтегрировать по времени в пределах от τ_1 до τ_2 :

$$\Delta Q_{\text{п}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\lambda \rho c} (t_{\text{гп}} - t_0) (\sqrt{\tau_2 - \tau_1}). \quad (3.69)$$

Таким образом, количество теплоты, необходимое для испарения влаги с поверхности зерна при контактном способе сушки, зависит от температуропроводности материала греющей поверхности, разности температур греющей поверхности и высушиваемого зерна и экспозиции сушки.

3.4.1 Физическая интерпретация процесса сушки зерна

Изучение динамики контактной сушки позволило выяснить физическую сущность и вскрыть механизм совокупности тех явлений, которыми определяется процесс сушки на горячей поверхности. Сложившиеся вследствие этого представления о процессе дают возможность перейти к его схематической модели.

Основные наиболее существенные черты физической схемы контактной сушки, допускающие переход к ее количественному описанию с помощью известных физических законов, сводятся к следующему. Весь процесс сушки делится на первый период, а также 1-ю и 2-ю части второго периода (период прогрева вводится в первый период), границей между которыми являются критические влагосодержания. Для процесса характерно наличие во всех периодах градиентов температуры внутри материала.

Температура поверхности материала t , соприкасающегося с греющей поверхностью, в первый период процесса при постоянной скорости сушки неизменна во времени и известна [206].

В единичном слое происходит парообразование, обусловленное внутренними отрицательными источниками теплоты, и перенос пара через материал к его открытой поверхности.

Для оценки влияния внутреннего парообразования и переноса пара на интенсивность сушки и механизм переноса введем модифицированный критерий фазового превращения

$$\bar{\varepsilon} = \frac{j_n}{j}, \quad (3.70)$$

где j_n - внутренняя интенсивность парообразования, кДж/кг ; j - средняя интенсивность сушки, кДж/кг , $j = j_n + j_o$ (j_o - интенсивность испарения на открытой поверхности материала и вблизи нее, кДж/кг).

Этот критерий применительно к первому периоду сушки может быть определен следующим образом:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{q_n}{q}, \quad (3.71)$$

или

$$\bar{\varepsilon} = 1 - \frac{\lambda dt/dx}{rj}, \quad (3.72)$$

где q_n – плотность потока теплоты, переносимой паром, Вт/м²; q – плотность потока теплоты, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); r – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Критерий $\bar{\varepsilon}$ в течение первого периода остается примерно постоянным по величине. Модифицированный критерий фазового превращения является основным при изучении процесса контактной сушки. Он определяет, с одной стороны, долю потока пара j_n , образовавшегося в контактном слое или внутри материала (во второй период), в общем потоке пара j , покидающем высушиваемый материал; с другой стороны, он оценивает долю теплоты, переносимой паром, образовавшимся в контактном слое и внутри материала, в общем потоке теплоты, полученном от греющей поверхности.

Перенос теплоты теплопроводностью осложнен переносом теплоты паром, движущимся через слой зерна. Влага в виде жидкости перемещается изнутри к зонам парообразования (внутри зерна и у его открытой поверхности).

Второй период сушки начинается с углубления внутрь зерна зоны парообразования у греющей поверхности, зерновой материал делится на «сухую» и «влажную» области. Парообразование происходит на открытой поверхности зерна и в зоне между областями, которая является подвижным фронтом испарения. Пар, образующийся внутри зерна, диффундирует через влажную область, при этом его количество оценивается критерием $\bar{\varepsilon}$. Температура фронта испарения (ширина зоны испарения невелика, в связи с чем для упрощения вместо зоны испарения можно рассматривать поверхность испарения), со временем понижается. Скорость углубления фронта испарения изменяется; в первой части второго периода углубление происходит значительно медленнее, чем во второй. В первой части периода осуществляется перенос влаги к зонам парообразования в виде жидкости, во второй части перенос влаги происходит преимущественно в виде пара. С течением времени толщина «сухой» области возрастает, а «влажной» – сокращается [221, 222, 249, 250].

Плотность потока теплоты, воспринимаемого зерном от греющей поверхности во второй период, непрерывно уменьшается в отличие от первого периода, когда плотность потока теплоты остается неизменной. Плотность потока теплоты, а также интенсивность сушки в течение всего процесса могут считаться известными величинами, определяемыми по данным кинетики сушки.

Можно полагать, что на поверхности парообразования и за ней влагосодержание зерна остается неизменным и соответствующим «сухой» области тела, температура которой возрастает со временем. В обоих периодах сушки происходит удаление пара в окружающую среду со стороны открытой поверхности зернового материала.

Для представленной схемы процесса желательно аналитическим путем получить температурное поле и поле влагосодержания (а также поле давлений) в высушиваемом зерне в первый и второй периоды процесса. Сопоставление этих полей с экспериментально полученными позволит не только подтвердить и уточнить предложенный механизм контактной сушки, выявить некоторые его

особенности, которые не могут быть найдены экспериментально (например, скорость углубления фронта испарения в первой части периода и температура зерна на контактной поверхности), но и создать предпосылки для получения количественных закономерностей контактной сушки.

Анализ полей температуры, влагосодержания и давления при сушке обычно проводят с помощью системы дифференциальных уравнений переноса теплоты и влаги, сформулированной и решенной А.В. Лыковым и Ю.А. Михайловым. Однако для использования этих решений необходимо знать коэффициенты переноса, которые существенно изменяются в зависимости от влагосодержания и температуры.

В связи с этим целесообразно применить для анализа поля температуры и поля влагосодержания в материале (поле давлений играет заметную роль лишь при высоких температурах греющей поверхности $t_{гп}$ и в первый период), сопряженные краевые задачи теплопроводности и влагопроводности. Решение задачи тепло,- массообмена при сушке целесообразно вначале разделить на две самостоятельные задачи теплопроводности и влагопроводности с подвижными границами с соответствующими краевыми условиями. Эти задачи сводят к совместному решению дифференциальных уравнений теплопроводности (и влагопроводности) для двух частей материала, различающихся по своим влаготеплофизическим свойствам и наличию в них стоков и источников теплоты.

Сопряжение двух температурных полей осуществляется при определенных условиях. Если, например, на границе раздела полей нет источников (стоков) теплоты, то температуры и потоки теплоты, выходящие из одной части тела и входящие в другую, принимаются равными. Вместе с тем зависимость условий на границе раздела полей от времени остается неизвестной, что относит эти задачи к числу сопряженных. Для второго периода сушки имеет место нестационарная сопряженная краевая задача теплопроводности с подвижной границей между сухой и влажной областями высушиваемого зерна.

Применительно к процессу сушки сопряженные задачи не решались и не использовались, за исключением работы японских исследователей Риозо Тоэи и Шиня Хаяши, сделавших попытку анализа процесса конвективной сушки зернового и порошкообразного материалов.

Впервые одномерная задача о температурном поле и скорости движения границы раздела фаз с различными теплофизическими свойствами, когда теплота передается лишь теплопроводностью, для случая полупространства при граничных условиях, не зависящих от времени, была рассмотрена Ляме, Клапейроном и Стефаном. В этой задаче предполагается, что фазовые превращения происходят мгновенно при переходе через критическую температуру, теплофизические характеристики среды кусочно-непрерывны и скачкообразно изменяются при переходе через границу раздела [282].

Подобного рода нелинейные (за счет нелинейности граничных условий вследствие подвижности границы между областями высушиваемого зерна) задачи теплопроводности с подвижными границами встречаются в самых различных процессах и относятся к числу наиболее сложных задач математической

физики.

Новая постановка задачи о тепло,- влагопереносе при сушке позволяет полнее отразить все особенности механизма этого процесса.

3.4.2 Температурное поле в зерновом материале в первый период сушки

Представим слой зерна, толщиной l_2 (рисунок 3.9) на греющей поверхности сушильной установки контактного типа. При этом зерно, подвергаемое тепловому воздействию находится в непосредственном соприкосновении ($x = 0$) с греющей поверхностью зерносушилки, имеющей температуру $t_{гп}$.

При этом в высушиваемом зерне в плоскости $x = 0$ устанавливается постоянная температура $t_{гп}$. От греющей поверхности вследствие теплопроводности зерну передается теплота, плотность потока которой неизменна и равна q . В области высушиваемого зерна 1 толщиной l_1 действуют непрерывно и равномерно распределенные стоки теплоты. Количество теплоты, расходуемой на испарение влаги в области 1, определяют по общему потоку теплоты q и критерию фазового превращения $\bar{\varepsilon}$, оценивающему долю теплоты, переносимого паром, образовавшимся в контактном слое материала 1 в общем потоке теплоты, полученном от греющей поверхности (формула 3.69).

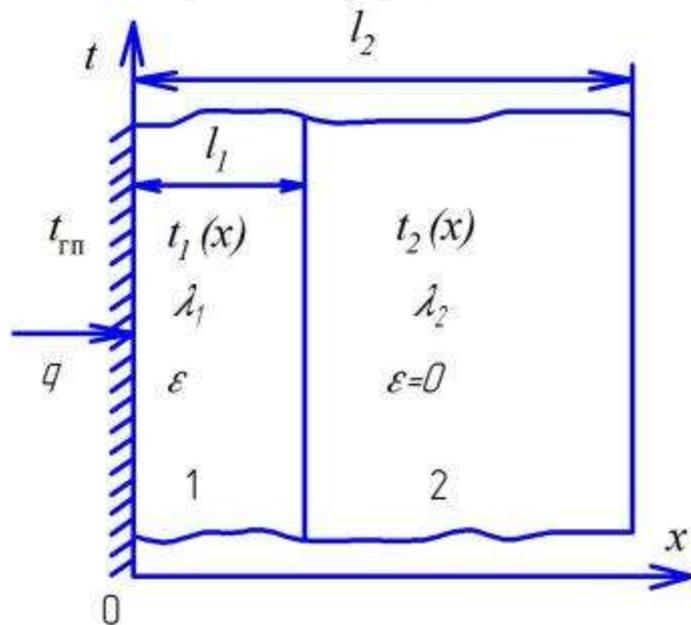


Рисунок 3.9 – К формулировке задачи стационарной теплопроводности для тонкого слоя зерна

В области 2, отличающейся от области 1 теплофизическими характеристиками, стоки теплоты отсутствуют. На открытой поверхности $x = l_2$ осуществляются испарение и унос с поверхности в окружающую паровоздушную среду как пара, образовавшегося на этой поверхности, так и пара, образовавшегося в контактном слое 1 и транспортируемого через зерно. Плотность потока теплоты через произвольную поверхность зерна складывается из плотностей потоков теплоты, переносимого теплопроводностью, паром и жидкостью.

Поставленная стационарная сопряженная задача теплопроводности математически может быть сформулирована следующим образом:

$$a_2 \frac{d^2 t_1}{dx^2} - \frac{q_v}{\rho_1 c_1} = 0 \quad \text{при} \quad 0_1 \leq x \leq l_1; \quad (3.73)$$

$$a_2 \frac{d^2 t_1}{dx^2} = 0 \quad \text{при} \quad l_1 \leq x \leq l_2. \quad (3.74)$$

где a_1, a_2 , - соответственно коэффициенты температуропроводности высушиваемого материала в областях 1 и 2, м²/с; c_1 - удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С); ρ_1 - насыпная плотность зернового материала, подвергаемого сушке в области 1, кг/м³.

Удельную производительность внутренних источников теплоты можно определить следующим образом:

$$q_v = \left| \frac{q\bar{\varepsilon}}{l_1} \right|, \quad (3.75)$$

где q – общий поток теплоты, Вт/м².

Тогда формулу (3.73) можно записать в виде

$$a_1 \frac{d^2 t_1}{dx^2} - \frac{q\bar{\varepsilon}}{\rho_1 c_1 l_1} = 0. \quad (3.76)$$

Граничные условия:

- 1) на внешних границах слоя зерна ($x = 0, x = l_2$);
- 2) на границе раздела областей ($x = l_1$).

$$t_1(l_1) = t_2(l_1) = t_{\kappa}; \quad (3.77)$$

$$-\lambda_1 \frac{dt_1(l_1)}{dx} = -\lambda_2 \frac{dt_2(l_1)}{dx} + q\bar{\varepsilon} \quad (3.78)$$

- условия сопряжения.

В результате решения системы (3.73) - (3.74) распределения температуры в областях 1 и 2 примут вид:

$$t_1 = t_{\text{en}} + \frac{q\bar{\varepsilon}}{\lambda_1 l_1} \frac{x^2}{2} - \frac{q(1+\bar{\varepsilon})}{\lambda_1} x, \quad (3.79)$$

$$t_2 = t_{\text{en}} - \frac{q l_1 (2 + \bar{\varepsilon})}{2\lambda_1} - \frac{q(1 - \bar{\varepsilon})}{\lambda_2} (x - l_1), \quad (3.80)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности материала в областях 1 и 2 соответственно, Вт/(м·°С).

Как показывают приведенные зависимости, в области 1 тонкого слоя зерна распределение температуры носит параболический характер, в области 2 - линейный.

Перепад температуры в слое зернового материала, контактирующем с греющей поверхностью, может быть определен из соотношения:

$$\Delta t_1 = t_{\text{en}} - t_{\kappa} = \frac{q(2 + \bar{\varepsilon})}{2\lambda_1} l_1. \quad (3.81)$$

Тогда температура t_{κ} на границе 1 и 2 областей (температура в контактном слое)

$$t_{\kappa} = t_{\text{en}} - \frac{q(2 + \bar{\varepsilon})}{2\lambda_1} l_1. \quad (3.82)$$

Определив $t_{кc}$ с помощью экспериментальных исследований, можно вычислить температуру $t_{гп}$ в плоскости $x = 0$ по формуле:

$$t_{эн} = t_{кc} + \frac{q(2 + \bar{\varepsilon})}{2\lambda_1} l_1. \quad (3.83)$$

Температура зерна на расстоянии от нагреваемой поверхности кожуха $x = l_2$ (температура зернового слоя) может быть вычислена из выражения:

$$t_{зс} = t_{эн} - \frac{ql_1(2 + \bar{\varepsilon})}{2\lambda_1} - \frac{q(1 - \bar{\varepsilon})}{\lambda_2} (l_2 - l_1). \quad (3.84)$$

Знание величины $t_{зс}$ дает возможность оценить потери теплоты зерном и проанализировать зависимость j от $t_{зс}$.

Согласно (3.81) перепад температуры в слое зерна:

$$\Delta t = t_{эн} - t_{зс} = \frac{ql_1(2 + \bar{\varepsilon})}{2\lambda_1} + \frac{q(1 - \bar{\varepsilon})}{\lambda_2} (l_2 - l_1). \quad (3.85)$$

Как видно из (3.85), перепад температуры в слое зерна зависит от величин q , $\bar{\varepsilon}$ и λ_1 . Чем больше величина $\bar{\varepsilon}$, т. е. чем больше внутреннее парообразование (определяемое главным образом толщиной слоя l_2 и температурой $t_{гп}$), тем больше перепад температуры.

Величина

$$\Delta t = \frac{q\bar{\varepsilon}}{2\lambda_1} l_1 \quad (3.86)$$

обуславливает перепад температуры, вызванный лишь внутренним парообразованием в контактном слое зерна. Этот перепад температуры при постоянных q и $\bar{\varepsilon}$ будет тем выше, чем меньше коэффициент теплопроводности зерна λ_1 .

Суммарное приращение температуры Δt_1 складывается из приращения температуры, обусловленного теплопроводностью, и приращения, вызванного фазовым превращением в слое зерна:

$$\Delta t_1 = \frac{q}{\lambda_1} l_1 + \frac{q\bar{\varepsilon}}{2\lambda_1} l_1, \quad (3.87)$$

Таким образом, величина перепада температуры в слое зерна за счет испарения составляет некоторую долю, равную $\bar{\varepsilon}/2$, от перепада температуры за счет теплопроводности. В предельном случае при $\bar{\varepsilon} = 1$ приращение температуры, вызванное испарением, равно половине перепада температуры, обусловленного теплопроводностью, или одной трети от общего перепада Δt_1 . Последнее следует из выражения

$$\frac{\Delta t_{уcn}}{\Delta t_1} = \frac{\bar{\varepsilon}}{2 + \bar{\varepsilon}}, \quad (3.88)$$

где $\Delta t_{уcn}$ - перепад температуры зерна, вызванный испарением с его поверхности влаги, °С.

Из (3.82) следует, что температура в месте сопряжения полей t_1 зависит от $\bar{\varepsilon}$, при этом с повышением $\bar{\varepsilon}$, температура снижается, что подтверждают данные опытов.

Значение градиента температуры в контактном слое зерна можно полу-

чить дифференцированием соотношения (3.87):

$$\frac{dt_1}{dx} = \frac{q\bar{\varepsilon}}{\lambda_1 l_1} x - \frac{q}{\lambda_1} (1 + \bar{\varepsilon}). \quad (3.89)$$

Пренебрегая зависимостью градиента температуры от координаты x вследствие малости толщины l_1 , можно получить приближенное среднее значение градиента температуры в контактном слое. Градиент температуры, постоянный по величине в области 2 высушиваемого материала, определяется из соотношения:

$$\left. \frac{dt_1}{dx} \right|_{cp} \approx \frac{\nabla t_1}{l_1} = \frac{q(2 + \bar{\varepsilon})}{2\lambda_1}. \quad (3.90)$$

Полученные аналитическим путем выражения для распределения температуры в двух сопряженных полях при контактной сушке тонких слоев материалов в первый период позволяют провести их анализ и сравнить результаты расчетов с прямым экспериментом.

Также данные зависимости можно использовать для расчета температурного поля внутри тонкого слоя материала в процессе контактной сушки в первый период, а также для расчета других показателей процесса теплообмена.

3.4.3 Температурное поле в зерновом материале во второй период сушки

Представим слой влажного зерна толщиной l (рисунок 3.10) находящийся в сушильной установке на греющей поверхности. Зерновой слой находится в непосредственном соприкосновении ($x = 0$) с греющей поверхностью, от которой зерну путем теплопроводности передается теплота, плотность потока которого равна $q(\tau)$. Перенос образовавшегося пара через поверхность $x = 0$ невозможен. На поверхности $x = l$ происходят испарение и унос в окружающую паровоздушную среду как пара, образовавшегося на этой поверхности, так и пара, образовавшегося внутри зерна и транспортируемого через него. Плотность потока теплоты через произвольную поверхность зерна складывается из плотностей потоков теплоты, переносимого скелетом зерновки, паром и жидкостью.

Аналитическое решение сопряженной задачи теплопроводности для первого периода сушки с неподвижной границей является начальным (при $\tau = 0$) распределением температур по толщине зерна $t_{1,2}(x, 0) = t_4(x, 0) = f_1(x)$ для второго периода сушки. Следовательно, известна температура t_n в плоскости $x = 0$.

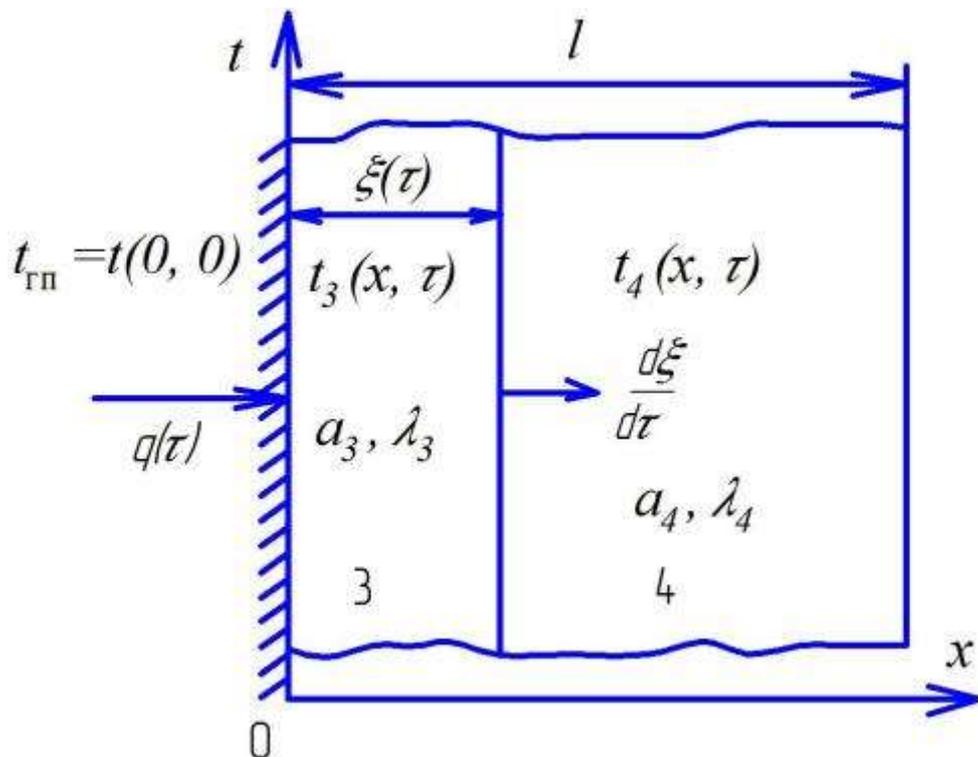


Рисунок 3.10 – К формулировке задачи нестационарной теплопроводности с подвижной границей

С момента времени $\tau = 0$ начинается углубление зоны испарения, и зерновой слой делится на сухую и влажную области, положение границы между которыми определяется функцией $\bar{\xi}(\tau)$. Значение этой функции определяет переменную толщину сухой области. Температура на границе областей с течением времени уменьшается. Область $0 \leq x \leq \bar{\xi}(\tau)$, являющаяся сухой, представляет собой в основном скелет зерна как капиллярнопористого коллоидного тела). Область $\bar{\xi}(\tau) \leq x \leq l$, являющаяся влажной, состоит из скелета зерновки, жидкости и пара, температура которых одинакова вследствие интенсивного теплообмена внутри зерна. В связи с небольшим изменением теплофизических свойств тонкого слоя зерна в пределах каждой из частей второго периода величины a_T и λ можно считать постоянными.

Будем полагать, что внутреннее испарение происходит лишь на движущейся границе, положение которой определяется функцией $\bar{\xi}(\tau)$. Количество теплоты, расходуемой на испарение на границе областей, может быть определено по общему потоку теплоты, подводимой при сушке, и модифицированному критерию фазового превращения $\bar{\xi}$, величина которого различна в 1-й и 2-й частях второго периода.

Математическая формулировка задачи сводится к следующему:
 сухая область зернового слоя

$$\frac{dt_3}{d\tau} = a_3 \frac{d^2 t_3}{dx^2} \text{ при } \tau > 0, 0 \leq x \leq \bar{\xi}(\tau); \quad (3.91)$$

влажная область зернового слоя

$$\frac{dt_4}{d\tau} = a_4 \frac{d^2 t_4}{dx^2} \text{ при } \tau > 0, \bar{\xi}(\tau) \leq x \leq l. \quad (3.92)$$

начальные условия:

$$t_3(x, 0) = t_4(x, 0) = f_1(x); 0 \leq x \leq l. \quad (3.93)$$

Граничные условия:

1) на внешних неподвижных границах ($x = 0, x = l$)

$$-\lambda_3 \frac{dt_3(0, \tau)}{dx} = q(\tau) \text{ при } q(\tau) \neq 0; \quad (3.94)$$

$$-\lambda_4 \frac{dt_4(l, \tau)}{dx} - (1 - \bar{\varepsilon})q(\tau) = 0, \quad (3.95)$$

при этом $q(\tau)$ - любая непрерывная функция времени;

2) на подвижной границе $x = \bar{\varepsilon}(\tau)$ раздела сухой и влажной областей материала условиями сопряжения будут:

$$t_3(\bar{\varepsilon}, \tau) = t_4(\bar{\varepsilon}, \tau) = t_{cr} f(\tau), \quad (3.96)$$

где $f(\tau)$ - произвольная непрерывная функция времени, которая при $\tau = 0$ равна 1, т. е. в начальный момент времени температура на границе областей равна t_{cr} , а равенство потоков теплоты с учетом потока теплоты фазового превращения и изменения энтальпии высохшего слоя позволяет считать, что

$$-\lambda_3 \frac{dt_3(\bar{\varepsilon}, \tau)}{dx} + \lambda_4 \frac{dt_4(\bar{\varepsilon}, \tau)}{dx} = \bar{\varepsilon} m(\tau) - \Delta i, \quad (3.97)$$

где $m(\tau)$ – непрерывная функция времени.

Уравнение (3.97) представляет собой видоизмененное уравнение теплового баланса. Введенная на границе областей теплота совместно с изменением энтальпии Δi в результате фазового перехода (она «подпитывает» поток теплоты) тратится на испарение влаги на подвижной границе.

Величина Δi может быть определена из выражения

$$\Delta i = c_3 \rho_3 t_3(\bar{\varepsilon}, \tau) \frac{d\bar{\varepsilon}}{d\tau} - c_4 \rho_4 t_4(\bar{\varepsilon}, \tau) \frac{d\bar{\varepsilon}}{d\tau} = [c_3 \rho_3 t_3(\bar{\varepsilon}, \tau) - c_4 \rho_4 t_4(\bar{\varepsilon}, \tau)] \frac{d\bar{\varepsilon}}{d\tau}. \quad (3.98)$$

Подставив (3.96) в (3.97), получим:

$$-\lambda_3 \frac{dt_3(\bar{\varepsilon}, \tau)}{dx} + \lambda_4 \frac{dt_4(\bar{\varepsilon}, \tau)}{dx} = m(\tau) r \bar{\varepsilon} + [c_4 \rho_4 t_4(\bar{\varepsilon}, \tau) - c_3 \rho_3 t_3(\bar{\varepsilon}, \tau)] \frac{d\bar{\varepsilon}}{d\tau}. \quad (3.99)$$

Потери теплоты, обусловленные теплообменом зерна с окружающей средой, невелики, поэтому в условии (3.94) они не учитываются. Определим температурное поле в сухой и влажной областях слоя зерна и закон движения границы раздела.

Сформулированная задача отличается от классической задачи Стефана следующими особенностями:

- 1) граничные условия являются функциями времени;
- 2) температура на границе областей не остается постоянной, а изменяется со временем;
- 3) граничное условие на подвижной границе в явном виде содержит время;
- 4) рассматриваемая задача определяет температурное поле в теле конечных размеров.

Большое количество работ российских и зарубежных авторов посвящено

решению и исследованию задач с подвижной границей. Точное решение подобного класса задач может быть представлено в виде системы нелинейных интегральных уравнений. Однако использование этой системы для инженерных расчетов крайне затруднительно. В связи с этим можно воспользоваться приближенными методами, дающими решение с точностью, необходимой при инженерных расчетах. Особый интерес представляют методы, в основе которых лежит замена действительных кривых изменения температуры их приближенными аналогами, вытекающими из тех или иных физических соображений, т. е. «истинное» распределение температуры заменяют квазистационарным, и вместо уравнения Фурье вводят уравнение Лапласа. К таким методам относят и метод Л.С. Лейбензона.

Математическая обработка экспериментальных данных о полях температуры при контактном способе передачи теплоты, полученных различными авторами, показала, что распределение температур t_3 и t_4 по координате x можно считать с достаточной степенью точности линейным. Исходя из этого, примем:

$$t_3(x, \tau) = C_1(\tau) + C_2(\tau)x; \quad (3.100)$$

$$t_4(x, \tau) = C_3(\tau) + C_4(\tau)x. \quad (3.101)$$

Тогда дифференциальные уравнения (3.91) и (3.92) можно привести к виду:

$$a_3 \frac{d^2 t_3}{dx^2} = 0; \quad (3.102)$$

$$a_4 \frac{d^2 t_4}{dx^2} = 0. \quad (3.103)$$

Из (3.102) и (3.103) и соответственно из (3.100) и (3.101) находим, что

$$\frac{dt_3}{dx} = C_2(\tau) \text{ и } \frac{dt_4}{dx} = C_4(\tau).$$

Используя граничные условия (3.94) и (3.95), получаем:

$$C_2(\tau) = -\frac{1}{\lambda_3} q(\tau);$$

$$C_4(\tau) = -\frac{1-\bar{\varepsilon}}{\lambda_4} q(\tau).$$

Найдем постоянные $C_1(\tau)$ и $C_3(\tau)$ используя выражения:

$$C_1(\tau) = t_n f(\tau) + \frac{1}{\lambda_3} q(\tau) \bar{\varepsilon};$$

$$C_3(\tau) = t_{cm} f(\tau) + \frac{1-\bar{\varepsilon}}{\lambda_4} q(\tau) \varepsilon.$$

Окончательные выражения для распределения температуры в сухой и влажной областях слоя зерна получим следующего вида:

$$t_3(x, \tau) = t_{cm} f(\tau) - \frac{1}{\lambda_3} q(\tau) [x - \xi]; \quad (3.104)$$

$$t_4(x, \tau) = t_{cm} f(\tau) - \frac{1-\bar{\varepsilon}}{\lambda_4} q(\tau) [x - \xi], \quad (3.105)$$

где ξ – глубина зоны испарения, м.

Из (3.105) следует, что при $\tau = 0$, чему соответствует $\xi(0) = 0$,

$$t_4(x,0) = f_1(0) = t_n - \frac{1-\bar{\varepsilon}}{\lambda_4} q(0)x.$$

Таким образом, начальное условие должно являться линейной функцией x .

Найдя из (3.104) и (3.105) выражения $dt_3(\xi,\tau)/dx$, $dt_4(\xi,\tau)/dx$, $t_3(\xi,\tau)$ и $t_4(\xi,\tau)$, после преобразований получим:

$$\bar{\varepsilon}q(\tau) - \bar{\varepsilon}rm(\tau) = t_n f(\tau) [c_4 \rho_4 - c_3 \rho_3] \frac{d\xi}{d\tau}. \quad (3.106)$$

Интегрирование последнего дифференциального уравнения дает:

$$\xi = \int \frac{\bar{\varepsilon}q(\tau) - \bar{\varepsilon}rm(\tau)}{t_n f(\tau) [c_4 \rho_4 - c_3 \rho_3]} d\tau + C. \quad (3.107)$$

Постоянную интегрирования C можно найти, используя условие, согласно которому при $\tau = 0$; $\xi = 0$. Уравнение (3.107) определяет закон углубления зоны испарения в общем случае.

Полученные решения (3.104), (3.105) и (3.106) могут быть использованы для анализа и расчета процесса контактной сушки. При этом функция

$$m(\tau) = -g \frac{d\bar{u}}{d\tau} = gk\bar{u}_{sp} \exp(-k\tau) \quad (3.108)$$

определяется по скорости сушки.

Обработка полей температуры, полученных различными авторами при контактной сушке многих капиллярнопористых и капиллярнопористых коллоидных материалов, показала, что температура на границе раздела сухой и влажной областей изменяется со временем по экспоненциальному закону.

Подставив функцию (3.105) в (3.107), произведя интегрирование и определив произвольную постоянную, найдем частное решение уравнения (3.107):

$$\xi = \frac{1}{t_{cm} [c_4 \rho_4 - c_3 \rho_3]} \left\{ \frac{\bar{\varepsilon}q}{v-n} [1 - \exp[-(v-n)\tau]] - \frac{B}{k-n} [1 - \exp[(k-n)\tau]] \right\}, \quad (3.109)$$

здесь $B = \bar{\varepsilon}rgk\bar{u}_{sp}$.

Уравнение (3.127) выражает закон углубления зоны испарения при контактной сушке и является исходным для определения ξ . Зная из опыта зависимость ξ от τ , можно использовать уравнение (3.109) для определения критерия фазового превращения $\bar{\varepsilon}$.

3.5 Материальный и тепловой баланс сушилки.

Определение затрат энергии на процесс сушки зерна

Рассмотрим тепловой баланс теоретической сушилки, в которой вся теплота расходуется на испарение влаги из зерна, а дополнительные поступления теплоты в камеру и теплопотери в окружающую среду отсутствуют. Процесс сушки в теоретической сушилке происходит при постоянной температуре материала, равной 0°C .

Тепловая энергия, поступающая в сушильную камеру, складывается из тепло-

ты, поступившей с атмосферным воздухом и теплоты, полученной в нагревательном устройстве.

Теплота, поступающая с воздухом, кДж/ч,

$$Q_0 = Li, \quad (3.110)$$

где $L_{\text{воз}}$ – количество сухого атмосферного воздуха, кг/ч; i – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг.

Количество сухого атмосферного воздуха

$$L_{\text{воз}} = 1000 \frac{W}{d_2 - d_1}, \quad (3.111)$$

где W – количество испаренной в сушилке влаги, кг/ч; d_1, d_2 – влагосодержание агента сушки на входе и выходе из сушильной камеры, кг/(кг сухого воздуха).

Энтальпию влажного воздуха, отнесенную к 1 кг сухого воздуха, кДж/кг, определим по формуле:

$$i = ct_0 + 0,001d_0(2500 + 1,84t_0), \quad (3.112)$$

где c – теплоемкость сухого воздуха, равная 1 кДж/(кг·°C); t_0 – температура воздуха (агента сушки), °C; d_0 – влагосодержание воздуха, кг/(кг сухого воздуха).

Теплота, выделяемая электронагревателем установки, кДж/ч:

$$Q_{\text{н.у}} = 3,6IU\eta, \quad (3.113)$$

где I – сила тока, А; U – напряжение, В; η – коэффициент преобразования электрической энергии в тепловую ($\eta = 0,92 \dots 0,97$).

Тепловой баланс теоретической сушилки таков:

$$Q_0 + Q_{\text{н.у}} = L_{\text{воз}}i_1 = L_{\text{воз}}i_2, \quad (3.114)$$

где i_1, i_2 – энтальпия сушильного агента соответственно на входе и выходе из сушильной камеры, кДж/кг.

Количество теплоты, поступающей в сушилку ($L_{\text{воз}}i_1$), равно количеству теплоты, уходящей с отработавшим агентом сушки ($L_{\text{воз}}i_2$). Тепловая энергия, расходуемая на испарение влаги из высушиваемого материала, немедленно возвращается сушильному агенту вместе с влагой в виде скрытой теплоты парообразования.

Часовой расход теплоты, кДж/ч, в теоретической сушилке находят по формуле (3.112), т.е. $Q = Q_{\text{н.у}}$

Удельный расход теплоты, кДж/кг испаренной влаги,

$$q = \frac{Q}{W}. \quad (3.115)$$

В действительной сушилке не вся теплота идет на испарение влаги, часть теплоты Q_m , кДж/ч, расходуется на нагрев зерна:

$$Q_m = G_2c_2(t - t_0), \quad (3.116)$$

где G_2 – количество зерна, выходящего из сушилки, кг/ч; c_2 – теплоемкость зерна при выходе из сушилки, кДж/(кг·°C); t_0, t – температура зерна соответственно до и после сушки, °C.

Теплоемкость зерна при выходе из сушильной установки c_2 , кДж/(кг·°C); определяют из выражения:

$$c_2 = \frac{(100 - \omega_2)c_c + \omega_2 c_\omega}{100}, \quad (3.117)$$

где c_c , c_ω – соответственно теплоемкость сухого вещества зерна и воды, кДж/(кг·°C), ω_2 – влажность зерна на выходе из сушильной установки, %.

Потери теплоты в окружающую среду, кДж/ч, определяют по формуле:

$$Q_{o.c.} = 3,6 \sum F_c a_T (t_{cp} - t_n), \quad (3.118)$$

где $\sum F_c$ – площадь поверхности сушильной установки, через которую происходят потери теплоты, м²; $t_{cp} = (t_1 + t_2)/2$ – средняя температура воздуха в зоне сушки, °C; t_n – температура наружного воздуха, °C; a_T – коэффициент теплообмена (теплоотдачи), Вт/(м²·°C)

В некоторых конструкциях сушилок предусматривают дополнительные подогреватели, устанавливаемые непосредственно в сушильной камере или перед ней и дающие добавочную теплоту Q_d .

С учетом отличий действительной сушилки от теоретической уравнение теплового баланса сушильной камеры можно представить в следующем виде:

$$L_{\text{воз}} i_0 + Q_{n.y.} + c_\omega W t_0 + Q_d = L_{\text{воз}} i_2 + Q_m + Q_{o.c.} \quad (3.119)$$

Левая часть уравнения представляет собой всю теплоту, приходящую в сушильную камеру: с наружным воздухом, от нагревательного устройства, с испарившейся из материала влагой, от добавочного подогревателя; правая часть – суммарный расход теплоты: с отработанным сушильным агентом, с нагретым материалом, выходящим из сушильной камеры, и расход в окружающую среду в результате теплопередачи через ограждения сушильной камеры.

Отсюда расход теплоты на сушку, кДж/ч,

$$Q = Q_{n.y.} = L_{\text{воз}} (i_2 - i_0) - c_\omega W t_0 - Q_d + Q_m + Q_{o.c.} \quad (3.120)$$

Удельный расход теплоты, кДж/кг испаренной влаги,

$$q = Q/W = L_{\text{воз}} (i_2 - i_0) - c_\omega t_0 - q_d + q_m + q_{o.c.}, \quad (3.121)$$

где q_d , q_m , $q_{o.c.}$ – удельный расход теплоты соответственно от добавочного подогревателя, на нагрев зерна, на потери в окружающую среду, кДж/кг.

Таким образом, затраты энергии на процесс сушки зерна в зерносушилках зависят от множества факторов: входных параметров высушиваемого материала и агента сушки, способа подвода теплоты к высушиваемому материалу, потерь теплоты в окружающую среду и др. При организации процесса сушки зерна с минимальными энергозатратами необходимо, чтобы вся подводимая теплота расходовалась на нагрев зерна и испарение из него влаги.

3.6 Методы определения интенсивности сушки

Для периода постоянной скорости сушки, как уже отмечалось ранее, процесс сушки с некоторым приближением протекает аналогично испарению влаги со свободной поверхности жидкости. В этом случае скорость испарения влаги, согласно закону Дальтона, может быть выражена уравнением:

$$i_m = C_{\text{исп}} (p_n - p_p) B, \quad (3.122)$$

где i – интенсивность испарения влаги, кг/(м²·ч); $C_{\text{исп}}$ – коэффициент испарения, отнесенный к разности парциальных давлений, кг/(с·м²·Па); p_n и p_p – соответ-

ственно парциальное давление насыщенного пара при температуре поверхности испарения и в окружающей среде, Па; B – атмосферное давление, Па.

В течение всего периода испарения влаги со свободной поверхности ее температура остается постоянной и равной температуре мокрого термометра психрометра t_{MT} .

Механизм процесса испарения влаги со свободной поверхности жидкости можно представить следующим образом. Частицы верхнего слоя влаги, нагретого до определенной температуры t_{MT} , обладая значительной кинетической энергией, при своем движении отрываются от поверхности и диффундируют через пограничный слой насыщенного пара, расположенный у поверхности испарения, в окружающую среду. Чем выше температура воды, тем подвижнее ее молекулы и тем быстрее диффузия частиц воды через пограничный слой [29].

На практике для анализа процесса испарения влаги со свободной поверхности жидкости используют дифференциальное уравнение, устанавливающее зависимость между влажностью, температурой и продолжительностью процесса. При сушке материалов небольших размеров (зерно и др.) данное уравнение приобретает вид:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla u, \quad (3.123)$$

где a_m – коэффициент влагообмена, Вт/(м²·кг);

Для того чтобы решить уравнение (3.123), необходимо задать распределение влажности внутри материала в начальный момент времени (начальное условие) и закон взаимодействия между поверхностью материала и окружающей средой (граничные условия). Допустив, что влагосодержание в любой точке материала имеет одно и то же значение, начальное условие можно записать:

$$\text{при } \tau = 0 \quad u(x, y, z) = u_0 = \text{const.} \quad (3.124)$$

Граничное условие задают, исходя из того, что влага, подведенная изнутри к поверхности зерна, полностью испаряется:

$$q_m = -a_m \rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_n = c(p_m - p_n),$$

где $\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_n$ – градиент влагосодержания на поверхности зерна; c – коэффициент испарения при сушке влажного зерна, отнесенный к единице разности парциальных давлений пара.

В период постоянной скорости сушки интенсивность испарения постоянна. Тогда граничное условие примет следующий вид:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_n + \frac{q_m}{a_m \rho_0} = 0. \quad (3.125)$$

Найдя среднее (интегральное) влагосодержание, можно получить уравнение сушки для периода постоянной скорости сушки в таком виде:

$$\omega^c = \omega_0^c - N\tau, \quad (3.126)$$

где N – скорость сушки в период постоянной скорости сушки, %/ч.

Скорость сушки N определяют из выражения:

$$N = \frac{100q_m}{R\rho_0}. \quad (3.127)$$

Продолжительность сушки для первого периода:

$$\tau_I = \frac{\omega_1^c - \omega_{k_1}^c}{N}, \quad (3.128)$$

где ω_1^c и $\omega_{k_1}^c$ – соответственно начальная и первая критическая влажность зерна, %.

Если сушка проходит только в период постоянной скорости, то в уравнение (3.128) вместо $\omega_{k_1}^c$ необходимо подставить значение конечной влажности ω_2^c .

Если процесс сушки во втором периоде начинается после периода постоянной скорости сушки, начальное условие будет иметь вид:

$$\text{при } \tau = 0 \text{ и } = (u_{\text{ц}} - u_{\text{п}}),$$

где $u_{\text{ц}}$ - влагосодержание центрального слоя высушиваемого зерна, кг влаги/(кг сухого вещества·м); $u_{\text{п}}$ - влагосодержание поверхности слоя высушиваемого зерна, кг влаги/(кг сухого вещества·м).

Если же период постоянной скорости отсутствует, то начальное условие будет иметь такой же вид, как и для периода постоянной скорости сушки (уравнение 3.124).

Задание граничных условий представляет значительную трудность, так как коэффициенты влагообмена, a_m и коэффициент испарения при сушке влажного зерна, c зависят от влагосодержания и температуры зерна, следовательно, изменяются во времени, т. е. процессы переноса описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений. Поэтому для упрощения задачи принимают допущение о том, что коэффициенты a_m и c являются постоянными.

Для влажного зерна во втором периоде сушки уравнение влагопереноса имеет вид:

$$-\frac{\partial \omega^c}{\partial \tau} = \frac{a_m}{l^2} \left(\frac{1}{\frac{1}{\pi^2} + \frac{1}{3Bi_m}} \right) (\omega^c - \omega_p^c), \quad (3.129)$$

где $Bi_m = \frac{\beta R}{a_m}$ – массообменный критерий Био.

Из уравнения (3.129) следует, что во втором периоде скорость сушки находится в прямой зависимости от текущей влажности ω^c и в обратной от определяющего размера тела l . Величина $\frac{\partial \omega^c}{\partial \tau}$ также зависит от коэффициента a_m , который изменяется в процессе сушки.

Точно решить уравнение (3.129) не представляется возможным из-за весьма сложного и не всегда определимого характера зависимости коэффициента a_m от температуры и влажности. Поэтому для технических расчетов в уравнении (3.129) заменяют комплекс, стоящий перед выражением $(\omega^c - \omega_p^c)$ на коэффициент K . Тогда уравнение (3.129) можно записать в виде

$$-\frac{\partial \omega^c}{\partial \tau} = K_c (\omega^c - \omega_p^c), \quad (3.130)$$

где K_c - коэффициент сушки.

Интегрируя уравнение (3.130) для периода убывающей скорости сушки в пределах от $\omega_{k_1}^c$ (первая критическая влажность) до ω_2^c (конечная влажность), получим:

$$\omega_2^c = (\omega_{k_1}^c - \omega_p^c) \exp(-K_c \tau_{II}) + \omega_p^c, \quad (3.131)$$

или

$$\tau_{II} = \frac{1}{K_c} \ln \left(\frac{\omega_{k_1}^c - \omega_p^c}{\omega_2^c - \omega_p^c} \right). \quad (3.132)$$

Коэффициент сушки K зависит от свойств зерна и параметров процесса сушки (температуры греющей поверхности, экспозиции сушки, исходной влажности зерна и др.), что требует получения определённых зависимостей для каждого частного случая. При сушке зерна значение критической влажности $\omega_{k_1}^c$ варьирует в довольно широких пределах и зависит от способа ведения процесса и режима сушки.

Выводы

Полученные теоретические закономерности отражают основные характерные черты процесса контактной сушки тонкого слоя зерна. Их можно использовать для расчета температурного поля внутри слоя материала в процессе контактной сушки, а также для расчета других показателей процесса теплообмена. При этом толщина зернового слоя должна незначительно превышать максимальный размер высушиваемого зерна, так как это позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи в несколько раз. Установлено, что физическую сущность механизма контактной сушки зерна определяют взаимосвязанные переносы теплоты, пара и жидкости. Тепло,- массоперенос, происходящий в зерне при его сушке, существенно зависит от его внутреннего строения, физико-химических свойств его твердой фазы, а также энергии связи поглощенной влаги.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА В УСТАНОВКАХ КОНТАКТНОГО ТИПА

4.1 Конструктивно - технологические схемы установок контактного типа для тепловой обработки зерна и принцип их работы

Возможность использования контактного способа передачи теплоты для нагрева зерна при его тепловой обработке подтверждена рядом исследований [127, 129, 132, 133, 139, 155, 169, 312...319]. В качестве источника теплоты для обогрева контактной поверхности сушильной камеры используют пар, горячую воду, электричество, газ и другие виды топлива. Под контактной поверхностью здесь принята нагретая поверхность сушильной камеры, непосредственно контактирующая с зерновым слоем. Скорость контактного способа теплопередачи зависит от температуры нагрева поверхности, толщины зернового слоя, а также времени контакта высушиваемого зерна с греющей поверхностью (экспозиции сушки). Контактный нагрев сырья применяют на мукомольных и крупяных заводах, главным образом, для подогрева зерна и небольшого снижения влажности при подготовке его к переработке. Как уже отмечалось выше, контактный нагрев в чистом виде для высокопроизводительных установок не является достаточно эффективным способом в сравнении с конвективным способом подвода теплоты. Однако при переработке небольших партий зерна контактную сушку можно использовать гораздо шире и на более высоком энергетическом уровне.

Для обеспечения качества процесса обработки, соблюдения эксплуатационных и технологических требований идеализированная установка контактного типа для тепловой обработки зерна должна включать в свой структурный состав следующие основные элементы (рисунок 4.1): 1 - устройство загрузки; 2 - генератор теплоты; 3 - теплопередающее и теплоотдающее устройство (элемент); 4 - устройство отвода образовавшейся влаги и подвода сухого воздуха; 5 - устройство выгрузки; 6 - устройство управления и контроля режимами тепловой обработки.

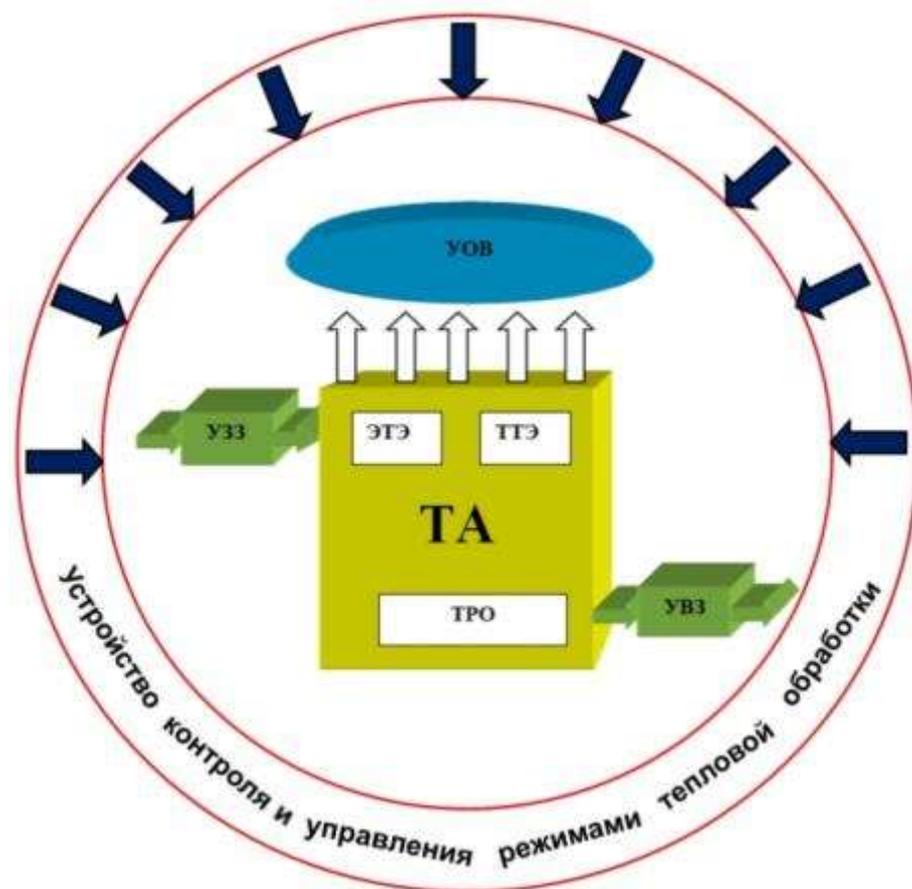


Рисунок 4.1 - Структурная схема контактной электроустановки для тепловой обработки зерна:

УОВ – устройство отвода влаги; УЗЗ – устройство загрузки зерна; ЭТЭ – электрический теплогенерирующий элемент; ТТЭ – теплопередающий и теплоотдающий элемент; ТА – теплообменный аппарат; ТРО - транспортирующий рабочий орган; УВЗ – устройство выгрузки зерна

Основой конструкции компактной контактной установки для тепловой обработки зерна является теплообменный аппарат с электрическими источниками теплоты и транспортирующим рабочим органом для обеспечения поточности процесса.

Для нормального протекания процесса тепловой обработки (прогрева, сушки, прокаливания и т.д.) необходимо выполнить ряд условий. Применительно к контактному способу нагрева таковыми являются:

- равномерный подвод теплоты к зерну;
- обеспечение максимально возможной площади контакта поверхности зерна, подвергающегося тепловой обработке с греющей поверхностью сушильной установки;
- постоянный отвод выделяющейся из зерна влаги (т.е. постоянный подвод сухого и отвод влажного воздуха);
- перемещение и перемешивание зернового слоя во избежание местного перегрева.

Биологические особенности зерна определяют его максимальную температуру нагрева и максимально возможный разовый влагосъём. Эти значения

напрямую связаны с параметрами теплообменника: температурой контактной поверхности; площадью контактной поверхности, непосредственно контактирующей с зерновым слоем (величиной коэффициента заполнения); толщиной зернового слоя; экспозицией сушки и т.д. Параметры теплоотдающего элемента теплообменника определенным образом характеризуют источник теплоты и определяют его режимы работы: температуру, потребляемую мощность и т.д. Помимо этого на процесс тепловой обработки влияют также параметры окружающей среды: температура и влажность воздуха, атмосферное давление и др.

Таким образом, процесс тепловой обработки в контактном электротеплообменнике определяет совокупность разнообразных факторов, каждый из которых прямо или косвенно влияет на эффективность работы разрабатываемой установки в целом.

Для обеспечения качественного процесса тепловой обработки зерна на основании глубокого изучения и анализа существующих средств механизации нами предложены следующие конструкции установок для тепловой обработки зерна (УТОЗ) [175...177].

Основой конструкции УТОЗ 1, выполненной в соответствии с патентами РФ №№ 2263862, 59226 являются цилиндрическая греющая контактная поверхность с электронагревателем, шнековый транспортирующий рабочий орган, устройство для удаления влаги (рисунок 4.2).

Контактная греющая поверхность представляет собой полый цилиндр, что обеспечивает хороший контакт с ней материала при простом конструктивном исполнении.

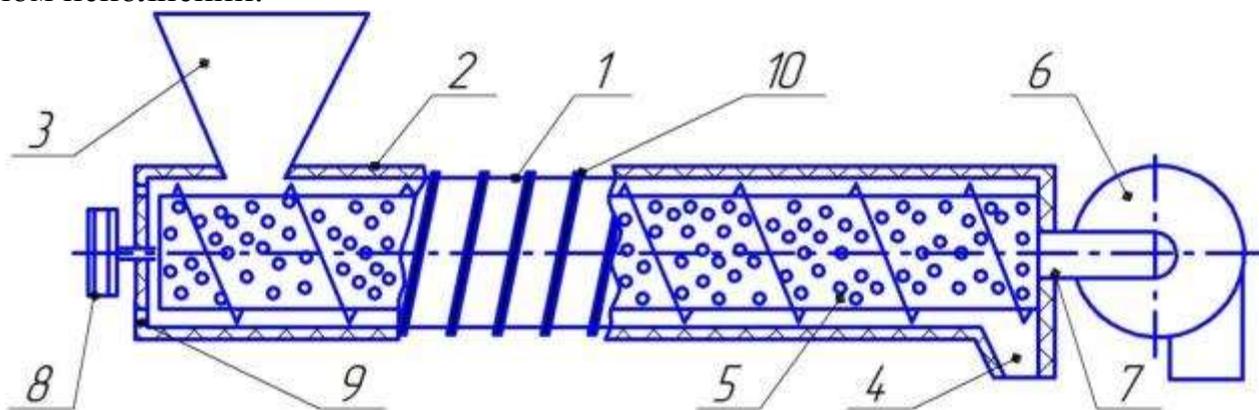


Рисунок 4.2 – УТОЗ 1:

1- теплообменник; 2 – теплоизолирующий материал; 3 – загрузочный бункер; 4 – выгрузное окно; 5 – транспортирующий рабочий орган (перфорированный шнек); 6 – вентилятор; 7 – воздуховод; 8 – привод транспортирующего рабочего органа; 9 – отверстия; 10 – электрический нагревательный элемент

Привод шнекового транспортирующего рабочего органа выполнен с возможностью плавного изменения частоты вращения шнека, что позволяет обеспечить необходимую экспозицию сушки для различных культур.

Устройство для удаления влаги состоит из вентилятора 6, воздуховода 7 и электрического нагревательного элемента 10, установленного на цилиндрической поверхности кожуха. Электрический нагревательный элемент позволяет регулировать температуру греющей поверхности в широких пределах и созда-

вать равномерное температурное поле. Количество отсасываемого воздуха можно регулировать изменением частоты вращения электродвигателя вентилятора или установкой заслонки (шибера) для изменения сечения воздуховода.

Принцип работы УТОЗ 1 следующий. Включают нагревательный элемент 10, привод 8 транспортирующего рабочего органа 5, а также устанавливают требуемую подачу воздуха путём изменения частоты вращения вала электродвигателя вентилятора 6. После достижения необходимой температуры кожуха 1, которую контролируют с помощью системы автоматического контроля и регулирования режимных параметров (на схеме не показана), подают зерно в загрузочный бункер 3. Из загрузочного бункера 3 зерно с помощью транспортирующего рабочего органа 5 перемещается к выгрузному окну 4. Контактная поверхность кожуха 1, зерно также нагревается, теряет излишки влаги. Поток воздуха, просасываемый вентилятором 6 через торцевые отверстия 9 в кожухе 1, перфорацию шнека 5 и далее через воздухопровод 7 выделяющийся из зерна пар удаляется из установки. Сухое зерно удаляется из устройства через выгрузное окно 4.

Покрытие внешней поверхности кожуха слоем теплоизолирующего материала дает возможность снизить потери теплоты, большая часть которой расходуется на нагрев зерна в кольцевом зазоре между кожухом и валом шнека, а также ускорить процесс достижения необходимой температуры кожуха.

При выполнении транспортирующего рабочего органа в виде шнека снижаются удельные затраты энергии, повышается универсальность устройства, так как оно может работать с зерном любых сельскохозяйственных культур, максимальный размер которого не превышает величину кольцевого зазора между кожухом и валом шнека.

Наличие отверстий в торцевой поверхности кожуха со стороны загрузочного бункера улучшает условия прохождения воздуха через слой зерна в зазоре между кожухом и шнеком, вследствие чего увеличивается количество испаренной влаги.

Установку можно применять как автономно, так и в составе технологических линий для тепловой обработки зерна. На установке можно сушить различные материалы с различной насыпной плотностью; сушка может происходить при различных температурах контактной поверхности и различных параметрах среды. Установку также можно применять и для прогрева зерна с целью уничтожения его вредителей. При использовании установки в составе поточно-технологических линий её воздухопровод может быть связан с общей аспирационной сетью помещения.

Принципиальным отличием конструкции УТОЗ 2 (патенты РФ №№ 2323580, 75233, 97279) от УТОЗ 1 является составной цилиндрический кожух (рисунок 4.3). Составные части кожуха разделены между собой теплоизолирующими кольцами и снабжены индивидуальными нагревательными элементами. Транспортирующий рабочий орган выполнен в виде шнека с перфорированными витками, причём диаметр перфорации витков шнека не превышает минимального размера зерна [178].

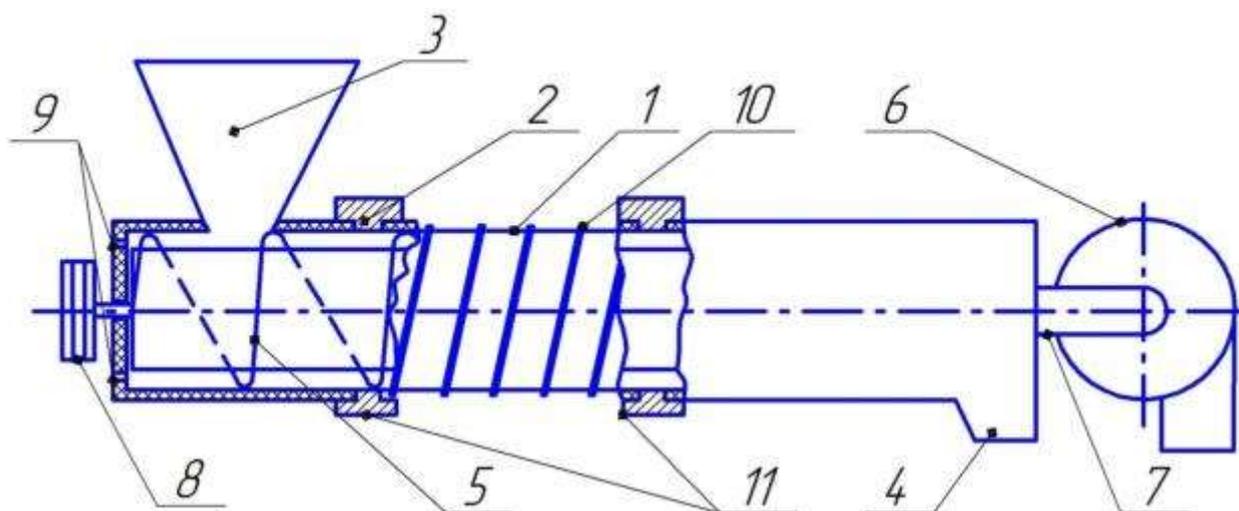


Рисунок 4.3 – УТОЗ 2:

1 - кожух; 2 – теплоизолирующий материал; 3 – загрузочный бункер; 4 – выгрузное окно; 5 – шнек с перфорированными витками; 6 – вентилятор; 7 – воздуховод; 8 – привод транспортирующего рабочего органа; 9 – отверстия; 10 - нагревательный элемент; 11 – разделительные кольца

При работе вентилятора 6 на нагнетание испарившаяся из зерна влага удаляется потоком воздуха через перфорацию витков шнека 5 и торцевые отверстия 9 в кожухе 1. В случае включения вентилятора 7 на всасывание водяные пары удаляются из установки потоком воздуха, проходящим через торцевые отверстия 9 кожуха 1, перфорацию витков шнека 5 и далее - через воздуховод 7.

Такое конструктивное исполнение позволяет осуществить более быстрый прогрев зерна и поддерживать температуру в пределах, которые не снижают посевные или технологические качества зерна.

Применение данной установки позволяет снизить удельную энергоёмкость процесса сушки зерна, улучшить качество готового продукта.

В целом принцип работы УТОЗ 2 аналогичен принципу работы УТОЗ 1.

Повышение качества процесса сушки зерна, а также обеспечение равномерного прогрева зерна возможно при использовании УТОЗ 3 (рисунок 4.4) [179].

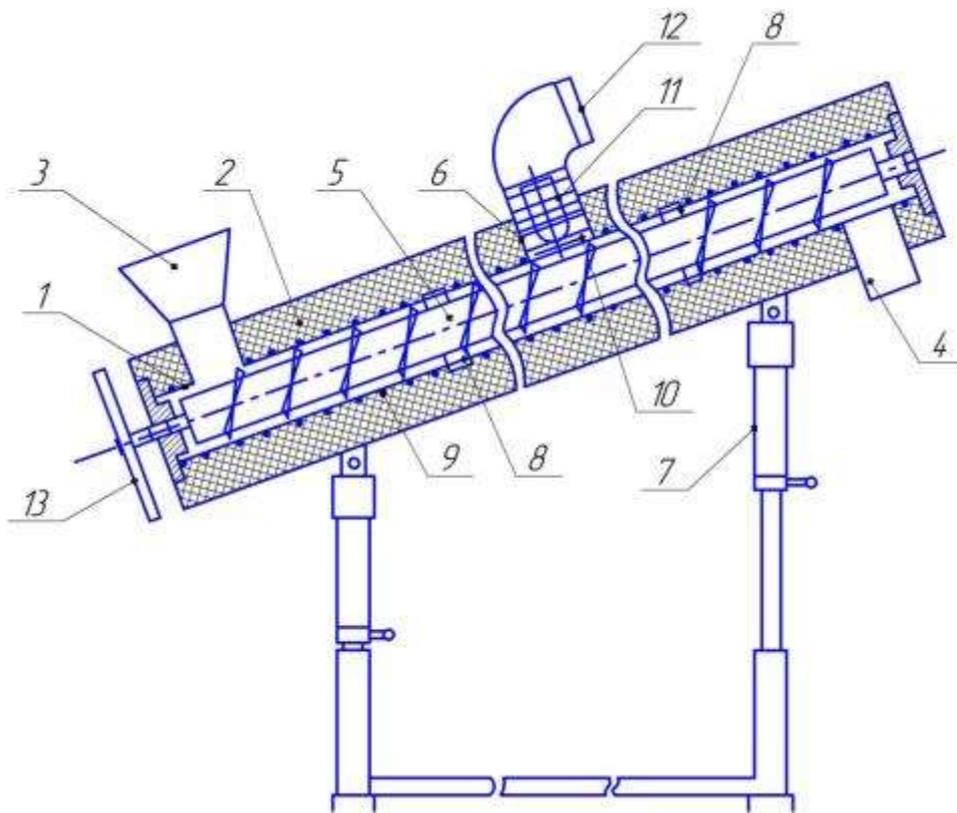


Рисунок 4.4 – УТОЗ 3:

1 – кожух; 2 – слой теплоизолирующего материала; 3 - загрузочный бункер; 4 – выгрузное окно; 5 – транспортирующий рабочий орган; 6 – воздуховод; 7 – винтовые опоры; 8 – кольца; 9, 10 – нагревательные элементы; 11 - вентилятор; 12 – патрубок; 13 – привод транспортирующего рабочего органа

Данная установка – комбинированного типа (патент РФ № 2371650). Её конструктивные особенности позволяют осуществлять контактный способ подвода теплоты к материалу в сочетании с конвективным, а также каждый из этих способов подвода теплоты по отдельности.

Отличия УТОЗ 3 от предыдущих установок заключаются в следующем. Воздуховод установлен перпендикулярно кожуху и соединён с внутренней полостью кожуха между загрузочным бункером и выгрузным окном на одинаковом от них расстоянии. Опоры выполнены с возможностью регулирования по высоте. Кроме того, в воздуховоде помещен нагревательный элемент, за которым установлен вентилятор и патрубок с возможностью размещения в нем фильтра.

Расположение воздуховода между загрузочным бункером и выгрузным окном позволяет более качественно и интенсивно осуществлять процесс воздухообмена, что повышает эффективность УТОЗ 3 за счет улучшения условий прохождения воздуха через слой зерна и интенсивность обдува зерен. В результате улучшается качество обработанного зерна.

Выполнение опор с возможностью изменения угла наклона кожуха относительно горизонтали и фиксирования в заданном положении обеспечивает более качественную обработку зерна за счет высокой оборачиваемости зерен вокруг своей оси при сохранении той же экспозиции его обработки. Эта особенность конструкции обеспечивает эффективное использование УТОЗ 3 для обра-

ботки зерна большинства сельскохозяйственных культур, имеющих различные коэффициенты трения, что повышает универсальность устройства.

Кроме изменения направления потоков воздуха для удаления влаги принцип работы УТОЗ 3 аналогичен принципу работы описанных выше установок.

С целью повышения эффективности процесса тепловой обработки зерна, повышения пропускной способности, обеспечения более равномерного распределения зерна по греющей поверхности, а, следовательно, и для более равномерного прогрева зернового слоя нами предложена УТОЗ 4 (патенты РФ №№ 90970, 92603, 96466, 96467, 96468, 99130, 99131, 2411432, 2413912, 110291) [180...199].

Принципиальное конструктивное отличие УТОЗ 4 от представленных выше устройств заключается в следующем.

Кожух установки имеет прямоугольное сечение. Транспортирующий рабочий орган выполнен в виде бесконечной цепи со скребками. Внутри кожуха горизонтально установлена греющая пластина, причем верхняя ветвь цепи со скребками опирается на пластину. Нагревательные элементы размещены между загрузочным бункером и выгрузным окном с нижней стороны греющей пластины. Для обеспечения движения зерна единичным слоем в кожухе установлена заслонка – отсекатель (рисунок 4.5).

Выполнение кожуха прямоугольного сечения теплоизолированным, использование скребкового транспортирующего органа, а также возможность регулирования температуры нагрева греющей пластины - все это обеспечивает требуемую равномерность тепловой обработки зерна, а также снижает затраты электрической энергии.

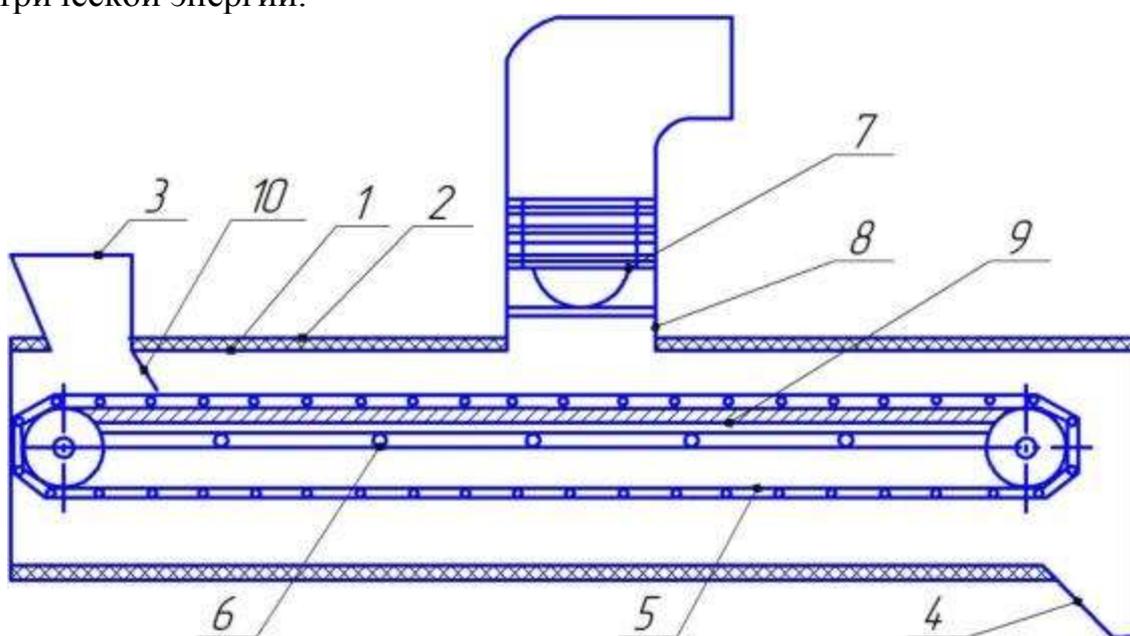


Рисунок 4.5 – УТОЗ 4:

1 – кожух, 2 - теплоизолирующий материал, 3 - загрузочный бункер, 4 - выгрузное окно, 5 - транспортирующий рабочий органа, 6 - нагревательные элементы, 7 – вентилятор, 8 – воздуховод, 9 – греющая пластина, 10 – заслонка - отсекатель

Принцип работы УТОЗ 4 заключается в следующем. Включают нагревательные элементы 6. После достижения необходимой температуры пластины 9 подают зерно в загрузочный бункер 3, откуда оно поступает на греющую пластину 9, по которой, вращаясь, перемещается транспортирующим рабочим органом 5 в единичном слое к выгрузному окну 4. Контактная поверхность пластины 9, зерно также нагревается, теряет излишки влаги, которые в виде пара выдуваются через загрузочный бункер 3 и выгрузное окно 4 потоком воздуха, создаваемым вентилятором 7 через воздухопровод 8. Конструктивные особенности скребков обеспечивают равномерный забор зерна из загрузочного бункера, а также вращение его вокруг своей оси при движении вдоль пластины и, как следствие, равномерный нагрев. Сухое зерно удаляется из устройства через выгрузное окно.

Разработанная установка универсальна, так как использование скребкового транспортирующего рабочего органа позволяет проводить тепловую обработку зерна и семян различных сельскохозяйственных культур. Перемещение скребковым транспортирующим рабочим органом постоянно вращающегося вдоль своей оси зерна единичным слоем, позволяет обеспечить высокую равномерность сушки зерна при требуемом качестве готового продукта и заданной пропускной способности.

4.2 Исследование процесса тепловой обработки зерна в лабораторных условиях

4.2.1 Программа и методика исследований установок контактного типа для тепловой обработки зерна

Для определения и оптимизации конструктивных параметров и режимов работы предложенных УТОЗ и, главное, для подтверждения теоретических предпосылок и выводов нами была принята следующая программа лабораторных исследований [160, 161]:

- разработка и изготовление экспериментальных УТОЗ; выявление эффективности их работы;
- определение пропускной способности УТОЗ и сравнение ее с расчетной пропускной способностью;
- обоснование конструктивно-режимных параметров УТОЗ с учетом выявленных теоретических закономерностей и полученных результатов исследований;
- исследование влияния выбранных конструктивных параметров и режимов работы установок на затраты энергии и качество получаемого продукта;
- проведение сравнительного анализа теоретических и экспериментальных результатов исследований.

Целью экспериментальных исследований является определение оптимальных конструктивных параметров и режимов работы предложенных УТОЗ для повышения качества получаемого продукта, снижения затрат энергии на процесс при поддержании заданной пропускной способности.

Блок-схема алгоритма экспериментального исследования процесса тепло-

вой обработки зерна представлена на рисунке 4.6.

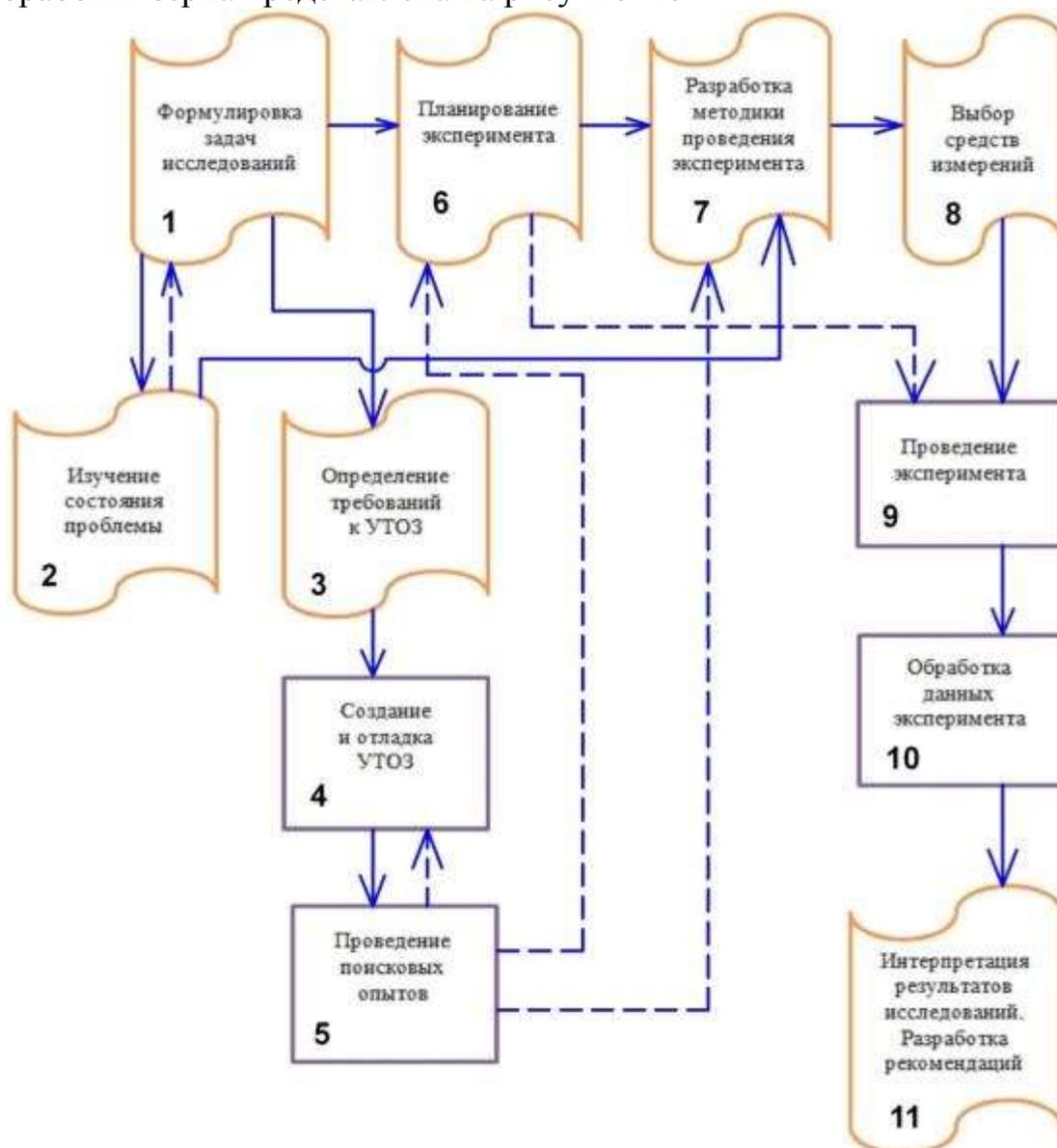


Рисунок 4.6 - Блок-схема алгоритма экспериментальных исследований процесса тепловой обработки зерна

В соответствии с поставленными задачами исследования проводили поэтапно в определенной последовательности. Этапы исследования пронумерованы в порядке их выполнения, типовые потоки информации показаны сплошными линиями со стрелками, а нетиповые - пунктирными.

После изучения состояния вопроса, накопления и анализа соответствующей информации были определены основные этапы исследований, которые включали в себя:

- разработку, изготовление, отладку лабораторной УТОЗ и проведение поисковых опытов;
- планирование эксперимента и разработку частных методик экспериментальных исследований;
- выбор средств измерений и подготовку лабораторного оборудования и приборов к работе;

- проведение предусмотренных планом эксперимента опытов и анализ полученных результатов.

При формулировке задач исследований нами учитывались совокупность идентификаторов процесса и ожидаемый результат исследования.

Предметом анализа при обзоре ранее выполненных исследований послужили новые идеи и задачи, подходы к решению этих задач, результаты этих исследований, экономические показатели, возможные пути достижения поставленной цели.

При анализе теоретических работ ранжировали значимость факторов процесса тепловой обработки с тем, чтобы в последующем незначимыми факторами можно было пренебречь. Это позволяет получить относительно несложную математическую модель процесса при сохранении адекватности и упростить ее последующий анализ. Также была определена область исследований с учетом имеющихся ограничений [164].

Этапы 3...5, связанные с созданием и отладкой экспериментальной УТОЗ и проведением поисковых опытов, позволили отработать математическую формулировку задачи и уточнить методику проведения эксперимента (этап 7).

Этапы 6 и 7 составили основу методической части экспериментального исследования. Назначение этих и последующих этапов понятно из наименования.

Надежность опытов оценивали по рекомендациям Адлера, Веденяпина, Мельникова и др.

Результаты экспериментальных исследований обрабатывали с применением методов математической статистики на ПЭВМ с помощью программ «Mathcad - 14», «Statistica – 10» и «Derive - 6» и др. При этом особое внимание обращали на критерии, подтверждающие достоверность и значимость результатов опытов, а также адекватность полученных математических моделей [168, 172, 173].

4.2.2 Методика обработки результатов основного эксперимента

Для сокращения количества опытов при выборе оптимального сочетания переменных факторов, влияющих на процесс тепловой обработки зерна, применяли критерий, которым служил показатель суммарных удельных затрат энергии на 1 кг испаренной влаги q , кДж/кг, представляющий собой отношение расходуемой на сушку теплоты Q , кДж, к массе испаренной влаги M , кг [152].

Этот критерий обладает достаточной универсальностью и позволяет сравнивать между собой сушильные установки различных типов. Например, при известных пропускной способности, начальной и конечной влажности зерна, а также расходе топлива в сушилках конвективного типа с учетом теплоты сгорания топлива, которую определяют по справочным данным, можно легко определить суммарные удельные затраты теплоты на 1 кг испаренной влаги.

В ходе проведения опытов, выполненных в соответствии с планом эксперимента, получены необходимые данные для составления математических моделей процессов тепловой обработки зерна в разработанных УТОЗ.

Для оценки отклонения параметра оптимизации от среднего значения вы-

числяли дисперсию воспроизводимости по данным m параллельных наблюдений матрицы планирования в каждой точке плана по формуле [1]:

$$S_v^2 = \frac{\sum (\bar{y}_v - y_{v,j})^2}{m-1}, \quad (4.1)$$

где S_v^2 - дисперсия в v -ой точке; j - порядковый номер параллельного опыта в данной точке плана матрицы; \bar{y}_v - среднее арифметическое значение параметра оптимизации в m параллельных опытах в точке v ; $y_{v,j}$ - значение параметра оптимизации в v -ой точке; $(m - 1)$ - число параллельных наблюдений в точках плана матрицы.

Однородность дисперсий проверяли с помощью критерия Кохрена G , основанного на законе распределения отношения максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий, т. е.

$$G = \frac{S_{v \max}^2}{\sum_{v=1}^N S_v^2}, \quad (4.2)$$

где $S_{v \max}^2$ - максимальная дисперсия в v -ой точке; $\sum_{v=1}^N S_v^2$ - сумма всех дисперсий;

N - общее число точек плана матрицы.

Гипотезу о воспроизводимости измерений проверяли при заданном уровне значимости $q = 5\%$. Критическое значение критерия Кохрена находили по приложению Е [134] при числе степеней свободы $v_q = m - 1$ и $v_{zh} = N - 1$. В случае, если расчетное значение G оказывалось меньше найденного по таблице, гипотезу об однородности дисперсий и воспроизводимости результатов принимали.

Дисперсию параметра оптимизации определяли по формуле:

$$S^2 = S^2\{y\} = \frac{\sum_{v=1}^N S_v^2}{N}, \quad (4.3)$$

где $S^2\{y\}$ - среднее арифметическое дисперсий всех различных точек плана матрицы или дисперсия параметра оптимизации; S_v^2 - дисперсия в v -ой точке; $\sum_{v=1}^N S_v^2$ - сумма всех дисперсий.

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитывали на ПЭВМ с помощью программы «Statistica-10» [28, 42, 212, 273].

Дисперсию ошибки определения коэффициентов регрессии вычисляли по формуле [2]:

$$S^2\{b_i\} = S^2\{y\} / (Nm). \quad (4.4)$$

Среднеквадратическое отклонение дисперсии ошибки определения коэффициента регрессии b_i рассчитывали по формуле:

$$S^2\{b_i\} = \sqrt{\frac{S^2\{y\}}{Nm}}. \quad (4.5)$$

Значимость коэффициентов регрессии проверяли с помощью критерия Стьюдента. Для каждого коэффициента значение критерия

$$t_i = |b_i|/S\{b_i\}, \quad (4.6)$$

где $|b_i|$ - рассчитанные коэффициенты регрессии.

При уровне значимости $q = 5 \%$ проверяли гипотезы о значимости коэффициента b_i . При числе степеней свободы $\nu_i = N(m - 1)$ находили табличное значение критерия Стьюдента $t_{кр}$ и сравнивали его с расчетным t_i . В случае большего значения t_i коэффициент b_i признавали значимым. В противном случае b_i считали статистически незначимым, и его отбрасывали без пересчета остальных коэффициентов.

Адекватность модели проверяли с помощью F -критерия Фишера [34, 223, 242]:

$$F = S_{ad}^2/S^2\{y\}, \quad (4.7)$$

где S_{ad}^2 - оценка дисперсии адекватности; $S^2\{y\}$ - дисперсия параметра оптимизации.

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{v=1}^N (\bar{y}_v - \hat{y}_{v,\Lambda})^2, \quad (4.8)$$

где l - число значимых коэффициентов (включая b_0); $\hat{y}_{v,\Lambda}$ - математическое ожидание параметра оптимизации, подсчитанное по уравнению регрессии.

4.2.3 Реализация плана эксперимента и его результаты

Для реализации плана эксперимента разработаны и созданы лабораторные установки для тепловой обработки зерна по предложенным выше запатентованным конструктивным схемам: УТОЗ 1, УТОЗ 2, УТОЗ 3 и УТОЗ 4.

При лабораторных исследованиях УТОЗ 1 сушили семена подсолнечника, УТОЗ 2 - зерно пшеницы и ржи, а также выполняли термическое обеззараживание зерна пшеницы и ячменя, УТОЗ 3 исследовали при сушке и обжаривании зерна ячменя, УТОЗ 4 - при сушке зерна овса, пшеницы, ржи и термическом обеззараживании зерна овса.

Ниже описаны результаты проведённых экспериментальных исследований.

На рисунке 4.7 представлен процесс лабораторных исследований УТОЗ 1.



Рисунок 4.7 – УТОЗ 1 при проведении лабораторных исследований: 1 – рама; 2 – кожух; 3 – бункер загрузочный; 4 – лоток выгрузной; 5 – заслонка; 6 – шибер; 7 – вентилятор; 8 – выпрямитель тока; 9 – электродвигатель; 10 – редуктор; 11 – воздуховод; 12 – комплект измерительных приборов; 13 - теплообменник

Установка смонтирована на жесткой металлической раме 1 и включает в себя теплообменник 13, представляющий собой цилиндрический кожух с электронагревателем, шнековый перфорированный транспортирующий рабочий орган (рисунок 4.8), вентилятор 7 с воздуховодом 11.

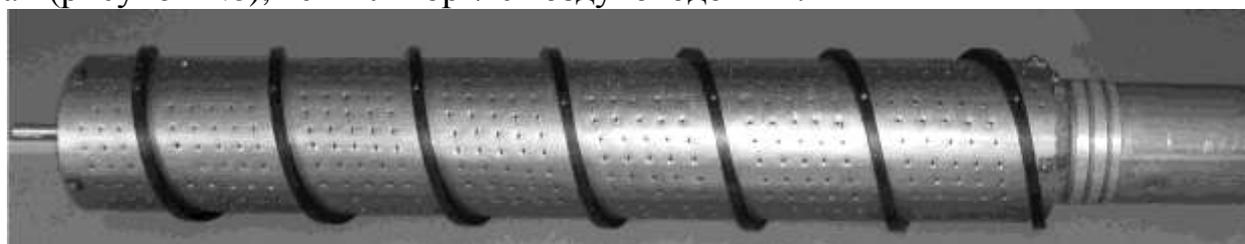


Рисунок 4.8 – Транспортирующий рабочий орган УТОЗ 1

УТОЗ 1 позволяет исследовать процесс сушки при различных температурах греющей поверхности, разной частоте вращения шнека, различной продолжительности контакта материала с греющей поверхностью, без обдува и с обдувом материала воздухом при различных скоростях его движения. Параметры процесса сушки можно контролировать с помощью комплекта измерительных приборов 12 (рисунок 4.7).

Греющая поверхность УТОЗ 1 расположена горизонтально и имеет форму полого цилиндра. Такая геометрическая форма греющей поверхности в состоянии обеспечить хороший контакт с ней материала при простом конструктивном исполнении. Греющая поверхность тщательно обработана и отполирована с внутренней стороны, которая контактирует с высушиваемым материалом. Электрический нагревательный элемент позволяет регулировать температуру поверхности от 20 °С до 200 °С. Измеряют температуру греющей поверхности и проверяют перед началом опыта равномерность температурного поля по длине поверхности при помощи установленных в ней термодатчиков.

Транспортирующий рабочий орган выполнен из перфорированной трубы, на которой закреплены витки шнека. Привод осуществляется от электродвигателя постоянного тока 9 через редуктор 10 с возможностью плавного изменения частоты вращения шнекового транспортирующего рабочего органа.

Приспособление для удаления паров влаги состоит из центробежного вентилятора 7, соединенного с кожухом 2 с помощью воздуховода 11. Количество отсасываемого воздуха регулировали изменением положенияшибера 6.

Экспериментальная УТОЗ 1 позволяет проводить исследования в широких пределах изменения следующих основных режимных параметров: частоты вращения шнека – от 1 с^{-1} до 3 с^{-1} изменением напряжения, подаваемого на двигатель постоянного тока от 80 В до 225 В, скорости движения семян подсолнечника от 0,0027 м/с до 0,0076 м/с; мощности нагревательного элемента в зависимости от требуемой температуры греющей поверхности от 0,9 до 1,35 кВт; мощности электродвигателя привода шнека – от 0,04 до 0,16 кВт. Мощность электродвигателя вентилятора на разных режимах работы УТОЗ 1 практически не изменялась и составляла 0,26 кВт.

В результате проведенных исследований УТОЗ 1 нами были получены следующие результаты.

В процессе поисковых опытов было выявлено отсутствие положительного эффекта при сушке семян подсолнечника при частоте вращения шнека менее 1 с^{-1} и температуре греющей поверхности более $200 \text{ }^\circ\text{C}$ без удаления влаги из зоны сушки. В этом случае резко возрастают суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги, которые превышали 7 МДж/кг, а температура зерна на выходе из сушильной камеры превышает $45 \text{ }^\circ\text{C}$, что приводит к критическому снижению всхожести высушиваемого зерна.

В ходе проведения опытов, выполненных в соответствии с планом эксперимента, получены необходимые данные для составления математической модели процесса сушки семян подсолнечника в УТОЗ 1.

После обработки результатов проведенных опытов было получено следующее уравнение регрессии в натуральных значениях факторов для частного случая, когда температура греющей поверхности $t = 130 \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует начальному (нулевому) уровню варьирования данного фактора:

$$q = 9,0667 - 2361,6669v_3 + 2,0075v_6 + 203640v_3^2 - 177,3314v_3v_6 - 0,1343v_6^2, \quad (4.9)$$

где q – удельные затраты теплоты на испарение влаги, МДж/кг; v_3 – скорость движения семян, м/с; v_6 – скорость движения воздуха, м/с.

Корреляционное отношение, определенное по формуле [79, 274]

$$R = \sqrt{\frac{\sum(y - \bar{y})^2 - \sum(y - \bar{y}_x)^2}{\sum(y - \bar{y})^2}}, \quad (4.10)$$

где $\sum(y - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений индивидуальных значений параметра оптимизации от общей средней арифметической \bar{y} ; $\sum(y - \bar{y}_x)^2$ – сумма квадратов отклонений параметра оптимизации в конкретных точках плана эксперимента от частных средних \bar{y}_x , соответствующих определенным, фиксиро-

ваным значениям независимых переменных, оказалось равным 0,942.

Табличное значение критерия Стьюдента t_T при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы $\nu_t = N - 1 = 60 - 1 = 59$, где N – число точек плана эксперимента, равно 2,004. Расчетное значение критерия Стьюдента t_p , определенное с помощью программы для ПЭВМ «Statistica-10», равно 9,16. Неравенство $t_p > t_T$ подтверждает достоверность вычисленного корреляционного отношения.

Табличное значение критерия Фишера F_T при 5 %-ном уровне значимости для полученного уравнения при степенях свободы числителя $\nu_1 = k - 1 = 6 - 1 = 5$ и знаменателя $\nu_2 = N - k = 60 - 6 = 54$, где k – количество коэффициентов уравнения регрессии, включая свободный член, равно 2,4. Расчетное значение критерия Фишера $F_p = 2,22$. Так как $F_T = 2,4 > F_p = 2,22$, то полученная математическая модель адекватна [62, 320, 321].

Табличное значение критерия Кохрена G_T при доверительной вероятности $\gamma_d = 0,95$ и числе степеней свободы $\nu_{\text{ч}} = m - 1 = 2$ и $\nu_{\text{зн}} = N - 1 = 59$, где m – число повторений опыта в каждой точке плана эксперимента, равно 0,1131. Расчетное значение этого критерия $G_p = 0,1063$. Неравенство $G_T = 0,1131 > G_p = 0,1063$ свидетельствует о воспроизводимости результатов измерений [77].

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия скорости движения семян и скорости движения воздуха приведено на рисунке 4.9.

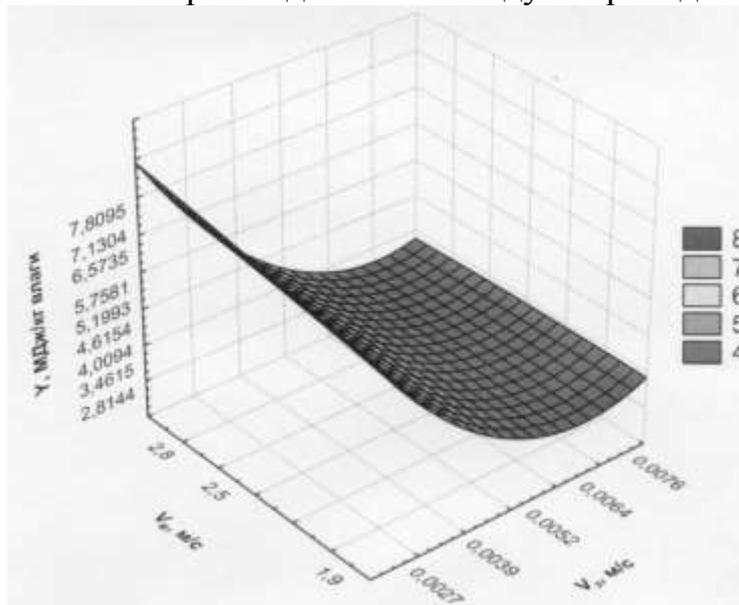


Рисунок 4.9 – Графическая интерпретация уравнения 4.9

Рисунок 4.9 показывает, что поверхность отклика от взаимодействия скоростей движения семян и воздуха вогнутая и имеет минимум в области эксперимента при $v_3 = 0,006...0,007$ м/с.

Уравнение (4.9) в кодированных значениях факторов имеет следующий вид:

$$Y = 4,1273 - 1,6777x_2 + 0,2075x_3 + 1,2345x_2^2 - 0,0273x_3^2 - 0,2021x_2x_3, \quad (4.11)$$

где Y – суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги, МДж/кг; x_2 – скорость движения семян; x_3 – скорость движения воздуха.

Коэффициенты уравнения 4.11 показывают, что в рассматриваемом слу-

чае из линейных членов наибольшее влияние на параметр оптимизации оказывает скорость движения семян x_2 , а наименьшее – сочетание скоростей движения семян и воздуха (x_2 и x_3). Причем при увеличении фактора x_2 значение параметра оптимизации снижается. Из нелинейных членов уравнения значительное влияние на параметр оптимизации оказывает квадрат скорости движения семян, причем при увеличении этого члена параметр оптимизации также увеличивается.

По указанному выше алгоритму нами также были проанализированы частные случаи математических моделей процесса сушки зерна в УТОЗ 1, когда скорость движения зерна $v_3 = 0,00515$ м/с и скорость движения воздуха $v_b = 2,35$ м/с. Данные значения режимных параметров соответствуют нулевым уровням варьирования независимых факторов.

Для случая, когда скорость движения зерна $v_3 = 0,00515$ м/с (нулевой уровень) уравнение регрессии в натуральных значениях факторов имеет вид:

$$q = -19,4851 + 0,3543t - 0,0173v_g - 0,0014t^2 + 0,0085tv_g - 0,1343v_g^2, \quad (4.12)$$

где t – температура греющей поверхности, °С.

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия температуры греющей поверхности и скорости движения воздуха приведено на рисунке 4.10.

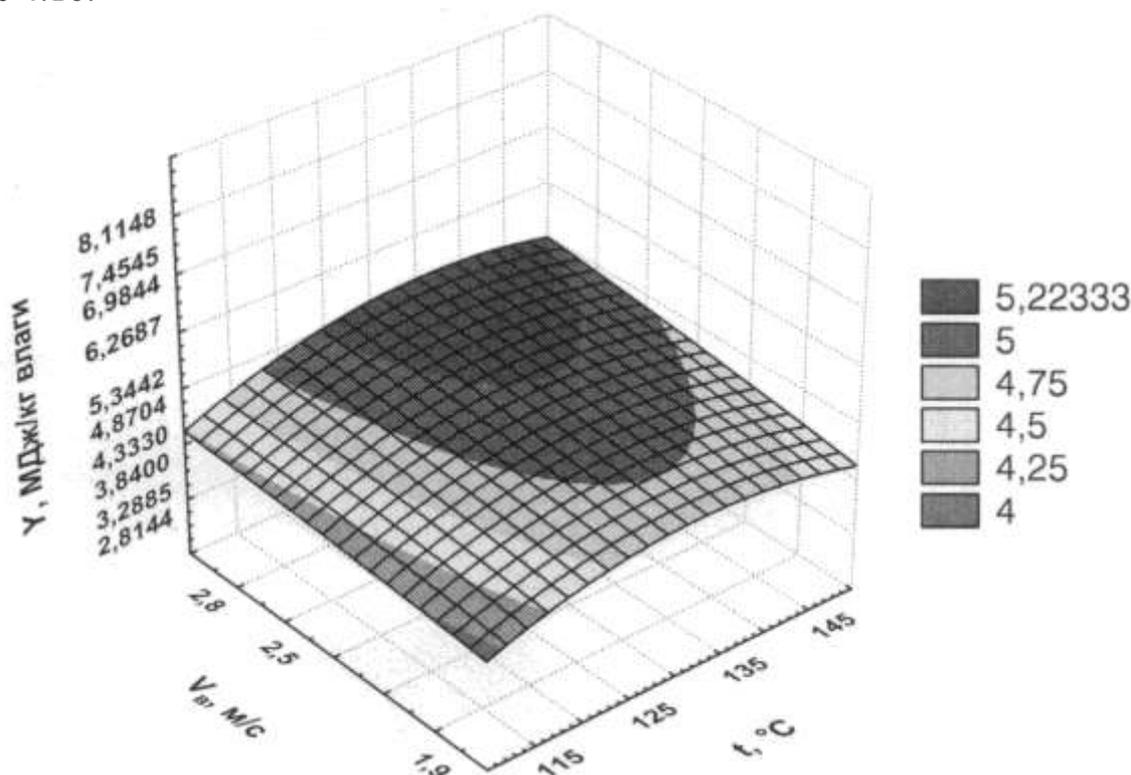


Рисунок 4.10 – Графическая интерпретация уравнения 4.12

Уравнение (4.12) в кодированных значениях факторов имеет следующий вид:

$$Y = 4,9182 + 0,1968x_1 + 0,2075x_3 - 0,3125x_1^2 - 0,0273x_3^2 + 0,0576x_1x_3, \quad (4.13)$$

где x_1 - температура греющей поверхности.

Для случая, когда скорость движения воздуха $v_b = 2,35$ м/с (нулевой уро-

вень), уравнение регрессии в натуральных значениях факторов имеет вид:

$$q = -16,4708 + 0,4094t - 1916,0205v_3 - 0,0014t^2 - 6,7019tv_3 + 203640v_3^2. \quad (4.14)$$

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия температуры греющей поверхности и скорости движения семян приведено на рисунке 4.11.

В кодированных значениях факторов уравнение (4.14) имеет следующий вид:

$$Y = 4,3048 + 0,2032x_1 - 1,7001x_2 - 0,3125x_1^2 + 1,2345x_2^2 - 0,2472x_1x_2. \quad (4.15)$$

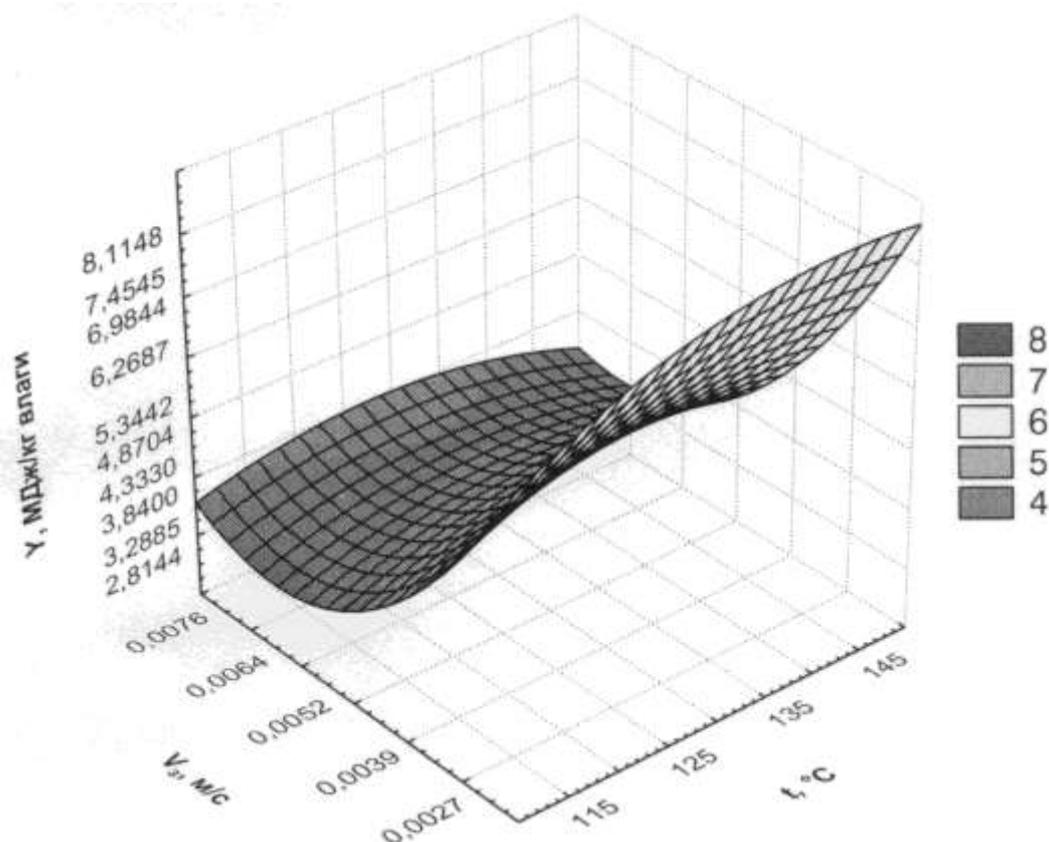


Рисунок 4.11 – Графическая интерпретация уравнения 4.14

В таблице 4.1 приведены результаты критериальной оценки полученных уравнений регрессий.

Таблица 4.1 – Критериальная оценка уравнений регрессий

№ уравнения	Критерии						
	R	F_p	F_T	t_p	t_T	G_p	G_T
4.12	0,947	2,31	2,4	7,28	2,004	0,0879	0,1131
4.14	0,941	2,05	2,4	4,92	2,004	0,0954	0,1131

Полученные расчетные значения критериев и сравнение их с табличными значениями показали адекватность полученных математических моделей, значимость их коэффициентов и достоверность проведённых исследований.

Анализ зависимостей суммарных удельных затрат теплоты на испарение влаги от скорости движения зерна при различных значениях температуры греющей поверхности и скорости движения воздуха показал, что эти зависимости с достаточной степенью точности аппроксимируются уравнениями вида:

$$y = a_0 - a_1x + a_2x^2. \quad (4.16)$$

Коэффициенты данного уравнения и получаемые при их подстановке в уравнение корреляционные отношения приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения коэффициентов уравнения зависимости суммарных удельных затрат теплоты на испарение влаги от скорости движения семян при различных значениях температуры греющей поверхности и скорости движения воздуха

Средняя температура греющей поверхности, °С	Скорость движения воздуха, м/с	Коэффициенты уравнения			Корреляционное отношение R
		a ₀	a ₁	a ₂	
115	2,8	7,9745	1,8321	0,1702	0,982
	2,5	8,3587	1,8995	0,1732	0,935
	1,9	7,1461	1,507	0,1476	0,983
125	2,8	10,14	2,6411	0,2612	0,92
	2,5	10,333	3,9611	0,5866	0,952
	1,9	10,948	4,2444	0,5847	0,961
135	2,8	10,621	2,9035	0,3061	0,97
	2,5	8,1077	1,3589	0,0849	0,936
	1,9	9,1716	2,8501	0,349	0,916
145	2,8	10,723	3,2324	0,3596	0,971
	2,5	8,7685	1,9129	0,1635	0,915
	1,9	11,213	4,0713	0,5167	0,926

Графическая интерпретация кривых, соответствующих получаемым уравнениям, приведена на рисунке 4.12.

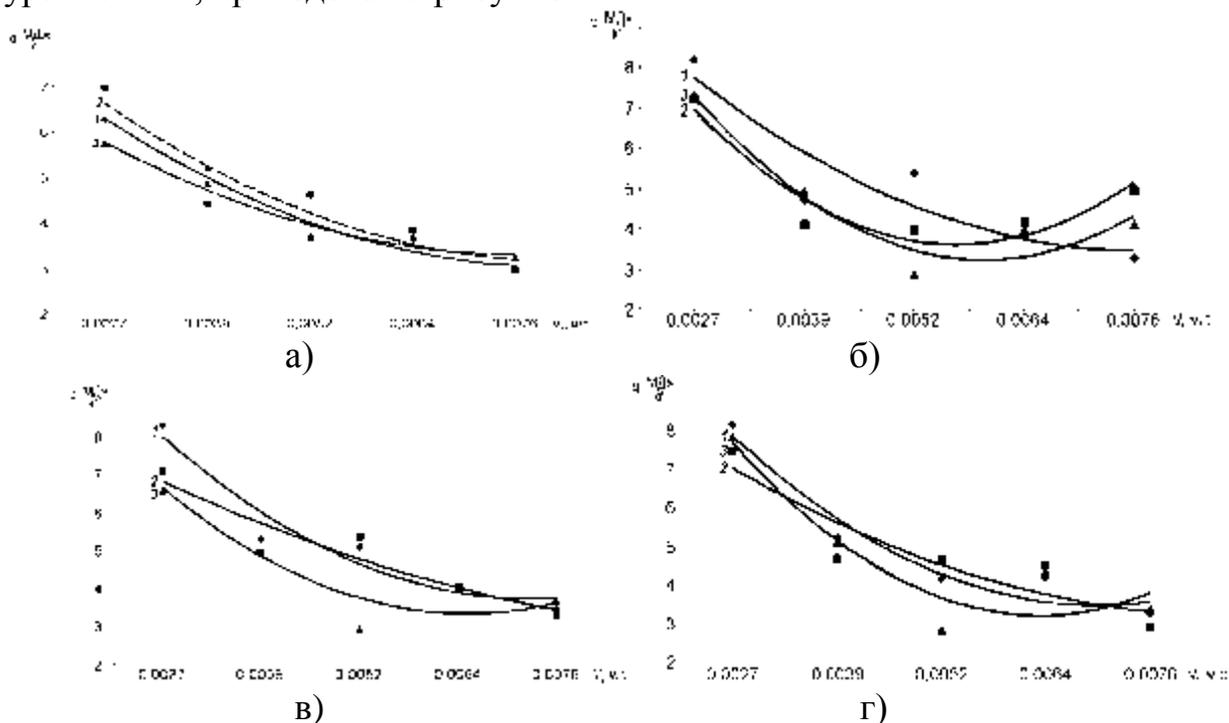


Рисунок 4.12 - Зависимости суммарного удельного расхода теплоты на испарение влаги от скорости движения зерна при различной температуре греющей поверхности:

а – температура греющей поверхности 115 °С; б - температура греющей поверхности 125 °С; в - температура греющей поверхности 135 °С; г - температура греющей поверхности 145 °С; 1 - $v_B = 2,8$ м/с; 2 - $v_B = 2,5$ м/с; 3 - $v_B = 1,9$ м/с

Анализ кривых, приведённых на рисунке 4.12 показывает, что суммарные удельные затраты теплоты q на испарение из семян подсолнечника влаги с ростом скорости их движения в УТОЗ 1 снижаются до определенного значения (3,2...3,8 МДж/кг), после которого начинают увеличиваться. Причем более интенсивное снижение q наблюдается при больших скоростях движения воздуха, а при меньших скоростях интенсивность уменьшается.

После определения вида поверхностей отклика был выполнен их анализ с помощью двухмерных сечений. Для облегчения расчетов анализ проводили с закодированными величинами факторов. При этом в полученных математических моделях определяли центр поверхности отклика, для чего находили частные производные по каждому фактору и приравнивали полученные выражения к нулю. После этого проводили каноническое преобразование моделей второго порядка. Затем выполняли графоаналитический анализ полученных выражений. На графике в координатах независимых переменных с натуральным масштабом наносили центр (точку S) поверхностей отклика, и из него проводили координатные оси главных направлений канонических уравнений. После этого, придавая различные значения критерию оптимизации в канонических уравнениях, строили серии кривых равного выхода (изолиний) в области допустимых значений варьирования независимых переменных. По кривым сечений можно судить об изменении критерия оптимизации в зависимости от значений независимых факторов. Рассмотрение всех возможных двухмерных сечений дает наглядное представление о значениях критерия оптимизации, которые он будет принимать при варьировании уровней каждой пары факторов.

Построим двухмерные сечения поверхности отклика, полученной при нулевой скорости движения воздуха и представленной уравнением 4.15.

Координаты центра поверхности определим дифференцированием уравнения (4.15) и решением системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dY}{dx_1} = 0,2032 - 0,625x_1 - 0,2472x_2; \\ \frac{dY}{dx_2} = -1,7001 - 0,2472x_1 + 2,469x_2. \end{cases} \quad (4.17)$$

$$x_{1S} = 0,051; x_{2S} = 0,694.$$

После подстановки значений x_{1S} и x_{2S} в уравнение (4.15) получили значение удельных затрат теплоты на испарение влаги в центре поверхности $Y_{S \min} = 3,72$ МДж/кг.

Проводим каноническое преобразование уравнения (4.15), для чего решаем характеристическое уравнение:

$$f(B) = \begin{vmatrix} b_{11} - B & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} - B \end{vmatrix} = B^2 - (b_{11} + b_{22})B + (b_{11}b_{22} - 0,25b_{12}^2) = 0. \quad (4.18)$$

После подстановки получаем:

$$B^2 - (-0,3125 + 1,2345)B + (-0,3125 \cdot 1,2345 - 0,25 \cdot 0,2472^2) = 0,$$

окончательно

$$B^2 + 0,922B - 0,4011 = 0. \quad (4.19)$$

Собственными числами (корнями) данного характеристического уравнения будут: $B_{11} = 1,244$; $B_{22} = -0,322$, а само уравнение в канонической форме имеет вид:

$$Y_{12} - 3,72 = 1,244x_1^2 - 0,322x_2^2. \quad (4.20)$$

Точность расчетов подтверждаем проверкой:

$$\sum_1^2 b_{ii} = -0,3125 + 1,2345 = 0,922; \quad (4.21)$$

$$\sum_1^2 B_{ii} = 1,244 - 0,322 = 0,922.$$

Определим угол поворота осей координат в точке S по формуле:

$$ctg 2\alpha = \frac{b_{ii} - b_{jj}}{b_{ij}} = \frac{-0,3125 - 1,2345}{0,2472} = -6,26; \quad (4.22)$$

$$\alpha = -4^\circ 34'.$$

Так как угол α отрицательный, то оси следует повернуть по часовой стрелке относительно центра двумерного сечения поверхности отклика.

Уравнение (4.21) использовано для построения контурных кривых поверхности отклика. Результаты расчетов, проведенных для построения семейства кривых, представлены в таблице 4.3, а сами кривые - на рисунке 4.13.

Таблица 4.3 - Данные расчета координат основных точек при построении двумерного сечения (при $x_3 = 0$)

Величина параметра оптимизации	x_1	x_2	Величина параметра оптимизации	x_1	x_2	
3,72	0	0	4,25	$\pm 0,7$	0,5	
	$\pm 0,127$	0,25		$\pm 0,76$	0,75	
	$\pm 0,25$	0,5		$\pm 0,83$	1,0	
	$\pm 0,382$	0,75		$\pm 0,91$	1,25	
	$\pm 0,51$	1,0		$\pm 1,0$	1,5	
	$\pm 0,64$	1,25		$\pm 1,1$	1,75	
	$\pm 0,76$	1,5		$\pm 0,79$	0	
	$\pm 0,89$	1,75		$\pm 0,8$	0,25	
4,0	$\pm 1,02$	2,0	4,5	$\pm 0,83$	0,5	
	$\pm 0,47$	0		$\pm 0,88$	0,75	
	$\pm 0,49$	0,25		$\pm 0,94$	1,0	
	$\pm 0,54$	0,5		$\pm 1,02$	1,25	
	$\pm 0,61$	0,75		$\pm 1,1$	1,5	
	$\pm 0,7$	1,0		4,75	$\pm 0,91$	0
	$\pm 0,79$	1,25			$\pm 0,92$	0,25
	$\pm 0,9$	1,5			$\pm 0,94$	0,5
$\pm 1,0$	1,75	$\pm 0,99$	0,75			
$\pm 1,12$	2,0	$\pm 1,04$	1,0			
4,25	$\pm 0,65$	0	$\pm 1,11$		1,25	
	$\pm 0,66$	0,25				

Рисунок 4.13 свидетельствует о том, что минимальное значение суммарных удельных затрат теплоты на испарение влаги в рассматриваемом сечении

поверхности при факторе x_3 , взятом на нулевом уровне, равно 3,72 МДж/кг и имеет место при температуре греющей поверхности 130 °С и скорости движения зерна 0,0068 м/с.

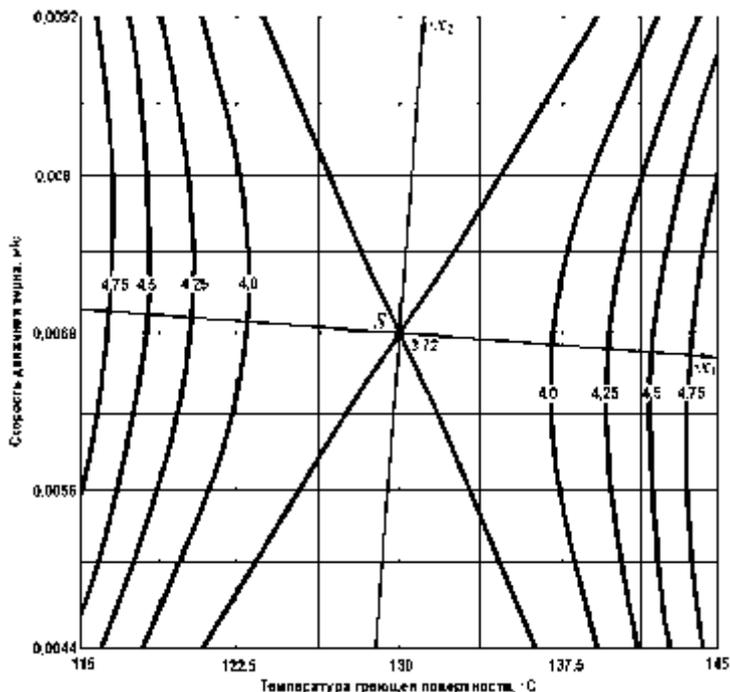


Рисунок 4.13 - Двухмерные сечения поверхности отклика, характеризующей суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги, МДж/кг, при $x_3 = 0$

Анализ рисунка 4.13 также показывает, что в рассматриваемом сечении поверхности при изменении x_1 суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги меняются интенсивнее, чем при изменении x_2 .

Получим двухмерные сечения поверхности отклика по факторам x_1 и x_3 , представленной уравнением 4.12.

Дифференцированием уравнения 4.12 определим координаты центра $x_{1S} = 0,737$; $x_{2S} = 4,578$.

После подстановки значений x_{1S} и x_{2S} в уравнение (4.12) получим значение суммарных удельных затрат теплоты на испарение влаги в центре поверхности $Y_S = 5,466$ МДж/(кг влаги).

После канонического преобразования уравнения (4.12) выясняем, что $B_{11} = -0,024$; $B_{22} = -0,315$, а само уравнение принимает вид:

$$Y_{13} - 5,466 = -0,024x_1^2 - 0,315x_3^2. \quad (4.23)$$

Угол поворота новых осей координат α оказался равным $-5^\circ 51'$.

Уравнение (4.23) использовано для построения контурных кривых поверхности отклика (рисунок 4.14).

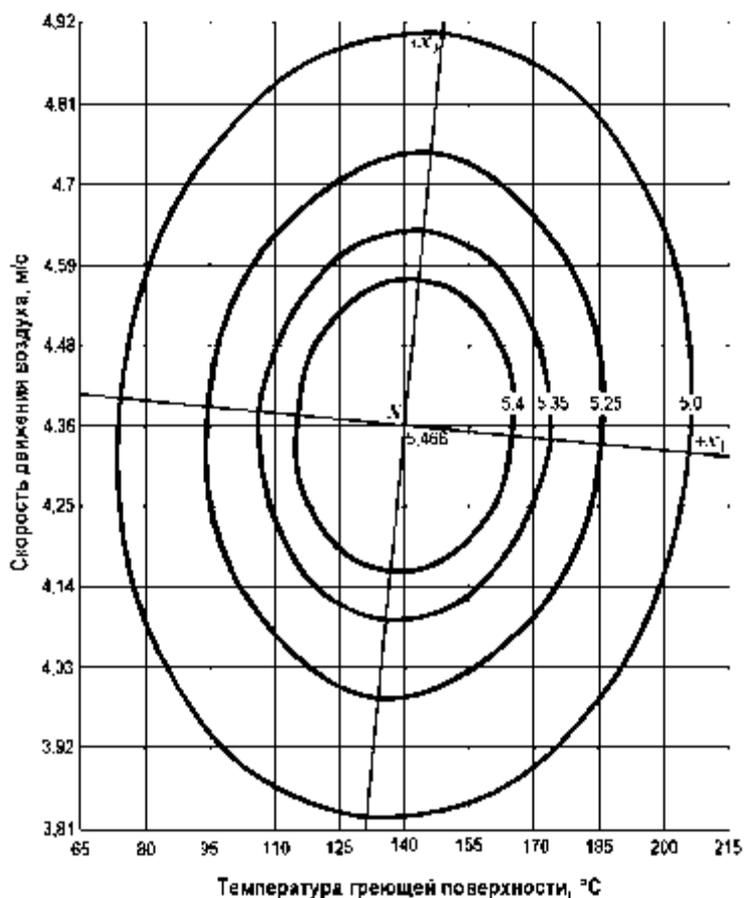


Рисунок 4.14 - Двухмерные сечения поверхности отклика, характеризующей суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги, МДж/кг, при $x_2 = 0$

Построенное двухмерное сечение (рисунок 4.14) представляет собой систему контурных кривых равных суммарных удельных затрат теплоты на испарение влаги.

Поскольку поверхность отклика выпуклая, то в точке экстремума имеем максимальное значение суммарных удельных затрат теплоты на испарение влаги в рассматриваемом сечении поверхности при факторе x_2 , взятом на нулевом уровне, равное 5,47 МДж/кг. При этом скорость движения воздуха равна 4,36 м/с, а температура греющей поверхности 140 °С.

Получим двухмерные сечения поверхности отклика по факторам x_2 и x_3 , представленной уравнением 4.11. Дифференцированием этого уравнения определим координаты центра поверхности $x_{2S} = 0,76$; $x_{3S} = 0,986$. После подстановки значений x_{2S} и x_{3S} в уравнение (4.11) получим значение суммарных удельных затрат теплоты на испарение влаги в центре поверхности $Y_S = 3,592$ МДж/(кг влаги).

После канонического преобразования уравнения (4.11) выясняем, что $B_{11} = 1,242$; $B_{22} = -0,035$, а само уравнение принимает вид:

$$Y_{23} - 3,592 = 1,242x_2^2 - 0,035x_3^2. \quad (4.24)$$

Угол поворота новых осей координат $\alpha = -4^\circ 55'$.

Уравнение (4.24) использовано для построения контурных кривых поверхности отклика, которые представлены на рисунке 4.15.

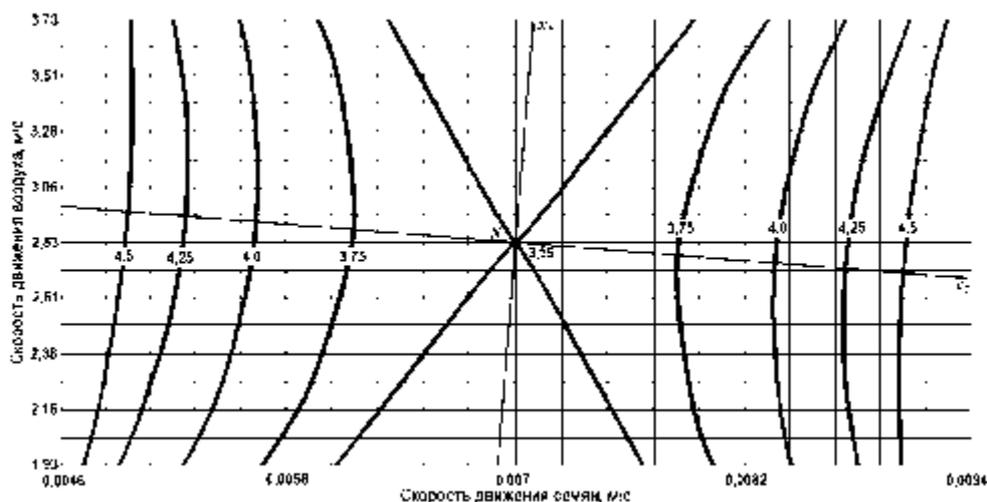


Рисунок 4.15 - Двухмерные сечения поверхности отклика, характеризующей удельные затраты теплоты на испарение влаги, МДж/кг, при $x_1 = 0$

Рисунок 4.15 показывает, что поверхность имеет экстремум (минимум) в точке с координатами $v_з = 0,007$ м/с, $v_в = 2,83$ м/с, при этом достигается минимальное значение суммарных удельных затрат теплоты на испарение из семян влаги равное 3,59 МДж/кг.

Практическая проверка правильности проведения канонического анализа полученных математических моделей процесса сушки в УТОЗ 1 показала, что значения суммарных удельных затрат теплоты на испарение влаги в серии из трех опытов составили 3,68, 3,51 и 3,20 МДж/кг. Среднее арифметическое составило 3,46 МДж/кг, что всего на 3,6 % отличается от полученного аналитическим путем оптимального значения, равного 3,59 МДж/(кг влаги). Это свидетельствует о хорошей сходимости результатов исследований.

Таким образом, в результате анализа математических моделей процесса сушки семян подсолнечника выявлены оптимальные значения независимых факторов, при которых суммарные удельные затраты теплоты на испарение из семян влаги минимальны и составляют 3,59 МДж/кг: температура греющей поверхности 130 °С, скорость движения воздуха в сушильной установке 2,83 м/с, скорость движения семян – 0,0068 м/с. Экспозиция сушки на указанных режимах работы УТОЗ 1 составила 184 с. Разовый влагосъем при этом находился в пределах 2,5...3 %.

Производительность УТОЗ 1 на выбранном режиме составляет 0,15 т/ч. Температура зерна на выходе из сушильной камеры на оптимальных режимах не превышала 39,5 °С, что не приводило к снижению его посевных качеств.

Аналогично были проведены исследования, обработаны результаты экспериментальных данных и определены оптимальные значения независимых режимных факторов для УТОЗ 2, УТОЗ 3, УТОЗ 4.

Следует отметить, что в процессе лабораторных исследований УТОЗ 1 были выявлено, что для обеспечения более равномерного нагрева зернового слоя, повышения производительности и снижения удельных затрат на процесс испарения влаги с поверхности зерна необходимо увеличить конструктивные параметры (диаметр и длину) сушильной камеры (кожуха установки). Кроме того, необходимо обеспечить ступенчатый нагрев кожуха по длине, то есть со-

здать несколько независимых зон сушки.

Указанные недостатки были учтены при создании УТОЗ 2 (рисунок 4.16).

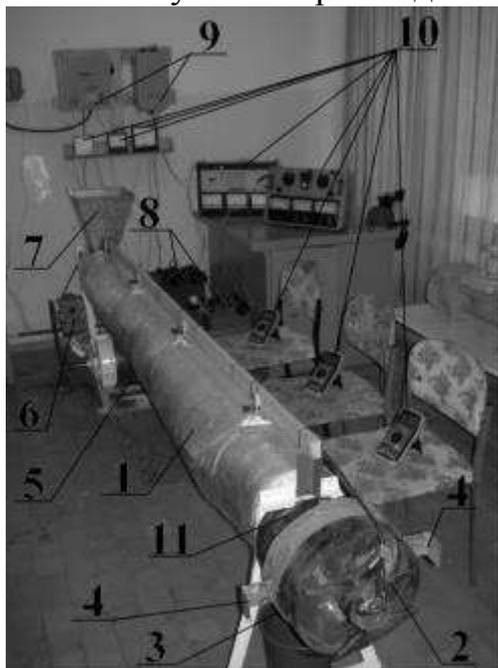


Рисунок 4.16 – УТОЗ 2 при проведении лабораторных исследований:

1 - теплообменник; 2 - вентилятор; 3 - выгрузное окно; 4 - заслонки; 5 - электродвигатель; 6 - редуктор червячный; 7 - загрузочный бункер; 8 - автотрансформаторы; 9 - пускозащитная аппаратура; 10 - комплект измерительных приборов; 11 - воздуховод

Длину кожуха увеличили в 2 раза (общая длина УТОЗ 2 составляет 2,5 м), диаметр УТОЗ 2 увеличили по сравнению с УТОЗ 1 в 1,5 раза до 0,3 м. Кожух УТОЗ 2 выполнили составным, при этом каждую составную часть кожуха снабдили индивидуальным нагревательным элементом с возможностью регулирования температуры. Составные части кожуха соединили кольцами, выполненными из теплоизолирующего материала, что не позволяет тепловому потоку с одного участка греющей поверхности распространяться на соседние. Проведённые поисковые опыты показали, что температуру первой части кожуха необходимо выставлять такой, чтобы температура зерна на этом участке на 5...10 °С не доходила до его предельно-допустимой температуры сушки. При этом происходит быстрый прогрев зерна и испарение с него поверхностной влаги. Температуру средней части необходимо выставлять минимально возможной, при этом исследования показали эффективность отключения нагревательного элемента среднего участка после его прогрева, что приводит к снижению энергозатрат на процесс тепловой обработки зерна. Нагретое на первом участке зерно, проходя вторую часть кожуха (среднюю), попадает в так называемую «зону отлежки», где происходит перераспределение влаги – влага из внутренних слоёв зерновки начинает передвигаться к наружному слою. Затем, проходя последнюю часть кожуха, температуру которого устанавливают на 5...10 °С выше температуры первого участка, зерно нагревается до предельно-допустимой температуры. При этом происходит повторное испарение влаги с поверхности зерна, удаление влажных паров из сушильной камеры и охлажде-

ние зерна.

Экспериментальная УТОЗ 2 позволяет проводить исследования в широких пределах изменения следующих основных режимных параметров: скорость движения зерна в сушильной камере - 0,007...0,034 м/с, скорость движения воздуха - 0...7,6 м/с, причём конструктивные особенности установки позволяют исследовать режимы тепловой обработки зерна в режиме «прямоток» и «противоток» (рисунок 4.17). Среднюю температуру нагрева контактной поверхности установки изменяли в пределах 20...200 °С.

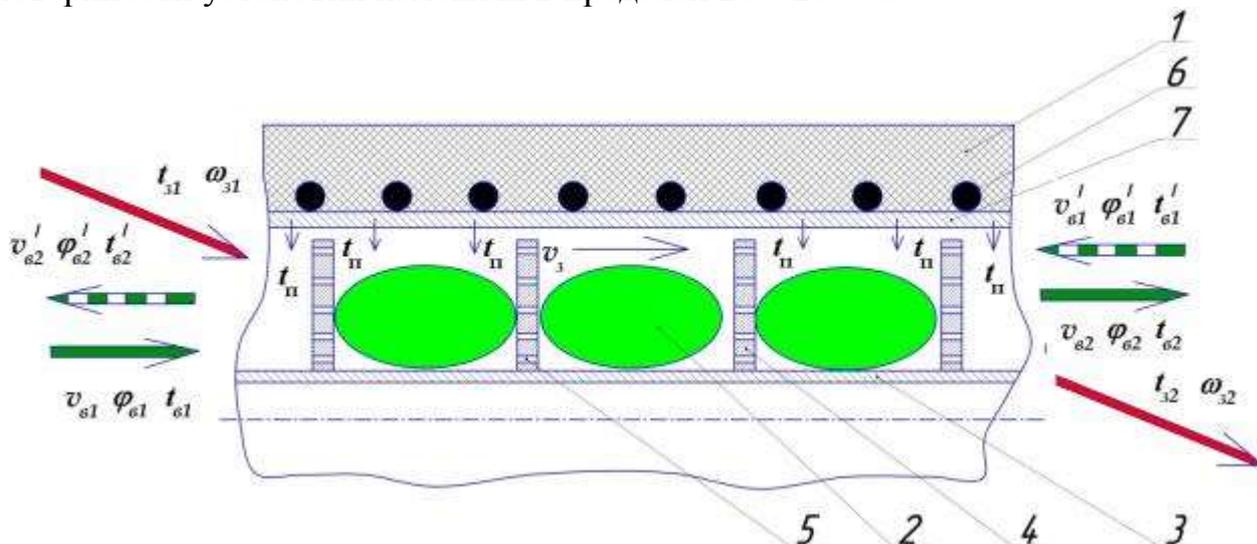


Рисунок 4.17 – Физическая модель процесса сушки зерна в УТОЗ 2:

1 – теплоизоляция; 2 – зерно; 3 – вал винтового транспортирующего рабочего органа; 4 – витки винтового транспортирующего рабочего органа; 5 – перфорация; 6 – нагревательные элементы; 7 – кожух; t_z – температура зерна, °С; ω_z – влажность зерна, %; t_b – температура воздуха (агента сушки), °С; ϕ_b – влажность воздуха, %; v_z – скорость движения зерна, м/с; v_b – скорость движения воздуха, м/с; t_n – средняя температура греющей поверхности, °С; индексы 1 и 2 указывают на соответствующие режимные параметры на входе и на выходе из сушильной камеры, штрих в обозначениях указывает на противоточное движение воздуха

Следует отметить, что в зерносушилках конвективного типа основное предназначение агента сушки - это нагрев зерна и отвод образовавшейся влаги из зоны сушки. В сушилках же контактного типа агент сушки необходим для удаления испарившейся влаги из сушильной камеры. В этом случае агентом сушки является атмосферный воздух, подаваемый в сушильную камеру вентилятором.

Проведённые исследования влияния исходной влажности зерна на влагосъём и, как следствие, на удельные затраты энергии на сушку, показали, что с увеличением исходной влажности влагосъём снижается, причём зависимость имеет вид полиномиальной кривой и описывается уравнением:

$$Y = 40,2068 - 4,2648x - 0,0651x^2, \quad (4.25)$$

где Y - исходная влажность зерна, %; x - разовый влагосъём, %.

Корреляционное отношение при этом равно $R = 0,95$ (рисунок 4.18).

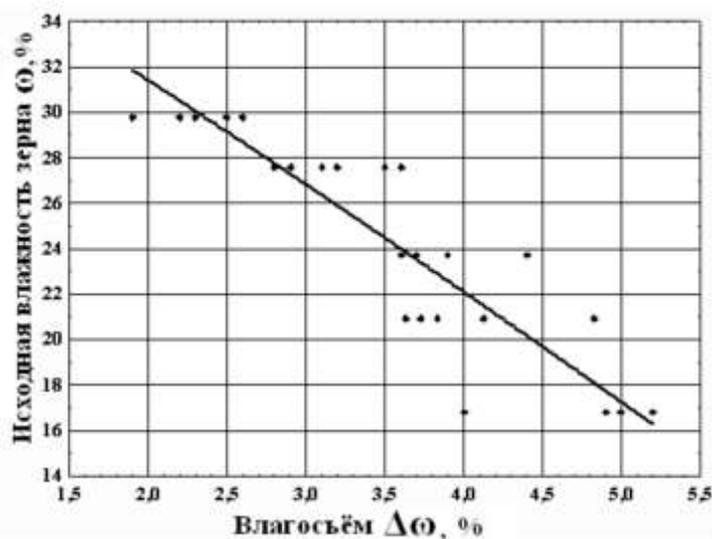


Рисунок 4.18 Зависимость влагосъёма от исходной влажности зерна при контактном способе подвода теплоты

Снижение влагосъёма при увеличении исходной влажности объясняется тем, что одинаковые объёмы зерна при разной исходной влажности имеют различную массу. Это связано с тем, что в зерне с большей исходной влажностью содержится и больше влаги, на испарение которой требуется затратить дополнительное количество энергии. Так как исследования по влиянию исходной влажности на влагосъём проводили на одинаковых режимах, то зерно с большей исходной влажностью не успевало прогреваться до одинаковой температуры за равные периоды времени опыта, следовательно, в этом случае получали меньший влагосъём. Напротив, зерно с низкой исходной влажностью (и меньшей массой) эффективнее нагревалось, и влагосъём в этом случае возрастал.

После обработки результатов проведённых опытов по сушке зерна пшеницы в режиме «прямоток», было получено следующее уравнение регрессии в натуральных значениях факторов для частного случая, когда скорость движения зерна $v_3 = 0,0205$ м/с (нулевой уровень варьирования):

$$q = 8302,91 + 84,55v_g - 187,12t_n - 16,27v_g^2 + 1,04v_g t_n + 1,58t_n^2, \quad (4.26)$$

где q – суммарные удельные затраты энергии на испарение влаги, кДж/кг; v_g – скорость движения воздуха, м/с; t_n – средняя температура греющей поверхности, °С.

Корреляционное отношение R для уравнения (4.29) составило 0,868.

Уравнение (4.26) в кодированных значениях факторов имеет следующий вид:

$$Y = 3103,89 + 88,51x_2 + 69,93x_3 - 234,91x_2^2 + 39,51x_2x_3 + 158,47x_3^2, \quad (4.27)$$

где Y – суммарные удельные затраты энергии на испарение влаги, кДж/кг; x_2 – скорость движения воздуха; x_3 – средняя температура греющей поверхности.

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия скорости движения воздуха и средней температуры греющей поверхности представлено на рисунке 4.19 а.

После определения вида поверхности отклика был выполнен её анализ с помощью двухмерного сечения (рисунок 4.19 б).

Аналогично были получены математические модели для следующих частных случаев: скорость движения воздуха $v_b = 3,8$ м/с; температура греющей поверхности $t_{гп} = 60$ °С (соответствует нулевому уровню варьирования факторов).

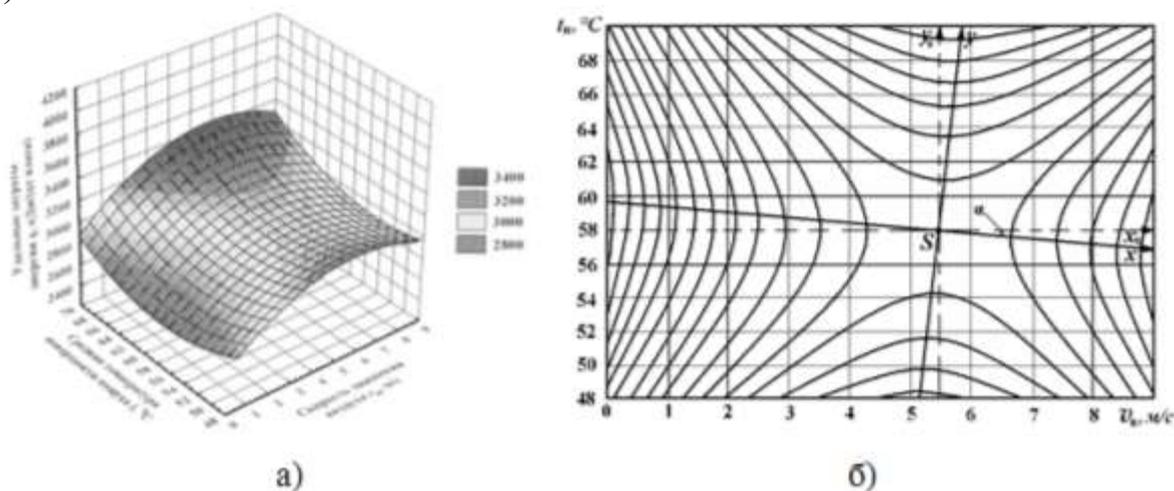


Рисунок 4.19 – Графическая интерпретация уравнения (4.26):

а – поверхность отклика от взаимодействия скорости движения воздуха и средней температуры греющей поверхности; б – двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги, кДж/кг

Для каждой из полученных математических моделей было определено корреляционное отношение и выполнена проверка с помощью критериев Стьюдента, Фишера, Кохрена.

Анализ расчетных значений критериев и сравнение их с табличными значениями подтвердил адекватность полученных математических моделей, значимость их коэффициентов и достоверность проведенных экспериментов.

Полученные математические модели процесса сушки зерна показали, что суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги из зерна пшеницы при прямотоке минимальны ($q_{\min} = 3,04$ МДж/кг) при скорости движения зерна $v_3 = 0,0035$ м/с и средней температуре поверхности кожуха $t_{гп} = 61,8$ °С. Однако полученный минимум энергозатрат соответствует неприемлемым режимам процесса, так как при $v_3 = 0,0035$ м/с пропускная способность УТОЗ 2 не превышала 90 кг/ч, что экономически нецелесообразно. Поэтому оптимальными суммарными удельными затратами теплоты будем считать такие, при которых пропускная способность установки максимальна, а разовый влагосъем - не менее 2 %. Из рисунка (4.20) видно, что это условие выполняется при $v_{3 \text{ опт}} = 0,033$ м/с.

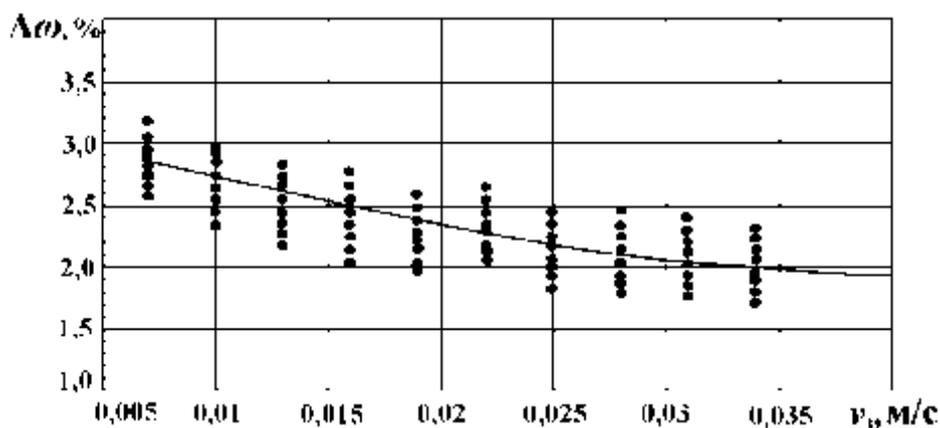


Рисунок 4.20 - Зависимость влагосъёма от скорости движения зерна:

$$\Delta\omega = 3,129 - 58,972x + 797,5589x^2,$$

где $\Delta\omega$ - разовый влагосъём, %; x - скорость движения зерна, м/с

При этом оптимальные значения остальных режимных параметров являются следующие (рисунок 4.19): средняя температура греющей поверхности $t_{п\text{ опт}} = 58\text{ }^\circ\text{C}$, скорость движения воздуха в УТОЗ $v_{в\text{ опт}} = 5,44\text{ м/с}$. Для этого случая суммарные удельные затраты теплоты на испарение из зерна пшеницы влаги $q_{\text{опт}}$ составляют 3,1 МДж/кг при пропускной способности установки 250 кг/ч и экспозиции сушки 76 с.

Аналогично, для режима сушки зерна пшеницы «противоток» были получены следующие оптимальные режимные параметры: скорость движения зерна $v_{з\text{ опт}} = 0,04\text{ м/с}$; скорость движения воздуха $v_{в\text{ опт}} = 5,2\text{ м/с}$; средняя температура греющей поверхности $t_{п\text{ опт}} = 60\text{ }^\circ\text{C}$. При этих параметрах суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги из зерна $q_{\text{опт}}$ составили 3,2 МДж/кг, а экспозиция сушки – 63 с.

Проведённые опыты показали, что энергозатраты при режиме сушки «противоток» выше, чем при сушке зерна в режиме «прямоток». Основная причина этого явления – особенности конструкции установки. Так, при сушке зерна в режиме «прямоток», вентилятор отсасывал часть воздуха непосредственно из выгрузного окна, что уменьшало объём воздуха, проходящего через кольцевой зазор установки. При работе вентилятора в режиме «противоток» большая часть всасываемого воздуха проходила через кольцевой зазор установки, охлаждая её греющую поверхность, что увеличило затраты энергии на поддержание оптимального температурного режима. Поэтому при модернизации установки следует изменить расположение входного отверстия воздуховода и предусмотреть возможность подогрева воздуха, подаваемого в установку. Это позволит снизить затраты энергии на сушку зерна при сохранении его качества.

При сушке зерна ржи область эксперимента ограничили до одного режима (прямоток).

Проведённые исследования процесса сушки зерна ржи и обработка полученных экспериментальных данных по методике, аналогичной приведённой выше, позволили выявить следующие оптимальные режимы данного процесса: скорость движения зерна $v_{з\text{ опт}} = 0,033\text{ м/с}$, средняя температура греющей поверхности $t_{п\text{ опт}} = 61\text{ }^\circ\text{C}$, скорость движения воздуха в сушильной камере

$v_{в\text{ опт}} = 5,44$ м/с. При этом суммарные удельные затраты теплоты на испарение из зерна ржи влаги $q_{\text{опт}} = 3,22$ МДж/кг. Пропускная способность УТОЗ 2 на указанных режимных параметрах составила 250 кг/ч, экспозиция сушки – 76 с.

При этом зерно на выбранных режимах не нагревалось выше 39 °С, что не приводило к ухудшению семенных свойств зерна - снижению всхожести [66].

Оптимальным режимом термического обеззараживания зерна ячменя в УТОЗ 2 является следующий: средняя температура греющей поверхности $t_{п\text{ опт}} = 95$ °С, скорость движения зерна $v_{з\text{ опт}} = 0,02$ м/с. Удельный расход энергии при этом составляет 4,28 кВт·ч/т [64].

При термическом обеззараживании зерна пшеницы оптимальные сочетания режимных параметров были получены следующие: $t_{п\text{ опт}} = 100$ °С, $v_{з\text{ опт}} = 0,02$ м/с; удельный расход энергии при этом составляет 4,32 кВт·ч/т.

Время термообработки в обоих случаях составило – 125 с. При этом зерно нагревалось до температуры 60 °С, и после обработки оно было пригодным для дальнейшей переработки.

Пропускная способность УТОЗ 2 при термическом обеззараживании на полученных оптимальных режимах составила 0,175 т/ч.

Проведённые исследования выявили также недостатки УТОЗ 2 – недостаточная равномерность нагрева зерна и нерациональная схема движения воздуха. Так, в отдельных случаях часть зерна нагревалась выше допустимого значения, что приводило к снижению качества готового продукта.

Для устранения указанного недостатка конструкции УТОЗ 2 была создана УТОЗ 3 (рисунок 4.21).



Рисунок 4.21 - УТОЗ 3 при проведении лабораторных исследований:

1 – кожух; 2 – вентилятор; 3 – электрокалорифер; 4 – загрузочный бункер; 5 – выгрузное окно; 6 – электродвигатель; 7 – редуктор червячный; 8 – опора винтовая; 9 – воздуховод; 10 – пускозащитная аппаратура; 11 – контрольно-измерительная аппаратура

Лабораторная УТОЗ 3 включает в себя, как и УТОЗ 2, кожух, разделенный на три независимых участка и покрытый слоем теплоизолирующего материала. Каждый участок снабжен индивидуальным нагревательным элементом. Внутри кожуха помещен транспортирующий рабочий орган, выполненный в виде перфорированного шнека и приводимый во вращение электродвигателем. В отличие от УТОЗ 1 и УТОЗ 2, воздуховод УТОЗ 3, с которым соединен вентилятор, установлен посередине между загрузочным бункером и выгрузным окном. В воздуховоде установлен нагревательный элемент. Это позволяет создать равномерный поток воздуха по участкам установки и исключить подсос воздуха через выгрузное окно.

Разработанная установка выполнена с возможностью изменения угла наклона кожуха относительно горизонтали и фиксирования в заданном положении. Это обеспечивает возможность более качественной и эффективной тепловой обработки зернового материала за счет более высокой оборачиваемости зерен вокруг своей оси.

УТОЗ 3 является установкой комбинированного типа. Её конструктивные особенности позволяют осуществлять, как только контактный или конвективный способы подвода теплоты к высушиваемому зерну, так и сочетание вышеуказанных способов подвода теплоты. При контактном нагреве зерна подвод теплоты осуществляется, как и в предыдущих УТОЗ от греющей поверхности с помощью электрических нагревательных элементов, а конвективный подвод теплоты осуществляется посредством установленного в воздуховоде УТОЗ электронагревателя.

УТОЗ 3 позволяет исследовать процесс тепловой обработки зерна при изменении в широких пределах основных режимных параметров: средней температуры греющей поверхности (20...250 °С), времени тепловой обработки зерна (30...250 с), скорости движения воздуха в кожухе (0...10 м/с), а также температуры подаваемого воздуха (20...70 °С).

Анализ полученных результатов исследования комбинированной сушки зерна в УТОЗ 3 позволил сделать вывод, что удельные затраты теплоты на испарение влаги возрастают с увеличением конвективной составляющей подвода теплоты к высушиваемому зерну (рисунок 4.22). Поэтому при тепловой обработке зерна в предложенной установке следует температуру подаваемого воздуха принимать близкой по значению к оптимальной температуре окружающего воздуха для производственных помещений (20 °С).

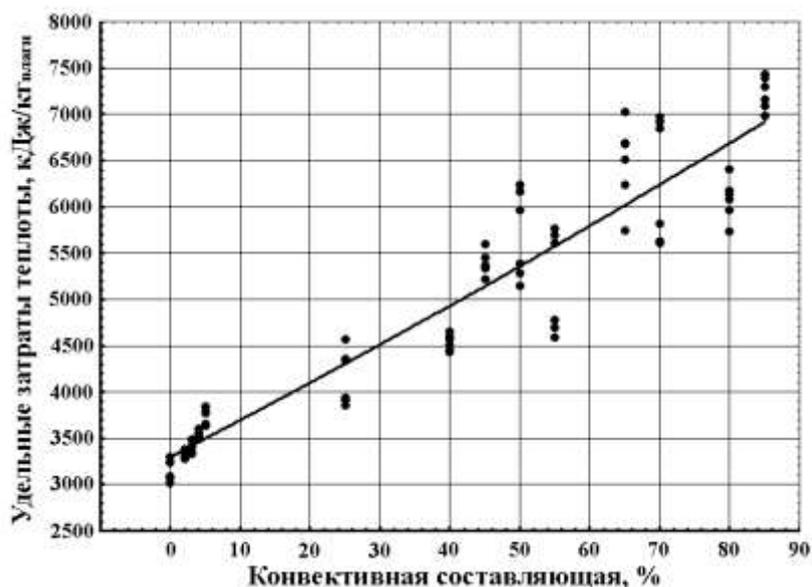


Рисунок 4.22 – Зависимость удельных затрат теплоты от процентного соотношения конвективной и контактной составляющих комбинированной сушки зерна в УТОЗ 3

Анализ экспериментальных данных, полученных при обжаривании зерна ячменя на УТОЗ 3, показал, что при увеличении температуры нагрева обжариваемого зерна происходит увеличение массовой доли содержания в нем декстринов и уменьшение массовой доли жиров (рисунок 4.23) [65].

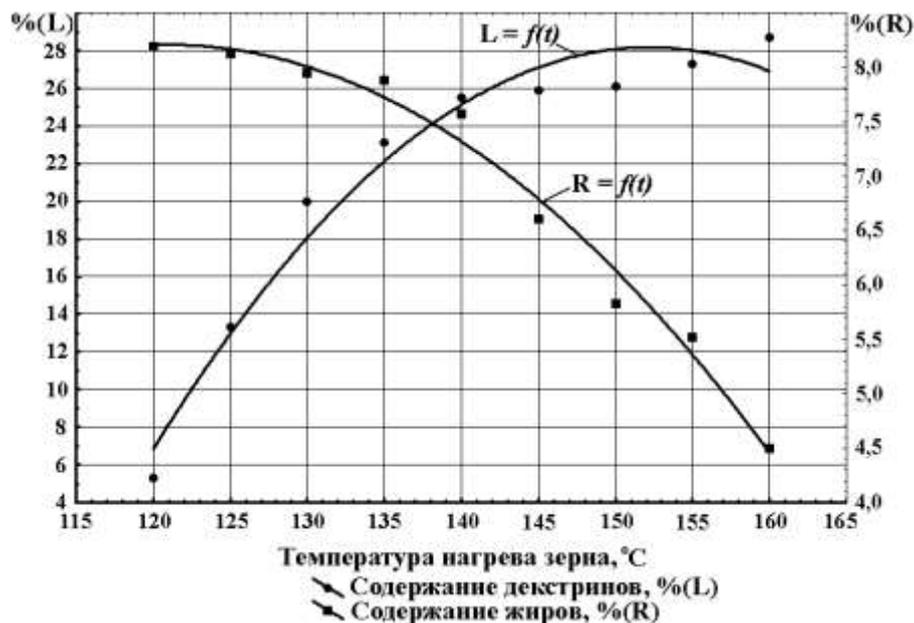


Рисунок 4.23 - Зависимость массовой доли декстринов и жиров от температуры нагрева зерна ячменя сорта «Раушан»

Оптимальная температура нагрева зерна ячменя $t_{3, \text{опт}} = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$, так как при превышении этой температуры незначительно увеличивается массовая доля декстринов в зерне, а массовая доля жиров резко уменьшается. Это приводит к снижению питательной ценности зерна и к необоснованному увеличению удельных затрат теплоты на процесс обжаривания.

Таким образом, был проведен двухфакторный эксперимент по определе-

нию влияния средней температуры греющей поверхности $t_{cp,cp}$ и времени обжаривания зерна τ на удельные затраты теплоты Q_{yd} при нагреве зерна в пределах 130...150 °С.

На основе проведенных поисковых опытов нами приняты следующие пределы варьирования независимых факторов для процесса обжаривания зерна: средняя температура греющей поверхности – 190...230 °С, время обжаривания зерна – 90...290 с.

После обработки результатов проведенных экспериментов нами получены уравнения регрессии, характеризующие влияние средней температуры греющей поверхности УТОЗ 3 и времени обжаривания на температуру нагрева зерна, в натуральных и кодированных значениях факторов соответственно

$$t_3 = -16,2309 + 0,1291\tau + 0,6273t_{cp,cp}, \quad (4.28)$$

где t_3 – температура нагрева зерна, °С; τ – время обжаривания, с; $t_{cp,cp}$ – средняя температура греющей поверхности, °С;

$$Y = 141,0611 + 7,7435x_2 + 4,7098x_1, \quad (4.29)$$

где Y – температура нагрева зерна, °С; x_1 – средняя температура греющей поверхности; x_2 – время обжаривания.

Анализ коэффициентов уравнений (4.28) и (4.29) показывает, что при увеличении средней температуры греющей поверхности и времени обжаривания температура нагрева зерна также увеличивается, причем изменение времени обжаривания оказывает большее влияние.

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия средней температуры греющей поверхности и времени обжаривания и их совместного влияния на температуру нагрева зерна представлено на рисунке 4.24.

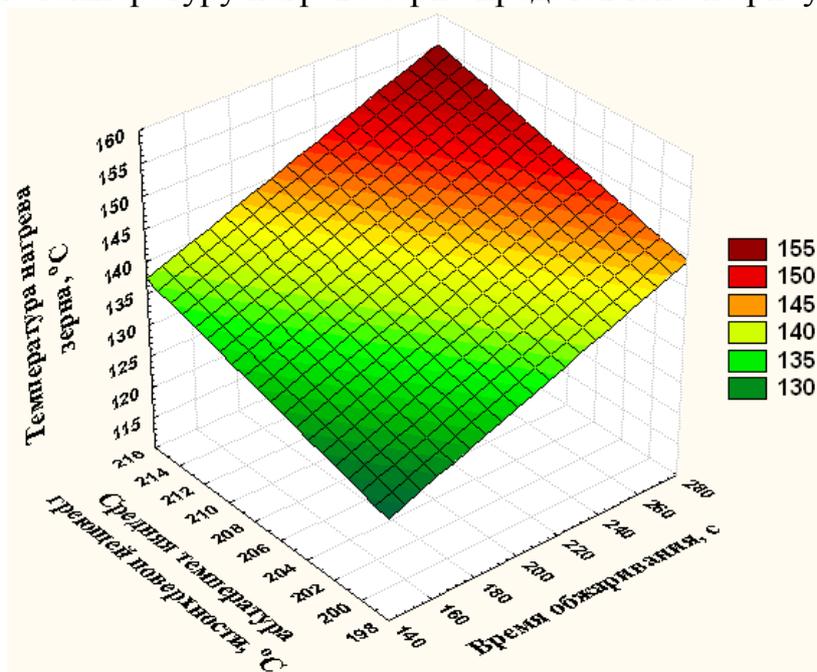


Рисунок 4.24 – Графическая интерпретация уравнения 4.28

Уравнение регрессии, характеризующее влияние средней температуры греющей поверхности и времени обжаривания на удельные затраты теплоты, необходимые для нагрева 1 кг зерна на 1 °С, в натуральных значениях факторов

имеет следующий вид:

$$q_{y0} = 899,3632 - 0,4804\tau - 8,0303t_{cp,cp} + 0,0001\tau^2 + 0,0019\tau t_{cp,cp} + 0,0188t_{cp,cp}^2, \quad (4.30)$$

где q_{y0} – удельные затраты теплоты, кДж/(кг·°С).

Уравнение (4.30) в кодированных значениях факторов:

$$Y_1 = 30,9087 - 1,5514x_2 + 1,2922x_1 + 0,4329x_2^2 + 0,8766x_1x_2 + 1,0536x_1^2, \quad (4.31)$$

где Y_1 – удельные затраты теплоты, кДж/(кг·°С).

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия средней температуры греющей поверхности, времени обжаривания и их совместного влияния на удельные затраты теплоты представлено на рисунке 4.25.

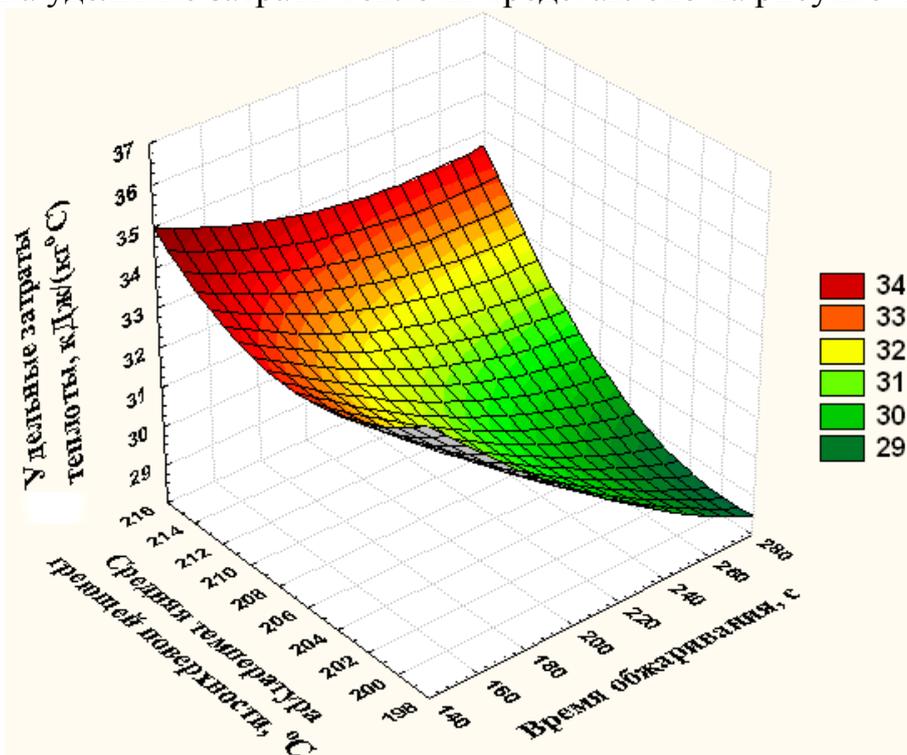


Рисунок 4.25 – Графическая интерпретация уравнения 4.31

Все полученные математические модели были подвергнуты критериальной оценке, которая подтвердила их адекватность, значимость коэффициентов и достоверность проведённых исследований.

После обработки и анализа уравнений регрессии (4.29) и (4.31) были определены значения независимых факторов, при которых температура зерна $t_{з,опт} = 140$ °С, и найдены удельные затраты теплоты на процесс обжаривания при полученных значениях независимых факторов (таблица 4.4).

Интервалы варьирования независимых факторов определяли, исходя из минимальной требуемой пропускной способности устройства при использовании его для прожаривания зерна в крупном свиноводческом хозяйстве. В соответствии с официальными данными территориального органа Федеральной службы государственной статистики о свиноводческих хозяйствах Ульяновской области одним из крупнейших хозяйств является ООО СКИК «Новомалыклинский» с среднегодовым поголовьем 18694 голов.

Таблица 4.4 - Показатели процесса обжаривания при нагреве зерна до температуры $t_{3,опт} = 140$ °С

№	Средняя температура греющей поверхности, °С	Время обжаривания, с	Удельные затраты теплоты, МДж/(кг·°С)	Пропускная способность, кг/ч
1	190	287	2,626	12,5
2	195	263	2,634	13,7
3	200	238	2,707	15,1
4	205	214	2,835	16,8
5	210	190	3,022	18,9
6	215	165	3,274	21,8
7	220	141	3,581	25,5
8	225	117	3,948	30,8
9	230	93	4,374	38,9

Исходя из оптимальной структуры стада и применяемых рационов кормления поросят-сосунов, минимальная производительность разрабатываемой УТОЗ должна быть не ниже 25 кг/ч.

Поэтому лабораторные исследования процесса обжаривания зерна были проведены при средней температуре греющей поверхности 215...230 °С и соответствующем времени обжаривания, за которое достигается температура зерна $t_{3,опт} = 140$ °С.

После обработки результатов были получены уравнения регрессии, характеризующие влияние соответственно времени обжаривания и средней температуры греющей поверхности на удельные затраты энергии при нагреве зерна до $t_{3,опт} = 140$ °С в натуральных значениях факторов:

$$q_{yд} = 68,9865 - 0,4453\tau + 0,0014\tau^2; \quad (4.32)$$

$$q_{yд} = 1520,8036 - 13,7778t_{гр.сп} + 0,0319t_{гр.сп}^2, \quad (4.33)$$

где $q_{yд}$ – удельные затраты теплоты, кДж/(кг·°С).

Уравнения (4.32) и (4.33) в кодированных значениях факторов соответственно

$$Y_1 = 34,5873 - 3,1401x_2 + 1,8466x_2^2; \quad (4.34)$$

$$Y_1 = 34,6391 + 3,1441x_1 + 1,7901x_1^2, \quad (4.35)$$

где Y_1 – удельные затраты теплоты, кДж/(кг·°С); x_1 – время обжаривания; x_2 – средняя температура греющей поверхности

Анализ уравнений (4.32), (4.33), (4.34) и (4.35) показал, что минимальные удельные затраты теплоты $q_{yд,мин} = 33,35$ кДж/(кг·°С) на обжаривание зерна ячменя при температуре $t_{3,опт} = 140$ °С достигаются при средней температуре греющей поверхности $t_{гр.сп,мин} = 216$ °С и времени обжаривания $\tau_{мин} = 159$ с. Однако полученный минимум энергозатрат соответствует пропускной способности устройства $\Pi = 22,6$ кг/ч. Поэтому рациональными удельными затратами теплоты будем считать те затраты, при которых пропускная способность устройства составляет 25 кг/ч. Данное условие выполняется при $t_{гр.сп,рац} = 220$ °С и $\tau_{рац} = 141$ с, при которых $q_{yд,рац} = 33,65$ кДж/(кг·°С).

Анализ математических моделей процесса сушки зерна на УТОЗ 3 при

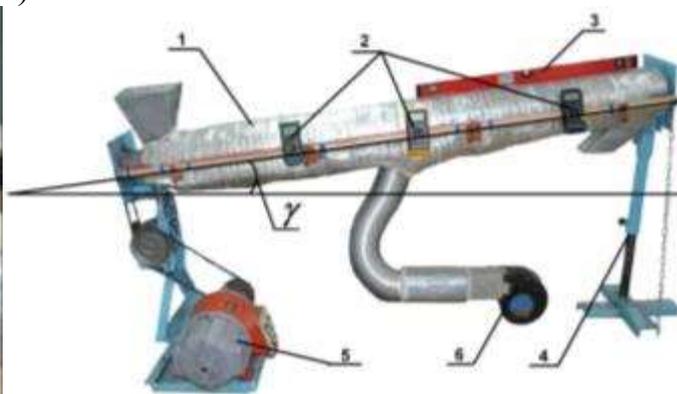
горизонтальном расположении кожуха установки позволил определить следующие оптимальные значения режимных параметров: суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги из зерна ячменя $q_{\text{уд.онм}}$ составляют 3,7 МДж/кг влаги, средняя температура греющей поверхности $t_{\text{гр.ср.онм}} = 54 \text{ }^\circ\text{C}$, экспозиция сушки зерна $\tau_{\text{онм}} = 90 \text{ с}$, скорость движения воздуха $v_{\text{в.онм}} = 1,7 \text{ м/с}$, температура воздуха, подаваемого в сушильную камеру $t_{\text{в.онм}} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$. Пропускная способность установки при этом составила 350 кг/ч.

Также одним из конструктивных параметров, влияющим на процесс сушки зерна в УТОЗ 3, является угол наклона оси шнека или кожуха установки к горизонтали.

Для выявления влияния угла наклона кожуха УТОЗ 3 к горизонтали на качество сушки зерна и определения оптимального значения данного параметра нами были проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке для сушки зерна (рисунок 4.26).



а)



б)

Рисунок 4.26 – Лабораторные исследования влияния угла наклона кожуха УТОЗ 3 к горизонтали на качество сушки зерна:

а) проведение эксперимента; б) лабораторная установка: 1 – кожух установки; 2 – приборы контроля температуры греющей поверхности установки; 3 – уровень–угломер; 4 – винтовая опора; 5 – электропривод транспортирующего рабочего органа; 6 – вентилятор; γ – угол наклона кожуха установки к горизонтали, град

В процессе экспериментальных исследований УТОЗ 3 определяли качественные и количественные взаимосвязи между изменяющимися параметрами процесса сушки зерна. Контролировали следующие факторы: угол наклона кожуха УТОЗ 3 к горизонтали γ , экспозицию сушки τ , среднюю температуру греющей поверхности $t_{\text{гр}}$, температуру зерна на выходе из установки t_3 , исходную и конечную влажности зерна, соответственно, ω_1 и ω_2 , а также всхожесть зерна до и после сушки.

Скорость движения воздуха и его температура для обеспечения качественного выноса влаги из сушильной камеры УТОЗ 3 были приняты на основании результатов предыдущих исследований: $v_{\text{в}} = 1,7 \text{ м/с}$, температура воздуха $t_{\text{в}} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$.

На основании результатов поисковых опытов, а также, исходя из конструктивных соображений, угол наклона кожуха УТОЗ 3 к горизонтали изме-

няли от 0 до 45°. Экспозиция сушки оставалась на всех режимах постоянной и составляла 90 с, для этого с увеличением угла наклона кожуха установки к горизонтали увеличивали частоту вращения шнека n от 20 до 470 мин⁻¹. Средняя температура нагрева кожуха сушильной установки была постоянна и составляла 54 °С. Средняя температура зерна на выходе из сушильной камеры на всех режимах не превышала 40 °С, что соответствует требованиям к сушке семенного материала.

Качество процесса сушки оценивали по результатам контроля всхожести зерна на каждом из исследуемых режимов. Всхожесть определяли согласно действующему ГОСТу, при этом исходная всхожесть зерна (до сушки) составляла 95,5 % [66].

В ходе проведения исследований нами были получены необходимые данные для выявления оптимального соотношения значений режимных и конструктивных параметров и показателей качества процесса сушки. Так, при оценке влияния угла наклона кожуха УТОЗ 3 на всхожесть зерна установлено, что при горизонтальном расположении кожуха УТОЗ всхожесть зерна после сушки минимальна и составила 93,57 % (рисунок 4.27), что связано, в первую очередь, с неравномерностью нагрева зерна.

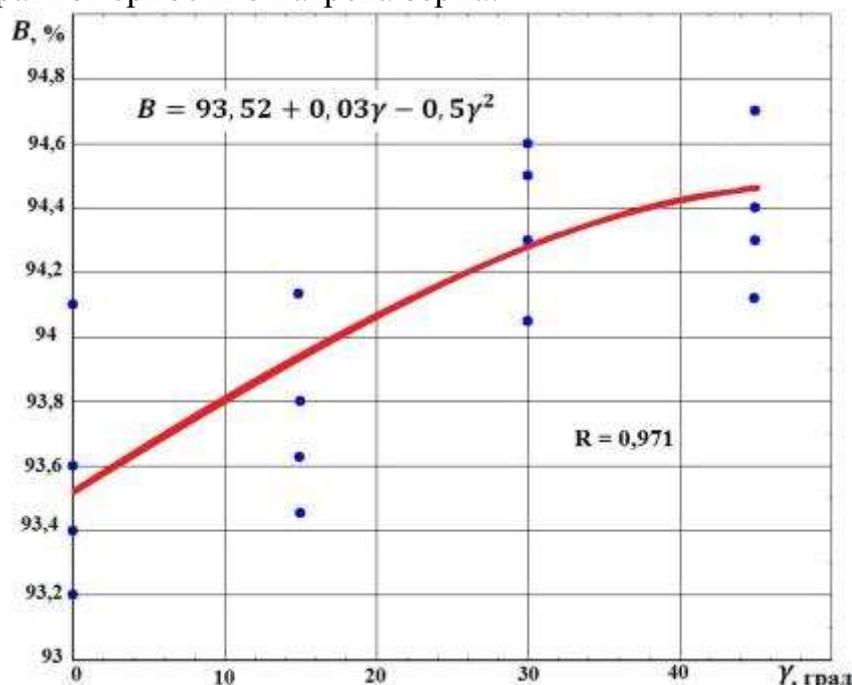


Рисунок 4.27 – Зависимость всхожести зерна B после сушки от угла наклона кожуха установки к горизонтали γ

Температура нагрева отдельных зёрен при этом превышала предельно допустимую, что в итоге отрицательно сказалось на всхожести всей партии зерна, которая снизилась, по сравнению с исходной, на 1,93 %. Увеличение угла наклона от 0° до 45° привело к улучшению оборачиваемости зерна, более равномерному его прогреву во всём объёме сушильной камеры и повышению всхожести, а, следовательно, и качества процесса сушки. Всхожесть при этих углах наклона кожуха УТОЗ 3 к горизонтали увеличилась соответственно от 93,57 % до 94,37 % (на 0,8 %).

Анализ зависимости энергозатрат от угла наклона кожуха УТОЗ 3 к горизонтали выявил следующее. При горизонтальном расположении кожуха установки ($\gamma = 0^\circ$), наблюдали минимум энергозатрат на процесс испарения влаги $q = 3,75$ МДж/кг. При увеличении угла наклона до 45° происходит резкое повышение суммарных удельных затрат энергии до $q = 6,76...7,26$ МДж/кг (в 1,8...1,94 раза) (рисунок 4.28), что связано со снижением осевой скорости зернового материала в установке и, следовательно её пропускной способности. В то же время всхожесть зерна снижается по сравнению с исходной на 1,13 %.

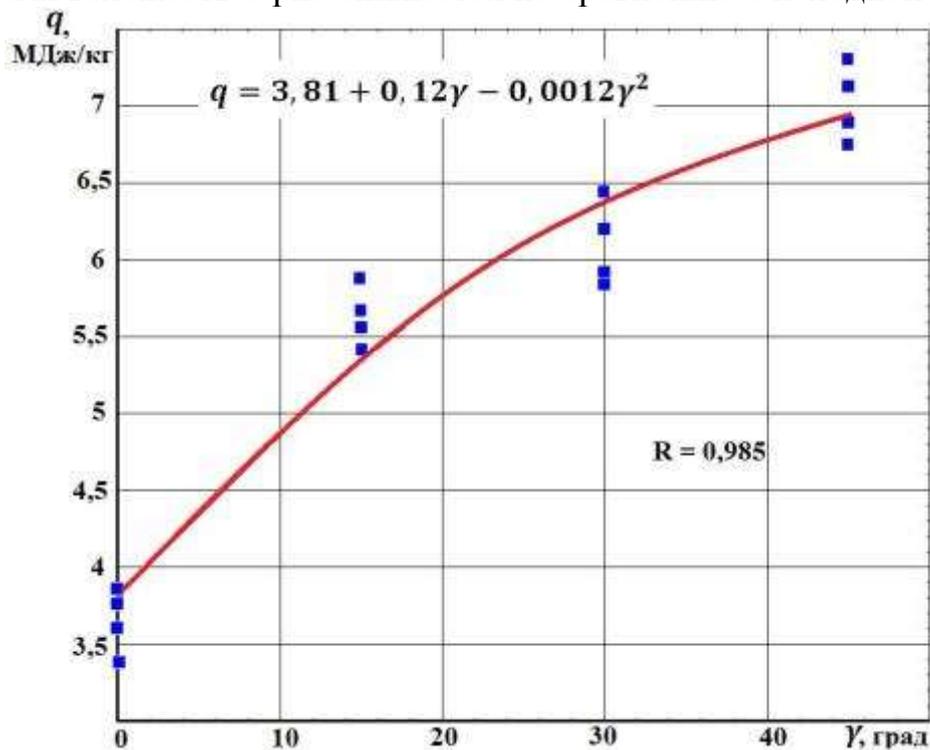


Рисунок 4.28 – Зависимость суммарных удельных затрат энергии на удаление влаги из зерна q от угла наклона кожуха установки к горизонтали γ

Анализ полученных данных позволил выявить следующие рациональные параметры процесса сушки зерна ячменя в УТОЗ 3. Так, эффективнее всего эксплуатировать УТОЗ при горизонтальном расположении её кожуха. Снижение при этом всхожести на 1,98 % находится в допустимых пределах, предъявляемых агротехническими требованиями к эксплуатации зерносушильной технике. Повышение же эффективности сушки путем увеличения угла, и, следовательно, повышением всхожести приводит к почти двойному увеличению энергозатрат на процесс удаления влаги из зерна, что в свою очередь существенно влияет на рост себестоимости сушки и делает эксплуатацию данной установки нерентабельной.

Следовательно, на качество процесса сушки в предложенной установке и на систему «качество-энергозатраты» влияние оказывает не только температура греющей поверхности, экспозиция сушки, скорость движения и температура воздуха, но и угол наклона кожуха установки к горизонтали γ .

В результате экспериментальных исследований выявлено, что рациональный угол наклона кожуха УТОЗ 3 равен 0° (горизонтальное положение), при этом оптимальные режимные параметры энергосберегающей эксплуатации

установки следующие: средняя температура греющей поверхности равна 54 °С, экспозиция сушки – 90 с. Суммарные затраты теплоты на испарение влаги из зерна при этих режимных параметрах составили 3,75 МДж/кг. Разовый влагосъём на выбранном режиме составил 2,3 % при пропускной способности УТОЗ 3 - 250 кг/ч.

Дальнейшее совершенствование конструкции предложенных УТОЗ было направлено на увеличение производительности и повышение качества сушки, посредством обеспечения более равномерного, тонкослойного нагрева обрабатываемого зерна.

Для реализации указанных целей нами была разработана и изготовлена лабораторная УТОЗ 4 (рисунок 4.29).



Рисунок 4.29 - УТОЗ 4 при проведении лабораторных исследований:

1 - кожух; 2 - электрокалорифер; 3 - загрузочный бункер; 4 - выгрузное окно; 5 - воздуховод; 6 - электродвигатель; 7 - персональный компьютер; 8 - блок автоматического управления температурным режимом; 9 - контрольно-измерительная аппаратура

Разработанная экспериментальная УТОЗ 4 состоит, в отличие от предыдущих УТОЗ, из кожуха прямоугольного сечения, поверхность которого покрыта слоем теплоизолирующего материала. Транспортирующий рабочий орган выполнен в виде бесконечной цепи со скребками (рисунок 4.30 а). Внутри кожуха горизонтально установлена греющая пластина (рисунок 4.30 б).

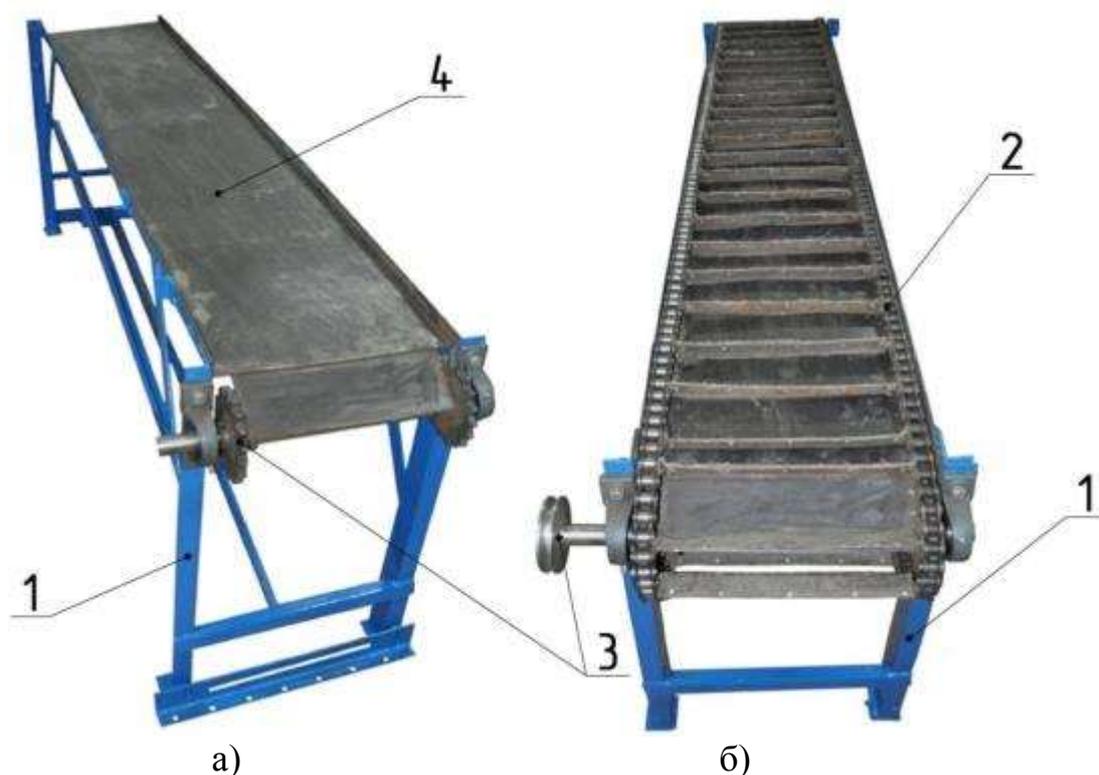


Рисунок 4.30 – Элементы конструкции УТОЗ 4:

а) вид без транспортирующего рабочего органа, б) вид с транспортирующим рабочим органом: 1 – рама; 2 – цепь со скребками; 3 – элементы привода; 4 – греющая пластина

УТОЗ 4 позволяет исследовать процесс тепловой обработки зерна при изменении в широких пределах основных режимных параметров: средней температуры греющей поверхности ($20 \dots 250 \text{ }^\circ\text{C}$), скорости движения зерна по греющей поверхности ($0,01 \dots 0,13 \text{ м/с}$), скорости движения воздуха в кожухе ($0 \dots 10 \text{ м/с}$), температуры подаваемого в сушильную камеру воздуха ($20 \dots 70 \text{ }^\circ\text{C}$).

В результате предыдущих экспериментальных исследований, проведённых на УТОЗ 1, 2 и 3 было выявлено, что при загрузке влажного зернового материала в рабочую камеру температура греющей поверхности быстро снижается. Поэтому для повышения качества обработки зерна необходимо поддерживать температуру греющей поверхности и температуру подаваемого воздуха постоянной. С этой целью УТОЗ 4 была оснащена разработанным нами блоком автоматического управления температурным режимом (рисунок 4.31).

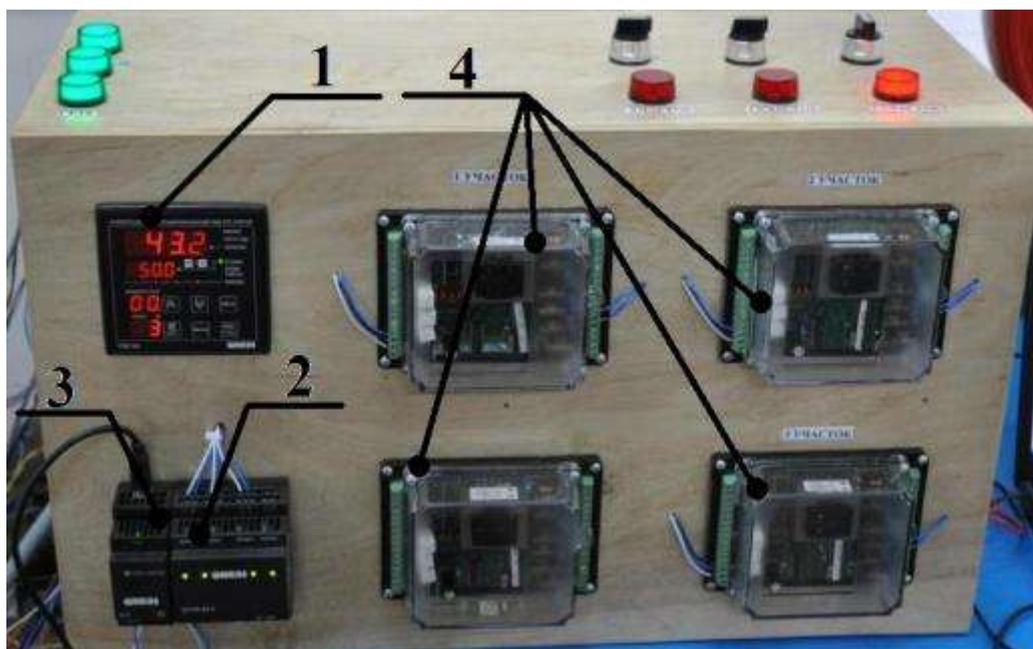


Рисунок 4.31 - Блок автоматического управления температурным режимом:
 1 - регулятор ТРМ - 148; 2 - блок питания; 3 - преобразователь интерфейса;
 4 - блок управления симисторами и тиристорами (БУСТ)

Регулятор ТРМ - 148 предназначен для измерения и автоматического регулирования температуры, значение которой первичными термопреобразователями (датчиками) может быть преобразовано в напряжение постоянного тока или унифицированный электрический сигнал постоянного тока.

Термопреобразователи предназначены для непрерывного измерения температуры жидких, паро- и газообразных сред, сыпучих материалов и твердых тел, не агрессивных к материалу защитной арматуры термопреобразователя.

В разработанной УТОЗ 4 температуру греющей пластины измеряли термопреобразователями сопротивления типа ДТС224-50М.В3.43/1,5 (рисунок 4.32 а). Для измерения температуры подаваемого в установку горячего воздуха в воздуховоде использовали датчик ДТС125-50М.В2.60 (рисунок 4.32 б).



а)



б)

Рисунок 4.32 – Термопреобразователи сопротивления:
 а) датчик ДТС 224-50М.В3.43/1,5; б) датчик ДТС 125-50М.В2.60

Для питания стабилизированным напряжением 24 В или 36 В датчиков с унифицированным выходным токовым сигналом использовали многоканальный блок питания БП14Б-Д4.4-24 (рисунок 4.33 а).

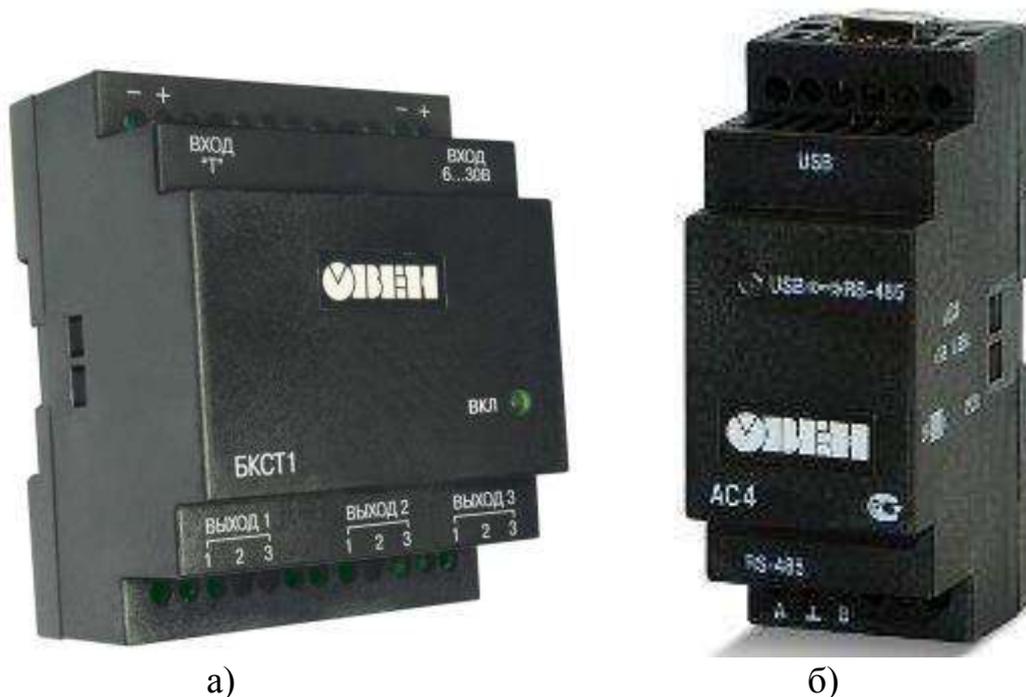


Рисунок 4.33 – Элементы автоматизации УТОЗ 4:

а) блок питания БП 14Б-Д4.4-24; б) преобразователь интерфейса АС4

Преобразователь интерфейса АС4 (рисунок 4.33 б) предназначен для взаимного автоматического преобразования сигналов интерфейса USB, что позволяет подключать к сети переменного тока персональный компьютер с USB-портом.

Для осуществления связи персонального компьютера с приборами, подключенными через преобразователь интерфейса АС4, применяли программное обеспечение SCADA-система OWEN PROCESS MANAGER (OPM).

В процессе работы УТОЗ 4 необходимо при достижении определенной температуры греющей пластины отключить электрический ток от нагревательных элементов. С этой целью в блоке автоматического управления температурным режимом установлены симисторы, которые работают как управляемые выключатели.

Для управления симисторами применили блок БУСТ (рисунок 4.31), а для обеспечения теплоотвода использовали охладители 0221-60 М6.

Для обеспечения требуемого температурного режима в УТОЗ 4 материала на персональном компьютере при помощи программы «Конфигуратор ТРМ-148» задавали значения температуры на приборе ТРМ-148.

Лабораторные исследования процессов тепловой обработки зерна на УТОЗ 4 и обрабатывали полученные экспериментальные данные аналогично методике исследований УТОЗ 1, УТОЗ 2 и УТОЗ 3.

Результаты проведённых исследований УТОЗ 4 в лабораторных условиях при сушке зерна овса, ржи и пшеницы представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Сравнительная характеристика оптимальных режимных показателей при сушке различных культур в УТОЗ 4

Показатели	Высушиваемая культура		
	Овёс	Рожь	Пшеница
Средняя температура греющей поверхности, °С	69	94	87
Скорость движения зерна, м/с	0,05	0,045	0,045
Скорость движения воздуха, м/с	1,33	1,33	1,33
Температура подаваемого воздуха, °С	23,8	23,4	23,6
Средний разовый влагосъём, %	2,85	2,75	2,77
Суммарные удельные затраты энергии на процесс испарения влаги из зерна, МДж/кг	3,7	3,86	3,82
Максимальная температура зерна на выходе из сушильной камеры, °С	38	39	38
Пропускная способность установки, кг/ч	305	375	400
Экспозиция сушки, с	40	45	45

Как видно из полученных данных, энергозатраты на процесс сушки зерна зависят от вида высушиваемой культуры. Так, максимум энергозатрат приходится на рожь, это связано, прежде всего, с тем, что рожь содержит больше водорастворимых веществ. Белковый комплекс у нее более устойчив, к тому же рожь содержит большое количество слизи. Поэтому зерно ржи выдерживает более высокую температуру нагрева.

Оптимальным режимом термического обеззараживания зерна овса в УТОЗ 4 при минимальных удельных затратах энергии, равных 4,1 кВт·ч/т, является следующий: средняя температура греющей поверхности $t_{гр\ onm} = 80$ °С, длительность термического обеззараживания - 180 с. Зерно при этом на выходе из установки нагревалось до температуры 57...60 °С, что вполне удовлетворяет режимным параметрам обработки технологического сырья (фуража, комбикорма и т.п.). При этом погибло 100 % зерновых вредителей (приложение В).

4.3 Исследование процесса тепловой обработки зерна в производственных условиях и его экономическая эффективность

4.3.1 Программа и методика исследований

Для подтверждения возможности использования разработанных УТОЗ в относительно небольших сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятиях, и уточнения ряда предположений, на которые опирались при разработке теоретических основ процесса тепловой обработки зерна и проектировании УТОЗ, а также для установления границ экономически эффективного использования УТОЗ с выбранными конструктивными параметрами и режимами их работы, были проведены исследования предложенных установок в производственных условиях.

Исследуемые УТОЗ представляли собой модуль тепловой обработки зерна, входящий в технологические линии по послеуборочной обработке зерна (сушке), по подготовке зерна к размолу (сушке и подогреву в зимний период), поджариванию зерна и его термическому обеззараживанию.

Исследования проводили в следующем порядке. По договору с предприятиями, деятельность которых связана с зернопроизводящей и зерноперерабатывающей отраслями, в течение определенного времени проводили изучение и анализ существующего технологического процесса. В результате уточняли ре-

жимные и эксплуатационные показатели работы установок, рассчитывали технико-экономические характеристики. Также определяли требуемые в данных конкретных условиях пропускную способность установок, потребляемую мощность, среднюю температуру греющей поверхности кожуха при различных режимах работы, уточняли порядок работы с предложенными УТОЗ. Исследования проводили при работе с зерном разных культур различной исходной влажности и степенью засоренности при различных тепловых режимах обработки (сушка, обжаривание, обеззараживание) с последующей оценкой качества получаемой продукции.

Качество зерна, полученного после тепловой обработки в хозяйствах, оценивали в аккредитованных и сертифицированных испытательных лабораториях. На основании анализа полученных результатов были сделаны выводы и разработаны соответствующие рекомендации.

4.3.2 Результаты исследований разработанных УТОЗ в производственных условиях

Предложенные УТОЗ прошли производственную апробацию в ряде сельскохозяйственных предприятий Республики Чувашии, Ульяновской и Самарской областей.

Пилотные исследования УТОЗ 1 на базе сельскохозяйственного предприятия проводили при использовании её в технологическом процессе по подработке семян подсолнечника.

На рисунке 4.34 представлен фрагмент технологической линии подработки семян подсолнечника с использованием УТОЗ 1.

В проводимых производственных исследованиях использовали ранее обоснованные оптимальные конструктивно-режимные и теплофизические параметры УТОЗ 1. Также измеряли влажность семян до и после процесса сушки, контролировали температуру нагрева семян после сушки и температуру греющей поверхности кожуха, затем определяли суммарные затраты теплоты на 1 кг испаренной влаги.



Рисунок 4.34 - Технологическая линия подработки семян подсолнечника

При сушке семян подсолнечника температура греющей поверхности составляла 128...132 °С, сѐм влаги за один проход находился в пределах

4...4,7 %, температура зерна на выходе из УТОЗ 1 составляла 34...36 °С. При этом суммарные удельные затраты теплоты на 1 кг испаренной влаги варьировали от 3,42 до 3,68 МДж. Заданный температурный режим не приводил к значительному снижению всхожести и энергии прорастания семян. Так, при начальной влажности семян 15 % и температуре греющей поверхности 130 °С, всхожесть семян после сушки снизилась на 4 %, при этом энергия прорастания снизилась всего на 2 %. Это свидетельствует о достаточной эффективности процесса сушки в предложенной установке и соответствии просушенных семян технологическим требованиям.

Часть экспериментальных данных, полученных при сушке семян подсолнечника на УТОЗ 1 в производственных условиях, приведена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Показатели работы УТОЗ 1

Показатель	Величина показателя		Отклонение, %
	теория	эксперимент	
Пропускная способность, т/ч	0,16	0,155	-3,1
Потребляемая мощность, тах, кВт	1,55	1,6	3,2
Температура поверхности, °С			
минимальная	115	110	-4,3
максимальная	145	150	3,4
Скорость движения семян, м/с	0,0068	0,007	2,9
Экспозиция сушки, с	184	178	-3,3

Выявлено, что расхождение результатов, полученных теоретически и экспериментально, не превышает 4,3 %, что свидетельствует об их хорошей сходимости.

Размерные показатели УТОЗ 1 представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Размерные характеристики УТОЗ 1

Показатели	Величина показателя
Габаритные размеры, мм	
высота	1200
ширина	620
длина	2000
Масса, кг	120

Приведенные данные показывают, что при сравнительно небольших габаритах и массе через установку за рабочую смену можно пропустить от 1,2 до 1,92 т семян. Причем при сушке зерна или семян для последующего использования в технологических целях производительность можно увеличить вдвое, в этом случае частоту вращения транспортирующего рабочего органа также увеличивают в два раза, например, с помощью сменных шкивов различных диаметров.

УТОЗ 1 также была использована в технологической линии приготовления растительного масла.

В процессе тепловой обработки влажность семян подсолнечника уменьшалась с 10...12 % до 5...7 %. При большей начальной влажности семена подвергали тепловой обработке дважды. При этом влагосъем за первый проход составлял 4...4,7 %, за второй – 2,2...2,9 %. Температура семян после окончания процесса сушки составляла 48...50 °С. Затем высушенные семена направляли для дальнейшей переработки их в масло.

При исследованиях УТОЗ 1 в составе технологической линии по произ-

водству муки из зерна пшеницы были получены следующие результаты.

В процессе тепловой обработки влажность семян уменьшалась с 16...21 % до 14...15 %. Температура зерна после окончания процесса сушки составляла 45...50 °С, что полностью соответствовало технологическим требованиям.

Температура греющей поверхности составляла 130...150 °С. Съём влаги за один проход находился в пределах 2...6 %. При этом суммарные затраты теплоты на 1 кг испаренной влаги колебались от 3,42 МДж до 3,88 МДж.

Режимы сушки варьировали с помощью терморегулятора, а также посредством изменения частоты вращения транспортирующего рабочего органа.

Аналогичную апробацию в производственных условиях прошли и остальные УТОЗ.

УТОЗ 2 исследовали при сушке зерна и его термическом обеззараживании.

При сушке зерна пшеницы средняя температура греющей поверхности составляла 40...75 °С, съём влаги за один проход находился в пределах 2...6 %, температура зерна на выходе из сушильной установки составляла 30...40 °С. При этом суммарные удельные затраты теплоты на 1 кг испаренной влаги изменялись от 3,1 до 3,4 МДж. Заданный температурный режим не приводил к снижению продовольственных и семенных показателей зерна. Полученные данные свидетельствуют о достаточной эффективности процесса сушки в предложенной установке. После сушки семена очищали и сортировали по фракциям на пневматической сортировальной машине (рисунок 4.35).



Рисунок 4.35 – Фрагмент технологической линии по послеуборочной обработке зерна:

1 - УТОЗ 2; 2 - аппаратура для контроля температурного режима; 3 - комплект приборов для контроля энергетических показателей; 4 - винтовой транспортёр; 5 - сортировальная машина

Проведённые исследования работы УТОЗ 2 в режиме термического обеззараживания зерна пшеницы показали, что при исходной второй степени заражённости на выходе зерно освобождалось от вредителей, а его продоволь-

ственные свойства не снижались. Удельный расход энергии при этом составил 4,35 кВт·ч/т.

Часть экспериментальных данных, полученных при тепловой обработке зерна, приведена в таблице 4.8.

Таблица 4.8 - Показатели работы УТОЗ 2

Показатель	Величина показателя		Отклонение, %
	теория	эксперимент	
Пропускная способность, т/ч			
а) сушка зерна	0,25	0,239	-4,4
б) термическое обеззараживание	0,18	0,175	-2,8
Потребляемая мощность, т/ч			
а) сушка зерна	2,1	2,15	4,5
б) термическое обеззараживание	7,35	7,6	3,4
Средняя температура греющей поверхности, °С			
а) сушка зерна	50...70	50...70	–
б) термическое обеззараживание	95...100	95...100	–
Экспозиция тепловой обработки, с			
а) сушка зерна	74	76	2,7
б) термическое обеззараживание	123	125	1,6

Выявлено, что результаты экспериментальных исследований отличаются от результатов теоретических исследований не более чем на 4,5 %, что свидетельствует об их хорошей сходимости.

УТОЗ 3 прошла производственную апробацию при проведении исследований по обжариванию зерна в составе технологической линии по производству полнорационных комбикормов для поросят-сосунов.

Для определения эффективности использования поджаренного зерна в составе стартерного полнорационного комбикорма проводили исследование при кормлении двух групп поросят-сосунов численностью по 100 голов в течение 15 дней (с 3 по 17 день жизни). За основу был принят комбикорм, используемый в хозяйстве для подкормки поросят-сосунов.

Первой группе (контрольной) скармливали комбикорм, используемый в хозяйстве, а второй группе (опытной) – аналогичный по рецепту комбикорм с добавлением обжаренного в предлагаемом устройстве ячменя сорта «Раушан».

Результаты исследования представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Результаты исследования эффективности кормления

поросят-сосунов различными стартерными комбикормами

Показатели	Группы	
	контрольная	опытная
Количество голов на начало опыта	100	100
Живая масса поросят в начале исследования (3-дневный возраст), кг	141,9	141,0
Живая масса поросят в конце исследования (17-дневный возраст), кг	472,0	498,1
Прирост живой массы, кг	330,1	357,1
Среднесуточный прирост живой массы на 1 голову, кг	0,220	0,238
Прирост живой массы 1 поросенка за период откорма, кг	3,3	3,57
Затрачено комбикорма за период откорма, кг	52,5	52,5
Сохранность поросят, %	95	98

При проведении исследований средняя температура греющей поверхности находилась в пределах 215...225 °С, а время обжаривания в пределах 135...145 с. При этих режимах в обжариваемом зерне превращалось в декстрины до 30 % крахмала. Температура обработанного зерна на выходе из устрой-

ства составляла 136...148 °С, а удельные затраты теплоты на нагрев зерна находились в пределах 5,6...7,1 кВт·ч/т.

Отклонение основных показателей процесса обжаривания зерна, полученных в ходе производственных исследований, от показателей, полученных в ходе лабораторных исследований, не превысило 3,7 %, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов.

Также УТОЗ 3 входила в состав технологической линии послеуборочной обработки зерна, включающей приемную яму, норию зерновую ковшовую НЗК-3, семяочистительную машину СМ-4, спирально-винтовой погрузчик зерна, устройство для сушки зерна, погрузчик зерна КШП (рисунок 4.36).



Рисунок 4.36 – Фрагмент технологической линии подработки зерна: 1 – УТОЗ 3; 2 – контрольно-измерительная аппаратура; 3 – погрузчик зерна со спирально-винтовым рабочим органом; 4 – погрузчик зерна КШП

Во время проведения опытов значения независимых факторов варьировали в пределах оптимальных значений, полученных в ходе лабораторных исследований: средняя температура греющей поверхности составляла 50...55 °С, время сушки зерна – 85...90 с, скорость движения воздуха – 1,6...1,8 м/с, температура воздуха – 20...25 °С. При этом разовый влагосъем составлял 2...4 %, а температура высушенного зерна не превышала 35...40 °С.

Основные показатели работы УТОЗ 3 при сушке зерна, полученные в ходе производственных исследований, в сравнении с теоретическими расчётами представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Сравнительные показатели работы УТОЗ 3 при сушке зерна

Показатели	Значение показателя		Отклонение, %
	теория	эксперимент	
Пропускная способность устройства, кг/ч	350,0	346,2	1,08
Суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги, МДж/кг	4,01	4,1...4,2	2,5...5
Потребляемая мощность, тах, кВт	3,1	3,2	3,2

При проведении исследований по тепловой обработке зерна УТОЗ 4 была включена в состав технологической линии послеуборочной обработки зерна, включающей приемную яму, норию зерновую УН-5, зерноочистительную ма-

шину МС-4,5, спирально-винтовой погрузчик зерна, установку для тепловой обработки зерна (рисунок 4.37).



Рисунок 4.37 - Фрагмент технологической линии подработки зерна:
1 – УТОЗ 4; 2 - контрольно-измерительная аппаратура; 3 - погрузчик зерна со спирально-винтовым рабочим органом

Во время проведения опытов независимые факторы варьировали в пределах оптимальных значений, полученных в ходе лабораторных исследований: средняя температура греющей поверхности при сушке зерна находилась в пределах $65...75\text{ }^{\circ}\text{C}$, время сушки - $35...40\text{ с}$, скорость движения воздуха - $5...6\text{ м/с}$, температура воздуха - $20...25\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом на оптимальных режимах влажность снижалась на $2,7...3\text{ \%}$, температура зерна на выходе из установки составляла $35...39\text{ }^{\circ}\text{C}$, что полностью удовлетворяет агротехническим и технологическим требованиям. Суммарные удельные затраты на процесс испарения влаги находились в пределах $3,6...3,9\text{ МДж/кг}$.

Также часть зерна, с исходной второй степенью зараженности, подвергали тепловой обработке на следующих режимах: температура греющей поверхности - $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, время нахождения зерна в установке - 180 с . После тепловой обработки погибли все вредители, а удельные затраты энергии не превысили $4,1\text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ зернового материала.

Основные показатели работы установки при тепловой обработке зерна в производственных условиях в сравнении с результатами лабораторных исследований представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 - Сравнительные показатели работы УТОЗ 4 при тепловой обработке зерна

Показатели	Значение показателя		Отклонение, %
	теория	эксперимент	
Пропускная способность установки, т/ч:			
- сушка зерна	0,4	0,392	-2
- термическое обеззараживание зерна	0,21	0,208	-1,2
Температура зерна после обработки, на выходе из установки, °С			
- сушка зерна	37	38...38,5	2,7...4
- термическое обеззараживание зерна	59	58...60	±1,7
Потребляемая мощность, мах, кВт			
- сушка зерна	3,5	3,65	4,3
- термическое обеззараживание зерна	7,5	7,35	-2

В результате производственной апробации подтвердилась работоспособность разработанных УТОЗ, отказы и поломки отсутствовали. Также было выявлено соответствие получаемого продукта требованиям Государственных стандартов.

Экспертные комиссии базовых хозяйств, в которых проводили производственное исследование УТОЗ, признали конструкции установок перспективными и пришли к выводу о целесообразности их дальнейшего применения в технологических процессах подработки зерна (приложение Г).

4.3.3 Экономическая эффективность процессов тепловой обработки зерна в предлагаемых УТОЗ

Экономическая оценка является заключительным этапом комплексной оценки технологий и сельскохозяйственной техники [32].

Расчет экономической эффективности применения предложенных УТОЗ выполнен на основании результатов производственных исследований согласно действующей методике по определению экономической эффективности новых сельскохозяйственных машин и оборудования [41, 280, 284].

Экономическую оценку предлагаемых УТОЗ проводили по результатам внедрения в сельскохозяйственное производство и определяли в следующей последовательности (рисунок 4.38) [80].



Рисунок 4.38 – Этапы экономической оценки разработки и внедрения УТОЗ

Эффективность предлагаемых УТОЗ определяли по величине экономического эффекта, получаемого сельскохозяйственными предприятиями.

Размер получаемого экономического эффекта определяли в сравнении с базовыми средствами механизациями процесса тепловой обработки зерна, причём выбор базовых машин осуществляли, исходя из имеющихся в наличии в сельскохозяйственных предприятиях.

Показатели технико-экономической эффективности предлагаемых УТОЗ в сравнении с серийно выпускаемыми зерносушильными установками приведены в таблице 4.12 (по ценам на декабрь 2012 года).

Таблица 4.12 - Техничко-экономические показатели УТОЗ
(при сушке зерна пшеницы)

ПОКАЗАТЕЛИ	УСТАНОВКИ							
	УТОЗ 1	Базовый вариант	УТОЗ 2	Базовый вариант	УТОЗ 3	Базовый вариант	УТОЗ 4	Базовый вариант
		ПУФС-0,4		СЗПБ-2,5		СЗ-0,3		СЗШ-0,5
Пропускная способность, т/ч	0,155	0,4	0,25	2,5	0,35	0,3	0,4	0,5
Масса, т	0,12	0,8	0,2	4	0,41	2,5	0,51	5,4
Суммарные удельные затраты энергии на испарение влаги, МДж/кг	3,59	4,1	3,1	4,8	4,1	4,9	3,7	4,6
Удельная энергоёмкость, тах, кВт·ч/т (сушка зерна)	10,3	55	8,6	106	9,1	54,4	9,2	120
Удельная металлоёмкость, кг·ч/т	774	2000	800	1600	1171	8333	1275	10800
Годовая экономия, руб.	135155,4	–	153679,6	–	203350,8	–	248380,2	–
Экономический эффект на 1 т продукции, руб.	220,13	–	250,3	–	331,2	–	404,54	–
Срок окупаемости, лет	0,62	–	0,53	–	0,48	–	0,3	–

Результаты сравнения показывают, что основные показатели предлагаемых установок лучше, чем аналогичные показатели серийно выпускаемых отечественной промышленностью зерносушилок (базовые варианты).

Применение разработанных УТОЗ в условиях небольших зернопроизводящих и зерноперерабатывающих сельскохозяйственных предприятий оказалось экономически выгодно.

4.3.4 Особенности эксплуатации разработанных УТОЗ

Разработанные УТОЗ рекомендованы для их использования в следующих случаях:

- 1) для сушки зерна повышенной влажности;
- 2) для сушки небольших партий элитных семян;
- 3) для термического обеззараживания сыпучих пищевых продуктов (зерна, муки, крупы и т.п.) заражённых вредителями (долгоносиком, брехусом, мучным клещом и т.д.);
- 4) для обжаривания зерна, с последующим его скармливанием скоту.

Вначале рекомендуется сушить зерно, имеющее наибольшую влажность и размещенное на открытых площадках и в складах, не оборудованных установками для активного вентилирования.

При наличии большого количества зерна повышенной влажности, а также зерна, зараженного вредителями хлебных запасов, первоначально необходимо высушить зерно, которое имеет более высокую влажность, температуру и зараженность. При наличии зерна разных культур сначала нужно сушить зерно пшеницы сильных, твердых и ценных сортов, а также культур, менее стойких в хранении (рис, подсолнечник, просо).

При наличии зерна повышенной влажности, требующего немедленной сушки, разработанные УТОЗ должны работать круглосуточно. При этом месячная норма составляет 540 часов работы. Дополнительное время необходимо для очистки УТОЗов при переходе с одной зерновой культуры на другую, планово-предупредительного ремонта, перемещения УТОЗ и их установки на территории предприятия.

УТОЗы должны быть обеспечены электропитанием с требуемыми параметрами электрической сети, необходимой рабочей силой и подготовленными транспортирующими устройствами для подачи влажного зерна, подбора и складирования высушенного зерна. Для размещения влажного и сухого зерна должны быть в наличии емкости, обеспечивающие работу УТОЗов без простоев.

Зерно перед тепловой обработкой в УТОЗах должно быть очищено на зерноочистительных машинах от крупных и легких примесей. Кроме того необходимо проводить замеры влажности зерна до и после тепловой обработки, также важно контролировать температуру зерна на выходе из УТОЗ.

Перед пуском УТОЗ в работу обслуживающий персонал должен осмотреть и очистить от сора и пыли поверхности кожуха установки, воздуховода, вентилятора и т. д.

Так же необходимо проверить исправность действияшибера и заслонки, обеспечивающих ручное или дистанционное регулирование соответственно подачи зерна и воздуха; настройку автоматического блока управления режимами тепловой обработки; состояние и готовность к работе норий, конвейеров и других транспортирующих устройств (правильность вращения приводных барабанов, натяжение ленты, наличие и исправность ковшей); частоту вращения вентилятора, легкость вращения вала, отсутствие толчков, ударов и трения рабочего колеса о кожух вентилятора, отсутствие несвойственного шума и вибрации при его работе; наличие смазки в подшипниках и масла в редукторе привода транспортирующего рабочего органа; натяжение приводных ремней; исправность вентиляционного оборудования; наличие в зернохранилищах сырого зерна и места для размещения высушенного зерна; наличие и исправность первичных средств пожаротушения, пожарной сигнализации; наличие и исправное состояние ограждений, заземления и зануления электрооборудования, обеспечивающих безопасность работы.

Оператор, обслуживающий УТОЗы, должен знать их устройство и прави-

ла эксплуатации, назначение отдельных узлов и деталей, технологический процесс сушки зерна, а также действующие требования безопасности и отвечать за работу на своем участке.

Кроме того, необходимо соблюдать режимы тепловой обработки зерна, указанные в пунктах 4.2.3 и 4.3.2 монографии, а также обеспечить заданную производительность установок.

Перед каждой сменой обслуживающий персонал должен подготовить и передать следующей смене УТОЗ в исправном и очищенном состоянии.

Зерносушильщик постоянно должен следить за нормальным заполнением зерном загрузочного бункера, бесперебойной работой выпускного механизма, за исправностью и работой всего оборудования УТОЗ.

Выводы

1. Для обеспечения заданного процесса тепловой обработки зерна, соблюдения эксплуатационных, технологических требований установки для тепловой обработки зерна должны включать устройство загрузки, генератор теплоты, теплопередающее и теплоотдающее устройство (элемент), устройство непрерывного отвода образовавшейся влаги, устройство управления и контроля режимными параметрами тепловой обработки.

2. Обеспечить требуемое качество готового продукта после тепловой обработки зерна возможно при осуществлении контактного нагрева единичного слоя сыпучего материала в теплоизолированной кожухе при постоянном перемешивании зерна и удалении образующихся водяных паров.

3. Экспериментальные исследования предложенных УТОЗ позволили выявить их оптимальные конструктивные параметры и режимы работы. При работе УТОЗ на оптимальных режимах повышается эффективность тепловой обработки зерна при заданной производительности и требуемом качестве готового продукта.

Производственная апробация разработанных УТОЗ подтвердила их высокую эффективность работы при выполнении различных технологических операций (сушка зерна, обжаривание, обеззараживание). Расхождение значений основных показателей процесса тепловой обработки зерна, полученных теоретически и в результате проведённых экспериментов, не превысило 5 %.

4. Результаты технико-экономического анализа УТОЗ в сравнении с наиболее эффективными существующими зерносушильными установками показали, что разработанные установки имеют меньшие энергоёмкость и металлоёмкость. Суммарные удельные затраты энергии на процесс испарения влаги из зерна при использовании УТОЗ снижаются в 1,2...1,6 раза. Срок окупаемости разработанных УТОЗ не превышает 1 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации действует Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Также Правительством Российской Федерации разработана и принята Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 г.». Все эти правовые акты направлены на повышение энергетической эффективности производства и снижение энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации к 2020 г. не менее чем на 40 %.

Основным показателем энергоэффективности производства сельскохозяйственной продукции является его энергоемкость, то есть удельные затраты энергии на производство единицы продукции.

Важная научная задача в области энергосбережения - разработка и внедрение в сельскохозяйственное производство энергоэффективных технологий и соответствующих средств механизации.

Кроме того, согласно Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 – 2020 годы, одним из приоритетных направлений является развитие малых форм хозяйствования - крестьянских (фермерских) хозяйств.

В настоящее время в нашей стране уже функционируют свыше 300 тыс. крестьянских (фермерских) хозяйств, валовый сбор зерна в которых достигает $3,5 \cdot 10^6$ т.

Однако, обеспечение требуемого уровня рентабельности производства зерна сельскохозяйственными предприятиями подобного типа возможно лишь при использовании энергоэффективных установок для послеуборочной обработки зерна.

Одна из наиболее энергозатратных операций в цикле послеуборочной обработки зерна - его сушка. Примерно 20 % от всего потребления энергии в агропромышленном комплексе развитых стран приходится на этот процесс.

Таким образом, создание и адаптация средств механизации сушки зерна к условиям реального сельскохозяйственного производства в России является актуальной и важной научно-технической проблемой.

Для эффективной работы фермерских хозяйств необходимы минизерносушилки, конструкция которых обеспечивала бы требуемое качество готового продукта, сравнительно небольшие затраты энергии при эксплуатации в фермерских хозяйствах.

Следует отметить, что на протяжении всей истории развития средств механизации сушки зерна требовалось создавать установки большой производительности, в которых энергоэффективным было применение конвективного способа подвода теплоты. Использование же контактного способа нагрева зерна не обеспечивало приемлемых энергетических показателей. Однако эксплуатация существующих высокопроизводительных зерносушилок конвективного

типа экономически неэффективна в условиях фермерских хозяйств.

Накопленный опыт показывает, что создание минизерносушилок возможно на основе применения контактного способа передачи теплоты зерну от электрического нагревательного устройства.

Создание огневых минизерносушилок является малорациональным направлением развития зерносушильной техники из-за невозможности организовать на низкопотенциальном уровне тепловые конвекционные процессы. Поэтому основным способом нагрева зерна в минизерносушилках должен быть электрический, как достойная альтернатива традиционным способам подвода теплоты к объекту сушки.

Перспективным направлением развития средств механизации процесса сушки зерна является создание малогабаритных контактных установок для тепловой обработки зерна, позволяющих проводить предпосевную обработку, сушку, прожаривание и обеззараживание зерна.

Применение электронагрева и контактного, или комбинированного способов передачи теплоты зерну позволит добиться максимального соответствия создаваемых на этой основе установок технологическим требованиям и требованиям, предъявляемым при эксплуатации в условиях небольших фермерских хозяйств (экологичность, универсальность и т.д.).

Непрерывное совершенствование конструкций зерносушильной техники, интенсификация режимов её работы с одновременным улучшением качества процесса сушки и готового продукта в конечном итоге, разработка и внедрение средств автоматического управления существенно усложняют методы расчёта структуры и параметров зерносушильных установок при их проектировании. При этом применение методов моделирования даёт возможность существенно снизить сроки создания установок для сушки зерна, а также повысить эффективность их функционирования.

Установленные требования и критерии, предъявляемые к созданию зерносушильной техники, а также использование основных зависимостей по моделированию процесса сушки зерна позволят создавать новые зерносушилки, эффективные с точки зрения получения качественного готового продукта при минимальных затратах энергии и соблюдении технологических требований.

Полученные теоретические закономерности отражают основные характерные черты имеющего место в зерносушильных установках процесса контактной сушки тонкого слоя зерна. Эти закономерности можно использовать для расчета температурного поля внутри слоя материала в процессе контактной сушки, а также для расчета других показателей процесса тепломассообмена. При этом толщина зернового слоя должна незначительно превышать максимальный размер высушиваемого зерна, так как это позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи в несколько раз.

Для снижения энергозатрат на процесс тепловой обработки зерна, соблюдения эксплуатационных, технологических требований установки для тепловой обработки зерна должны включать устройство загрузки, генератор теплоты, теплопередающее и теплоотдающее устройство (элемент), устройство непре-

рывного отвода образовавшейся влаги, устройство управления и контроля режимными параметрами тепловой обработки.

Обеспечить требуемое качество готового продукта после тепловой обработки зерна возможно при осуществлении контактного нагрева единичного слоя сыпучего материала в теплоизолированном кожухе при постоянном перемешивании зерна и удалении образующихся водяных паров.

Экспериментальные исследования предложенных авторами средств механизации процессов тепловой обработки зерна позволили выявить их оптимальные конструктивные параметры и режимы работы. Производственная апробация разработанных устройств подтвердила их высокую эффективность работы при выполнении различных технологических операций (сушка зерна, обжаривание, обеззараживание).

Результаты технико-экономического анализа предлагаемых установок для тепловой обработки зерна в сравнении с наиболее эффективными существующими зерносушильными установками показали, что разработанные установки имеют меньшие энергоёмкость и металлоёмкость. Суммарные удельные затраты энергии на процесс испарения влаги из зерна при использовании предложенных установок для тепловой обработки зерна снижаются в 1,2...1,6 раза.

Разработанные средства механизации могут быть рекомендованы для сушки зерна, его обжаривания при подготовке его к скармливанию скоту, термического обеззараживания зерна в условиях в условиях небольших зернопроизводящих и зерноперерабатывающих сельскохозяйственных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. М.: «Металлургия», 1969. – 157 с.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
3. Азаров Б.М. Технологическое оборудование пищевых производств. - М.: Агропромиздат, 1988. – 462 с.
4. Алимов А.В. Сушильная техника для села. // Механизация и электрификация сельского хозяйства – 2002. - № 6. – С. 32-33.
5. Андонов К.И. Технология и оборудование для тепловой обработки кормов // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1991. - № 7. - С. 64-68.
6. Андрианов Н.М. Особенности работы зерновых сушилок. // Техника в сельском хозяйстве – 2006. - № 4. – С. 9-12.
7. Анискин В.И. Активное вентилирование как средство сушки и временной консервации зерна // Механизация подготовки и хранения семян. - М.: Сельхозиздат, 1962. - С. 67-70.
8. Анискин В.И. К созданию перспективного оборудования для производства зерна. // Техника в сельском хозяйстве – 1994. - № 5. – С. 13-15.
9. Анискин В.И. Консервация влажного зерна (По данным зарубежных исследователей) / Под ред. д-ра с.-х. наук, проф. Н.Н. Ульриха. - М.: Колос, 1968. – 286 с.
10. Анискин В.И. Механизация уборки и послеуборочной обработки зерновых культур / В.И. Анискин, Э.В. Жалнин – М.: О-во «Знание» РСФСР, 1976. – 46 с.
11. Анискин В.И. Теория и технология сушки и временной консервации зерна активным вентилированием / В.И. Анискин, В.А. Рыбарук. - М.: Всесоюз. научн.-иссл. ин-т мех. с. хоз-ва ВИМ, 1972. – 200 с.
12. Антипов С.Т. Машины и аппараты пищевых производств / С.Т. Антипов, Н.Т. Кретов. - М.: Высшая школа, 2001. – 231 с.
13. Антошин И.М. Теоретические основы массообменных процессов пищевых производств / И.М. Антошин. – М.: Пищевая промышленность, 1970. – 344 с.
14. Артемьев В.Г. О конструктивных параметрах машин для сушки и термической обработки семян // Совершенствование сельскохозяйственных машин и технологий механизированных процессов. - Ульяновск, - 1991. - С. 47-52.
15. Артемьев В.Г. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины - Ульяновск, 2003. – 320 с.
16. Артюшин А.А. Система технологий и машин для сельскохозяйственного производства России и малотоннажной переработки сельхозпродукции: Принципы построения, методика разработки и управления, федеральный и региональные аспекты / Н.В. Краснощеков и др.; - М., Информагротех, 1994. - 264 с.
17. Артюшин А.А. и др. Система использования техники в сельскохозяйственном производстве. Построение эффективного машинного производства

- продукции - М., Росинформагротех, - 2003. - 519 с.
18. Атаназевич В.И. Сушка зерна. М.: Издательство Дели принт, 2007. – 480 с.
 19. Атаназевич В.И. Сушка семян кукурузы / В.И. Атаназевич, Г.О. Воронцов, О.В. Ивентьева. – М.: Агропромиздат, 1986. – 92 с.
 20. Афанасьев В.А. Научно-практические основы тепловой обработки зерновых компонентов в технологии комбикормов. Диссертация на соискание учёной степени доктора техн. наук. М. 2003.
 21. Афанасьева Т.Д. Хранение и сушка зерна / Т.Д. Афанасьева, Н.И. Рыбалка. - Алма-Ата: Казсельхозгиз, 1963. – 263 с.
 22. Аэров М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зерновым слоем. - Л.: Химия, 1968. – 164 с.
 23. Баум А.Е. Прогрессивная технология хлебоприемных и зерноперерабатывающих предприятий. – М.: Колос, 1978. – 192 с.
 24. Баум А.Е. Сушка зерна. / А.Е. Баум, В.А. Резчиков. - М.: Колос, 1983. – 223 с.
 25. Бекасов А.Г. Руководство по сушке зерна. - М.: Государственное издательство технической и экономической литературы по вопросам заготовок, 1952. – 391 с.
 26. Беляев Н.М. Основы теплопередачи. – Киев: Высш. школа, 1989. – 342 с.
 27. Борисов М.Н. Механизация обработки зерна на токах. - Саратов, 1974. – 254 с.
 28. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. – 2-е изд., - СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
 29. Бородин И.Ф. Электрофизическая интенсификация сушки зерна. / И.Ф. Бородин, Р.В. Ткачев // Механизация и электрификация сельского хозяйства – 1999. - № 11. – С. 14-15.
 30. Бортдинов А.З. Послеуборочная обработка зерна и семян. - Казань: Издательство Казанского ун-та, 2001. – 82 с.
 31. Бочкарёв Е.А. Технология переработки продукции растениеводства. - Самара, 2003. – 203 с.
 32. Братчикова С.В. Экономическая эффективность послеуборочной обработки и сушки зерна // Зерновое хозяйство. - 2003. - № 3 - С. 25-26.
 33. Будзко И.А. Электрификация сельского хозяйства: состояние, проблемы, перспективы. - М: Общество «Знание» РСФСР, 1976. – 94 с.
 34. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. – М.: Колос, 1973. – 199 с.
 35. Вейник А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. - М.-Л., Госэнергоиздат, 1959. – 228 с.
 36. Верба М.И. Теория сушки. - Изд. МЭИ, 1960. – 354 с.
 37. Веремеенко В.И. Исследование распределения агента сушки в шахтных зерносушилках. Диссертация кандидата технических наук. - Одесса, ОТИПП, 1967. - 148 с.
 38. Веселов С.А. Проектирование вентиляционных установок предприятий

по хранению и переработке зерна. - М.: Колос, 1974. – 228 с.

39. Вобликов Е.М. Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е.М. Вобликов, В.А. Буханцов, А.С. Прокопец. - Ростов-на-Дону: Издательский центр «МарТ», 2003. – 231 с.

40. Вобликов Е.М. Технология хранения зерна. - С.-Пб.: Лань, 2003. – 448 с.

41. Волкова Н.А. Экономическая оценка инженерных проектов: Методика и примеры расчетов на ЭВМ / Н.А. Волкова, В.В. Коновалов, И.А. Спицын, А.С. Иванов. – Пенза: РИО ПГСХА, 2002. – 242 с.

42. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. - М.: ФОРУМ, 2008 – 464 с.

43. Гержой А.П. Зерносушение и зерносушилки. – М.: Хлебоиздат, 1958. – 425 с.

44. Гержой А.П. Интенсификация процесса и совершенствование технологии конвективной сушки зерна / Труды Всесоюзного совещания по сушке. - Профиздат, 1958. - С. 58-60.

45. Гинзбург А.С. Автоматизация процессов сушки зерна / А.С. Гинзбург, А.П. Гержой, А.Т. Птушкин. – М.: Заготиздат, 1962. – 267 с.

46. Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. - М.: Пищевая промышленность, 1966. – 407 с.

47. Гинзбург А.С. Комбинированная сушка зерна в кипящем и плотном слое / Сообщения и рефераты ВНИИИЗ, 1959. - № 4. - С. 64-65.

48. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.

49. Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое / А.С. Гинзбург, В.А. Резчиков. – М.: Пищевая промышленность, 1966. - 516с.

50. Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов. - М.: Пищепромиздат, 1960. – 684 с.

51. Гинзбург А.С. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы / А.С. Гинзбург, М.А. Громов. - М.: Сельхозгиз, 1984. – 317 с.

52. Гинзбург А.С. Технология сушки пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1967. – 248 с.

53. Гинзбург А., Резчиков В., Алейников В. и др. Сушка пшеницы и подсолнечника с предварительным нагревом и рециркуляцией // Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность, 1973, № 10. - С. 11-13.

54. Гинзбург А., Резчиков В., Дубровский В. Предварительный нагрев зерна перед сушкой // Мукомольно-элеваторная промышленность, 1967, № 9. - С. 13-14.

55. Гинзбург А.С., Савина И.М. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов: Справочник. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 280 с.

56. Гоголев Ф.Т. Сушка зерна. - М.: Сельхозгиз, 1939. – 294 с.

57. Голик М.Г. Научные основы обработки зерна в потоке / М.Г. Голик, В.Н. Демидович, Б.Е. Мельник. - М.: Колос, 1972. – 219 с.

58. Голубкович А.В. Оптимизация технологии двухэтапной сушки зерна в условиях переменных режимов. / А.В. Голубкович, К.А. Белобородов, Д.С. Ламкин, А.Д. Галкин, В.Д. Галкин // Техника в сельском хозяйстве – 2007. - № 4. – С. 21–25.
59. Голубкович А.В., Чижиков А.Г. Сушка высоковлажных семян и зерна. – М.: Агропромиздат, 1991. – 174 с.
60. Горохов В.Г., Каштанова Г.И. Рекомендации по сушке зерна на зерносушилках шахтного типа. Изд-во: ОмСХИ им. С.М. Кирова, 1983. – 88 с.
61. Горохов Г.А. Технология переработки зерна. - М.: Колос, 1972. – 265 с.
62. Горский В.Г., Адлер Ю.П. Планирование промышленных экспериментов. М.: Металлургия, 1974 - 274 с.
63. Горячкин В.П. Собрание сочинений. М.: Колос, 1965. - т. 3. – 352 с.
64. ГОСТ 10841 - 97. Зерно. Методы определения заражённости и повреждённости вредителями. Введ. 01.07.98. - Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 7 с.
65. ГОСТ 29177-91. Метод определения состояния (степени деструкции) крахмала. М.: ИПК Издательство стандартов, 1991. – 7 с.
66. ГОСТ 10968-88. Зерно. Методы определения энергии прорастания и способности прорастания. М.: Издательство Минхлебопродуктов СССР, 1988. – 3 с.
67. Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы. – М.: МСХ РФ, 2012. – 204 с.
68. Гришин М.А. Установки для сушки пищевых продуктов: Справочник / М.А. Гришин, В.И. Атаназевич, Ю.Г. Семенов. – М.: Агропромиздат, 1989. - 215 с.
69. Громов А.П. Совершенствование зерносушильных устройств // Механизация и экономика сельскохозяйственного производства. - 1974. - С. 121-134.
70. Гуляев Г.А. Автоматизация процессов послеуборочной обработки и хранения зерна. - М.: Колос, 1990. – 201 с.
71. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массообмена. - М.: Высшая школа, 1967. – 264 с.
72. Данилов О.Л. Теория и расчет сушильных установок: О.Л. Данилов; Ред. В.Н. Лазарев: Моск. энерг. ин-т. – М.: МЭИ, 1977. – 72 с.
73. Данилов О.Л., Леончик Б.И. Экономия энергии при тепловой сушке. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 133 с.
74. Дацковский В.М. Расчёт процесса сушки в шахтных зерносушилках / Труды Одесского института инженеров мукомольной промышленности и элеваторного хозяйства, 1952. - Вып. 3. - С. 26-28.
75. Демский А.Б. Комплексные зерноперерабатывающие установки. - М.: Колос, 1978. – 256 с.
76. Демский А.Б. Справочник по оборудованию зерноперерабатывающих предприятий. - М.: Колос, 1980. – 263 с.
77. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике

- и науке / Пер. с англ. Э.К. Лецкого – М.: Мир, 1980. – 510 с.
78. Джорогян Г.А. Новый способ термической дезинсекции зерна // Сообщения и рефераты ВНИИЗ, 1955. - Вып. 6. - С. 65-68.
79. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). - М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
80. Драгайцев В.И. Методика экономической оценки технологий и машин в сельском хозяйстве. М.: ВНИИЭСХ, 2010. – 147 с.
81. Драганов Б.Х., Кузнецов А.В., Рудобашта С.П. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. – М.: Агропромиздат, 1990. – 463 с.
82. Егоров Г.А. Гидротермическая обработка зерна. - М.: Колос, 1968. – 164 с.
83. Егоров Г.А. Технология и оборудование мукомольно-крупяного и комбинированного производства. – М.: Колос, 1979. – 368 с.
84. Егоров Г.А. Технология муки. - М. Колос, 2005. – 296 с.
85. Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики: / Под ред. чл.-корр. РАН И.И. Елисеевой. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 480 с.
86. Ерёмина Т.Н. Практикум по хранению и переработке сельскохозяйственных продуктов с основами биохимии / Т.Н. Ерёмина, В.А. Исайчев. - Ульяновск, 1999. - 172 с.
87. Есаков Ю.В. Универсальные сушильные агрегаты «УСК» / Ю.В. Есаков, С.Ю. Есаков // Механизация и электрификация сельского хозяйства – 2002. - № 6. – С. 33-35.
88. Есаков Ю.В. Универсальные сушильные установки УСК в агрегате с установками «Емеля». / Ю.В. Есаков, В.М. Бугаева // Достижения науки и техники АПК – 1999. - № 5. – С. 38-40.
89. Есимов М.А. Опыт реконструкции шахтных зерносушилок на рециркуляционный способ сушки в Целиноградской области // Мукомольно-элеваторная промышленность, 1971. - № 8. - С. 22-24.
90. Ефимов А.В. Перспективные способы сушки зерна. / А.В. Ефимов, И.Х. Масалимов // Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем: Материалы Всерос. науч.-техн. конф., 19-23 окт. 2009 г. / редкол.: П.В. Сенин [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2009. – С. 479-481.
91. Ефимов С.П. Справочник по заготовкам, хранению и качеству зерна и маслосемян. - М.: Колос, 1977. – 344 с.
92. Жабко В.В. Справочник по теплоснабжению сельскохозяйственных предприятий / В.В. Жабко, Д.П. Лебедев, В.П. Мороз и др.; Под общ. ред. В.В. Уварова. - М.: Колос, 1983. – 320 с.
93. Жидко В.И., Атаназевич В.И., Савченко С.М. Повышение эффективности использования зерносушильного оборудования / Обзорная информация. Серия: Элеваторная промышленность. М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1973. - 56 с.
94. Жидко В.И. и др. Зерносушение и зерносушилки. - М.: Колос, 1982. – 239 с.
95. Жидко В.И. Тепло- и массоперенос при сушке зерна в плотном подвиж-

- ном слое. - Минск: Энергия, 1966. – 321 с.
96. Жуковский В.С. Основы теории теплопередачи. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1969. – 455 с.
97. Журавлев А.П. Теория и практика рециркуляционной сушки зерна. - Самара: СГСХА, 2001. – 254 с.
98. Журавлев А.П. Технология сушки зерна и семян подсолнечника / А.П. Журавлев, Л.А. Журавлева. - Чапаевск, 2000. – 200 с.
99. Захарченко И.В. Послеуборочная обработка семян. - М.: Заготиздат, 1984. – 267 с.
100. Захарченко И.В. Производство семян - на промышленную основу / И.В. Захарченко, В.Н. Духонин, Н.В. Захарченко. - Пермь, 1977. – 261 с.
101. Зелинский Г.С., Комышник Л.Д. Использование зерносушилок «Целинная». - Москва-Целиноград: Колос, 1967. – 95 с.
102. Зелинский Г.С. Опыт реконструкции и эксплуатации зерносушилок // Мукомольно-элеваторная промышленность, 1971. - № 8. - С. 19-21.
103. Зимин Е.М. Движение влаги в зерновке при сушке // Механизация сельского хозяйства. - 2001. - № 4. - С. 11-14.
104. Зоотехнический анализ кормов / Е.А. Петухова, Р.Ф. Бессарабова, Л.Д. Халенева, О.А. Антонова. - М.: Агропромиздат, 1989. – 239 с.
105. Зотов Е.И. Поточные линии перерабатывающих отраслей АПК. - Ульяновск: УГСХА, 2005. – 80 с.
106. Зюлин А.Н. Перспективы механизации послеуборочной обработки и хранения зерна и семян. / А.Н. Зюлин, А.Г. Чижиков // Механизация и электрификация сельского хозяйства – 2002. - № 6. – С. 10-14.
107. Исайчев В.А. Практикум по технологии хранения и переработке продукции растениеводства. - Ульяновск: УГСХА, 2005. – 290 с.
108. Исаченко В.П. и др. Теплопередача: В.П. Исаченко, В.А. Осина, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 417 с.
109. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. – М.: Колос, 1997. – 551 с.
110. Кавецкий Г.Д. Сушка в пищевой промышленности. – М.: ВЗИПП, 1991. – 120 с.
111. Казаков Е.Д., Кретович В.Л. Биохимия зерна и продуктов его переработки. – М.: Колос, 1980. – 319 с.
112. Калинушкин М.П. Вентиляторные установки. - М.: Высшая школа, 1982. – 253 с.
113. Карпов Б.А. Технология послеуборочной обработки и хранения зерна. - М.: Агропромиздат, 1987. – 288 с.
114. Каспер В.И. О некоторых вопросах сушки зерна в пневмогазовых рециркуляционных зерносушилках // Тепло- и массообмен в сушильных и термических процессах: [сб. ст.]. - Минск: Наука и техника, 1966. - 334 с.
115. Клеев И.А. Активное вентилирование зерна в складах и на площадках. - М.: Хлебоиздат, 1961. – 67 с.
116. Клеев И.А. Хранение пшеницы и ржи. - М.: Заготиздат, 1951. – 241 с.

117. Кленин Н.И., Саун В.А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины – М.: Колос, 1994. – 751 с.
118. Клименок А.В. Выбор метода и параметров термообработки фуражного зерна перед плющением // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - Респ. межвед. тематический научно-технический сборник, 1988. - Вып. 68. – С. 125-137.
119. Коба В.Г., Брагинец Н.В., Мурусидзе Д.Н., Некрашевич В.Ф. Механизация и технология производства продукции животноводства. - М.: Колос, 1999. - 528 с.
120. Комышник Л.Д. Теоретические основы интенсификации процессов сушки в газовых рециркуляционных зерносушилках // Мукомольно-элеваторная промышленность, 1971. - № 8 – С. 16-18.
121. Коломиец А.П., Кондратьева Н.П., Владыкин И.Р., Юран С.И. Электропривод и электрооборудование. – М.: КолосС, 2006. – 328 с.
122. Комиссаров А.П. Циклическая сушка зерна. / А.П. Комиссаров, В.Д. Тихонов // Механизация и электрификация сельского хозяйства – 1999. - № 12. – С. 26-27.
123. Комышник Л.Д. и др. Сушка и хранение семян подсолнечника / Л.Д. Комышник, А.П. Журавлев, Ф.М. Хасанова – М.: Агропромиздат, 1988. – 94 с.
124. Комышник Л.Д. и др. Эксплуатация рециркуляционных зерносушилок / Л.Д. Комышник, А.П. Журавлев, Н.Г. Ревера. – М.: Агропромиздат, 1986. – 231 с.
125. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. – М.-Л.: Машгиз, 1957. – 280 с.
126. Кормление свиней / Трончук И.С., Фесина Б.Е., Почерняева Г.М. и др. – М.: Агропромиздат, 1990. – 175 с.
127. Красников В.В. Кондуктивная сушка. - М.: Энергия, 1973. - 288 с.
128. Кремнев О.А. Скоростная сушка. - Киев: Гостехиздат УССР, 1963. – 259 с.
129. Кришер О. Научные основы техники сушки. - М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 213 с.
130. Кудрина В.Н. Практикум по хранению и переработке сельскохозяйственной продукции / В.Н. Кудрина, Н.М. Лычко. - М.: Колос. 1992. - 176 с.
131. Кулагин М.С. Механизация послеуборочной обработки и хранения зерна и семян. - М.: Колос, 1979. – 256 с.
132. Куликов В.Н., Миловидов М.Е. Оборудование предприятий элеваторной и зерноперерабатывающей промышленности. М.: Агропромиздат, 1991. – 383 с.
133. Куприца Я.Н. Технология переработки зерна. - М.: Колос, 1965. – 248 с.
134. Курдюмов В.И. Разработка и исследование машин для механизации животноводства и их рабочих органов. - Ульяновск, 2002. – 159 с.
135. Курочкин А.А. Оборудование и автоматизация перерабатывающих производств / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, А.С. Гордеев. – М.: КолосС, 2007. – 560 с.
136. Кучинская З.М. Оборудование для сушки, гранулирования и брикетирования кормов. - М.: Агропромиздат, 1988. – 207 с.

137. Лебедев П.Д. Расчёт и проектирование сушильных установок. - М.: Госэнергоиздат, 1963. – 258 с.
138. Лебедев П.Д. Сушка инфракрасными лучами. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 241 с.
139. Лебедев П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1972. – 320 с.
140. Личко Н.М. Технология переработки продукции растениеводства. - М.: Колосс, 2000. – 214 с.
141. Лыков А.В. Теория переноса энергии и вещества / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. - Минск: Изд-во Акад. Наук БССР, 1954. – 357 с.
142. Лыков А.В. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968. – 425 с.
143. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высш. школа, 1967. – 599 с.
144. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.
145. Лыков А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. - М.: Гостехиздат, 1954. – 296 с.
146. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
147. Лыков М.В., Леончик Б.И. Распылительные сушилки. Основы теории и расчета. – М.: Машиностроение, 1966. – 331 с.
148. Любарский В.М. Активное вентилирование сельскохозяйственных продуктов. - М.: Колос, 1972. – 213 с.
149. Любарский Л.Н. Сушка сельскохозяйственных продуктов // Сельскохозяйственная энциклопедия, т. 4, 1955. - С. 425-427.
150. Любошиц И.Л. и др. Сушка дисперсных термочувствительных материалов. - Минск: Наука и техника, 1969. – 214 с.
151. Малин Н.И. Справочник по сушке зерна. - М.: Агропромиздат, 1987. – 316 с.
152. Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна. - М.: Колос, 2004. – 240 с.
153. Мальтри В.М. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения: Сокр. пер. с нем. / В.М. Мальтри, Э. Петке, Б. Шнайдер: Пер. В.М. Комиссаров, Ю.Л. Фрегер: Под ред. В.Г. Евдокимова. - М.: Машиностроение, 1979. – 525 с.
154. Манасян С.К. Моделирование и интенсификация процесса сушки зерна // Механизация уборки, послеуборочной обработки и хранения: Научные труды ВИМ. - М.: ВИМ, 2004. – 148 с.
155. Машины и оборудование для цехов предприятий малой мощности по переработке сельскохозяйственного сырья. В 2-х частях. - М.: Информагротех, 1995. – 256 с.
156. Мельник Б.Е. Вентилирование зерна. - М.: Колос, 1970. – 183 с.
157. Мельник Б.Е. Справочник по сушке и активному вентилированию зерна. / Б.Е. Мельник, Н.И. Малин. - М.: Колос, 1980. – 175 с.
158. Мельник Б.Е. Техничко-экономическая эффективность вентилирования зерна. - М.: Колос, 1975. – 191 с.
159. Мельник Б.Е. Технология приемки, хранения и переработки зерна / Б.Е

- Мельник, В.Б. Лебедев, Г.А. Винников. - М.: Агропромиздат, 1990. – 367 с.
160. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В.Мельников, В. Р. Алёшкин, П. М. Рошин. - Л.: Колос. Ленингр. отделение, 1980. – 168 с.
161. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных (пер. с англ.). – Л.: Судостроение, 1980. – 380 с.
162. Муругов В.П. Использование установок инфракрасного нагрева в сельскохозяйственном производстве // Применение электрической энергии в сельскохозяйственном производстве. - М.: Колос, 1974. - С. 529-534.
163. Мякишев Н.Ф. Токи высокой частоты и ультразвук в сельском хозяйстве // Применение электрической энергии в сельскохозяйственном производстве. - М.: Колос, 1974. - С. 537-540.
164. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. - М.: Наука, 1965. – 327 с.
165. Никитина Л.М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М.: Энергия, 1968. – 499 с.
166. Новиков П.А. Установка термического обеззараживания и сушки семян // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института зернового хозяйства. - 1977. - Т. 5. - С. 157-164.
167. Обработка и хранение зерна / Пер. с нем. А.М. Мазурицкого; Под ред. и предисл. А.Е. Юкиша. – М.: Агропромиздат, 1985. – 320 с.
168. Обработка результатов измерений / Касандрова О.Н., Лебедев В.В. – М.: Наука, 1970. – 103 с.
169. Окунь Г.С. и др. Установки для сушки зерна за рубежом. - М.: Сельхозиздат, 1963. – 251 с.
170. Окунь Г.С. Тенденции развития технологии и технических средств сушки зерна. Обз. Информация. - М., 1987. – 56 с.
171. Опман Я.С. Применение энергетических показателей для оценки эффективности сушильных аппаратов // Вопросы интенсификации переноса тепла и массы в сушильных и термических процессах. - Минск: Наука и техника, 1967. - С. 38-46.
172. Орлов И.В. Экономико-математические методы и модели. Выполнение расчетов в среде EXCEL / Практикум. – М.: ЗАО «Финстатинформ» 2000. - 136 с.
173. Осипов В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М.: Энергия, 1969. – 392 с.
174. Остапчук Н.В., Шашкин А.Б., Каминский В.Д. Повышение эффективности сушки зерна. - Киев: Техника, 1981. - 142 с.
175. Патент RU № 2263862. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, М.А. Карпенко, Г.В. Карпенко; Оpubл. 10.11.2005; Бюл. № 31.
176. Патент RU № 75233. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, И.Н. Зозуля; Оpubл. 27.07.2008; Бюл. № 21.
177. Патент RU № 59226. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин; Оpubл. 10.12.2006; Бюл. № 34.

178. Патент RU № 2323580. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин; Оpubл. 10.05.2008; Бюл. № 13.
179. Патент RU № 2371650. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.Н. Зозуля; Оpubл. 27.10.2009; Бюл. № 30.
180. Патент RU № 90970. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 27.01.2010; Бюл. № 3.
181. Патент RU № 92603. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 27.03.2010; Бюл. № 9.
182. Патент RU № 96466. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 10.08.2010; Бюл. № 22.
183. Патент RU № 96467. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 10.08.2010; Бюл. № 22.
184. Патент RU № 96468. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 10.08.2010; Бюл. № 22.
185. Патент RU № 96639. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.А. Постников; Оpubл. 10.08.2010; Бюл. № 22.
186. Патент RU № 99130. Устройство для сушки и обеззараживания зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 10.11.2010; Бюл. № 31.
187. Патент RU № 99131. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 10.11.2010; Бюл. № 31.
188. Патент RU № 2411432. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 10.02.2011; Бюл. № 4.
189. Патент RU № 2413912. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 10.03.2011; Бюл. № 7.
190. Патент RU № 2428642. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; Оpubл. 10.09.2011; Бюл. № 25.
191. Патент RU № 110291. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин, Е.В. Сельков; Оpubл. 20.11.2011; Бюл. № 32.
192. Патент RU № 2436630. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 20.12.2011; Бюл. № 35.
193. Патент RU № 2446886. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 10.04.2012; Бюл. № 10.
194. Патент RU № 118036. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, М.В. Ильина; Оpubл. 10.07.2012; Бюл. № 9.
195. Патент RU № 119862. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; Оpubл. 27.08.2012; Бюл. № 24.
196. Патент RU № 119683. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 27.08.2012; Бюл. № 24.
197. Патент RU № 119864. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 27.08.2012; Бюл. № 24.
198. Патент RU № 2453123. Устройство для сушки пищевых продуктов. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 20.06.2012; Бюл. № 17.
199. Патент RU № 2465527. Устройство для сушки зерна. / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 27.10.2012; Бюл. № 30.

200. Пахомов В.И. Оптимизация тепловой обработки фуражного зерна СВЧ-энергией. / В.И. Пахомов, В.Д. Каун // Механизация и электрификация сельского хозяйства, – 2000. - № 9. – С. 8-11.
201. Петражицкий Г.Б. Инженерные методы расчетов нестационарных процессов теплопроводности в тонких многослойных стенках / Г.Б. Петражицкий, В.И. Полежаев // Теплоэнергетика, - 1962. - № 2. - С.48-51.
202. Петриченко В.Е. Прогрессивная технология приёмки и хранения зерна. - М.: Агропромиздат, 1985. - 241с.
203. Питание свиней: Теория и практика / Пер. с англ. Н.М. Тепера. – М.: Агропромиздат, 1987. – 313 с.
204. Плаксин М.Ю. Процессы и аппараты пищевых производств. / М.Ю. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. – М.: КолосС, 2005. – 760 с.
205. Плановский А.Н. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности / А.Н. Плановский, В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. - М.: Химия, 1979. – 288 с.
206. Полонская Ф.М. Тепло- и массообмен в периоде постоянной скорости сушки // Журнал технической физики, 1953. - Т. 23. - Вып. 5, С. 26-29.
207. Птицын С.Д. Зерносушилки. - М.: Машиностроение, 1966. – 486 с.
208. Птицын С.Д. Зерносушилки. Технологические основы, тепловой расчет и конструкции. – М.: Машиностроение, 1966. – 211 с.
209. Птицын С.Д. Сушка и хранение зерна в колхозах. - М.: Сельхозгиз, 1951. – 168 с.
210. Птушкин А.Т. Автоматизация производственных процессов в отрасли хранения и переработки зерна / А.Т. Птушкин, О.А. Новицкий. - М.: Агропромиздат, 1985. – 349 с.
211. Пунков С.П., Стародубцева А.И. Хранение зерна, элеваторно-складское хозяйство и зерносушение. – М.: Агропромиздат, 1990. – 331 с.
212. Пустильник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
213. Пятков И.Ф. Перспективы и преимущества электротермической обработки семян перед посевом // Пути повышения эффективности и рационального использования электрической и тепловой энергии в сельском хозяйстве. - Киев, 1977. - С. 33-34.
214. Рекомендации по высокопроизводительному использованию реконструированной зерносушилки М-819. - М.: ВНИИ механизации сельского хозяйства, 1989. – 20 с.
215. Рогов И.А. Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. - М.: Пищевая промышленность, 1976. – 210 с.
216. Романенко П.Г. Сушка в кипящем слое. - М.: Химия, 1964. – 241 с.
217. Романков П.Г. Процессы и аппараты химической промышленности. / П.Г. Романков, М.И. Курочкина, Ю.Я. Мозжерин и др. – Л.: Химия, 1989. – 560 с.
218. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. – Л.: Химия. Ленинградское отделение, 1979. – 271 с.

219. Романов Е.Р. Прямоточная сушка зерна: Зарубежная практика // Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность, 1982. - № 3. - С. 43-45.
220. Рубцов П.А. Применение электрической энергии в сельскохозяйственных процессах / П.А. Рубцов, С.П. Осетров. - М.: Колос, 1971. – 257 с.
221. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твёрдой фазой. М.: Химия, 1980. - 248 с.
222. Рудобашта С.П. // Энциклопедия «Машиностроение». Раздел IV. Расчет и конструирование машин. Т. 12 «Машины и аппараты химических производств». Раздел 5. Машины и аппараты для массообменных процессов (с. 468-482, 486-487, 504-510). - М.: Машиностроение, 2004. – 832 с.
223. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов экспериментов. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
224. Румянцев П.Д. Амбарные вредители и меры борьбы с ними. - М.: Заготиздат, 1940. – 206 с.
225. Рябова Т.Ф., Новак И.Н. Совершенствование нормирования и снижение удельных затрат топлива на сушку зерна // Экспресс-информация. Серия: Элеваторная промышленность. - М.: ЦНИИТЭИ Минхлебопродуктов СССР, 1987, вып. 1. - 22 с.
226. Савченко С.М. Повышение эффективности работы зерносушилок / С.М. Савченко, В.И. Атаназевич. - М.: ЦНИИТЭМ Минзага СССР, 1976. – 349 с.
227. Сажин Б.С. Основы техники сушки. – М.: Химия, 1984. – 317 с.
228. Сакур В.А. Сушка и активное вентилирование зерна и зеленых кормов. - М.: Колос, 1974. – 215 с.
229. Самочётов В.Ф. Зерносушение / В.Ф. Самочётов, Г.А. Джорогян. - М.: Колос, 1964. – 315 с.
230. Самочетов В.Ф. Техническая база хлебоприемных предприятий: Зерносушение / В.Ф. Самочетов, Г.А. Джорогян, Е.И. Никулин. - М.: Колос, 1978. – 272 с.
231. Севернев М.М. Механическое обезвоживание и термическая сушка высоковлажных кормов. - М.: Колос, 1980. – 247 с.
232. Сельскохозяйственная техника и оборудование для фермерских хозяйств. В 2-х томах. - М.: Информагротех, 1994. – 384 с.
233. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Г.Е. Листопад, Г.К. Демидов, Б.Д. Зонов и др.; Под общ. ред. Г.Е. Листопада. – М.: Агропромиздат, 1986. – 688 с.
234. Сельскохозяйственные машины. Практикум / М.Д. Адиньяев, В.Е. Бердышев и др.; Под ред. А.П. Тарасенко. – М.: Колос, 2000. – 240 с.
235. Семёнов Г.В. Касьянов Г.И. Сушка сырья: мясо, рыба, овощи, молоко. - Ростов н/Д.: Издательский центр «МарТ», 2002. – 112 с.
236. Сергеев А.С. Лабораторные исследования влияния различных температур воздуха при искусственной сушке // Труды Московского института сельскохозяйственного производства, 1973. - Том X. - Вып. 1. - С. 72-77.
237. Скороваров М.А. Режимы сушки зерна. - М.: Хлебоиздат, 1959. - 241 с.
238. Скороваров М.А. Эксплуатация зерносушилок. - М.: Хлебоиздат, 1956. –

216 с.

239. Скороваров М.А., Эммануэль Т.П. Расчет и реконструкция зерносушилок. - М.: Заготиздат, 1961. – 241 с.

240. Слухоцкий А.Е. Установки индукционного нагрева. - Л.: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1981. – 153 с.

241. Смольский Б.М. и др. Нестационарный теплообмен. - Минск: Наука и техника, 1974. – 157 с.

242. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

243. Статистические методы в инженерных исследованиях / Бородюк В.П., Воцинин А.П., Иванов А.З. и др.; Под ред. Г.К. Круга. – М.: Высш. школа, 1983. – 216 с.

244. Судорчук А.П. Энергосберегающая установка для сушки зерна крупяных культур // Совершенствование конструкций и технологии использования сельскохозяйственной техники. - Самара, 1999. - С. 210-212.

245. Сушка зерна. Труды. Ответственный редактор - доктор техн. наук, проф. Л.А. Трисвятский, 1981. – 58 с.

246. Сушка и хранение зерна на фермах Англии. Пер. с англ. В.С. Шмалько. - М.: Сельхозгиз, 1957. – 191 с.

247. Сыроватка В.И. Экологичность и конкурентно способность производства комбикормов в хозяйствах / Сыроватка В.И., Теплицкий М.Г // Экология и сельскохозяйственная техника. Т. 3. Экологические аспекты производства продукции животноводства и электротехнологий: Материалы 4-й научно-практической конференции. – СПб.: СЗНИИМСЭСХ, 2005. - С. 61-68.

248. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 272 с.

249. Тёмкин А.Г. Зависимость процесса сушки от формы тела. - М.: Гостоптехиздат, 1959. – 375 с.

250. Теоретические основы сохранения зерновой массы / Всесоюзн. акад. с.-х. наук им. В.И. Ленина. - М.: Колос, 1981. – 118 с.

251. Теплофизические свойства веществ. – Под ред. Варгафтика Н.Б. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 367 с.

252. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочное пособие / Под ред. А.С. Гинзбурга. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 223 с.

253. Терехов М.Б. Технология переработки зерна и зернопродуктов / М.Б. Терехов, Р.А. Каримов. - Н. Новгород, 1999. – 341 с.

254. Терпиловский К.Ф. Механизация процессов тепловой обработки кормов. - Минск, Ураджай, 1973. – 127 с.

255. Техническая база хлебопекарных предприятий (Зерносушение) / В.Ф. Самочетов, Г.А. Джорогян, Е.И. Никулин. – М.: Колос, 1978. – 272 с.

256. Технология переработки продукции растениеводства / Под ред. Н.М. Личко. – М.: Колос, 2000. – 552 с.

257. Технология пищевых производств / Под ред. Л.П. Ковальской. – М.: Колос, 1999. – 752 с.

258. Технология уборки, консервирования и хранения кормов / Под ред. Й. Блажека; Пер. с чеш. А.М. Сухановой, С.Д. Баранниковой. – М.: Агропромиздат, 1985. – 144 с.
259. Тиц З.Л. Машины для послеуборочной поточной обработки семян / З.Л. Тиц, В.Л. Анискин. - М.: Машиностроение, 1967. – 371 с.
260. Трисвятский Л.А. Практикум по хранению и технологии сельскохозяйственных продуктов. - М.: Колос, 1981. – 200 с.
261. Трисвятский Л.А. Хранение зерна. – М.: Агропромиздат, 1986. – 350 с.
262. Трисвятский Л.А., Мельник Б.Е. Технология приема, обработки, хранения зерна и продуктов его переработки. - М.: Колос, 1983. – 351 с.
263. Уваров А.М. Повышение производительности и улучшение эксплуатации зерносушилок. – М.: Заготиздат, 1955. – 36 с.
264. Уваров А.М. Сушка зерна. - М.: Госторгиздат, 1937. – 294 с.
265. Уколов В.С. Сушка кукурузы. - М.: Колос, 1964. – 301 с.
266. Федоров И.М. Теория и расчет процесса сушки во взвешенном состоянии / Под ред. Н.М. Михайлова. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 176 с.
267. Фёдоров И.М. Теория и расчёт процесса сушки. - М.: Госэнергоиздат, 1955. – 597 с.
268. Фёдоров Н.Е. Аналитический расчет сушильных установок. – М.: Пищевая промышленность, 1967. – 304 с.
269. Филоненко Г.К. Кинетика сушильных процессов. - М.: Оборониздат, 1939. – 294 с.
270. Филоненко Г.К. Сушильные установки. - М.: Энергоиздат, 1952. – 257 с.
271. Филоненко Г.К., Лебедев П.Д. Сушильные установки. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 264 с.
272. Халанский В.М., Горбачев И.В. Сельскохозяйственные машины. – М.: Колос, 2003. – 624 с.
273. Халафян А.А. Статистический анализ данных. STATISTICA 6.0. – Краснодар: КубГУ, 2005. – 307 с.
274. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. – 552 с.
275. Чернопятов И.Г. Руководство к сушке и хранению хлеба. - М.: Хлебоиздат, 1867. – 198 с.
276. Чернядев А.Н. Автоматизированная обработка и сушка зерна. - Киров: Книжное издательство, 1967. – 254 с.
277. Чижиков А.Г. Состояние и перспективы развития механизации послеуборочной обработки и хранения зерна и семян. // Достижения науки и техники АПК – 2001. - № 11. – С. 17-20.
278. Членов В.А., Михайлов Н.В. Сушка сыпучих материалов в виброкипящем слое. - М.: Стройиздат, 1967. – 224 с.
279. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов - М.: Физматгиз, 1962. - 456 с.
280. Чухарько З.Т. Экономические вопросы сушки зерна. // Труды МТИПП. - 1957. Вып. 7. - С. 214-247.

281. Шарошко Е.А. Практикум по хранению и технологии сельскохозяйственных продуктов - М.: Колос, 1969. – 208 с.
282. Шервуд Т.К. Массопередача / Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки И.; Пер с англ. Н.Н. Кулова; Под ред. В.А. Малюсова. – М.: Химия, 1982. – 695 с.
283. Шibaев П.Н. Улучшить организацию сушки семян в колхозах и совхозах. // Селекция и семеноводство, 1966. - № 4. - С. 56-64.
284. Шустер А.И. Проблема экономической эффективности капитальных вложений. // Методы и практика определения эффективности капитальных вложений и новой техники. - М.: Наука, 1967. - Вып. 13. - С. 58-61.
285. Эрк Ф.Н. Сушка и очистка семян трав. - М.: Россельхозиздат, 1969. – 194 с.
286. Юниш А.Е. Справочник по оборудованию элеваторов и складов. - М.: Колос, 1978. – 254 с.
287. Afzal T.M., Abe T., Hikida Y. Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley // Journal of Food Engineering, - 1997. - 42, pp. 177-182.
288. Allen I.R. Application of grain drying theory to the drying of maize and rice. - J. Agr. Engng Res., 2005. - v. 5, - № 4, pp. 69-72.
289. Antonijevic D. Unsteady heat and mass transfer during combined conductive-convective drying of colloidal capillary-porous materials // Drying Technology. – 2000. – 18:1, pp. 531-532.
290. Antonijevic D. Variable coefficients model for drying processes with conductive heat supply // Drying Technology. – 2009. – 27:1, pp. 71-75.
291. Bauder H.J. Die Körnerkühlung und ihre Anwendung. Landtechn., 1965. - Bd 20. - № 5, pp. 55-57.
292. Cao C., Wang X.B. Automatic control of grain dryers // Modernizing Agric., 2002. – 3:, pp. 40-44.
293. Cao. W. Electrohydrodynamic drying characteristics of wheat using high voltage electrostatic field / Cao, W., Nishiyama, Y., Koide, S. // Journal of Food Engineering, - 2004. - 62 (3), pp. 209-213.
294. Cherrj M. The chill sets in progress and problems in grain cooling. Farmer Stockbr., 1966. - v. 80. - № 11, pp. 120-122.
295. Chou S.K., Chua K.J., Lee S.M. On the use of contact factor parameter to optimize drying operations // Energy Conversion and Management. – 2003. – 44:9, pp. 1451-1464.
296. Converse H.H. Transient heat transfer within stored in a cylindrical bin. Amer. Soc. Agr. Engrs., 2006. - № 855, pp. 254-256.
297. Farges D., Hemati M., Laguerie C., Vachet F., Rousseaux P. A New Approach to Contact Drying Modelling // Drying Technology: - 1995. - 13:5, pp. 1317 – 1329.
298. Foster G.H. Moisture changes during aeration of grain. Amer. Soc. Agr. Engrs., 1967. – 351 p.
299. Fudym O., Carrere-Gee C., Lecomte D., Ladevie B. Drying kinetics and heat flux in thin-layer conductive drying // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2003. – 30:3 pp. 333-347.

300. Gunasekaran S. Optimal energy management in grain drying // *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 1986. – 25(1), pp. 1-48.
301. Hall C.W. Theory of infrared drying // *Transaction of the ASAE*. – 1962. – 5(1), pp. 14-16.
302. Hukill W.V. Basic principles in drying corn and grain sorghum. *Agr. Engng*, 1997. - v. 28. - № 8, pp. 75-78.
303. Jia C., Sun D., Cao C. Mathematical simulation of temperature and moisture fields within a grain kernel during drying // *Drying Technology*. – 2000. – 18:1, pp. 1305-1325.
304. Jia C., Yang W., Siebenmorgen T.J., Cnossen A.G. Development of computer simulation software for single kernel drying. Tempering and stress analysis // *Transactions of the ASAE*. – 2002. – 45(5), pp. 1485-1492.
305. Jouin M. Donnees techniques sur la ventilation du gra. *Etud. CHEEMA*, 1969. - № 329, pp. 147-149.
306. Kwanchai C., Sakamon D., Somchart S. Performance and energy consumption of an impinging stream dryer for high-moisture particulate materials // *Drying Technology*. – 2010. – 28:1, pp. 20-29.
307. Marchant J.A. Control of high temperature continuous flow grain dryers // *Agric. Eng.* – 1985. – 40:1, pp. 145-149.
308. Mhimid A., Fohr J.P., Nasrallah S.B. Heat and mass transfer during drying of granular products by convection and conduction // *Drying Technology*. – 1999. – 17:6, pp. 1043-1063.
309. Mhimid A., Nasrallah S. Ben, Fohr J. P. Heat and mass transfer during drying of granular products — simulation with convective and conductive boundary conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2000. – 43 (15) pp. 2779-2791.
310. Mikhailov M.D., Shishedjiev B.K. Temperature and moisture distributions during contact drying of a moist porous sheet // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1975. – 18:1, pp. 15-24.
311. Morey R.V., Gustafson R.J., Cloud H.A., Walter K.L. Energy requirements for high – low temperature drying // *Transactions of the ASAE*. – 1978. – 21(4): pp. 562-567.
312. Nilsson L., Schlunder E. -U. Contact drying combined with membrane separation: Dewatering rates of porous spheres wetted with four different liquid mixtures // *Chemical Engineering and Processing*. – 1998. – 37:4, pp. 317-330.
313. Pabis, Stanisław. Grain drying : theory and practice / Stanisław Pabis, Digvir S. Jayas, Stefan Cenkowski. New York : John Wiley, 1998. Description: xii, 303 p.: ISBN: 0471573876 (cloth : alk. paper).
314. Paterson H. Chilled grain storage. *Farm Mech. Build.*, 1997. - v. 19. - № 216, pp. 571-575
315. Shedd C.K. Resistance of grains and seeds into the air flow. *Agr. Engng*, 1953. - v. 34. - № 9, pp. 114-116.
316. Sundaram Gunasekaran. Pulsed microwave-vacuum drying of food materials // *Drying Technology*. – 1999. – 17:3, pp. 395-412.

317. Tsottsas E., Kwapinska M., Saage G. Modeling of contact dryers // *Drying Technology*. – 2007. – 25:1, pp. 1377-1391.
318. Vargas W.L., McCarthy J.J. Heat conduction in granular materials // *AIChE Journal*. – 2001. – 47, pp. 1052-1059.
319. Wang L.J., Sun D.W. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology // *Trends in Food Science Technology*. – 2001. – 12, pp. 174-184.
320. Yadollahinia A.R., Omid M., Rafie S. Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products // *Int. J. Agri. Biol.*, - 2008. - 10:, pp. 61-65.
321. Zihlmann F. Strömungstechnische Grundlagen und deren Anwendung bei der Belüftungstechnik und beim pneumatischen Transport. *Traktor Landmasch.*, 1969. - Bd 31. - № 3, pp. 1145-1148.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Основные числа (критерии) подобия для процесса сушки зерна в установках с различным типом подвода теплоты

Наименование числа (критерия)	Обозначение	Физический смысл	Область применения
Фурье (критерий гомохронности в тепловых явлениях)	F_0	Характеризует связь между скоростью изменения температурного поля, физическими характеристиками и размерами высушиваемого материала	Исследование нестационарных температурных полей в твёрдых телах (сравнение во времени процессов нагревания или охлаждения подобных тел различных размеров)
Фурье (критерий гомохронности в явлениях массообмена)	F_{0m}	То же, для поля влагосодержаний	То же, для процесса сушки (увлажнения)
Рейнольдса	Re	Характеризует гидродинамический режим движения потока, являясь мерой соотношения в нём инерции и внутреннего трения	Во всех расчётах гидродинамики потока и переноса теплоты вынужденным потоком жидкости или газа
Грасгофа	Gr	Характеризует соотношение сил внутреннего трения и подъёмной силы, обусловленной разностью плотностей в отдельных точках неизотермического потока	То же, при свободном движении жидкости или газа
Пекле (теплообменный)	Pe	Является мерой соотношения молекулярного и конвективного (молярного) переносов теплоты в потоке	Во всех расчётах переноса теплоты потоком жидкости или газа
Пекле (массообменный)	Pe_m	То же, для переноса массы	То же, для переноса массы
Прандтля (теплообменный)	$Pr = \frac{Pe}{Re}$	Является мерой относительной инерционности температурных и скоростных полей	В расчётах переноса теплоты в движущейся среде, как характеристика её физических свойств
Прандтля (массообменный)	$Pr_m = \frac{Pe_m}{Re}$	Является мерой относительной инерционности полей массосодержания и скоростей в потоке	То же, в расчётах переноса массы
Нуссельта (теплообменный)	Nu	Характеризует соотношение между интенсивностью теплоотдачи и теплопроводностью в пограничном слое	В расчётах внешнего теплообмена как определяемый критерий (безразмерный коэффициент теплоотдачи)
Нуссельта (массообменный)	Nu_m	Характеризует соотношение между интенсивностью массообмена и массопроводностью в пограничном слое	То же, в расчётах внешнего массообмена (безразмерный коэффициент массообмена)
Био (теплообменный)	Bi	Характеризует соотношение между интенсивностью теплообмена на поверхности твёрдого тела и его теплопроводностью	В расчётах теплопроводности (температурного поля твёрдого тела), как определяющий критерий

Био (массообменный)	Bi_m	Характеризует соотношение между интенсивностью массообмена на поверхности тела и его массопроводностью (потенциалопроводность массы)	То же, в расчётах внутреннего переноса массы
Гухмана	Gu	Характеризует потенциальные возможности нагретого газа как сушильного агента (параметрический критерий, определяемый условиями задачи)	В расчётах внешнего теплообмена с влажным материалом как характеристика влияния массообмена на теплообмен
Кирпичёва (теплообменный)	Ki	Характеризует соотношение между интенсивностями внешнего теплообмена и внутреннего переноса теплоты	В расчётах теплообмена, когда известна плотность потока теплоты (в том числе и лучистого) на поверхности твёрдого тела
Кирпичёва (массообменный)	Ki_m	Характеризует соотношение между интенсивностями внешнего массообмена и внутреннего переноса массы	В расчётах массообмена, когда известна плотность потока массы на поверхности высушиваемого материала. Является характеристикой образования трещин в материале в процессе его сушки
Лькова	Lu	Характеризует соотношение между инерционностью поля, массосодержанием и полем температур в твёрдом теле	Является характеристикой отношения интенсивностей внутреннего переноса массы (влаги) и теплоты в процессе сушки
Поснова	Pn	Характеризует относительный перепад влагосодержаний, вызванный перепадом температур в стационарном состоянии	Является термодинамической характеристикой материала
Коссовича	Ko	Характеризует соотношение между теплотой, затраченной на испарение влаги, и теплотой, затраченной на нагревание тела за весь процесс сушки	Является специфической формой критерия фазового превращения
Ребиндера	Rb	Характеризует отношение среднеинтегральной по объёму образца теплоты, затраченной на нагревание тела, к теплоте на нагревание влаги за бесконечно малый промежуток времени	Является характеристикой кинетики процесса сушки, устанавливающей зависимость между теплообменом и массообменом
Критерий фазового превращения	ε	Характеризует отношение изменения влагосодержания тела за счёт фазового превращения к общему изменению влагосодержания	Является характеристикой механизма внутреннего переноса влаги: при $\varepsilon = 1$ - влагосодержание изменяется только за счёт фазовых превращений (испарение, конденсация); при $\varepsilon = 0$ - фазовое превращение отсутствует и влагосодержание изменяется только за счёт переноса жидкости
Померанцева	Po	Характеризует соотношение между объёмным источником теплоты и интенсивностью внутреннего переноса теплоты	В расчётах теплообмена с внутренним источником теплоты при нагреве в поле ТВЧ или ИК-лучами материала в установках с большой пропускной способностью

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Классификация форм связи влаги с высушиваемым материалом

Вид связи	I. Химическая связь (связь в точных количественных соотношениях)		II. Физико-химическая связь (связь в различных настроенных соотношениях)		III. Физико-механическая связь (удерживание влаги в неопределенных соотношениях)			
	Ионная связь	Молекулярная связь (гидратная влага)	Адсорбированная связь (связь влаги в гидратных оболочках)	Осмогическая связь	Структурная связь	Связь в микрокапиллярах	Связь в макрокапиллярах	Связь сывчаивания
Условия образования данной формы связи с влагой	Химические реакции (гидратация)	Кристаллизация из раствора (образование кристаллогидратов)	Адсорбция влаги	Исбирательная диффузия через полупроницаемую оболочку	Образование тела	Поглощение влаги в пористых или волокнистых материалах	Поглощение влаги в пористых или волокнистых материалах	Прилипание влаги при неосредненном контакте с поверхностью материала
Причина, обуславливающая данную форму связи	Первичная валентность (электростатические силы взаимодействия)	Вторичная валентность (электростатические силы взаимодействия)	Молекулярное взаимодействие молекул и ионов в внешней и внутренней поверхности	Осмогическое давление	Влага захватывается при образовании впадин структуры тела	Капиллярное давление, обусловленное кривизной поверхности жидкости	То же	Поверхностное натяжение, характерное для углов смачивания $\theta < 90^\circ$
Интенсивность (энергия связи)	Сильная связь	Сильная связь	Связь средней интенсивности	Слабая обратимая связь - удерживание	Механическое удерживание влаги, мономолекулярный слой связан адсорбционно	Механическое удерживание влаги	Механическое удерживание влаги (слой у стенок связан адсорбционно)	Механическое удерживание влаги при неосредненном контакте с поверхностью материала
Условия вытеснения связи	Химическое взаимодействие, иногда прокаливание	Промывание	Испарение влаги	Безвозвратное образование новых комплексов в воде раствора или материала	Испарение, отжим давлением, разрушение структуры	Испарение	Испарение	Механическое разрушение
Изменение материала и влаги вследствие осушения данной формы связи	Образование новых связей материала. Влага исходит	Изменение свойств материала. Влага входит в структуру кристалла	Материал меняет свой вид	Набухание материала	Материал меняет свой вид	Испарение	Испарение	Механическое разрушение

ПРИЛОЖЕНИЕ В

СИСТЕМА АККРЕДИТАЦИИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ КХА

№ 800
«23» ноября 2007 года

Испытательная лаборатория по агрохимическому
обслуживанию сельскохозяйственного
производства Федерального государственного
учреждения "Станция агрохимической службы"
"Ульяновская"
432025, г. Ульяновск, ул. Маяковского, д.35
№ РОСС.RU.0001.510251

Предъявитель продукции ПАВЛУШИН А.А.

Наименование продукции: ЯЧМЕНЬ-УРОЖАЯ 2007 ГОДА

Дата получения образца 22.11.2007 года _____

Дата проведения КХА 22.11.2007 - 23.11.2007 года- _____

Вид испытаний: Показатели физико-химические.

Определения содержания: Соответствие ГОСТ 28672-90.

Техническое задание на проведение испытаний: направление ПАВЛУШИН А.А.

На соответствие требования ГОСТ 28672-90.

Настоящий протокол не может быть скопирован без разрешения
испытательной лаборатории, протокол выдается только на
испытываемый образец

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Наименование образцов номер образца, дата отбора	Наименование показателей	Един. Измерения	Норма По НД	Результаты Испытаний	Погрешность	Методика Испытаний
Ячмень - урожай 2007 года	Сорная примесь, в т.ч. минеральная примесь	%	Н/б 8.0	3.0	20%	Гост 30483
		%	Н/б 0.3	0,00	20%	
	В числе минер. примеси: Галька	%	Не более 1.0	0.00	20%	Гост 30483
	Испорченные зерна	%	Н/б 0.2	0.00	20%	Гост30483
	Фузариозные зерна	%	Н/б 1.0	0.00	20%	Гост30483
	Овсюг	%	Н/б 1.0	0.20	20%	Гост 30483
	вредная примесь	%	Н/б 1.0	0.00	20%	Гост 30483
	в числе вредной примеси спорынья и головня	%	0.5	0.00	20%	Гост 30483
	семена горчачка ползучего и т.д. (по совокупности)	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена вязаля разноцветного	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена гелиотропа опушенноплодного	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена триходесмы седой	%	Не допуск.	Не обнаруж.	20 %	Гост 30483
	Проросшие зерна в числе зерновой	%	Не более 5.0	0.00	20%	Гост 30483
	Загрязненность Зараженность Вредителями	Экз.	Не допуск	2 степень зараженности	20 %	Гост 13586.4
	Зерновая примесь	%	Не более 15.0	5.0	0.01 %	Гост 30483

Контроль правильности по контрольному источнику, параллельные пробы


 Начальник ИЛ
 А.И. Масленникова
 «23» ноября 2007 года
 агроинформационной
 службы
 «Удальновская»
 М.П.

СИСТЕМА АККРЕДИТАЦИИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ
ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ КХА

№ 800
«23» ноября 2007 года

Испытательная лаборатория по агрохимическому
обслуживанию сельскохозяйственного
производства Федерального государственного
учреждения "Станция агрохимической службы"
"Ульяновская"
432025, г. Ульяновск, ул. Маяковского, д.35
№ РОСС.RU.0001.510251

Предъявитель продукции ПАВЛУШИН А.А.

Наименование продукции: ЯЧМЕНЬ-УРОЖАЯ 2007 ГОДА/после термической обработки при 37 °С/

Дата получения образца 22.11.2007 года

Дата проведения КХА 22.11.2007 - 23.11.2007 года

Вид испытаний: Показатели физико-химические.

Определения содержания: Соответствие ГОСТ 28672-90.

Техническое задание на проведение испытаний: направление ПАВЛУШИН А.А.

На соответствие требованиям ГОСТ 28672-90.

Настоящий протокол не может быть скопирован без разрешения
испытательной лаборатории, протокол выдается только на
испытываемый образец

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Наименование образцов номер образца, дата отбора	Наименование показателей	Един. Измерения	Норма По НД	Результаты Испытаний	Погрешность	Методика Испытаний
Ячмень - урожай 2007 года	Сорная примесь, в т.ч. минеральная примесь	% %	Н/б 8.0 Н/б 0.3	3.0 0,00	20% 20%	Гост 30483
После термической обработки при температуре 37 градусов	В числе минер. примеси: галька	%	Не более 1.0	0.00	20%	Гост 30483
	Испорченные зерна	%	Н/б 0.2	0.00	20%	Гост30483
	Фузариозные зерна	%	Н/б 1.0	0.00	20%	Гост30483
	Овсюг	%	Н/б 1.0	0.20	20%	Гост 30483
	вредная примесь	%	Н/б 1.0	0.00	20%	Гост 30483
	в числе вредной примеси спорынья и головня	%	0.5	0.00	20%	Гост 30483
	семена горчица ползучего и т.д. (по совокупности)	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена вяза разноцветного	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена гелиотропа опушенноплодного	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена триходесмы седой	%	Не допуск.	Не обнаруж.	20 %	Гост 30483
	Проросшие зерна в числе зерновой	%	Не более 5.0	0.00	20%	Гост 30483
	Загрязненность Зараженность Вредителями	Экз.	Не допуск	2 степень зараженности	20 %	Гост 13586.4
	Зерновая примесь	%	Не более 15.0	5.0	0.01 %	Гост 30483

Контроль правильности по контрольному источнику, параллельные пробы


 Начальник ФЛК
 А.И. Миленникова
 23 ноября 2007 года
 Ульфовская



СИСТЕМА АККРЕДИТАЦИИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ
ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ КХА

№ 800
«23» ноября 2007 года

Испытательная лаборатория по агрохимическому
обслуживанию сельскохозяйственного
производства Федерального государственного
учреждения "Станция агрохимической службы"
"Ульяновская"
432025, г. Ульяновск, ул. Маяковского, д.35
№ РОСС.RU.0001.510251

Предъявитель продукции ПАВЛУШИН А.А.

Наименование продукции: ЯЧМЕНЬ-УРОЖАЯ 2007 ГОДА/после термической обработки при 60 °С/

Дата получения образца 22.11.2007 года
Дата проведения КХА 22.11.2007 - 23.11.2007 года

Вид испытаний: Показатели физико-химические.
Определения содержания: Соответствие ГОСТ 28672-90.

Техническое задание на проведение испытаний: направление ПАВЛУШИН А.А.
На соответствие требованиям ГОСТ 28672-90.

Настоящий протокол не может быть скопирован без разрешения
испытательной лаборатории, протокол выдается только на
испытываемый образец

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Наименование образцов номер образца, дата отбора	Наименование Показателей	Един. Измерения	Норма По НД	Результаты Испытаний	Погрешность	Методика Испытаний
Ячмень - урожай 2007 года	Сорная примесь, в т.ч. минеральная примесь	% %	Н/б 8.0 Н/б 0.3	3.0 0,00	20% 20%	Гост 30483
После термической обработки при температуре 60 градуса	В числе минер. примеси: Галька	%	Не более 1.0	0.00	20%	Гост 30483
	Испорченные зерна	%	Н/б 0.2	0.00	20%	Гост30483
	Фузариозные зерна	%	Н/б 1.0	0.00	20%	Гост30483
	Овсюг	%	Н/б 1.0	0.20	20%	Гост 30483
	вредная примесь	%	Н/б 1.0	0.00	20%	Гост 30483
	в числе вредной примеси спорынья и головня	%	0.5	0.00	20%	Гост 30483
	семена горчица ползучего и т.д. (по совокупности)	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена вяза разноцветного	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена гелиотропа опушенноплодного	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена триходесмы седой	%	Не допуск.	Не обнаруж.	20 %	Гост 30483
	Проросшие зерна в числе зерновой	%	Не более 5.0	0.00	20%	Гост 30483
	Загрязненность Зараженность Вредителями	Экз.	Не допуск	Не обнаружено	20 %	Гост 13586.4
	Зерновая примесь	%	Не более 15.0	5.0	0.01 %	Гост 30483

Контроль правильности по контрольному источнику, параллельные пробы

А.И. Масленникова

Начальник ИД
А.И. Масленникова
«23» ноября 2007 года



СИСТЕМА АККРЕДИТАЦИИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ
ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ КХА

№ 801
«23» ноября 2007 года

Испытательная лаборатория по агрохимическому
обслуживанию сельскохозяйственного
производства Федерального государственного
учреждения "Станция агрохимической службы"
"Ульяновская"
432025, г. Ульяновск, ул. Маяковского, д.35
№ РОСС.RU.0001.510251

Предъявитель продукции ПАВЛУШИН А.А.

Наименование продукции: ПШЕНИЦА-УРОЖАЯ 2007 ГОДА

Дата получения образца 22.11.2007 года _____

Дата проведения КХА 22.11.2007 - 23.11.2007 года- _____

Вид испытаний: Показатели физико-химические.

Определения содержания: Соответствие ГОСТ Р 52554-2006.

Техническое задание на проведение испытаний: направление ПАВЛУШИН А.А.
На соответствие требованиям ГОСТ Р 52554-2006.

Настоящий протокол не может быть скопирован без разрешения
испытательной лаборатории, протокол выдается только на
испытываемый образец

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Наименование образцов номер образца, дата отбора	Наименование показателей	Един. Измерения	Норма По НД	Результаты Испытаний	Погрешность	Методика Испытаний
Пшеница - урожай 2007 года	Сорная примесь, в т.ч. минеральная примесь	% %	Н/б 5.0 Н/б 0.3	1.9 0,00	20% 20%	Гост 30483
	В числе минер. примеси: Галька	%	Не более 1.0	0.00	20%	Гост 30483
	Испорченные зерна	%	Н/б 1.0	0.00	20%	Гост30483
	Фузариозные зерна	%	Н/б 1.0	0.00	20%	Гост30483
	Куколь	%	Н/б 0.5	0.00	20%	Гост 30483
	Трудноотделимая примесь	%	Н/б 1.0	0.00	20%	Гост 30483
	вредная примесь	%	Н/б 0.5	0.00	20%	Гост 30483
	в числе вредной примеси спорынья и головня	%	0.05	0.00	20%	Гост 30483
	семена горчица ползучего и т.д. (по совокупности)	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена вяза разноцветного	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена гелиотропа опушенноплодного	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена триходесмы седой	%	Не допуск.	Не обнаруж.	20 %	Гост 30483
	Головневые, мараные синегузочные	%	Не более 10.0	0.00	20%	Гост 30483
	Загрязненность Зараженность Вредителями	Экз.	Не допуск	2 степень зараженности	20 %	Гост 13586.4
	Зерновая примесь	%	Не более 5.0	2.7	0.01 %	Гост 30483

Контроль правильности по контрольному источнику, параллельные пробы


 Начальник ИЛ
 А.И. Масленникова
 «23» ноября 2007 года
 М.П.

СИСТЕМА АККРЕДИТАЦИИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ
ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ КХА

№801
«23» ноября 2007 года

Испытательная лаборатория по агрохимическому
обслуживанию сельскохозяйственного
производства Федерального государственного
учреждения "Станция агрохимической службы"
"Ульяновская"
432025, г. Ульяновск, ул. Маяковского, д.35
№ РОСС.RU.0001.510251

Предъявитель продукции ПАВЛУШИН А.А.

Наименование продукции: ПШЕНИЦА-УРОЖАЯ 2007 ГОДА/после термической обработки
при 37 °С/

Дата получения образца 22.11.2007 года _____
Дата проведения КХА 22.11.2007 - 23.11.2007 года- _____

Вид испытаний: Показатели физико-химические.
Определения содержания: Соответствие ГОСТ Р 52554-2006.

Техническое задание на проведение испытаний: направление ПАВЛУШИН А.А.
На соответствие требования ГОСТ Р 52554-2006.

Настоящий протокол не может быть скопирован без разрешения
испытательной лаборатории, протокол выдается только на
испытываемый образец

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Наименование образцов номер образца, дата отбора	Наименование показателей	Един. Измерения	Норма По НД	Результаты Испытаний	Погрешность	Методика Испытаний
Пшеница - урожай 2007 года	Сорная примесь, в т.ч. минеральная примесь	%	Н/б 5.0	1.9	20%	Гост 30483
		%	Н/б 0.3	0,00	20%	
После термической обработки при температуре 37 градусов	В числе минер. примеси: галька	%	Не более 1.0	0.00	20%	Гост 30483
	Испорченные зерна	%	Н/б 1.0	0.00	20%	Гост30483
	Фузариозные зерна	%	Н/б 1.0	0.00	20%	Гост30483
	Куколь	%	Н/б 0.5	0.00	20%	Гост 30483
	Трудноотделимая примесь	%	Н/б 1.0			
	вредная примесь	%	Н/б 0.5	0.00	20%	Гост 30483
	в числе вредной примеси спорынья и головня	%	0.05	0.00	20%	Гост 30483
	семена горчача ползучего и т.д. (по совокупности)	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена вязаля разноцветного	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена гелиотропа опушенноплодного	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена триходесмы седой	%	Не допуск	Не обнаруж.	20 %	Гост 30483
	Головневые, маран-ные снегузочные	%	Не более 10.0	0.00	20%	Гост 30483
	Загрязненность Зараженность Вредителями	Экз.	Не допуск	2 степень зараженности	20 %	Гост 13586.4
	Зерновая примесь	%	Не более 5.0	2.7	0.01 %	Гост 30483

Контроль правильности по контрольному источнику, параллельные пробы



СИСТЕМА АККРЕДИТАЦИИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ
ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ КХА

№801
«23» ноября 2007 года

Испытательная лаборатория по агрохимическому
обслуживанию сельскохозяйственного
производства Федерального государственного
учреждения "Станция агрохимической службы"
"Ульяновская"
432025, г. Ульяновск, ул. Маяковского, д.35
№ РОСС.RU.0001.510251

Предъявитель продукции ПАВЛУШИН А.А.

Наименование продукции: ПШЕНИЦА-УРОЖАЯ 2007 ГОДА /после термической обработки
при 60 °С/

Дата получения образца 22.11.2007 года

Дата проведения КХА 22.11.2007 - 23.11.2007 года

Вид испытаний: Показатели физико-химические.

Определения содержания: Соответствие ГОСТ Р 52554-2006.

Техническое задание на проведение испытаний: направление ПАВЛУШИН А.А.

На соответствие требования ГОСТ Р 52554-2006.

Настоящий протокол не может быть скопирован без разрешения
испытательной лаборатории, протокол выдается только на
испытуемый образец

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Наименование образцов номер образца, дата отбора	Наименование Показателей	Един. Измерения	Норма По НД	Результаты Испытаний	Погрешность	Методика Испытаний
Пшеница - урожай 2007 года-	Сорная примесь, в т.ч. минеральная примесь	%	Н/6 5.0	1.9	20%	Гост 30483
		%	Н/6 0.3	0,00	20%	
После термической обработки при температуре 60 градус	В числе минер. Примеси: Галька	%	Не более 1.0	0.00	20%	Гост 30483
		%	Испорченные зерна	0.00	20%	
	Фузариозные зерна	%	Н/6 1.0	0.00	20%	Гост30483
	Куколь Трудноотделимая примесь	%	Н/6 0.5	0.00	20%	Гост 30483
		%	Н/6 1.0			
	Вредная примесь	%	Н/6 0.5	0.00	20%	Гост 30483
	в числе вредной примеси спорынья и головня	%	0.05	0.00	20%	Гост 30483
	семена горчицы ползучего и т.д. (по совокупности)	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена вяза разноцветного	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена гелиотропа опушенноплодного	%	0.1	0.00	20%	Гост 30483
	семена триходесмы седой	%	Не допуск.	Не обнаруж.	20 %	Гост 30483
	Головневые, мараные синегузочные	%	Не более 10.0	0.00	20%	Гост 30483
	Загрязненность Зараженность Вредителями	Экз.	Не допуск	Не обнаружено	20 %	Гост 13586.4
	Зерновая примесь	%	Не более 5.0	2.7	0.01 %	Гост 30483

Контроль правильности по контрольному источнику, параллельные пробы


 Начальник ИД
 А.И. Масленникова
 «23» ноября 2007 года



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

АКТ

производственных испытаний и внедрения устройства для сушки зерна

Настоящим подтверждается, что в ФГУП учебно-опытном хозяйстве «Ульяновской ГСХА» Чердаклинского района Ульяновской области в период с июля по сентябрь 2006 и 2007 г.г. проведены производственные испытания устройства для сушки зерна.

Изготовленное на основе рекомендаций и чертежей представителей ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА» профессора Курдюмова В.И., доцента Карпенко Г.В. и аспиранта Павлушина А.А., устройство для сушки зерна контактного типа включало в себя раму, шнековый рабочий орган, теплообменник, устройство для удаления влаги, загрузочный бункер и выгрузное окно. Теплообменник представляет собой теплоизолированный с наружной стороны кожух цилиндрической формы. Под слоем теплоизоляции размещены три нагревательных элемента, питающиеся от сети переменного тока напряжением 220 В через индивидуальные регуляторы напряжения. Шнековый транспортирующий рабочий орган концентрично расположен внутри кожуха и приводится во вращения от электродвигателя постоянного тока через червячный редуктор и ременные передачи. Частота вращения электродвигателя менялась с помощью регулятора напряжения. Для расширения диапазона изменения частоты вращения шнека применялись сменные шкивы. Витки шнека выполнены перфорированными с диаметром отверстий 2,2 мм. Кожух со стороны выгрузного окна соединен с вентилятором центробежного типа через воздуховод, а противоположная торцевая часть кожуха выполнена перфорированной.

При работе сушилки зерно вовлекается во вращательно-поступательное движение, контактируя с нагретыми электронагревателем поверхностями кожуха и рабочего органа. Выделяющийся пар удаляется из зоны сушки вентилятором. Высушенный продукт выходит из устройства через выгрузное окно.

Сушке подвергались зерно и семена пшеницы и ржи. Температура различных участков кожуха, оснащенных индивидуальными нагревательными

элементами, составляла 40...75 °С. Съем влаги за один проход на оптимальных режимах сушки находился в пределах 2...6 %. При этом затраты теплоты на 1 кг испаренной влаги колебались от 2,4 до 3,4 МДж. Температура семян после окончания процесса сушки составляла 30...45 °С, что полностью соответствовало агротехническим и технологическим требованиям.

Режимы сушки, контролируемые с помощью приборов контроля и органов управления, задавались изменением подаваемого на каждый нагревательный элемент напряжения, изменением положения заслонки вентилятора, а также посредством изменения частоты вращения рабочего органа.

К достоинствам данного устройства для сушки зерна можно отнести: надежность в работе; простоту конструкции; компактность; сравнительно небольшие материальные затраты; удобство обслуживания; качественный равномерный прогрев продукта, достигаемый за счет тонкослойного движения семян; возможность использования для сушки семян других культур.

Применение устройства для сушки зерна в условиях хозяйства оказалось экономически выгодно. Экономия составила 27,5...35 рублей на 1 т высушенного материала.

За период эксплуатации через устройство для сушки было пропущено примерно 12 т семян пшеницы сортов «Кинельская Л 503 «Волжская-100» и «Волжская-К» и 10 т семян ржи «Саратовская 5». При этом снижения посевных качеств семян, отказов и поломок не наблюдалось. По нашему мнению, данная установка может быть рекомендована для использования в условиях сельскохозяйственных предприятий при сушке относительно небольших партий зерна, а также в фермерских хозяйствах и малых перерабатывающих предприятиях.

Директор

Начальник цеха механизации

Главный бухгалтер



« 15 » сентября 2007 г.





А.С. Корабельщиков

Е.В. Шайкин

Л.С. Ханиева

АКТ

производственных испытаний и внедрения устройства для тепловой обработки зерна

Настоящим подтверждается, что в крестьянско-фермерском хозяйстве «Чобанян» Кузоватовского района Ульяновской области в период с января по июнь 2007 года проходило проверку в условиях производства устройство для тепловой обработки зерна.

Изготовленное на основе рекомендаций и чертежей представителей ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА» профессора Курдюмова В.И., доцента Карпенко Г.В. и аспиранта Павлушина А.А. устройство для тепловой обработки зерна контактного типа включало в себя раму, шнековый рабочий орган, теплообменник, устройство для удаления влаги, загрузочный бункер и выгрузное окно. Теплообменник представляет собой теплоизолированный с наружной стороны кожух цилиндрической формы. Под слоем теплоизоляции размещены три нагревательных элемента, питающиеся от сети переменного тока напряжением 220 В через индивидуальные регуляторы напряжения. Шнековый транспортирующий рабочий орган концентрично расположен внутри кожуха и приводится во вращение от электродвигателя постоянного тока через червячный редуктор и ременные передачи. Частота вращения электродвигателя менялась с помощью регулятора напряжения. Для расширения диапазона изменения частоты вращения шнека применялись сменные шкивы. Витки шнека выполнены перфорированными с диаметром отверстий 2,2 мм. Кожух со стороны выгрузного окна соединен с вентилятором центробежного типа через воздуховод, а противоположная торцевая часть кожуха выполнена перфорированной.

При работе устройства зерно вовлекается во вращательно-поступательное движение, контактируя с нагретыми электронагревателем поверхностями кожуха и рабочего органа. Выделяющийся пар удаляется из зоны сушки вентилятором. Высушенный или подвергнутый тепловой обработке продукт выходит из устройства через выгрузное окно.

За период эксплуатации с помощью данного устройства было высушено примерно 60 т зерна ржи и 30 т зерна пшеницы, обеззаражено около 40 т пшеницы и 50 т ячменя.

Температура различных участков кожуха, оснащенных индивидуальными нагревательными элементами, составляла: при сушке - 40...75 °С, а при термообработке - 80...100 °С. Съём влаги за один проход на оптимальных режимах сушки находился в пределах 2...6 %. При этом затраты теплоты на 1 кг испаренной влаги при сушке зерна колебались от 2,4 до 3,4 МДж. Удельные расходы энергии на термическое обеззараживание зерна не превышали 4,4 кВт·ч/т. Температура зерна на выходе из установки не превышала: в режиме сушки - 40 °С, а в режиме термообработки - 60 °С, что соответствовало агротехническим и технологическим требованиям.

К достоинствам данного устройства можно отнести: надежность в работе; простоту конструкции; компактность; удобство обслуживания; качественный равномерный прогрев продукта, достигаемый за счет тонкослойного движения зерна; возможность использования для сушки и термического обеззараживания зерна различных сельскохозяйственных культур. Применение устройства для сушки зерна в условиях фермерского хозяйства оказалось экономически выгодно. Экономия при сушке зерна составила 150 рублей на 1 т высушенного материала, а при термическом обеззараживании - 200 рублей на 1 т зерна.

За время эксплуатации в хозяйстве отказов и поломок устройства не наблюдалось. По нашему мнению, устройство может быть рекомендовано для использования в условиях фермерских хозяйств, малых перерабатывающих предприятий, а также для промышленного изготовления.

Глава фермерского хозяйства

Главный бухгалтер

« 07 » июля 2007 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Исп. директор ООО «Агрофирма АГРОИНВЕСТ»



Н.П. Епанчинов

« 5 » октября 2010 г.

АКТ

внедрения и производственных исследований
устройства для тепловой обработки зерна

Настоящим подтверждается, что в ООО «Агрофирма АГРОИНВЕСТ» Кузоватовского района Ульяновской области в 2010 г. были проведены исследования в производственных условиях устройства для тепловой обработки зерна, изготовленного в соответствии с описанием к патенту РФ № 2371650.

Устройство для тепловой обработки зерна состоит из цилиндрического кожуха, загрузочного бункера, выгрузного окна, соосно установленного внутри кожуха с возможностью вращения транспортирующего рабочего органа, выполненного в виде шнека с перфорированными витками, воздуховода, а также винтовых опор. Внешняя поверхность кожуха покрыта слоем теплоизолирующего материала. Кожух выполнен составным, причём его составные части разделены между собой кольцами, изготовленными из теплоизоляционного материала. Каждая составная часть кожуха снабжена индивидуальным электрическим нагревательным элементом, расположенным под слоем теплоизоляции. Воздуховод установлен перпендикулярно кожуху и соединен с его внутренней полостью между загрузочным бункером и выгрузным окном на одинаковом от них расстоянии. В воздуховоде помещен нагревательный элемент, за которым установлен вентилятор и патрубок с возможностью размещения в нем фильтра. Нагревательные элементы питаются от сети переменного тока напряжением 220 В через индивидуальные регуляторы напряжения. Транспортирующий рабочий орган получает привод от электродвигателя посредством ременной передачи.

При работе устройства зерно поступает в загрузочный бункер и с по-

мощью шнека приобретает вращательно-поступательное движение внутри кожуха. Контактруя с нагретой электрическими нагревателями поверхностью кожуха, а также с горячим воздухом, подаваемым вентилятором, зерно нагревается, обжаривается и выходит из устройства через выгрузное окно.

Предложенное и разработанное сотрудниками ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА» профессором Курдюмовым В.И., доцентом Павлушиным А.А. и аспирантом Зозулей И.Н. устройство для тепловой обработки зерна применялось для обжаривания зерна ячменя, входящего в состав полнорационного комбикорма для поросят-сосунов.

При проведении исследований на оптимальных режимах в обжариваемом зерне превращалось в декстрины до 30 % крахмала, температура обработанного зерна на выходе из устройства составляла 136...148 °С, а удельные затраты теплоты находились в пределах от 33,4 до 35,9 кДж/(кг·°С).

При внедрении предложенного устройства для тепловой обработки зерна в ООО «Агрофирма АГРОИНВЕСТ» экономический эффект составил 8...10 рублей на 1 кг прироста живой массы.

За период эксплуатации предложенного устройства поломки и отказы работы устройства отсутствовали.

Таким образом, производственные исследования показали высокую эффективность и эксплуатационную надежность предложенного устройства для тепловой обработки зерна. Изготовление устройства не сложно и может быть выполнено в ремонтных мастерских сельскохозяйственных предприятий. Результаты исследований позволяют рекомендовать предложенное устройство сельскохозяйственным предприятиям, занимающимся производством свинины.

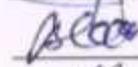
Инженер

Вет. врач

Бухгалтер



В.В. Епанчинов



В.П. Епанчинов



Л.В. Ларионова

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «Ульяновская Нива»

К.Х. Галимуллин

« 29 » сентября 2010 г.

АКТ

внедрения и производственных исследований устройства для тепловой обработки зерна

Настоящим подтверждается, что в ООО «Ульяновская Нива» Чердаклинского района Ульяновской области в 2009 - 2010 г.г. были проведены исследования в производственных условиях устройства для тепловой обработки зерна, изготовленного в соответствии с описанием к патенту РФ № 2371650.

При работе устройства зерно поступает в загрузочный бункер и с помощью шнека приобретает вращательно-поступательное движение внутри кожуха. Контактная с нагретой электрическими нагревателями поверхностью кожуха, а также с горячим воздухом, подаваемым вентилятором, зерно нагревается и теряет излишки влаги. Выделяющийся пар удаляется из устройства вместе с отработавшим воздухом, а высушенное зерно выходит из устройства через выгрузное окно.

Предложенное и разработанное сотрудниками ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА» профессором Курдюмовым В.И., доцентом Павлушиным А.А. и аспирантом Зозулей И.Н. устройство для тепловой обработки зерна применялось для сушки зерна пшеницы и ячменя, используемого в дальнейшем в качестве семенного материала.

При проведении исследований по сушке зерна предлагаемое устройство входило в состав технологической линии послеуборочной обработки зерна, включающей приемную яму, норию зерновую НПК-20, зерноочистительные машины «ПЕТКУС» К-527 и К-531А, спирально-винтовой погрузчик зерна, устройство для сушки зерна, погрузчик зерна КШП.

Средняя температура поверхности кожуха при сушке зерна варьировалась в пределах 50...55 °С, время – 85...90 с, скорость движения воздуха – 1,6...1,8 м/с, температура воздуха – 20...25 °С. При этом на оптимальных режимах разовый влагосъем составлял 2...3 %, температура обработанного зерна на выходе из устройства составляла 35...40 °С, что полностью удовлетворяет агротехническим и технологическим требованиям, а удельные затраты находились в пределах от 3,7 до 4,3 МДж/кг_{влаги}.

При внедрении предложенного устройства для тепловой обработки зерна в ООО «Ульяновская Нива» экономия эксплуатационных затрат составила 140...160 рублей на 1 тонну высушенного зерна.

За период эксплуатации предложенного устройства было обработано примерно 10 т зерна пшеницы «Казанская 560» и 15 т зерна ячменя «Раушан». При этом снижения качества высушенного зерна, а также поломок и отказов работы устройства не наблюдалось.

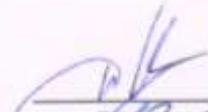
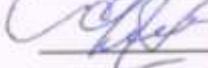
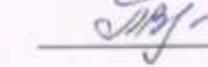
Таким образом, производственные исследования показали высокую эффективность и эксплуатационную надежность предложенного устройства для тепловой обработки зерна. Изготовление устройства не сложно и может быть выполнено в ремонтных мастерских сельскохозяйственных предприятий. Результаты исследований позволяют рекомендовать предложенное устройство сельскохозяйственным предприятиям, фермерским хозяйствам, а также мелким перерабатывающим предприятиям.

Гл. агроном

Гл. инженер

Главный бухгалтер



 И.Ф. Сафин
 В.А. Степанов
 М.В. Водолазова

«УТВЕРЖДАЮ»

Исп. директор ООО «Агрофирма Агроинвест»

 Епанчинов Н.П.

«14» сентября 2011 г.

АКТ

внедрения и производственных исследований
установки для тепловой обработки зерна

Настоящим подтверждается, что в ООО «Агрофирма Агроинвест» Кузоватовского района Ульяновской области в августе 2010 и 2011 г.г. были проведены исследования в производственных условиях установки для тепловой обработки зерна, изготовленной в соответствии с описанием к патенту РФ № 2411432.

При работе установки зерно поступает в загрузочный бункер и с помощью скребкового транспортера перемещается по греющей пластине к выгрузному окну. Контактруя с нагретой электрическими нагревателями поверхностью пластины, а также горячим воздухом, подаваемым вентилятором, зерно нагревается, теряя излишки влаги. Выделяющийся пар удаляется из установки вместе с отработавшим воздухом, а высушенное зерно выходит через выгрузное окно.

Предложенную и разработанную сотрудниками ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА» профессором Курдюмовым В.И., доцентом Павлушиным А.А. и аспирантом Сутягиным С.А. установку для тепловой обработки зерна применяли для сушки зерна пшеницы и овса, предназначенного в дальнейшем для использования в качестве семенного материала.

При проведении исследований по сушке зерна предлагаемая установка входила в состав технологической линии послеуборочной обработки зерна, включающей приемную яму, норию зерновую Е-10, зерноочистительные машины ЗАВ-10, спирально-винтовой погрузчик зерна, установку для сушки зерна.

Средняя температура греющей поверхности при сушке зерна находилась в пределах 65...75 °С, время сушки - 35...40 с, скорость движения воздуха - 5...6 м/с, температура воздуха - 20...25 °С. При этом на оптимальных режимах влажность снижалась на 2,7...3 %, температура зерна на выходе из установки составляла 35...39 °С, что полностью удовлетворяет агротехническим и технологическим требованиям, а удельные затраты находились в пределах 3,6...3,9 МДж/кг_{влаги}.

При внедрении предложенной установки для сушки зерна в ООО «Агрофирма Агроинвест» экономия эксплуатационных затрат составила 268 рублей на 1 тонну высушенного зерна.

За период эксплуатации предложенной установки было обработано примерно 30 т зерна пшеницы «Казанская 560» и 25 т зерна овса сорта «Скакун». При этом качество высушенного зерна не снижалось, а поломки и отказы при работе установки отсутствовали.

Также часть зерна, с исходной второй степенью зараженности, подвергали тепловой обработке на следующих режимах: температура греющей поверхности - 80 °С, время нахождения зерна в установке - 180 с. После тепловой обработки погибли все вредители, а удельные затраты энергии на обработку не превысили 4,1 кВт·ч/т зернового материала.

Таким образом, производственные исследования показали высокую эффективность и эксплуатационную надежность предложенной установки для тепловой обработки зерна. Результаты исследований позволяют рекомендовать предложенную установку сельскохозяйственным, перерабатывающим предприятиям и фермерским хозяйствам.

Гл. инженер ООО «Агрофирма Агроинвест»

Гл. бухгалтер ООО «Агрофирма Агроинвест»

Представитель УГСХА

д.т.н., профессор



Епанчинов В.В./

/Ларионова Л.В./

/Курдюмов В.И./

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
ООО «Поволжская МИС»
Беляев В.Е. /
«05» 2011 г.



АКТ
внедрения научно-технической разработки

Мы, нижеподписавшиеся, представители ООО «Поволжская МИС» в лице директора Беляева Виктора Евгеньевича и агронома Маркова Александра Николаевича, а также авторы научно-технической разработки, сотрудники ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА» профессор Курдюмов В.И. и доцент Павлушин А.А. настоящим актом подтверждаем, что в сентябре 2011 г. в ООО «Поволжская МИС», были проведены исследования в производственных условиях установки для тепловой обработки зерна, изготовленной в соответствии с описанием к патенту РФ № 2411432.

При проведении исследований предлагаемая установка входила в состав технологической линии послеуборочной обработки зерна.

Исследования проведены на тепловой дезинсекции зерна, с исходной второй степенью зараженности. Зерно подвергали тепловой обработке на следующих режимах: температура греющей поверхности – 80 °С, время экспозиции - 180 с. После тепловой обработки живых вредителей не обнаружено, а удельные затраты энергии на обработку составили 4,1 кВт ч/т зернового материала.

За период исследований установки в производственных условиях было обработано 20 т зерна пшеницы «Поволжская 86». Поломки и отказы установки для тепловой обработки зерна отсутствовали.

Исследования установки для тепловой обработки зерна в производственных условиях подтвердили ее эффективность. Применение установки в режиме термического обеззараживания позволяет полностью уничтожить вредителей зерна при исходной второй степени его зараженности.

Данная установка может быть рекомендована для сушки зерна, подготовки его к размолу, термической дезинсекции зерна в условиях крестьянских (фермерских), личных подсобных хозяйств и малых перерабатывающих предприятий.

Генеральный директор ООО «Поволжская МИС»
канд. техн. наук,

 /Беляев В.Е./

Агроном ООО «Поволжская МИС»

 /Марков А.Н./

Профессор ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА»
доктор техн. наук,

 /Курдюмов В.И./

Доцент ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА»
канд. техн. наук,

 /Павлушин А.А./

«УТВЕРЖДАЮ»

председатель ЗАО «Северный ключ»

Денщикова С.И./

2012 г.



внедрения и производственных исследований устройства
для тепловой обработки зерна

Настоящим подтверждается, что в Закрытом акционерном обществе «Северный ключ», расположенном в с. Савруха, Похвистневском районе Самарской области в 2011 - 2012 г.г. были проведены исследования в производственных условиях устройства для тепловой обработки зерна, изготовленного в соответствии с описанием к патенту РФ № 2371650.

Устройство для тепловой обработки зерна состоит из цилиндрического кожуха, загрузочного бункера, выгрузного окна, соосно установленного внутри кожуха с возможностью вращения транспортирующего рабочего органа, выполненного в виде шнека с перфорированными витками, воздуховода, а также винтовых опор. Внешняя поверхность кожуха покрыта слоем теплоизолирующего материала. Кожух выполнен составным, причём его составные части разделены между собой кольцами, изготовленными из теплоизоляционного материала. Каждая составная часть кожуха снабжена индивидуальным электрическим нагревательным элементом, расположенным под слоем теплоизоляции. Воздуховод установлен перпендикулярно кожуху и соединен с его внутренней полостью между загрузочным бункером и выгрузным окном на одинаковом от них расстоянии. В воздуховоде помещен нагревательный элемент, за которым установлен вентилятор и патрубок с возможностью размещения в нем фильтра. Нагревательные элементы питаются от сети переменного тока напряжением 220 В через индивидуальные регуляторы напряжения. Транспортирующий рабочий орган получает привод от электродвигателя посредством ременной передачи. При работе устройства зерно

поступает в загрузочный бункер и с помощью шнека приобретает вращательно-поступательное движение внутри кожуха. Контактруя с нагретой электрическими нагревателями поверхностью кожуха, а также с горячим воздухом, подаваемым вентилятором, зерно нагревается, обжаривается и выходит из устройства через выгрузное окно.

Предложенное и разработанное сотрудниками ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина» профессором Курдюмовым В.И. и доцентом Павлушиным А.А. устройство для тепловой обработки зерна применяли для обжаривания зерна ячменя, входящего в состав полнорационного комбикорма для поросят-сосунов.

При проведении исследований на оптимальных режимах в обжариваемом зерне превращалось в декстрины до 30 % крахмала, температура обработанного зерна на выходе из устройства составляла 136...148 °С, а удельные затраты теплоты находились в пределах от 33,4 до 35,9 кДж/(кг·°С).

При внедрении предложенного устройства для тепловой обработки зерна экономический эффект превысил 10 рублей на 1 кг прироста живой массы. За период эксплуатации предложенного устройства поломки и отказы работы устройства отсутствовали.

Таким образом, производственные исследования показали высокую эффективность и эксплуатационную надежность предложенного устройства для тепловой обработки зерна. Изготовление устройства не сложно и может быть выполнено в ремонтных мастерских сельскохозяйственных предприятий. Результаты исследований позволяют рекомендовать предложенное устройство сельскохозяйственным предприятиям, занимающимся производством свинины.

Главный бухгалтер

Главный зоотехник

 /Крестовникова Т.В./
 /Крестовников А.А./

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «МИП «Академия-Био»


Р.И. Александров/
«30»  2012 г.



АКТ

внедрения и производственных исследований устройства
для тепловой обработки зерна

Настоящим подтверждается, что в Малом инновационном предприятии «Академия-Био» (юр. адрес: 428003, Чувашская республика, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 29, каб. 227, тел. 8(8352)62-03-26) в 2010...2012 г.г. были проведены исследования в производственных условиях устройства для тепловой обработки зерна, изготовленного в соответствии с описанием к патенту РФ № 2371650.

При работе устройства зерно поступает в загрузочный бункер и с помощью шнека приобретает вращательно-поступательное движение внутри кожуха. Контактруя с нагретой электрическими нагревателями поверхностью кожуха, а также с горячим воздухом, подаваемым вентилятором, зерно нагревается и теряет излишки влаги. Выделяющийся пар удаляется из устройства вместе с отработавшим воздухом, а высушенное зерно выходит из устройства через выгрузное окно.

Предложенное и разработанное сотрудниками ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина» профессором Курдюмовым В.И. и доцентом Павлушиным А.А. устройство для тепловой обработки зерна применяли для сушки зерна пшеницы и ячменя.

При проведении исследований по сушке зерна предлагаемое устройство входило в состав технологической линии послеуборочной обработки зерна

Средняя температура поверхности кожуха при сушке зерна варьировалась в пределах 50...55 °С, время - 85...90 с, скорость движения

воздуха - 2,6...3,8 м/с, температура воздуха - 20...25 °С. При этом на оптимальных режимах разовый влагосъем составлял 2...3 %, температура обработанного зерна на выходе из устройства составляла 35...40 °С, что полностью удовлетворяет агротехническим и технологическим требованиям, а удельные затраты находились в пределах от 3,7 до 4,3 МДж/кг влаги.

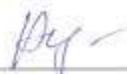
При внедрении предложенного устройства для тепловой обработки зерна в ООО «Академия-Био» экономия эксплуатационных затрат превысила 160 рублей на 1 тонну высушенного зерна.

За период эксплуатации предложенного устройства было обработано примерно 20 т зерна пшеницы «Волжская 100» и 15 т зерна ячменя «Раушан». При этом снижения качества высушенного зерна, а также поломок и отказов работы устройства не наблюдалось.

Таким образом, производственные исследования показали высокую эффективность и эксплуатационную надежность предложенного устройства для тепловой обработки зерна.

Изготовление устройства не сложно и может быть выполнено в ремонтных мастерских сельскохозяйственных предприятий. Результаты исследований позволяют рекомендовать предложенное устройство сельскохозяйственным предприятиям, фермерским хозяйствам, а также мелким перерабатывающим предприятиям.

Исполнительный директор

 /Руссу Н.В./

Бухгалтер

 /Базякова А.В./

Курдюмов Владимир Иванович
Павлушин Андрей Александрович
Карпенко Галина Владимировна
Сутягин Сергей Алексеевич

**ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА
В УСТАНОВКАХ КОНТАКТНОГО ТИПА**

Монография

Ульяновск, ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА
им. П.А. Столыпина», 2013, 290 с.

Подписано в печать _____

Бумага типографская. Печать офсетная.

Формат 60 x 84 1/16. Усл. печ. л. 18,1

Тираж 500 экземпляров. Заказ № _____

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1