

**МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ ВОЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИМ.ГЕНЕРАЛА АРМИИ А.В.ХРУЛЕВА»**

На правах рукописи

ЮХНИК Иван Петрович

**НАУКА И ПРАКТИКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗЕРНОВОГО СЫРЬЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ
ЕГО ПОДГОТОВКИ И ПЕРЕРАБОТКИ В ПИЩЕВЫЕ ПРОДУКТЫ**

Специальность 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
Романчиков С.А.

Санкт-Петербург – 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНОВОГО СЫРЬЯ В ПИЩЕВУЮ ПРОДУКЦИЮ	11
1.1 Технологии и оборудование обеспечения максимальной сохранности зерновых.....	11
1.2. Особенности процесса активного вентилирования зерна	19
1.3. Технологии и оборудование для переработки некондиционного зерна	35
Выводы по главе и постановка задач исследования	409
Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛО-МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ ЗЕРНА	431
2.1. Математическая модель тепло-массообменных процессов сушки зерна....	431
2.1.1. Анализ характера особенностей теплообмена в дискретной насыпи пищевого продукта	431
2.1.2. Исследование тепло- и массопереноса в насыпях пищевого сырья при наличии очагов самосогревания.....	497
2.2. Особенности кинематики перемещения зерна в процессе вентилирования	586
2.3. Моделирование механических нагрузок элементов оборудования для сушки зерна активным вентилированием	6062
2.3.1. Конструктивные особенности и нагрузки на лопасти ворошителей для активного вентилирования зерна	60
2.3.2. Моделирование особенности нагруженности вала ворошителя зернохранилища при активном вентилировании	674
2.4. Моделирование средств обеспечения необходимых параметров процесса теплоснабжения активного вентилирования	708
2.5. Предпосылки необходимости переработки некондиционного зерна	71
Выводы по главе	73
Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНОВЫХ	75
3.1. Идентификация параметров модели отвечающих за несанкционированные величины температуры в хранилище	75
3.2. Методические особенности исследования тепло-массообменных процессов при активном вентилировании зернохранилищ	88

3.3. Экспериментальные исследования эффективности активного вентилирования	90
3.3.1. Особенности проведения пассивного эксперимента по активному вентилированию	90
3.3.2. Сбор и обработка полученных экспериментальных данных	95
3.3.3. Построение и анализ регрессионных зависимостей	101
3.4. Экспериментальные исследования энергообеспечения оборудования сушки.....	109
3.5. Возможности производства модифицированных крахмалов из некондиционного зернового сырья.....	113
3.5.1. Возможности совершенствования традиционных производств модифицированных крахмалов	113
3.5.2. Возможности комбинированного производства модифицированных крахмалов.....	121
Выводы по главе	128
Глава 4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	129
4.1. Рекомендации по конструированию зернохранилищ со шнековыми ворошителями	129
4.2. Рациональные параметры реализации процессов активного вентилирования зерна и осуществляющего их оборудования	132
4.3. Перспективы применения и совершенствования устройств для изготовления модифицированных крахмалов	136
Выводы по главе	141
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	142
ЛИТЕРАТУРА.....	144
ПРИЛОЖЕНИЯ	158

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Продовольственная безопасность Российской Федерации, особенно в условиях экономических санкций, требует всемерного развития производства продуктов питания, в том числе импортозамещающих. С этой целью Правительством РФ сформулированы перечни инновационных критических технологий и приоритетных направлений развития научно-технологического комплекса Российской Федерации на период до 2020 года, включающие в качестве первостепенных мер развитие технологий биоинженерии и рациональное природопользование. Безусловным первенством в реализации этих направлений в области развития пищевых производств является переработка такого доступного отечественного сырья как зерновые.

С одной стороны при решении затронутой проблемы, в настоящее время одной из наиболее важных задач, стоящих в области производства полноценных продуктов питания является обеспечение перерабатывающих предприятий высококачественным сырьем. Как следствие этого весьма актуально решение проблемы послеуборочной обработки и хранения зерна. Современное оборудование для этих целей не всегда удовлетворяет потребностям производителей, осуществляющих дальнейшую переработку зерновых, поэтому особую актуальность приобретает вопрос возможных конструктивных изменений зернохранилищ различного типа и предложения по рациональным технологиям их эксплуатации.

Увеличение объемов зерна, производимых на территории Российской Федерации, позволит увеличить обеспеченность населения страны важнейшим продовольственным ресурсом, что, в свою очередь, положительно скажется на продовольственной безопасности государства. Как свидетельствуют статистические данные, предоставляемые Министерством сельского хозяйства Российской Федерации, в большинстве субъектов Федерации порядка 55-60% участков земли, используемых для выращивания различных культур, отдается под производство зернобобовых и зерновых. Здесь необходимо отметить, что

деятельность по выращиванию зерновых и зернобобовых (как и иных растительных культур), характеризуется ярко выраженным фактором сезонности. Получение урожая возможно только в строго определенное время года, в связи с чем следует создавать мощности, обеспечивающие долговременное хранение собранного в теплое время года зерна. Поддержание зерновых культур в состоянии, пригодном для применения в пищевом производстве, требует удаления из них излишней влаги. С этой целью в хранилищах, где производится долговременное размещение зерна, используется специальное оборудование. Актуальность его применения является особенно высокой в тех регионах, где зерно, убираемое с полей, в силу различных причин характеризуется увеличенной влажностью.

На количество влаги, содержащейся в зерне, которое закладывается на хранение, влияет большое количество факторов. К ним можно отнести степень прогрева воздуха в хранилище, его влажность, качество зерна, соблюдение технологических параметров процесса сушки. От того, насколько правильно организован процесс просушивания зерна, зависит себестоимость производства хлебопекарной продукции, а значит, и конечная цена для потребителя.

Отметим, что сегодня инфраструктура, обеспечивающая долговременное хранение зерен различных культур, характеризуется неудовлетворительным состоянием. Одной из причин здесь является то, что существуют противоречия между показателями экономической эффективности эксплуатации хранилищ и показателями качества размещаемой в них продукции. Иными словами, если производитель начинает необоснованно экономить на хранении зерна, не соблюдая требуемые режимы, то качество зерна ухудшается, значительная его часть становится некондиционной. Противоречия, упомянутые выше, могут носить технологический или эксплуатационный характер.

Так, при проектировании некоторых хранилищ допускаются ошибки, которые связаны с некорректным определением параметров отверстий, используемых для помещения зерна в хранилище и его удаления оттуда. В этом

случае пропускная способность склада существенно снижается, из-за чего экономическая эффективность хранения зерна становится ниже.

Потребность производителей зерна в максимально эффективном использовании всего собираемого урожая приводит к тому, что компании, выпускающие зерно, стремятся применить в производстве в том числе и некондиционное зерно. Оно, в частности, может быть применено в производстве модифицированного крахмала. Для этого некондиционное зерно подвергается биохимическому воздействию, вследствие которого происходит дегградация полисахаридов. Из-за этого зерно теряет свою структуру, а после завершения реакции появляются новые химические вещества с уникальными свойствами, применимыми в производстве пищевой продукции. В частности, происходит изменение структуры полисахаридов, что приводит к появлению гидроксильных крахмальных групп. Они вовлекаются во взаимодействие с иными соединениями, после чего появляются эфиры, а сами полисахариды полимеризуются. Таким образом, появляются крахмалы, имеющие модифицированную структуру. Сфера их применения является очень широкой. Во-первых, устойчивый спрос на модифицированные крахмалы демонстрируют предприятия пищевой промышленности, которым они необходимы в качестве сырья для выпуска разнообразных сладостей. Отметим также, что модифицированные крахмалы активно задействуются в производстве текстиля: его добавление помогает сделать характеристики тканей улучшенными.

Отметим, что сегодня в науке отсутствует теория, которая давала бы полное представление о связи факторов, влияющих на качество использования зерновых в производственной деятельности (не только пищевой, но и текстильной). Кроме этого, нет и удовлетворительного модельного описания отдельных этапов подготовки и ресурсосберегающей переработки этого важнейшего вида сельскохозяйственного сырья в пищевую продукцию.

Степень разработанности темы. Научные и практические основы хранения зерна и его сушки представлены в работах учёных Резчикова В.А., Сашина Б.С., Семенова В.Ф., Стародубцевой А.И., Кретова И.Т., Острикова А.Н.,

Шевцова А.А., Трисвятского Л.А. и многих других. Вопросы активного вентилирования раскрыты в работах ученых Журавлева, А.П., Цугленка Н.В., Манасяна С.К., Mitall G.S., Lapp H.M., Townsend J.S. и др. Проблемы глубокой биотехнологической переработки зерна, в том числе некондиционного, в разное время активно занимались Жушман А. И., Литвяк В.В., Юркштович С.М., Бутрим В.В., Потороко И.В. и др.

Необходимо отметить недостаточность результатов исследований о конструктивных особенностях зернохранилищ активного вентилирования и оборудования для переработки некондиционного зерна в модифицированные крахмалы.

Цель работы: повышение эффективности сохранности зерна за счет модернизации систем активного вентилирования хранилищ и решения вопросов совершенствования оборудования для ресурсосберегающей переработки некондиционной части в пищевые продукты, в частности модифицированные крахмалы.

Научная задача – разработка концепции и средств, обеспечивающих ресурсосбережение при хранении, подготовки зернового сырья и его переработки в продукты питания в рамках рационального природопользования, как одного из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации.

Объект исследований. Система процессов и аппаратов, обеспечивающих подготовку и ресурсосберегающую переработку зернового сырья в пищевую продукцию.

Предмет исследования. Закономерности изменения полей влажности и температуры зерна, в их взаимозависимости с конструктивными особенностями узлов устройств многоцелевого назначения для повышения сохранности зерна и характерные особенности оборудования для ресурсосберегающей переработки некондиционного зерна.

Границы исследования охватывают разработку процессов и аппаратов, используемых в мукомольных и пищевых производствах, а также смежных отраслях промышленности по производству продуктов питания, в том числе, в

рамках критических технологий Российской Федерации, в частности технологий биоинженерии.

Методы исследования. В рамках настоящей работы преимущественно используются методы, относящиеся к области математического моделирования. Такие применены методы статистического анализа, а также различные способы организации исследовательской деятельности.

Научная новизна.

1. Сформирована математическая модель, которая позволяет рассчитывать оптимальные характеристики процесса просушивания зерна, закладываемого на хранение в склады.

2. Определена методика, в соответствии с которой осуществляется идентификация показателей математической модели для оборудования бункерного типа.

3. Определены технические решения, реализация которых позволит обеспечить надлежащий режим нагнетания воздуха оборудованием бункерного типа.

4. Предложены конструктивные решения устройств для повышения эффективности переработки некондиционного зерна в модифицированные крахмалы.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что впервые на основе системного подхода идентифицированы параметры технологических процессов подготовки (хранения) зерна для перехода к его глубокой переработке минимизирующей его безвозвратные потери.

Практическую значимость работы составляют:

1. Модернизированная конструкция системы воздухораспределения;

2. Методики расчета конструктивных элементов бункерных сушильно-вентиляционных установок;

3. Практические рекомендации по совершенствованию зернохранилищ активного вентилирования для многоцелевого назначения;

4. Конструкции устройств для получения модифицированных крахмалов.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты анализа современного состояния использования зерновых свидетельствующие о целесообразности разработки средств повышения эффективности сохранности зерна путем модернизации систем активного вентилирования хранилищ и решение вопросов совершенствования оборудования для ресурсосберегающей переработки остающейся его некондиционной части в пищевые продукты, в частности модифицированные крахмалы.

2. Математическая модель, определяющая параметры процесса удаления влаги из зерна, обеспечиваемого оборудованием бункерного вида;

3. Методика идентификации параметров разработанной модели для бункерных установок с различными воздухораспределительными системами;

4. Регрессионная модель влияния эксплуатационных параметров хранения зерна, таких как влажность и скважность на количество появляющегося некондиционного зерна;

5. Рекомендации, реализация которых направлена на повышение качества вентилирования, осуществляемого в хранилищах зерна.

6. Технологическое устройство различных видов оборудования, предназначенного для получения крахмалов модифицированного типа.

Применение результатов исследований. Результаты, которые получены при проведении исследования, апробированы на мощностях ООО «Проектинтертехника» (Санкт-Петербург, акт внедрения от 23.09.2020 г.) и в учебно-методическом процессе НИУ ИТМО.

Апробация работы. Результаты исследований были обсуждены на Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (г. Воронеж, 11–13 ноября 2019 г.); I Международной научно-практической конференция «Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции», (г. Саратов, 12–13 марта 2020 г.); VIII Международной научно-практической конференции ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АПК:

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА (МК-10-20), (г. Пенза, март, 2020 г.); V международной научно-практической конференции: «Глобальная экономика в XXI веке: роль биотехнологий и цифровых технологий» – International Scientific and Practical Conference: «Global Economy in the XXI century: the role of biotechnology and digital technology» (Москва, 15–16 июля 2020 года); VII международной конференции: «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (г. Казань 30–31 июля 2020 года), и университетских конференциях научно-преподавательского коллектива сотрудников ИТМО.

Публикации. В процессе проведения исследования было создано 16 научных работ. При этом одна из них была опубликована в издании, индексируемом базой Scopus. Еще шесть научных статей были размещены в изданиях, имеющих аккредитацию от ВАК РФ. Кроме этого, в процессе проведения исследования было получено два патента, один из которых описывает изобретение, а другой – полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация образована введением, четырьмя содержательными главами, заключением, перечнем использованных источников, а также приложением. Работа изложена на 164 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 18 таблиц. Список литературы включает 144 наименования, в том числе 20 зарубежных.

Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНОВОГО СЫРЬЯ В ПИЩЕВУЮ ПРОДУКЦИЮ

1.1 Технологии и оборудование обеспечения максимальной сохранности зерновых

Роль зерновых в питании человека переоценить трудно. Это обстоятельство ведет к неустанным поискам специалистами, как дальнейшего увеличения производства этого важного вида сельскохозяйственного сырья, так и возможностей его максимального сохранения без потери ценных свойств, вплоть до его переработки в продукты питания.

Среди всех зерновых главенствующее место занимает пшеница. По данным Росстата, в 2019 году урожайность пшеницы в России составила 26,6 центнера с гектара убранной площади (ц/га). В 2018 г. этот показатель составлял 25,4 ц/га, а в 2017 г. – 29,2 ц/га. Лидерами в 2019 году по урожайности пшеницы стали: Египет (6,4 т/га), страны ЕС (5,9 т/га), Китай (5,5 т/га). Примерно 46% мирового производства пшеницы приходится на тройку стран – Россия, Индия, Китай.

В 2012 году доля пшеницы на отечественном рынке зерновых культур составляла 44%.

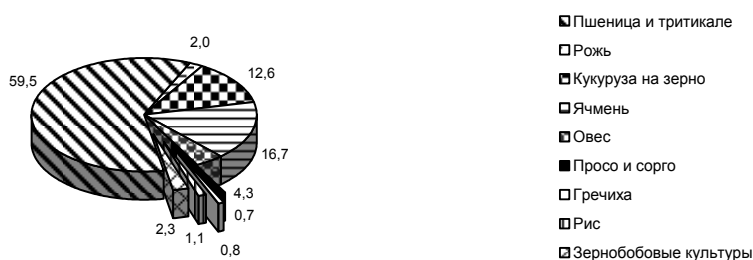


Рисунок 1.1 – Структура произведенных зерновых в РФ в 2019 году



Рисунок 1.2 – Пирамида здорового питания

Хлебные зерновые культуры (рис, пшеница, кукуруза, овес, ячмень, рожь, просо, амарант, гречиха и др.) относятся к семейству злаков. Согласно классификации, принятой в России, хлебные зерновые культуры делятся на четыре вида – крупяные, зерновые, зернокармливые и зернофуражные.

Зерно богато на углеводы, которые представлены преимущественно полисахаридами. На сухое вещество приходится от 60% до 80% углеводов. Содержание белка в зерне – от 7% до 20%. Из витаминов в зерне хлебных злаков содержатся витамины группы Е, В, РР и А. Зерно хлебных зерновых культур богато различными ферментами (липаза, амилаза, протеолитические ферменты, пероксидаза).

Из зерна хлебных зерновых культур производят крупу, муку, корма для животных [1].

Указанные соображения подтверждаются статистикой потребления хлебобулочной продукции в различных регионах Российской Федерации.

Таблица 1.1 – Статистика динамики потребления хлебопродуктов

Наименование субъекта РФ	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Архангельская обл.	109	109	109	107	106	107
Брянская обл.	112	111	113	114	107	110
Белгородская обл.	137	136	138	139	139	141
Вологодская обл.	125	124	121	112	108	109
Воронежская обл.	142	138	136	137	137	135
Владимирская обл.	115	118	118	117	116	117
Ивановская обл.	113	112	111	111	110	107
Калининградская обл.	108	108	107	106	107	106
Республика Карелия	116	116	116	116	118	119
Курская обл.	144	142	143	146	146	146
Костромская обл.	101	102	102	102	101	102

Калужская обл.	109	108	107	110	110	110
Республика Коми	116	116	116	110	110	110
Ленинградская обл.	117	116	117	116	113	114
Липецкая обл.	143	142	143	144	144	144
Мурманская обл.	96	95	94	88	84	83
Московская обл.	117	117	118	121	123	122
Москва	108	107	109	109	112	110
Новгородская обл.	115	113	114	115	113	112
Орловская обл.	113	109	108	110	111	113
Псковская обл.	108	103	103	100	96	95
Рязанская обл.	119	119	117	117	116	116
Санкт-Петербург	87	87	87	88	87	88
Смоленская обл.	120	119	121	125	123	122
Тульская обл.	104	102	103	102	105	105
Тверская обл.	134	135	131	129	130	133
Тамбовская обл.	157	155	154	155	154	155
Ярославская обл.	105	100	100	100	99	95
<i>Северо-Западный ФО</i>	<i>104</i>	<i>103</i>	<i>103</i>	<i>101</i>	<i>99</i>	<i>100</i>
<i>Центр. федеральный округ (ЦФО)</i>	<i>118</i>	<i>117</i>	<i>118</i>	<i>119</i>	<i>120</i>	<i>119</i>
<i>Российская Федерация</i>	<i>119</i>	<i>119</i>	<i>119</i>	<i>118</i>	<i>118</i>	<i>117</i>

Химический состав зерна, как и любого живого организма, довольно сложен. Важной частью зерна хлебных зерновых культур являются азотистые вещества, основную массу которых составляют белки (клейковина). Содержание сырой клейковины у пшеницы находится в диапазоне от 16% до 52%. На химический состав и пищевую ценность зерна влияет среда, климат, характеристики почвы. Иногда урожай оказывается непригоден для использования его в пищевых и кормовых целях. Такое происходит, например, при нашествии вредителей или заражении фитопатогенными грибными заболеваниями, такими как фузариоз, пиренофороз, мучнистая роса, чернь колоса, септориоз, стеблевая и бурая ржавчина. Потери урожая могут достигать 20-70%. Для предупреждения негативных последствий предпринимаются специальные меры и мероприятия, в т. ч. послеуборочная обработка зерна.

Под послеуборочной обработкой зерна подразумевается этап зернопроизводства, включающий очистку зернового вороха и его сушку. Иногда предусматривается и вентилирование зерновой массы. Очистка необходима для очищения зерновой массы от различных примесей, а сушка – для снижения уровня влажности зерна. Выполняется послеуборочная обработка зерна на

специальных зерноочистительных комплексах. Ее цель – привести зерновую массу в состояние, стойкое для хранения. Главная задача при этом заключается в обеспечении сохранности качества зерна [9-11].

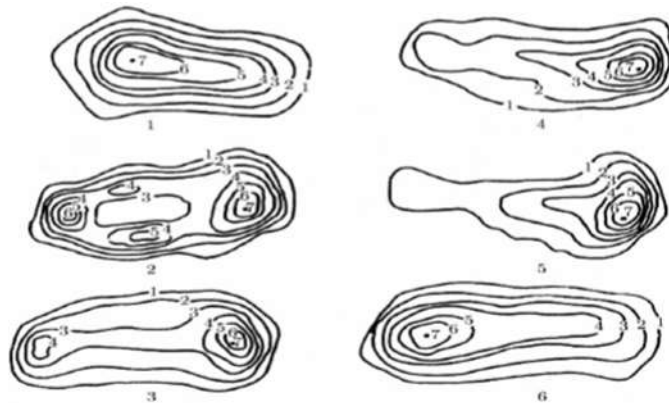


Рисунок 1.3 – Динамика изменения распределения влажности в зерновке в зависимости от стадии созревания [3]:

1 – на 14-е сутки цветения; 2 – на 19-е сутки цветения; 3 – на 27 сутки цветения; 4 – на 32 сутки цветения; 5 – на 36 сутки цветения; 6 – на 39 сутки цветения (после обильных осадков)

При активном вентилировании обеспечивается ликвидация самосогревания зерна; ускорение биохимических и физиологических процессов при послеуборочном дозревании; исключение травмирования зерна; снижение затрат на послеуборочную обработку и хранение зерновой массы; сокращение потребности в навесах, площадках, складских емкостях для зерна; исключение загрязненности зерна канцерогенными веществами, которые образуются при неполном сгорании топлива в зерносушилках.

Вентилирование необходимо для того, чтобы сохранить качество собранного урожая. Эта технология активно используется в странах с развитым аграрным сектором (например, в Австралии, Канаде, Соединенных Штатах).

При вентилировании зерно или увлажняется, или подсыхает. Это зависит от исходной влажности зерновой массы. Использование технологии активного вентилирования способствует обновлению газового состава воздуха в семенах, снижению энергетической емкости процесса и повышению качества зерна. К тому же, для реализации приема нет необходимости в серьезных инвестициях и приобретении сложного оснащения.

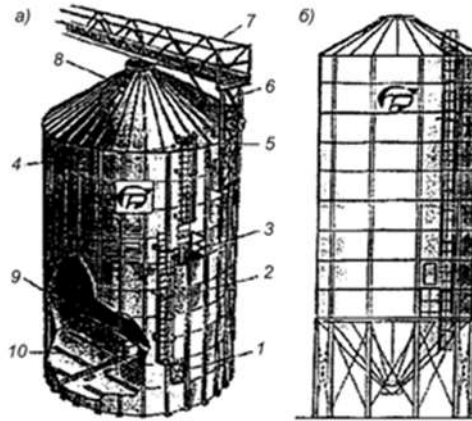


Рисунок 1.4 – Зернохранилища итальянской фирмы Frame вентилируемые:
плоское дно (а); конусное дно (б):

1 – вход; 2 – лестница; 3 – промежуточное пространство/площадка; 4 – датчик уровня;
5 – смотровые отверстия; 6 – опоры; 7 – арматура для транспорта; 8 – датчики контроля температуры; 9 – выгрузной шнек; 10 – решетка вентилирования

Достигаемая, таким образом, интенсификация процесса подготовки зерна сокращает энергетические затраты на сушку.

На рисунке 1.4 показаны зернохранилища вентилируемые. Один вариант зернохранилища имеет плоское дно, второй – конусное. Показанные варианты зернохранилища – универсальная и экономически выгодная форма хранения зерна.

Зернохранилища имеют герметичный корпус, производятся из высокопрочной и высококачественной стали. Производители гарантируют защиту зерна от грызунов, птиц, атмосферных осадков. Герметичность конструкции гарантируется использованием для соединения элементов зернохранилища специальных болтов с уплотняющими шайбами. Для эффективной эксплуатации зернохранилища укомплектованы уровневыми датчиками, системой термометрии и аспирации.

Для своевременного обслуживания зернохранилища оснащены транспортными галереями, площадками и лестницами. Благодаря системе термометрии и системе контроля уровня зерновой массы обеспечивается возможность мониторинга температуры на определенных отметках хранилища.

В представленных зернохранилищах предусмотрена система активной вентиляции, состоящая из кровельных вентиляторов или дефлекторов, перфорированных панелей пола и нагнетающих вентиляторов.

Конструкция с конусным дном расположена на подставке из металлоконструкций, которые смонтированы при помощи специальных болтовых соединений. Загрузка материала на хранение происходит таким же образом, как и в зернохранилища других типов. Выгрузка зерна происходит самотеком на транспортер-элеватор.

Таким образом, для долгосрочного безопасного хранения зерна необходимо вместительное, надежное и вентилируемое зернохранилище. Зернохранилища бывают различной модификации: с конусным и плоским дном; вентилируемые; с конусным днищем проездом.

В настоящее время продолжается активный поиск новых технических решений по обеспечению наиболее эффективных мер по обеспечению сохранности зерновых в процессе хранения. К ним относятся отечественные разработки в соответствии с патентами: SU 1755732 A1, 23.04.1990; RU 2257520 C1, 27.07.2005; RU 2017390 C1, 15.08.1994; RU 2292275 C1, 27.01.2007; RU 2366151 C1, 10.09.2009; SU 515495 A1, 25.05.76; SU 1242440 A, 11.07.86; SU 1055414 A, 23.11.83; SU 1706455 A, 23.01.92; SU 1611263 A, 07.12.90, а также зарубежные технические решения DE 3812122 A, 26.10.1989; СН 669709 A, 14.04.1989; JP 2005022742 A, 27.01.2005; GB 784861 A, 16.10.1957.

Принципиальная схема одной из таких разработок приведена на рисунке 1.5.

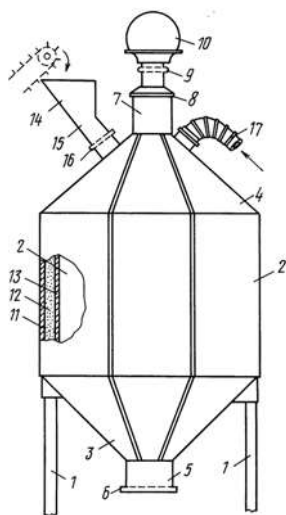


Рисунок 1.5 – Зернохранилище

Конструктивное описание зернохранилища:

- опоры (1);
- цилиндр (2);
- конусы (4);
- патрубки (5, 7);
- шиберы (6, 9);
- адсорбатор металлотканый (8);
- электрический вакуумный насос (10);
- наружный, средний и внутренний слой панели (11, 12 и 13 соответственно);
- загрузочный бункер – 14;
- течка – 15;
- шибер – 16;
- вакуум-провод – 17.

Зернохранилище имеет вид сборной емкости (замкнутый сверху и снизу конусами цилиндр, установленный на двух опорах). Электрический вакуумный насос, которым оснащено зернохранилище, работает от ВЭУ (ветроэлектрической установки).

Стеновые панели трехслойные. Наружный слой – металл (алюминиевый лист, оцинкованная жель, пластик огнестойкий); средний – пористый, невозгораемый, легкий материал; внутренний – пластик теностойкий, лист алюминиевый или оцинковка.

Зернохранилище оснащается загрузочным бункером, в который поступает зерновая масса из транспортера-элеватора. После того, как зерно загружено, включают вакуумный насос, под действием которого паровоздушная смесь отсасывается вместе с пылью, проходя через адсорбатор металлотканый.

Предлагаемое техническое решение способствует снижению трудозатрат на сооружение устройства (т. к. конструкция выполнена из легких трехслойных

панелей. Также обеспечиваются необходимые режимы активного вентилирования загруженной зерновой массы.

Поверхность зерна, впитывающая и задерживающая влагу, покрыта мелкой сетью капилляров. Интенсивность перемещения влаги внутри зерна приводит к образованию трещин. Влага в капиллярах при углублении зоны испарения становится паром. Если объем пара резко увеличивается, то зерно деформируется.

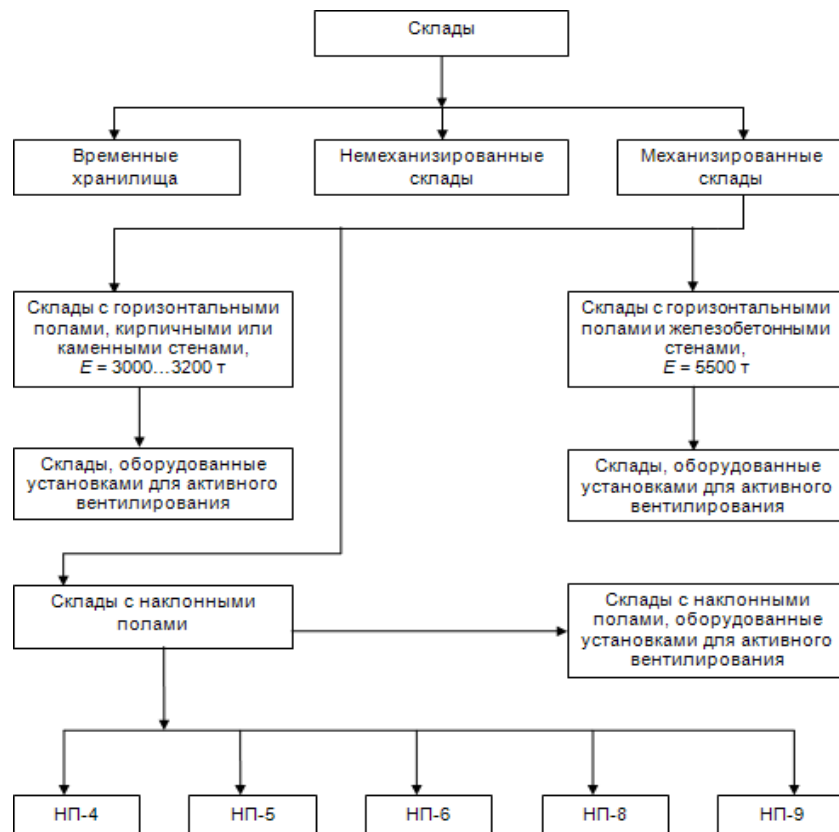


Рисунок 1.6 – Типы зерновых складов

Зерно в процессе сушки может деформироваться и трескаться. Как правило, трещины не приводят к снижению посевных качеств зерна.

На изменение технологических свойств зерна влияет и искусственное нарушение связи влаги с твердым скелетом зерновки, и перегрев [8-16].

В процессе активного вентилирования воздействию подвергаются теплофизические характеристики гигроскопичность, аэродинамические свойства, сыпучесть, скважистость и влажность зерна (Приложение А 1–5).

1.2. Особенности процесса активного вентилирования зерна

Активное вентилирование зерна обычно осуществляется в профилактических целях, главной из которых является регулирование параметров температуры и/или влажности. Эффективное регулирование вышеуказанных параметров позволяет ослабить жизнедеятельность организмов, способных нанести вред зерну, что, в свою очередь, увеличивает срок хранения зерновой массы и повышает ее стойкость к негативному воздействию вредителей.

Вентилирование зерна следует осуществлять в определенные периоды. Лучше всего охлаждать зерно в условиях холодного и сухого воздуха, а также тогда, когда температурные показатели зерновой массы и наружного воздуха существенно разнятся. Периоды, при которых отмечается большая разница между температурой зерна и воздуха, могут ограничиваться не только временем года или периодом в течение года, когда, например, отмечается похолодание, но и временем суток. Параметром, определяющим охлажденность зерна, является температура от 0 до +10 градусов по Цельсию. Вентилировать зерно целесообразно осенью, когда температура воздуха еще плюсовая, но уже достаточно низкая. В некоторых случаях вентилирование зерна может осуществляться и в другие времена года (например, в районах, где этому располагают природно-климатические условия и температурный режим).

Подсушивать зерно следует только в том случае, если воздух достаточно влажный и теплый, что характерно преимущественно для летне-осеннего периода.

Вентилирование зерновой массы, осуществляемое в профилактических целях, должно происходить в соответствии определенными требованиями. К таковым относятся:

- разница в параметрах температуры и влажности воздуха и зерновой массы;
- высокая интенсивность вентилирования;

- достаточное количество смен воздушных масс в пространствах между зерном.

Также как в области создания новых конструкций для мест хранения зерна специалисты ищут эффективные приемы и способы активного вентилирования, как у нас в стране SU 1410906 A1, 23.07.1988; RU 2015651 C1, 15.07.1994; RU 2202168 C2, 20.04.2003; SU 1755732 A1, 23.08.1992; RU 2202168 C2, 20.04.2003; SU 1457852 A1, 15.02.1989; SU 1498429 A1, 07.08.1989; RU 58007 U1, 10.11.2006, так и за рубежом DE 102004044807 B3, 19.01.2006; BE 577136 A1, 05.07.1959; CH 6847771 A5, 30.12.1994; CN 1830272 A, 13.09.2006.

Патент РФ №2452171, зарегистрированный 10 июня 2012 года, в качестве способа сушки сельхозсырья предлагает его активное вентилирование с использованием вентиляционной установки (сырье укладывается и сушится на каркасе воздухораспределительного канала этой установки). В соответствии с Патентом, плотность укладки сырья должна находиться в пределах от 100 до 300 кг на кубометр. Концентрация озона, которым оказывается воздействие на сырье, должна составлять от 0,1 до 10 грамм на метр, а параметры экспозиции на биофизические процессы, происходящие в ходе сушки сырья (время озонового воздействия на сырье), должны находиться в пределах от 5 до 15 минут. Ниже представлена формула, по которой на основании приведенных показателей можно рассчитать частоту следования озонирования и активного вентилирования:

$$f = \frac{1}{t_0 + t_{AB}}, \quad (1.1)$$

где t_0 , t_{AB} – параметры экспозиции на биофизические процессы сушки, которые оказывают непосредственное воздействие на концентрацию и экспозицию воздействия озона по скважности в интервале $\gamma = 90-10\%$. Показатель скважности определяется как соотношение времени воздействия озона на сырье к сумме времени озонирования и времени активного вентилирования. Формула для вычисления показателя скважности представлена ниже:

$$\gamma = \frac{t_0}{t_0 + t_{AB}} \cdot 100 \%, \quad (1.2)$$

Применение режимов активного вентилирования имеет определенные преимущества. К таковым можно отнести:

- возможность регулирования расхода отработанных воздушных масс с целью повышения интенсивности и эффективности сушки сырья;
- активное вентилирование способствует не только быстрее высушивать сырье, но и сохранять его питательную ценность в ходе сушки;
- сырье, подвергающееся активному вентилированию, будет храниться дольше, что представляется возможным в том числе благодаря более качественным условиям хранения.

Интенсивность вентилирования зерна должна определяться его устойчивостью к внешним воздействиям во время хранения. Так, зерно со слабой устойчивостью следует вентилировать более интенсивно. Кроме того, подача насыпи в воздушные массы при вентилировании, объем которой зависит от того, насколько качественным является зерно, является обязательным условием для обеспечения достаточного количества смен воздушных масс в пространствах между зерном.

Факторами, определяющими число смен воздушных масс, являются мощность агрегатов в вентиляционных установках и высота насыпи. Установки, осуществляющие активное вентилирование, могут содержать в себе агрегаты различных мощностей. Следует отметить, что то, насколько часто будет меняться воздух при вентилировании, в большей степени зависит не от мощности агрегата, а от высоты зерновой насыпи.

С целью нормализации количества обменов воздушных масс внутри насыпи следует устанавливать насыпь таким образом, чтобы все ее части находились на примерно одинаковой высоте по отношению к системе распределения воздушных масс. Если высота разных частей зерновой насыпи будет неравномерной, то больше воздуха будет поступать в те части насыпи, расстояние от которых до

воздухораспределительной системы меньше. Это приведет к тому, что зерно будет вентилироваться неравномерно.

Определить количество обменов воздушных масс в пространствах между зерном можно путем:

1. Установки общего объема пространств между зерном в насыпи (измеряется в м³). Данный показатель составляет 40% от общего объема насыпи в зерновых насыпях и половину общего объема насыпи в кукурузных початках.

2. Определение объема суточной подачи воздуха через вентиляционную установку в насыпь (измеряется в м³).

3. Соотнесение двух вышеуказанных показателей и вычисление суточного количества обменов воздушных масс в пространствах между зерном.

Используя вентиляционные установки, следует обращать особое внимание на то, сколько решеток находится в одном ряду и в каком порядке они расположены. В случае произвольного увеличения числа решеток в ряду эффективность процесса вентилирования может ухудшаться, что будет отрицательно сказываться на результатах процесса. Для того, чтобы этого не случилось, увеличивать число решеток в ряду следует не произвольно, а в определенном порядке. Оптимальным является размещение решеток таким образом, чтобы они располагались вплотную, а оптимальное количество решеток в ряду – 9. В данном случае потоки воздуха будут равномерно охлаждать зерно. Если сделать ряд длиннее, воздушные массы будут распределяться неравномерно, что приведет к менее эффективному охлаждению зерна, располагающегося над решетками, находящимися дальше от вентиляционного агрегата. Степень такой неравномерности вентилирования будет увеличиваться прямо пропорционально увеличению длины ряда.

В некоторых случаях зерно может подвергаться самосогреванию. Данный эффект в целом губителен на протяжении всего периода хранения зерна, что делает необходимым его скорейшую ликвидацию.

Самосогревание может быть успешно ликвидировано в том случае, если хранение зерна правильно организовано. Неправильная организация работы

заготовительного пункта нередко приводит к возникновению очагов самосогревания, что не позволяет добиться сохранности зерна во время его хранения.

Основным способом ликвидации самосогревания зерна является активное вентилирование. Интенсивность такого вентилирования должна быть максимально высокой при любых показателях влажности воздушных масс. Преимуществом в ходе осуществления активного вентилирования на максимальной мощности будет пониженная влажность зерна, так как в данном случае возможным представляется не только снизить температуру зерна, но и высушить его.

Риск возникновения самосогревания зависит от участка насыпи, на котором хранится зерно. Наиболее высоким он будет в тех местах, где сформировались максимально благоприятные условия для жизнедеятельности микроорганизмов, клещей и насекомых. После начала процесса самосогревания зерна на одном из таких участков он распространяется по всему зерновому массиву.

Ликвидация гнездового самосогревания требует, в первую очередь, наличия и задействования в соответствующих целях передвижных вентиляционных установок. Такие установки используются для того, чтобы подавать воздух в зерновой массив сверху. Преимуществом передвижных установок является их транспортабельность: при необходимости их месторасположение можно изменить без особых проблем (как внутри зерновой насыпи, так и за ее пределами – установки могут перемещаться и между заготовительными пунктами). Кроме того, мощности вентиляционных установок вполне достаточно для ликвидации самосогревания в одном гнезде в один прием.

Использование передвижных вентиляционных установок требует установки вентиляционных труб в шахматном порядке. Радиус действия одной такой трубы при этом должен составлять 135 см. При такой расстановке труб представляется возможной локализация очага и предотвращение движения нагретых воздушных масс в места насыпи, на которые самосогревание не распространилось.

Установка однотрубных вентиляционных агрегатов в гнезде по центру целесообразно в случае, если необходимо ликвидировать маленький очаг самосогревания. В этом случае вентиляция зерна осуществляется путем отсасывания воздушных масс.

В отличие от передвижных вентиляционных установок, использование стационарных установок подразумевает локальное воздействие на те зерновые массивы, которые размещены непосредственно в пределах действия системы распределения воздушных масс решеток данных установок. В данном случае воздействие на секции зерновых массивов осуществляется в следующем порядке: сначала вентилируются секции с образованными в них «гнездами», затем – все остальные секции. В целом, гибкость в плане установления очередности вентилирования при использовании стационарных вентиляционных установок практически неограничена в силу наличия большого числа вентилируемых рядов решеток распределения воздушных масс.

В случае допущения возникновения сплошного самосогревания зерна желательно производить активное вентилирование в как можно большем количестве участков зернового массива одновременно. Это, в свою очередь, требует наличия как можно большего количества вентиляционных агрегатов в одном заготовительном пункте.

На основании данных, полученных в ходе проведенных лабораторных исследований, а также основываясь на итогах практического применения активного охлаждения зерна при самосогревании, представилось возможным сделать следующий вывод: чем больше разница в температуре зернового массива и воздуха снаружи насыпи, а также чем чаще происходят обмены воздуха в пространствах между зерном, тем быстрее будет охлаждаться греющееся зерно.

Активное вентилирование при самосогревании будет наиболее эффективным при самой низкой температуре воздуха, а также тогда, когда обмены воздуха в пространствах между зерном с последующим выведением нагретых воздушных масс в атмосферу происходят максимально часто.

При вентиляции зернового массива, в котором началось самосогревание, теплый воздух, насыщенный влагой, сначала перераспределяется внутри зерновой насыпи, перемещаясь между ее слоями. Если вентиляция производится с использованием установки, которая подает воздух снизу, температура снижается сначала в нижнем слое, который находится ближе к системе распределения воздуха. Затем по очереди охлаждается воздух в среднем и верхнем слоях соответственно. При подаче воздуха сверху путем нагнетания сохраняется вышеупомянутая очередность охлаждения воздуха. В случае, если теплый воздух выводится путем отсасывания его одноструйным агрегатом, очередность меняется – воздух охлаждается сверху вниз. Причиной тому является принцип нагнетания воздуха, в соответствии с которым сначала охлаждаются слои зернового массива, расположенные максимально близко к выходным отверстиям устройства распределения воздуха.

В некоторых случаях над самосогревающимся зерном во время его обработки может появляться пар. Это происходит в результате вентилирования, осуществляющего нагнетание воздушных масс. При отсасывании воздуха пар скапливается в патрубке, после чего выходит из него. В данном случае конденсат, образующийся в результате работы вентиляционной установки, будет оседать в патрубке и на поверхности насыпи. Образование конденсата объясняется столкновением теплых и холодных воздушных масс над насыпью/холодных зерен.

Вентилировать зерновую насыпь следует продолжать даже в том случае, если температура верхних слоев насыпи повышается, или если над насыпью появляются облака пара. Остановка вентилирования может привести к потере сохранности зерна. В данном случае гораздо эффективнее и целесообразнее будет усиление вентилирования до тех пор, пока температура внутри зернового массива приблизится к аналогичному показателю за его пределами. Длительность процесса вентилирования будет зависеть от того, насколько влажным и теплым было зерно, а также от температуры и влажности наружного воздуха в самом начале.

Вентиляция зерна всегда предполагает необходимость обеспечения выхода воздуха из склада. Для этого следует держать открытыми все двери и окна, создавая максимально возможную проветриваемость помещения. Если склад не проветривать, влажный воздух будет скапливаться в верхней части насыпи и на кровлевой обрешетке, что, в свою очередь, приведет к скоплению конденсата. А это, учитывая объемы хранения зерновых массивов, может привести к серьезным последствиям.

Активное вентилирование, которое производится для того, чтобы высушить зерно, может быть как успешным, так и неудачным. Для обеспечения успешности этого процесса следует принимать во внимание следующие важные факторы:

- температурные показатели воздушных масс и зерна;
- начальные показатели влажности зернового массива;
- показатели влажности воздуха (как внутри насыпи, так и снаружи);
- интенсивность и длительность процесса вентилирования;
- зерно какой из культур подвергается данному процессу (для разных зерновых культур свойственны разные гигроскопические свойства).

Значение температуры нагнетаемого воздуха для подсушивания зерна хорошо характеризуется данными о результатах применения активного вентилирования на некоторых пунктах, в которых задействуются такие приемы (приложение П4).

Основываясь на приведенных данных, отметим, что зерно сушится заметно сильнее в условиях более высокой температуры нагнетаемых воздушных масс по сравнению с низкой температурой даже в том случае, если процесс вентилирования происходит с одинаковой интенсивностью и занимает одинаковое время. Так, в первом случае потеря зерном влажности может колебаться от двух до трех процентов, тогда как при вентилировании в условиях более низкой температуры нагнетаемого воздуха влажность зерна либо уменьшится на уровне погрешности (если не прибегать к лабораторному определению данного показателя), либо вообще не изменится.

Для подтверждения описанных выше наблюдений опытным путем было проведено 3 опыта, в каждом из которых показатели относительной влажности воздуха были одинаковыми, тогда как температура воздуха изменялась (+30, +20 и 0 градусов по Цельсию соответственно).

В ходе проведенных опытов было подтверждено наблюдаемое свойство зерна испарять влагу при активном вентилировании тем интенсивнее, чем температура воздуха выше, и тем менее интенсивно, чем температура ниже. Данное наблюдение представляется вполне логичным с теоретической точки зрения, так как в теории поглощение тепла и испарение влаги – процессы, которые происходят одновременно друг с другом. Кроме того, наблюдения также подтверждают теорию, согласно которой холодный воздух обладает меньшей влагоемкостью по сравнению с теплым.

Эффект вентилирования, который используется для подсушивания зерна, находится в непосредственной взаимозависимости от показателя влажности воздуха по той причине, что они постоянно взаимодействуют друг с другом, а также из-за непрерывности процессов влагоотдачи и влагопоглощения.

Гигроскопические свойства зерна, о которых уже говорилось ранее, приводят к стремлению зерна прекратить влагообмен в ходе воздействия на него воздушных масс (то есть при вентилировании).

Советские ученые уже давно рассчитали уровень влажности воздуха и зерна, необходимый для полного прекращения влагообмена между ними.

Стоит отметить довольно большие колебания показателей равновесной влажности зерна в зависимости от культуры последнего. Это, в свою очередь, свидетельствует о важности принятия во внимание гигроскопических параметров зерна той или иной культуры, прежде чем начинать вентилирование. Наиболее вероятной причиной столь существенных различий в показателях равновесной влажности зерна является различный белковый и минеральный состав, а также различное строение клеток и разная толщина алейронового слоя.

Воздушные массы, которым свойственна пониженная относительная влажность, будут оказывать тем большее воздействие на процесс подсушивания

зерна, чем чаще происходят обмены воздуха в пространствах между зерном. Также следует отметить зависимость интенсивности насыщения зерновой влагой воздуха от скорости его перемещения внутри насыпи – чем она выше, тем интенсивность такого насыщения будет ниже, и, соответственно, тем лучшими свойствами влагопоглощения он будет обладать.

Сегодня технологический процесс сушки зерна особенно сильно нуждается в модернизации. Благодаря конструктивной модернизации оборудования и его характеристик возможным представляется снижение затрат энергии на осуществление того или иного процесса, а расширение технологических возможностей оборудования открывает новые возможности его практического применения. Успешная технологическая модернизация оборудования в первую очередь предполагает изучение основных тепловлажностных характеристик слоя зерна. Далее рассмотрим ключевые тепловлажностные свойства, представляющие важность при использовании зерносушилок шахтного, камерного и бункерного типов с плотным состоянием слоя сушеного материала, в которых протекающие процессы обмена теплом и влагой тесно связаны между собой:

- 1) теплофизические;
- 2) влажностные.

Теплофизические характеристики включают в себя:

- коэффициент теплопроводности λ ;
- коэффициент температуропроводности a ;
- коэффициент теплоемкости c .

Дополнительными характеристиками первой группы являются:

- удельная объемная теплоемкость $c\rho$;
- коэффициент теплоаккумуляции (теплоусвояемость) v .

Влажностные характеристики включают в себя:

- коэффициент массопереноса;
- потенциал влагопереноса;
- удельная изотермическая влагеёмкость.

Дополнительными характеристиками второй группы являются:

- полный водный потенциал;
- удельное влагосодержание.

Между всеми указанными выше характеристиками прослеживаются причинно-следственные, корреляционные и функциональные связи. Единственным непостоянным показателем в данном случае является состояние процесса сушки зерна, которое зависит от температуры (θ) и влажности (ω) последнего. Начальная плотность зерна (ρ) – неизменный показатель.

При расчете показателя теплопроводности зерна (λ) следует использовать цилиндрический электрический зонд, мощность которого постоянна. Конструкция данного зонда - НИПТИМЭСХ АЗ РФ – представлена А. Эрком, В. Бровциным и С. Манасяном. Данная конструкция фактически является улучшенной версией зонда Л.Ф. Янкелева [1].

Показатели измерений, проведенных с использованием зонда конструкции НИПТИМЭСХ АЗ РФ, необходимы для того, чтобы определить температуропроводность. Измерения при этом должны быть проведены в соответствии с предложенным Г. Кондратьевым методом регулярного режима.

Калориметрический способ используется для определения коэффициента теплоемкости зерна. Для разных образцов зерна свойственны разные параметры, перечень которых представлен ниже:

- зерновая культура и сорт;
- содержание влаги;
- плотность, насыпная плотность, порзность;
- различные температурные показатели.

Рекомендуемым условием для расчета тепловых свойств плотного слоя зернового материала считается проведение экспериментальных исследований в лабораторных условиях. Это предполагает использование следующего оборудования и материалов:

- прибора ИТХ9П;

- измерительного блока со стабилизированными источниками мостовой измерительной схемы и подогревной обмотки зонда, измерительной схемой и усилителем;

- прибора для фиксации полученных результатов.

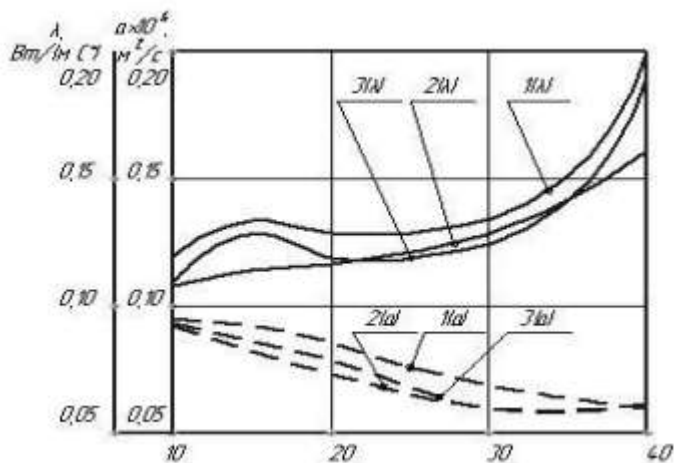


Рисунок 1.7 – Зависимость теплофизических показателей слоя зерновых культур (тип слоя 1) от влажности:

a – температуропроводность; λ – теплопроводность; 1 – ячмень; 2 – рожь; 3 – овес

Тепловым зондом в приборе ИТХ9П выступает полупроводниковый цилиндрический зонд. Верхний порог погрешности данного прибора равен пяти процентам. Время теплового воздействия на прибор в среднем занимает от четырех до пяти минут при температурной чувствительности = 1 °С.

Порядок проведения опыта с использованием данного прибора следующий: в течение 72 часов зерновой материал увлажняется, находясь при этом в специальных полиэтиленовых мешках. Дважды в сутки зерно перемешивается. По каждой культуре готовят 11 образцов, влажность которых составляет от 10 до 35 процентов.

Рисунок 1.7 наглядно демонстрирует результаты проведенных опытов, а также показывает, насколько сложным может быть процесс изменения теплофизических свойств зерна в зависимости от влажности последнего. На основании проведенных исследований можно точно сказать, что влажность является одним из ключевых характеристик зернового материала, определяющих его теплофизические характеристики. Данный показатель влияет на указанные

выше характеристики следующим образом: увеличение таких характеристик зерна, как удельная объемная теплоемкость, теплопроводность и коэффициент теплоаккумуляции прямо пропорционально повышению влажности зерна. Температуропроводность зерна также повышается с увеличением его влажности, но только до того момента, когда влажность зерна достигает 14% - в этот момент теплопроводность достигает своего пика, и при дальнейшем увеличении влажность будет постепенно снижаться (влажность = 14-28%), либо оставаться практически неизменной (влажность = более 28%). Столь сложное влияние влажности зерна на его термические свойства является причиной наличия различных форм связей влаги, а также различными показателями энергозатрат на осуществление влагоотвода. Чем выше плотность зерна, тем выше будут значения его основных теплофизических свойств. Кроме того, на последние также оказывают существенное влияние такие факторы, как сорт и зерновая культура.

Определение режимов технологических операций с зерном (сушка, активное вентилирование), помимо наличия информации о коэффициентах теплообмена, предполагает наличие данных о таких показателях, как:

- влагообмен (коэффициент);
- массоперенос (коэффициент и потенциал);
- удельная изометрическая влажность.

Показателями, от которых зависит полный влажностный потенциал φ зерна, являются температура и содержание влаги в зерне. Полное исключение зависимости влажностного потенциала от первого показателя возможно только путем применения метода нестационарного субстанционального потока при изотермических условиях, в основе теории которого лежит решение задачи теплопроводности для системы двух полуограниченных тел при граничном условии четвертого рода, соответствующего идеальному контакту.

В соответствии с вышеуказанным методом вид зависимости можно представить в виде: $J(\omega, \theta)$ и $\varphi(\omega, \theta)$: $b aJ - \varphi = \omega \theta \beta J = k$.

Коэффициенты a и b , зависящие от вида и сорта зерна и состояния слоя зернового материала, определяются в результате обработки экспериментальных

данных. Используя теоретические и экспериментальные методы определения тепловлажностных свойств зерна, можно рассчитывать системы управления и регулирования термовлагообменными процессами при сушке и активном вентилировании зерна, а также определять оптимальные параметры технологических режимов сушки, вентилирования и хранения зерна.

Принимая во внимание все вышесказанное, можно сделать такие выводы:

1) влажность зерна сильнее всего воздействует на его основные теплофизические свойства;

2) теплофизические свойства зерна в большинстве случаев имеют сложный характер, им свойственна нелинейность, которая выражается в характере их изменения с изменением влажностных показателей;

3) при влажности зерна 10-14% величины основные теплофизические характеристик возрастают (теплопроводность возрастает больше всего, температуропроводность – меньше всего);

4) при влажности зерна 14-20% величины этих двух характеристик начинают уменьшаться;

5) при влажности зерна 20-28% отмечается еще более стремительное уменьшение величины температуропроводности зерна, и увеличение показателя теплоемкости;

6) при влажности зерна 28-35% отмечается продолжение сокращения теплоемкости, но сокращается она уже не так быстро (ячмень), а в некоторых случаях и вовсе остается неизменной (все остальные культуры); также отмечается существенный рост показателя теплопроводности, который может в два раза превышать показатель, свойственный для зерна при нулевом проценте влажности последнего;

7) характер изменения теплопроводности можно объяснить наличием разных форм связи влаги с материалом. При влажности зерна от 20 до 28 % влага заполняет мелкие поры и после их насыщения переходит в межзерновое пространство (при этом теплопроводность меньше, так как в поры материала вместо воды входит воздух, теплопроводность которого значительно меньше, чем

жидкости). При влажности зерна свыше 28% происходит резкое увеличение теплопроводности за счет слабосвязанной поверхностной влаги, которая выступает на поверхность отдельных зерен и образует водяные тепловые «мостики» в местах контакта частиц материала;

8) характер изменения температуропроводности плотного зернового слоя в диапазоне влажности от 20 до 28 % можно объяснить тем, что скорость изменения температуры в воздухе выше, чем в воде, и влага в зерне с увеличением её содержания насыщает поры и выступает на поверхности, что способствует уменьшению температуры.

Улучшить технико-экономические показатели прямоточных зерносушилок шахтного типа представляется возможным путем устранения недочетов, которые относятся к конструкции установок. Улучшение таких показателей позволит избавиться от неравномерного воздействия на зерновой массив при сушке и нагреве.

Далее рассмотрим возможные конструктивные изменения зерносушилок шахтного типа:

1) увеличение сечения подводящего диффузора и использование всей высоты напорной камеры при его монтаже, что позволит несколько замедлить поток агента сушки;

2) усиление конструкции дополнительными элементами, что позволит уменьшить самосортирование зерна, и, как следствие, добиться более равномерного его перемещения в зерносушилке;

3) совмещение периодического и непрерывного способов выпуска зерна в единый способ (комбинированный).

Самыми распространенными видами установок для сушки зерна в России являются бункерные и камерные зерносушилки. Для сушилок этих типов свойственно наличие общего недочета – чрезмерно большая толщина сушильного слоя не позволяет добиться равномерного нагрева и подсушивания зерна. И если в случае с установками камерного типа нивелирование воздействия этой проблемы представляется возможным, то для бункерных установок устранить эту

проблему гораздо сложнее. В большинстве случаев это приводит к тому, что слои зерна, расположенные ближе к агенту сушки, будут пересушиваться, а слои, расположенные дальше – наоборот. В этой связи целесообразным представляется реконструирование зерносушилки. Наиболее эффективным вариантом является выделение трех сушильных зон путем установки дополнительного перфорированного воздуховода, через который агент сушки будет подаваться при условии перекрытия перфорации в том или ином месте при необходимости. Для возможности регулирования напора теплоносителя следует установить на воздухораспределительный патрубок собственный приводный механизм. Расположение датчиков влажности должно быть максимально равномерным по всем зонам сушки, что будет способствовать своевременной подаче агента сушки на участки с повышенной влажностью.

1.3. Технологии и оборудование для переработки некондиционного зерна

В России развитие многопродуктовых схем переработки сырья для получения разных видов ингредиентов (в т. ч. белоксодержащих и углеводсодержащих) идет уникальным путем, альтернатив которому пока еще не существует. С каждым годом акцент все больше смещается в сторону переработки зерновых. Особенно актуально это в условиях сокращения производства кукурузы и картофеля; дефицита белковых продуктов (кормовых и пищевых, свекловичного сахара и крахмальной патоки; высокой стоимости картофеля в сравнении с зерном.

В деле обеспечения населения страны пищевой продукцией зерновым культурам отводится приоритетная роль. Это одна из предпосылок, определяющих необходимость поиска и создания новых технологий глубокой переработки зерна с целью повышения эффективности его использования. На современном этапе и с учетом существующего уровня технологического развития такое ценное сырье, как зерно, может использоваться не только для получения традиционных продуктов (крупы, мука), но также и иных полезных продуктов питания.

Одной из приоритетных задач в обеспечении жителей страны пищевой продукцией выступает задача по замене ввозимых из-за рубежа сырьевых ингредиентов на качественные российские аналоги. Сказанное относится в том числе к белковым препаратам, сиропам и сахарозе.

Для того, чтобы обеспечить больше возможностей в использовании крахмалов в разных промышленных отраслях, нужно производить их с особыми свойствами. Другими словами, обычного пищевого крахмала недостаточно. Изменить природные свойства крахмала можно путем биологического, химического, физического и комбинированного воздействия на него. После подобной обработки крахмал называется модифицированным. Перечислим некоторые из превращений, в результате которых обеспечивается получение модифицированных крахмалов:

- полимеризация структур полисахарида и прочих высокомолекулярных соединений, приводящая к образованию сополимеров;

- взаимодействие между собой гидроксильных групп крахмалов с разными химическими соединениями, приводящее к возникновению новых видов эфиров (соединений);

- дегидратация полисахаридов и преобразование натуральной зернистой структуры;

- расщепление цепей полисахаридов (при этом зернистая структура крахмала может быть и сохранена).

Исходя из характера преобразований, которые имеют место при модификации структуры полисахаридов, выделяется две группы крахмалов:

1. Первая группа – замещенные крахмалы.
2. Вторая группа – расщепленные крахмалы.

Крахмалы первой группы образуются в результате полимеризации с иными высокомолекулярными соединениями или за счет присоединения других радикалов. Крахмалы второй группы образуются в связи с расщеплением цепей полисахаридов.

Для получения расщепленных крахмалов на исходное сырье оказывают механическое или термическое воздействие, обрабатывают ультразвуком или облучают. При этом используются ферменты, окислители, соли, кислоты и иные добавки. В результате происходит деструкция цепей полисахаридов.

Из расщепленного крахмала получают клейстер, обладающий такими свойствами:

- повышенная стабильность при хранении;
- высокая прозрачность;
- пониженная вязкость.

Крахмал модифицируется, чаще всего, путем обработки серной или соляной кислотой. С этой целью происходит нагревание сырья ниже температуры клейстеризации (около 45-50 градусов). Для модификации расход кислоты составляет 1-3 процента к массе исходного сырья, т. е. сырого крахмала. В

результате обработки полисахаридные цепи деполимеризуются, растворимость крахмала повышается, прозрачность клейстера повышается, а вязкость наоборот снижается. Происходит увеличение редуцирующей способности полисахаридов в 5-12 раз и снижение их молекулярной массы до 45000 – 50000.

В нашей стране подобные модифицированные крахмалы используют в производстве особых сортов сладостей.

Расщепленные крахмалы включают окисленные модифицированные крахмалы, которые получают путем воздействия на сырой крахмал других окислителей (например, йодной кислоты, перекиси, перманганатов, гипохлоритов). Глюкозидные связи в сыром крахмале расщепляются, а в результате образуются карбонильные группы. Степень окисления крахмала будет зависеть от условий протекания процесса и расхода реагента. На практике может использоваться комбинированное действие окислителя (перманганат калия) и минеральной кислоты (HCl) на суспензию крахмал. Время действия – 40 минут; температура – 40-43 градуса; расход окислителя – 0,15-0,2%; расход минеральной кислоты – 1-3%. В результате обработки образуется модифицированный крахмал. Он используется как стабилизатор и желирующий компонент в производстве молочных продуктов и мороженого.

Оценка желирующей способности крахмала окисленного проводится по качеству студня из клейстера после того, как продукт будет охлажден. Охлаждение проводится в течение часа при температуре около 17-20 градусов. При вынимании студня из емкости его форма должна сохраняться. Консистенция должна быть упругой и плотной.

Крахмалы окисленные по свойствам похожи на крахмалы, модифицированным кислотой. Различия заключаются в следующем: в стабильности при хранении и низких показателях вязкости.

При подборе условий модифицирования крахмалов можно получить крахмалы с заданными свойствами, использующиеся в производстве кондитерских и мучных изделий.

Набухающие крахмалы – это модифицированные крахмалы, получаемые после влаготермической обработки. Такие крахмалы набухают в холодной воде и переходят в растворимое состояние (частично или полностью). В результате проведенной влаготермической обработки структура крахмальных зерен разрушается. В одних случаях такое разрушение частичное, а в других – полное и необратимое. Для того, чтобы целенаправленно изменить природные свойства крахмалов, проводят предварительную обработку продукта. Такая обработка проводится путем использования химических реагентов либо в условиях влаготермической обработки с использованием антисептиков, щелочей, солей, кислот и прочих химических соединений.

Используемые в пищевой промышленности набухающие крахмалы образуются при добавлении солей фосфорной кислоты.

Замещенные крахмалы получают при использовании в определенных условиях реакции замещения органическими и неорганическими соединениями в реакционноактивных гидроксильных и редуцирующих групп структур полисахаридных цепей. Природные свойства крахмалов и крахмальных клейстеров при этом подвергаются существенным изменениям. Происходит, в частности, усиление пленкообразующей способности, повышение стабилизирующего действия и вязкости.

Если крахмал взаимодействует с фосфатными соединениями (например, с тиохлоридом фосфора, хлорокисью фосфора или триметафосфатом натрия), то возникают эфиры (соединения), в которых гидроксильные группы полисахаридов (либо одна такая группа) этерифицируются кислотными группами фосфорсодержащих эфиров.

Для того, чтобы получить монокрахмалфосфаты, в суспензию сырого крахмала добавляют реагенты (например, карбамид и фосфорнокислый натрий в количестве 0,6-2,7% к массе сырого крахмала). Раствор перемешивается в течение нескольких минут, после чего направляется на сушку в пневмосушилку. Время термической обработки – час при температуре 130 градусов. В результате получаем фосфатный крахмал, клейстер которого характеризуется

устойчивостью к низким температурам. Широкое использование такие крахмалы получили в пищевой отрасли при производстве майонезов, соусов, мучных кондитерских изделий. Также фосфатные крахмалы используются при производстве диетических продуктов и детского питания.

При производстве крахмалов ацетилованных используют уксусный ангидрид, ледяную уксусную кислоту и пр.

Ацетаты крахмала, стабилизирующие клейстер, обеспечивают получение прочной пленки. При взаимодействии крахмала с реагентом в соотношении один к 0,25-1,0 при t 100 °С (время взаимодействия – 5-13 часов) образуется ацетат крахмала. Доля ацетильных групп в ацетате крахмала варьируется от 3 до 6 процентов. Ацетат крахмала характеризуется растворимостью в воде (при t 95–100 °С) и сохранностью зернистой структуры.

В продуктах питания ацетаты крахмала играют роль загустителя. Их основные характеристики выражаются в высокой устойчивости при оттаивании, заморозке и хранении. Широкое использование ацетаты крахмала получили в производстве консервированных начинок, смесей и сухих продуктов.

Большое внимание отечественные исследователи уделяют новым технологиям получения модифицированных крахмалов RU 2315811 C2, 27.01.2008; SU 311963 A1, 19.08.1971; RU 2421525, 20.06.2011; SU 542770 A1, 15.01.1977; RU 2180560 C2, 20.03.2002 и зарубежные US 2007/055058 A1, 08.03.2007; EP 0721471 B1, 04.10.2001; US 3377339 A, 09.04.1968; UZ 2856 C, 30.10.2005; US 5651829 A, 29.07.1997; WO 2003/037907 A1, 08.05.2003; WO 2005/037849 A1, 28.04.2005; US 440804104, 10.1983.

Производство модифицированных крахмалов и их использование в пищевой промышленности позволяет расширить ассортиментную линейку пищевой продукции.

Сегодня особое внимание уделяется разработке практических машинно-аппаратурных схем производства модифицированных крахмалов.

В производстве желейной кондитерской продукции достаточно широко используется технология окисления крахмала картофельного перманганатом

калия. В производстве мороженого используют окисленный кукурузный крахмал. Благодаря этому обеспечивается высококачественная стабилизация структуры мороженого и частичная замена агар-агар в производстве жележных кондитерских изделий. Также стоит упомянуть о технологии окисления горохового крахмала, не уступающего по прочности образуемого студня желирующему картофельному крахмалу.

Технология картофельного окисленного крахмала, обладающего высокой студнеобразующей способностью, с использованием сернокислого железа и перекиси водорода, разработана на основе исследований процесса окисления крахмала различными реагентами.

На практике широко применяется технология гидролитической обработки и очистки кукурузного амилопектинового крахмала, который затем используется при производстве кровезаменителя «Волекам».

Вышеперечисленные процессы прошли проверку на опытно-промышленных установках в заводских условиях.

Стабилизаторы должны отвечать таким требованиям:

- снижение водоотдачи приготавливаемого раствора;
- диспергируемость в холодной воде.

Таким требованиям отвечают крахмалы после обработки методом горячей экструзии и крахмалопродукты, набухающие в холодной воде. Последние изготавливаются путем высушивания клейстера на вальцовых сушилках.

К настоящему времени разработано несколько новых видов набухающих крахмалов, используемых в производстве пищевой продукции разного назначения (например, гороховый полуфабрикат, набухающая мука, экструзионные крупы, крахмальная крупа «Саго»).

Несмотря на большое внимание к модифицированным крахмалам, основное внимание уделяется химическим аспектам этого процесса и недостаточное количество разработок касается аппаратурно-технологических схем.

Выводы по главе и постановка задач исследования

Проведенный анализ патентной и специальной литературы выявил крайнюю необходимость совершенствования всего комплекса средств по ресурсосберегающей переработке зернового сырья, составляющего значительную часть потенциального источника развития и совершенствования пищевых отраслей промышленности.

Разработки отечественных и зарубежных специалистов направлены на решение этой проблемы в основном за счет более глубокой биотехнологической переработки на основании достижений биохимии.

Вместе с тем еще остаются резервы по совершенствованию процессов и аппаратов, как на этапе обеспечения более высокой сохранности кондиционного зернового материала, так и в области переработки остающегося после хранения некондиционного сырья.

Представляется целесообразным в качестве цели дальнейших исследований в этой области определить повышение эффективности сохранности зерна путем модернизации систем активного вентилирования хранилищ и решение вопросов совершенствования оборудования для ресурсосберегающей переработки остающейся его некондиционной части в пищевые продукты, в частности модифицированные крахмалы.

Используя в качестве основных методы математического моделирования, статистического анализа и экспериментальных исследований, как устройств активного вентилирования, так и оборудования для получения модифицированных крахмалов необходимо решить следующие задачи:

1. Создать математическую модель процессов сушки зерна в установках бункерного типа;
2. Предложить методику идентификации параметров разработанной модели для бункерных установок с различными воздухораспределительными системами;
3. Разработать технические решения для распределенной подачи воздуха в бункерных установках;

4. Разработать ряд устройств для повышения эффективности переработки некондиционного зерна в модифицированные крахмалы.

5. Предложить более совершенную конструкцию системы воздухораспределения;

6. Разработать методики расчета конструктивных элементов бункерных сушильно-вентиляционных установок;

7. Выработать практические рекомендации по совершенствованию зернохранилищ активного вентилирования для многоцелевого назначения.

8. Предложить конструкции устройств для получения модифицированных крахмалов.

Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛО-МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ ЗЕРНА

2.1. Математическая модель тепло-массообменных процессов сушки зерна

2.1.1. Анализ характера особенностей теплообмена в дискретной насыпи пищевых продуктов

Несмотря на важность решения вопросов, связанных с прогнозированием формирования тепло-влажностных полей при хранении зерновых и зависящих от них изменений технологических свойств сырья, в настоящее время имеющихся математических описаний этих сопряженных явлений недостаточно. Это объясняется сложностью и малоизученностью процессов хранения пищевых насыпей как на микро-, так и на макроуровне. Такие массы представляют собой систему с распределенными параметрами. В связи с этим возможность прогнозирования полей тепло- и влагосодержания зависит, с одной стороны, от полноты необходимой информации о влажности и температуре компонентов массы в исходный момент, с другой – от надежности математической модели, способной на основе этой информации, используемой для задания краевых условий и теплофизических констант, описать реальные процессы теплопереноса в насыпи. Анализ характера особенностей теплообмена в дискретной насыпи пищевых продуктов может быть осуществлен только на основании сформированных аналитических моделей.

Известные математические модели температурных режимов хранения насыпной массы разрабатывались для целей построения систем автоматического регулирования режима хранения сельскохозяйственных продуктов. При этом в качестве моделей температурного поля очага самосогревания использовались, как правило, системы с распределенными параметрами при весьма существенных ограничениях, накладываемых на рассматриваемый процесс. В большинстве работ насыпная масса рассматривается как сплошная теплофизическая среда, в

которой передача тепла осуществляется механизмом кондуктивной теплопроводности. Развитие полей тепло- и влагосодержания в семенной массе моделируется законами феноменологической теории тепломассообмена в сплошных средах. В работе [14] получены уравнения распространения тепла в зерновой насыпи очага самосогревания в виде пластин, цилиндра и шара.

Изменение температуры в произвольный момент времени в любой точке греющего пласта толщиной $2R$ и окружающего его массива, имеющего свой тепловой фон, найдем решением дифференциальных уравнений теплопроводности:

для пласта

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial z} \right) + q_u \quad (2.1)$$

для окружающего насыпного массива

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial z} \right) + q_0 \quad (2.2)$$

где τ – продолжительность процесса;

z – расстояние от средней плоскости греющего пласта;

ρ – плотность насыпного массива;

c – удельная насыпного массива;

λ – коэффициент теплопроводности насыпного массива;

t – температура в рассматриваемой точке насыпного массива;

q_0 – интенсивность тепловыделения (тепловой фон) насыпного массива, окружающего греющий пласт;

q_u – интенсивность тепловыделения греющего пласта повышенной физиологической активности.

Индекс 1 относится к греющему пласту, индекс 2 – к окружающей среде.

Система уравнений (2.1) – (2.2) решена на основе принципа суперпозиции при следующих упрощающих предпосылках. Температура греющего пласта в начальный момент времени одинакова по всему объему и равна $t_1(x, 0) = t_0$, а в

окружающем пласт зерновом массиве равна $\int_2(x, 0) = t_c$; рассматривается зерновая насыпь достаточно больших размеров (неограниченная пластина); тепловое взаимодействие между очагом самосогревания и окружающим массивом происходит по закону теплопроводности; интенсивность тепловыделения пласта q_u и окружающего массива q_0 постоянны во времени; теплофизические характеристики зерна в пласте и массиве приняты постоянными, но в общем случае отличными друг от друга.

Получим решение задачи с соответствующими краевыми условиями в предположении $t_0 = t_c$ для греющего пласта

$$t_1(z_1, \tau) - t_0 = \frac{\left(q_u - q_0 \frac{\rho_1 c_1}{\rho_1 c_1} \right) \tau}{\rho_1 c_1} \left(1 - \frac{4}{1 + k_c} F_1 \right) + \frac{q_0 \tau}{\rho_2 c_2}, \quad (2.3)$$

где через F_1 обозначена сумма

$$F_1 = \sum_{n=1}^{\infty} (-h)^{n-1} \left[\operatorname{erfc} \frac{(2n-1) - \frac{z}{R}}{2\sqrt{Fo_1}} + \operatorname{erfc} \frac{(2n-1) + \frac{z}{R}}{2\sqrt{Fo_1}} \right] \quad (2.4)$$

для насыпного массива

$$t_2(z_1, \tau) - t_0 = \frac{\left(q_u - q_0 \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \right) \tau}{\rho_1 c_1} \frac{4k_c}{1 + k_c} \times$$

$$\times \left[-\operatorname{erfc} \frac{\frac{z}{R} - 1}{2\sqrt{Fo_2}} - \frac{2}{1 + k_c} F_2 \right] + \frac{q_0 \tau}{\rho_2 c_2} \quad (2.5)$$

где

$$F_2 = \sum_{n=1}^{\infty} (-h)^{n-1} (-1)^n \operatorname{erfc} \frac{2nk_0^{-\frac{1}{2}} + \frac{z}{R} - 1}{2\sqrt{Fo_2}} \quad (2.6)$$

В записанных уравнениях a - коэффициент теплопроводности насыпного массива;

$$k_c = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \sqrt{\frac{\rho_1 c_1 \lambda_1}{\rho_2 c_2 \lambda_2}} - \text{критерий теплоусвоения};$$

$$h = \frac{1 - k_c}{1 + k_c}; k_a = \frac{a_1}{a_2} - \text{критерий, характеризующий теплоинерционные}$$

свойства среды относительно пластины;

$$Fo_1 = \frac{a_1 \tau}{R^2} \text{ и } Fo_2 = \frac{a_2 \tau}{R^2} - \text{числа Фурье соответственно для пластины и среды};$$

$$\operatorname{erfc}x = 1 - \operatorname{erf}x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-x^2) dx, \quad (2.7)$$

где $\operatorname{erfc}x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-x^2) dx$ – функция ошибок Гаусса

Из решения (2.3), (2.4) получены частные упрощенные случаи. Экспериментальная проверка для зерна влажностью 20–22 % для пласта самосогревания и 13–14 % для насыпного массива подтвердила справедливость полученных зависимостей.

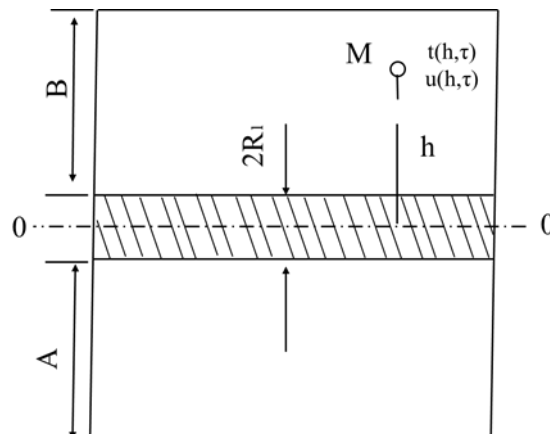


Рисунок 2.1 – Графическая интерпретация начальных условий:

A, B – расстояние от основания емкости для хранения; $2R_1$ – толщина греющего пласта;
h – расстояние от центра греющего пласта

В работах [3, 4, 6–10] авторами проведен теоретический анализ тепло- и массопереноса в слое зерновой насыпи при наличии греющего пласта с постоянной интенсивностью тепловыделения.

Для проведения такого анализа принималось, что в насыпи имеется слой зерна толщиной $2R$ с повышенной температурой и влажностью (рисунок 2.1).

Согласно [2.3,2.4] тепло- и влагоперенос в насыпи с повышенной температурой при $h < R$ описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial t_1(h, \tau)}{\partial \tau} = \left(a + a_m \delta \varepsilon \nu \frac{c_m}{c_q} \right) \frac{\partial^2 t_1(h, \tau)}{\partial h^2} + \varepsilon \nu \frac{c_m}{c_q} a_m \frac{\partial^2 u_1(h, \tau)}{\partial h^2} + \frac{q_1}{c_q \rho} \\ \frac{\partial u_1(h, \tau)}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u_1(h, \tau)}{\partial h^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 t_1(h, \tau)}{\partial h^2} \end{cases} \quad (2.8)$$

где t_1 – температура греющего пласта;

u_1 – влагосодержание греющего пласта;

a – температуропроводность насыпи;

a_m – коэффициент диффузии влаги насыпи;

δ – термоградиентный коэффициент насыпи;

ε – критерий фазового превращения;

ν – теплота фазового превращения;

c_m – удельная изотермическая влагоемкость насыпи;

ρ – плотность насыпи;

q_1 – количество тепла, выделяемого единицей объема греющего пласта в единицу времени;

τ – время.

Тепло и влагоперенос в насыпи на расстоянии $h > R$ от центра греющего пласта на основании приведенных выше рассуждений и упрощений о теплоизолированности боковых стенок хранилища может быть описан следующей системой уравнений

$$\frac{\partial t_2(h, \tau)}{\partial \tau} = \left(a + a_m \delta \varepsilon \nu \frac{c_m}{c_q} \right) \frac{\partial^2 t_2(h, \tau)}{\partial h^2} + \varepsilon \nu \frac{c_m}{c_q} a_m \frac{\partial^2 u_2(h, \tau)}{\partial h^2} + \frac{q_2}{c_q \rho}; \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial u_2(h, \tau)}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u_2(h, \tau)}{\partial h^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 t_2(h, \tau)}{\partial h^2}, \quad (2.10)$$

где t_2 – температура насыпи, окружающих греющий пласт;

u_2 – влагосодержание насыпи, окружающих греющий пласт;

q_2 – количество тепла, выделяемого единицей объема насыпи, окружающих греющий пласт, в единицу времени.

Начальные условия для систем:

$$t_1(h, 0) = t_1; \quad t_2(h, 0) = t_2; \quad (2.11)$$

$$u_1(h, 0) = u_1; \quad u_2(h, 0) = u_2; \quad (2.12)$$

Граничные условия для систем:

$$\frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial h} = 0; \quad \frac{\partial u_1(0, \tau)}{\partial h} = 0; \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial t_2(\infty, \tau)}{\partial h} = \frac{\partial u_2(\infty, \tau)}{\partial h} = 0; \quad (2.14)$$

$$t_1(R, \tau) = t_2(R, \tau); \quad u_1(R, \tau) = u_2(R, \tau); \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial t_1(R, \tau)}{\partial h} = \frac{\partial t_2(R, \tau)}{\partial h}; \quad \frac{\partial u_1(R, \tau)}{\partial h} = \frac{\partial u_2(R, \tau)}{\partial h}. \quad (2.16)$$

Очевидно, что теплофизические характеристики греющего пласта и насыпи, окружающей его, постоянные и одинаковые.

При решении вышеуказанных задач придерживались следующих условий:

1) боковые стороны цилиндра теплоизолированы, а через основания цилиндра происходящий тепло- и влагоперенос между брикетами и воздухом незначителен, поэтому им пренебрегают;

2) тепло- и влагоперенос между слоями насыпи происходит только путем теплопроводности, а между насыпью и воздухом он незначительный, поэтому им пренебрегают.

Понятно, что принятые допущения являются весьма серьезными.

Для соответствующих начальных и граничных условий для записанных выше систем дифференциальных уравнений нами получено решение, описывающее температурное поле насыпи:

$$t_2(h, \tau) = t_2 + \frac{q_2 \tau}{c_q \rho} + \frac{2\tau(q_2 - q_1)}{c_q \rho} \left(t^2 \operatorname{erfc} \frac{R + |h|}{2\sqrt{a\tau}} - t^2 \operatorname{erfc} \frac{|h| - R}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \frac{t_2 - t_1}{2} \left(\operatorname{erfc} \frac{R + |h|}{2\sqrt{a\tau}} - \operatorname{erfc} \frac{|h| - R}{2\sqrt{a\tau}} \right)$$

Получено упрощенное решение задачи тепломассопереноса в насыпи пищевых продуктов, при допущении теплоизолированности боковых стенок хранилища и пренебрежении тепловлагопереносом через его основание. Дополнительно предполагалось, что тепло- и влагопередача между отдельными элементами осуществляется только путем теплопроводности.

Численный эксперимент для условий получения этого решения графически представлен на рис.2.2

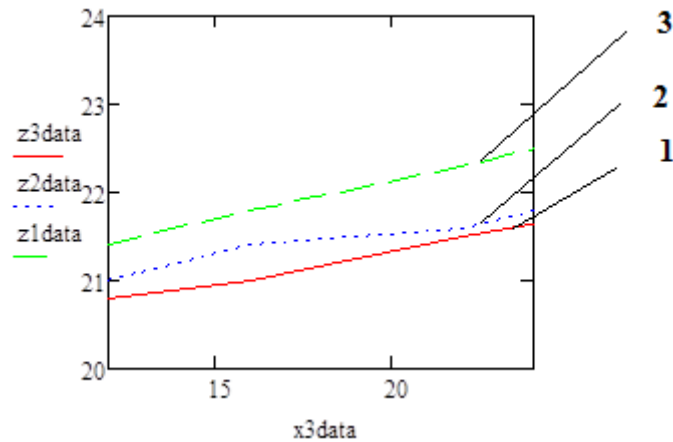


Рисунок 2.2 – Распределение температуры от влажности продукта

1) $h = 0,5 \text{ m}$, 2) $h = 1,0 \text{ m}$, 3) $h = 1,5 \text{ m}$

$$t_0 = t_{1\Pi} = t_{2\Pi} = 16^\circ\text{C}; \quad q_1 = 0,01 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}; \quad q_2 = 0,02 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}};$$

$$\alpha = 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \quad c = 1,6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad k = 2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{с}}; \quad \tau = 3600 \text{ с}.$$

Для режимов хранения не отвечающим принятым допущениям решение может иметь существенные погрешности по сравнению с реальным распределением поля температур, что для его практического использования требует дополнительной экспериментальной проверки.

2.1.2. Исследование тепло- и массопереноса в насыпях пищевого сырья при наличии очагов самосогревания

Рассмотрим модель аналитического уточнения режимов тепло-массопереноса в условиях близких к реально реализуемым вариантам хранения большинства видов зерновых, предназначенных для переработки в пищевых целях. Органолептические методы, распространенные в пищевой промышленности, в частности при оценке качества сельскохозяйственного сырья, после его хранения, часто приводят к значительным потерям его и влияют на эффективность работы всего агропромышленного комплекса. Это требует более

точного расчетного представления о влиянии режимов, контролируемых приборами, установленными в соответствующих хранилищах, для компенсации нежелательных изменений под действием биологических процессов происходящих в насыпях пищевого сырья. Рассматриваемая модель, таким образом, представляет интерес, как для разработчиков соответствующего измерительного оборудования, так и в целом для работников пищевых отраслей. В ней рассмотрен один из вариантов решения задачи о хранения насыпей пищевого сырья в цилиндрических силосах с влаготеплоизолированными боковыми и влагоизолированными торцевыми поверхностями, где на границах слоя семян с окружающей средой температура изменяется в соответствии с изменением температуры атмосферного воздуха. Аналитически решение соответствующей краевой задачи осуществлялось методом интегрального преобразования Лапласа. Полученные аналитические решения удобны для инженерных расчетов и могут быть применены для более точного определения температуры в каждый момент процесса хранения в любой точке насыпи, что позволяет своевременно принимать меры средствами применяемой автоматики.

Одновременно решается задача аналитического исследования распределения температуры и влагосодержания в насыпях пищевого сырья при наличии очагов повышенной температуры в виде греющего пласта – источника интенсивности тепловыделения.

При рассматриваемом способе хранения пищевого сырья в цилиндрических силосах с влаготеплоизолированными боковыми и влагоизолированными торцевыми поверхностями на границах насыпей пищевого сырья с окружающей средой температура изменяется в соответствии с изменением температуры атмосферного воздуха.

Насыпь пищевого сырья в башне силосного типа с математической точки зрения можно принять за неограниченную пластину (конечный стержень с тепломассоизолированной поверхностью).

Краевая задача совместного тепло–массопереноса для сформулированных условий может быть записана следующим образом: требуется решить систему

дифференциальных уравнений типа теплопроводности [3, 20, 22, 28, 44–47] для трехслойного однородного и изотропного тела основной геометрической формы (конечного стержня) с необходимыми начальными и граничными условиями, отражающими реальную связь насыпи пищевого сырья с окружающей средой:

$$\text{I – для нижнего слоя } (0 < x < h, \tau > 0) \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_q \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon \rho}{c_q} \frac{\partial u_1(x, \tau)}{\partial \tau}, \\ \frac{\partial u_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_m \frac{\partial^2 u_1(x, \tau)}{\partial x^2} + \alpha_m \delta \frac{\partial t_1^2(x, \tau)}{\partial x^2} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$u_1(x, 0) = u_{10} = \text{const},$$

$$t_1(0, \tau) = \bar{t}_0 + t_m \cos(\omega(\tau + \tau_0)), \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial u_1(0, \tau)}{\partial x} + \delta \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (2.20)$$

$$t_1(h, \tau) = t_2(h, \tau), \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial t_1(h, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t_2(h, \tau)}{\partial x}, \quad (2.22)$$

$$u_1(h, \tau) = u_2(h, \tau), \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial u_1(h, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial u_2(h, \tau)}{\partial x}; \quad (2.24)$$

II – для слоя («пласта») с переменным источником теплоты ($h < x < l, \tau > 0$)

$$\begin{cases} \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_q \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon \rho}{c_q} \frac{\partial u_2(x, \tau)}{\partial \tau} + \frac{q(\tau)}{c_q}, \\ \frac{\partial u_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_m \frac{\partial^2 u_2(x, \tau)}{\partial x^2} + \alpha_m \delta \frac{\partial t_2^2(x, \tau)}{\partial x^2} \end{cases} \quad (2.25)$$

$$t_2(x, 0) = t_{20} = \text{const}, \quad (2.26)$$

$$u_2(x, 0) = u_{20} = \text{const}, \quad (2.27)$$

$$t_2(l, \tau) = t_3(l, \tau), \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial t_2(l, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t_3(l, \tau)}{\partial x}, \quad (2.29)$$

$$u_2(l, \tau) = u_3(l, \tau), \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial u_2(l, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial u_3(l, \tau)}{\partial x} \quad (2.31)$$

III – для верхнего слоя ($l < x < H, \tau > 0$)

$$\begin{cases} \frac{\partial t_3(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_q \frac{\partial^2 t_3(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon \rho}{c_q} \frac{\partial u_3(x, \tau)}{\partial \tau}, \\ \frac{\partial u_3(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_m \frac{\partial^2 u_3(x, \tau)}{\partial x^2} + \alpha_m \delta \frac{\partial t_3^2(x, \tau)}{\partial x^2} \end{cases} \quad (2.32)$$

$$t_3(x, 0) = t_{30} = \text{const}, \quad (2.33)$$

$$u_3(x, 0) = u_{30} = \text{const}, \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial u_3(H, \tau)}{\partial x} + \delta \frac{\partial t_3(H, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (2.35)$$

$$t_3(H, \tau) = \bar{t}_0 + t_m \cos(\varphi\omega(\tau + \tau_0)), \quad (2.36)$$

где $t_i(x, \tau)$ – температура слоя i ($i=1, 2, 3$); t_{i0} – начальная температура соответствующего слоя, принимаем в дальнейшем, $t_{i0}=t_0$;

$u_i(x, \tau)$ – влагосодержание i -того слоя насыпи пищевого сырья,

$u_{i0}=u_0$ начальное влагосодержание;

x – координата;

τ – время;

α_q – коэффициент теплопроводности;

α_m – коэффициент влагопроводности;

ε – коэффициент фазового превращения;

ρ – удельная теплота фазового превращения;

c_q – удельная теплоемкость насыпи пищевого сырья;

δ – термоградиентный коэффициент;

\bar{t}_0 – средняя температура атмосферного воздуха;

t_m – амплитуда колебания температуры атмосферного воздуха;

$\omega = \frac{2\pi}{p}$; p – период колебаний температуры атмосферного воздуха;

τ_0 – сдвиг во времени момента закладки насыпей пищевого сырья в хранилище от момента летнего максимума температуры атмосферного воздуха;

$q(\tau)$ – удельная теплота дыхания насыпи пищевого сырья.

При постановке задачи рассматриваются уравнения теплопереноса и уравнения влагопереноса.

Кроме того для сформулированной задачи записаны начальные условия и граничные условия четвертого рода, определяющие равенство температур, влагосодержаний и их потоков на границах соответствующих слоев.

Для описания взаимодействия насыпи с окружающей средой посредством задания температуры на поверхности слоя выбраны граничные условия первого рода [62].

Замыкают систему уравнений условия теплоизоляции.

В уравнениях слагаемое $\frac{q(\tau)}{c_q}$ описывает источник тепла.

В данном исследовании берем $q(\tau) = q_1 + q_2 \exp(-k\tau)$, где $k = \text{const} > 0$ [24]. Из-за громоздкости выражений для полей температур и влагосодержаний краевой задачи приведем решение соответствующей задачи теплопереноса, заключающейся в решении уравнения теплопроводности для всех насыпей пищевого сырья с необходимыми начальными и граничными условиями:

для нижнего слоя ($0 < x < h, \tau > 0$)

$$\frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (2.37)$$

$$t_1(x, 0) = t_0, \quad (2.38)$$

$$t_1(h, \tau) = t_2(h, \tau), \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial t_1(h, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t_2(h, \tau)}{\partial x}, \quad (2.40)$$

$$t_1(0, \tau) = \bar{t}_0 + t_m \cos(\omega(\tau + \tau_0)), \quad (2.41)$$

для «пласта» ($h < x < l, \tau > 0$)

$$\frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q(\tau)}{c}, \quad (2.42)$$

$$t_2(x, 0) = t_0, \quad (2.43)$$

$$t_2(l, \tau) = t_3(l, \tau), \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial t_2(l, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t_3(l, \tau)}{\partial x}, \quad (2.45)$$

для верхнего слоя ($1 < x < H, \tau > 0$)

$$\frac{\partial t_3(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t_3(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (2.46)$$

$$t_3(x, 0) = t_0, \quad (2.47)$$

$$t_3(H, \tau) = \bar{t}_0 + t_m \cos(\omega(\tau + \tau_0)), \quad (2.48)$$

Аналитическое решение краевой задачи, записанной выше, получено методом интегрального преобразования Лапласа.

Поля температур по слоям насыпей пищевого сырья представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned}
T_1(X, Fo) &= 1 + Po_1 k_\Delta \left(1 - \left(\frac{k_\Delta}{2} + k_h \right) \right) X + \frac{2Po_2}{Pd_k} \times \\
&\times \frac{\sin(\sqrt{Pd_k} \frac{k_\Delta}{2}) \sin\left(\sqrt{Pd_k} \left(1 - \left(k_h + \frac{k_\Delta}{2} \right) \right)\right) \sin \sqrt{Pd_k} X}{\sin \sqrt{Pd_k}} \exp(-Pd_k Fo) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \cdot \\
&\Phi_n \sin(n\pi x) \exp(-(n\pi)^2 Fo) + \Phi_{1\omega}; \quad (2.49) \\
T_2(X, Fo) &= 1 - \frac{Po_1}{2} [k_n^2 (1 - X) + k_1 (k_1 - 2) X + X^2] + \frac{Po_2}{Pd_k} \times \\
&\times \left[\frac{\cos(\sqrt{Pd_k} k_h) \sin(\sqrt{Pd_k} (1 - X) + \cos(\sqrt{Pd_k} (1 - k_1) \sin(\sqrt{Pd_k} X))}{\sin \sqrt{Pd_k}} - 1 \right] \\
&\times \exp(-Pd_k Fo) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \cdot \Phi_n \sin(n\pi x) \exp(-(n\pi)^2 Fo) + \Phi_{2\omega}; \\
T_3(X, Fo) &= 1 + Po_1 k_\Delta \left(k_h + \frac{k_\Delta}{2} \right) (1 - X) + \frac{2Po_2}{Pd_k} \times \\
&\frac{\sin\left(\sqrt{Pd_k} \left(k_h + \frac{k_\Delta}{2} \right)\right) \sin\left(\sqrt{Pd_k} \frac{k_\Delta}{2}\right) \sin \sqrt{Pd_k} (1 - X)}{\sin \sqrt{Pd_k}} \exp(-Pd_k Fo) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \cdot \\
&\Phi_n \sin(n\pi x) \exp(-(n\pi)^2 Fo) + \Phi_{3\omega}; \quad (2.50)
\end{aligned}$$

где $T_i(X, Fo) = \frac{t_i(x, \tau) - t_0}{\bar{t}_0 - t_0}$ – безразмерная температура ($i=1.2.3$);

$$\begin{aligned}
\Phi_n &= ((-1)^n - 1) \left(1 + \frac{T_m \cos(Pd_\omega Fo + \varphi)}{\sqrt{1 + \left(\frac{Pd_\omega}{(n\pi)^2} \right)^2}} \right) + \\
&+ \frac{2}{1 - \frac{(n\pi)^2}{Pd_k}} \left(\frac{Po_0}{Pd} - \frac{Po_1}{(n\pi)^2} \right) \sin \frac{n\pi k_\Delta}{2} \left(n\pi \left(k_h + \frac{k_\Delta}{2} \right) \right); \quad (2.51)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Phi_{1\omega} &= \Phi_{3\omega} = \frac{T_m}{(\text{chacos}\alpha)^2 + (\text{shasin}\alpha)^2} \times \\
&\times [\cos(Pd_\omega (Fo + Fo_0)) (\text{chacos}\alpha_x \text{cos}\alpha_x + \text{shasin}\alpha_x \text{sin}\alpha_x) - \\
&-\sin(Pd_\omega (Fo + Fo_0)) (\text{chacos}\alpha_x \text{sin}\alpha_x - \text{shasin}\alpha_x \text{sin}\alpha_x)]; \quad (2.52)
\end{aligned}$$

$$\Phi_{23} = \frac{T_m}{(chasin\alpha)^2 + (shacos\alpha)^2} \times$$

$$\times [\cos(Pd_\omega(Fo + Fo_0)) (chasin\alpha_x \sin\alpha_x + shacos\alpha_x \cos\alpha_x) -$$

$$-\sin(Pd_\omega(Fo + Fo_0)) (shacos\alpha_x \sin\alpha_x - chasin\alpha_x \cos\alpha_x)]; \quad (2.53)$$

$Fo = \frac{\alpha\tau}{H^2}, Fo_0 = \frac{\alpha\tau_0}{H^2}$ – число Фурье;

$$Po_i = \frac{q_i H^2}{\alpha c \Delta t} \text{ – число Померанцева } (i = 1, 2),$$

$$Po_0 = Po_1 + Po_2; \quad (2.54)$$

$$Po_k = \frac{kH^2}{\alpha}, Pd_\omega = \frac{\omega H^2}{\alpha} \text{ – числа Предводителя;}$$

$$X = \frac{x}{H}; k_l = \frac{l}{H}; k_h = \frac{h}{H}; k_\Delta = k_l - k_h; \quad (2.55)$$

$$T_m = \frac{t_m}{\Delta t}, \Delta t = \bar{t}_0 - t_0; \quad (2.56)$$

$$\varphi = \arctg \frac{Pd_\omega}{(n\pi)^2}; \alpha = \sqrt{\frac{Pd_\omega}{8}}; \alpha_x = \sqrt{\frac{Pd_\omega}{8} (1 - 2X)}. \quad (2.57)$$

При достаточно большом времени процесса хранения, т.е. для $\tau \rightarrow \infty$, решения упрощаются и температуры насыпи пищевого сырья вне слоя с источником тепла будут равны

$$t_1(x, \tau)|_{\tau \rightarrow \infty} = \bar{t}_0 + \frac{q_1 \Delta h}{\alpha c} \left(1 - \frac{l+h}{H}\right) x;$$

$$t_1(x, \tau)|_{\tau \rightarrow \infty} = \bar{t}_0 + \frac{q_1 \Delta h}{\alpha c} \frac{l+h}{2} \left(1 - \frac{x}{H}\right).$$

В этом случае рассматриваемые распределения температур зависят от теплофизических свойств насыпи пищевого сырья, высоты слоя (пласта) с источником самосогревания $\Delta h = l - h$, средней температуры атмосферного воздуха, составляющей источника теплоты q_1 и точек в насыпи пищевого сырья, в которых возникает очаг самосогревания.

Рассмотрим упрощенную задачу, для которой

$$t_1(0, \tau) = t_{1\Pi} = const;$$

$$t_3(H, \tau) = t_{2\Pi} = const;$$

т.е. температура поверхности насыпи насыпях пищевого сырья, примыкающей к основанию силосной башни («подложки») и температура верхней поверхности башни остаются неизменными во все время процесса хранения.

В этом случае распределения температур будут следующими:

$$\begin{aligned}
 t_1(x, \tau) = & t_{1\Pi} + \left[t_{2\Pi} - t_{1\Pi} + \frac{q_1 \Delta h}{\alpha c} \left(H - \left(h + \frac{\Delta h}{2} \right) \right) \right] \frac{x}{H} + \\
 & + \frac{2q_2}{ck} \cdot \frac{\sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} x\right)}{\sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} H\right)} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} \left(H - \left(h + \frac{\Delta h}{2} \right) \right)\right) \sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} \frac{\Delta h}{2}\right) \exp(-k\tau) - \\
 & - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(n\pi)^3} \cdot \bar{\Phi}_n \sin\left(\frac{n\pi x}{H}\right) \exp\left(- (n\pi)^2 \frac{\alpha\tau}{H^2}\right); \quad (2.58)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_2(x, \tau) = & t_{1\Pi} + \left[t_{2\Pi} - t_{1\Pi} + \frac{q_1}{\alpha c} \left(h(H - \Delta h) + \Delta h \left(H - \frac{\Delta h}{2} \right) \right) \right] \frac{x}{H} + \\
 & + \frac{q_2}{ck} \cdot \exp(-k\tau) \cdot \left[\cos\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} h\right) \cos\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} x\right) + \sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} l\right) \sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} x\right) - 1 - \right. \\
 & - 2ctg\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} H\right) \sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} \left(h + \frac{\Delta h}{2} \right)\right) \sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} \frac{\Delta h}{2}\right) \sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} x\right) \left. \right] - \\
 & - \frac{q_1}{2\alpha c} (h^2 + x^2) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(n\pi)^3} \cdot \bar{\Phi}_n \sin\left(\frac{n\pi x}{H}\right) \exp\left(- (n\pi)^2 \frac{\alpha\tau}{H^2}\right); \quad (2.59)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_3(x, \tau) = & t_{1\Pi} + \frac{q_1 \Delta h}{\alpha c} \left(h + \frac{\Delta h}{2} \right) \left[t_{2\Pi} - t_{1\Pi} - \frac{q_1 \Delta h}{\alpha c} \left(h + \frac{\Delta h}{2} \right) \right] \frac{x}{H} + \\
 & + \frac{2q_2}{ck} \cdot \frac{\sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} \left(h + \frac{\Delta h}{2} \right)\right) \sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} \frac{\Delta h}{2}\right)}{\sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} H\right)} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{\alpha}} (H - x)\right) \exp(-k\tau) - \\
 & - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(n\pi)^3} \cdot \bar{\Phi}_n \sin\left(\frac{n\pi x}{H}\right) \exp\left(- (n\pi)^2 \frac{\alpha\tau}{H^2}\right); \quad (2.60) \\
 & (h < x < l = h + \Delta h)
 \end{aligned}$$

Здесь

$$\bar{\Phi}_n = (n\pi)^2 [t_{1\Pi} - t_o - (-1)^n (t_{2\Pi} - t_o)] + \frac{2H^2}{\alpha c} \left(q_1 + \frac{q_2}{1 - \frac{kH^2}{\alpha(n\pi)^2}} \right) \times \sin \left(\left(h + \frac{\Delta h}{2} \right) \frac{n\pi}{H} \right) \cdot \sin \left(\frac{\Delta h}{2} \frac{n\pi}{H} \right). \quad (2.61)$$

В связи с приведенными замечаниями к формулам краевых условий роль средней температуры атмосферного воздуха играют температура основания семенной башни и разность температур верхней и нижней поверхностей насыпи пищевого сырья, которыми можно управлять и тем самым предупреждать несанкционированный перегрев. По полученным формулам произведен расчет распределения температуры по высоте насыпи пищевого сырья.

$$t_1(x, \tau) \Big|_{\tau \rightarrow \infty} = t_{1\Pi} + \left[t_{2\Pi} - t_{1\Pi} + \frac{q_1 \Delta h}{\alpha c} \right] \times$$

Размеры элеватора силосного типа взяты из работы [31]: $H = 9$ м. Расчетные параметры и теплофизические характеристики следующие:

$$h = 0,4H; \quad 1) \Delta h = 1 \text{ м}; \quad 2) \Delta h = 0,5 \text{ м};$$

$$t_o = t_{1\Pi} = t_{2\Pi} = 16^\circ\text{C}; \quad q_1 = 0,01 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}; \quad q_2 = 0,02 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}};$$

$$\alpha = 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \quad c = 1,6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad k = 2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{с}}; \quad \tau = 80 \text{ суток}.$$

Результаты расчета представлены на рисунке 2.3, из анализа которого можно сделать вывод о росте температуры до критической для хранения насыпи пищевого сырья при ширине слоя с очагом самосогревания, приближающемся к 0,5 м при выбранных условиях хранения (кривая 2).

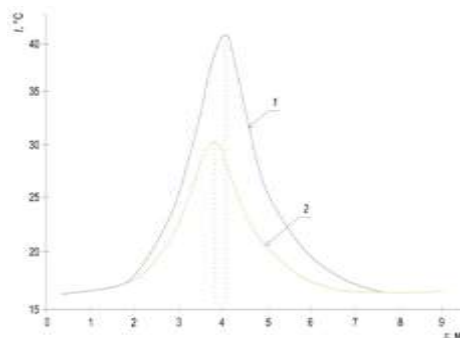


Рисунок 2.3 – Распределение температуры по высоте слоя пищевой насыпи:
1 – $\Delta h = 1$ м; 2 – $\Delta h = 0,5$ м.

Выполненные расчеты дают несколько завышенные значения температур, что способствует более раннему предупреждению самовозгорания насыпей пищевого сырья.

Полученные аналитические решения удобны для инженерных расчетов и могут быть применены для определения температуры в каждый момент процесса хранения в любой точке насыпи пищевого сырья.

Таким образом, с помощью разработанной математической модели можно прогнозировать безопасные условия хранения насыпей пищевого сырья, скорость изменения их температуры, предупреждать их самосогревание, сохраняя тем самым высокое качество пищевого сырья в насыпях.

2.2. Особенности кинематики перемещения зерна в процессе вентиляции

У любого ворошителя шнекового типа есть режим функционирования, при котором данное оборудование работает максимально эффективно. Параметром, от которого зависит режим функционирования ворошителя, является скорость его вращения. Таким образом, необходимо обнаружить такую скорость вращения, при которой ворошитель будет работать максимально эффективно. С этой целью были предприняты расчеты, проведенные в соответствии с упрощенной теорией [108, 111, 112]. В процессе расчетов были приняты несколько допущений. Во-первых, масса зерна, помещаемая в шнек для обработки, считалась несжимаемой. Во-вторых, при расчетах не было учтено воздействие линейной вязкости. В-третьих, предполагалось, что зерно перемещается в шнеке изотермическим способом. На рисунке 2.4 продемонстрирована схема канала ворошителя, для которого произведены расчеты.

Также было сделано предположение, в соответствии с которым диаметр ворошителя (внешний) и диаметр лопастного цилиндра (внутренний) обладают тождественными значениями. Иными словами, пространства, по которому зерно

могло бы возвращаться обратно, не возникает. В этом случае определить, какой является скорость вращения ворошителя, можно, пользуясь формулой (2.62):

$$V_z = \frac{\pi D n}{60} \cos \varphi, \quad (2.62)$$

где V_z – проекция скорости, с которой происходит вращение ворошителя, по оси X (при этом принимается, что $y=h$);

n – угловая скорость, с которой движется шнековый аппарат; , мин⁻¹;

D – внешний диаметр шнекового оборудования, м;

φ – угол, на который поднимается шнековая винтовая линия, град.

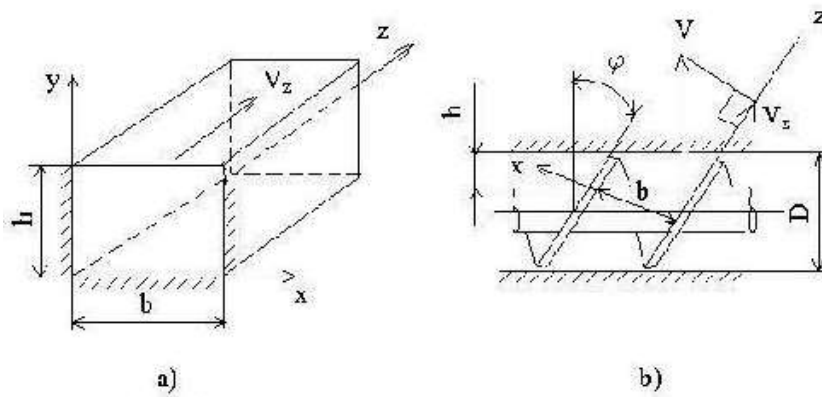


Рисунок 2.4 – Устройство ворошительного оборудования шнекового типа

Ниже приведена формула, в соответствии с которой рассчитывается скорость перемещения обрабатываемого зерна (по оси Z):

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z, \quad (2.63)$$

где t – длительность обработки, мин;

v_z – проекция скорости на ось Z, м/с;

χ – показатель объемной вязкости, Пас;

τ_{zz}, τ_{yz} – составляющие тензора касательных напряжений;

z – координата;

τ_z – компонента касательных напряжений по оси Z;

ρ – плотность, кг/м³;

g_z – сила тяжести, Н/кг.

Таким образом, рассчитать движение нагнетателя червячного типа можно, пользуясь выражением (2.64):

$$\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right). \quad (2.64)$$

Предположим, что скорость, с которой передвигается зерновая масса, является мало зависящей от x .

В этом случае:

$$Q = b \int_0^h v_z(y) dy = \frac{V_z b h}{2} - \frac{b h^3}{12 \mu} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right). \quad (2.65)$$

где Q – объем обрабатываемой зерновой массы, кг/м²;

μ – вязкость обрабатываемого сырья, м²/с.

Обратим внимание, что выражение (2.65) было получено в результате ряда упрощений и не соответствует теоретическим положениям. Однако на практике такие упрощения, как правило, могут быть введены, поскольку получаемое в результате их использования выражение дает результаты, в целом соответствующие специфике пищевого производства. Полученные результаты проведённых расчетов предлагается представить в графическом виде (рисунок 2.5 и 2.6), записав их в явном для скорости перемещения зерновой массы по оси шнека V_z виде и полагая, что $b = h = D/2$. Дополнительно в расчетах полагали, что $Q = 100$ кг/м², $D = 2-3$ м, $dp/dz = 1-3$ кг/с·м² и $\mu = 12-16$ м²/с (напор и условную кинематическую вязкость перед расчётом нормировали, привязав к общепринятым значениям этих характеристик). Следует отметить, что для ожидаемого характера изменения скорости перемещения зерновой массы (рисунок 2.5) явно прослеживается экстремальный характер кривых, что говорит о предпочтительности выбора диаметра шнекового ворошителя для зерна различных влажностей.

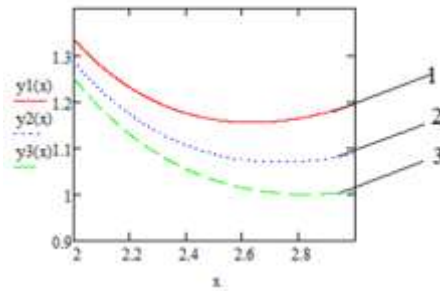


Рисунок 2.5 – Скорость перемещения зерновой массы вдоль лопасти при различной влажности зерна:
1 – 12 %, 2 – 14 %, 3 – 16 %

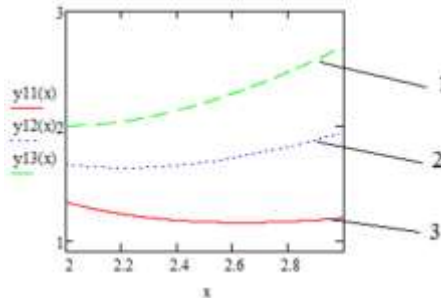


Рисунок 2.6 – Скорость перемещения зерновой массы вдоль лопасти при различном напоре:
1 – 3 кг/с·м²; 2 – 2 кг/с·м²; 3 – 1 кг/с·м²

Так, например, для диаметра шнекового ворошителя 2,6 м и влажности зерна 12 %, скорость его перемещения минимальна, но возрастает с увеличением диаметра витков ворошителя. Это связано, по-видимому, с возрастанием центробежной силы, которой становится достаточно для перемещения высушенных зерен. В то же время кривые (рис. 2.6) говорят об изменении характера убывания скорости при малых напорах к возрастанию при больших напорах. Так, например, даже более сухое зерно ($W = 12\%$) перемещается медленнее, чем более влажное ($W = 16\%$) при существенном снижении теплоносителя от 3 кг/с·м² до 1 кг/с·м². Обе группы графиков говорят о неравномерности распределения скоростей вдоль лопасти ворошителя в процессе работы, а значит о наличии ускорений и следовательно изменении действующих сил на различные участки лопастей ворошителя при изменении его диаметра. Эти обстоятельства обязательно должны учитываться при проектировании ворошителей и при их эксплуатации.

Предложенные конструктивные решения совершенствования технологического оборудования позволили реализовать принцип динамического

активного вентилирования зерновой массы. Расчеты скорости перемещения зерновой массы по оси шнека такого рода ворошителей могут быть реализованы с помощью подходов упрощенной линейной теории шнека. Проведенные выкладки дают возможность определить основные геометрические характеристики для ворошения зерна в процессе его вентилирования. Так, например, при влажности зерна 12 %, скорость его перемещения возрастает с увеличением диаметра витков ворошителя. Не менее важно установление роли давления подаваемого при сушке теплоносителя, особенно для предложенной конструкции динамического активного вентилирования. Более влажное (16 %) зерно целесообразно сушить при существенном повышении пиковых давлений теплоносителя до $3 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$, что может быть, в частности, реализовано частотой и диаметром перфорации цилиндрических стоек воздуховода. Геометрия самого канала и характер расположения (горизонтальный, вертикальный или наклонный) может выбираться для конструкции хранилища.

Таким образом, выполненный анализ показал, что повышение сохранности зерна можно достичь путем использования его ворошения при динамическом активном вентилировании с помощью шнекового ворошителя, причем количество перемещаемого зерна Q напрямую связано с таким параметром ворошителя, как его диаметр, для известной влажности обуславливающей коэффициент μ .

2.3. Моделирование механических нагрузок элементов оборудования для сушки зерна активным вентилированием

2.3.1. Конструктивные особенности и нагрузки на лопасти ворошителей для активного вентилирования зерна

Специфика гетерогенной среды, которую представляет подвергаемое активному вентилированию в процессе сушки сохраняемое в бункере зерно, характеризующееся наличием уплотнений в виде участков продукта повышенной

влажности, накладывает определенную специфику на конструкцию отдельных узлов ворошителя.

В зернохранилищах используют большое количество технологических приемов обеспечения предотвращения загнивания зерна, причиной чего являются повышение его температуры и влажности из-за происходящих биологических процессов в насыпях продукта. Одним из выходов из такой ситуации является обеспечение активного вентилирования зернохранилищ. Среди разнообразных конструктивных решений реализующих такой метод повышения сохранности зернового продукта является использование специальных ворошителей. Значительное количество таких устройств содержит в своем составе специальные шнеки, от конструкции и режимов эксплуатации которых, существенно зависит снижение отходов зерна после хранения. Задача определения оптимальной связи конструктивных и технологических свойств таких устройств является, таким образом, актуальной задачей.

Уменьшение потерь, возникающих при долговременном хранении зерна, связано с поддержанием в элеваторах влажности воздуха, превышающей 15-20%. Необходимость соблюдения этого условия связана с тем, что при достижении такой влажности воздуха зерно начинает «дышать», причем потеря его массы резко снижается. Однако активизация «дыхания» пшеницы, в свою очередь, приводит к тому, что в зерне появляются микроорганизмы, размножение которых приводит к увеличению интенсивности гниения. Для недопущения появления таких микроорганизмов в элеваторах необходимо поддерживать постоянное вентилирование. Все сказанное выше доказывает, что оптимальными условиями хранения пшеницы являются такие, при которых соблюдается необходимая влажность воздуха, а также поддерживается требуемая скорость его движения.

На рисунке 2.6 продемонстрирована схема ворошительного оборудования, применяемая в хранилищах, предназначенных для долговременного размещения пшеницы. Такое ворошительное оборудование обладает корпусом, выполненным в форме цилиндра. Оно монтируется на стенах зернового хранилища.

Применение ворошительного оборудования обеспечивает надлежащую скорость перемещения воздушных масс в хранилище. Достигается данная скорость благодаря функционированию двух цилиндров, находящихся в едином

корпусе и имеющих несколько лопастей. Оба цилиндра соединены между собой. В процессе работы ворошителя обрабатываемая зерновая масса перемещается через сквозные окна, что приводит к ее равномерному распределению.

При использовании оборудования рассматриваемого типа температура, при которой хранится зерно, снижается. Становится меньше и влажность воздуха в зерновом хранилище. Такой результат становится возможным благодаря тому, что в ворошителе присутствует два цилиндра, которые вращаются одновременно. Поскольку они ориентированы противоположным образом относительно друг друга, то цилиндр, расположенный снаружи ворошителя, поднимает зерновую массу и, перемещая ее в направлении, способствует тому, чтобы пшеница оказалась в ином цилиндре. Когда зерно попадает в цилиндр, расположенный внутри ворошителя, оно опускается вниз. В процессе перемещения зерновой массы оно испытывает воздействие со стороны воздушного потока, попадающего в ворошитель благодаря перфорации. Поскольку пшеница в процессе хранения перманентно перемещается, она не слеживается и не образует собой единую массу. В свою очередь, движение воздушных масс позволяет поддерживать в хранилище такой прогрев и влажность воздуха, которые способствуют максимально длительному хранению зерна [10-12].

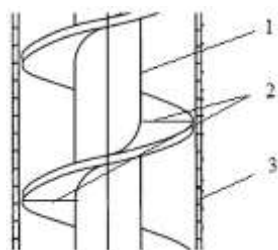


Рисунок 2.7 – Схема ворошительного оборудования шнекового типа

1 – Корпус;

2 – Шнековые витки ; 3 – Перфорация, необходимая для попадания воздуха внутрь корпуса

Действующие на элементы ворошителя нагрузки можно проследить на схеме (рисунок 2.8). На этапе загрузки продукта продукт поступает внутрь корпуса 1 на лопасть 2, по которой ссыпается вниз корпуса, заполняя пространство между внутренней стенкой корпуса и наружной стенкой внешнего перфорированного цилиндра. Одновременно он попадает внутрь внутреннего перфорированного цилиндра и также заполняет все его пространство. Через определенное время для вентилирования продукта подают, при необходимом

давлении, сухой теплый воздух. Одновременно с этим приводят во вращение, обеспечивающее подъем продукта вверх, внутренний перфорированный цилиндр 1 с лопастями 2. Перемещаясь вверх, продукт через перфорацию во внутреннем цилиндре, обдуваясь потоком воздуха, отдает излишки температуры и влаги. Поступая на лопасти 2, он давит на них, а они в свою очередь опираются на нижележащее зерно (q), реализуя схему нагрузки «балка на упругом основании). Одновременно просыпающееся между концами лопасти 2 и перфорированным цилиндром 3 зерно, воздействует на лопасть с силой P_1 , а за счет определенного угла разворота лопасти в сторону вращения, в направлениях перпендикулярных оси лопасти шнека, возникают сила P_3 из-за сопротивления зерна и сила P_2 возникающая за счет вдуваемого теплого сухого воздуха.

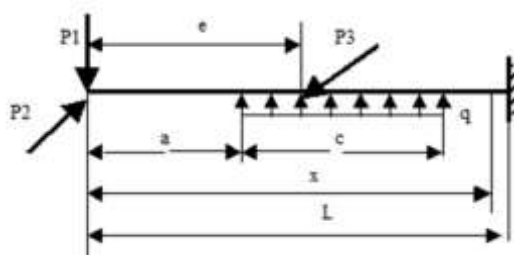


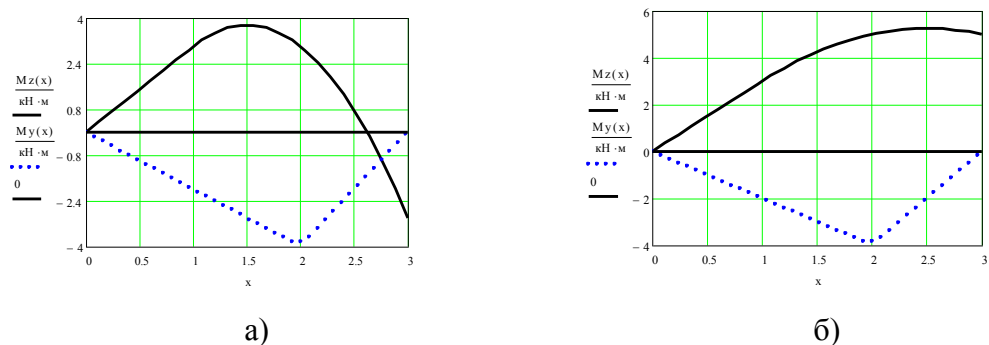
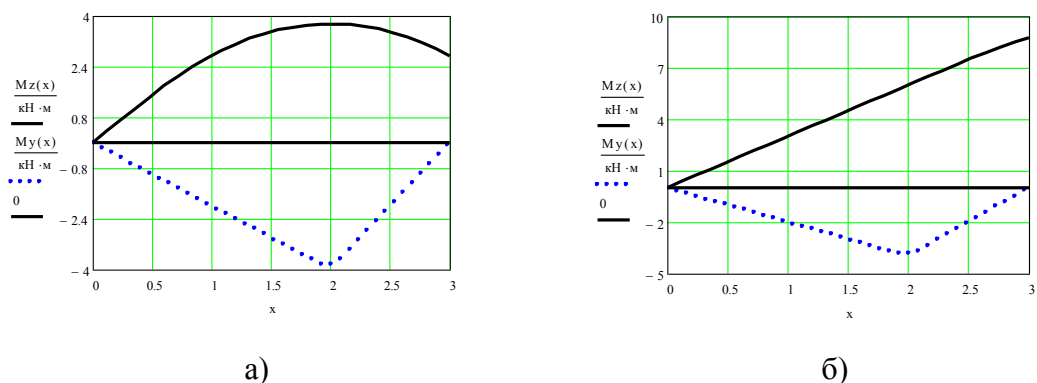
Рисунок 2.8 – Расчетная схема лопасти шнека

Анализ нагруженности лопатки шнека можно провести в Mathcad по специальной программе (рисунок 2.8). При проведении расчетов приняты следующие величины параметров: $L = 3$ м, $e = 2$ м, $c + a = L$. Анализ результатов расчета позволяет сделать несколько важных для регулирования работы ворошителя выводов. Так, например, изменение величины нагрузки q , связанной прежде всего с плотностью упаковки зерна в межвитковом зазоре или с влажностью смещает максимум изгибающего момента в сторону заделки.

То есть при работе с влажным зерном важна прочность крепления витков шнека к внутреннему корпусу. С другой стороны, увеличение расстояния a и уменьшение c , требует усиления периферии витка шнека, поскольку максимум изгибающего момента сдвигается в сторону схода зерна с витка шнека.

$$\begin{aligned}
 & \text{Н} := \text{N} \quad \text{м} := \text{m} \quad \text{град} := \text{deg} \quad \text{кН} := 1000 \cdot \text{N} \\
 & \text{мм} := 0.001 \cdot \text{m} \quad \text{см} := 0.01 \cdot \text{m} \quad \text{МПа} := 10^6 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \\
 & P_1 := 3 \cdot \text{кН} \quad P_2 := 2 \cdot \text{кН} \quad P_3 := 6 \cdot \text{кН} \quad q := 2 \cdot \frac{\text{кН}}{\text{м}} \\
 & a := 2 \cdot \text{м} \quad c := 3 \cdot \text{м} \quad e := 4 \cdot \text{м} \quad L_{\text{дуп}} := 6 \cdot \text{м} \quad \sigma_{\text{доп}} := 10 \cdot \text{МПа} \quad \text{дерево} \\
 & M_z(x) := \begin{cases} P_1 \cdot x & \text{if } x \leq a \\ [P_1 \cdot x - 0.5 \cdot q \cdot (x - a)^2] & \text{if } a < x \leq a \\ \begin{cases} [-P_2 \cdot x] & \text{if } x < e \\ [P_1 \cdot x - q \cdot c \cdot (x - a - \frac{c}{2})] & \text{otherwise} \end{cases} & \text{otherwise} \\ [-P_2 \cdot x + P_3 \cdot (x - e)] & \text{otherwise} \end{cases} \\
 & x := 0, \frac{L}{25} .. L
 \end{aligned}$$

Рисунок 2.9 – Программа для ЭВМ

Рисунок 2.10 – Характер изменения изгибающего момента от величины q :а) $q = 2$ КН/м; б) $q = 6$ КН/м.Рисунок 2.11 – Характер изменения изгибающего момента от величины c : $(a + c = 3)$, где а) $c = 2,5$ м; б) $c = 0,5$ м

Изучение нагрузок, которые формируются в процессе функционирования ворошительного оборудования, говорит о следующем. Факторами, воздействующими на эффективность работы такого ворошителя, являются специфика конструкции шнека, а также параметры режимов, в которых производится эксплуатация оборудования. Кроме этого, на том, с какой эффективностью работает шнековый ворошитель, сказывается влажность обрабатываемой пшеницы.

2.3.2. Моделирование особенности нагруженности вала ворошителя зернохранилища при активном вентилировании

При практической реализации идей активного вентилирования особый интерес представляют собой вопросы совершенствования технических средств для обеспечения успешного хранения собранного урожая сельскохозяйственного сырья, в частности зерна. Среди разнообразных конструктивных решений реализующих повышение сохранности зернового продукта является использование специальных ворошителей. Одной из задач, возникающих при создании таких устройств, является задача определения оптимальной связи их конструктивных и технологических свойств.

В настоящее время достаточно широко в схемах активного вентилирования используются шнековые ворошители, устанавливаемые вдоль вертикальной оси зернохранилищ с цилиндрическим корпусом. Расчетная схема такого устройства с действующими нагрузками приведена на рисунке 2.12.

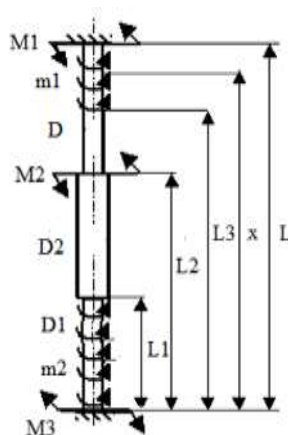


Рисунок 2.12 – Схема шнекового ворошителя в зернохранилище

Надлежащее качество вентилирования гарантируется тем, что в ворошительном оборудовании имеется сразу два цилиндра, оснащенных лопастями. Также ворошитель имеет комплекс отверстий во внешней оболочке, благодаря которым внутрь корпуса попадает воздух. Еще одной составной частью ворошителя является воздуховод, направляющий воздушные потоки таким образом, чтобы они способствовали перемещению пшеницы в нужном направлении. Также в ворошителе имеется несколько сквозных окон, которые

необходимы, чтобы пшеница правильно распределялась между несколькими полостями, где производится вентиляция [64-66].

Благодаря тому, что зерна пшеницы перманентно перемещаются, они не слеживаются и не образуют собой единую массу. А воздушная циркуляция позволяет добиваться таких показателей влажности и прогрева воздуха, которые способствуют максимально длительному хранению зерновой массы.

Действующие на элементы шнекового ворошителя нагрузки можно проследить на приведенной выше схеме. На этапе загрузки продукта продукт поступает внутрь корпуса на лопасти, по которым ссыпается вниз корпуса, заполняя пространство между внутренней стенкой корпуса и наружной стенкой внешнего перфорированного цилиндра и обеспечивая возникновение крутящих моментов m_1 . Одновременно он попадает внутрь внутреннего перфорированного цилиндра и также заполняет все его пространство. Через определенное время для вентилирования продукта подают, при необходимом давлении, сухой теплый воздух. Одновременно с этим ворошитель приводят во вращение за счет вращающего момента M_1 , обеспечивающего подъем продукта вверх [109-113]. Перемещаясь вверх, продукт через перфорацию во внутреннем цилиндре, обдуваясь потоком воздуха, отдает излишки температуры и влаги. Поступая на лопасти, он давит на них, а они в свою очередь опираются на нижележащее слипшееся зерно создавая при избыточной влажности дополнительный момент M_2 . Просыпающееся между концами лопасти и перфорированным цилиндром зерно, воздействует на лопасть с силой, а за счет определенного угла разворота лопасти в сторону вращения, в направлениях перпендикулярных оси лопасти шнека, генерирует момент m_2 .

Анализ результатов расчета позволяет сделать несколько важных для регулирования работы ворошителя выводов (рисунок 2.13).

Так, например, изменение величины момента M_2 , связанной прежде всего с плотностью упаковки зерна в межвитковом зазоре или с влажностью увеличивает максимум касательных напряжений в сечениях вала, делая саму кривую φ (угла сдвига между сечениями) более крутой (рисунок 2.13 б). То есть при работе с

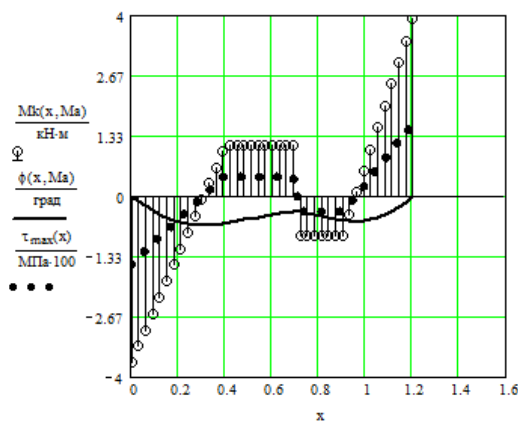
влажным зерном особенно важна прочность несущего стержня ворошителя на срез. С другой стороны падает крутящий момент сопротивления на нижнем срезе шнека, что позволяет несколько упростить его крепление в поддерживающих подшипниках.

решение уравнения неразрывности деформаций $\phi=0$

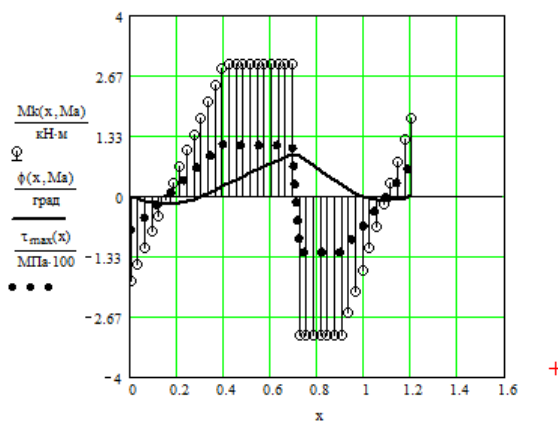
$M_2 := 1 \text{ кН}\cdot\text{м}$ начальное приближение

$$\phi(x, M_2) := \int_0^x \frac{Mk(x, M_2)}{G \cdot Jk(x)} dx \quad M_2 := \text{root}(\phi(L, M_2), M_2) \quad M_2 = 4 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

$$\tau_{\max}(x) := \frac{Mk(x, M_2)}{Wk(x)}$$



а) $M_2 = 2 \text{ кН}\cdot\text{м}$



б) $M_2 = 6 \text{ кН}\cdot\text{м}$

Рисунок 2.14 –Характер изменения важнейших механических характеристик по сечениям вала

Изучение нагрузок, которые формируются в процессе функционирования ворошительного оборудования, говорит о следующем. Факторами, воздействующими на эффективность работы такого ворошителя, являются специфика конструкции шнека, а также параметры режимов, в которых

производится эксплуатация оборудования. Кроме этого, на том, с какой эффективностью работает шнековый ворошитель, сказывается влажность обрабатываемой пшеницы.

2.4. Моделирование средств обеспечения необходимых параметров процесса теплоснабжения активного вентилирования

Как полагают эксперты, в рационе среднестатистического человека продукты питания, произведенные при использовании зерна различных растительных культур, образуют порядка 60%. Наибольшее распространение среди таких продуктов питания получили хлебобулочные изделия, для производства которых необходимым является пшеничное зерно. Это обусловило значительную актуальность проблемных вопросов, возникающих в связи с развитием технологий долговременного хранения пшеничного зерна. Было проведено множество исследований, нацеленных на нахождение наиболее оптимального способа уменьшения потерь зерна вследствие его слеживаемости. Другие специалисты акцентировали внимание на работе, направленной на разработку методов хранения, позволяющих снизить потери зерна вследствие его чрезмерного увлажнения. Отметим, что попадание в зерно влаги приводит к тому, что оно становится неприменимым для применения в пищевом производстве. Таким образом, в процессе сбора урожая и его последующего хранения необходимо не допускать попадания влаги в пшеничное зерно. Как было выявлено в результате множества исследований, объем клейковины, имеющейся в пшеничном зерне, практически не повышается в процессе сбора урожая и его последующего хранения. Однако в это время совершенствуется качество клейковины, что выражается в увеличении ее эластичности. Снижение количества клейковины, выделяемой зерном, а также недопущение контакта между пшеницей и источниками влаги требует помещения зерновой массы в хранилище, где поддерживается низкая влажность воздуха, а сам воздух активно циркулирует по всему объему хранилища.

Отметим, что индустрия производства хлебопекарных продуктов нуждается в инфраструктуре выращивания, сбора и хранения пшеницы. Однако сегодня развитие такой инфраструктуры является сложной задачей, поскольку производители, осуществляющие выпуск пшеницы, как правило, не обладают достаточными мощностями для ее долговременного хранения, а также не имеют возможности инвестировать средства в создание таких мощностей. Из-за этого компании, которыми выращивается пшеница, на долговременное хранение закладывается 20-25% собираемого урожая. Из-за этого хранилища, где размещается зерно, не загружаются на полную мощность. Таким образом, предприятия, выпускающие зерно, не имеют стимула к дальнейшему развитию инфраструктуры для долговременного хранения пшеничного зерна, а также не осуществляют своевременные ремонт и обслуживание уже имеющихся хранилищ. Все сказанное выше негативно сказывается на стоимости хлебопекарной продукции для потребителя.

К числу мер по повышению сохранности необходимого качества зерна относится обеспечение активного вентилирования находящегося в хранилищах зерна для подсушки влаги, выделяемой в процессе его дыхания [95-102].

Большая часть оборудования, применяемого с этой целью, предусматривает периодическую продувку насыпей сохраняемого сыпучего продукта специально подогреваемым воздухом.

2.5. Предпосылки необходимости переработки некондиционного зерна

Полученные выше аналитические решения задач теплообмена при некотором упрощении краевых условий, а также выполненные расчеты отдельных конструктивных элементов зернохранилищ свидетельствуют о значительных резервах по увеличению степени сохранности закладываемых в них зерновых. Вместе с тем, существенные различия в свойствах выращиваемого в разных регионах сырья не исключают возможности несанкционированного воздействия на качество зерна эксплуатационных параметров. Статистика работы

крупных элеваторов и зернохранилищ разных конструкций, включая и те, в которых осуществляется активное вентилирование, говорит о том, что в разные годы количество некондиционного зерна по истечению сроков хранения колеблется от 5 до 20 %.

Так, например, часто при нарушении теплового режима активного вентилирования, появляются зерна испорченные или поврежденные при сушке в процессе самосогревания. Они выделяются одновременно с определением засоренности. В случае, когда в отобранной навеске присутствуют некондиционные зерна, то их количество должно быть рассчитано точно, что делается после отделения мусора. Для этого специалист, отбирающий навеску, должен провести крестообразное деление, в результате которого некондиционное зерно отделяется от качественного зерна. Формула 2.66 используется для определения объема зерен, убранных из основной навески вследствие некондиционности:

$$X = \frac{g_1 \cdot g_2}{g_3} \quad (2.66)$$

где g_1 – суммарная масса некондиционных зерен, удаляемых из дополнительной навески, г;

g_2 – масса качественного зерна, сохранившегося после удаления мусора, а также некондиционного зерна, г;

g_3 – масса основной части зерна, отобранной для определения концентрации некондиционных зерен.

Для определения суммарного количества некондиционных зерен, содержащихся в навеске, имеющей массу в 50 грамм, необходимо воспользоваться формулой (2.67):

$$X = g + x = g + \frac{g_1 \cdot g_2}{g_3} \quad (2.67)$$

где g – суммарная масса некондиционного зерна, удаленного из 50-граммовой навески.

Отметим, что попытки визуального определения объема некондиционных зерен в большинстве случаев не приводят к результатам, имеющим требуемую

степень точности. Связано это с тем, что человеческий глаз, как правило, неспособен отличить характерный оттенок некондиционного зерна от цвета качественного зерна. Таким образом, для выделения некондиционного зерна и его последующего удаления необходимо пользоваться раствором гипохлорита, доведенным до кипящего состояния. Суть этого метода заключается в следующем.

Зерновую массу (10 грамм), в которой нет каких-либо примесей, перемещают в химический стакан, после чего в этот же стакан разливается смесь поваренной соли и гипохлорита (концентрация вещества – 1-2%). При этом необходимо добиться, чтобы раствор полностью скрыл зерновую массу. После этого производится нагревание полученной массы, а после начала кипения отсчитывается 60 секунд, после чего температурная обработка завершается. Затем раствор поваренной соли и гипохлорита удаляется, а оставшаяся зерновая масса двукратно промывается водой с температурой 15-20 градусов. Завершающим этапом обработки является просушка зерна с использованием фильтровальной бумаги. В результате качественное зерно становится белым, а некондиционное зерно не меняет оттенок.

Отметим, что качественным зерном может являться только такое, которое обладает ярко выраженным белым цветом. Если же после обработки у зерна сохраняется даже незначительное потемнение, то оно бракуется.

Современные достижения биотехнологии и биохимии по трансформации пищевого сырья с точки зрения наиболее полного извлечения из него продуктов, представляющих интерес в самых разнообразных сферах материального производства, включая пищевую промышленность, делает недопустимыми такие потери общественно потраченного труда и природных ресурсов.

Создание промышленных технологий и разработка соответствующего оборудования в создавшихся условиях представляет собой важную технико-экономическую задачу.

Выводы по главе

Выполненные в настоящем разделе исследования позволяют решить такие задачи, поставленные для реализации сформулированной в работе цели, как:

создать математическую модель процессов сушки зерна в установках бункерного типа;

предложить методику идентификации параметров разработанной модели для бункерных установок с различными воздухораспределительными системами;

разработать технические решения для распределенной подачи воздуха в бункерных установках.

Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНОВЫХ

3.1. Идентификация параметров модели отвечающих за несанкционированные величины температуры в хранилище

Идентификацию теоретических параметров с экспериментальными проведем путем определения распределения температур по объему насыпи пищевого сырья при его хранении в специализированных силосах. Предполагается, что краевые условия для хранения выбраны максимально соответствующими реальным условиям при активном вентилировании.

Рациональное природопользование, признанное во всем мире доминирующей тенденцией развития экономики, предполагает наиболее полное использование при переработке потребляемого человеком растительного сырья. Существенный вклад в решение этой проблемы вносит правильное хранение собранного сельскохозяйственного сырья на этапе подготовки его к переработке. Учитывая значительное количество в пищевом растительном сырье корнеплодов, зерна и семян, как источников крахмал- и пектин содержащих веществ, становится понятным интерес производителей продуктов питания к условиям и режимам его хранения. Современные хранилища, используемые для этих целей, оснащены разнообразными средствами для обеспечения необходимых тепло-влажностных режимов и даже регулирования состава среды в помещениях непосредственного размещения сохраняемых насыпей крахмал- или пектинсодержащего сырья [41-44].

Ранее приведены решения задачи исследования тепло- массопереноса в насыпях зернового сырья для краевых условий определяемых наличием в насыпи очагов самосогревания, с изменением температуры на границах насыпи в соответствии с температурой окружающей среды [45].

Важным фактором, влияющим на эффективное хранение исследуемых насыпей, является движение воздуха в камерах хранения, которое обеспечивается

активным вентилированием. Оно необходимо для отвода тепла, выделяемого при дыхании растительными объектами, равномерного распределения поступающего охлажденного воздуха в камеры и предотвращения значительного перепада температур. Необходимо правильно регулировать движение воздуха, так как при высокой интенсивности возрастает усушка сырья, а при низкой возможно возникновение очагов порчи в насыпке из-за значительных колебаний температур [46-47].

С этой целью рассмотрим задачу распределения температур в насыпи исследуемого сырья в условиях теплоизолированной боковой поверхности при изменении температур оснований с действующим внутри источником теплоты.

Для условий хранения зернового сырья как сплошной среды в металлическом силосе цилиндрической формы при изменении температуры боковой поверхности с течением времени в оптимальных для хранения пределах (от $t_1 = t_{min}$ до $t_2 = t_{max}$) при теплоизолированных основаниях силоса (или с теплоизолированной боковой поверхностью при изменении температур оснований) с действующим источником теплоты (дыхания сырья) краевую задачу теплопереноса можно сформулировать так: решить уравнение теплопроводности для бесконечного цилиндра (или неограниченной пластины - конечного стержня с теплоизолированной боковой поверхностью - для насыпи небольшой высоты)

$$\frac{\partial t(\xi, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} + \frac{v-1}{\xi} \frac{\partial t(\xi, \tau)}{\partial \xi} \right) + \frac{q}{c} \quad (3.1)$$

$$(0 < \xi < \xi_v; v = 1, 2; \xi_1 = h; \xi_2 = R; \tau > 0)$$

При начальном условии

$$\tau(\xi, 0) = t_1 = t_{min} = const \quad (3.2)$$

условии симметрии

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial \xi} = 0 \quad (3.3)$$

и граничном условии первого ряда

$$t(\xi_v, \tau) = \begin{cases} t_1 = t_{min} & \text{при } 0 < \tau < \tau_1 \\ t_2 = t_{max} = const & \text{для } \tau_1 < \tau < \tau_2 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$q = q_1 \pm q_2 \exp(-k\tau). \quad (3.5)$$

где $t(\xi, \tau)$ – температура;

$t_1 = t_{min} = const$ – минимальное значение температуры на поверхности насыпи;

$t_2 = t_{max} = const$ – максимально допустимое значение температуры на поверхности насыпи, это может быть и температура среды;

τ – время;

$[0, \tau_1]$ – время работы охлаждающего устройства;

$[\tau_1, \tau_2]$ – время самопроизвольного нагрева материала (время отключения охлаждающего устройства);

ξ – текущая координата;

h – высота насыпи сырья в металлическом силосе;

R – радиус кругового сечения силоса;

v – параметр формы ($v=1$ – пластина, стержень, $v=2$ – цилиндр);

a – коэффициент температуропроводности;

c – удельная теплоемкость слоя сырья;

$q = q_1 \pm q_2 \exp(-k\tau)$ – экспериментально установленные зависимости удельной теплоты дыхания сырья;

$k = const > 0$ – эмпирический коэффициент (коэффициент затухания).

Аналитическое решение задачи (1) – (5) получено в следующем виде:

$$T_v(X, F_0) = 1 - \frac{F_{01}}{F_{02}} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4 \sin(xF_{01}) (P_{v1} \sin\beta + P_{v2} \cos\beta)}{v\lambda m\varphi_v} +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A_{nv}}{\mu_{nv}^v} \left[\frac{\exp(\mu_{nv}^2 F_{02}) - \exp(\mu_{nv}^2 F_{01})}{\exp(\mu_{nv}^2 F_{02}) - 1} + P_{01} \frac{\frac{P_d}{\mu_n^2} \left(1 \pm \frac{P_{02}}{P_{01}}\right)}{\mu_n^2 \left(\frac{P_d}{\mu_n^2} - 1\right)} \right] \times \exp(\mu_{nv}^2 F_0) + B_v;$$

$$x = \frac{\pi m}{F_{02}}, \quad \beta = 2x \left(F_0 - \frac{F_{01}}{2} \right); \quad (3.6)$$

$$P_{11} = sh\sqrt{x} \sin\sqrt{x} ch(\sqrt{x}X) \cos(\sqrt{x}X) - ch\sqrt{x} \cos\sqrt{x} sh(\sqrt{x}X) \sin(\sqrt{x}X);$$

$$P_{12} = ch\sqrt{x} \cos\sqrt{x} ch(\sqrt{x}X) \cos(\sqrt{x}X) + sh\sqrt{x} \sin\sqrt{x} sh(\sqrt{x}X) \sin(\sqrt{x}X);$$

$$\varphi_1 = ch(2\sqrt{x}) + \cos(2\sqrt{x});$$

$$\mu_{n_1} = \frac{\pi}{2}(2n - 1); n \in N; \quad (3.7)$$

$$A_{n_1} = (-1)^n \cos(\mu_{n_1} X);$$

$$A_{n_2} = -\frac{J_0(\mu_{n_2} X)}{J_1(\mu_{n_2})};$$

$$B_1 = \frac{P_{0_1}}{2} \left[1 - X^2 \pm \frac{2P_{0_2}}{PdP_{0_1}} \left(1 - \frac{\cos(\sqrt{Pd}X)}{\cos\sqrt{Pd}} \right) \exp(-PdF_0) \right];$$

$$P_{2_1} = \text{bei}\sqrt{2x}\text{ber}(\sqrt{2x}X) - \text{ber}\sqrt{2x}\text{bei}(\sqrt{2x}X);$$

$$P_{2_2} = \text{ber}\sqrt{2x}\text{ber}(\sqrt{2x}X) + \text{bei}\sqrt{2x}\text{bei}(\sqrt{2x}X);$$

$$\varphi_2 = \text{ber}^2\sqrt{2x} + \text{bei}^2\sqrt{2x};$$

μ_{n_2} - последовательные положительные корни характеристического уравнения

$$J_0(\mu) = 0 \quad (3.8)$$

$$B_2 = \frac{P_{0_1}}{4} \left[1 - X^2 \pm \frac{4P_{0_2}}{PdP_{0_1}} \left(1 - \frac{J_0(\sqrt{Pd}X)}{J_1\sqrt{Pd}} \right) \exp(-PdF_0) \right];$$

$$F_0 = \frac{a\tau}{h^2}; F_{0_1} = \frac{a\tau_1}{h^2}; F_{0_2} = \frac{a\tau_2}{h^2}; - \text{числа Фурье};$$

$$X = \frac{z}{h}, X = \frac{r}{R} - \text{безразмерные координаты } (\xi = z - \text{для пластины}, \xi = r -$$

для цилиндра);

$$Pd = \frac{kh^2}{a} - \text{число Предводителя};$$

$$P_{0_1} = \frac{q_1 h^2}{ac\Delta t}, P_{0_2} = \frac{q_2 h^2}{ac\Delta t} - \text{числа Померанцева};$$

$\Delta t = t_2 - t_1, t_1 < t_2; J_0(X), J_1(X)$ - функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно;

$\text{ber } X, \text{bei } X$ – функции Томсона;

γ – плотность абсолютно сухого материала.

Усредненные по объему решения (6) имеют вид

$$\begin{aligned} \bar{T}_v(F_0) &= \frac{\bar{t}(\tau) - t_1}{\Delta t} = \\ &= 1 - \frac{F_{01}}{F_{02}} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2^v \Phi^v \sin(xF_{01})}{m\pi\sqrt{2x}\varphi_v} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2^v (\exp(\mu_n^2 F_{02}) - \exp(\mu_n^2 F_{01}))}{\mu_n^2 (\exp(\mu_n^2 F_0) - 1)} \exp(-\mu_n^2 F_0) + \bar{B}_v \end{aligned} \quad (3.9)$$

где $\Phi_1 = sh(2\sqrt{x}) \cos\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right) + sin(2\sqrt{x}) sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)$

$$\Phi_2 = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(-1)^p p \left(\sqrt{\frac{x}{2}}\right)^{2p-1}}{(p!)^2} \left[ber\sqrt{2x} \sin\left(\beta - \frac{\pi p}{2}\right) - bei\sqrt{2x} \cos\left(\beta - \frac{\pi p}{2}\right) \right]$$

$$\bar{B}_1 = P_{01} \left[\frac{1}{3} \pm \frac{P_{02}}{PdP_{01}} \left(1 - \frac{tg\sqrt{Pd}}{\sqrt{Pd}} \right) \exp(-PdF_0) \right];$$

$$\bar{B}_2 = \frac{P_{01}}{4} \left[\frac{1}{2} \pm \frac{4P_{02}}{PdP_{01}} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{Pd}} \right) \exp(-PdF_0) \right].$$

Зная усредненное значение температуры $\bar{T}(F_0)$, можно найти темп охлаждения $\frac{\partial \bar{T}(F_0)}{\partial F_0}$ и удельный расход энергии, необходимой для поддержания исследуемого режима хранения:

$$Q_v = c\gamma(\bar{t}(\tau) - t_1) \quad (3.10)$$

Из решения (3.9) для достаточно больших значений чисел Фурье (большой длительности хранения сырья или высоких значений термоинерционных свойств материала или достаточно небольшой высоты насыпи сырья) можно получить упрощенные формулы для расчета средней температуры сохраняемого материала. Так, при $m=1$ и $F_0 \gg F_{01}$; $F_0 \gg F_{02}$ для $v=1$ (аналогично для $v=2$) имеем:

$$\bar{t}_1(\tau) = t_1 + (t_2 - t_1) \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2} - \sqrt{\frac{2a\tau_2}{\pi}} - \frac{\sin \frac{\pi\tau_1}{\tau_2}}{\pi n} \right) + \frac{P_{01}}{3}; \quad (3.11)$$

Учитывая, что последнее слагаемое во второй скобке формулы (3.11) значительно меньше единицы, получаем

$$\bar{t}_1(\tau) = t_1 + \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2} \right) (t_2 - t_1) + \frac{P_{01}}{3} \quad (3.12)$$

Легко показать, что всегда $t_1 < \bar{t}_1(\tau) < t_2$, что соответствует физике процесса.

Более точными, чем формулы (3.11) и (3.12), но также достаточно элементарными, являются следующие зависимости для расчета температурных полей:

$$t_1(z, \tau) = t_1 + (t_2 - t_1) \left[1 - \frac{\tau_1}{\tau_2} - \sum_{m=1}^{\infty} B_{m_1} \cos(\beta - \sqrt{x}(1-X)) \exp(-\sqrt{x}(1-X)) + \sum_{n=1}^{\infty} B_{n_1} \cos(\mu_n X) \exp(-\mu_n^2 F_0) \right] + \frac{P_{01}}{3}, \quad (3.13)$$

где

$$B_{m_1} = \frac{2 \sin(xF_{01})}{\pi m},$$

$$B_{n_1} = (-1)^n \frac{2(1 - \exp(\mu_n^2(F_{01} - F_{02})))}{\mu_{n_1}(1 - \exp(-\mu_n^2 F_{02}))},$$

Из усредненных значений температуры слоя сырья

$$\bar{t}_1(\tau) = t_1 + (t_2 - t_1) \left[1 - \frac{\tau_1}{\tau_2} - \sum_{m=1}^{\infty} \bar{B}_{m_1} \cos \beta - \sum_{n=1}^{\infty} \bar{B}_{n_1} \exp(-\mu_n^2 F_0) + \frac{P_{01}}{3} \right], \quad (3.14)$$

где

$$\bar{B}_{m_1} = \sqrt{\frac{2}{x}} B_{m_1};$$

$$\bar{B}_{n_1} = \frac{2(1 - \exp(\mu_n^2(F_{01} - F_{02})))}{\mu_{n_1}(1 - \exp(-\mu_n^2 F_{02}))}.$$

Помимо определения температурных полей, полученные аналитические решения [8] дают возможность решить обратную задачу по нахождению времени необходимого для достижения нужной температуры в любой точке насыпи (или средней температуры слоя насыпи при выбранных значениях τ_1 и τ_2).

Задав τ_1 , можно определить интервал $[\tau_1, \tau_2]$, т.е. время, за которое температура насыпи достигает своей верхней границы, т.е. оптимальное соотношение периодов $[0, \tau_1]$ и $[0, \tau_2]$, что дает возможность минимизировать расход энергии на поддержание режима хранения [9-11].

Таким образом, предложена и решена краевая задача, описывающая температурное поле слоя крахмал- или пектиносодержащего сырья при управляемых температурных воздействиях.

Дыхание овощей и фруктов зависит прямо пропорционально от температуры, при которой осуществляется их хранение. В пределах температурного коридора, используемого при хранении овощей и фруктов, интенсивность их дыхания является соответствующей закону Аррениуса:

$$F = \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$$

где E – величина энергии активации, T – температура, при которой ведется хранение овощей и фруктов; R – универсальная газовая постоянная.

Используя выражение (3.15), можно продемонстрировать, как зависит энергия, выделяемая при дыхании фруктов и овощей, хранящихся в температурном коридоре 20-25 градусов Цельсия на протяжении 1,5-2 недель:

$$q_1 = q_{01} \exp(k_1 \tau) \quad (3.15)$$

Эта же закономерность соблюдается и в том случае, если хранение фруктов и овощей носит изотермический характер. В формуле (3.15) применены следующие параметры: q_{01} и k_1 , – функции, зависящие от влажности воздуха в хранилище, q_0 , – удельная энергия, выделяемая овощами или фруктами при 0 градусах Цельсия.

Отметим, что фрукты и овощи, которые хранятся внизу, обладают более высокой температурой, чем такие же овощи и фрукты, находящиеся в верхнем слое. Объясняется это тем, что тепло, генерируемое хранимым сырьем, не может отводиться, вследствие чего оно остается возле фруктов и овощей и повышает их температуру [11-16]. Как показывают современные исследования, интенсивность

дыхания фруктов и овощей по мере продвижения от нижних слоев к верхнему изменяется в соответствии со следующим выражением:

$$q_2 = q_{02} \exp(-k_2 z)$$

где z - координата, q_m - удельная энергия, выделяемая фруктами и овощами в процессе дыхания при нуле градусов Цельсия ($z = 0$).

Таким образом, для определения зависимости между энергией, выделяемой овощами и фруктами в процессе хранения, и такими параметрами, как τ , z , необходимо воспользоваться выражением (3.16):

$$q = q_0 \exp(k_1 \tau - k_2 z) \quad (3.16)$$

Описанные выше закономерности необходимо принимать во внимание, организовывая хранение различных пищевых продуктов. Например, когда осуществляется хранение насыпных продуктов (зерен различных растительных культур), то происходит выделение паров воды, из-за чего влажность зерна повышается. Выделяемая влага начинает перемещаться по всей массе зерна, чему дополнительно способствует разница в температурах между слоями, находящимися вверху и внизу хранилища. Влага стремится удалиться из слоев, характеризующихся увеличенной температурой, и попасть туда, где нагрев ниже. Здесь стоит отметить, что даже несмотря на то, что влага интенсивнее всего перемещается в зерновом хранилище сразу после того, как сырье помещено на хранение, тенденции перераспределения влаги должны учитываться в течение всего срока размещения зерна. Все сказанное выше свидетельствует о том, что процесс перемещения влаги в массиве хранимого сырья способствует тому, что в отдельных частях насыпи влажность превышает предельные значения. Кроме этого, создаются условия, способствующие недопустимому повышению температуры зернового сырья. Это обуславливает необходимость оперативного выявления фактов перегрева сырья и чрезмерного повышения его влажности, что нужно для быстрого реагирования на сложившуюся ситуацию. В случаях, когда высота слоя сырья, помещенного на хранение, является меньшей по сравнению с диаметром пространства для хранилища, управление теплопроводности приобретает следующий вид:

$$\frac{\partial t(z, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(z, \tau)}{\partial z^2} + \frac{q_0}{c} \exp(k_1 \tau - k_2 z)$$

$$(0 < z < h, \tau > 0)$$

В этом случае начальные и граничные условия следует записать в виде

$$t(z, 0) = t_0 = \text{const} \quad (3.17)$$

$$t(0, \tau) = f_1(\tau); \quad (3.18)$$

$$t(h, \tau) = f_2(\tau) \quad (3.19)$$

где a - коэффициент температуропроводности;

h - высота насыпи;

t_0 - температура продукта в начале процесса хранения;

c - удельная теплоемкость насыпи продукта;

$f_1(\tau)$ и $f_2(\tau)$ - заданные ограничения на границах слоя. Выполняя подстановку в соответствии с [18]

$$t(z, \tau) = v(z, \tau) + \frac{q_0}{c(k_1 - ak_2^2)} \exp(k_1 \tau - k_2 z)$$

где $v(z, \tau)$ - новая искомая функция, сведем записанное выше неоднородное уравнение (3.16) к однородному уравнению, поскольку источник теплоты учитывается в подстановке

$$\frac{\partial t(z, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(z, \tau)}{\partial z^2} \quad (3.21)$$

При этом новые краевые условия переписутся в виде [19]:

$$v(z, 0) = t_0 - \frac{q_0}{c(k_1 - ak_2^2)} \exp(-k_2 z) = \varphi(z)$$

$$v(0, \tau) = f_1(\tau) - \frac{q_0}{c(k_1 - ak_2^2)} \exp(k_1 \tau) = \varphi_1(\tau) \quad (22)$$

$$v(h, \tau) = f_2(\tau) - \frac{q_0}{c(k_1 - ak_2^2)} \exp(k_1 \tau - k_2 h) = \varphi_2(\tau)$$

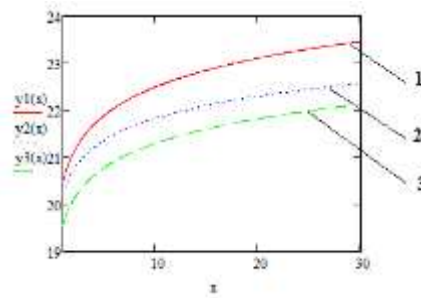


Рисунок 3.1 – Теоретическое распределение температур по толщине слоя (ось x – число Фурье, X – безразмерная координата)
 1 – для расстояния от поверхности слоя $X = 0,17$; 2 – для расстояния от поверхности слоя $X = 0,5$; 3 – для расстояния от поверхности слоя $X = 0,83$

Аналитические оценки решения полученной краевой задачи могут быть получены методом интегральных преобразований.

Полученные результаты целесообразно проанализировать графически.

На рис.3.1 приведены сравнительные зависимости теоретического распределения температуры по толщине сохраняемого слоя при изменении числа Фурье.

Полученные результаты для их использования в практических целях или для дальнейшего уточнения аналитической постановки задачи интересно сравнить с данными эксперимента.

В качестве экспериментальных были использованы данные работы по хранению крахмалосодержащего сырья в складе. В связи с тем, что разность влажностей по слоям при закладке партии ($x=0$) колебалась незначительно, значение k_2 принимали равным нулю. Значение влажности сырья в слое в начальный момент времени $U(Z,0)$ составляло значительно менее 10%, значение температуры t_0 принималось близким к комнатной.

В связи с тем, что разность влажностей по слоям при закладке партии ($x = 0$) колебалась незначительно ($\pm 0,2\%$), значение k_2 принимали равным нулю. Значение влажности сырья в слое в начальный момент времени $U(Z,0) = 8,4\%$, значение температуры $t_0 = 16\text{ }^\circ\text{C}$, $k_1 = 0,8 \cdot 10^{-7}\text{ c}^{-1}$, $q_0 = 0,013\text{ Вт/кг}$. Это соответствует оценкам теплоты выделения сырья с такой влажностью и температурой, полученным по данным работы. Результаты расчетов для насыпи сырья высотой 3 м приведены в таблице 3.1 где число Фурье выбирали в форме

$$Fo = \frac{a \tau}{h^2}$$

Таблица 3.1 – Экспериментальные и расчетные значения ($t_1 = 24^\circ\text{C}$; $t_2 = 22^\circ\text{C}$)

$Fo, 10^3$	$X = 0,17$		$X = 0,5$		$X = 0,83$	
	$t_{\text{эксп}}$	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{эксп}}$	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{эксп}}$	$t_{\text{расч}}$
1	-	20,6	-	20,1	-	19,2
3	22	21,4	20	21,2	13	20,8
6	-	21,9	-	21,5	-	21,0
9	-	22,3	-	21,8	-	21,3
13	23	22,6	21	22,0	20	21,5
17	-	23,0	-	22,2	-	21,7
20	23	23,2	31	22,3	29	21,9
25	-	23,4	-	22,4	-	21,9
30	-	23,5	-	22,5	-	21,9

Сравнение этих результатов с теоретическими целесообразно выполнить графически.

На рисунке 3.2 приведены сравнительные зависимости экспериментального распределения температуры по толщине сохраняемого слоя при практически наблюдаемом изменении числа Фурье.

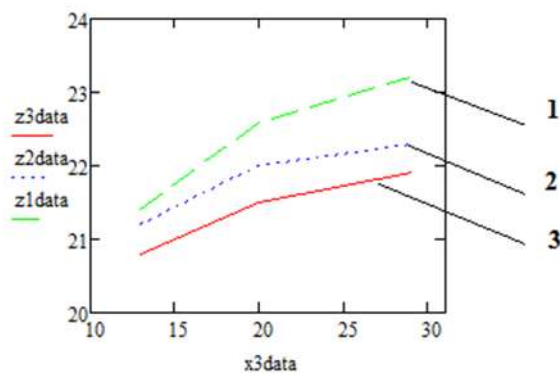


Рисунок 3.2 – Экспериментальное распределение температур по толщине слоя (x – число Фурье, X – безразмерная координата):

1 – для расстояния от поверхности слоя $X = 0,17$; 2 – для расстояния от поверхности слоя $X = 0,5$; 3 – для расстояния от поверхности слоя $X = 0,83$

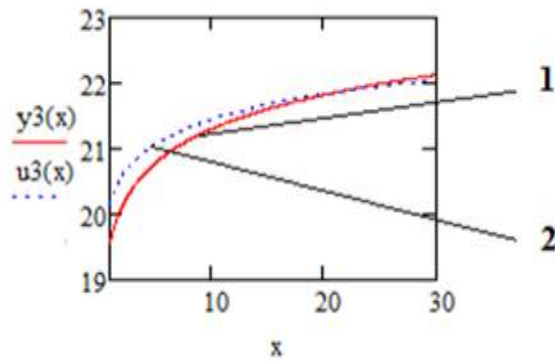


Рисунок 3.3 – Распределение температур для слоя $X=0,83$
 (x – число Фурье, X – безразмерная координата)
 1 – теоретические значения; 2 – экспериментальные данные (линия тренда)

Рисунки 3.2 и 3.2 говорят о том, что и теоретические и экспериментальные оценки дают погрешности не выше 10%, что является приемлемым для использования при назначении реальных режимов хранения насыпей крахмал- и пектиносодержащего сырья.

На рисунке. 3.3 приведены сравнительные распределения теоретического и экспериментального распределения температур для поверхности, отстоящей от основания слоя на $X = 0,83$, что свидетельствует о близости аналитических оценок к реальным температурам в насыпи хранящегося пищевого продукта.

Определенный интерес представляет собой сравнение распределений температур в срединной поверхности хранящейся насыпи крахмал- и пектиносодержащего сырья ($X = 0,5$) по отношению к распределению на его верхнем уровне (рисунок 3.4)

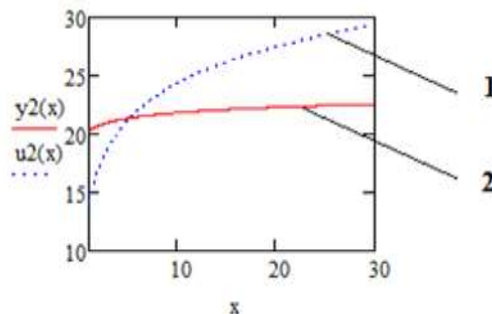


Рисунок 3.4 – Распределение теоретических температур по толщине слоя
 (x – число Фурье, X – безразмерная координата)
 1 – при $X = 0,50$; 2 – при $X = 0,83$

Общие представления об объемном распределении температур представлены на рисунке 3.5

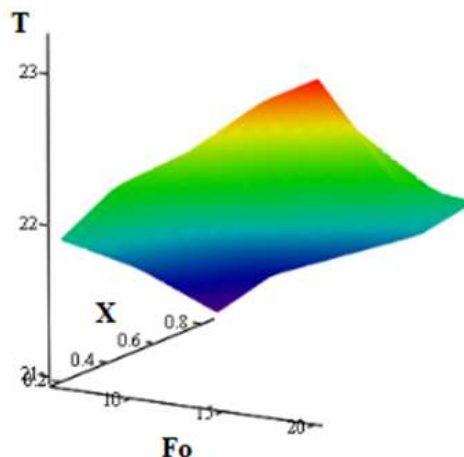


Рисунок 3.5 – Характер распределения расчетной температуры по толщине слоя хранящегося сырья в зависимости от числа Фурье

Проведенное сравнение аналитических оценок распределения температуры и ее фактическое экспериментальное распределение свидетельствует о достаточно хорошей сходимости результатов. В то же время необходимость дальнейшего усложнения краевых условий решения уравнений теплообмена вытекает, например, из эффектов отраженных на рис.3.4. Плотность укладки и скважистость насыпей имеют по-видимому большое практическое значение при хранении. Наличие воздуха в пространстве между отдельными элементами насыпи влияет на изменение температуры и влажности продукта и определяет характер протекающих в нем физиологических процессов. Воздух таких пространств, перемещаясь по скважинам, способствует передаче тепла путем конвекции и перемещению влаги в зерновой массе в виде пара. Благодаря скважинам в насыпях возможны такие виды их обработки, как сушка, активное вентилирование и газация.

Определение распределения температур по объему насыпи пищевого, крахмал- или пектинсодержащего, сырья при его хранении в специализированных силосах завершено построением соответствующих аналитических решений, сходимость которых вполне удовлетворительна с данными эксперимента. При формулировании краевых условий для хранения в условиях максимально

соответствующих реальным условиям при активном вентилировании выявлена необходимость применения метода интегрального конечного синус-преобразования.

Полученное аналитическое решение может быть предложено для инженерных расчетов процесса хранения крахмал- или пектиносодержащего сырья невысокой влажности при управляемых температурных воздействиях. Решение, учитывающее удельную теплоту дыхания сырья, при сформулированных краевых условиях, дает возможность определить темп охлаждения (нагрева), наименьший удельный расход энергии для поддержания необходимого режима, а также выбрать оптимальное соотношение продолжительностей периодов работы и отключения устройства активного вентилирования.

3.2. Методические особенности исследования тепло-массообменных процессов при активном вентилировании зернохранилищ

Зерновая масса сформирована разнообразными составляющими. Помимо собственно зерна, в нее входят различные примеси, воздух, паразитические микроорганизмы. Поскольку зерновая масса является многокомпонентной, то этим обуславливается наличие у нее специфических особенностей, подлежащих обязательному учету при закладке на хранение.

Из-за того, что в зерне, помещенном на хранение, перманентно выделяются водяные пары, влажность зерна меняется. При этом стоит отметить, что перемещение влаги по массиву зерна возможно как вследствие того, что разные составляющие этого массива обладают отличающейся температурой, так и вследствие того, что в разных частях хранилища зерно имеет разную влажность.

Как уже отмечалось в одном из предыдущих разделов работы, повышение (или понижение) нагрева зерна в одной из частей хранилища способствует активизации процесса перемещения влаги. Из частей зернового массива, где температура повышенная, влага перебирается туда, где нагрев ниже.

Отметим, что наиболее интенсивно влага перемещается в том зерне, которое недавно было убрано с поля и заложено на хранение. Это обуславливается тем, что разные части зернового массива обладают сильно отличающейся температурой. По мере выравнивания степени прогрева интенсивность влагообмена снижается. Все сказанное выше обуславливает тот факт, что вследствие влагообмена в зерновом массиве концентрация влаги в отдельных частях этого массива может превысить предельно допустимые значения. Таким образом, факты неравномерного распределения жидкости в массиве зерна должны своевременно выявляться и устраняться.

Если на хранение одновременно закладывается несколько партий зерна, каждая из которых характеризуется своим уровнем влажности, то процесс выравнивания жидкостной концентрации в зерне проходит медленно, даже если перемешивать зерно максимально интенсивно. В результате перемешивания то зерно, в котором содержалось больше всего влаги, теряет жидкость, а сухое зерно, наоборот, увлажняется. Как демонстрируют опытные исследования, интенсивность влагообмена между разными партиями зерна, помещенными на хранение в одно и то же место, начинает резко повышаться спустя 1-2 часа после закладки на хранение, после чего остается максимальной на протяжении 1-1,5 суток. Через 3-4 дня после того, как начинается хранение нескольких партий зерна, влагообмен практически прекращается, поскольку зерно становится одинаково влажным во всех частях хранилища. Стоит отметить, что закладка в одно и то же хранилище нескольких партий зерна, значительно отличающихся друг от друга по влажности, должно сопровождаться интенсивным перемешиванием. Если этого не делать, то зерно начнет слеживаться, вследствие чего его качество быстро ухудшится.

Если зерно, закладываемое на хранение, находится в условиях активного перемещения воздуха, то из него удаляется ненужная влага. Этот процесс будет протекать до тех пор, пока концентрация влаги в зерне и воздухе не станет одинаковой.

В процессе хранения может возникнуть потребность в уменьшении температуры, снижении или повышении влажности. Чтобы определить, имеется ли потребность в этом, необходимо постоянно мониторить состояние зерна,

измерять степень его прогрева и скорость движения воздушных масс. Здесь нужно отметить, что положительный результат от вентилирования достигается только тогда, когда параметры вентилирования соблюдаются неукоснительно.

Перед тем, как начать вентилировать зерновое хранилище, следует определить равновесную влажность воздуха в хранилище. В случае, если зерно содержит в себе больше влаги, чем имеет воздух, то после проведения вентиляции оно станет подсушенным. И наоборот: если зерно имеет меньше влаги, чем воздух, то в результате вентилирования оно увлажнится. Принимать решение о необходимости вентиляции необходимо в каждом конкретном случае отдельно, оценивая, как это скажется на состоянии зерновой массы.

Как уже упоминалось ранее, в процессе принятия решения о начале вентиляции следует учитывать, насколько прогрелось зерно, какой является температура воздуха в хранилище, какое количество влаги содержится в воздухе. Вентилирование целесообразно проводить только в тех случаях, когда сочетание этих факторов обеспечивает охлаждение и подсыхание зерна или охлаждение его без снижения влажности.

Влажность зерна до вентилирования определяют стандартным методом, температуру зерновой массы по слоям при помощи термоштанг или дистанционных установок для контроля температуры. При определении возможности вентилирования учитывается самая низкая температура в насыпи.

Относительную и абсолютную влажность воздуха можно определить с помощью психрометра.

Абсолютной влажностью воздуха ($\gamma_{п}$) называется масса водяного пара, находящегося в 1 м^3 влажного воздуха ($\text{г}/\text{м}^3$).

Абсолютной влажностью воздуха ($\gamma_{п}$) называется масса водяного пара, находящегося в 1 м^3 влажного воздуха ($\text{г}/\text{м}^3$).

Относительной влажностью воздуха (ϕ) называется отношение массы водяного пара, находящегося в 1 м^3 влажного воздуха, к максимально возможной его массе в 1 м^3 воздуха при том же барометрическом давлении и при той же температуре:

Психрометр образован двумя приборами, измеряющими нагрев воздуха (термометрами). Один из них является сухим, а второй смочен жидкостью снизу. Цена деления психрометра может варьироваться в пределах 0,3-0,5 градусов Цельсия. Термометр, ни один из концов которого не смочен, необходим для измерения температуры воздуха. А термометр, один конец которого смочен жидкостью (для этого он оборачивается в марлевую повязку или иную ткань), дает показания, которые всегда оказываются ниже, чем результат измерения сухим термометром. Рассчитывая разницу в показаниях, можно определить, какова влажность воздуха в помещении. Здесь используется следующее правило: чем более существенной является разница в показаниях двух термометров, тем меньше влаги содержится в воздухе. Если же воздух характеризуется стопроцентной влажностью (или близкой к ней), то показания обоих термометров будут отличаться друг от друга на минимальную величину.

Для определения точной величины влажности воздуха необходимо воспользоваться информацией, внесенной в специальную таблицу.

Психрометр должен находиться в тех местах, где на него не воздействует солнечное излучение. Измерения, проводимые при помощи психрометра, дают корректный результат только в том случае, если шарик, находящийся на влажном градуснике, обернут тканью и постоянно остается мокрым.

Если температура окружающей среды находится в отрицательном диапазоне, то для нахождения влажности воздуха необходимо пользоваться иными методами. За 30 минут до начала эксперимента психрометр должен быть помещен в место, где будет проводиться измерение, причем шарик должен быть обернут в сухую ткань и не контактировать со льдом. Затем необходимо взять тару, поместить в нее жидкость, температура которой соответствует комнатной, и разместить его внизу влажного градусника. Шарик, находящийся на этом градуснике, кратковременно помещается в жидкость (длительность нахождения шарика в воде должна быть достаточной, чтобы ткань стала влажной). После этого тара с водой удаляется, а ткань вытирается таким образом, чтобы каплей жидкости на ней не было. Спустя полчаса проводятся измерения.

После получения всех требуемых данных принимается решение о целесообразности проведения вентиляции в зерновом хранилище.

Существуют таблицы, в которые внесена информация, требуемая для нахождения равновесной влажности зерновой массы. Чтобы воспользоваться такими таблицами, следует найти относительную влажность воздуха. Этот параметр нужен, чтобы установить, какой является равновесная влажность зерновой массы. На основе этого параметра принимается решение о начале вентилирования или отказе от него. Чтобы провести вентилирование, необходимо добиться такой ситуации, при которой зерно обладает уменьшенной влажностью по сравнению с изначальной. Если это условие не соблюдается, то вентилирование приведет к ухудшению состояния зерновой массы.

Эксперимент был реализован при следующих начальных условиях: влажность зерна составляет 17%, а температура воздуха в зерновом хранилище – 20 градусов Цельсия. После использования психрометра было определено, что сухой градусник дает показания 18,5 градусов Цельсия, а термометр, один конец которого увлажнен – 16 градусов Цельсия. Таким образом, разница в их показаниях равняется 2,5 градусам Цельсия. Используя психрометрическую таблицу, определяем, что влажность воздуха в данных условиях составляет 75%, при этом равновесная влажность зерновой массы будет равняться 15,1%. Из этого можно сделать вывод, что проведение вентиляции является допустимым: температура зерновой массы снизится, а концентрация влаги в ней уменьшится. Если нет возможности рассчитать, какой равновесной влажностью характеризуется пшеница, принимается следующее условие для допустимости вентилирования: зерно имеет температуру, превышающую прогрев воздуха в хранилище на 5-6 градусов Цельсия (либо более). Если же погода характеризуется большой влажностью (например, в дождливый период времени), то вентиляция должна проводиться только в том случае, когда зерно обладает температурой на 8-9 градусов больше, чем воздух в хранилище. Перед началом вентилирования следует принять меры по недопущению всасывания атмосферных осадков в зерновое хранилище.

Если зерно, заложенное на хранение, имеет высокую температуру, то его необходимо вентилировать до того времени, пока оно не охладится до температуры, равной прогреву воздуха ночью. Отметим, что повышения концентрации влаги в горячем зерне, заложенном на хранение, при вентилировании не происходит: воздушные массы, перегоняющие пшеницу, становятся более теплыми, из-за чего они способны впитать в себя больше влаги.

Если целью вентиляции является снижение температуры зерна, то она должна проводиться в ночное и утреннее время.

3.3. Опытное определение эффективности активного вентилирования

3.3.1. Специфические особенности экспериментального исследования а по активному вентилированию

Любой эксперимент, направленный на нахождение оптимальных кондиций для хранения зерновых, должен проводиться на реально эксплуатируемом оборудовании без внесения значительных корректировок в режим функционирования.

Отметим, что важнейшей задачей, разрешаемой посредством вентилирования заложенной на хранения зерновой массы – совершенствование ее устойчивости. Решение этой задачи достигается постоянным и интенсивным движением воздушной массы в хранилище.

Воздух и зерно, находящееся в хранилище, перманентно обмениваются между собой влагой. Протекание данного процесса не зависит от того, работает ли вентиляционная установка. Если воздух в хранилище недостаточно влажный, а зерно, помещенное на хранение, содержит большое количество жидкости, то в результате влагообмена пшеница становится подсушенной. И наоборот: в случае, когда влажность воздуха меньше, чем зерна, то влага начинает переходить в пшеницу. Если влажность воздуха и пшеницы становится идентичной, то влагообмен прекращается. Однако такое состояние длится недолго, поскольку влажность воздуха – показатель, зависящий от большого количества параметров.

В случае, если они меняются, то корректируется и влажность воздуха, вследствие чего влагообмен снова интенсифицируется.

Поскольку любая зерновая культура, в том числе и пшеница, является гигроскопичной, то перед стартом вентилирования необходимо вычислить, какой является влажность воздуха в помещении, где производится хранилище. Начинать вентилирование необходимо лишь в том случае, если фактически в пшенице содержится больше влаги, чем составляет ее равновесная влажность. Поскольку пшеница, прогретая до высоких температур и содержащая большое количество влаги, в процессе хранения повышает свою температуру, то этот процесс необходимо прекратить, охлаждая пшеницу. Для этого интенсивность вентилирования делается выше путем нагнетания в хранилище увеличенного количества воздуха. Однако в этом случае эксплуатация вентиляционной установки сопряжена с повышенными материальными затратами, что является невыгодным. Снизить расходы можно путем подбора вентилирующего оборудования, чьи характеристики соответствуют объему хранимого зерна, его температуре и влажности.

Отметим, что снижение температуры зерна, находящегося в хранилище, носит неравномерный характер. В верхних слоях фиксируется температура выше, чем внизу. Из-за этого при длительном вентилировании может начаться гниение пшеницы.

Таким образом, высота зернового массива, закладываемого на хранение, не должна быть больше, чем предусмотрено характеристиками вентилирующего оборудования. Отметим, что использование установки вентиляции позволяет не только уменьшить температуру зерна, но и сделать его более сухим. Для этого используется режим медленной сушки, при котором используется воздух, температура которого превышает прогрев атмосферного воздуха на 6-9 градусов Цельсия. В таком режиме вентилирующие установки работают, как правило, в конце периода уборки урожая, который характеризуется повышенной влажностью закладываемого на хранение зерна.

Если на хранение помещается не крупная партия определенных видов растительных культур (например, зерен гречихи или подсолнечника), то может проводиться быстрая сушка. Она характеризуется применением увеличенной температуры воздуха (на 15-20 градусов Цельсия выше, чем температура атмосферного воздуха). Кроме этого, при быстрой сушке увеличивается и интенсивность перемещения воздуха.

При проведении активного вентилирования следует контролировать, чтобы все участки зернового массива просушивались равномерно. Таким образом, максимальное удаление одной вентиляционной установки от другой должно составлять 50-70 см.

Также в процессе удаления влаги из зерна, закладываемого на хранение, необходимо контролировать надлежащее состояние зерна. Нужно следить, чтобы в нем не появлялись трещины либо иные повреждения. По мере уменьшения концентрации влаги в зернах температура воздуха, нагнетаемого в хранилище, снижается.

Отметим также, что активное вентилирование может применяться только в светлое время суток при отсутствии дождя или иных атмосферных осадков. Относительная влажность воздуха должна находиться в диапазоне 50-65%. Если воздух имеет относительную влажность менее 50%, то его температуру необходимо искусственно повысить.

3.3.2. Сбор и обработка полученных экспериментальных данных

Методологически данные эксперимента собирали путем фиксирования изучаемых параметров в процессе рабочего цикла одного из элеваторов Петербургского мельничного комбината, загруженного зерном пшеницы собранной на Северном Кавказе, на протяжении с сентября 2019 по январь 2020 года.

Пробы партии зерна в соответствии с ГОСТ ISO 24333-2017 отбирали при помощи специальных конусных щупов.

Щупы вводили в зерно в закрытом состоянии. На нужной глубине их открывали, и они наполнялись зерном на заданном расстоянии от поверхности зерновой насыпи. Щуп закрывали и открывали при помощи стержня, проходящего через его полую штангу. Щупы оснащались навинчивающимися штангами, которые закрывались в результате свободного перемещения конуса на конце штанги: при надавливании (при вводе в насыпь) конус, прижимаясь к нижней части штанги, закрывался.

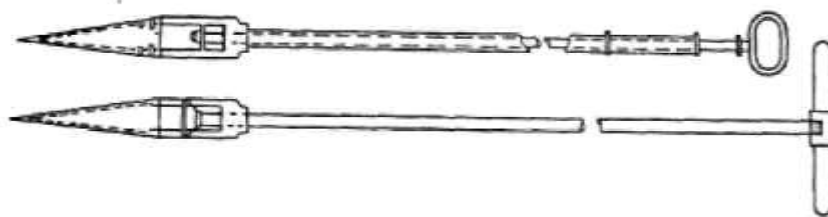


Рисунок 3.6 – Конусный щуп для отбора проб

Некондиционное зерно отбирали по нескольким признакам. Морозобойное зерно определяли одновременно с засоренностью.

Количество поврежденных морозом зерен выражали в процентах к исходной навеске. Для получения окончательного результата брали среднее из двух параллельных определений, разница, между которыми не превышала 5 %.

Одновременно определяли проросшие зерна. Количество проросших зерен выражали в процентах к исходной навеске.

Если в исследуемой навеске имелись зерна, испорченные и поврежденные при сушке или в процессе самосогревания, то их количество более точно определяли после выделения из навески сорной и зерновой примесей. Для этого из зерна, которое осталось после удаления мусора, брались несколько навесок массой 10 г каждая. Объем некондиционных зерен, содержащихся в каждой из навесок, рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$X = (g_1 g_2) / g_3$$

где g_1 – масса некондиционных зерен, содержащихся в дополнительной навеске, г;

g_2 – масса зерна, которое осталось после удаления мусора из изначальной 50-граммовой навески;

g_3 – масса дополнительной навески, сформированной для определения концентрации некондиционного зерна, г. Таким образом, общий объем некондиционных зерен в навеске, масса которой составляет 50 граммов, вычисляется в соответствии со следующим выражением:

$$X = g + (g_1 g_2) / g_3$$

где g – масса некондиционных зерен в навеске.

Отметим, что попытки визуального определения объема некондиционных зерен в большинстве случаев не приводят к результатам, имеющим требуемую степень точности. Связано это с тем, что человеческий глаз, как правило, неспособен отличить характерный оттенок некондиционного зерна от цвета качественного зерна. Таким образом, для выделения некондиционного зерна и его последующего удаления необходимо пользоваться раствором гипохлорита, доведенным до кипящего состояния. Суть этого метода заключается в следующем.

Зерновую массу (10 грамм), в которой нет каких-либо примесей, перемещают в химический стакан, после чего в этот же стакан разливается смесь поваренной соли и гипохлорита (концентрация вещества – 1-2%). При этом необходимо добиться, чтобы раствор полностью скрыл зерновую массу. После этого производится нагревание полученной массы, а после начала кипения отсчитывается 60 секунд, после чего температурная обработка завершается. Затем раствор поваренной соли и гипохлорита удаляется, а оставшаяся зерновая масса двукратно промывается водой с температурой 15-20 градусов. Завершающим этапом обработки является просушка зерна с использованием фильтровальной бумаги. В результате качественное зерно становится белым, а некондиционное зерно не меняет оттенок.

Отметим, что качественным зерном может являться только такое, которое обладает ярко выраженным белым цветом. Если же после обработки у зерна сохраняется даже незначительное потемнение, то оно бракуется.

От того, какой влажностью обладает зерно, зависит режим его хранения. Для расчета влажности зерна необходимо пользоваться следующим алгоритмом.

Из зерна, закладываемого на хранение, выделяется навеска, масса которой составляет 20 граммов. Затем это зерно размалывается при помощи мельницы (длительность обработки – 0,5 минуты).

Для определения качества помола использовались два сита (N 1, N 0,8). Качество помола признавалось приемлемым, если после пятиминутного вращения с частотой 160-200 оборотов ежеминутно на сите N 1 концентрировалось до 5% зерна, а на сите N 08 – 45-50% зерновой массы. Если эти показатели не соблюдены, то необходимо провести дополнительный размол.

Затем в две бюксы, выполненные из металлического материала (влажность должна быть предварительно удалена), помещаются навески, причем масса каждой из них должна составлять 5 граммов. Заполненные зерном бюксы укладываются в специальные гнезда в шкафу, причем предварительно в эти гнезда должны быть помещены крышки. В оставшиеся гнезда в шкафу следует поместить бюксы, где отсутствует зерно. Затем начинается тепловая обработка зерновой массы, которая продолжается в течение 2/3 часа. Отсчет времени необходимо начинать с того момента, как температура в шкафу достигнет отметки в 130 градусов Цельсия.

Как только обработка завершается, бюксы, в которых находилось зерно, достаются из шкафа, после чего они сразу перемещаются в эксикатор. Там они находятся на протяжении 1/3 часа (этого времени достаточно, чтобы привести температуру бюксы в соответствие с комнатной). Затем измеряется температура бюкса.

Для определения влажности зерна необходимо воспользоваться следующим выражением:

$$X = 100(m_1 - m_2) / (m_1 - m)$$

где m – суммарная масса бюксы и крышки, на которой она размещается, г;

m_1 – масса системы, состоящей из крышки, бюксы и зерновой массы до начала сушки, г;

m_2 – масса системы, состоящей из крышки, буюсы и зерновой массы, после завершения сушки, г.

Отметим, что максимальная разница между результатами экспериментов, проводимых параллельно, не должна быть выше, чем 0,2%. Если данное условие не соблюдается, то эксперимент проводится заново.

Чтобы рассчитать, какой влажностью обладает проба, необходимо вычислить среднее значение по испытанным параллельно пробам. Полученное значение должно быть округлено с точностью до 0,1.

Отметим, что зерно, помещенное на хранение в складское помещение, не формирует однородную массу. Между зернами всегда остается пространство, в котором находится воздух.

Существует специальный параметр, который дает информацию о том, какой объем воздуха находится в зерновой массе. Это плотность размещения (укладки) зерна. Значение этого показателя оказывает существенное воздействие на процесс хранения. Так, от объема воздуха, находящегося внутри зерновой массы, зависит температура пшеницы, а также количество влаги, содержащееся в ней. Попадая внутрь массива зерна, воздух начинает перемещаться, благодаря чему стартует конвекционный процесс. Таким образом, воздух, заключенный внутри зерна, может быть использован для его осушения.

Параметрами, определяющими степень плотности укладки зерна (скважистость), являются форма пшеничного зерна, его упругость, а также геометрические размеры. Кроме этого, существует еще несколько показателей, при изменении которых скважистость зерна также трансформируется. Это концентрация влаги в зерне, геометрические размеры хранилища, длительность срока хранения зерна. Таким образом, плотность зерновой массы в процессе хранения может варьироваться в широком диапазоне.

Чтобы определить, какой скважистостью обладает помещенное на хранение зерно, необходимо воспользоваться следующим выражением:

$$S = \frac{(V_1 - V)}{V_1} \cdot 100$$

где S – скважистость, %;

V – объем, занимаемый твердой фракцией зерна, см³;

V_1 – совокупный объем, занимаемый пшеничным зерном, см³.

Чтобы определить, какой совокупный объем занят пшеничным зерном, следует воспользоваться следующим выражением:

$$V_1 = \frac{P \cdot 1000}{\gamma}$$

где γ – натура зерна;

P – суммарная масса 1000 пшеничных зерен, г.

Чтобы определить, какой объем воздуха содержится в массиве помещенного на хранение зерна, следует применить выражение ниже:

$$F = \frac{(V_1 - V)}{P}$$

Определив произведение массы зерна и объема, занимаемого воздухом, находящимся внутри массы зерна, можно рассчитать показатель воздухообмена. Он необходим для принятия решения об изменении режима проведения вентилирования.

Отметим, что в числе показателей, использованных в описанных выше формулах, присутствуют натура зерна, его объем, а также масса, которой обладает определенное количество пшеничных зерен.

Инструкция, в соответствии с которой рассчитывается натура зерна, излагается в тексте стандарта ГОСТ 10840-2017. Совокупная масса одной тысячи пшеничных зерен определяется путем получения навески, включающей соответствующее количество частиц, и измерения ее массы на весах.

Отметим, что существуют ориентировочные значения массы 1000 зерен разных растительных культур. К примеру, для пшеницы этот показатель составляет 48-50 граммов. Чтобы определить массу 1000 зерен конкретной партии, следует выделить из партии зерна навеску, масса которой соответствует ориентировочной, после чего разместить ее на разборной доске. Затем при помощи шпателя отобранная навеска делится на две равных части. Полученные части навески, в каждой из которых содержится по 0,5 тысяч зерен, взвешиваются

на весах, обеспечивающих точность измерения вплоть до 0,01 г. Если определено, что две части навески отличаются друг от друга по массе не более чем на 6%, то результатом измерения является сумма масс двух частей навески. Итоговый результат подлежит округлению до единственного десятичного знака.

Для расчета объема, занимаемого навеской, состоящей из 1000 пшеничных зерен (или зерен иных растительных культур), необходимо прибегнуть к пикнометрии. Для ее проведения необходима жидкость, которая не является смачивающей (это может быть, например, керосин). Сама пикнометрия проводится следующим образом: в цилиндр, объем которого известен заранее, помещается 30-50 мл несмачивающей жидкости, после чего в этот же цилиндр погружается навеска, состоящая из 1000 зерен. Далее необходимо рассчитать разницу между объемом несмачивающей жидкости и итоговым объемом, занятым системой, состоящей из жидкости и зерна. Отметим, что использовать воду в качестве несмачивающей жидкости нецелесообразно, поскольку при ее применении масса зерна изменяется. Результат эксперимента будет некорректным и в том случае, если на поверхности окажется воздух.

3.3.3. Построение и анализ регрессионных зависимостей

Изложенные выше рекомендации по оценке параметров зерна применялись в пассивном эксперименте состоящем в фиксировании и обработке данных замеров производимых в течение 6 месяцев с периодичностью в 15 суток, предусмотренной регламентом активной вентиляции, в течении 60–90 минут воздухом 15-20 °С Через смотровые лючки в срединной по высоте плоскости элеватора производились замеры с анализом проб на содержание в нем некондиционного зерна.

Полученные результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Экспериментальные данные замеров

№ п/п	Некондиция, %	Влажность, %	Скважистость, %	Температура, °С
0	3,01	12,17	56,20	16,62
1	3,50	12,17	52,66	17,12
2	3,63	12,72	56,20	17,65

3	3,70	13,27	56,20	18,35
4	4,03	14,37	52,66	19,10
5	4,11	12,17	49,12	20,13
6	4,53	14,37	56,20	22,03
7	4,66	12,72	49,12	23,56
8	4,69	13,27	49,12	25,86
9	4,70	14,37	50,89	27,62
10	5,43	14,37	49,12	30,50

На первом этапе проведения такого эксперимента искали зависимость некондиционного зерна при хранении, принятых в качестве функций отклика, от измеряемых параметров: влажности, скважности и температуры, в виде

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$$

Полученные в результате эксперимента данные приведены в таблице 3.2.

Проверку целесообразности построения функций отклика от выбранного набора параметров для верхних и нижних замеров осуществляли построением корреляционной матрицы.

Анализ таблицы, полученной в результате расчета взаимных коэффициентов корреляции использованных в эксперименте показателей, свидетельствует о корректности набора варьируемых параметров для выбранных функций отклика.

Таблица 3.3 – Корреляционная матрица данных эксперимента

	Потери, %	Влажность, %	Скважность, %	Температура, С
Потери, %	1			
Влажность, %	0,6516268	1		
Скважист, %	-0,678359	-0,06365190	1	
Температура, °С	0,9445323	0,614132807	-0,671380779	1

Регрессионный анализ экспериментальных данных с помощью электронных таблиц Excel позволил построить уравнение регрессии выбранного типа для функции отклика Y .

$$Y = 2,44 + 0,18x_1 - 0,05x_2 + 0,09x_3$$

где x_1, x_2, x_3 – соответственно, влажность, скважность и температура.

Регрессионная статистика приведена для функции отклика измерений ниже, в таблице 3.4.

Судя по величине множественного коэффициента корреляции R , построенные уравнения регрессии, в целом достаточно хорошо описывают функцию отклика.

Вместе с тем, дополнительный анализ корреляционной матрицы говорит о том, коэффициенты взаимной корреляции отдельных контролируемых параметров на целевую функцию и тем более между самими варьируемыми параметрами занимают диапазон от $-0,99$ до $0,96$). Это позволяет предположить наличие нелинейной связи между функцией отклика и некоторыми из варьируемых параметров.

Качественный анализ варьируемых параметров позволяет выделить в них два фактора, которые потенциально могут влиять на характер (линейности или нелинейности) функции отклика: влажность; скважность.

Температура имеет коэффициент корреляции близкий к коэффициенту влажности и может быть исключен из дальнейшего рассмотрения.

Достаточно высокая точность поддержания выбранных факторов на заданных уровнях, выявленная в ходе предварительных исследований, позволила для дублирования ограничиться тремя параллельными опытами.

Таблица 3.4 – Регрессионная статистика функции отклика Y_1

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,95938655
R-квадрат	0,92042256
Норм R-кв	0,88631794
Станд. ошибка	0,23450712
Наблюдения	11

<i>Дисперсионный анализ</i>					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	3	4,4525	1,48418	26,988	0,00032
Остаток	7	0,385	0,05499		
Итого	10	4,8375			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>
Y-пересеч	2,43619336	1,9861	1,22659	0,2596	-2,2603	7,132	-2,26	7,132
Перем X 1	0,18116633	0,1229	1,47466	0,1838	-0,1093	0,471	-0,109	0,471

Перем X 2	-0,05155866	0,0388	-1,3284	0,2257	-0,1433	0,040	-0,143	0,040
Перем X 3	0,09441448	0,0338	2,79072	0,0268	0,01442	0,174	0,014	0,174

Зависимость Y от варьируемых параметров в этом случае искали в виде

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2$$

Рандомизировав последовательность опытов при помощи таблицы случайных чисел для устранения влияния случайных погрешностей, матрицы планирования эксперимента записывали в виде таблицы 3.5.

Для получения статистически достоверной математической модели при анализе экспериментальных данных проверялась однородность дисперсий выборок функции отклика Y .

Для этой цели вычислялось значение критерия Фишера по формуле:

$$F_p = \frac{\max \{s_{yi}^2\}}{\min \{s_{yi}^2\}}$$

Для данных таблицы 3.4 это значение оказалось равным 4,0, что меньше табличного значения, равного 9,28 [108] для доверительной вероятности 95%.

Такое соотношение между расчетным и табличным значениями критерия Фишера свидетельствует о воспроизводимости эксперимента, что дает возможность с помощью пакета прикладных программ EXCEL вычислить необходимые оценки коэффициентов нелинейного уравнения регрессии в виде

$$Y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_{11} \cdot x_1^2 + a_{22} \cdot x_2^2 + a_{12} \cdot x_1 x_2$$

Таблица 3.5 – Планирование эксперимента для Y

влажн	скважн					потери
x1	x2	x1^2	x2^2	x1*x2	y1	
12,17	56,2	148,1089	3158,44	683,954	3,01	
12,17	52,66	148,1089	2773,076	640,8722	3,5	
12,72	56,2	161,7984	3158,44	714,864	3,63	
13,27	56,2	176,0929	3158,44	745,774	3,7	
14,37	52,66	206,4969	2773,076	756,7242	4,03	
12,17	49,12	148,1089	2412,774	597,7904	4,11	
14,37	56,2	206,4969	3158,44	807,594	4,53	
12,72	49,12	161,7984	2412,774	624,8064	4,66	
13,27	49,12	176,0929	2412,774	651,8224	4,69	
14,37	50,89	206,4969	2589,792	731,2893	4,7	

14,37	49,12	206,4969	2412,774	705,8544	5,43
предельные значения					
12,17	49,12	мин			
14,37	56,2	макс			
уравнение нелинейной регрессии					
0,011622	0,040927	-0,00254	-4,60543	-0,04934	125,7879
0,030278	0,016676	0,165996	1,776531	4,705589	66,61054
0,93409	0,252524	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
14,17212	5	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
4,51865	0,318841	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д

$$y=125,788-0,049x_1-4,605x_2-0,003x_1^2+0,041x_2^2+0,012x_1x_2$$

Таким образом, регрессионное выражение является следующим:

$$Y = 125,788 - 0,049x_1 - 4,605x_2 - 0,003x_1^2 + 0,041x_2^2 + 0,012x_1x_2$$

При этом данное выражение описывает особенности реально происходящего процесса лишь в том случае, при котором каждая его составляющая делает вклад, который не носит случайный характер. Чтобы проверить, соблюдается ли данное условие, необходимо вычислить значение критерия Стьюдента:

$$f = M(k - 1), \text{ т.к. } |a_i| > 2\Delta a,$$

$$\text{где } \Delta a = t_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot S_{aij}, \quad S_{ai} = \frac{S_y}{\sqrt{k}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M S_y^2}{k(M-1)}};$$

k – количество экспериментов, проводимых параллельно.

Определение степени достоверности показателей, находящихся в регрессионном уравнении, дает возможность исключить из данного уравнения все незначимые члены.

Далее необходимо проверить, насколько адекватным является соотношение, полученное в результате осуществления эксперимента. В результате данной проверки определяется, не было ли допущено необоснованное удаление значимых величин. Кроме этого, проверка дает возможность оценить корректность выбора использованной математической модели. Суть проверочного исследования заключается в расчете значения критерия Фишера и

его сопоставлении с табличной величиной. Чтобы рассчитать значение критерия Фишера, следует воспользоваться формулой, приведенное ниже:

$$F_p = \frac{\max \{s_{ad}^2, s_y^2\}}{\min \{s_{ad}^2, s_y^2\}}, \text{ при } S_{ag} = \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - y_{pi})^2}{k(M-1)},$$

где y_p – величина функций отклика y_1 и y_2 ;

s_y^2 – дисперсия среднего арифметического y_p ;

k – количество показателей, содержащихся в уравнении.

Используя информацию, которая содержится в таблице 3.4, а также результаты ранее осуществленных вычислений, получаем, что критерий Фишера равен $F_p = 4,22$. Табличным же значением критерия Фишера для конкретных условий эксперимента является 12,67.

Сопоставляя табличное и рассчитанное значения критерия Фишера, получаем, что $F_p < F$. А это значит, что математическая модель, избранная для анализа результатов эксперимента, позволяет формировать адекватное представление о зависимости объема некачественного зерна.

Для исследования полученной модели на экстремум воспользуемся правилом Сильвестра, для чего найдем ее критическую точку

$$z(x, y) := 125.788 - 0.049 x - 4.605 y - 0.003 x^2 + 0.041 y^2 + 0.012 x \cdot y$$

$$\frac{d}{dy} z(x, y) \rightarrow 0.012 \cdot x + 0.082 \cdot y - 4.605$$

$$A := \begin{pmatrix} 0.012 & 0.082 \\ 0.006 & 0.012 \end{pmatrix} \quad \frac{d}{dx} z(x, y) \rightarrow \begin{pmatrix} -0.006 \cdot x + 0.012 \cdot y - 0.049 \\ 4.605 \\ 0.049 \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} 4.605 \\ 0.049 \end{pmatrix}$$

$$\text{soln} := \text{lsolve}(A, B)$$

$$\text{soln} = \begin{pmatrix} -147.247 \\ 77.707 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.7 – Поиск критической точки нелинейной модели

Поиск критической точки показал, что она лежит вне области изменения варьируемых параметров. Это свидетельствует о том, что модель монотонна в

исследуемой области и количество потерь определяется в основном температурным режимом хранения зерна.

Хотя температура не участвовала в числе параметров нелинейного моделирования, в связи с монотонностью модели вызывает интерес построение отдельной зависимости изменения количества некондиционного зерна от температуры.

Соответствующая статистическая обработка экспериментальных данных позволяет (с достоверностью $r = 0.989$) записать такую зависимость в виде

$$P(T) = -0,028 + 0,248 T - 0,002T^2$$

где P - потери зерна при хранении, %

T – температура зерна, град С°

Графически построенное уравнение представлено на рис.3.8

Такую модель строили с помощью программы CurveExpert 1.3. На рисунке 3.8 приводится ее графическое изображение.

Анализируя полученные результаты можно сказать, что все основные характеристики зерна, отвечающие за его качество, имеют сложный нелинейный характер изменения в зависимости от влажности и скважности.

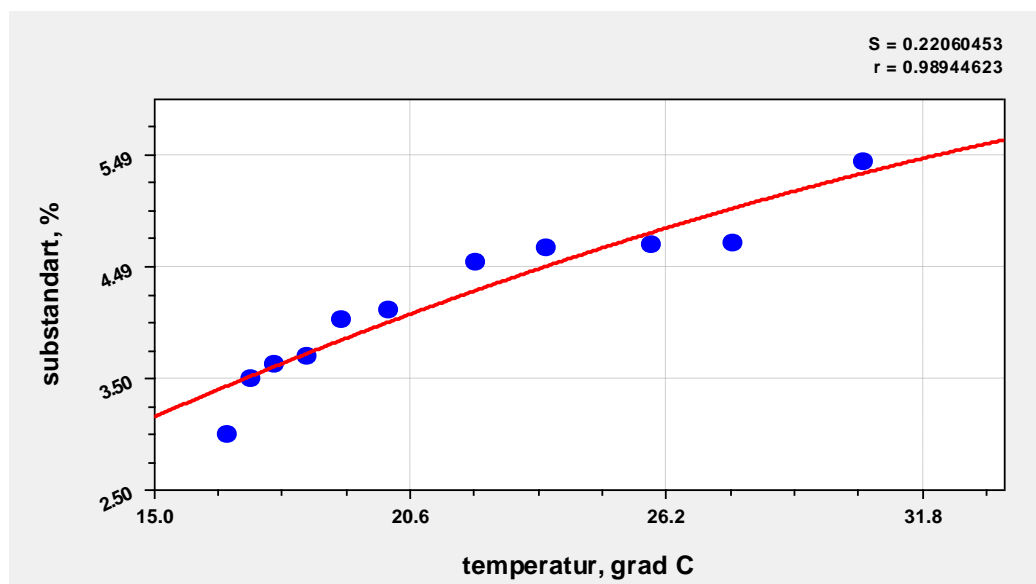


Рисунок 3.8 – Зависимость количества некондиционного зерна от температуры

Такой вывод подтверждается рассмотрением локальных зависимостей других варьируемых параметров от температуры: влажности и скважности насыпей зерна.

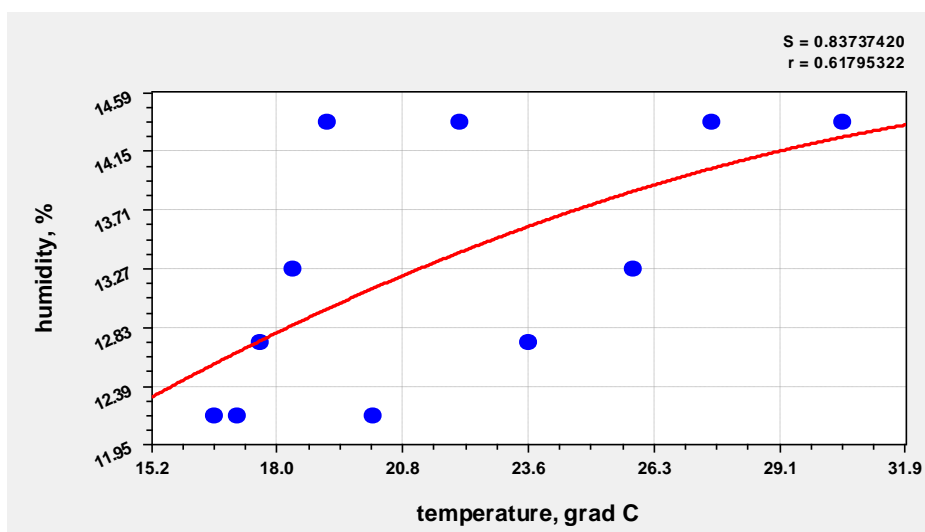


Рисунок 3.9 – Зависимость влажности зерна от температуры

Можно предположить, что такой эффект обеспечивается тем, что в диапазоне допустимых значений влажности, все основные теплофизические параметры плотного зернового слоя (теплопроводность, теплоемкость, теплоаккумуляция и температуропроводность) являются неубывающими функциями.

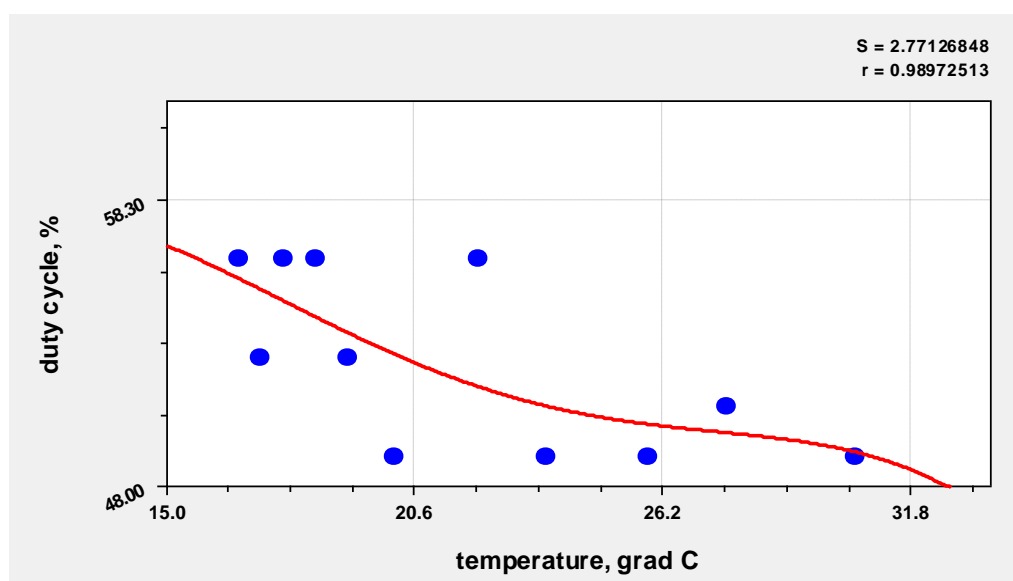


Рисунок 3.10 – Зависимость скважности насыпи зерна от температуры

При этом в области повышенных значений влажности с ее увеличением температуропроводность практически постоянна, а теплопроводность возрастает со значительной скоростью. При влажности зерна от 20 до 28% влага заполняет мелкие поры и после их насыщения переходит в межзерновое пространство (при этом теплопроводность меньше, так как в поры материала вместо воды входит воздух, теплопроводность которого значительно меньше, чем жидкости). При влажности зерна свыше 28% происходит резкое увеличение теплопроводности за счет слабосвязанной поверхностной влаги, которая выступает на поверхность отдельных зерен и образует водяные тепловые «мостики» в местах контакта частиц материала. Такие общие закономерности ведут к существенному увеличению количества некондиционного зерна в случаях несвоевременной активной вентиляции зерновых насыпей.

3.4. Экспериментальные исследования энергообеспечения оборудования сушки

Узлы, обеспечивающие повышение температуры воздуха и его последующую подачу, представляют собой важнейшую часть любой вентиляционной установки. От того, насколько хорошо прогрет воздух, подаваемый в зерновое хранилище, зависит возможность доведения показателей состояния зерна до таких значений, при которых сохраняемость зерна станет максимальной. Чтобы увеличить длительность периода хранения зерна, целесообразно оснащать складские помещения регуляторами температуры воздуха. За счет применения таких регуляторов можно гибко изменять режим нагнетания воздуха, что будет способствовать улучшенной сохранности зерновой массы [20-22].

Возможность поддержания оптимальных режимов функционирования нагнетающих воздух установок появляется только в том случае, если имеется хорошо функционирующий канал обратной связи. Поскольку в большинстве

случаев для нагнетания воздуха и повышения его температуры применяются электрические нагреватели, одной из особенностей работы которых является определенная степень инерционности, то для обеспечения управления режимами их работы необходимо создавать специализированные АСУ.

Отметим, что при разработке и эксплуатации подобного рода систем появляются различные проблемы, которые обусловлены необходимостью учета изменений, случающихся в моменты начала и завершения подачи питания. Эти проблемы могут быть решены посредством методов, рассматриваемых теорией переходных процессов.

Как предусматривает данная теория, для описания процесса, который носит переходный характер, следует пользоваться системой дифференциальных уравнений. Они составляются в соответствии с законами Кирхгофа.

$$\text{Given} \quad L \cdot C \cdot \frac{d^2}{dt^2} U(t) + R1 \cdot C \cdot \frac{d}{dt} U(t) + U(t) = E$$

$$U(0) = 0 \quad U(0) = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot E$$

$$U := \text{odesolve}(t, t1, 100) \quad t := 0, \frac{t1}{100} .. t1 \quad i(t) := C \cdot \frac{d}{dt} U(t)$$

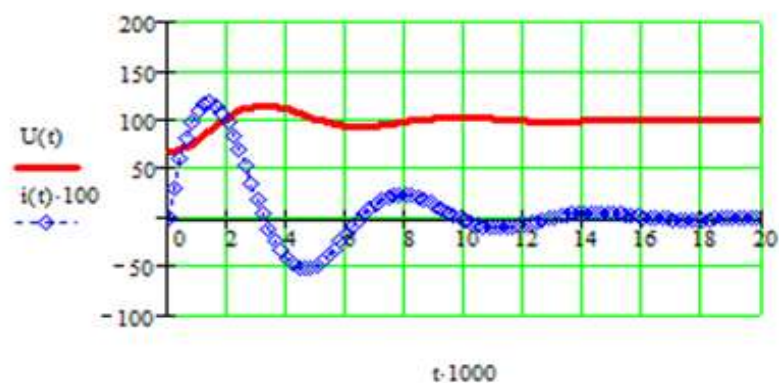


Рисунок 3.11 – График изменения электрического напряжения в цепи после прекращения подачи тока

В рамках экспериментального исследования была составлена электрическая цепь, состоящая из шести компонентов. Это источник тока E , индуктивная катушка 1, сопротивления ($R1$ и $R2$, причем $R1$ действует постоянно, а $R2$ является переменным), а также ключ и конденсатор C . На рисунке 3.11 продемонстрировано уравнение, описывающее состояние данной электрической

цепи после того, как завершается подача питания. Также на рисунке 3.11 показана программа, созданная при помощи пакета MathCad и позволяющая вычислять корни дифференциального уравнения, описывающего состояния цепи.

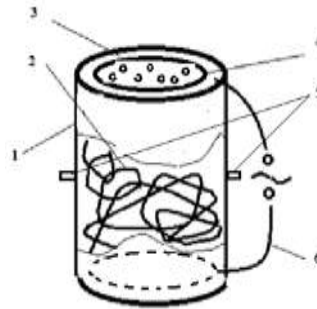


Рисунок 3.12 – Устройство для повышения температуры воздуха

1 – наружная обечайка, 2 – проводник, выполненный из нихромового материала, 3 - внутренняя обечайка (с отверстиями), 4 – крышка, имеющая перфорацию, обеспечивающую поступление продукта и 5 – патрубки, обеспечивающие перемещение воздуха внутри устройства, 6 - концы проводника (необходимы для установления контакта с источником тока).

На рисунке 3.12 продемонстрирована принципиальная схема устройства, обеспечивающего повышение температуры воздуха. Алгоритм функционирования этого устройства представлен ниже.

В момент времени $t=0$ проводник, выполненный из нихромового материала, характеризуется определенным начальным сопротивлением. После того, как концы этого проводника начинают контактировать с источником тока, начинается нагрев устройства. Энергия, выделяемая в результате работы источника тока, попадает через отверстия, имеющиеся в корпусе устройства, в пространство, где находится продукт. Когда нагретый воздух начинает проходить через патрубки, то форма проводника меняется, благодаря чему его нити становятся максимально близкими друг другу. В результате общее сопротивление системы становится меньше, что при постоянном напряжении дает результат в виде увеличения силы тока. Меняя скорость, с которой нагнетается воздух, можно воздействовать на силу тока, а также на энергию. Лишний объем воздушной массы удаляется через специальные отверстия, которые имеются в обеих крышках установки.

Как уже было отмечено выше, в процессе работы рассматриваемого устройства нити проводника начинают более тесно контактировать друг с другом. При этом из электрической цепи фактически удаляются некоторые составляющие, результатом чего является снижение общего сопротивления и

повышение силы тока (т.к. напряжение остается постоянным). Схема такой электрической цепи продемонстрирована на рисунке 3.13 [52-59].

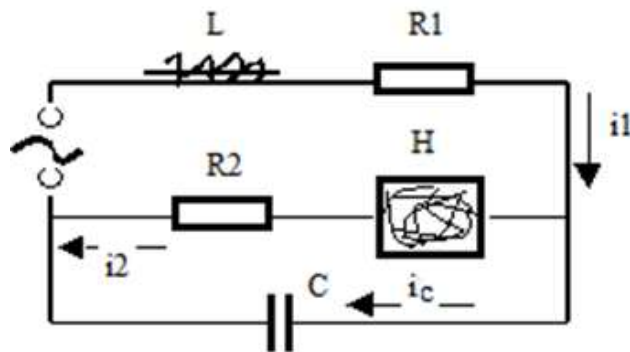


Рисунок 3.13 – Принципиальная схема подключения к источнику тока нагревательного оборудования

На рисунке 3.14 продемонстрирован отрывок программы, созданной при помощи пакета MathCad и позволяющей рассчитать, как меняются параметры функционирования рассмотренной выше электрической цепочки.

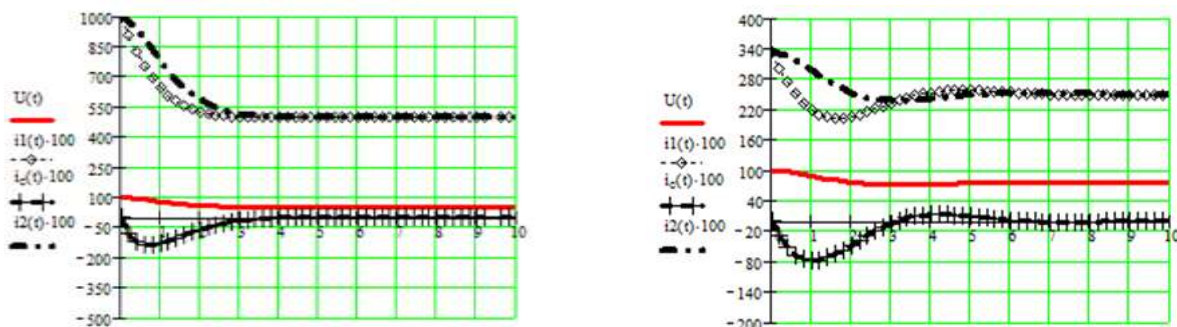
$$\begin{aligned} \text{Given } & L \cdot C \cdot \frac{d^2}{dt^2} U(t) + \left(R1 \cdot C + \frac{L}{R2} \right) \cdot \frac{d}{dt} U(t) + \left(\frac{R1}{R2} + 1 \right) \cdot U(t) = E \\ & U'(0) = 0 \quad U(0) = E \\ U := & \text{odesolve}(t, t1, 1000) \quad t := 0, \frac{t1}{100} .. t1 \\ i_c(t) := & C \cdot \frac{d}{dt} U(t) \quad i1(t) := i_c(t) + \frac{U(t)}{R2} \quad i2(t) := \frac{U(t)}{R2} \end{aligned}$$

Рисунок 3.14 – Отрывок программы MathCad, созданной для определения изменения режимов функционирования электрической цепи

Проведение эксперимента, суть которого заключалась в изменении значения $R2$, позволило вычлнить несколько зависимостей.

В частности, было выявлено, что после изменения $R2$ происходит резкое изменение силы тока. Однако этот процесс является кратковременным: спустя 0,003-0,005 сила тока стабилизируется. Отметим также, что увеличение интенсивности движения воздуха имеет своим результатом уменьшения расстояния между витками спирали проводника. Из-за этого сопротивление $R2$ снизится до отметки 10 Ом, сила тока, протекающего в электрической цепи, может увеличиться вплоть до 1 А (рисунок 3.15а). Если же сопротивление, как и

в примере выше, будет падать до 10 Ом, но при этом воздух начнет двигаться менее интенсивно, то сила тока в цепи станет ниже.



а)

б)

Рисунок 3.15 – Основные характеристики цепи

а) $R_2 = 10 \text{ Ом}$; б) $R_2 = 10 \text{ Ом}$

Таким образом, режим функционирования описанного выше устройства для нагревания воздуха может корректироваться путем увеличения (или уменьшения) интенсивности подачи воздуха. При этом необходимо обеспечивать безопасность эксплуатации электрической сети, поскольку сразу после изменения интенсивности нагнетания воздуха суммарное сопротивление падает, что приводит к повышению силы тока. Все сказанное выше свидетельствует о том, что применение нагревательного оборудования, имеющего рассмотренную конструкцию, предоставляет возможность изменять объем подаваемой энергии.

3.5. Возможности производства модифицированных крахмалов из некондиционного зернового сырья

3.5.1. Возможности совершенствования традиционных производств модифицированных крахмалов

Перечнями критических технологий и приоритетных направлений развития научно-технологического комплекса Российской Федерации на период до 2020 года определены технологии биоинженерии и рациональное природопользование.

Безусловным первенством в реализации этих направлений в области развития пищевых производств является доступное отечественное сырье [13].

К таким видам сырья по праву может быть отнесено зерно.

Требования рационального природопользования в случае переработки этого вида сельскохозяйственного сырья требует в первую очередь использования современных подходов биотехнологий [24].

К числу таких подходов биотехнологии относят глубокую переработку крахмалов путем их модифицирования.

Крахмал является добавкой, которая получила широкое распространение в производстве пищевой продукции. Существует множество разновидностей крахмала, которые кодируются в диапазоне E1401-E1451. Благодаря внедрению крахмала в продукт производитель добивается необходимой консистенции. Также необходимо отметить, что крахмал применяется в производстве гидроколлоидов, которые, в свою очередь, используются в пищевой промышленности как стабилизаторы. В таблице 3.6 продемонстрировано описание наиболее часто используемых в пищевом производстве модификаций крахмала.

Таблица 3.6 - .Отдельные типы модифицированных крахмалов

Тип модификации	Основные подгруппы	Функции в продукте питания	Области применения
Крахмал, обработанный термически (E1400)	Расщепленные декстрины	Загуститель консистенции, стабилизатор	Производство йогурта и других кисломолочных продуктов (не более 1,0%)
Крахмал, обработанный кислотой (E1401)	Гидролизированные	Загуститель и стабилизатор консистенции	Гелеобразователь в жевательных конфетах и т.п.
Окисленный крахмал (E1404)	Расщепленные	Загуститель, эмульгатор	При производстве мармеладов, лукама
Крахмал, обработанный ферментными препаратами (E1405)	Гидролизированные	Загуститель консистенции	Для получения кондитерских изделий: пастилы, жевательных резинок
Монокрахмал фосфат (E1410)	Этерифицированные	Загуститель, стабилизатор	Добавляют в томатные пасты, кетчупы

Дикрахмалфосфат ацетилованный «сшитый» E1414	Сшитые	Загуститель консистенции	Консервирование овощей
Ацетатный крахмал, этерифицированный уксусным ангидридом (E1420)	Стабилизированные крахмалы	Стабилизатор консистенции	При производстве майонеза, кетчупа и соусов
Дикрахмал-адипат ацетилованный (E1422)	Стабилизированные крахмалы	Загуститель, стабилизатор	Часто применяются для загущения кетчупов
Дикрахмалфосфат оксипропилированный «сшитый» (E1442)	Сшитые	Стабилизатор, загуститель	При производстве сладких сырков и др.
Оксипропилированный дикрахмалглицерин (E1443)	Сшитые	Загуститель, текстуратор	Консервирование овощей, рыб
Эфир крахмала и натриевой соли октенилтантарной кислоты (E1450)	Стабилизированные расщепленные крахмалы	Стабилизатор, загуститель консистенции	Производство низкокалорийных продуктов питания
Ацетилованный окисленный крахмал (E1451)	Стабилизированные крахмалы	Загуститель, стабилизатор	Для приготовления прозрачных супов

Использование нескольких видов крахмалов, как правило, приводит к формированию геля. В этом случае также возникает трехмерная сеть, благодаря которой происходит связывание частиц воды.

Крахмал, который подвергнут расщеплению, считается жидкокипящим. Клейстер, который образован такими крахмалами, обладает сниженной вязкостью. Получить жидкокипящий крахмал можно, разрушая цепи, сформированные полисахаридами. Для этого необходимо осуществить химическую реакцию, при которой крахмал прореагирует с окислителем. Результатом такого химического взаимодействия станет снижение молекулярной массы получившегося соединения, а также формирование большого количества карбоксильных групп. Кроме этого, после проведения реакции крахмальные зерна могут утратить собственную структуру. Сфера использования крахмалов, подвергнутых расщеплению, является очень широкой. Те крахмалы, которые прореагировали с какой-либо кислотой, обладают такой особенностью, как

практически неограниченная растворимость в воде. Используя их, можно получить клейстер, при снижении температуры которого возникает студень высокой прочности. А такой студень, в свою очередь, используется как сырье в производстве конфет и сладостей, получивших большое распространение в странах Востока [30].

Большая востребованность модифицированных крахмалов, в том числе в пищевой промышленности, обусловило создание для их получения крупных специализированных производств.

Вместе с тем, на местах хранения зерна создание специализированных производств не всегда рентабельно из-за сезонности появления и сравнительно небольших количеств некондиционного сырья, а транспортировка его на крупнотоннажные производства связана с дополнительными затратами. Такая ситуация делает целесообразной организацию в некоторых местах хранения зерна сравнительно небольших цехов или участков по переработке некондиции. Это в свою очередь требует определенной корректировки под такие задачи некоторых видов специализированного оборудования.

Одним из указанных видов такого оборудования является устройство, которое относится к оборудованию крахмалопаточного производства и применяется для измельчения крахмалосодержащего сырья при изготовлении модифицированных крахмалов [28].

Предлагаемые усовершенствования приводят к упрощению конструкции, увеличению степени измельчения сырья и обеспечению предварительной подготовки за счет обработки сырья химическими реагентами. На рисунке изображена принципиальная схема устройства.

Устройство состоит из цилиндрического корпуса 1 с загрузочным бункером 2, установленного внутри него горизонтально на валу 3 барабана 4, на наружной поверхности которого укреплено перфорированное терочное средство 5, полый прижим 6, в который через питающий шланг подается необходимый химический реагент о осуществляется регулирование степени измельчения, а также расположенная в нижней части корпуса 1 решетка 7 для измельченного продукта.

Терочное средство, которое обозначено цифрой 5, представляет собой ленту, выполненную из стального материала и обладающую увеличенной гибкостью. Эта лента находится снаружи барабана (4). По всей протяженности ленты имеются полосы, сформированные абразивным материалом [109].

Контакт между барабаном (4) и терочным механизмом (5) обеспечивается специальным зажимом (9). На прижиме (6) имеется болт, изменяя положение которого, можно управлять размером фракции готового продукта. Описываемое устройство работает в соответствии со следующим алгоритмом. Сырье, которое должно быть обработано, попадает в пространство для измельчения, предварительно проходя через бункер (2). Испытывая воздействие со стороны полос, выполненных из абразивного материала (8), некоторые части обрабатываемого материала попадают в пространство, которое ограничивается прижимом (6), а также барабаном (4). Сырье, попадающее в это пространство, измельчается, в это же время начиная взаимодействовать с реагентом. В процессе этого взаимодействия полосы (8) осуществляют деструкцию каждой клетки, где есть крахмал. Управлять степенью измельчения крахмалосодержащего продукта, можно, меняя удаление абразивных полос (8) от прижима (6). Кроме этого, для улучшения качества измельчения можно применять мелкофракционные абразивы. Материал, который уже был подвергнут измельчению, аккумулируется в поддоне (11), который находится ниже, чем устройство для измельчения. Отметим, что достоинством рассматриваемого оборудования является наличие терочного устройства, представляющего собой не совокупность клиньев, а сплошную ленту, выполненную из металлического материала и содержащую частицы абразива. Благодаря такому решению терочное устройство легко крепится на барабане [110].

Эксплуатационная надежность рассматриваемого оборудования является высокой. Кроме этого, применением такого оборудования достигается надлежащее качество обработки сырья, содержащего крахмал. В процессе обработки сырье может взаимодействовать с разнообразными реагентами, что позволяет получать такой продукт, который обладает всеми необходимыми

свойствами. По сравнению с известным устройством, в предлагаемом при любом регулировании степени измельчения обеспечивается ее повышение вследствие увеличения размеров терочной поверхности.

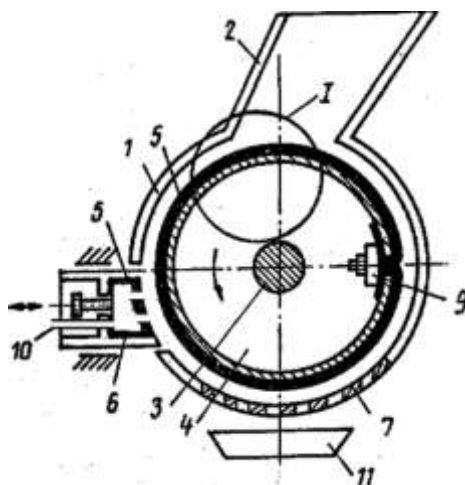


Рисунок 3.16 – Принципиальная схема устройства для измельчения сырья при изготовлении модифицированных крахмалов

Другие виды модифицированных крахмалов получают из частично клейстеризованной крахмальной суспензии. В таких случаях целесообразно применять устройство другого типа.

Наиболее известным для этой цели техническим решением является устройство, в котором, для повышения производительности и улучшения качества получаемого продукта для более равномерного протекания процесса, установлена вальцовая сушилка с размещенным над ней клейстеризатором и бункером-питателем клейстеризованного крахмала, причем клейстеризатор состоит из двух параллельно расположенных с зазором валков-электродов, подключенных к источнику электрического тока (А.с. СССР №771191 Устройство для изготовления модифицированного крахмала, В.И. Асташкевич, А.И. Жушман, В.Н. Коробков, МПК 26 В 17/28, Заявка № 2718790/28-13 от 22.01.79. Опубликовано 15.10.80. БИ № 38).

В этом устройстве клейстеризатор за счет воздействия электрических разрядов предварительно подготавливает перерабатываемую суспензию, которая после клейстеризации подсушивается на сушилке. Частично способствуя повышению производительности, устройство не обеспечивает разнообразия получаемых

модифицированных крахмалов. Для этого необходима дополнительная обработка полуфабриката химическими реагентами на других устройствах.

Задачей, решаемой предлагаемым устройством, является устранение необходимости процедур дополнительной обработки перерабатываемого сырья химическими реактивами для получения модифицированного крахмала. Поставленная задача решается за счет достижения технического результата, дополнительно заключающегося в повышении производительности устройства.

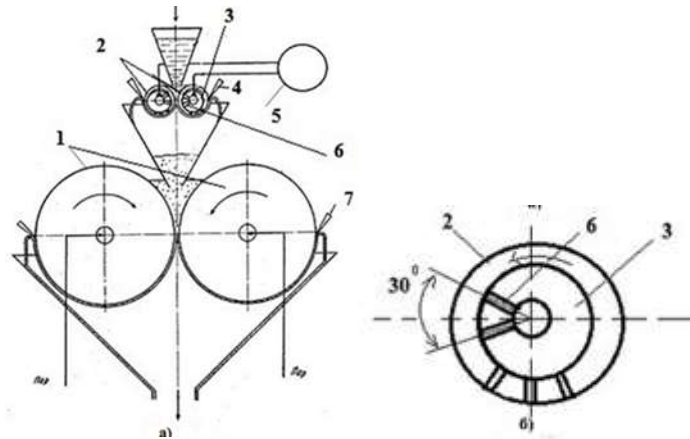


Рисунок 3.17 – Устройство для приготовления модифицированного крахмала из клейстеризованной суспензии:

а) вертикальный разрез устройства; б) укрупненно один из прикатных валков

Данный технический результат достигается за счет того, что устройство для получения модифицированных крахмалов, содержит приемную камеру, прикатные валки, ножи для съема клейстеризованного продукта, бункер-питатель для направления клейстера в зазор между вальцами сушилки, обогреваемыми паром, ножи для съема готового продукта, при этом прикатные валки выполнены каждый в виде двух коаксиальных цилиндров, причем наружные установлены с возможностью вращения вдоль их общей оси и выполнены перфорированными, а внутренние цилиндры закреплены неподвижно и соединены магистралями с емкостью с подогретыми химическими реактивами, причем в них выполнены по две форсунки, смещенные одна относительно другой на угол 30° и размещенные симметрично относительно прямой соединяющей оси вращения прикатных валков

На рисунок 3.17. схематически показано устройство для получения модифицированного крахмала. На рисунке 3.17 а) изображен вертикальный разрез устройства, а рисунке 3.17 б) укрупненно один из прикатных валков.

Устройство содержит сушилку из двух вальцов 1, над которой располагаются прикатные валки, выполненные в виде двух коаксиальных перфорированных наружных цилиндров 2 и внутренних цилиндров 3. Внешняя поверхность нпружных цилиндров касается скребков 4 для удаления налипшей крахмальной суспензии. Осевые отверстия внутренних цилиндров подсоединены магистралями к емкости 5 подогретого химического реагента. Со стороны, обращенной к обрабатываемой крахмальной суспензии, в корпусе внутренних цилиндров выполнены по две форсунки 6, смещенные одна относительно другой на угол 30° и размещенные симметрично относительно прямой соединяющей оси вращения прикатных валков. По наружной поверхности вальцов сушилки установлены ножи 7 для съема готового продукта.

Устройство работает следующим образом. Крахмальная суспензия заданной концентрации подается насосом в приемную камеру и из нее поступает в зазор между наружными цилиндрами 2 прикатных валков. Через перфорацию этих цилиндров при периодическом совмещении ее с выполненными в корпусе наружного цилиндра 3 форсунками 6, впрыскивается химический реактив из емкости 5. Излишки крахмальной суспензии при вращении наружных цилиндров снимаются скребками 4. Часть химического реагента попадающая на крахмальную суспензию из верхних форсунок участвует в ее нагреве в зазоре между наружными цилиндрами прикатных валков, а вторая часть, из нижних форсунок, попадает на подсушенный продукт выталкивая частички попавшие в перфорацию. Прошедшая между нагретыми наружными цилиндрами крахмальная суспензия клейстеризуется и попадает для подсушивания между вальцами 1 сушилки. Готовый продукт снимается с последних ножами 7.

Применение для предварительной клейстеризации крахмала прикатных валков с введением в крахмальную суспензию химических реагентов позволяет существенно увеличить производительность установки для получения

модифицированного крахмала, обеспечивает равномерную клейстеризацию крахмала, улучшая тем самым качество получаемого конечного продукта. Кроме того, при смене химического реагента появляется возможность получать набухающие крахмалы различной степени клейстеризации для использования в разных отраслях промышленности. Значительно сокращается расход тепло- и электроэнергии.

3.5.2. Возможности комбинированного производства модифицированных крахмалов

Требования по модификации и созданию оборудования для переработки некондиционного зерна предполагают использование для этого и новых перспективных технологий.

Известны попытки применения для этой цели современных технологий, включающих экструзию зерна.

После проведения загрузки каких-либо изменений в продукте не происходит. Когда он начинает двигаться в пределах рабочей камеры, сжатие становится более интенсивным. В результате степень плотности продукта повышается, а из-за высокой интенсивности трения увеличивается и его температура. После того, как структура продукта становится однородной, его текучесть существенно уменьшается, что приводит к коренной перестройке структуры крахмала. Давление, оказываемое на продукт, достигает 1,6 МПа, а температура в рабочей камере составляет 170-200 градусов Цельсия. Агрегатным состоянием воды при такой температуре и давлении является жидкость. Когда продукт попадает в пространство, где давление равняется атмосферному, энергия, собранная в нем, начинает осуществлять работу, в результате которой происходит деструкция клеток биополимеров. Разрушаются углеводы и белки, что приводит к формированию более элементарных соединений, легко усваиваемых человеком.

Иногда обработка может производиться при помощи углекислого газа. В этом случае в питатель помещается определенный объем углекислого газа

(он должен быть таким, чтобы масса газа составляла 4-7% от массы сырья, подлежащего обработке).

При проведении экспериментов на первом этапе рецептуры и технология изготовления крахмальной суспензии для опытов выбирались традиционной для нативного крахмала и в соответствии с разработкой Всероссийского научно-исследовательского института крахмалопродуктов (Способ производства модифицированного крахмала, Патент РФ № 2 159 252 Жушман А.И. и др. Опубликовано: 20.11.2000 Бюл. № 32). Они включали тщательное перемешивание исходного продукта в воде при 50°C и выдержку полученной суспензии в течение часа, причем в качестве модифицирующих реагентов брали 0,12% FeSO₄ и 0,20% H₂O₂ мас. сухих веществ.

Для подготовленных образцов определялась скорость гелеобразования в соответствии с разработанной методикой.

Сравнительный качественный анализ скорости гелеобразования определяли с помощью скоростной фотосъемки на подготовленных образцах крахмальных суспензий по скорости гелеобразования определяемой отношением эквивалентного диаметра растекания к времени гелеобразования (рис.3.18)

$$V = D/\tau \quad [\text{м/с}] \quad \text{или} \quad V = \frac{2\sqrt{S}}{\tau} \quad [\text{м/с}]$$

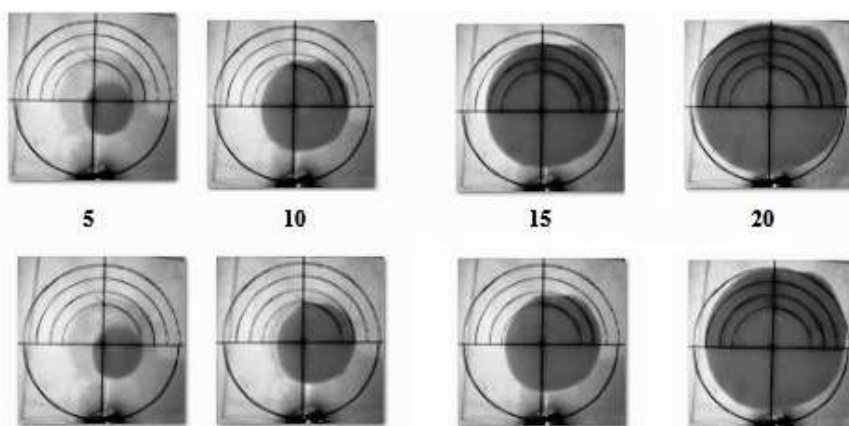


Рисунок 3.18 – Динамика гелеобразования крахмального клейстера при 50°C (верхний ряд – растекание по измерительной сетке контрольных образцов, нижний ряд – растекание образцов, прошедших модификацию)

Сравнение полученных результатов эксперимента в течение времени от 5 до 20 минут свидетельствует о том, что модифицированные крахмалы имеют большую скорость гелеобразования, о чем свидетельствует меньшая скорость растекаемости клейстера (рис.3.19) В целях совершенствования технологии производства модифицированных крахмалов для цехов малой производительности нами проведены исследования комбинированной термо-химической обработки зернового крахмала первого сорта по ГОСТ 31935-2012 Крахмал пшеничный. Технические условия.

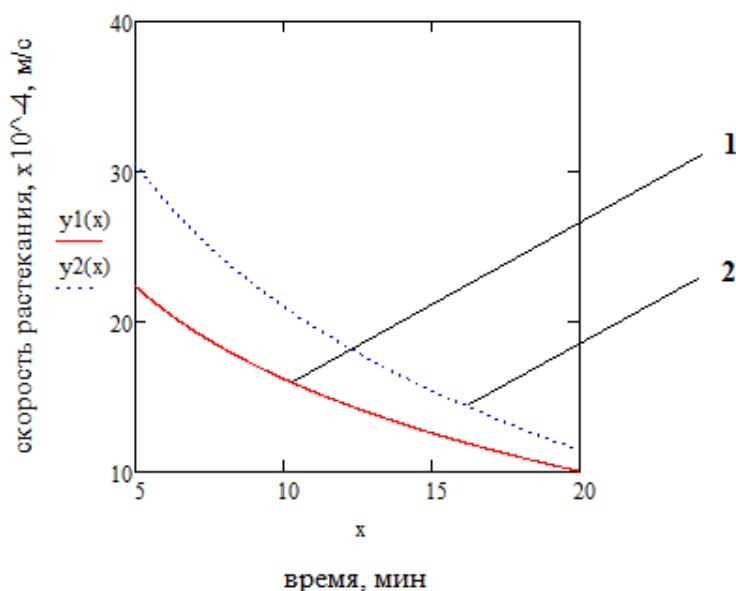


Рисунок 3.19 – Сравнительная характеристика скорости растекания химически модифицированного (1) и нативного (2) крахмала

Состав сырьевого источника для него выбирался в виде пшеницы с нижними требованиями по качеству, граничащими с некондиционным зерном по ГОСТ 9353-2016 Пшеница. Технические условия. Химические реактивы использовались те же, что и в предварительном эксперименте с прежними дозировками.

Таблица 3.7 – Характеристики зернового сырья, выбранного для эксперимента

Наименование показателя	Характеристика	
	высшего сорта	первого сорта
Массовая доля влаги, %, не более	14	14
Массовая доля общей золы в пересчете на сухое вещество, %, не более	0,20	0,30

Кислотность, см ³ , не более	20	25
Массовая доля протеина в пересчете на сухое вещество, %, не более	0,3	0,5

Термо-химическую обработку такого зерна проводили на экструдере КЭШ-2, оснащенном необходимыми измерительными датчиками (рис.3.20), по режимам, рекомендованным для экструдирования крахмалсодержащего пищевого сырья (Василенко В.Н. Научное обеспечение производства полноценных коэкструдированных и экспандированных комбикормов/ докторская диссертация – Воронеж – 2010 г.)



Рисунок 3.20 – Установка для термо-химической обработки зерна:

- 1 – шкаф управления; 2 – вольтамперметр; 3 – преобразователь давления; 4 – ПК с SCADA;
 5 – система передачи давления; 6 – термоэлектрические преобразователи; 7 – тахометр;
 8 – экструдер КЭШ-2.

После получения экструдированного продукта (рис.3.21) его измельчали на лабораторной молотковой дробилке МД 5х2 (рис.3.22) до максимальной степени.

Полученные термо-химические модифицированные крахмалы использовали для выпечки образцов мелкоштучных хлебо-булочных изделий для сравнения их органолептических показателей.

Качество выпеченных образцов хлебобулочных изделий оценивали органолептически (рис. 3.23).



Рисунок 3.21 – Экструдированный продукт



Рисунок 3.22 – Установка для измельчения продукта после термо-химической обработки зерна

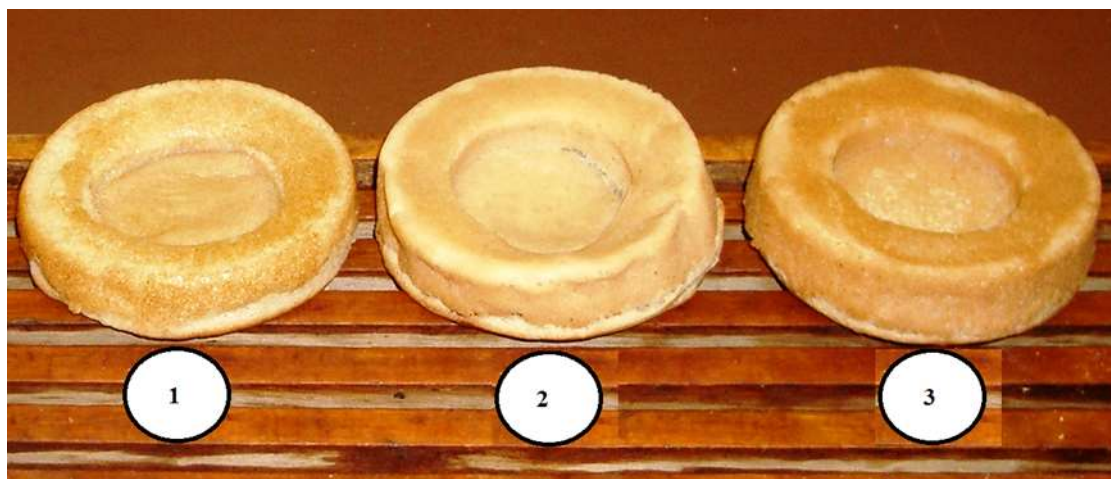


Рисунок 3.23 – Выпеченные при использовании разных крахмалов образцы для органолептической оценки:

1 – нативный крахмал; 2 – химически модифицированный; 3 – термо-химически модифицированный.

Органолептическая оценка качества выпекаемых хлебобулочных изделий проводилась группой экспертов включающей проектировщиков теплового оборудования, технологов хлебопекарного производства и представителей заказчиков из сетевых универсамов, типа «Лента». Конкордация группы экспертов оценивалась по критерию Кенделла

Величина такого критерия оказалась равной 0,87 и свидетельствует о согласованности мнений экспертов.

$$W = \frac{12 S}{m^2 (n^3 - n)},$$

где m – число экспертов в группе;

n – число факторов;

S – сумма квадратов разностей рангов (отклонений от среднего), вычисляемая по формуле:

$$S = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m A_{ij} - \frac{1}{2} m(n+1) \right)^2.$$

Величина критерия 0,87 свидетельствовала о согласованности мнений экспертов.

Таблица 3.6 – Дескрипторы по Национальному стандарту

Наименование показателя	Характеристика
1. Запах	Запах и поверхность соответствующие виду изделия. От светло-желтого до темно-коричневого. Пропеченный, не влажный на ощупь, без следов непромеса. Для рогликовых изделий – мякиш слоистый в изломе, для слоеных изделий – с отделимыми друг от друга слоями; для изделий с начинкой – слой основы, соприкасающийся с начинкой, может быть увлажнен. Свойственный изделию данного вида, без постороннего привкуса. При использовании пищевкусовых добавок – привкус, свойственный внесенным добавкам. Свойственный изделию данного вида, без постороннего запаха. При использовании ароматических добавок - запах, свойственный внесенным добавкам.
2. Поверхность	
3. Цвет	
4. Форма	
5. Пропеченность	
6. Промес	
7. Пористость	
8. Вкус	

В ходе анкетирования была сделана попытка выявления влияния основных органолептических показателей на качество хлебобулочных изделий, выпеченных с нативным крахмалом, химически модифицированным, термо-химически модифицированным.

В качестве дескрипторов для такой оценки выбирали показатели

установленные для органолептического контроля Национальным стандартом Российской Федерации «Изделия хлебобулочные из пшеничной муки», введенным в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию от 29 декабря 2005 г. N 480-ст.

Таблица 3.7 – Качество выпечных хлебобулочных изделий

Наименование показателя	Тип крахмала		
	Нативный	Химически модифицированный	Термохимически модифицированный
Запах (1)	77	64	75
Поверхность (2)	22	41	31
Цвет (3)	21	37	38
Форма (4)	22	34	41
Пропеченность (5)	31	33	23
Промес (6)	16	15	17
Пористость (7)	5	14	8
Вкус (8)	30	41	48

Собранные данные подвергли статистической обработке, принимая общее качество изделия в качестве целевой функции, а отдельные показатели в качестве дескрипторов.

Для того чтобы более объективно оценить качество выпеченных изделий можно определить площади фигур очерченных соответствующими кривыми. Для этого можно воспользоваться несложной программой Mathcad приведенной в приложении В7.

Полученные результаты представлены в таблице 3.8 и на рисунке 3.24.

Результаты расчетов показали, что коэффициент заполнения для выпечки с использованием термо-химически модифицированного крахмала равен 1303, а для химически модифицированного крахмала 812,242. Таким образом, наилучшее качество выпечных изделий содержащих термо-химически модифицированный крахмал.

Таблица 3.8 –Результаты опроса экспертов

Эксперт №	Вид крахмала		
	нативный	химически-модифицированный	термохимически модифицированный
1.	77	64	75
2.	22	41	31
3.	21	37	38
4.	22	34	41
5.	31	33	23
6.	16	15	17
7.	5	14	8
8.	30	41	48

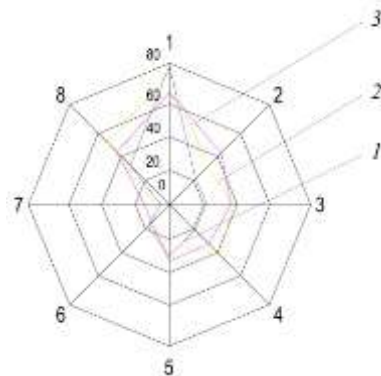


Рисунок 3.24– Обработка результатов опросов по видам крахмала:
1 – нативный; 2 – химически модифицированный; 3 – термо-химически модифицированный

Выводы по главе

Проделанные исследования, результаты которых изложены в настоящей главе позволили:

построить регрессионную модель влияния эксплуатационных параметров хранения зерна, таких как влажность и скважность на количество появляющегося некондиционного зерна;

предложить более совершенную конструкцию системы воздухораспределения;

разработать ряд устройств для повышения эффективности переработки некондиционного зерна в модифицированные крахмалы;

оценить эффективность использования термо-химически модифицированных крахмалов при хлебопечении.

Глава 4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

4.1. Рекомендации по конструированию зернохранилищ со шнековыми ворошителями

Результаты аналитического моделирования свидетельствуют о существенной неоднородности температурных полей внутри насыпи зерна при его хранении.

Особенно существенна эта неоднородность при наличии самосогревания зерна за счет происходящих в нем биологических процессов. Правомерно возникает мысль о необходимости применения некоторых мер по снижению этой неравномерности. Одним из традиционных способов выравнивания температуры в гетерогенной среде обычно является ее перемешивание. Применительно к хранению зерна такой подход обычно называют активным вентилированием.

Известны различные технические решения, реализующие такой подход в пищевой промышленности и сельскохозяйственном машиностроении, а именно в устройствах активного вентилирования при хранении сельскохозяйственного продукта для более полной его сохранности для переработки в пищевых целях. В качестве примера такого решения можно привести устройство, на которое оформлено авторское свидетельство СССР №1757521, кл. А01F 25/14. Существует также и винтовой питатель, назначение и устройство которого описаны в авторском свидетельстве СССР №1701611, В 30 В 11/34.

Недостатками таких конструкций является то, что в них сложно отрегулировать качество вентилирования при переходе с одной культуры на другую, особенно это касается просушивания верхнего слоя при хранении зерна, семян масличных, картофеля или топинамбура.

Представляется наиболее близким к достижению равномерности температурного поля по объему насыпи бункер активного вентилирования

сельскохозяйственного продукта (Патент RU №2 406 291, кл. A01F 25/14). Он обеспечивает повышение качества хранящегося сельскохозяйственного продукта, но не предусматривает его транспортировку в период закладки и выгрузки. Кроме того не исключено слипание между собой отдельных объектов хранимого продукта.

Следует отметить, что существующие модели бункеров активного вентилирования имеют существенные недостатки, выраженные в том, что не обеспечивается в полном объёме защита зерновой массы от слипания между собой отдельных зёрен.

В целях не допущения снижения показателей качества зерновой массы в процессе хранения, а именно, предотвращения слеживаемости и слипания отдельных зерен, предложен бункер для динамического вентилирования.

Совершенствование процесса вентилирования зерновой массы достигается за счет конструктивных изменений бункера. Для этого в конструкцию бункера для динамического вентилирования предлагается включить неподвижно зафиксированный цилиндр с винтовой лопастью, внутри которого зафиксированы шнековый ворошитель и воздухопровод, через который подается под давлением теплый воздух. Шнековый ворошитель и воздухопровод выполнены из составным коаксиальных перфорированных цилиндрических стоек.

Положительный эффект от предложенной конструкции достигается за счёт того, что при вращении шнекового ворошителя периодически обеспечивает совмещение перфораций проделанных в его стенке и воздуховода, что обеспечивает периодический выброс теплого воздуха и принудительный разрыв слипшихся зерен за счет динамического действия. Движение зерновой масса внутри корпуса обеспечивается за счет разнонаправленной ориентации шнекового ворошителя, который поднимает ее в область горлышка и через отверстия перегружает на лопасти цилиндра. Противоположная нарезка лопастей цилиндра позволяет перемещать зерно вниз бункера. Оснащение бункера рекуператором обеспечивает возможность регулировки температуры подаваемого воздуха и снизить затраты на его нагрев. Предложенная конструкция

бункера для динамического вентилирования показана на рис. 4.1. Принцип работы бункера для хранения зерна сводится к следующему. Загрузка зерновой массы осуществляется через загрузочную воронку 7. Зерновая масса подается вовнутрь корпуса 1 на цилиндр с винтовой лопастью 2, по которым ссыпается вниз, заполняя пространство. Вращение шнекового ворошителя 3 обеспечивает наполнение пространства между ним и внутренней стенкой цилиндра с винтовой лопастью 2 и подъем зерновой массы до отверстий 6 проделанных в горлышке 11.

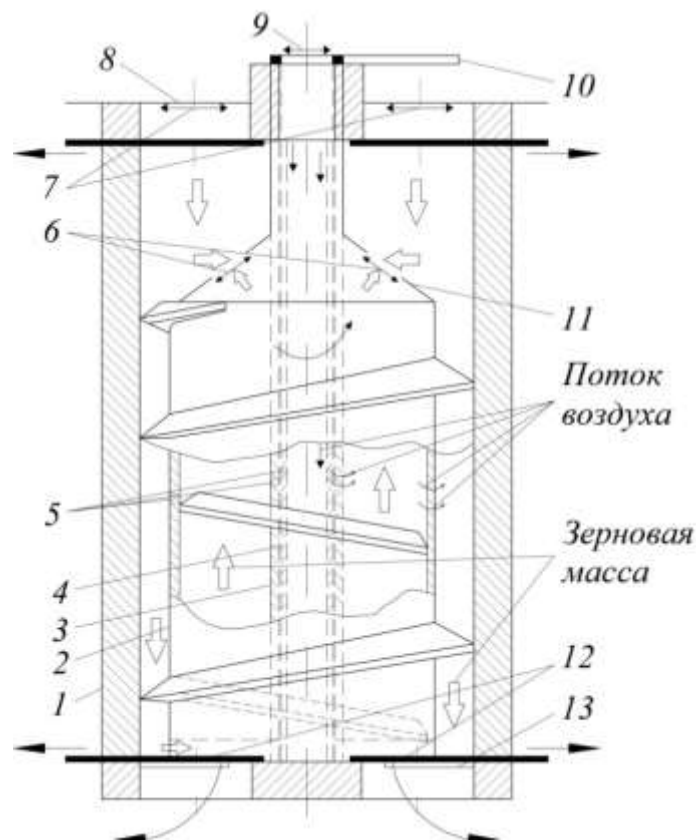


Рисунок 4.1 – Бункер для активного динамического вентилирования:

- 1 – корпус; 2 – цилиндр с винтовой лопастью; 3 – шнековый ворошитель; 4 – воздуховод;
 5 – перфорация; 6 – отверстие; 7 – загрузочная воронка; 8 – откидная крышка;
 9 – рекуператор; 10 – задвижка; 11 – горлышко; 12 – люк; 13 – крышка.

По заполнению пространств внутри корпуса зерновой массой загрузочная воронка 7 закрывается.

Подача сухого, теплого воздуха под давлением в воздуховод 4 осуществляется через рекуператор 9. Одновременно с подачей воздуха обеспечивается вращение шнекового ворошителя 3. Перемещаясь и обдуваясь потоком динамического воздуха (который «сдувает» сухое зерно, обеспечивая

теплоносителю доступ до влажных слоев) зерновая масса внутри корпуса отдает излишки теплоты и влаги. Выгрузка зерновой массы осуществляется через люк 12 при вращении шнекового ворошителя.

4.2. Рациональные параметры реализации процессов активного вентилирования зерна и осуществляющего их оборудования

Учитывая важность конструкции узла предварительной подготовки воздуха для его использования при активном вентилировании зерна целесообразно максимально упрощать его конструкцию при надежном регулировании выходных параметров.

Достаточно известно устройство для сушки зерна (патент РФ №2371650, опубл. 27.10.2009), включающее цилиндрический кожух, внешняя поверхность которого покрыта слоем теплоизолирующего материала, нагревательные элементы размещены на внешней поверхности кожуха под слоем теплоизолирующего материала между загрузочным бункером и выгрузным окном, загрузочный бункер, выгрузное окно, соосно внутри кожуха с возможностью вращения установлен транспортирующий рабочий орган, имеется воздуховод и вентилятор, транспортирующий рабочий орган выполнен в виде полого вала шнека, витки которого выполнены перфорированными с диаметром перфорации, не превышающим минимального размера зерна, кожух выполнен составным, причем составные части кожуха разделены между собой кольцами, выполненными из теплоизолирующего материала, воздуховод соединен с внутренней полостью кожуха, в воздуховоде между кожухом и вентилятором установлен нагревательный элемент. Однако известное устройство имеет недостаток, к которому можно отнести неполное использование внутреннего объема.

Более совершенной является установка для сушки и нагрева сыпучих материалов (патент РФ №1038766, опубл.30.08.83), содержащее корпус с загрузочным и разгрузочным патрубками и нагревательные элементы, причем

цилиндры, размещенные в корпусе, на открытых торцах снабжены общими фланцами подключенными к загрузочному и разгрузочному патрубкам, а нагревательные элементы расположены вокруг соответствующих корпусов.

Установка работает следующим образом. Секции через загрузочный бункер заполняются сыпучим материалом. Затем включают установку в сеть трехфазного тока и переменное магнитное поле обмоток однофазных индукторов нагревает внутренние поверхности секций. Сыпучий материал постепенно нагревается, содержащаяся в нем влага испаряется. Пар, проходя через перфорации трубы, выбрасывается в атмосферу. После достижения оптимальной температуры материала открывается задвижка и дозатором подают материал потребителю.

Недостатками установки являются периодический характер действия и необходимость предусматривать специальный выброс удаленной влаги, а также односторонняя передача нагревательными элементами теплоты через корпуса цилиндров, что снижает эффективность теплосъема, кроме того отсутствует возможность изменения режимов работы нагревательных элементов в зависимости от начальной влажности поступившего для сушки сыпучего материала.

Предлагаемое техническое решение устраняет описанные недостатки, для чего установка для сушки и нагрева сыпучих материалов, содержит корпус с размещенным в нем перфорированным цилиндром, с загрузочным и разгрузочным патрубками, и нагревательные элементы, расположенные вокруг цилиндра, при этом размещенный соосно с корпусом цилиндр выполнен перфорированным в зоне обогрева, а загрузочный и разгрузочный патрубки размещены соосно с вертикальной осью цилиндра на входе сыпучего материала и на его выходе, соответственно, при этом зона обогрева снабжена фланцами жестко закрепленными на корпусе и цилиндре, а внутри нее размещены нагревательные элементы в виде полых перфорированных трубок с навитыми на них с зазором электрическими спиралями, которые своими верхними торцами оперты на кольцевой фланец, установленный в зазоре между корпусом и

цилиндром с возможностью возвратно-поступательного перемещения, при этом верхний торец перфорированных трубок и патрубков установленный на верхнем ограничивающей зону нагрева фланце с возможностью сообщения с зазором между верхним жестко закрепленным на корпусе фланцем и подвижным кольцевым фланцем подключены к разным магистралям со сжатым воздухом, управляемым термодатчиком установленным на выходе обрабатываемого сыпучего материала.

Технический эффект, в предлагаемом устройстве, реализуется за счет того, что существенно упрощается процесс контроля и перестройки режимов его работы из-за возможности отслеживания влажности обрабатываемого сыпучего материала, например зерна, непосредственно в процессе сушки. Это позволяет осуществить связь термодатчика установленного на выходе с магистралями подачи воздуха над подвижным кольцевым фланцем в зоне обогрева. Превышение такого давления по сравнению с давлением под фланцем приводит к его перемещению вниз и сокращению обогреваемого объема, что при постоянстве выделяемой теплоты увеличивает теплоприток в зону непосредственного контакта с сыпучим материалом. Объемные обогрев спирали за счет перфорации полых направляющих трубок, на которые навиты спирали, также увеличивает количество выделяемой спиралями теплоты. Постоянство режимов подаваемого на электрические спирали тока, положительно сказывается на долговечности устройства.

Сущность предложения поясняется рис. 4.2а), рис.4.2б) и рис.4.1в) где изображены общая схема устройства, вид его сечения по линии А-А, и укрупненная конструкция одного из нагревательных элементов.

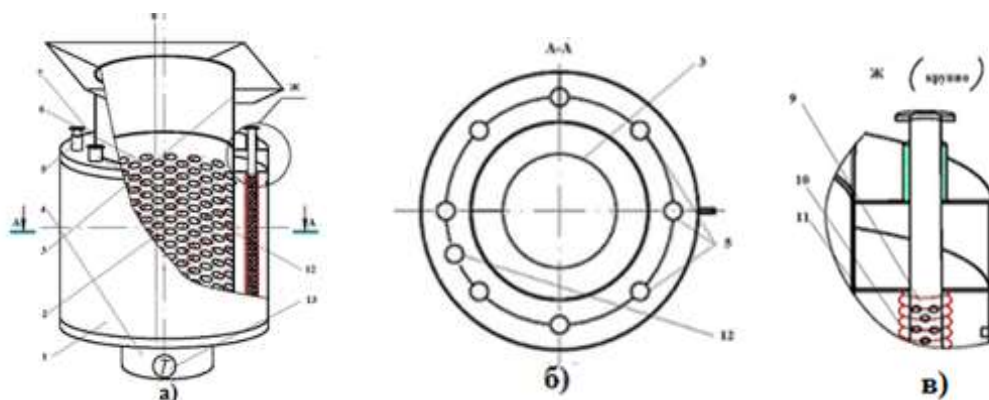


Рисунок 4.2 Установка для сушки и нагрева сыпучих материалов

1 – корпус; 2 – перфорированный цилиндр; 3 – загрузочный патрубок; 4 – разгрузочный патрубок; 5 – нагревательный элемент; 6 – зона обогрева; 7, 8 – фланец; 9 – перфорированных трубок; 10–12 – патрубок; 13 –термодатчик

Принципиальная схема установки для сушки и нагрева сыпучих материалов, включает корпус 1 с размещенным в нем перфорированным цилиндром 2, с загрузочным 3 и разгрузочным 4 патрубками, и нагревательные элементы 5, расположенные вокруг цилиндра, при этом размещенный соосно с корпусом 1 цилиндр 2 выполнен перфорированным в зоне обогрева 6, а загрузочный и разгрузочный патрубки размещены соосно с вертикальной осью цилиндра на входе сыпучего материала и на его выходе, соответственно, при этом зона обогрева снабжена фланцами 7 и 8 жестко закрепленными на корпусе и цилиндре, а внутри нее размещены нагревательные элементы в виде полых перфорированных трубок 9 с навитыми на них с зазором электрическими спиралями 10, которые своими верхними торцами оперты на кольцевой фланец 11, установленный в зазоре между корпусом и цилиндром с возможностью возвратно-поступательного перемещения, при этом верхний торец перфорированных трубок и патрубок 12 установленный на верхнем ограничивающий зону нагрева фланце 7 с возможностью сообщения с зазором между верхним жестко закрепленным на корпусе фланцем и подвижным кольцевым фланцем подключены к разным магистралям со сжатым воздухом, управляемым термодатчиком 13 установленным на выходе обрабатываемого сыпучего материала.

Работает установка для сушки и нагрева сыпучих материалов следующим образом. В начальный момент времени свободно расположенные в зоне обогрева между фланцем 8 и подвижным кольцевым фланцем 12 спирали 11 подключенные к источнику тока (на рисунке не показан) выделяют определенное количество теплоты, которая через отверстия перфорации трубок 10 и цилиндра 2 поступают в зону контакта с обрабатываемым сыпучим материалом. Если термодатчик регистрирует заданную температуру на выходе, процесс продолжается. В том случае, когда на выходе температура меньше допустимой, в

магистральной связанной с верхними торцами перфорированных трубок 10 давление увеличивают. Это приводит к перемещению кольцевого фланца вниз и уменьшению объема обогреваемой зоны. Теплоотдача через перфорацию трубок и цилиндра увеличивается и температура сушки повышается. Аналогично при превышении температуры сыпучего материала на выходе давление над подвижным кольцеобразным фланцем снижают и объем обогреваемой зоны увеличивается, общая теплоотдача от нагреваемого объема уменьшается и сыпучий материал на выходе возвращается к нормированной температуре.

Использование описанного устройства позволяет достаточно просто и экономически выгодно сушить или подогреть продукт, обеспечивая при этом высокую производительность за счет регулировки потока воздуха в патрубки для входа воздуха.

4.3. Перспективы применения и совершенствования устройств для изготовления модифицированных крахмалов

Определенная часть зерна, которая после хранения может быть признана некондиционной может быть использована при изготовлении модифицированных крахмалов.

Известны технологии и устройства для получения модифицированных крахмалов, позволяющие, например, получать из 100 тыс. тонн зерна до 24 тыс. тонн таких продуктов [1].

В специальной литературе описано также устройство для обработки крахмалосодержащих пищевых материалов, содержащее для их измельчения лезвийный инструмент, вращающийся с большой скоростью [23].

Такое оборудование характеризуется наличием большого количества недостатков. Во-первых, конструктивные решения, примененные разработчиками, являются чрезмерно усложненными. Во-вторых, невозможна длительная эксплуатация режущих элементов, поскольку их ресурс невелик. Этот недостаток также является значительным, поскольку для удаления изношенных

режущих элементов и замены их новыми необходимо выведение оборудования из эксплуатации на длительное время. Кроме этого, непрерывная обработка продукции с помощью рассматриваемого вида оборудования становится возможной только в том случае, если есть возможность использовать дополнительные перемещающие устройства. Такие устройства имеют большие геометрические размеры, из-за чего возникает потребность в крупных площадях для их размещения.

Мы предлагаем устройство, которое может использоваться для уменьшения фракции сырья, используемого в производстве пищевой продукции. Данное устройство является близким к ранее разработанным по получаемому результату, а также принципу функционирования. Это устройство образовано ротором и валом, обеспечивающим давление на зерно и его измельчение. Кроме этого, оборудование включает ножи, осуществляющие очистку обрабатываемого сырья, а также шнеки. Вал, измельчающий сырье, смонтирован таким образом, что имеется возможность внешнего касания. Благодаря такому технологическому решению отходы обработки не смешиваются с очищенным и измельченным сырьем. Оборудование включает в свой состав несколько рабочих органов, в каждом из которых имеются шнеки. В местах, где шнек крепится к ротору, могут появляться застойные пространства. Чтобы не допустить их возникновения, следует монтировать шнек таким образом, чтобы ось его вращения была повернута на 8-10 градусов относительно линии, проведенной между центрами вала и ротора. Устройство рассматриваемой конструкции обладает увеличенной производительностью в сопоставлении с аналогами, что достигается таким расположением ножей, которое обеспечивает касание наружных поверхностей. В пространстве, которое ограничивается шнеком, необходимым для разгрузки рабочей области, и внутренней частью полого ротора, имеется специальный лоток, куда собираются отходы производства. Он может вращаться в любую сторону от своего изначального положения, причем минимальный угол вращения составляет 90 градусов. Когда появляется потребность в удалении отходов из

перфорации, лоток поворачивается, а освободившееся пространство подвергается обработке прогретой водой и дезинфекции.

В данном устройстве успешно решаются вопросы измельчения крахмалосодержащих продуктов, но для получения модифицированных крахмалов необходима дополнительная обработка получаемого продукта химическими реагентами на других устройствах.

Задачей, решаемой предлагаемым нами устройством, является устранение необходимости процедур дополнительной обработки перерабатываемого сырья химическими реагентами для получения модифицированного крахмала. Поставленная задача решается за счет достижения технического результата, заключающегося в повышении производительности устройства.

Данный технический результат достигается за счет того, что устройство для получения модифицированных крахмалов, содержит корпус с загрузочной воронкой для измельченного крахмалосодержащего сырья, перфорированные ротор и прессующий вал, скребки и разгрузочные шнеки, расположенные внутри полых ротора и вала, кроме того оно снабжено пропиточной ванной с необходимыми химическими реагентами, в которой установлены верхний и нижний опорные валики и прижимной валок, который установлен с возможностью касания с нижним опорным валиком по срезу заполнения ванны реагентами, при этом на верхнем и нижнем опорных валиках, огибая прижимной валок и наружную поверхность прессующего вала, размещена сетка из упругого пористого материала.

Сущность устройства поясняется на рисунке 4.3., где на фиг.а) изображена общая схема устройства, а на фиг.б) укрупненно пропиточная ванна.

Устройство для изготовления модифицированных крахмалов, содержит расположенный на роликовых опорах 1 перфорированный полый ротор, внутри которого установлен лоток 2 для нижнего разгрузочного шнека, которые заключены в корпусе 3 с направляющей перегородкой 4. Перфорированный полый ротор 5 в зоне продавливания измельченного сырья касается прессующего вала, над которым установлена пропиточная ванна 6. Через загрузочное отверстие

7 поступает измельченное крахмалосодержащее сырье, которое поступает в зону продавливания для одновременной обработки химическими реагентами, доставляемым с верхнего опорного валика 8, огибающего его и прижимной валок 9, расположенной на верхнем опорном валике 10 сеткой из упругого пористого материала 11, предварительно насыщенными этими реагентами в зоне касания нижнего опорного валика и прижимного вала.

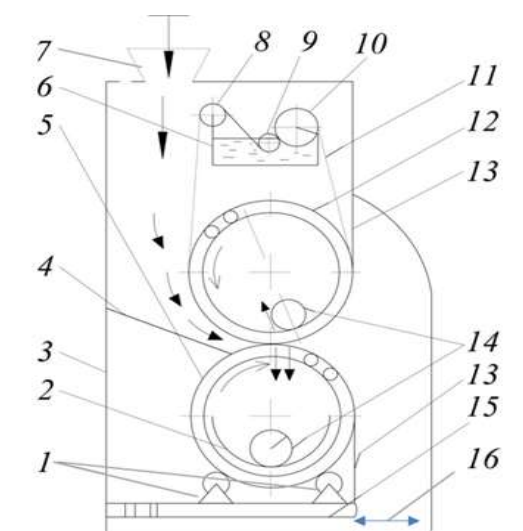


Рисунок 4.3 – Схема устройства для приготовления модифицированного крахмала:

- 1 – роликовая опора; 2 – лоток; 3 – корпус; 4 – перегородка; 5 – ротор; 6 – ванна; 7 – загрузочный бункер; поз. 8 – опорный валик; 9 – прижимной валик; 10 – верхний опорный валик;
11 – сетка; 12 – прессующий вал; 13 – нож; 14 – разгрузочный шнек; 15 – платформа;
16 – отверстие

Прессующий вал 12 продавливая, смоченное химическими реагентами сырье через собственную перфорацию и отверстия перфорированного ротора, частично уносит остатки сырья вне рабочей зоны, где они счищаются очистительными ножами 13, которые осуществляют аналогичную функцию и для нижнего опорного вала. Разгрузочные шнеки 14, расположенные внутри полых перфорированных ротора и прессующего вала удаляют обработанное химическими реагентами измельченное крахмалосодержащее сырье на следующие операции приготовления модифицированного крахмала. Периодическое санитарно-техническое обслуживание осуществляют промывкой водой через загрузочную воронку посредством перфорации в установочной платформе 15 и отверстия в корпусе 16.

Работает устройство для изготовления модифицированных крахмалов следующим образом. Работает устройство для получения модифицированного крахмала, так. Заранее подготовленное крахмалсодержащее сырье загружают в корпус 3 с направляющей 4 и загрузочной воронкой 7. Оно попадает в зону контакта перфорированных ротора 5 и прессующего вала 12, где продавливается через отверстия перфорации. Скребки 13, прилегая к рабочим поверхностям, удаляют частички перерабатываемого сырья, а разгрузочные шнеки 14, внутри полого перфорированных ротора 5 и прессующего вала 12 удаляют крахмалсодержащий измельченный продукт в разгрузочный лоток 2. Поскольку он установлен эквидистантно внутренней поверхности полого перфорированного ротора 5 а сам ротор размещен на опорных роликах 1, на установочной платформе 15, которая примыкает к емкости с отверстиями 16 удаление остатков перерабатываемого сырья не вызывает проблем. При реализации этого процесса при продавливании крахмалсодержащего сырья через перфорацию ротора 5 и прессующего вала 12, выделяемый крахмал соприкасается со смоченную химическими реагентами сетку из упругого пористого материала 11. Эта сетка, проходя в пропиточной ванне между нижним опорным валиком 10 и прижимным валком 9, упруго сжимается и, после этого, восстанавливая форму, впитывает химические реагенты. Дополнительные эффекты равномерности распределения по прессующему валу используемых реагентов обеспечивается использованием конструкции и взаимного расположения валика 10 и валика 8, которые помещаются в пропиточную ванну по срезу заполняющих ее реагентов.

Описанное устройство опробовано при различных концентрациях FeSO_4 и H_2O_2 для выяснения их влияния на изменение кислотности раствора после реакции, условной и относительной вязкости получаемого клейстера. Сравнение полученных результатов говорит о влиянии концентрации реагентов на условную вязкость, что может обеспечить корректировку раствора для более полного удовлетворения требований предъявляемых к конечному продукту. Использование описанного устройства позволяет не только получать различные виды модифицированных крахмалов, выбирая необходимые химические

реагенты и их концентрацию, но и достаточно просто дополнительно измельчать сырье, обеспечивая высокую производительность за счет соответствующего выбора диаметра отверстий перфорации и геометрических размеров рабочих органов.

Выводы по главе

Результаты полученные в настоящей главе решают вопросы:

разработки методики расчета конструктивных элементов бункерных сушильно-вентиляционных установок;

создания практических рекомендаций по совершенствованию зернохранилищ активного вентилирования для многоцелевого назначения;

разработать конструкции ряда устройств для получения модифицированных крахмалов как расщепленного, так и замещенного видов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы хранения и переработки зерна имеют для отечественной пищевой промышленности чрезвычайную актуальность, поскольку оно является основным пищевым ресурсом, на базе которого предполагается решать большинство проблем связанных с продовольственной безопасностью страны.

Трудно переоценить сложность задач, которые стоят перед исследователями в этой области. Достаточно сказать, что первые опыты с активным вентилированием сохраняемого зерна проводились французскими учеными еще в 1730-1740 годах, а надежных моделей и методик оценки количества некондиционного зерна, заложенного на хранение в разное время и разные хранилища, даже подвергаемому определенным мероприятиям по его сохранности, до сих пор нет. Актуальность таких моделей и методик особенно усилилась в настоящее время, когда благодаря успехам биотехнологий и биохимии, появились технологии позволяющие осуществлять глубокую переработку некондиционного зерна с получением из него ценных пищевых продуктов.

Частичному решению указанных вопросов посвящены исследования изложенные выше. На основании полученных результатов:

создан ряд математических модели процессов сушки зерна в установках бункерного типа для различных граничных условий;

предложена методика идентификации параметров разработанной модели для бункерных установок с различными воздухораспределительными системами;

разработаны технические решения для распределенной подачи воздуха в бункерных установках,

разработан ряд устройств для повышения эффективности переработки некондиционного зерна в модифицированные крахмалы.

предложена более совершенная конструкция системы воздухораспределения;

разработаны методики расчета конструктивных элементов бункерных сушильно-вентиляционных установок;

на основании полученных эмпирических моделей выработаны практические рекомендации по совершенствованию зернохранилищ активного вентилирования для многоцелевого назначения;

предложены конструкции для хранения зерна и устройств для получения модифицированных крахмалов из некондиционного зерна, защищенные патентами РФ на полезные модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева, А.А. Обоснование термо- технологических приемов сушки пшеницы на сушилках типа «С» Текст. // А.А. Авдеева / Дис. .канд.техн.наук, М.: 2003.
2. Аксенов С.И. Вода и ее роль в регуляции биологических процессов. Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2004, 212 с.
3. Алямовский И.Г. Теплообмен при охлаждении картофеля и овощей в насыпном слое // Холодильная техника. – 1973. – № 8. – С. 24–27.
4. Баум, А.Е. Сушка зерна Текст. / А.Е.Баум, В.А. Резчиков- М.: Колос, 1983.-224с.
5. Близнюк Г.И., Щербаков В.Г., Малышев А.М. Изменение кислотного числа масла семян подсолнечника в зависимости от условий и длительности хранения // Масложировая промышленность. – 1973. – № 12. – С. 6–8.
6. Боуманс, Г. Эффективная обработка и хранение зерна. Текст. / Пер. с англ. В.И. Даниевского М.: Агропромиздат, 1991 - 607с.
7. Братерский, Ф.Д. Послеуборочная обработка зерна. Текст. / Ф.Д. Братерский, С.В. Карabanов-М.: Агропромиздат, 1986.-175с.
8. Вавилов, Ю.Г. Моделирование процесса сушки в плотном слое без перемешивания. Влагообменные процессы и аппараты химической технологии. Текст. / Ю.Г. Вавилов, М.М. Разин, М.К. Герасимов, Л.Г. Голубев // Казань, 1983. С. 59-62.
9. Вобликов, Е.М. Послеуборочная обработка и хранение зерна. Текст. / В.А. Буханцов, Б.К. Маратов, А.С. Прокопцев -Ростов н/Д: издательский центр «МарТ», 2001.-240с.
10. Вобликов, Е.М. Технология хранения зерна. Текст. / Е.М. Вобликов СПб.: Издательство «Лань», 2003- 448с.
11. Волков М.А. Влияние режимных параметров активной вентиляции на потери массы плодоовощной продукции / А.М. Волков, А.Ф. Джафаров, В.Д.

Шестаков // Сб. науч. трудов (Межвузовский) «Проблемы совершенствования торгово—технологического оборудования». — Л.: 1982. С. 68 — 78.

12. Гержой, А.П. Зерносушение и зерносушилки Текст. / А.П. Гержой, В.Ф. Самочетов 4-е изд., перераб. - М.: Колос, 1967. - 256с.

13. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. СанПиН 2.3.2.1078-01 от 06.11.2011 г.

14. Гинзбург, А.С. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы. Текст. / А.С Гинзбург, М.А. Громов М.: Колос, 1984. - 304 с.

15. Горбатова, К.К. Биохимия молока и молочных продуктов / К.К.Горбатова. - СПб., ГИОРД, 2001. - 320 с.

16. Горелова, Е.И. Основы хранения зерна./ Е.И. Горелова М.: Агропромиздат, 1986.- 136с.

17. ГОСТ 10842-89. Зерно зерновых и бобовых культур и семена масличных культур. - М: Изд-во стандартов, 2001. - 3 с.

18. ГОСТ 1040-2017 Семена сельскохозяйственных культур. Правила приемки и методы отбора проб. - М: Изд-во стандартов, 2019. - 3 с.

19. ГОСТ ИСО 24333-2017 Семена сельскохозяйственных культур. Метод определения влажности. - М: Изд-во стандартов, 2019. - 5 с.

20. Грачев, Ю.П. Моделирование и оптимизация тепло и массообменных процессов пищевых производств. Текст. / Ю.П. Грачев, А.К. Тубольцев, ВК. Тубольцев- М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984-216с.

21. Гуляев, Г.А. Автоматизация процессов послеуборочной обработки и хранения зерна. Текст. / Г.А. Гуляев М.,1990. - 286с.

22. Демский, Н.В. Методы и подходы построения динамических моделей Текст. / Н.В. Демский, О.В. Пиляева. Студенческая наука - взгляд в будущее: материалы Всерос. студ. науч. конф. ч.2 / Краснояр. гос. аграр. ун-т. -Красноярск, 2006. - с. 153-155.

23. Егоров, Г.А. Технология муки. Технология крупы/ Г.А. Егоров. -М.:КолоС, 2005. - 296 с.

24. Жалан В.З. Теплофизические основы хранения сочного растительного сырья на пищевых предприятиях. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 239 с.
25. Жидко, В.И. Зерносушение и зерносушилки Текст. / В.И.Жидко, В.А.Резчиков, В.С. Уколов М.: Колос, 1982. - 339с.
26. Журавлев, А.П. Технология и техника сушки зерна Текст. / А.П. Журавлев-Самара, 2000.-197с.
27. Зверев, С.В. Физические свойства зерна и продуктов его переработки Текст. / С.В. Зверев-М.:Де Ли принт,2007.-175с.
28. Иванцев Г Л. Прогрев неподвижного слоя шаров потоком горячего газа. / Г.Л. Иванцев, Б.Я. Любов — ДАН СССР, т.86, №2, 1952. — С. 293 — 296.
29. Казаков, Е.Д. Однозначная оценка качества зерна. Текст. / Е.Д. Казаков-М.: Колос, 1983-352с.
30. Кей, Р.Б. Введение в технологию промышленной сушки. Текст./ Р.Б. Кей Пер. с англ. - Минск: Наука и техника, 1983. - 262 с.
31. Козьмина Н.П. Хранение зерна. – М.: Колос, 1975. – 424 с.
32. Колесов, Л.В. Оптимальные стационарные режимы процесса сушки в шахтной зерносушилке. Текст. / Л.В. Колесов, Г.А. Коренькова, Е.Т. Раженков, Е.Ф. Гришин, С.К. Манасян // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1985, № 1.-С.34-36.
33. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Текст. / Корн Г., Корн Т. Пер.с англ. - 5-е изд. М.: Наука, 1984, 831 с.
34. Косой, В.Д. Контроль качества молочных продуктов методами физико-химической механики / В.Д.Косой, М.Ю.Меркулов, СБ. Юдина/ СПб.:ГИОРД, 2005. - 208 с.
35. Кривоносов А.И., Кауфман В.Я. Контроль качества зерна при хранении. Текст. -М.: Агропромиздат, 1989.-62с.
36. Кузьмин В.М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа. - Владивосток: Дальнаука, 2002, с.143 с.

37. Курдина, В.Н. Практикум по хранению и переработке с/х продуктов. Текст. / В.Н. Курдина М., 1992. - 254 с.
38. Кучинскас В.Ю. Технология хранения кормовых брикетов в хранилищах башенного типа. // Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. – Елгава: Латвийская с.-х. академия, 1986. – 18с.
39. Лебедев, В.Б. Обработка и хранение семян Текст. /В.Б. Лебедев-М.: Колос, 1983.-243с.
40. Лесин, В.В. Основы методов оптимизации. Текст. / В.В. Лесин, Ю.П. Лисовец-М.: Изд-во МАИ, 1998 -344с.
41. Лисицын А.Н., Григорьева В.Н., Кузнецова Н.В. Хранение и переработка масличных семян // Тр. ВНИИЖ Россельхозакадемии. – 2014. – № 2. – С. 16–20.
42. Лурье, А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. 2-е изд., перераб. Текст. / А.Б Лурье - М.: Колос, 1981. - 382с.
43. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса. / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536с.
44. Лыков, А.В. Теория сушки. Текст. / А.В. Лыков М.: Энергия, 1968.- 472 с.
45. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. Текст. / А.В. Лыков М.: Высшая школа, 1967 - 599 с.
46. Лыков, А.В. Тепломассообмен. Справочник. Текст. / А.В. Лыков-М.: Энергия, 1978-479с.
47. М: Колос, 2005. - 426 с.
48. Малин, Н.И. Снижение энергозатрат на сушку зерна Текст. / М.И. Малин-М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1991. 54с.
49. Малин, Н.И. Технология хранения зерна. Текст. / Н.И. Малин М.: КолосС, 2005 - 240с.
50. Малин, Н.И. Энергосберегающая сушка зерна. Текст. / Малин Н.И. М.: КолосС, 2004 - 240с.

51. Манасян, С.К. Дублирующие модули комплексов ПОЗ Текст./ С.К. Манасян, Н.В. Демский // Аграрная наука на рубеже веков: Материалы Регион, научн. конф. Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2006. - с.351-355.
52. Манасян, С.К. К построению обобщенной математической модели процесса сушки зерна. Текст. / Г.С. Окунь // Селекция, биология и агротехника сорго. Зерноград, 1984. -С. 114-122.
53. Манасян, С.К. Модульный принцип построения комплексов ПОЗ Текст. / С.К. Манасян, Н.В. Демский // Аграрная наука на рубеже веков: Материалы Всероссийской научн. конф. Краснояр. гос. аграр. ун-т. — Красноярск, 2005. С. 137-138.
54. Манасян, С.К. Совершенствование процесса сушки зерна в зерносушилках с.-х. назначения.: Дисс. . канд. техн. наук / С.К. Манасян. Л.-Пушкин, 1986 - 211 с.
55. Мартыненко, И.И. Автоматизация управления температурно-влажностными режимами сельскохозяйственных объектов. Текст. / И.И.Мартыненко, Н.Л.Гирнык, В.М. Полищук -М.: Колос, 1984. 151с.
56. Мельник, Б.Е. Активное вентилирование зерна: Справочник. Текст. / Б.Е. Мельник М.: Агропромиздат, 1986 159с.
57. Мельник, Б.Е. Справочник по сушке и активному вентилированию зерна. Текст. / Б.Е.Мельник, Н.И.Малинки -М.: Колос, 1980. 175с.
58. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В.Мельников, В.Ф.Алешин. -Л.: Колос, 1980.- 200 с.
59. Михайлов Ю.А. Аналитические исследования тепло- и массообмена при конвективной сушке. // Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. _ . М.: МТИПП, 1957.
60. Нечаев, А.П. Технологии пищевых производств: учеб./ А.П. Нечаев,
61. Остапчук, Н.В. Повышение эффективности сушки зерна Текст. / Н.В. Остапчук, А.Б. Шашкин-Киев: Урожай, 1988.—136с.

62. Патент РФ № 2153779, МКИ Н 05 В 6/10, F 24 1/10. Электронагреватель трансформаторного типа / А.В Сериков, В.М Кузьминов, Р.Г. Игнатов (Россия). - № 98113611/09; Заявлено 15.07.98; Опубл. 27.07.2000. Бюл.№ 21-1с.

63. Патент РФ № 2355963 С1, Бункер активного вентилирования/ Цугленок Н.В., Пиляева О.В., Демский Н.В., Манасян С.К., опубликовано 20.05.2009. Заявка № 2008101301/06 от 09.01.2008.

64. Патент РФ № 2365839 Бункер активного вентилирования/Демский Н.В., Манасян С.К., Пиляева О.В., опубликовано 27.08.2009. Заявка № 2008105092/06 от 11.02.2008

65. Патент РФ №1038766, F26B 17/12. Установка для сушки и нагрева сыпучих материалов/ Р.З.Икрамов, М.Б.Газиев, И.А.Липатов, Ш.М.Газиев. - №3410763/24-06; Заявлено 17.03.82; Опубликовано: 30.08.83 Бюл. №32-3с

66. Пат. № 2738535 РФ, F26B17/22. Бункер для динамического вентилирования зерна / И.П. Юхник, Э.Ф. Абдурахманов, О.И. Николук, – № 2020121863; заявлено 26.06.2020; опубликовано 10.12.2020; Бюл. № 34.

67. Пат. № 200974 РФ, F01F25/14. Бункер для динамического вентилирования зерна / И.П. Юхник, С.А. Романчиков, Е.В. Уточкин, О.С. Корнеева, В.А. Бабошин, В.В. Пушкарь, В.И. Пахомов, К.Н. Савинов – № 2020121943; заявлено 26.06.2020; опубликовано 20.11.2020; Бюл. № 32.

68. Пиляева О.В. Достоинства и недостатки зерносушильного оборудования Эпоха науки. 2019. № 17. С. 70-73

69. Попов, Н.Я. Повышение эффективности работы зерносушилок с повторным использованием агента сушки. Текст. / Н.Я. Попов// Обзорная информация. Серия «Элеваторная промышленность».- М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1991 -64с.

70. Процессы и аппараты пищевых производств. Текст. / А.Н. Остриков, А.А. Шевцов, Ю.В. Красовицкий и др.-М.: Колос, 2000. -551с.

71. Пунков, С.П. Хранение зерна элеваторно-складское хозяйство и зерносушение. Текст. / С.П.Пунков, А.И. Стародубцева М.: Агропромиздат, 1990.-367с.

72. Пунков, С.П. Элеваторно-складская промышленность. Текст. / С.П.Пунков, А.И. Стародубцева М.: Колос, 1980. - 255 с.

73. Резчиков, В.А Технология зерносушения. Текст. / В.А. Резчиков, О.Н. Налетев, С.В. Савченко-Алма-Ата: Изд-во АТУ, 2000.-363с.

74. Резчиков, В.А. Математическое описание процесса сушки предварительно нагретого зерна. Текст. // В.А. Резчиков, Р.П. Дубиничева / В кн.: Труды ВНИИЗ.-М.:ЦНИИТЭИ Министерства хлебопродуктов СССР, 1986, вып. 108, с. 1-5.

75. Резчиков, В.А. Совершенствование технологии сушки зерна Текст. // В.А. Резчиков, Л.Д. Комышник, А.П. Журавлев / Экспресс информация. Серия «Элеваторная промышленность» М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1982, вып.8, с.20.

76. Рекомендации по сушке зерна и семян. Текст. / Г.С. Окунь и др. - М.:ВИМ, 1982. -30 с.

77. Романчиков, С.А., Ермошин Н.А. Способ повышения эффективности производства хлеба при организации продовольственного обеспечения в особых природно-климатических условиях /Н.А. Ермошин, С.А. Романчиков// В сборнике: Состояние и перспективы развития современной науки по направлению "Технологии энергообеспечения. Аппараты и машины жизнеобеспечения". Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции. 2019. С. 171-175.

78. Романчиков, С.А., Сычев, А.А. Инновационные решения в сфере производства продукции агропромышленных предприятий Сычев А.А., Романчиков С.А. В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. С. 61-63.

79. Романчиков, С.А. Изменение условий разработки новых продуктов питания для импортозамещения в условиях экономических санкций / С.А. Романчиков // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2017. № 4 (49). С. 178-183.
80. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. Текст. / С.П. Рудобашта М.: Химия, 1982. - 248 с.
81. Рябова, Т.Ф. Совершенствование нормирования и снижение удельных затрат топлива на сушку зерна. Текст. // Т.Ф. Рябова, И.Н. Новак/ Экспресс -информация. Серия «Элеваторная промышленность». М.: ЦНИИТЭИ Минхлебопродуктов СССР, 1983, вып.21. - 22 с.
82. Сашин, Б.С. Основы техники сушки. / Б.С. Сашин М.: Химия, 1984.-205 с.
83. Свидетельство РФ №21992 на полезную модель, МКИ Н 05 В 6/10. Электронагреватель трансформаторного типа /А.В Сериков, В.М Кузьминов, М.М. Борисенко (Россия). - № 2001116347/20; Оpubл. 27.02.2002. Бюл.№ 6-2с.
84. Семенов, В.Ф. Бункеры и хранилища зерна. Текст. / Семенов, В.Ф. // Учебное пособие Барнаул, издательство АлтГТУ. 1999, 230 с.
85. Сергунов, В.С. Дистанционный контроль температуры зерна при хранении. Текст. / В.С. Сергунов-М.: Агропромиздат,1987 175с.
86. Советов, Б.Я. Моделирование систем. Текст. / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев М.: Высшая школа, 1998.-319с.
87. Сорочинский, В.Ф. Эффективный способ двухстадийной сушки зерна Текст. // В.Ф. Сорочинский / Комбикормовая пром-сть. 1996. - №4.1. С. 17-18.
88. Стабников, В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств. Текст. / В.Н. Стабников, В.М. Лысянский, В.Д. Попов- М.: Агропромиздат, 1985.-509с.
89. Стародубцева, А.И. Практикум по хранению зерна / А.И. Стародубцева, В.С. Сергунов. - М: Агропромиздат, 1987. - 192 с.
90. Стародубцева, А.И. Практикум по хранению зерна. Текст. / А.И. Стародубцева- М.: Агропромиздат, 1987 192с.
91. Суханова Р.С. Техническое обеспечение производства зерна в странах членах СЭВ Текст. // Р.С. Суханова / Земледелие, 1988; Т. 11, - с. 64

92. Трисвятский, Л.А. Технология приема, обработки, хранения зерна и продуктов его переработки. Текст. / ЛЛ.Трисвятский, Б.Е. Мельник М.: Колос, 1983.-351 с.

93. Турчинова, В.С. Активное вентилирование зерна за рубежом Текст. // Турчинова В.С. / Экспресс-информация. Сер. Хранение и переработка зерна. -М.: ЦНИИГЭИМинхлебопродуктаСССР, 1987.-Вып.10.-С.25.

94. Устименко, Т.В. Практикум оценки качества зерна и зерно-продуктов: методические указания / Т.В. Устименко, В.М. Филин, И.В. Авдеев. - М: ДеЛи принт, 2007. - 176 с.

95. Фадеев Л. Особенности хранения подсолнечника. – 2015. – 28 июля. – URL: <https://elevatorist.com/blog/read/132-osobennosti-hraneniya-podsolnechnika>

96. Харин, Ю.С. и др. Основы имитационного и статистического моделирования. Текст. / Ю.С. Харин и др. Минск: Дизайн ПРО, 1997. - 287 с.

97. Хувес, Э.С. Справочник механика хлебоприемного предприятия. Текст. / Э.С.Хувес, Г.С. Богданов М.: Колос, 1980. - 197 с.

98. Худякова, И.В. Оптимизация процесса сушки зерна пшеницы в рециркуляционных зерносушилках типа РД и У2 УЗБ на основе имитационного моделирования. Текст. Автореферат дис. на соиск. учен, степ канд. техн. наук./ И.В. Худякова- М.: 2002. - 25 с.

99. Цугленок Н.В., Манасян С.К., Демский Н.В. Техника и технология сушки зерна. Международный журнал экспериментального образования. 2012. № 11. С. 46-47.

100. Цугленок, Н.В. Имитационная модель функционирования сушильных установок Текст. / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян, Н.В. Демский, Ю.А. Книга // Вестник КрасГАУ №3,. Красноярск, 2007. - с. 196-200.

101. Цугленок, Н.В. Имитационная модель функционирования сушильных установок Текст. / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян, Н.В. Демский, Ю.А. Книга // Вестник КрасГАУ №3,. Красноярск, 2007. - с. 196-200.

102. Цугленок, Н.В. Методика определения теплофизических свойств зернового материала Текст. / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян, Н.В. Демский, Н.Н. Конусов // Вестник КрасГАУ №4, Красноярск, 2007. - с. 131-133.

103. Цугленок, Н.В. Методика определения теплофизических свойств зернового материала Текст. / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян, Н.В. Демский, Н.Н. Конусов // Вестник КрасГАУ №4, Красноярск, 2007. - с. 131-133.

104. Цугленок, Н.В. Теоретические основы процессов тепло- и массообмена при сушке зерна Текст. / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян // Вестник КрасГАУ, приложение к Вестнику КрасГАУ: сборник статей выпуск 2 - Красноярск 2003. с.52-53. V

105. Цугленок, Н.В. Техника и технология сушки зерна Текст. / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян, Н.В. Демский. // Монография Краснояр. гос. аграр. ун-т. - Красноярск, 2007. - 119 с.

106. Цугленок, Н.В. Экспериментальные исследования процесса сушки зерна Текст. / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян // Вестник КрасГАУ, приложение к Вестнику КрасГАУ: сборник статей выпуск 2 Красноярск 2003. - с.60-62.

107. Чеботарев, О.Н. Технология муки, крупы и комбикормов/ О.Н.Чеботарь, А.Ю. Шаззо, Я.Ф. Мартыненко - М.-Ростов н/Д: МарТ, 2004. - 688 с.

108. Шеховцова Т.И. Интенсивность дыхания семян подсолнечника при хранении их в нейтральной газовой среде // Элеваторная промышленность. – 1978. – Вып. 1. – С. 15–17.

109. Шibaев П.Н. Активное вентилирование семян / П.Н. Шibaев, Б.А. Карпов - М.: Россельхозиздат, 1969.

110. Шински, Ф. Управление процессами по критерию экономии энергии. Текст. // Шински Ф. / Пер. с англ. М.: Мир, 1981. - 388 с.

111. Юкиш, А.Е. Справочник работника элеваторной промышленности. Текст. / А.Е. Юкиш, Э.С. Хувес -М.: Колос, 1983. 304 с.

112. Юхник, И.П. Особенности конструкции червячных ворошителей для активного вентилирования зерна / Г.В. Алексеев., А.А. Бирченко, И.П. Юхник, А.А. Дерганосова // Вестник Южно-Уральского государственного университета.

Серия: Пищевые и биотехнологии. Т.3, №3, 2020. – С.66-72. DOI: 10.14529/food200308.

113. Юхник, И.П. Совершенствование шнекового ворошителя динамического вентилирования для мукомольной отрасли. Хлебопродукты № 7, 2020. – С. 51-55. DOI: 10.32462/0235-2508-2020-29-7-51-55.

114. Юхник, И.П. Нагреватель для систем активного вентилирования зерна / Г.В. Алексеев, А.А. Бирченко, И.П. Юхник, А.А. Дерканосова // Вестник ВСГУТУ. 2020. № 3 (78). С. 51-56.

115. Юхник, И.П. Совершенствование технологического оборудования для получения модифицированного крахмала / Г.В. Алексеев, А.Г. Леу, И.П. Юхник // Ползуновский вестник № 2, 2020. – С. 3-7. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.000.

116. Юхник, И.П. Аналитическое исследование температурного поля насыпи крахмал- или пектиносодержащего сырья при управляемых тепловых воздействиях / Г.В. Алексеев, О.А. Егорова, И.П. Юхник, С.А. Романчиков // Вестник Международной академии холода. № 4. 2020. С. 12-23.

117. Юхник, И.П. Моделирование температурного поля насыпи крахмал- или пектинсодержащего сырья при внутреннем самосогревании / Г.В. Алексеев, О.А. Егорова, А.Г. Леу, И.П. Юхник // Научный журнал «Известия КГТУ». – 2020, –№ 59. – С. 111-118. DOI 1997-3071-2020-59-

118. Юхник, И.П. Анализ характера особенностей тепломассобмена в дискретной насыпи пищевого продукта / Б.А. Вороненко, А.Г. Леу, Э.В. Абушинов, И.П. Юхник // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. Сб. трудов Международной научной конференции (Воронеж, 11-13 ноября 2019 г.) НИП, Воронеж, 2020. – С. 713-716.

119. Юхник, И.П. Новое оборудование для подготовки сырья при получении модифицированных крахмалов / А.Г. Леу, В.А. Арет, И.П. Юхник // TECHNICAL SCIENCE / «Colloquium-journal» №11(63), 2020. –С. 24–26. DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11720,

120. Юхник, И.П. Исследование особенности работы ворошителей зернохранилищ при активном вентилировании / А.Г. Леу, И.П. Юхник, Е.С. Сергачева //Сб. науч. трудов VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в АПК: теория и практика» (18-19 марта 2020 г.) Пенза, 2020. – С. 220–223.

121. Юхник, И.П. Возможности повышения сохранности зерна при активном вентилировании / В.А. Арет, И.П. Юхник, Г.В. Алексеев // Сб. науч. трудов Международной научно-практической конференции «Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции» (Саратов, 12-13 марта 2020 г.) Пенза, 2020. – С. 326–328.

122. Юхник, И.П. Совершенствование подготовки крахмалсодержащего сырья для получения модифицированных крахмалов / Юхник И.П., Леу А.Г., Рыбинская О.В., Тарасов К.В. // Глобальная экономика в XXI веке: роль биотехнологий и цифровых технологий. Сборник научных статей по итогам работы пятого круглого стола с международным участием. Высшая школа МВА IntegraL. Москва, 2020. –С. 215-217.

123. Юхник, И.П. Устройство для измельчения сырья при изготовлении модифицированных крахмалов / О.В. Рыбинская, И.П. Юхник, А.Г. Леу, К.В. Тарасов // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. Сб. научных статей по итогам VII международной научной конференции (Казань, 30-31 июля 2020 г). 2020. –С. 154-156.

124. Юхник, И.П., Романчиков, С.А. Экспериментальные исследования оборудования для энергообеспечения сушки зерна / С.А. Романчиков, И.П. Юхник // Материалы международная научно-техническая конференция за 2020 год В 2 ч. Ч.1. / под общ. ред. проф. С.Т. Антипова; Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж: ВГУИТ, 2020. – С. 75-77.

125. Alekseev, G.V., Romanchikov, S.A. et al. Ball under action of periodic point load // Advances in Engineering Research. – 2017. – Vol. 133. – P. 4–36.

126. Alexeev G.V., Goncharov M.V., Leu A.G., Nikolyuk O.I., Romanchikov S.A. Modelling of heat and mass transfer processes of capillary-porous bodies /G.V. Alexeev, M.V. Goncharov, A.G. Leu, O.I. Nikolyuk //Journal of Physics: Conference Series – 2019 - Vol. 1399, pp. 44-53.

127. Alexeev G.V., Krasilnikov V.N., Kireeva M.S. et al. Use of flaxseeds in the flour confectionery // International Food Research Journal. – 2015. –T. 22, N 3. – C. 1156–1162.

128. Voronenko B.A., Leu A.G., Abushinov E.V., Yukhnik I.P. Analysis of the nature of features of heat and mass transfer in discrete bulk of food products Applied Mathematics. Computational Science and Mechanics: Current Problems IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1479 (2020) 012105, pp 1-9. IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1479/1/0121.

129. Auf die richtige Auswahl des Gefrierverfahrens kommt es an // Lebensmitteltechnik. – 2008. – N 10. – S. 26–27.

130. Bakker Arkema F.W. Selected aspects of Crop Processing and Storage: a review. / J. Agr. Eng. Res., 1984, v. 30, N 1, p. 1-2.

131. Callens A. Frostschutz mit Stickstoff // Lebensmitteltechnik. – 2008. – N 1–2. – S. 48–49.

132. <https://www.activestudy.info/razlichnye-varianty-primeneniya-sposoba-aktivnogo-ventilirovaniya/>

133. Lis H., Lis T. Wyznaczanie współczynników przepływu ciepła masy w warstwie nasion. / Rocz. Nauk. Rol., 1985, 76, N 1, p. 189-200.

134. Mathematical model for drying of absorptive porous materials. Inokoma Mironobu, Okazaki Mono, Toli rijozo. «Aeto poljtechn., schrd.chem. Technol. and Met/ser/», 1985, №160, 32 p.

135. Mitall G.S., Lapp H.M., Townsend J.S. Continuous Drying of Wheat Hot Sand. / Can. Agr. Eng., 1982, v. 24, N 2, p. 119-122.

136. Niewierowicz T. Model cybrowy dielektrycznego suszenia scianki cylindrycznej. /Rozprawy Elektrotechniczne, 20, z. 1. Warszawa, 1974.

137. Otien L. Experimental and Mathematical Research of the Process in Drum Dryer. / *Canad. Agr. Eng.*, 1980, v. 22, 2, p. 163-170.
138. Sharaf- Eldeen J.I., Blaisdell J.L., Hamdy M.J. A Model for Ear Corn Drying. / *Trans ASAE*. 1980, v. 23, N 5, p. 1261-1265.
139. Sharp R. A. Review of Low Temperature Drying Simulation Models. / *J. Agr. Eng. Res.*, 1982, v. 27, N 3, p. 169-190.
140. Shepelev I.I., Eskova E.N., Pilaeva O.V., Stiglitz I.S., Arkhipova L.N. The solution to the problems of gas treatment in alumina production with application of ecological engineering/ *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Workshop "Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2019. C. 62063.*
141. Shepelev I.I., Nemerov A.M., Pilaeva O.V., Eskova E.N., Stiglitz I.S. Ecological engineering in the process of gas treatment from dust and prospects for its use in agriculture/ *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2019. C. 62003.*
142. Simulation studies of reversed-direction air-flow drying method for soybean seeds in a fixed bed/M.A.Sabbax, G.E.Meyer, W.L.Reller-*Trans. A SAE, St.Joseph Mish.*, 1979, vol. 22, №5, p.1 162-1166.
143. Smith E.A. Simulation of Grain Drying When Air flow is Non -parallel. / *J. Agr. Eng. Res.* 1982, v. 27, N 1, p. 21-33.
144. Troeger J.M. Design of a Solar Peanut Drying System. *Trans. ASAE*, 1982, v. 25, N3, p. 763-767.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица А1-Физико-механические свойства некоторых зерновых

Культура	Размеры, мм			Плотность, г/см ³	Объ емна я масс а,	Коз ффи цен т т Сквак истост ь, %	Козффициент внешнего трения по стали	
	длина	ширина	толщина					
Пшеница	4,8–8,0	1,6–4,0	1,5–3,3	1,2–1,5	0,76	0,47	35–45	0,37
Рожь	5,0–10,0	1,4–3,6	1,2–3,5	1,2–1,5	0,73	0,49	35–45	0,37
Овес	8,0–18,6	1,4–4,0	1,0–4,0	1,2–1,4	0,45	0,51	50–65	0,37
Ячмень	7,0–14,6	2,0–5,0	1,2–4,5	1,2–1,4	0,60	0,51	40–50	0,37
Рис	5,0–7,0	2,5–2,8	2,0–2,5	1,19–1,26	0,52	0,51	50–65	0,34
Гречиха	4,2–6,25	2,8–3,7	2,4–3,4	0,85–1,25	0,50	0,52	50–60	0,37
Кукуруза	5,5–13,5	5,0–11,5	2,5–8,0	1,35	0,73	0,53	35–55	0,37
Горох	4,0–8,8	4,0–9,0	3,0–9,0	1,4	0,75	0,55	40–45	0,37
Просо	1,8–3,2	1,5–2,0	1,5–1,7	1,1–1,2	0,70	0,52	30–45	0,34

Таблица А2 -Гидротермический коэффициент и влажность заготавливаемого зерна в различных районах России (Е. Д. Казаков)

Район заготовок	Значение гидротермического коэффициента	Средневзвешенная влажность зерна, %
Поволжье	1,87	11,9
Северный Кавказ	2,70	13,2
Башкирия	4,29	18,6
Красноярск	5,80	21,6

Таблица А3-Нормы естественной убыли зерна и продуктов его переработки, %

Наименование культур и продукции	Срок хранения	В элеваторах	В складах		На приспособленных для хранения площадках и в сапетках
			насыпью	в таре	
Пшеница, рожь, ячмень, полба	3 мес.	0,045	0,07	0,04	0,12
	6 мес.	0,055	0,09	0,06	0,16
	1 год	0,095	0,115	0,09	–
Овес	3 мес.	0,055	0,09	0,05	0,15
	6 мес.	0,065	0,125	0,07	0,2
	1 год	0,105	0,165	0,09	–
Рис-зерно	3 мес.	0,045	0,08	0,05	–
	6 мес.	0,075	0,105	0,07	–
	1 год	0,115	0,145	0,1	–
Просо	3 мес.	0,06	0,11	0,06	0,14
	6 мес.	0,08	0,15	0,08	–
	1 год	0,13	0,19	0,1	–
Кукуруза в зерне	3 мес.	0,075	0,13	0,07	0,18
	6 мес.	0,115	0,165	0,1	0,22
	1 год	0,115	0,21	0,13	–
Гречиха	3 мес.	0,055	0,08	0,05	–
	6 мес.	0,075	0,11	0,07	–

Таблица А4 – Равновесная влажность, %

Относительная влажность воздуха, %	Температура зерна, С°														
	Пшеница					Рожь и ячмень					Овес				
	-10	0	10	20	30	-10	0	10	20	30	-10	0	10	20	30
20	9,1	8,7	8,3	7,8	7,4	9,2	8,9	8,6	8,3	7,8	8,4	7,8	7,2	6,7	6,2
30	10,5	10,1	9,6	9,2	8,8	10,8	10,4	10,0	9,5	9,0	9,6	9,1	8,6	8,2	7,9
40	11,6	11,2	10,9	10,7	10,2	11,9	11,6	11,3	10,9	10,4	11,0	10,5	10,0	9,4	8,7
50	12,7	12,4	12,0	11,8	11,4	12,9	12,7	12,5	12,2	11,5	12,3	11,8	11,8	10,7	9,8
60	13,7	13,5	13,3	13,1	12,5	14,1	13,9	13,7	13,5	12,8	13,3	12,9	12,5	12,0	11,6
65	14,5	14,2	14,0	13,7	13,2	15,1	14,8	14,6	14,3	13,5	14,4	14,0	13,6	13,2	12,7
70	15,3	15,0	14,7	14,3	14,0	16,1	15,7	15,5	15,2	14,3	15,6	15,5	14,8	14,4	13,8
75	16,2	15,8	15,5	15,1	14,8	17,4	17,0	16,7	16,3	15,4	17,1	16,6	16,1	15,6	15,0
80	17,1	16,7	16,3	16,0	15,7	18,7	18,3	17,9	17,4	16,5	18,5	17,9	17,3	16,8	16,2
85	19,4	18,9	18,4	18,0	17,5	20,5	20,1	19,6	19,1	18,4	19,8	19,3	18,8	18,3	17,6
90	21,7	21,2	20,5	20,0	19,3	22,4	21,9	21,4	20,8	20,3	21,1	20,7	20,3	19,9	19,0

Таблица Б5 – Примерные сроки безопасного хранения некоторых зерновых

Культура	Влажность зерна, %	Температура зерна, °С							
		30	25	20	15	10	5	0	-5
Пшеница, рожь, ячмень	13	95	130	180	180	180	180	180	180
	14	30	37	78	170	180	180	180	180
	15	13	18	33	75	180	180	180	180
	16	6	9	18	35	135	180	180	180
	17	1	3	12	20	75	180	180	180
	18	–	1	8	12	32	127	н/у	н/у
	20	–	–	2	5	13	36	н/у	н/у
	22	–	–	–	2	8	22	н/у	н/у
	25	–	–	–	–	3	17	н/у	н/у
	28	–	–	–	–	–	12	н/у	н/у
30	–	–	–	–	–	10	н/у	н/у	
Овес	14	14	26	57	75	90	90	90	90
	16	2	4	11	20	70	90	90	90
	18	–	1	4	8	20	70	н/у	н/у
	20	–	–	1	3	10	26	н/у	н/у
	22	–	–	–	1	6	20	н/у	н/у
	26	–	–	–	–	1	14	н/у	н/у
30	–	–	–	–	–	8	н/у	н/у	
Просо	14	11	25	45	90	120	120	120	120
	15	6	10	20	58	113	120	120	120
	16	3	9	10	28	65	120	120	120
	17	2	4	7	12	27	80	110	120
	18	1	3	4	7	16	40	83	120
	22	–	–	–	2	4	6	10	18
	24	–	–	–	–	2	3	5	10

Таблица Б6 - Минимальная подача атмосферного воздуха при вентилировании

Влажность зерна, %		Удельная подача воздуха, м ³ /(ч · т), на установках				
зерновых, злаковых и бобовых	подсолнечника	СВУ-63	УСВУ- 62	СВУ-2	СВУ- 1	ГИПЗП- 55
16	8	25	25	35	40	30
18	9	30	35	45	50	40
20	10	45	55	70	80	60
22	11	65	80	110	130	95
24	12	90	115	165	210	140
26	13	120	160	240	–	200

Таблица В7 – Программа для анализа органолептических оценок

```

s := s ← 0
for i ∈ 0..7
  Δφ ← π / 4
  r ← ( 77 64 )
      ( 228 41 )
      ( 21 37 )
      ( 22 34 )
      ( 31 33 )
      ( 16 15 )
      ( 5 14 )
      ( 30 41 )
  ai ← ri,1 · sin [(i + 1) · Δφ ] - ri,0 · sin [(i) · Δφ ]
  bi ← ri,1 · cos [(i + 1) · Δφ ] - ri,0 · cos [(i) · Δφ ]
  ki ← ai / bi
  Δsi ← (ri,1)2 · ∫i·Δφ(i+1)·Δφ  $\frac{[(\sin(i \cdot \Delta\varphi) - k_i \cdot \cos(i \cdot \Delta\varphi))^2]}{(\sin(\varphi) - k_i \cdot \cos(\varphi))^2} d\varphi$ 
  s ← s + Δsi

```

s = 812.242

Analysis of the nature of features of heat and mass transfer in discrete bulk of food products

B A Voronenko, A G Leu, E V Abushinov and I P Yukhnik

St. Petersburg National Research University of Information Technology, Mechanics and Optics, 49, Kronverksky Prospect, Saint-Petersburg, Russia

E-mail: gva2003@mail.ru, anna.leu@mail.ru, elveg.abushinov@mail.ru, utv1981@mail.ru


Abstract. Despite the importance of resolving issues related to predicting the formation of heat-moisture fields during storage of grain, seeds and bulk-stored roots and tubers and the changes in technological properties of food raw materials that depend on them, currently, the mathematical descriptions of these associated phenomena do not suffice. This is due to the complexity and poor knowledge of the storage processes for bulk-stored food products at both the micro and macro levels. Such masses are a system with distributed parameters. In this regard, the possibility of predicting the fields of heat and moisture content depends, on the one hand, on the completeness of the necessary information about the moisture and temperature of the components of the mass at the initial moment, and on the other hand, on the reliability of the mathematical model capable of describing the real processes of heat transfer in bulk based on this information, which is used to set boundary conditions and thermophysical constants. An analysis of the nature of the features of heat and mass transfer in a discrete bulk of food product can be carried out only on the basis of the developed analytical models. This is the subject of this paper.

1. Introduction

The known mathematical models of temperature conditions for storing bulk-stored roots and tubers were developed for the purpose of constructing systems for automatic control of the agricultural product storage conditions. Moreover, systems with distributed parameters are as a rule used as models of the temperature field of the self-heating zone, and very significant restrictions are imposed on the process under consideration. In most papers, bulk-stored product is considered as a continuous thermophysical medium, in which heat transfer is carried out by the mechanism of conductive heat diffusion. The development of the fields of heat and moisture content in the seed mass is modelled by the laws of the phenomenological theory of heat and mass transfer in continuous media. In [1], equations of heat distribution in bulk-stored grain of a self-heating zone in the form of plates, a cylinder, and a ball were obtained.

2. Formulation of the problem

We consider the indicated problem on the assumption that a change in temperature at an arbitrary point in time at any point in the $2R$ thick heating layer and in the surrounding mass having its own thermal background is found by solving the differential heat conduction equations:

 of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.
 Published under licence by IOP Publishing Ltd



И.П. Юхник,
ФГКВОУ ВО «Военная академия
материально-технического
обеспечения им. генерала армии
А.В. Хрулёва»

doi: 10.32462/0235-2508-2020-29-7-51-55
УДК 631.171:338.36 (476)

Совершенствование шнекового ворошителя динамического вентиляции для мукомольной отрасли

В целях реализации Указа Президента Российской Федерации от 21.01.2020 г. №20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» по обеспечению населения высококачественной и безопасной пищевой продукцией, а также модернизации технических средств сельского хозяйства и инфраструктуры внутреннего рынка необходима разработка новых технических решений совершенствования технологического оборудования, используемого в процессе длительного хранения зерна.

Продовольственная независимость страны определяется как уровень самообеспечения, рассчитывается как отношение объёма отечественного производства сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия к объёму их внутреннего потребления и имеет пороговые значения (для зерна – не менее 95%).

Известно, что хлеб, хлебобулочные и другие мучные изделия в рационе питания граждан России по общей пищевой ценности занимают около 60% в сутки. Это обстоятельство привлекает внимание научных сотрудников как к проблемам повышения урожайности зерна, так и к обеспечению его показателей качества, например, при хранении. Необходимо отметить, что исследования

Аннотация. Исследовано технологическое оборудование, используемое в бункерах с активным вентилярованием. Проведено теоретическое моделирование шнекового ворошителя, в результате которого получены зависимости, позволяющие прогнозировать скорость перемещения зерновой массы с помощью ворошителя различных геометрических размеров и давления, создаваемого в рабочей зоне вентилярования. Предложено конструктивное решение модернизации шнекового ворошителя, реализующее принципы динамического активного вентилярования.

Abstract. The technological equipment used in bunkers with active ventilation is investigated. Theoretical modeling of a screw agitator is carried out, as a result of which dependencies are obtained that allow predicting the speed of movement of the grain mass using an agitator of various geometric sizes and pressure created in the working zone of ventilation. A constructive solution is proposed for the modernization of a screw agitator that implements the principles of dynamic active ventilation.

Ключевые слова: зерновая масса, бункер активного вентилярования, шнековый ворошитель, динамическое вентилярование, скорость перемещения.

Keyword: grain mass, active ventilation hopper, screw agitator, dynamic ventilation, moving speed.

направлены на предупреждение нежелательного контакта зерна с влажными, сильно пахнущими или ядовитыми агентами, ведущими к порче урожая. Основная задача при хранении зерна – это недопущение снижения показателей качества, а также уменьшение его количества [5, 10, 11]. Установлено, что при хранении зерна заметного увеличения количества клейковины не происходит, но значительно улучшается её качество. Клейковина становится более эластичной и легче растягивается. В целях обеспечения хранения зерна без снижения показателей качества используются зернохранилища (бункера), обеспечивающие активное вентилярование зерновой массы. Совершенствование конструкций данных объектов, а также модернизация технологического оборудования, используе-

в настоящее время является актуальной задачей.

Важным направлением сохранения собранного урожая без снижения показателей качества зерна является разработка новых технических решений модернизации технологического оборудования, используемого для хранения сыпучих сельскохозяйственных продуктов, одним из которых является бункер активного вентилярования [4, 9].

Следует отметить, что существующие модели бункеров активного вентилярования имеют существенные недостатки, которые выражаются в том, что защита зерновой массы от слипания между собой отдельных зёрен обеспечивается не в полном объёме.

В целях недопущения снижения показателей качества зерновой массы в процессе хране-

РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

05.18.01 – Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодовоовощной продукции и виноградарства (технические науки)

DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.001

УДК 664.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО КРАХМАЛА

Г.В. Алексеев, А.Г. Лей, И.П. Юхник

Настоящая статья посвящена вопросам совершенствования оборудования для переработки сельскохозяйственного сырья при обеспечении нужд пищевой промышленности, поскольку удовлетворение продуктами питания населения является одним из краеугольных вопросов самоидентификации и обеспечения безопасности любого государства. Расширение ассортимента таких продуктов на основе крахмала может быть достигнуто благодаря изменению физико-химических свойств его нативной формы и получения так называемых модифицированных крахмалов. Часто это позволяет более полно удовлетворять требованиям потребителей. Способность изменения этих свойств за счет определенного воздействия позволяет получать продукты питания, возможные к применению с необходимым эффектом для различных областей использования. В настоящее время наблюдается существенное увеличение продуктов питания, использующих крахмал в его различных формах и видоизменениях. Это обусловлено достаточно простыми технологиями его получения из крахмальных зерен и выделением из крахмалосодержащего сырья при его переработке. Наблюдается резкий рост объемов производства модифицированных крахмалов и сахаристых крахмалопродуктов. Набухающий крахмал и крахмалопродукты могут быть получены методом термопластической экструзии, а другие модифицированные крахмалы – путем воздействия на нативный крахмал определенными химическими веществами. Использование таких методов обработки сырья позволяет внести существенный вклад в обеспечение населения относительно недорогими высококачественными продуктами питания. Большие объемы внедрения инноваций, связанных с указанными производствами, основываются на интенсивных разработках технологий и оборудования в этой области и возможностями получать продукты с новыми полезными свойствами. Таким образом, тематику настоящей статьи можно считать актуальной. Целью настоящей работы является анализ возможностей совершенствования современного оборудования переработки продовольственного сырья в модифицированные крахмалы, а задачей – разработка конкретных рекомендаций по использованию современных подходов в конструировании оборудования.

Ключевые слова: технологии переработки, сельскохозяйственное сырье, пищевая промышленность, нативный крахмал, модифицированные крахмалы.

В настоящее время применяется оборудование, относящееся к технике переработки сельхозсырья, которое может быть использовано при производстве набухающих крахмалов для пищевой и других отраслей промышленности.

Достижение указанной цели можно обеспечить применением устройства следующего типа. Оно обычно используется в переработке сельскохозяйственной продукции в пищевой промышленности или сфере общественного питания для паровой очистки корнеклубнеплодов [1–3]. Основной целью его использования является снижение отходов и повышение качества обработки корнеклубнеплодов, хотя верхний слой картофеля, например, прилипший к кожуре и обрабо-

стеризованный крахмал, и с успехом может использоваться для производства модифицированного набухающего крахмала.

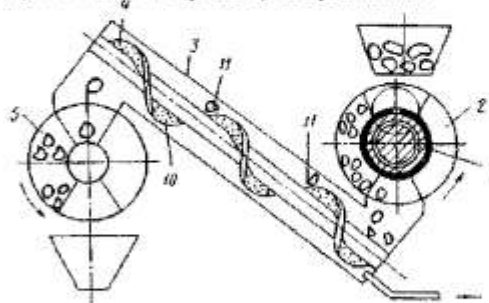


Рисунок 1 – Устройство для получения модифицированного набухающего крахмала