

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Фам Куанг Банг

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕЛЕННОГО
ЧАЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук, профессор
Богатиков Валерий Николаевич

Тверь – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМАТИКА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ.....	9
1.1 Обзор производства зеленого чая	9
1.2 Анализ технологических методов и средств сушки в условиях послеуборочной обработки зеленого чая	12
1.2.1 Технология процесса сушки зеленого чая.....	12
1.2.2 Анализ способов сушки пищевых продуктов в промышленном производстве и типы сушилок.....	14
1.3 Современные методы моделирования и управления процессом сушки.....	20
1.3.1 Основные подходы к математическому моделированию процесса сушки	20
1.3.1.1 Экспериментально-статистические модели в области процесса сушки.....	21
1.3.1.2 Аналитические модели.....	24
1.3.2 Современные методы управления технологическим процессом сушки .	27
1.3.2.1 Применение нечеткой логики для управления сушильными системами	27
1.3.2.2 Применение нейронных сетей для управления процессом термообработки.....	28
1.3.2.3 Применение управления с прогнозирующими моделями для регулирования процесса термообработки.....	30
1.4 Постановка цели и задач исследования.....	31
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	33
2.1 Анализ плотности зеленого чая.....	34
2.2 Анализ удельной теплоемкости зеленого чая.....	36
2.3 Анализ коэффициента массообмена	37
2.4 Анализ температуропроводности зеленого чая.....	40
2.5 Удельный расход тепловой энергии	44
2.6 Анализ равновесной влажности зеленого чая.....	54
2.7 Выводы главы.....	61
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ.....	62

3.1 Обоснование методов моделирования процесса сушки зелёного чая	62
3.2 Разработка математической модели процесса сушки зеленого чая в конвейерной сушилке	67
3.3 Результат процесса моделирования и проверка адекватности математических моделей.....	74
3.4 Выводы главы.....	79
ГЛАВА 4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ	81
4.1 Анализ процесса сушки зеленого чая как объекта управления и его особенностей	81
4.2 Структура и функциональная организация автоматизированной системы управления технологическим процессом сушки зеленого чая	85
4.3 Разработка автоматической системы управления процессом сушки зеленого чая	93
4.3.1 Постановка задачи проектирования системы управления	93
4.3.2 Применение метода Бокса-Уилсона к линеаризации в задаче управления нелинейным процессом сушки зеленого чая	96
4.3.3 Оптимизация функционала качества системы сушки зеленого чая.....	98
4.3.4 Алгоритм формирования управляющих воздействий в системе управления сушкой зелёного чая на основе прогнозирующих моделей	105
4.4 Оценка эффективности системы управления процессом сушки зеленого чая	112
4.5 Выводы главы.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	119
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акт о внедрении результатов диссертации в учебный процесс на факультете «Кибернетика» Новомосковского института РХТУ им. Д.И. Менделеева	133

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Зеленый чай – один из самых популярных и полезных напитков в мире, известный своими многочисленными положительными свойствами, влияющими на здоровье человека. Регулярное употребление зеленого чая снижает риск развития сердечно-сосудистых заболеваний, способствует снижению веса и профилактике диабета. Зеленый чай обладает противовоспалительными свойствами, что снижает вероятность возникновения некоторых видов рака.

Процесс переработки чайного листа включает несколько ключевых технологических стадий, среди которых наиболее энергоемкой и критически важной является сушка. Условия сушки определяют основные параметры качества конечного продукта, такие как аромат, цвет, химический состав и содержание биологически активных веществ (катехинов, аминокислот, полифенолов), оказывая непосредственное влияние на его потребительские свойства.

Качество сушки зеленого чая определяется рядом факторов, включая равномерность испарения влаги, сохранение природных свойств сырья и минимизацию теплового воздействия, способного привести к деградации ароматических соединений и потемнению листа. В традиционных методах сушки часто наблюдаются проблемы, связанные с неравномерным распределением температуры, локальным перегревом, перерасходом энергии и изменчивостью свойств исходного сырья. Эти факторы могут привести к ухудшению вкусовых характеристик чая, его рассыпчатости и нарушению текстуры.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности процесса сушки является разработка систем управления с применением современных методов управления, включая предиктивное управление, которые позволяют адаптивно регулировать параметры сушильного процесса, минимизируя потери энергии, снижая воздействие негативных факторов и обеспечивая стабильно высокое качество конечного продукта.

Степень разработанности темы. К настоящему времени большой вклад в

исследование и решение проблем управления технологическими процессами внесли отечественные ученые: Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Лыкова А.В., Гороховский А.Г. и Алексанян И.Ю., работы которых посвящены теории сушки, физическим основам и химическим процессам, происходящим в сушке. Среди зарубежных ученых, внесших вклад в развитие данной области, следует отметить работы Троджоски М. (Trojosky M.), Доймаз И. (Doymaz I.) и Уайтакер С. (Whitaker S.), исследующих кинетику сушки и моделирование тепломассообменных процессов; Шахари Н.А. (Shahari N.A.) и Эрбэй З. (Erbay Z.), изучающих промышленные аспекты сушки пищевых продуктов. Полученные в ходе исследований результаты являются предпосылкой для дальнейших изысканий в области применения прогнозирования состояния системы к контуру управления процессом сушки в условиях неопределенности.

Объектом исследования является технологический промышленный процесс сушки зеленого чая в конвейерном оборудовании.

Предметом исследования являются алгоритмы, методы, модели управления технологическим производственным процессом сушки зеленого чая в условиях неопределенности.

Цель и задачи работы.

Целью работы является повышение эффективности процесса сушки зеленого чая на основе совершенствования системы управления.

Для достижения цели поставлены следующие задачи исследования:

1. Анализ теплофизических характеристик зеленого чая и особенностей процесса его сушки.
2. Разработка математической модели процесса сушки зеленого чая в конвейерном сушильном оборудовании.
3. Разработка методики синтеза системы управления процессом сушки зеленого чая в условиях неопределенности.

Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель процесса сушки зеленого чая в конвейерном сушильном оборудовании, учитывающая динамическое изменение

теплофизических параметров (плотность, теплоемкость, коэффициент массообмена и равновесная влажность) в ходе сушки, что позволяет более точно описывать реальный процесс.

2. Разработана методика идентификации теплофизических параметров в реальном времени, что повышает точность прогнозирования параметров процесса (температура и влажность материала). В отличие от традиционных подходов, эта методика позволяет оперативно корректировать модель в реальном времени, адаптируясь к изменяющимся условиям сушки.

3. Разработана методика синтеза системы управления процессом сушки зеленого чая на основе управления с прогнозирующими моделями, отличающаяся использованием метода Бокса-Уилсона для локальной линеаризации процесса.

Достоверность научных положений подтверждается корректной постановкой задач исследования, обоснованным использованием теории и практики физической химии, математической физики, математической статистики и современных достижений теории и практики вычислительной техники, достаточным объемом лабораторных и вычислительных экспериментов, результаты которых свидетельствуют об адекватности разработанных моделей и обоснованности выводов и рекомендаций.

Практическая ценность работы:

Разработанная программа системы управления на основе построенной методики может быть применена для реализации управления аналогичными технологическими промышленными процессами, имеющими сложный и нелинейный характер. Построенная методика синтеза системы управления позволяет улучшить эффективность технологического промышленного процесса, носящего нелинейный характер, за счет построения прогностической линейной модели на основе метода Бокса-Уилсона.

Разработанная система управления, основанная на предложенной методике, способствует сокращению времени сушки, а также обеспечивает требуемые поля влажности и температуры. Эти факторы положительно влияют на эффективность процесса и качество конечного продукта – зеленого чая.

Разработана программа моделирования процесса сушки зелёного чая в конвейерном оборудовании по конвективному методу сушки, позволяющая рассчитывать его оптимальные технологические режимы. Эта программа является полезным инструментом, помогающим инженерам-проектировщикам и операторам определить оптимальные условия сушки для получения хорошего качества продуктов на основе зеленого чая.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса сушки зеленого чая в конвейерном сушильном оборудовании.

2. Методика синтеза системы управления процессом сушки зеленого чая на основе управления с прогнозирующими моделями, отличающаяся использованием метода Бокса-Уилсона для локальной линеаризации процесса.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, моделирования систем, теории нечеткой логики, теории автоматического управления, методы вычислительной математики.

Апробация работы.

Результаты диссертации были представлены и обсуждены на XI международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте ИММВ-2022» (г. Коломна, 2022), на Международном научно-техническом конгрессе «Интеллектуальные системы и информационные технологии» (г. Таганрог, 2022 г.), на III Международной научно-практической конференции «Цифровизация агропромышленного комплекса», (г. Тамбов, 2022 г.), на XX национальной конференции «Конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2022)», (г. Москва, 2022 г.), на VII Международной научно-практической конференции «Образы будущего в профессиональной деятельности» (г. Тверь, 2022 г.), на XXI национальной конференции «Конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2023)» (г. Москва, 2023 г.).

Публикации. По основным результатам диссертации опубликована 17 работа, в том числе 4 статей представлены в рецензируемых научных журналах,

рекомендованных ВАК, 2 – в научном журнале SCOPUS и WOS. Получено одно авторское свидетельство.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов по разделам, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Объем диссертации составил 134 страницы, включая 117 страниц основного текста, 3 страницы приложений к работе, 38 рисунков и 24 таблицы.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМАТИКА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕЛЕНОГО ЧАЯ

1.1 Обзор производства зеленого чая

Чай на сегодняшний день является самым распространенным напитком в мире. Употребление его тесно связано с культурой, хозяйством и историческими традициями многих народов [1].

За столетия до того, как стал известен химический состав чая, были обнаружены многие лечебные и питательные свойства чая посредством наблюдений и жизненного опыта. Зеленый чай имеет разнообразный химический состав. Он содержит дубильные вещества, кофеин, белок, пигмент, пектин, витамины, минералы, органические кислоты и т.д. Издавна чай считался целебным напитком и сначала использовался как лекарство.

Прежде всего, чай стимулирует жизнедеятельность организма, повышает работоспособность, устраняет усталость. И на самом деле, зеленый чай помогает замедлить или уменьшить процесс старения человеческого организма. Неслучайно в Великобритании в армии чай использовался как обязательный продукт питания, а затем и во всех других армиях мира [1]. Только впоследствии стало известно, что калорийность чая (свежих листьев) почти в 24 раза выше, чем в хлебе, что объясняется высоким содержанием белка в чае [2].

Химический состав чайного сырья и его влияние на качество чайной продукции:

1. Вода: в чайном сырье обычно составляет 75-80 %. Содержание воды в чае зависит от времени и погоды в период сбора урожая. При переработке вода является средой, в которой происходят взаимодействия между веществами в чае. Кроме того, вода также непосредственно участвует во многих гидролизных и окислительно-восстановительных реакциях, происходящих в процессе переработки зеленого чая. Когда содержание воды в чайном продукте составляет менее 10 %, дрожжи в чайном материале ингибируют [2].

2. Танин представляет собой смесь полифенолов, легко окисляющихся под действием катализаторов, ферментов и кислорода. Результат этого окисления

определяет цвет и вкус чая. Поэтому для производства чая часто выбирают чайные листья, в которых содержится большое количество танина. Содержание танинов в зеленом чае постепенно увеличивается с начала сбора урожая до середины июля и затем снижается осенью.

3. Кофеин: молекулярная формула: $C_8H_{10}N_2O_2$. Он растворяется в горячей воде для создания аромата, уменьшения горечи зеленого чая. Содержание кофеина варьируется в зависимости от вегетационного периода. Кофеин возгоняется при температуре 100-110°C, поэтому при сушке чая теряется 10% кофеина, содержащегося в сырье [3, 4].

4. Пектин в зеленом чае оказывает значительное влияние на процесс его производства. При соответствующем количестве пектина создаются хорошие условия для процесса скручивания чайных листьев. При высоком содержании пектина чайные листья слипаются, что приводит к снижению эффективности процесса скручивания чая и вызывает трудности при сушке чая (неравномерное качество сушки).

Состав ингредиентов листьев зеленого чая, который варьируется в зависимости от сезона сбора урожая, представлен в таблице 1.1.

В течение 5000 лет о чайной культуре написано большое количество книг, статей и исследований. Чай изучали как растение, требующее особых условий выращивания, и как пищевой материал, требующий сложной, разнообразной и тщательной обработки, особых условий хранения и транспортировки [5].

Чтобы готовый продукт чая имел хорошее качество, свежие чайные листья после сбора должны пройти через 5 стадий (рисунок 1.1): увядание, фиксацию (уничтожение дрожжей), скручивание, сушку, упаковку [6]. Обычно 4-6 кг свежих листьев зеленого чая дают 1 кг сушеных чайных листьев.

Таблица 1.1 – Химические составы зеленого чая

Химические составы	Сезон			
	Весна	Лето	Осень	Зима
Влажность, %	70,1	75,5	73,1	72,5
Содержание сухого вещества, %	29,9	24,5	26,9	27,5

Продолжение таблицы 1.1

Содержание растворимых веществ, %	40,6	43,2	42,4	41,0
Содержание танина, %	25,3	27,3	25,8	24,7
Содержание кофеина, %	2,3	2,5	2,7	2,4
Содержание полифенолов, %	21,1	22,6	22,0	20,6
Общее содержание зольности, %	4,5	4,2	4,0	4,4

Увядание. После сбора чайные листья увядают примерно 1-4 часа. Увявшие листья способствуют гидролизу углеводов и пектинов в воде. Во время этого процесса вес свежих чайных листьев уменьшается, часть влаги испаряется, что способствует лучшей фиксации.

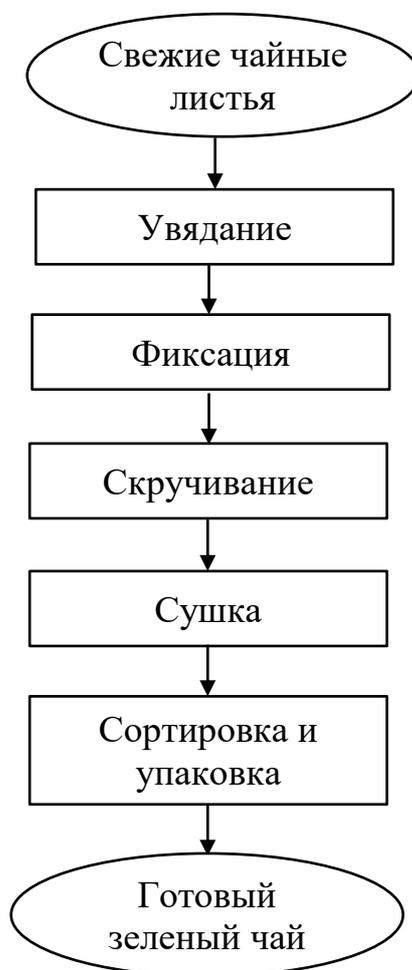


Рисунок 1.1 – Стадии производства зеленого чая

Фиксация (окончательное высушивание листовой ткани). Качество чая сильно зависит от этой стадии, убивающей ферменты листьев зеленого чая. Эта стадия помогает зеленому чаю сохранить активные химические вещества, такие

как катехины, витамины, дубильные вещества и другие. Обычно процесс уничтожения ферментов листьев зеленого чая происходит при температуре 250 °С в течение 2-3 минут [6]. После процесса фиксации оставшееся содержание влаги должно составлять 62-64%, вследствие чего лист станет мягким и легко податливым для скручивания.

Скручивание. Суть процесса скручивания зеленого чая заключается в раздавливании листьев чая, чтобы вода выделялась на поверхности листа. Операция скручивания направлена на придание листу требуемой формы. Зеленый чай проходит через скручивание один или два раза в течение 70-80 минут.

Сушка. Листья зеленого чая после процесса скручивания поступают в сушилку для выделения влаги. Влажность зеленого чая в конце процесса сушки снижается до 3-5 %, чтобы чай дольше сохранялся. Температура сушки 80-105 °С.

Сортировка и упаковка. По стандартам зеленый чай сортируется с помощью специальной машины. К зеленому чаю предъявляются строгие требования: содержание ломаных чаинок, крошки и высевок должно быть ниже, так как они снижают потребительский спрос и ценность продукта. Сухой чай должен быть упакован в три слоя обертки (два слоя обычной бумаги и один слой металлической бумаги посередине) в емкости с плотной крышкой.

1.2 Анализ технологических методов и средств сушки в условиях послеуборочной обработки зеленого чая

1.2.1 Технология процесса сушки зеленого чая

Сушка – один из основной этапов послеуборочной обработки, который происходит на предприятиях, производящих все виды сельскохозяйственных и пищевых продуктов.

Суть процесса сушки заключается в удалении жидкости из твердых тел посредством испарения на основе законов тепломассопереноса. Наиболее часто удаляемая жидкость – это влага или летучие органические растворители. Сушка часто является последним этапом производственного процесса, непосредственно перед упаковкой продукта [7]. Сушка – важнейший процесс для сохранения

любой пищевой и сельскохозяйственной продукции (зерновых и всех видов кормовых культур) в промышленности. Задачи процесса сушки – доведение влажности продукта до значения, необходимого для хранения; обеспечение сохранения возможного максимального количества химических веществ, определяющих качество продукта.

Как и другие пищевые и сельскохозяйственные продукции, процесс сушки зеленого чая имеет большое значение:

- уничтожает и предотвращает рост микроорганизмов, вредных для здоровья человека и отрицательно влияющих на качество зеленого чая;
- придает зеленому чаю приятный аромат, цвет и форму перед тем, как он попадет к потребителю;
- после сушки вес и объем зеленого чая значительно уменьшаются, что упрощает его хранение, транспортировку и делает их более экономичными;
- и самое главное – при низкой влажности срок хранения зеленого чая в обычных условиях значительно увеличивается.

Процесс сушки зеленого чая делится на два небольших этапа (таблица 1.2): первый этап (основной – контроль скорости испарения) и заключительный этап (завершающая сушка – фиксация вкуса и влаги).

Разделение стадий сушки зеленого чая призвано обеспечить:

1. Гарантию качества чая

Если с самого начала быстро высушить чайные листья при высоких температурах, то чай может подгореть, потерять свой естественный зеленый цвет и полезные соединения, такие как полифенолы и катехины.

Если сушить чайные листья слишком медленно, чай может сильно окислиться, что ухудшит его качество вкуса и цвета.

2. Контроль скорости испарения воды

Первоначально, когда влажность чая еще высока, его нужно сушить при высокой температуре, чтобы вода быстро испарилась.

Когда чай достигает средней влажности (~8-10%), температуру необходимо снизить, чтобы избежать слишком быстрого высыхания, вызывающего сильную

усадку и влияющего на структуру чая.

Заключительный этап требует бережной сушки для достижения желаемой влажности без потери естественного вкуса.

Таблица 1.2 – Этапы процесса сушки

Этап	Температура Воздуха (°C)	Влажность чая (%)	Время (мин)
Первый	100 - 110	60→12	10 - 14
Заключительный	80-90	12→5	18 - 20

3. Повышение энергоэффективности

Равномерная сушка при фиксированной температуре может потребовать больше энергии, чем оптимизация каждого этапа.

Разделение фаз помогает использовать энергию более разумно и экономно.

1.2.2 Анализ способов сушки пищевых продуктов в промышленном производстве и типы сушилок

В современном развитии пищевой промышленности можно встретить множество различных технологий сушки, при этом все они основаны на трех способах: конвекционном, сублимационном и микроволновом [8].

Конвекционная сушка является наиболее распространенным методом термообработки растительного сырья. Суть данного метода сушки заключается в передаче тепла высушиваемому материалу с помощью горячего воздуха или парогазовой смеси. При передаче тепла из сырья выделяется влага, которая потом поступает вместе с воздухом на выход камеры сушилки [9].

Суть сублимационной сушки состоит в том, чтобы изменить воду непосредственно с твердого состояния на парообразное. В производстве сублимационная сушка выполнена следующим образом: материалы замораживают при подходящей температуре, чтобы большая часть воды была преобразована в твердое состояние; затем создается вакуумное пространство в камере сушилки и медленно поднимается температура для сублимации воды, находившейся в твердом состоянии [10, 11]. Сублимационная сушка позволяет

получать продукты высокого качества, сохраняя практически неизменную пищевую ценность, низкую влажность продукта, длительное время хранения, простоту транспортировки. Однако, система сублимационной сушки сложна, требует значительного времени для сушки и высокого энергопотребления.

Суть микроволновой сушки. На сушильный материал воздействует микроволновое поле, под его воздействием молекулы вещества вибрируют и вращаются. При их миграции выделяется тепло, интенсивность которого зависит от содержания воды и количества молекул. Температура внутри продукта несколько выше, чем на его поверхности, поскольку поверхность быстро охлаждается за счет испаряющейся влаги. Благодаря этому действию давления пара жидкость из внутренней части продукта направляется к поверхности [12]. Главным преимуществом микроволновой сушки является высокая эффективность. Недостаток заключается в том, что весь процесс сушки требует больших затрат энергии.

Сублимационные и микроволновые сушилки дают продукты с высокой точностью значения выходной влажности продукта, однако данные методы требуют сложного высокотехнологичного оборудования и больших затрат энергии.

Следовательно, конвекционный способ является наиболее распространенным методом в условиях промышленности для сушки продуктов зеленого чая, он не требует дорогостоящего оборудования и большой энергоемкости даже при высоком содержании влаги в продукте.

В зависимости от физических и химических характеристик высушиваемых материалов в промышленности применяют разнообразные типы сушильных установок. Рассмотрим подробно конструкцию основных типов сушилок этого способа сушки.

Вращающаяся барабанная сушилка

Вращающаяся барабанная сушилка состоит из барабана, расположенного под наклоном около 6-8 градусов относительно поверхности земли, и двух ремней, которые скользят по опорным роликам при вращении барабана.

Расстояние между роликами регулируется для изменения уровень наклона барабана (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Пример внешнего вида барабанной сушилки

Барабан вращается со скоростью около 1-8 об/мин.

Сушильным агентом может быть воздух или парогазовая смесь. Обычно сушильные материалы и агент движутся в одном и том же направлении, чтобы избежать пересушивания. Скорость агента, движущегося в барабане, составляет около 2-3 м/с.

Влажный материал проходит через входной циклон и перемещается в барабане с помощью барьерных прокладок. В барабане барьерные прокладки перемешивают и улучшают контакт материала с сушильным агентом. Сушильный материал после сушки выводится из выходного циклона.

Очевидные преимущества барабанных сушилок [13]:

- подходят как для грубых, так и для тонких твердых частиц;
- нечувствительны к грубым или тяжелым твердым веществам;
- низкие расходы на оборудование для подачи воздуха;
- нечувствительны к изменениям размера частиц;
- нечувствительны к колебаниям влагосодержания и массового расхода;
- низкая удельная потребность в электрической энергии;
- стабильный удельный расход тепла даже при производительности ниже номинальной;
- простая установка и быстрый ввод в эксплуатацию;
- умеренный износ и низкие требования к запасным частям.

Недостатки барабанных сушилок [13]:

- высокая металлоемкость (толстостенная конструкция барабана);
- выбор внутренних устройств сушильного барабана требует многолетнего опыта;
- обеспыливание материала при сушке происходит лишь частично;
- противоточные варианты сушки ограничены крупнозернистыми материалами.

Сушилка с псевдооживленным слоем

Сушилка с псевдооживленным слоем (рисунок 1.3) представляет собой универсальное сушильное оборудование, используемое для сушки гранул, кристаллических материалов и крупнодисперсных порошков, а также аналогичных материалов для фармацевтической, химической, пищевой, красильной и смежных отраслей промышленности. Сырье помещают в сушилку с псевдооживленным слоем. Материал непрерывно движется вперед за счет вибрации, а горячий воздух проходит через псевдооживленный слой для осуществления теплообмена с влажным сырьем. Затем влажный воздух откачивается через циклонный сепаратор и пылеуловитель, а сухой материал выводится через выпускное отверстие.



Рисунок 1.3 – Пример внешнего вида сушилки с псевдооживленным слоем

Сушильным агентом может быть горячий воздух или топочные газы, разбавленные воздухом [14, 15].

Сушилка с псевдооживленным слоем обладает существенными

достоинствами:

- интенсивность сушки высока, что позволяет сушить при более высокой температуре;
- высокая способность автоматического регулирования.

Недостатки: большие размеры и высокая стоимость пылеулавливающих устройств; в некоторых случаях требуются дополнительные устройства для измельчения и подготовки материалов до входа сушилки.

Туннельная сушилка

Туннельная сушилка обычно имеет длину 30-40 м, а иногда и до 60 м, но не больше (рисунок 1.4). Конструкция туннельной сушилки очень проста. Обычно имеется один или несколько сушильных туннелей, расположенных параллельно. Сушильный материал, уложенный на тележке, медленно перемещается буксирной лебедкой. По определенному периоду времени тележка с сухими материалами выходит на выход, а на вход входит другая тележка с влажным материалом. Во время сушки дверцы постоянно закрываются. Сушильный агент благодаря вентилятору идет в направлении, противоположном движению материала [16].



Рисунок 1.4 – Пример внешнего вида туннельной сушилки

Преимущества:

- возможно, сушить большое количество материалов одновременно;
- небольшие затраты времени при большом объеме материала.

Недостатки:

- высокая стоимость оборудования;

- качество продукции невысокое.

Конвейерное сушильное оборудование

Конвейерное сушильное оборудование состоит из прямоугольного помещения, в котором находятся конвейеры. Эти ленты сделаны из металлической сетки и движутся со скоростью около 0,2 м/с.

При данном оборудовании технологическая схема процесса сушки материала выглядит следующим образом (рисунок 1.5).

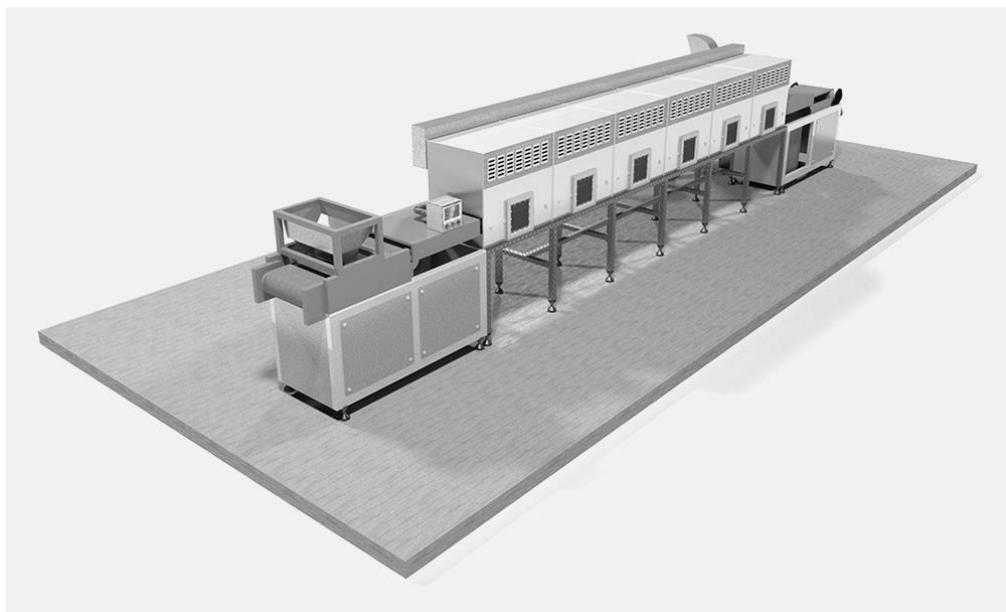


Рисунок 1.5 – Пример внешнего вида конвейерного сушильного оборудования

Воздух сначала вводится в теплоноситель, где он получает тепло. После достижения необходимой температуры горячий воздух, поступающий в сушильную камеру, контактирует с сушильным материалом, обеспечивая тепло для испарения влаги продукта [20].

В процессе сушки воздух движется с большой скоростью, поэтому часть материала будет вытягиваться вместе с воздухом из сушильной камеры. Для извлечения этого количества продукта на выходе ставится циклон. Горячий воздух после выхода из сушильной камеры поступает в циклон для отделения материала. Отработанный воздух выбрасывается вентилятором в окружающую среду [20].

Исходный сушильный материал подается в сушильную камеру по конвейерам. Сушильный материал движется по конвейерной ленте

перпендикулярно направлению движения горячего воздуха и получает тепло непосредственно от смеси горячего воздуха для осуществления процесса сушки [20].

Преимущества конвейерных сушилок:

- сырье непрерывно перемещается равномерным слоем. Они считаются наиболее устойчивыми к заторам;
- высокая готовность к сборке;
- не требуется сложного фундамента, сушилку можно установить на предварительно подготовленное бетонное основание;
- поскольку этот тип осушителя можно разобрать на мелкие детали, его очень удобно заменять и модернизировать, чтобы повысить эффективность работы и сэкономить больше топлива.

Недостатки ленточных сушилок:

Надежность. Появление дефектов конвейерной ленты приводит к выходу из строя.

Экологичность. Сушильные машины этого типа не оборудованы системой сбора пыли, поэтому их нельзя устанавливать вблизи жилых помещений.

Размер. Хотя сушилка этого типа не требует сложного фундамента, ее размеры довольно большие, не подходят для каждого домохозяйства.

Из вышеперечисленных преимуществ и недостатков типов сушилок для растительного сырья и характеристик зеленого чая в данной диссертации выбрана конвейерная ленточная сушилка для исследования процесса сушки зеленого чая.

1.3 Современные методы моделирования и управления процессом сушки

1.3.1 Основные подходы к математическому моделированию процесса сушки

Математическое моделирование представляет собой процесс изучения характеристик объекта посредством его математической модели. Основная задача заключается в выявлении оптимальных условий процесса, управлении им на основе разработанной модели, а также в последующем применении полученных результатов на объект исследования [17]. При построении математических

моделей и систем управления преимущественно применяются физико-химические закономерности и числовые данные, полученные непосредственно от исследуемого объекта, тогда как качественная информация зачастую не рассматривается в качестве равнозначного источника [18].

По методам построения математических моделирований технологического объекта исследования в целом и процесса сушки в частности их можно разделить на две основные группы: экспериментально-статистические и аналитические модели [19, 20].

1.3.1.1 Экспериментально-статистические модели в области процесса сушки

Под экспериментально-статистическим моделированием понимается процесс нахождения связи между выходными и входными параметрами путем экспериментирования и анализа данных, полученных в результате реального эксперимента [21]. В этом случае объект исследования рассматривается как «черный ящик», а математические уравнения, описывающие эту систему, не отражают внутренние характеристики объекта [22]. Моделирование процесса сушки на основе данного подхода просто и позволяет создать прямую зависимость между входными параметрами процесса сушки и свойствами конечного продукта. Однако полученную модель можно применять только к определенному диапазону значений. Этот метод моделирования можно разделить на полуэмпирический и эмпирический.

Чтобы смоделировать процесс сушки пищевых продуктов, необходимо построить функцию скорости удаления влаги из высушенного материала. Различные модели, используемые для скорости сушки (MR), проиллюстрированы в таблице 1.3, включая коэффициенты: a , b , c , – коэффициенты сушки; k – константы сушки; L – полутолщина высушенных материалов, M ; t – время, с.

Таблица 1.3 – Математические модели, используемые для скорости сушки [35]

Номер	Название математической модели	Уравнение скорости сушки
1	Модель Ньютона	$MR = e^{-kt}$
2	Модель Пейдера	$MR = e^{-kt^n}$

Продолжение таблицы 1.3

3	Модификации модели Пейдера	$MR = e^{(-kt)^n}$
4	Модель Хендерсона и Пабиса	$MR = a e^{-kt}$
5	Модификации модели Хендерсона и Пабиса	$MR = a e^{-kt} + b e^{-gt} + c e^{-ht}$
6	Экспоненциальная модель	$MR = a e^{-kt} + (1-a) a e^{-kat}$
7	Модель Приближение диффузии	$MR = a e^{-kt} + (1-a) a e^{-kbt}$
8	Модель Льюиса с корректировкой на размер материала	$MR = a e^{\frac{-ct}{L}}$
9	Логарифмическая модель	$MR = a e^{-kt} + b$
10	Модель Мидилли-Кучук	$MR = a e^{-kt^n} + bt$
11	Модель Ван и Сингх	$MR = 1 + at + bt^2$

Формула определения скорости сушки (MR) выражается следующим уравнением (1.1):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}, \quad (1.1)$$

где M , M_e – среднее и равновесное влагосодержание материала, %; M_0 – влагосодержание материала при $t = 0$.

Для более точного описания кинематики процесса сушки Пейдер предложил включить в модель безразмерную экспериментальную константу n (1.2):

$$MR = e^{-kt^n}. \quad (1.2)$$

Второй закон диффузии Фика (1.3) используется для описания диффузии влаги [23]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \nabla^2 M, \quad (1.3)$$

где D – коэффициент массовой диффузии, m^2/s .

Чтобы упростить второй закон Фика, Хендерсон и Пабис предложили (1.4):

$$MR = ae^{-kt}. \quad (1.4)$$

Для модификации модели Хендерсона и Пабиса были предложены отдельные экспоненциальные уравнения для каждой части кинетической кривой (1.5)-(1.6) [24, 25].

$$MR = ae^{-kt} + be^{-gt} + ce^{-ht}, \quad (1.5)$$

$$MR = ae^{-kt^n} + be^{-gt} + ce^{-ht}. \quad (1.6)$$

Модель Вейбулла и ее модификации были широко применены для моделирования кинетики сушки (1.7)-(1.9).

$$MR = a - be^{(-kt)^n}, \quad (1.7)$$

$$MR = a - be^{-kt^n}, \quad (1.8)$$

$$MR = e^{-\frac{t^n}{a}}. \quad (1.9)$$

В работах [26, 27] эмпирическая модель Вейбулла использовалась для описания кинетики высвобождения АФИ, которую можно записать в виде следующего математического уравнения:

$$MR = 1 - e^{-\frac{(t-T_i)^n}{a}}, \quad (1.10)$$

где a – параметр временной шкалы процесса; T_i – время задержки, с; n – параметр формы кривой высвобождения.

В работах [28, 29, 30] для описания кинематики процесса сушки использовался квадратичный полином, записанный в виде следующего уравнения (1.11):

$$MR = 1 + at + bt^2. \quad (1.11)$$

В работе [31] уравнение (1.12) было предложено для описания функциональной зависимости между влагосодержанием черники и временем сушки.

$$MR = e^{-(at+bt^2)}. \quad (1.12)$$

Следует отметить, что данный подход упрощает определение модели в ходе экспериментов и не требует сложных математических вычислений. Однако основным недостатком экспериментально-статистического метода определения

скорости процесса сушки является то, что коэффициенты теплообмена устанавливаются путем обобщения экспериментальных данных, полученных для конкретного материала и условий эксперимента. При этом условия сушки в лабораторных установках часто не совпадают с реальными условиями сушки на промышленном оборудовании. Поэтому полученную модель данного подхода возможно адаптировать не при любых условиях эксплуатации.

1.3.1.2 Аналитические модели

Аналитическим моделированием является процесс формализации реального объекта и нахождения его решения в аналитических функциях. Данные модели построены на математическом, физическом, химическом или другом научном языке путем применения специальной символики с точными правилами совместимости. Они описываются математическими формулами, линейными и нелинейными уравнениями, в том числе дифференциальными, интегральными и их комбинационными уравнениями. Аналитические модели более сложны по конструкции, требуют определения большего числа параметров, но они могут быть адаптированы к объектам при различных условиях эксплуатации.

При моделировании процессов сушки в [32, 33, 34] используются аналитические модели, в которых уравнения теплопереноса записываются отдельно для двух определенных областей: сухого и влажного материала.

В работе [35] для построения математического моделирования технологического промышленного процесса сушки какао Лемпото Форгор проводил анализ характеристик трех стадий процесса термообработки: период нагрева, постоянной и падающей скорости. Учитывая тепловые ферментативные потемнения какао-бобов в каждом периоде, автор описал математическое моделирование на каждой стадии процесса следующим образом.

Уравнение изменения температуры в периоде нагрева (1.13):

$$\frac{\partial T(l,t)}{\partial t} = a_p \frac{\partial^2 T(l,t)}{\partial l^2}, \quad (1.13)$$

где t – время, с; $T(l,t)$ – температурное поле слоя, °С; a_p – коэффициент температуропроводности слоя какао-бобов, м/с²; l – расстояние от точки

исследования до начальной точки толщины слоя какао-бобов, м.

Уравнение изменения температуры в периоде постоянной скорости термообработки (1.14):

$$\frac{\partial T(l, t)}{\partial T} = a_p \frac{\partial T^2(l, t)}{\partial l^2} + \frac{q_v}{C_p \rho_p}, \quad (1.14)$$

где q_v – источник тепла, возникающий в результате реакции ферментативного потемнения, Дж; ρ_p – плотность продукта, кг/м³; C_p – удельная теплоемкость продукта, Дж/(кг К).

В статье [36] представлено применения аналитической модели кинетики сушки по результатам исследований. Для облегчения расчетов и повышения точности общую кинематическую задачу, описывающую процесс сушки материалов в сушилке, необходимо разделить на два основных уровня: микрокинетика – описание процесса сушки гранул, частиц, и макрокинетика – описание процесса сушки материала по всему рабочему объему устройства.

Развитие науки и техники в пищевой промышленности способствовало проведению многочисленных исследований тепломассопереноса на макроскопическом уровне, в основе которых лежит теория диффузии, диспергирования, испарения и конденсации [37, 38]. Среди них моделями, лежащими в основе изучения процесса термообработки пищевой и сельскохозяйственной продукции в промышленном производстве, являются модели, разработанные Лыковым [39, 40, 41] и Уитакером [42, 43, 44].

Модель Лыкова. В работе [45] используется система дифференциальных уравнений тепломассопереноса для описания изменения влажности и температуры высушиваемого материала при процессе сушки. Данная система дифференциальных уравнений имеет вид (1.15):

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial t} = \nabla [K \nabla M + k \delta_T \nabla T] \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0 C} \nabla \left[\lambda \nabla T + \varepsilon r \rho_0 \frac{\partial M}{\partial t} \right], \end{cases} \quad (1.15)$$

где t – время, с; K – коэффициент массопереноса, 1/с; ρ_0 – плотность продукта в

абсолютном сухом состоянии, $\text{кг}/\text{м}^3$; C – удельная теплоемкость продукта, $\text{Дж}/(\text{кг К})$; ε – коэффициент парообразования; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м К})$; r – теплота испарения связанной влаги, $\text{Дж}/\text{кг}$; δ_T – коэффициент термической диффузии, $1/\text{К}$. Из перечисленных параметров в (1.15) определение коэффициента массопереноса представляет собой трудность применения данного подхода к моделированию процесса сушки [45]. Для решения данной проблемы требуется проведение экспериментов исследования зависимости k от влагосодержания и температуры воздуха, которые рассмотрены в разделе 2.

В работах [46, 47] используются уравнения тепломассопереноса А.В. Лыкова для моделирования процесса сушки капиллярно-пористого тела, данные уравнения представлены в виде векторов (1.16):

$$\begin{cases} C \frac{\partial T}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) - C_w (D \nabla M + D_T \nabla T) \nabla t + Q(M, T) \\ (1 - \varepsilon) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(D \nabla M) - \nabla(D \nabla T) \end{cases}, \quad (1.16)$$

где C – удельная теплоемкость продукта, $\text{Дж}/\text{кг } ^\circ\text{С}$; C_w – теплоемкость жидкости, $\text{Дж}/\text{кг } ^\circ\text{С}$; Q – теплота (Энергия), Дж ; D – коэффициент массовой диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

Во многих научных трудах модель Лыкова модифицировалась для получения новых подходов к моделированию термической обработки сельскохозяйственных и пищевых продуктов в условиях промышленного производства [48, 49].

Модель Уитакера. Суть данного метода заключается в использовании методики усреднения по объему и традиционные законы сохранения (сохранение массы, энергии и т. д.) для описания процесса тепломассообмена и прогнозирования влажности продукта. Модель включает в себя следующие механизмы: поток жидкости под воздействием капиллярных сил, движение газовой и паровой фазы, испарение влаги из материала, а также процессы теплопередачи, происходящие за счет конвекции, диффузии и теплопроводности.

С помощью этой модели можно объяснить теплофизические явления при термообработке пористых материалов. Однако, как в модели Лыкова, в данной модели также возникают трудности, связанные с неопределенностью параметров

процесса, таких как коэффициенты диффузии тепла и массопереноса.

Необходимо отметить, что использование математической модели для процесса сушки по-прежнему сталкивается со многими трудностями в процессе расчета таких явлений, как внутреннее испарение влаги, усадка или растрескивание материала, а также со сложностью определения ряда параметров модели [45].

1.3.2 Современные методы управления технологическим процессом сушки

1.3.2.1 Применение нечеткой логики для управления сушильными системами

Традиционные технологии управления трудно применять для управления процессом сушки, так как на процесс сушки всегда влияют внутренние и внешние возмущения, а также в процессе присутствует множество неопределенных параметров. Эти особенности процесса термообработки затрудняют описание процесса сушки в полной мере.

Во многих научных трудах упоминалось применение нечетких множеств для автоматизации управления процессом сушки [50, 51, 52]. Система нечеткого управления – это экспертная система, основанная на нечеткой логике, впервые введенной профессором Заде еще в 1965 году [53]. Суть данного метода управления: на основе опыта человека-оператора и знаний, полученных от экспертов на этапе проектирования, строится база правил системы нечеткого вывода для генерации правил действия по ситуации.

Система нечеткой логики используется для определения степени значений входного состояния, генерируемых в процессе фазификации, с целью формирования степени выходного состояния. Для представления степеней вывода и ввода системы используется функция принадлежности, имеющая треугольную, трапециевидную или колоколообразную форму. Полученное выходное значение должно пройти процесс преобразования (дефазификации), чтобы получить четкое значение для удобного учета или управления системой. Общий алгоритм реализации нечеткой логики представлен на рисунке 1.6.

В работе [54] с помощью компьютерных средств Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB автор ввел нечеткие правила для аппроксимации

зависимости влажности и времени сушки от значений температуры и равновесной влажности воздуха в сушильной камере. Этот результат был сравнен с экспериментальными данными в работе [55], и были сделаны выводы, что алгоритм управления, разработанный в работе [54], помогает реализовать задачи улучшения управления сушилкой с повышением качества древесины и снижением энергоемкости процессов.

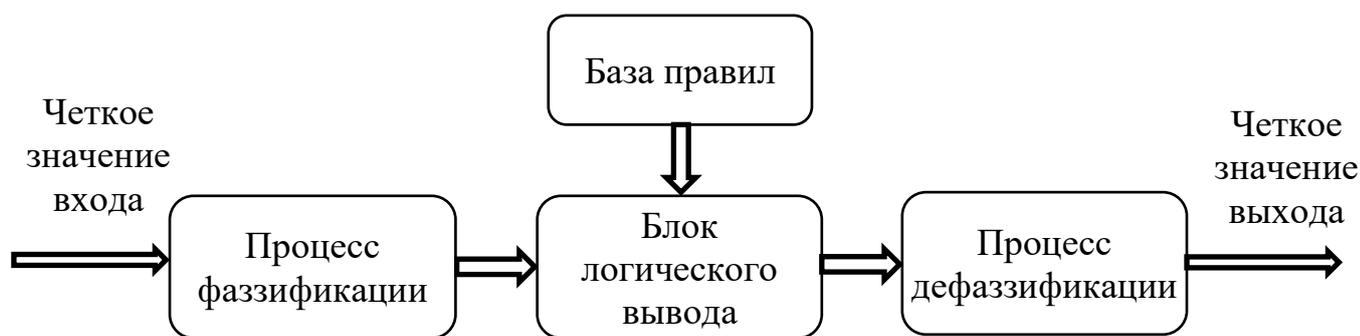


Рисунок 1.6 – Структура нечеткого логического регулятора

Использование знаний о показателях технических процессов и качестве зерна (запах, качество оболочки и цвет) для построения нечетких правил системы управления процессом сушки зерна в зерносушилке шахтного типа ДСП-32 было предложено в работе [56].

Есть другие опубликованные работы в области нечетких контроллеров для управления термообработкой материалов, в том числе нечеткие контроллеры для управления сушилкой риса [57], для роторных сушильных систем [58] и для сушки окатышей [59].

Основным преимуществом регуляторов на основе нечеткой логики является простота реализации, так как не нужно проводить сложные математические вычисления. Основной недостаток данного подхода к управлению: для формирования нечетких правил требуется значительное знание экспертов об объекте исследования [60].

1.3.2.2 Применение нейронных сетей для управления процессом термообработки

В настоящее время для решения задач прогнозирования теплофизических параметров сушильных материалов в различных типах сушилок популярно применение математического аппарата с использованием теории нейронных

сетей. Такой подход не требует какого-либо анализа и решения сложных математических уравнений и эффективно используется для управления сложными нелинейными объектами, аппроксимации функций при создании моделей и т.д. [61, 62].

Преимущество нейронных сетей для построения систем управления состоит в том, что, во-первых, они надежны и отказоустойчивы, во-вторых, в данном методе управления использование способности обучения системы позволяет осуществлять автоматическую настройку параметров сети для улучшения качества управления объектом.

Работа оборудования и поведение материала во время сушки является сложным процессом, на который влияет множество неизвестных внешних факторов и который имеет неопределенные параметры, такие как коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и термодиффузии материала и т.д. Эти параметры не являются постоянными величинами, а зависят от содержания влаги и температуры материала и окружающей среды во время сушки. Во многих научных трудах для моделирования процесса сушки пищевых продуктов в таких условиях широко применяется метод «нейронные сети». Среди них следует упомянуть модель сушки для тертого кокоса до значения уровня влажности (3%) [63]; для пиломатериалов [64], клубники [65] и модель прогнозирования состояния процесса сушки зерна [66].

Система искусственной нейронной сети (ИНС) состоит из двух основных слоев и некоторых скрытых слоев: первый – слой входных данных, количество узлов которого равно количеству управляющих переменных, помещенных в сеть для процесса вычисления нейронной сети; второй называется слоем выходных данных, содержащих узлы, число которых равно количеству прогнозируемых переменных. Между ними располагаются скрытые слои, обеспечивающие обработку данных и формирование сложных зависимостей. Каждый узел связан с другими узлами с определенным весом и пороговым значением. Если выходной сигнал любого узла превышает пороговое значение, то этот узел активируется и отправляет данные на следующий уровень сети. В противном случае данные не

будут переданы на следующий уровень сети.

Несмотря на широкий спектр возможностей искусственных нейронных сетей (ИНС), их применение в управлении сопровождается рядом недостатков:

- большинство методов проектирования ИНС основаны на эвристических принципах и часто не дают однозначных решений;
- для построения системы управления на базе ИНС требуется многократная настройка внутренних элементов и связей между ними;
- возникают сложности с подготовкой обучающей выборки, так как трудно подобрать достаточное количество качественных примеров для обучения;
- процесс обучения сети в некоторых случаях приводит к тупиковым ситуациям.

1.3.2.3 Применение управления с прогнозирующими моделями для регулирования процесса термообработки

Управление с использованием прогнозирующих моделей представляет собой метод, основанный на оптимизации заданной целевой функции с целью определения наилучшего управляющего воздействия в текущий момент времени. Данный подход является недавним развитием теории управления технологическими процессами, и он особенно эффективен при управлении сложными процессами с большими задержками. Промышленность широко приняла управление с прогнозированием моделей (УПМ) как мощную стратегию управления, которая хорошо подходит для высокопроизводительного управления [67]. Это было доказано более чем 3000 успешными применениями этой техники в управлении процессами в химической, нефтяной и перерабатывающей промышленности и других отраслях [68, 69].

В работе [71] Дидриксен продемонстрировал превосходство УПМ над контроллером с обратной связью для управления роторной сушилкой. В исследовании [72] Муш и его товарищи показали, что УПМ дало значительные экономические выгоды для сушки древесины в печи и значительно сократило время сушки.

В другом исследовании [73] Диб провел экспериментальные испытания

контроллера УПМ на непрерывной инфракрасной сушилке. Из результата этого исследования автор сделал следующие выводы: во-первых, УПМ превзошел комбинированный ПИД-регулятор без обратной связи и, во-вторых, эффективное управление не может быть достигнуто с помощью обычного управления с обратной связью ПИ- и ПИД-регулятора, поскольку непрерывный инфракрасный нагрев является нелинейным процессом, включающим сильное взаимодействие между системными переменными и большие временные задержки.

Перечисленные исследования показали перспективность использования УПМ для регулирования динамики процессов сушки. Однако, по сравнению с количеством успешных применений для линейных процессов, использования данного метода для управления промышленными нелинейными объектами еще довольно скромно.

Во-первых, значительное влияние возмущений на переменные состояния нелинейного процесса и невозможность их измерения.

Во-вторых, использование нелинейной модели во многих случаях сложно для построения прогнозирующей модели. Это обусловлено затруднением нахождения оптимального решения целевой функции, так как при нелинейной прогнозирующей модели сложность возрастает экспоненциально с увеличением длины горизонта прогноза, а чем меньше горизонт прогноза выхода, тем хуже качество управления [69].

В-третьих: УПМ-регулятор всегда требует дополнительной функции ограничения для целевой функции, чтобы гарантировать стабильное качество управления процессом. Однако, при управлении нелинейным процессом вопрос о выборе разумной функции ограничения до сих пор не был решен [69].

1.4 Постановка цели и задач исследования

Из анализа процесса сушки и особенностей характеристик зеленого чая было выявлено, что процесс сушки является сложным и нелинейным объектом, параметры которого изменяются динамически в ходе процесса. Одной из ключевых задач при проектировании систем управления является минимизация влияния этих изменений на работу сушилки. Для достижения высокой точности

слежения, а также плавного регулирования температуры и влажности слоя сушильного материала необходимо разрабатывать эффективные алгоритмы управления.

Основной целью диссертационной работы является разработка системы управления для повышения эффективности процесса сушки зеленого чая в условиях неопределенности.

В связи с этим для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследование теплофизических характеристик зеленого чая и особенность процесса его сушки.
2. Построение математической модели для процесса сушки зеленого чая в конвейерном сушильном оборудовании.
3. Разработка методики синтеза системы управления с прогнозирующими моделями процессом сушки зеленого чая в условиях неопределенности.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕЛЕНОГО ЧАЯ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Теплофизические свойства пищевых продуктов, такие как теплоемкость (C , Дж/(кг К)), температуропроводность (α , м²/с) и плотность (ρ , кг/м³), имеют большое значение для пищевой промышленности. Температуропроводность пищевых и сельскохозяйственных материалов определяет скорость, с которой тепло передается в материал или из него. Поэтому изучение теплофизических свойств очень важно при расчетах и оптимизации параметров технологических процессов производства пищевых продуктов, включая замораживание и сушку. Общеизвестно, что теплофизические свойства биологических материалов, таких как пищевые продукты, зависят от температуры, содержания влаги и других характеристик состояния продукта [70]. Следовательно, изменчивость состава и физических характеристик, возникающая в результате изменений климатических условий, методов орошения и используемых удобрений, будет проявляться в измененных теплофизических свойствах продукта. Математические модели влияния влажности, температуры и состава на эти свойства были бы полезны не только инженерам, но и ученым-пищевикам, занимающимся разработкой новых продуктов.

Существует большое количество литературы о теплофизических свойствах биологических материалов, таких как морепродукты, молочные продукты, фрукты и овощи, при различных условиях температуры и содержания влаги [75, 76, 77]. Однако, имеется очень ограниченная информация о теплофизических свойствах зеленого чая.

Для оценки температуропроводности пищевых продуктов использовались несколько методов, включая стационарные и нестационарные методы. Нестационарные методы более популярны и предпочтительны для пищевых продуктов, потому что они более быстрые, чем стационарные методы [75]. Среди нестационарных методов наибольшее внимание привлек зонд с источником тепла – благодаря его удобству и низкой стоимости [76]. Теплоемкость измеряется с

помощью калориметров, состоящих из изолированной колбы с жидкостью известной теплоемкости. Однако, в последнее время предпочтительным оборудованием стал дифференциальный сканирующий калориметр (ДСК), поскольку он предлагает быстрый и простой метод с точными и воспроизводимыми данными [77].

Изучение, систематизация и обобщение теплофизических параметров пищевых продуктов, таких как зеленый чай, являются необходимыми этапами для детального научного анализа кинетики и динамики тепломассообмена. Эти данные играют ключевую роль в построении моделирования и в проектировании систем автоматического управления сушильным оборудованием.

Пределы изменения влажности и температуры слоя зеленого чая при промышленном обезвоживании представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Пределы изменения влажности и температуры слоя зеленого чая

Зеленый чай	M, %	T, °C
	60 - 3	80-110

Конечная влажность M_k зеленого чая составляет 5%. Эта величина определяется термодинамическим анализом гигроскопических свойств чайного продукта с учетом технологических требований, обеспечивающих его сохранность при хранении.

Исходная влажность M_n зеленого чая составляет 62%. Это значение примерно соответствует максимальному M , возможному до того, как слой зеленого чая попадет в сушильное оборудование.

2.1 Анализ плотности зеленого чая

В процессе сушки зеленого чая его плотность изменяется вследствие испарения влаги и возможной усадки частиц. Рассмотрены методики расчета плотности в различных стадиях процесса сушки [74].

Анализ плотности зеленого чая проведен при исходной влажности $M_n = 57.02\%$. Расчет относительной погрешности определения ρ проводился по известному алгоритму, значение которого составляло $\varepsilon_p < 4\%$.

Общую формулу для определения плотности при сушке можно выразить

следующим образом: ρ , кг/м³

$$\rho(t) = \frac{m(t)}{V(t)}, \quad (2.1)$$

где $\rho(t)$ – плотность зеленого чая в моменте времени t , кг/м³; $m(t)$ – масса зеленого чая в моменте времени t , кг; $V(t)$ – объем зеленого чая в моменте времени t , м³.

Выражение для расчета объема высушенного материала:

$$m(t) = m_0(1 - M_0) + M(t),$$

где m_0 – исходная масса высушенного материала, кг; M_0 – начальная влажность зеленого чая, %; $M(t)$ – влажность зеленого чая в моменте времени t , %.

Объем высушиваемого материала может измениться из-за усадки в процессе сушки:

$$V(t) = V_0(1 - \beta(M_0 + M(t))),$$

где V_0 – исходный объем высушенного материала, м³; β – коэффициент усадки высушающегося материала (1/кг испарившейся воды).

Из (2.1) и полученных формул выведем выражение для плотности (2.2):

$$\rho(t) = \frac{m_0(1 - M_0) + M(t)}{V_0(1 - \beta(M_0 + M(t)))} = \frac{\rho_0(1 - M_0) + M(t)}{(1 - \beta(M_0 + M(t)))}, \quad (2.2)$$

В работе [78] были проведены эксперименты для определения значения плотности зеленого чая при изменении влажности зеленого чая в процессе производства. Исследования охватывали диапазон изменения влажности от 60% до 3%. Результаты показаны в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Плотность зеленого чая при изменении влажности зеленого чая

Влажность %	57,02	42,14	27,65	23,53	12,55	3,07
Плотность (кг/м ³)	683,93	519,4	434,75	364,15	339,83	312,13

Из формулы (2.2) и экспериментальных данных был определен коэффициент усадки высушающегося материала $\beta = 0,0368$.

По расчетным данным и результатам экспериментов было определено

среднее относительное отклонение $MRE \approx 3\%$, которое характеризует степень расхождения экспериментальных значений плотности с расчетными данными. Стандартное отклонение вычисляется по следующей формуле:

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\rho_{эi} - \rho_{рi})}{\rho_{эi}}, \quad (2.3)$$

где MRE – среднее относительное отклонение, $\rho_{эi}$ – экспериментальные значения плотности, $\rho_{рi}$ – расчетные значения плотности, N – Количество экспериментальных точек.

2.2 Анализ удельной теплоемкости зеленого чая

Для определения функции зависимости теплоемкости C зеленого чая от его влажности можно использовать аддитивный принцип на основе эмпирических данных. В работе [79] были проведены эксперименты для определения значения теплоемкости зеленого чая при изменении влажности зеленого чая в процессе производства. Исследования охватывали диапазон изменения влажности от 60% до 3%. Данные экспериментов показаны на рисунке 2.1 и в таблице 2.3 $C(M_H)$ – теплоемкость зеленого чая при начальной влажности, а C_c – теплоемкость при абсолютно сухом состоянии.

Таблица 2.3 – Удельная теплоемкость зеленого чая

Зеленый чай	$C(M_H)$, Дж/кг·°С	C_c , Дж/кг·°С
		3442

Зависимость C от M принимает следующий вид [79]:

$$C(M) = a_c M(t) + b_c, \quad (2.4)$$

где a_c , b_c – постоянные параметры, полученные в результате экспериментов, Дж/кг·°С.

На основе результатов исследования определены значения a_c и b_c , приведенные в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Величины параметрических констант в уравнении (2.4)

Зелёный чая	a_c , Дж/кг·°С	b_c , Дж/кг·°С
		1440

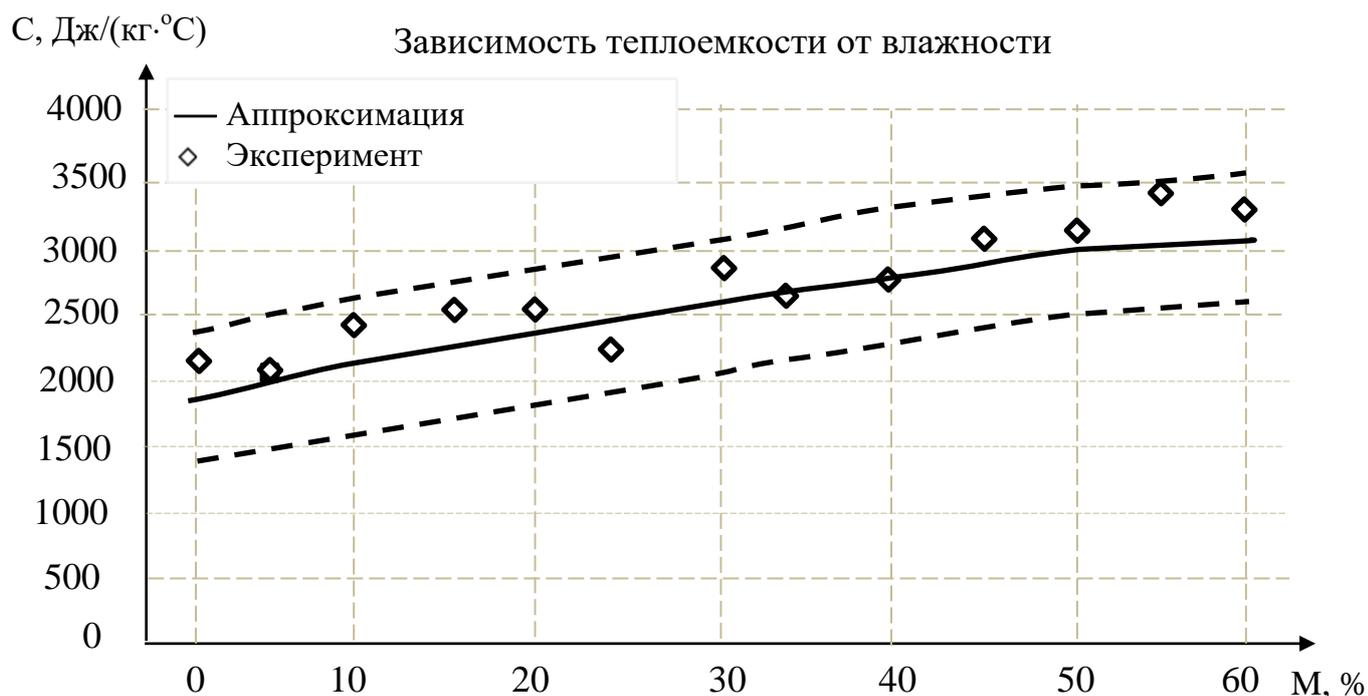


Рисунок 2.1 – Зависимость теплоемкости зеленого чая от его влажности

Из рисунка 2.1 [79] можно делать выводы по зависимости теплоемкости зеленого чая от значения его влажности:

- значение $C(M)$ зеленого чая существенно зависит от значения M ;
- значение $C(M)$ зеленого чая увеличивается при повышении его влажности.

Полученную функцию зависимости (2.4) можно использовать для проектирования модели и управления производственным технологическим процессом сушки зеленого чая.

2.3 Анализ коэффициента массообмена

При обработке чая сушка – это процесс, который потребляет много энергии и может отрицательно сказаться на качестве. Чтобы точно спроектировать и контролировать процесс сушки, необходимо учитывать коэффициент массообмена зеленого чая.

Обычно для описания явления переноса воды из материала в окружающую среду используется простая модель, представленная уравнением (2.5), аналогичным закону охлаждения Ньютона [80], также называемому уравнением

Льюиса [81]:

$$\frac{dM}{dt} = -K(M - M_e), \quad (2.5)$$

где M – влажность, %; M_e – равновесная влажность, %; t – время, с; K – коэффициент массообмена, 1/с.

Интегральная форма (2.6) этого уравнения называется моделью экспоненциальной сушки.

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = e^{-Kt}, \quad (2.6)$$

где M_0 – начальная влажность, %.

Коэффициент массообмена сушки K не является постоянной величиной, а зависит от температуры и повышения температуры переноса воды в материале. Поэтому общепризнано, что K зависит от температуры.

В обзоре тонкослойной сушки [81] пришли к выводу, что расход воздуха мало влияет на сушку зерна, и в статье [82] Хендерсон и Пабис заявили, что она оказывает существенного влияния в начале первых двух часов высушивания. Поскольку чай высыхает менее чем за час, поток воздуха может играть важную роль. В работе [83] говорится, что коэффициент массообмена зависит от расхода воздушного потока в диапазоне 0,1-0,25 м/с.

В данном исследовании включена зависимость коэффициента массообмена сушки от температуры и расхода сушильного воздуха. Результаты данной зависимости нужны для математического моделирования процесса (рисунок 2.2).

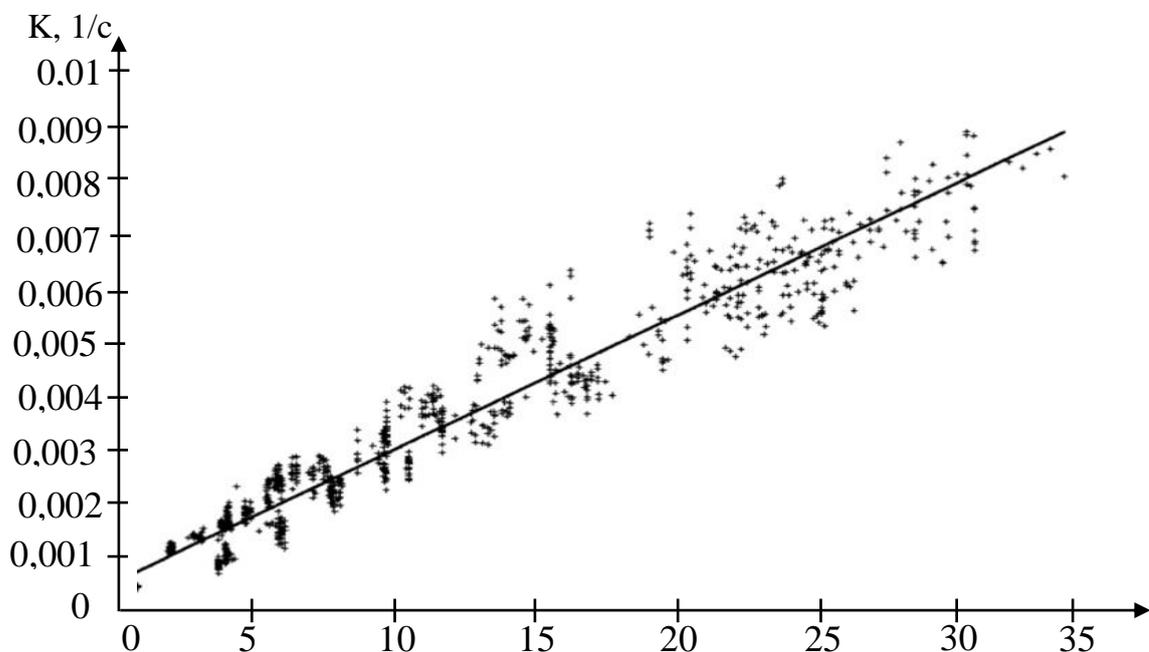
В работе [84] была проведена серия экспериментов, в которых температура воздуха варьировалась от 50 до 150 °С с шагом 10 °С и расхода воздуха – от 0,1 до 0,7 м/с. Исходное содержание влаги естественным образом зависело от погодных условий и времени увядания. Данные загружались в электронную таблицу для расчета коэффициента массообмена каждые 20 секунд во время опыта. Регрессионный анализ был использован для определения того, какая из переменных способствовала изменению коэффициента массообмена. Для каждого интервала времени строили график зависимости веса образца от времени и

определяли значение K . Этот метод учитывал небольшие вариации экспериментальных условий во время опыта и обеспечивал наибольшую степень свободы для статистического анализа.

Коэффициент массообмена сушки K определялся для каждого интервала дискретизации по следующей формуле из уравнения [84](2.7):

$$K = -\frac{\ln(M_0 - M_e) - \ln(M_k - M_e)}{t}, \quad (2.7)$$

где M_0 и M_k – влагосодержание в начале периода измерения и в конце периода, соответственно, %; M_e – содержание влаги в равновесии, %; t – временной интервал, с.



Произведение температуры и расхода воздуха,

Рисунок 2.2 – Изменения коэффициента массообмена K в зависимости от произведения температуры (б) и скорости воздуха (а)

Функцию изменения коэффициента массообмена при варьировании скорости воздуха и температуры можно определить по формуле (2.8) [84]:

$$K = (0,00028(T_a - 45)v_a) - 0,00067, \quad (2.8)$$

где T_a – температура, °С; v_a – скорость воздуха, м/с.

Из результата опытов можно делать следующие выводы:

- коэффициент массообмена K зеленого чая зависит от температуры и скорости воздушного потока.

- Коэффициент массообмена K зеленого чая прямо пропорционален поверхностному воздушному потоку и температуре воздуха.

2.4 Анализ температуропроводности зеленого чая

Значения температуропроводности сельскохозяйственных материалов определялись либо методом стационарного теплового потока, либо методом нестационарного теплового потока. Метод стационарного теплового потока требует много времени для достижения стационарных условий. По этой причине многие исследователи использовали метод нестационарного теплового потока для определения температуропроводности сельскохозяйственных материалов.

Нестационарный тепловой поток рассматривается в однородной среде, нагреваемой линейным источником тепла. Основное уравнение для теплового потока от источника теплопровода выглядит следующим образом [85]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right], \quad (2.9)$$

где T – температура на радиусе r , °C; t – время нагрева образца, с; α – температуропроводность, м²/с и r – радиальное расстояние от источника тепла, м.

Теплопроводность зеленого чая определяется по формуле (2.10) [85]:

$$k = \frac{Q \ln(t_2 - t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)}, \quad (2.10)$$

где k – теплопроводность, Вт/(м·К); Q – теплота, Вт/м; t время, с.

Значение теплоты в формуле (2.10) определяется по следующему выражению [85]:

$$Q = \frac{VI}{L}, \quad (2.11)$$

где V – напряжение, В; I – ток, А; L – длина провода нагревателя, м.

Используя значения удельной теплоемкости, теплопроводности и объемной плотности, температуропроводность зеленого чая рассчитывали по следующему выражению [85]:

$$\alpha = \frac{k}{C}, \quad (2.12)$$

где α – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; C – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, ρ – объемная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В этом исследовании для определения значений температуропроводности зеленого чая была разработана измерительная система, состоящая из трех компонентов (рисунок 2.3а):

- прибор измерения: датчик температуры и нагревательный провод;
- источник питания постоянного тока;
- компьютер для записи значений температуры.

Прибор измерения температуропроводности был разработан, как показано на рисунке 2.3б. Он был изготовлен из трубки из нержавеющей стали с внешним диаметром 6 мм, внутренним диаметром 4 мм и длиной 240 мм. Никель-хромовый нагревательный провод помещается внутрь трубки и подключается к источнику постоянного тока. Датчик температуры размещен в центре трубы и соприкасается с внутренней поверхностью трубы стальной цилиндрической пружиной. Датчик температуры калибруется от 4 до 81 °С. Для определения теплопроводности зонд вставляют вертикально в центр цилиндрического держателя, наполненного приготовленным зеленым чаем. Когда температура зеленого чая достигает равновесия, на нагревательный провод подается питание постоянного тока 0-30 В, 0-3 А, чтобы обеспечить полную передачу тепла от зонда к образцу зеленого чая. Повышение температуры измеряется датчиком температуры в зонде. Кривая зависимости температуры от времени отображается на мониторе ПК.

Влияние насыпной плотности на значение температуропроводности зеленого чая представлено на рисунке 2.4.

Значения температуропроводности зеленого чая уменьшились с $8,126 \times 10^{-8}$ $\text{м}^2/\text{с}$ при $250 \text{ кг}/\text{м}^3$ до $5,037 \times 10^{-8}$ $\text{м}^2/\text{с}$ при $550 \text{ кг}/\text{м}^3$. При увеличении насыпной плотности значения теплопроводности увеличились. Но значения объемной плотности могли увеличиваться быстрее, чем значения теплопроводности, что приводило к снижению температуропроводности зеленого чая.



а,



б,

Рисунок 2.3 – Разработанная система измерения теплопроводности (а),
деталь датчика теплопроводности (б)

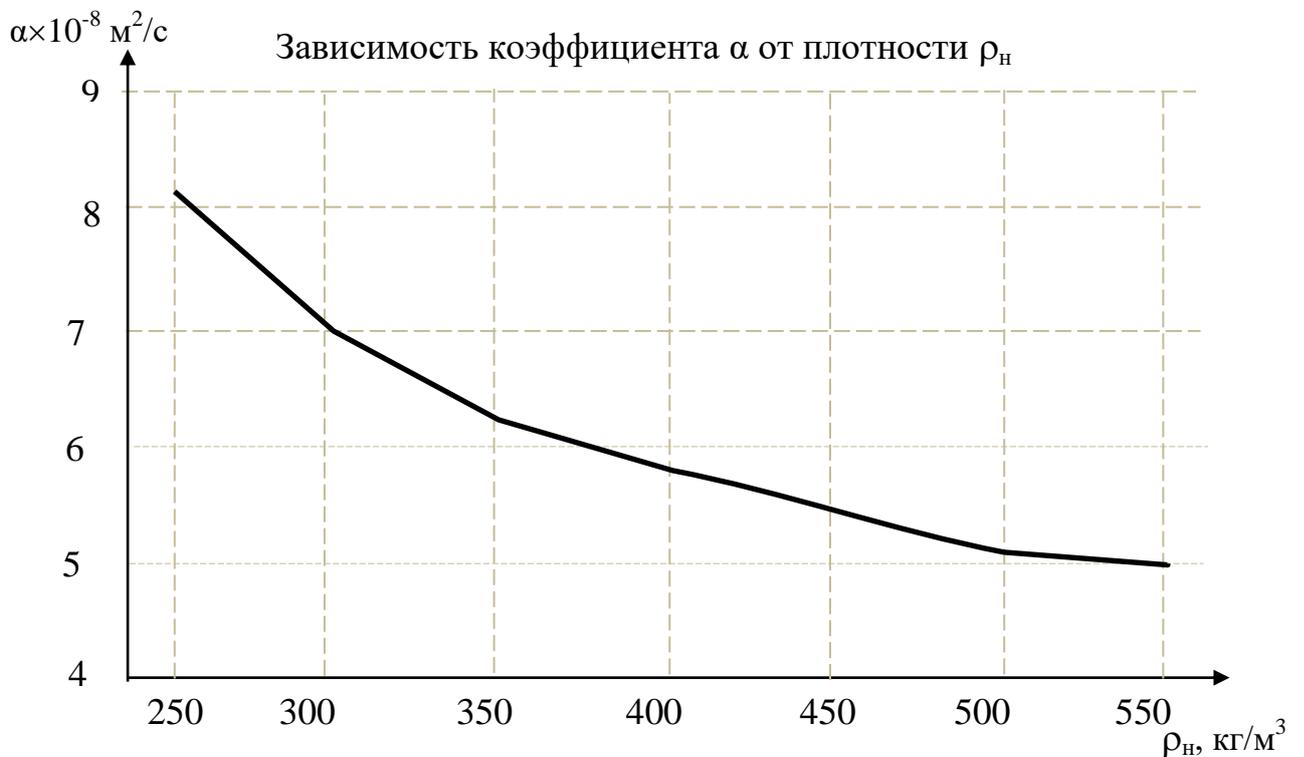


Рисунок 2.4 – Изменение коэффициента теплопроводности зеленого чая
при разной насыпной плотности

Влияние содержания влаги на значение температуропроводности зеленого чая представлено на рисунке 2.5. Из рисунка 2.5 видно, что коэффициент температуропроводности зеленого чая изменяется при различном содержании влаги. Оно увеличилось с $8,281 \times 10^{-8}$ до $12,617 \times 10^{-8}$ м²/с при увеличении значения влажности от 5,3% до 70,0%. Аналогичные закономерности наблюдались для пшеницы, кукурузы, сорго [86] и бобов африканского ямса [87].

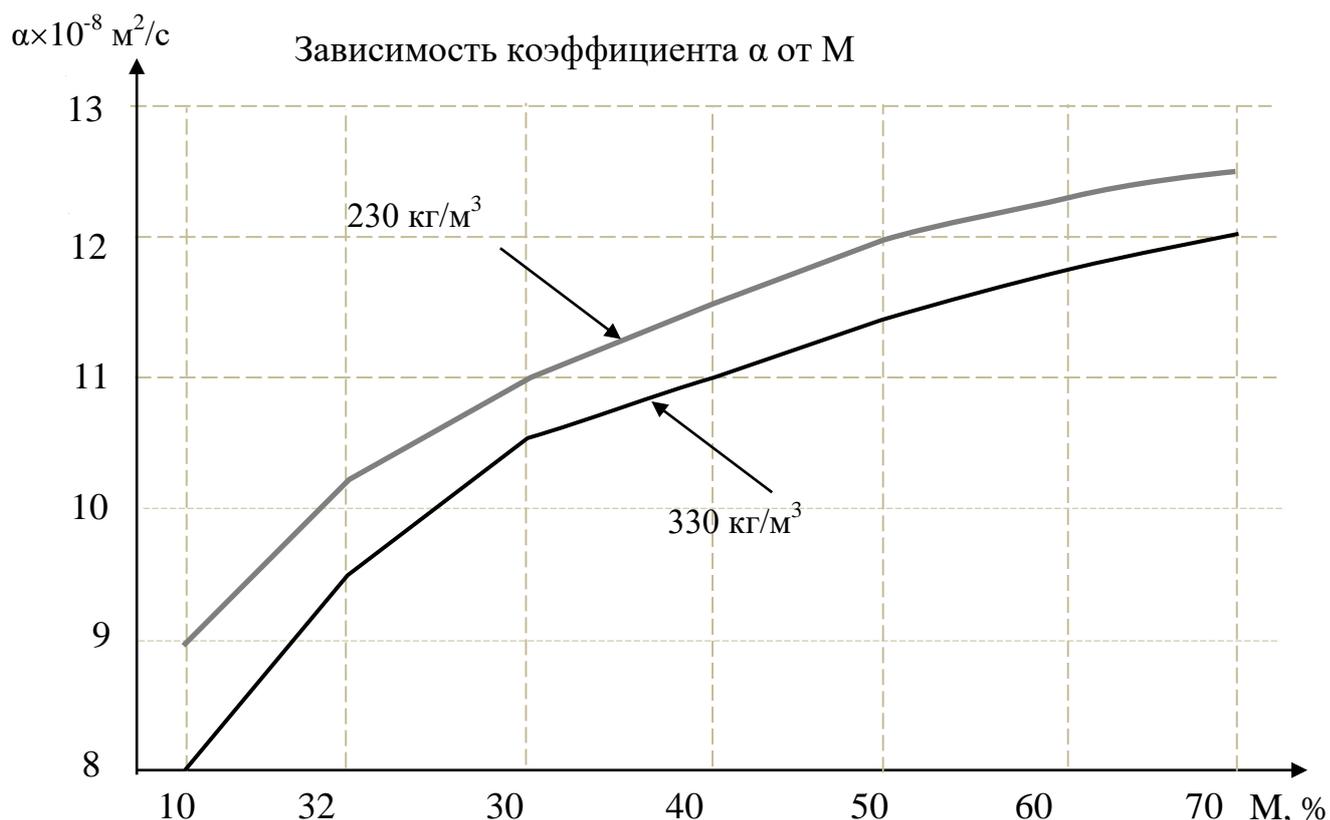


Рисунок 2.5 – Температуропроводность зеленого чая при различном содержании влаги

На температуропроводность зеленого чая существенно влияет содержание влаги и насыпная плотность. Температуропроводность зеленого чая увеличивается с увеличением содержания влаги. Значения температуропроводности зеленого чая уменьшились с $8,126 \times 10^{-8}$ м²/с при 250 кг/м³ до $5,037 \times 10^{-8}$ м²/с при 550 кг/м³. Изменение коэффициента температуропроводности зеленого чая при разной влажности показывает, что он увеличился с $8,281 \times 10^{-8}$ м²/с при 5,3% до $12,617 \times 10^{-8}$ м²/с при 70,0 %. Значения температуропроводности, полученные с высокой насыпной плотностью, были

ниже, чем полученные с низкой насыпной плотностью для зеленого чая.

Для математической аппроксимации полученных результатов экспериментов, представленных в таблице 2.5, применена методика точных узлов, посредством которой найдены функционалы $\alpha = f(M, \rho_H)$:

$$\alpha(M, \rho) = (a_\alpha \rho_H^2 + b_\alpha \rho_H + c_\alpha) M^2 + (d_\alpha \rho_H^2 + e_\alpha \rho_H + f_\alpha) M + (g_\alpha \rho_H^2 + h_\alpha \rho_H + i_\alpha), \quad (2.13)$$

где $a_\alpha, b_\alpha, c_\alpha, d_\alpha, e_\alpha, f_\alpha, g_\alpha, h_\alpha, i_\alpha$ – эмпирические коэффициенты, представленные в таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Температуропроводность зеленого чая α , 10^{-8}

Плотность, ρ_H , (кг·м ⁻³)	Влажность M, %						
	10	20	30	40	50	60	70
230	8,90	9,90	10,75	11,45	12,00	12,40	12,62
330	8,25	9,35	10,35	11,10	11,70	12,15	12,55

Таблица 2.6 – Значения эмпирических коэффициентов функции (2.13)

a_α	-0.000001273
b_α	0.000106308
c_α	0.118634409
d_α	-0.000001148
e_α	0.000141551
f_α	-1.029045369
g_α	0.000078434
h_α	0.000008696
i_α	7.748

2.5 Удельный расход тепловой энергии

Удельная теплота парообразования $r(T, M_e)$ (Дж/кг) – физическая величина, представляющая собой количество теплоты, необходимое для превращения единицы массы жидкости в пар, при данной температуре жидкости и неизменной температуре в процессе испарения.

При удалении связанной воды из продукта удельная теплота парообразования r определяется суммой (2.14) энергии испарения свободной воды $r_{св}$, теплоты смачивания $r_{см}$ и энтропии составляющей свободной энергии $r_{энт}$ [70].

$$r = r_{св} + r_{см} + r_{энт}. \quad (2.14)$$

В трудах [70, 88, 89] значения энергии испарения свободной воды $r_{св}$ (Дж/кг)

вычисляется по следующей формуле (2.15):

$$r_{cb} = 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T. \quad (2.15)$$

Тепловая энергия процесса смачивания r_{cm} (Дж/кг) определяется дифференциалом свободной энергии осушения в изотермических условиях [70].

$$r_{cm} = \left| 55.56 \cdot R \cdot T \cdot \ln(A_w) \right|, \quad (2.16)$$

где A_w – значения активной воды; R – фундаментальная физическая постоянная, численно равная работе, совершаемой одним моле идеального газа в изобарическом процессе при повышении температуры на 1 К, $R = 8,314$ Дж/(моль К).

Энтропия составляющей свободной энергии $r_{энт}$ (Дж/кг) определяется по следующей формуле (2.17) [70]:

$$r_{энт} = \left| 55.56 \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \nabla S}{\partial M_e} \right) \right|, \quad (2.17)$$

где S – связанная энергия; M_e – равновесная влажность.

И так:

$$r = r_{cb} + r_{cm} + r_{энт} = 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T + 55.56 \cdot R \cdot T \cdot \ln(A_w) + 55.56 \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \nabla S}{\partial M_e} \right), \quad (2.18)$$

Для точного определения r (Дж/кг) при различных способах сушки необходимо вычислить активную воду $A_w(T)$ и связанную энергию $T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial M_e} \right)$ в различных температурных условиях.

Эксперименты для определения активной воды $A_w(T)$ зеленого чая

Изотерму адсорбции зеленого чая определяли с помощью тензометрического метода Ван Бамелена. До проведения экспериментов необходимо создать эксикатор с известной влажностью и с различно концентрированным серноокислым раствором [90, 91]. Зеленый чай (по 2,0 г) помещали на проволочную сетку в эксикатор. Первоначально образцы в эксикаторах кондиционировали при различной активности воды, хранили при 27 °С и непрерывно взвешивали до тех пор, пока не был достигнут постоянный вес.

Процесс также повторяли при 35 °С и 40 °С, и регистрировали средние значения. Равновесное содержание влаги было получено путем оценки начального содержания влаги и известного изменения веса в пересчете на сухое вещество. Формула определения равновесной влажности выражается как (2.19) [70]:

$$M_e = \frac{G_2 - G_1(1 - M_0)}{G_2}, \quad (2.19)$$

где M_0 – начальная влажность проб, %; G_1 – начальная масса проб, кг; G_2 – масса проб в состоянии термодинамического равновесия, кг.

Среднее равновесное содержание влаги, полученное при разных значениях активности воды и температуры (27 °С, 35 °С и 40 °С) (таблица 2.7), было использовано для построения экспериментальных изотерм адсорбции зеленого чая (рисунок 2.6).

При постоянной температуре равновесное содержание влаги (M_e) зеленого чая увеличивается при увеличении значения активной воды (A_w). Кроме того, M_e увеличивается при понижении температуры и постоянном значении A_w . Изотермы адсорбции зеленого чая свидетельствуют о незначительном уменьшении величины активности воды при повышении температуры и постоянном значении M_e . Эта характеристика изотермы адсорбции представляет собой типичную сигмоидальную кривую третьего типа по классификации Брунауэра. Этот тип изотермы адсорбции часто наблюдается в случае водорастворимых компонентов, присутствующих в пищевых продуктах.

Из полученных данных экспериментов определения активной воды A_w зеленого чая можно построить функцию зависимости значения активной воды (A_w) от температуры T (К) и равновесной влажности M_e (%) с приближенной доверительной аппроксимацией $R_2 \geq 0,99$ следующим образом:

$$A_w(M_e, T) = (a_\alpha T^2 + b_\alpha T + c_\alpha)M_e^2 + (d_\alpha T^2 + e_\alpha T + f_\alpha)M_e + (g_\alpha T^2 + h_\alpha T + i_\alpha), \quad (2.20)$$

где a_α , b_α , c_α , d_α , e_α , f_α , g_α , h_α , i_α – эмпирические коэффициенты, представленные в таблице 2.8.

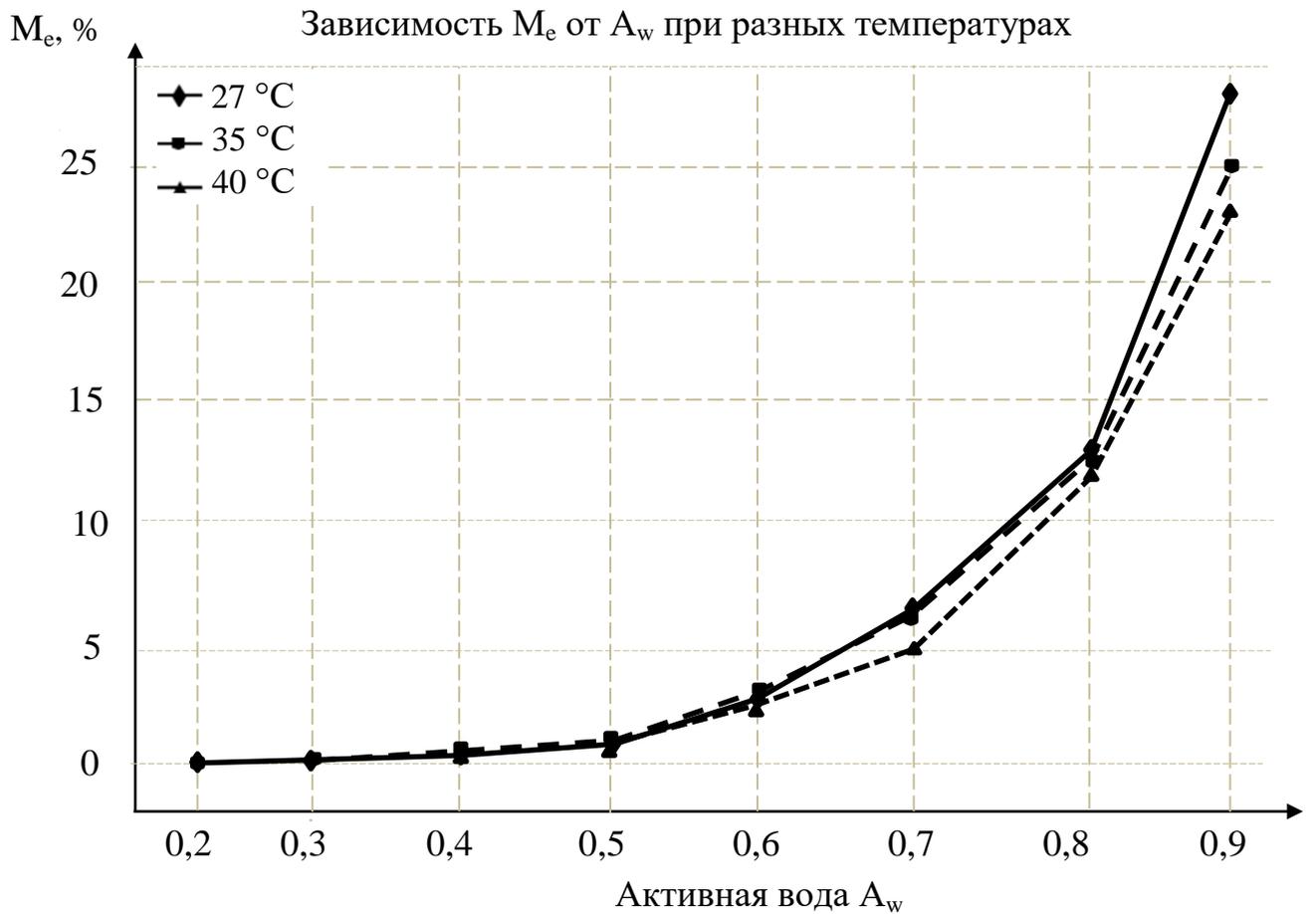


Рисунок 2.6 – Экспериментальные изотермы влагопоглощения зеленого чая при 27 °C, 35 °C и 40 °C

Таблица 2.7 – Влажность зеленого чая при разных температурах

T , °C	Значения активной воды A_w							
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
27	0	0,20	0,51	1,21	4,90	7,22	13,10	26,91
35	0	0,19	0,48	1,10	3,05	6,10	13,02	24,32
40	0	0,19	0,49	1,08	2,19	5,11	12,75	19,1

Таблица 2.8 – Значения эмпирических коэффициентов функции (2.20)

a_a	$-1,261 \cdot 10^{-5}$
b_a	0,007
c_a	-1,145
d_a	$1,511 \cdot 10^{-4}$
e_a	-0,090
f_a	13,561
g_a	$-3,491256 \cdot 10^{-5}$
h_a	0.021
i_a	-2.877

Для решения задачи, которая определит термодинамические закономерности теплопереноса энергии и массы высушенного материала в процессе удаления влаги, следует использовать потенциал влагопереноса (масса) θ . Данный подход основан на классических термодинамических принципах в работе [92, 93].

В гигроскопической среде потенциал массопереноса влажного материала θ приблизительно равняется значению химического потенциала μ , который определяется следующим выражением (2.20) [70]:

$$|\theta| = |\mu| = RT \ln(A_w). \quad (2.21)$$

В трудах [89, 90] показано, что в гигроскопической среде разность $\Delta\mu$ между значениями начальной величины химического потенциала μ_0 (свободной воды) и связанной воды приблизительно равняется энергии Гельмгольца E_c [70]:

$$|\Delta\mu| = E_c = -\frac{\partial\Delta F}{\partial M_e} = -RT \ln(A_w). \quad (2.22)$$

На основании эксперимента по удалению влаги из листьев зеленого чая была установлена зависимость активной воды от температуры и влажности листьев чая (2.20). Можно подставить данное выражение в дифференцированное уравнение Гельмгольца:

$$E_c = -RT \ln((a_\alpha T^2 + b_\alpha T + c_\alpha)M_e^2 + (d_\alpha T^2 + e_\alpha T + f_\alpha)M_e + (g_\alpha T^2 + h_\alpha T + i_\alpha)). \quad (2.23)$$

Здесь имеем, что значение ΔF определяется разностью между изменениями внутренней ΔE и связанной $T \cdot \Delta S$ энергиями [70]:

$$\Delta F = \Delta E - T\Delta S, \quad (2.24)$$

где ΔS – изменение энтропии.

Тогда производное выражение Гельмгольца по влажности M_e имеет следующий вид [70]:

$$\frac{\partial\Delta F}{\partial M_e} = \frac{\partial\Delta E}{\partial M_e} - T \frac{\partial\Delta S}{\partial M_e}. \quad (2.25)$$

Взяв производную от выражения (2.25) по температуре T получим:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial M_e} \right) = - \frac{\partial \Delta S}{\partial M_e}. \quad (2.26)$$

Поставив (2.22) в (2.26), получим:

$$\frac{\partial \Delta S}{\partial M_e} = - \frac{\partial (RT \ln(A_w))}{\partial T}, \quad (2.27)$$

$$T \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial M_e} \right) = -RT \left(\ln(A_w) + T \frac{(2a_\alpha T + b_\alpha)M_e^2 + (2d_\alpha T + e_\alpha)M_e + (g_\alpha T + h_\alpha)}{A_w} \right), \quad (2.28)$$

где $A_w(M_e, T) = (a_\alpha T^2 + b_\alpha T + c_\alpha)M_e^2 + (d_\alpha T^2 + e_\alpha T + f_\alpha)M_e + (g_\alpha T^2 + h_\alpha T + i_\alpha)$.

Из (2.25), (2.27) и (2.28) получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta E}{\partial M_e} &= \frac{\partial \Delta F}{\partial M_e} + T \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial M_e} \right) = RT \ln(A_w) - \\ &RT \left(\ln(A_w) + T \frac{(2a_\alpha T + b_\alpha)M_e^2 + (2d_\alpha T + e_\alpha)M_e + (g_\alpha T + h_\alpha)}{A_w} \right). \end{aligned} \quad (2.29)$$

Итак, подставив (2.20) и (2.29) в (2.18), получим зависимость значения удельной теплоты парообразования r от температуры и равновесной влажности:

$$r = r_{\text{св}} + r_{\text{см}} + r_{\text{энт}} = 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T + 55,56 \cdot R \cdot T \cdot \ln(A_w) + 55,56 \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \nabla S}{\partial M_e} \right),$$

где

$$\begin{aligned} \frac{\partial \nabla S}{\partial M_e} &= (a_\alpha \rho_H^2 + b_\alpha \rho_H + c_\alpha)M_e^2 + (d_\alpha \rho_H^2 + e_\alpha \rho_H + f_\alpha)M_e + (g_\alpha \rho_H^2 + h_\alpha \rho_H + i_\alpha) + \\ &+ T \frac{(2a_\alpha T + b_\alpha)M_e^2 + (2d_\alpha T + e_\alpha)M_e + (g_\alpha T + h_\alpha)}{(a_\alpha \rho_H^2 + b_\alpha \rho_H + c_\alpha)M_e^2 + (d_\alpha \rho_H^2 + e_\alpha \rho_H + f_\alpha)M_e + (g_\alpha \rho_H^2 + h_\alpha \rho_H + i_\alpha)}. \end{aligned}$$

Значения связанной энергии и удельной теплоты парообразования от температуры и равновесной влажности представлены в таблице 2.9 и в таблице 2.10 соответственно.

Таблица 2.9 – Значения связанной энергии при разных температурах

T = 300 К		T = 308 К		T = 313 К	
M _e	T · ∂(S) · 10 ³	M _e	T · ∂(S) · 10 ³	M _e	T · ∂(S) · 10 ³
%	Дж/мол	%	Дж/мол	%	Дж/мол
0,2	2,82	0,19	4,35	0,19	5,38

Продолжение таблицы 2.9

0,51	2,66	0,48	3,28	0,49	4,04
1,21	2,34	1,1	2,49	1,08	3,09
4,9	1,21	3,05	1,84	2,19	2,34
7,22	0,78	6,1	0,13	5,11	1,65
13,1	0,15	13,02	0,70	12,7	0,88
26,91	0,11	24,32	0,12	19,1	0,30

Таблица 2.10 – Значения удельной теплоты парообразования r при разных температурах и равновесных влажностях

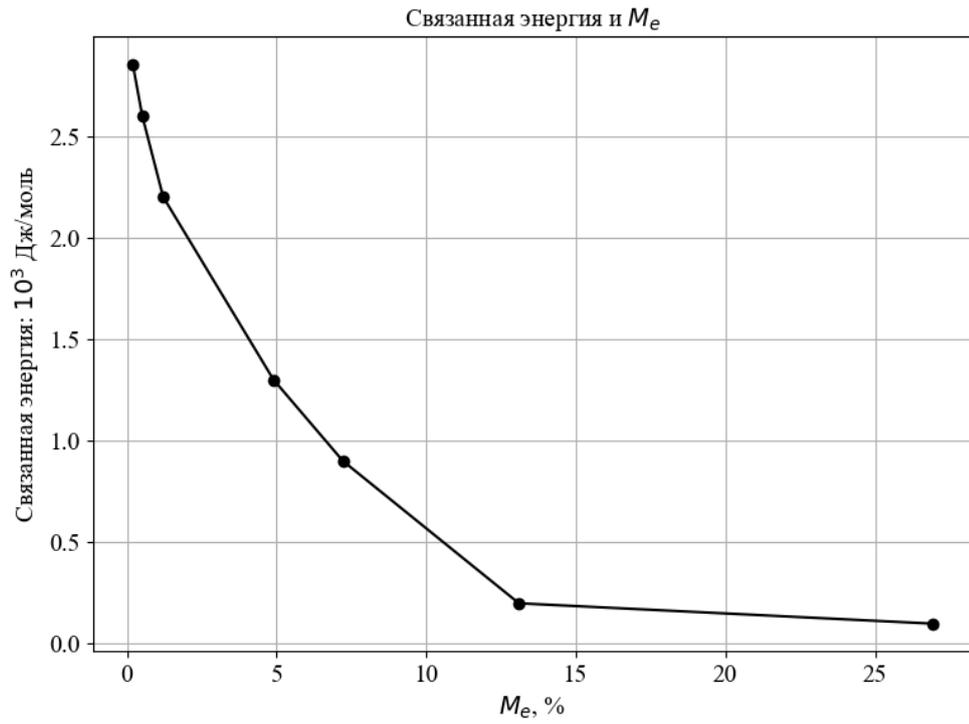
T = 300 К		T = 308 К		T = 313 К	
M_e %	$r(M_e) \cdot 10^6$ Дж/мол	M_e %	$r(M_e) \cdot 10^6$ Дж/мол	M_e %	$r(M_e) \cdot 10^6$ Дж/мол
0,2	2,75	0,19	2,83	0,19	2,88
0,51	2,71	0,48	2,73	0,49	2,76
1,21	2,66	1,1	2,65	1,08	2,67
4,9	2,57	3,05	2,59	2,19	2,61
7,22	2,53	6,1	2,54	5,11	2,55
13,1	2,47	13,02	2,48	12,7	2,48
26,91	2,45	24,32	2,44	19,1	2,43

Графики зависимости свободной энергии и удельной теплоты парообразования от равновесной влажности при $T = 300$ К, $T = 308$ К и $T = 312$ К представлены на рисунке 2.7 (а, б, в) и на рисунке 2.8 (а, б, в) соответственно.

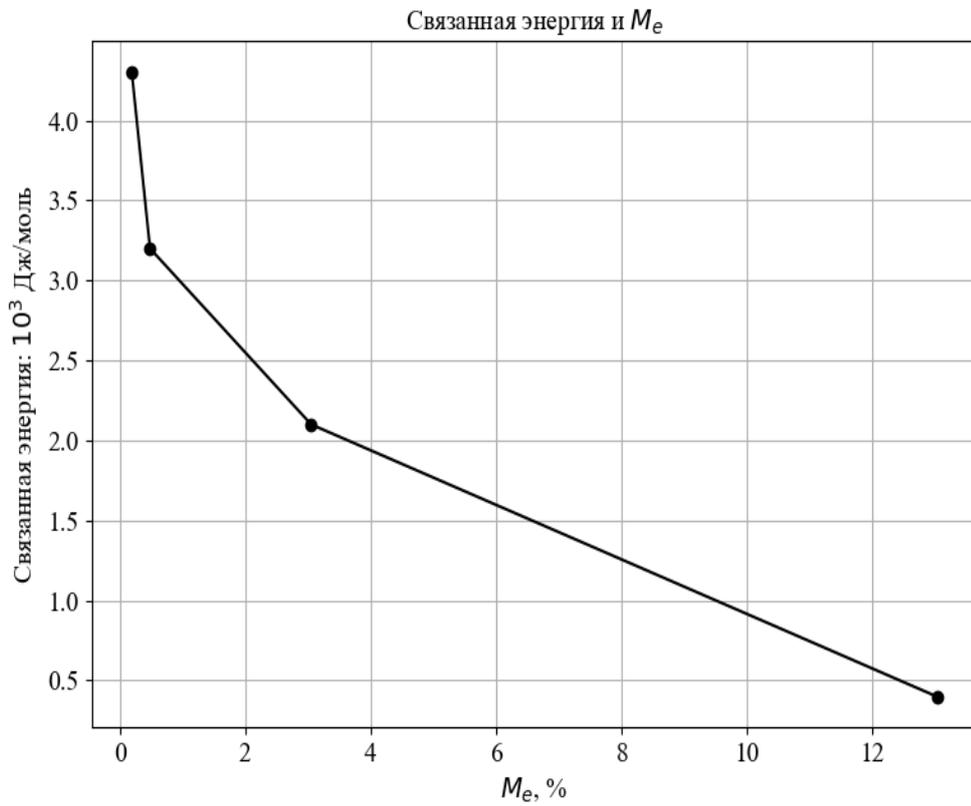
Изучив на графике зависимость удельной теплоты парообразования r от равновесной влажности при различных температурных условиях, можно увидеть, что это функция первого порядка по равновесной влажности. Поэтому для удобства использования в математической модели процесса сушки ее можно записать в следующем виде:

$$r(M_e, T) = (A \cdot T^2 + B \cdot T + C)M_e + (D \cdot T^2 + E \cdot T + F), \quad (2.30)$$

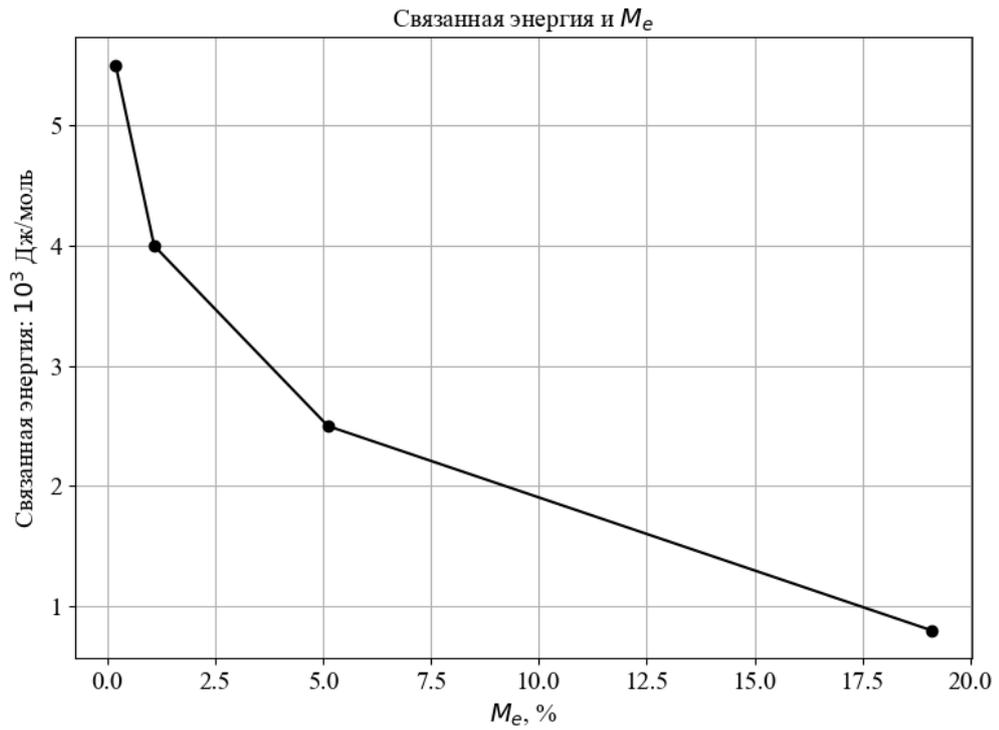
где A, B, C, D, E, F – эмпирические коэффициенты, представленные в таблице 2.11.



а,

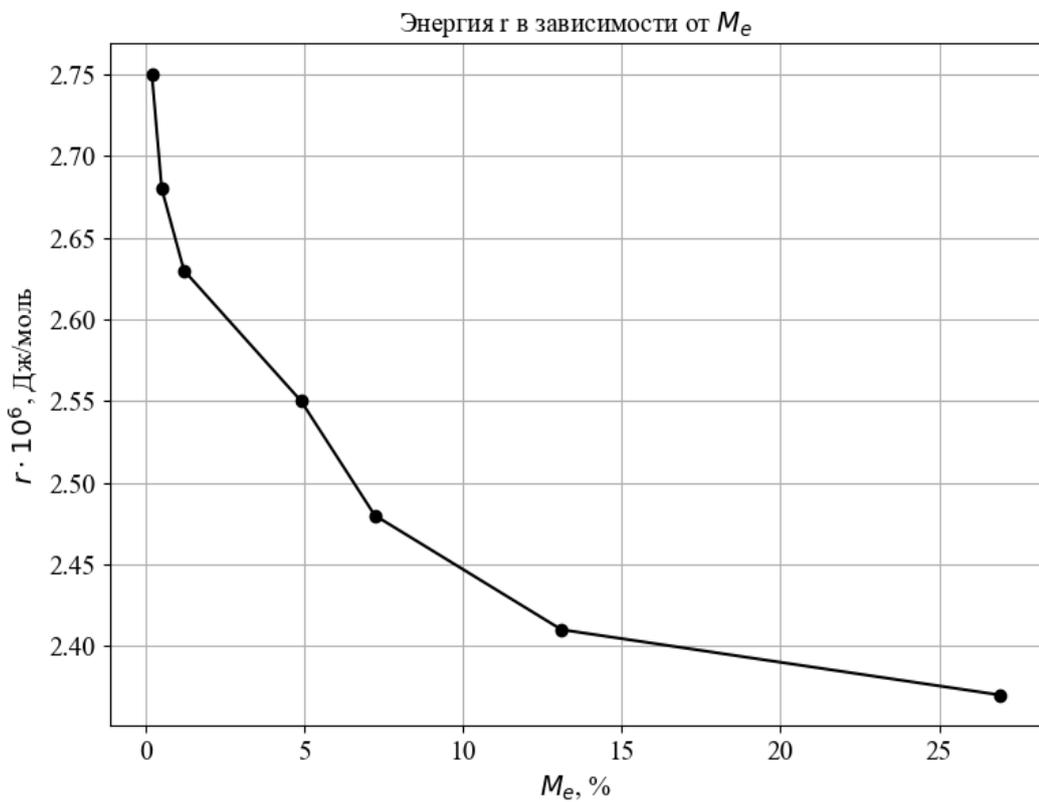


б,

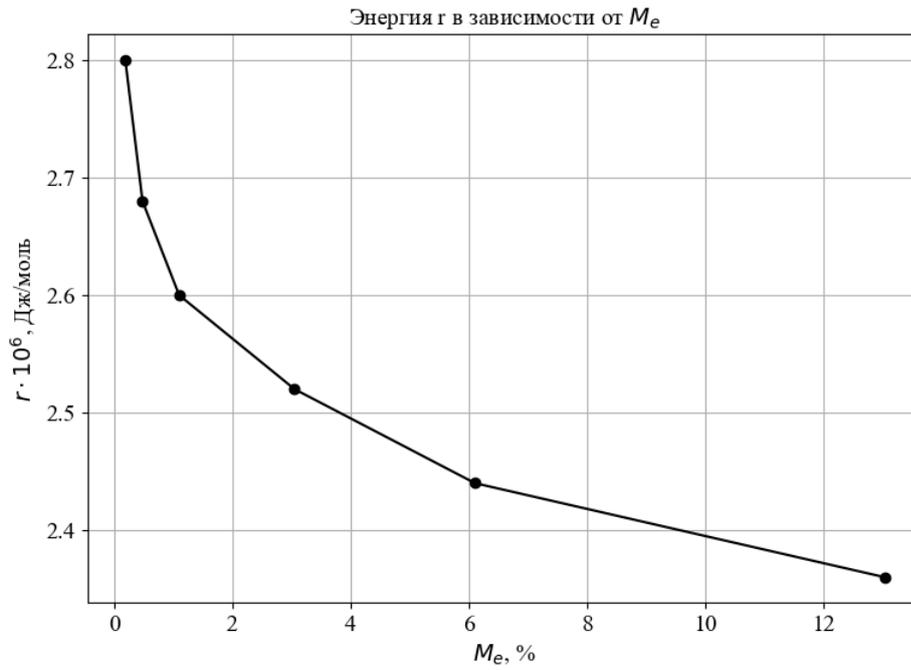


в,

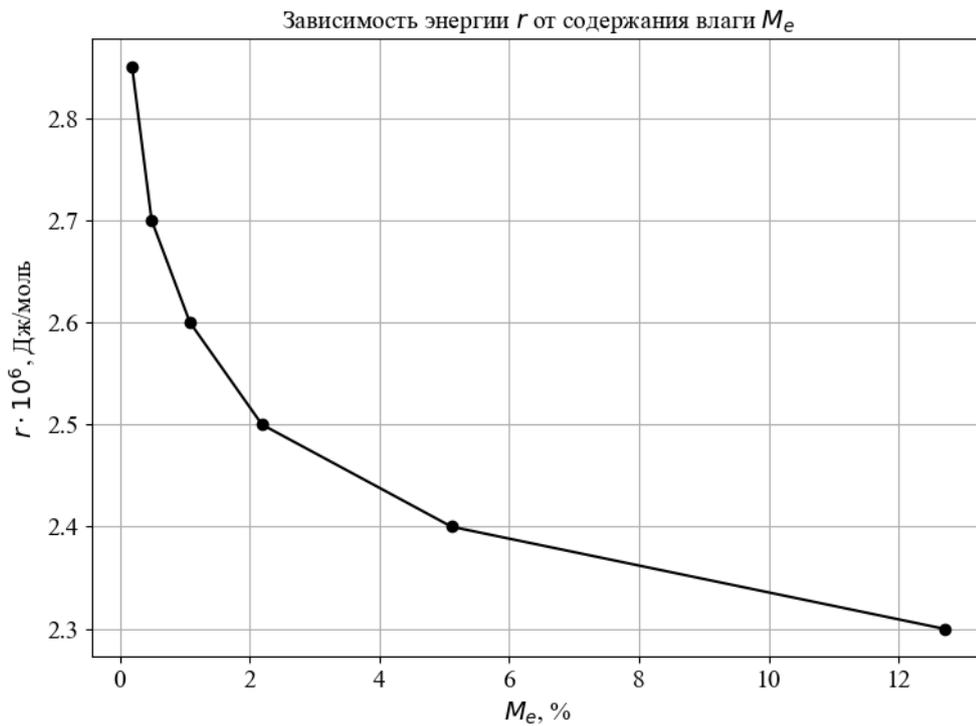
Рисунок 2.7 – Графики зависимости свободной энергии от равновесной влажности M_e при $T = 300$ К (а), $T = 308$ К (б) и $T = 312$ К (в)



а,



б,



в,

Рисунок 2.8 – Графики зависимости удельной теплоты парообразования от равновесной влажности M_e при $T = 300 \text{ К}$ (а), $T = 308 \text{ К}$ (б) и $T = 312 \text{ К}$ (в)

Выражение (2.30) для расчета значения удельной теплоты парообразования $\gamma(T, M_e)$ позволяет решить задачу определения тепло- и массообменных

процессов для сушки зеленого чая.

Таблица 2.11 – Значения эмпирических коэффициентов функции (2.30)

A	-70.04290548907
B	41969.74841626914
C	-1.1454106834
D	14.38812785146
E	1355.08282380568
F	1050789.9959083258

2.6 Анализ равновесной влажности зеленого чая

Равновесная влажность зеленого чая – состояние, при котором процесс усушки или насыщения влагой прекратился, и процент влажности стал постоянным. Значение равновесной влажности во время сушки изменится и зависит от относительной влажности и температуры слоя зеленого чая при сушке [20].

Для определения значения равновесной влажности зеленого чая (M_e) в процессе сушки были проведены эксперименты по изучению влияния основных рабочих параметров на эту величину. Проведены экспериментальные исследования по значению M_e листьев зеленого чая в процессе десорбции при различной относительной влажности и температуре окружающей среды [20].

Чай с содержанием влаги примерно 60 ± 5 % собирали с выращенных чайных кустов. Хотя листья чая доступны в любое время года, листья, использованные в этом исследовании, собирали с сентября по декабрь. В опытах использовали отборные листья не толще 0,5 мм. Обесцвеченные, надкушенные, раздавленные, загрязненные или высушенные образцы отбраковывались. Длина листьев была уменьшена наполовину, чтобы обеспечить хорошее расположение частиц в десорбционных камерах.

Образцы этих отобранных половинок листьев расположены в пяти небольших стеклянных десорбционных камерах с внутренним диаметром примерно 50 мм. Каждая из этих десорбционных камер содержит разные насыщенные солевые растворы хлорида лития, хлорида магния, карбоната калия, нитрата магния и хлорида натрия. В связи с этим были проведены эксперименты определения

равновесной влажности при изменении относительной влажности от 11 до 75%, как показано в таблице 2.12. В десорбционных камерах был установлен поднос, чтобы избежать любого контакта между солевыми растворами и половинками листьев чая.

Все эти камеры нагревали до контролируемых температур 30 °С, 40 °С и 50 °С. Эти значения представляют собой промежуточные условия между температурами хранения и сушки.

Разница между исходной и конечной массой частиц соответствует остаточному содержанию воды в листьях чая, подвергнутых процессу десорбции насыщенными растворами солей. Содержание влаги получают путем деления остаточного содержания воды на исходную общую массу частиц в печи. Вся экспериментальная процедура повторялась дважды в идентичных рабочих условиях для проверки ее достоверности [20].

Формула определения равновесной влажности выражается как (2.31) [70]:

$$M_e = \frac{G_2 - G_1(1 - M_0)}{G_2}, \quad (2.31)$$

где G_1 – вес чая (при достижении равновесия), кг; G_2 – абсолютный сухой вес слоя чая, кг.

Была проведена серия из 15 экспериментов по изучению влияния основных рабочих параметров на равновесную влажность чайного листа. В таблице 2.12 приведены экспериментальные данные равновесной влажности, полученные путем варьирования значений относительной влажности и температуры окружающей среды на пяти и трех уровнях соответственно. Поскольку всегда учитывались только две повторности, было получено среднее арифметическое экспериментального стандартного отклонения ($s = 0,13\%$) [20].

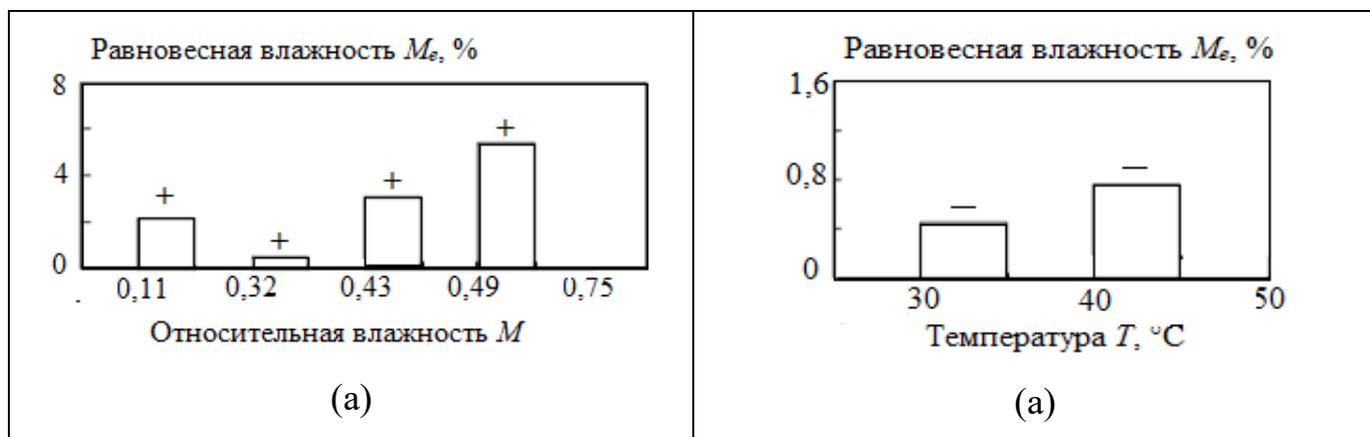
Таблица 2.12 – Данные экспериментов определения равновесной влажности зеленого чая

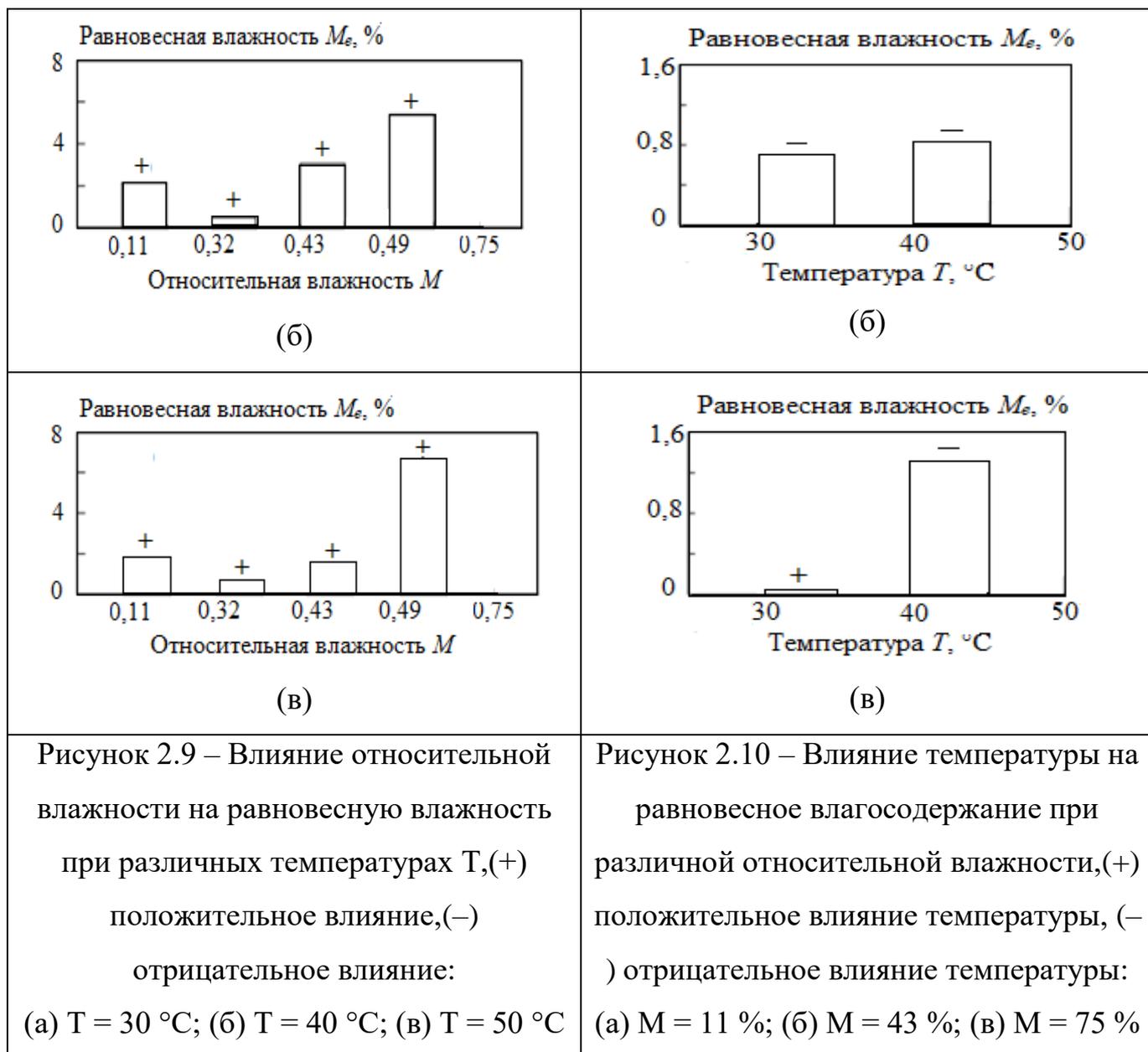
Относительная влажность (%)	Температура (°С)	Равновесная влажность (%)	Среднеквадратическое отклонение (СКО) (%)
11	30	4.03	0.02

Продолжение таблицы 2.12

32	30	7.75	0.05
43	30	6.9	0.0
51	30	8.65	0.15
75	30	14.65	0.25
11	40	3.58	0.015
32	40	5.72	0.08
43	40	6.19	0.04
51	40	9.28	0.22
75	40	14.68	0.03
11	50	2.82	0.16
32	50	4.71	0.30
43	50	5.35	0.20
51	50	6.86	0.30
75	50	13.40	0.28

Результаты, представленные на рисунках 2.9 и 2.10, показывают влияние температуры и относительной влажности на равновесную влажность. Из сравнения этих цифр видно, что относительная влажность окружающей среды оказывает большее влияние на равновесную влажность, чем температура. На рисунках 2.9 и 2.10 показано, что на равновесную влажность оказывает положительное влияние относительная влажность, т.е. чем больше M , тем больше M_e , и отрицательное влияние – температура, т.е. тем больше T , тем меньше M_e . Значит, при приращении относительной влажности увеличивается равновесная влажность, а в случае повышения температуры она снижается [20].





На рисунке 2.11(а) представлены графики изотерм равновесной влажности при различных температурах окружающей среды 30 °C, 40 °C и 50 °C. Экспериментальные результаты подтверждают положительное и значимое влияние относительной влажности на значения равновесной влажности. Однако из этих результатов следует, что разница между значениями равновесной влажности на рисунке 2.11(а) незначительна при разных температурах. По этой причине влияние температуры на M_e требует более детального анализа путем увеличения температурного диапазона исследования. Влияние температуры на результаты равновесной влажности заметно при увеличении разницы температуры исследования более чем на 40 °C. На рисунке 2.11(б) показаны

расчетные профили влагосодержания в диапазоне относительной влажности от нуля до 80% при 10 °С, 50 °С и 90 °С [20].

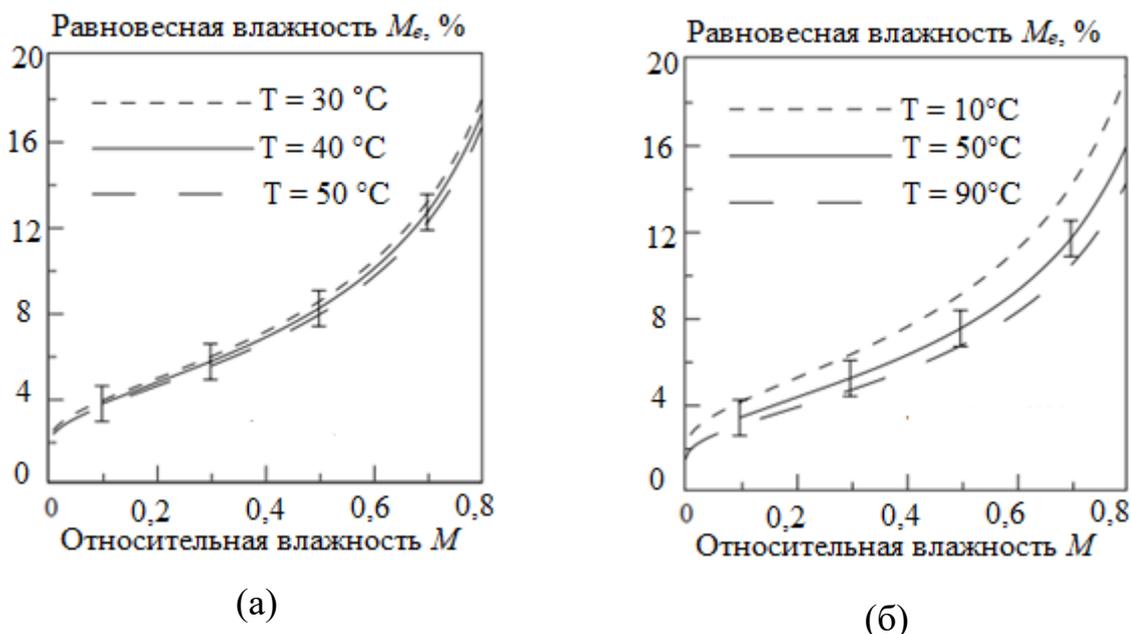


Рисунок 2.11 – Графики равновесной влажности при различных температурах

Для аппроксимации зависимости равновесной влажности листьев зеленого чая от относительной влажности и температуры окружающей среды в данной работе использовали нечеткую логику. Рассмотрим нечеткие функции принадлежности и базу правил нечеткой продукции.

Входными переменными является относительная влажность M и температура T окружающей среды (рисунок 2.12).

Относительная влажность слоя чая по экспериментальным исследованиям принимает значения от 0 до 80 %, а температура – от 10 °С до 90 °С. Выходной величиной являются равновесная влажность M_e , которая по данным экспериментов принимает значения от 3,58 до 18,6 %.

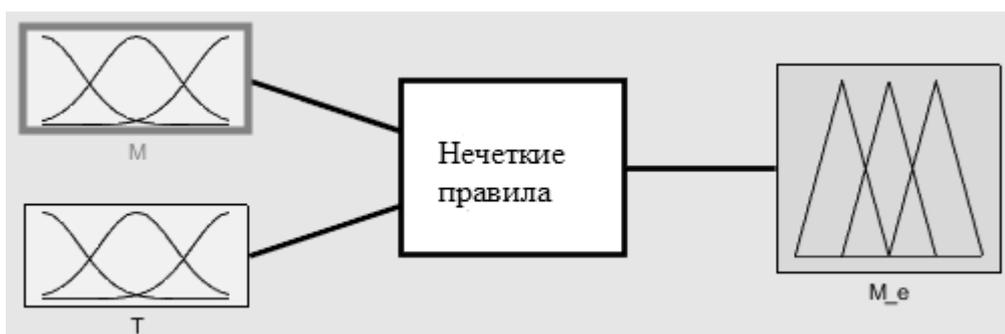


Рисунок 2.12 – Вход и выход переменных блока нечеткой логики

На универсуме нечетких множеств в данном случае будет целесообразно принять пять значений входных и выходных лингвистических переменных. Термножество значений лингвистических переменных изображается треугольными фигурами, а на границах области определения – сигмоидальными нечеткими интервалами. Для терм-наборов «Min» и «Max» переменных приняты трапециевидные формы по причине увеличенного диапазона значений в этой области. Графически лингвистические переменные показаны на рисунке 2.13.

Для обозначений термов всех переменных используются следующие слова и их соглашения: «Минимальная» – Min; «Малая» – M; «Средняя» – Sp; «Большая» – B; «Максимальная» – Max. То есть, лингвистические переменные имеют следующие значения: «Температура T» {Min, M, Sp, B, Max}; «Относительная влажность M» {Min, M, Sp, B, Max}; «Равновесная влажность M_e » {Min, M, Sp, B, Max}.

Для нечёткого вывода функции принадлежности воспользуемся одним из самых распространённых методов — методом Мамдани [103, 104]. В этом случае влияние комбинаций входных воздействий на выходной параметр записывается в следующем виде:

Если T = «Мин» и M = «Мин», то M_e = «Мин».

С учетом специфики явления формализована база правил нечеткого вывода функции, которая полностью приведена в таблице 2.13. Для формирования дефазифицированного значения выходной переменной используется метод центра среднего. Четкое значение равновесной влажности рассчитывается по формуле (2.32).

$$\bar{M}_e = \frac{\sum_{k=1}^N \mu_k \cdot M_e^k}{\sum_{k=1}^N \mu_k}. \quad (2.32)$$

Аппроксимация зависимости равновесной влажности листьев зеленого чая от относительной влажности и температуры слоя чая реализована в компьютерной программе Fuzzy Logic Toolbox приложения Matlab [105]. Процедура вывода показана на рисунке 2.14.

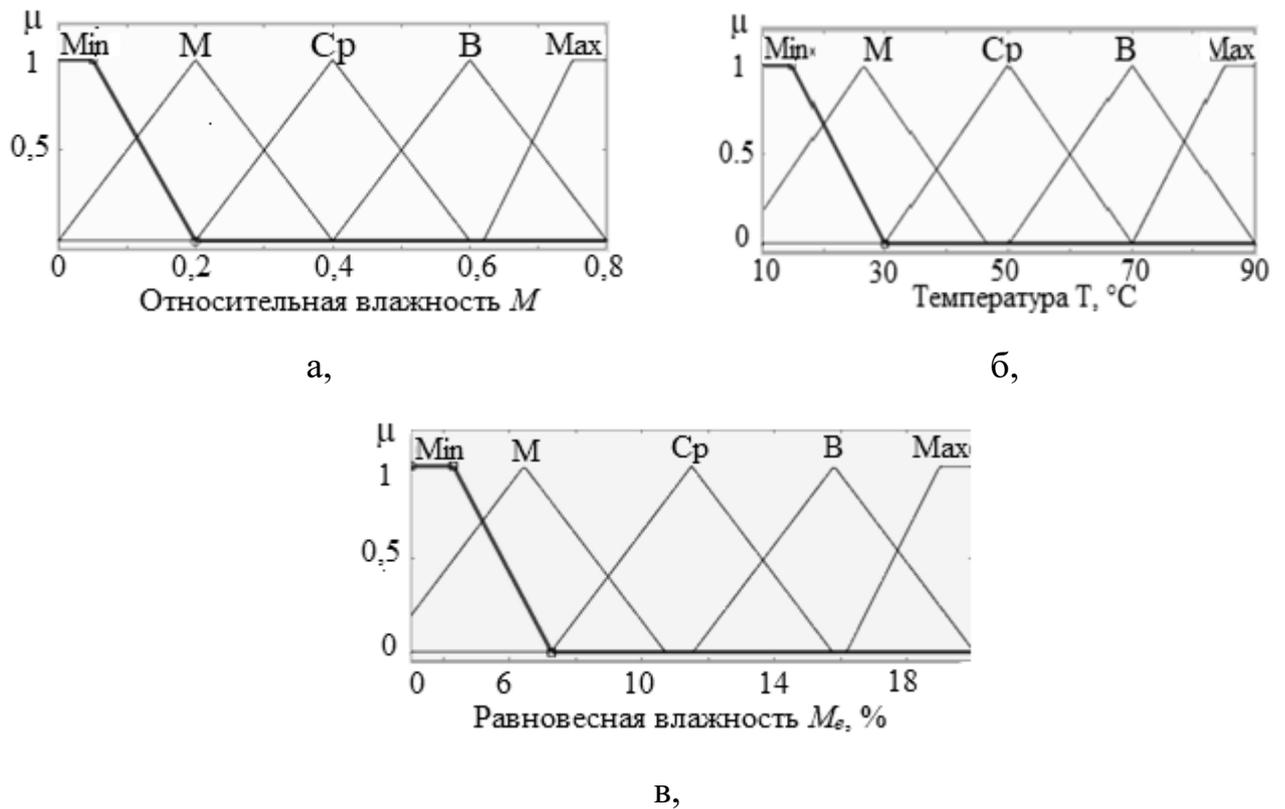


Рисунок 2.13 – Функции принадлежности переменных нечеткой логики: относительной влажности (а); температуры (б); равновесной влажности (в)

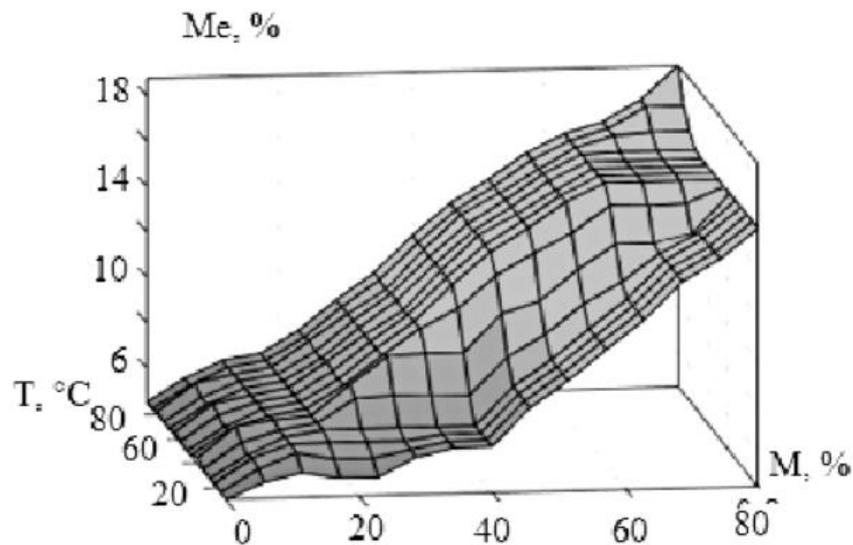


Рисунок 2.14 – Нечеткий вывод функций $M_e = f(T, M)$ в среде Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB

Таблица 2.13 – База правил нечеткого вывода функции для равновесной влажности чая

Температура	Относительной влажности				
	Min	M	Cp	B	Max
Min	Min	Min	M	B	B

Продолжение таблицы 2.13

M	Min	M	M	B	B
Cp	Min	M	Cp	B	B
B	Min	M	Cp	B	B
Max	Min	M	Cp	B	Max

2.7 Выводы главы

Во второй главе проведены исследования теплофизических свойств зеленого чая. Результаты показали, что теплофизические свойства зеленого чая не являются постоянными величинами, а изменяются в зависимости от температуры, содержания влаги и состава чая. При исследовании этих отдельных характеристик можно сделать следующие выводы:

- плотность ρ и теплоемкость C зеленого чая значительно зависит от его влажности M , при увеличении M значение ρ снижается, а C повышается;
- коэффициент массообмена K зеленого чая прямо пропорционален поверхностному воздушному потоку и температуре воздуха;
- на температуропроводность зеленого чая существенно влияет содержание влаги и плотность. Экспериментальные результаты подтверждают положительное и значимое влияние относительной влажности на температуропроводность, и отрицательное – на насыпную плотность.

Также проведен анализ равновесной влажности листьев зеленого чая и построена аппроксимация зависимости равновесной влажности листьев зеленого чая от относительной влажности и температуры слоя чая реализована в компьютерной программе Fuzzy Logic Toolbox приложения Matlab.

Кроме того, во второй главе были построены математические зависимости этих теплофизических свойств зеленого чая от температуры, влажности и других характеристик для удобного проектирования и моделирования производственных процессов в инженерной практике.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕЛЕНОГО ЧАЯ

3.1 Обоснование методов моделирования процесса сушки зелёного чая

В системном анализе эти задачи решаются с помощью моделирования, позволяющего не только продемонстрировать параметры оптимального режима процесса, но и выбрать наиболее подходящий способ управления процессом сушки в производственных условиях.

Моделирование – это метод изучения динамических систем и процессов, происходящих в них [94, 95]. Для выполнения процесса моделирования системы необходимо анализировать информацию, описывающую воздействия, получаемые системой и ее отдельными компонентами, а также изменения свойств системы при этих воздействиях [96].

Для моделирования сушильного оборудования могут использоваться физические, информационные и математические модели [97, 98].

Физическое моделирование сушильного оборудования стало применяться гораздо раньше, чем математическое моделирование. Данный метод моделирования характеризуется законами сохранения физической природы изучаемого процесса. При построении физической модели процесса система может быть представлена в виде опытной установки, что позволяет получить идентичную копию реальной динамической системы и воспроизвести процессы, происходящие при сушке. Сушка, представляющая собой сложный физико-химический систематический процесс, может быть представлена в виде следующей функционально-физической модели (рисунок 3.1) [97].

Для разработки физической модели сушки зеленого чая в конвейерной сушилке предполагали:

– внутренние характеристики сушильной камеры: длина (L , м), ширина (D , м), высота (H , м) и скорость движения ленты (v_c , м/с);

– в камере находится слой зеленого чая с начальной влажностью (M_0 , %) и начальной температурой (T_0 , °С);

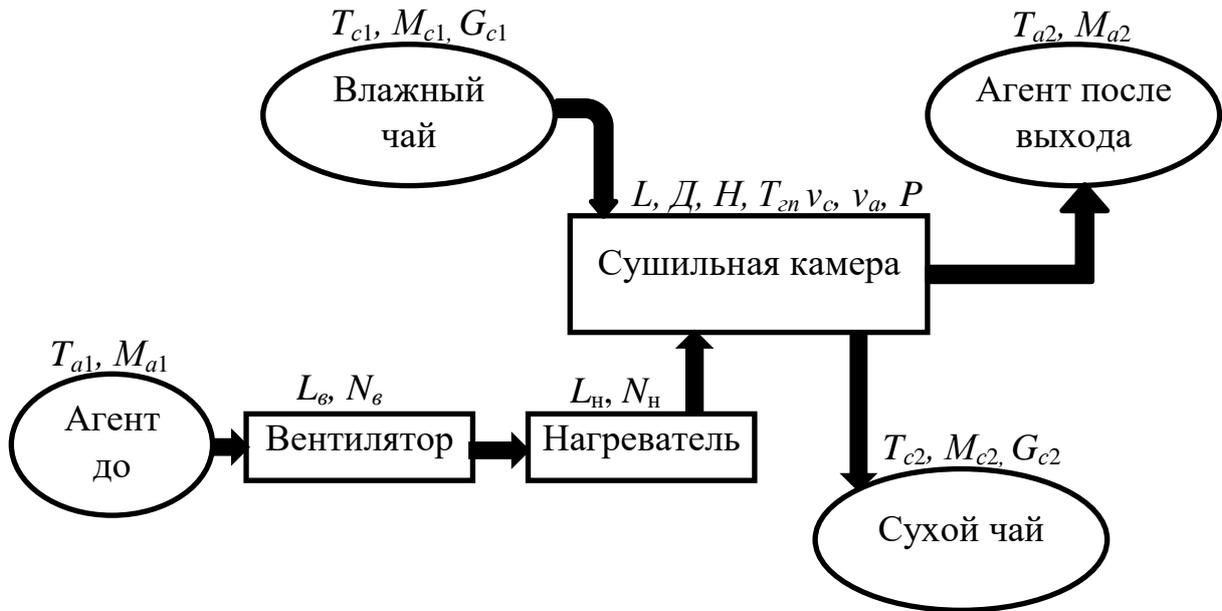


Рисунок 3.1 – Функциональная физическая модель процесса сушки

T_{a1} , T_{a2} – температура сушильного агента до входа и после выхода, °С; M_{a1} , M_{a2} – влажность сушильного агента до входа и после выхода, %; T_{c1} , T_{c2} – температура влажного и сухого продукта, °С; M_{c1} , M_{c2} – влажность влажного и сухого продукта, %; G_{c1} , G_{c2} – масса влажного и сухого продукта, кг; v_c – скорость движения продукта в сушилке, м/с; v_a – скорость сушильного агента, м/с; N_n – мощность нагревателя, кВт; N_b – мощность вентилятора, кВт; L_b – производительность (подача) вентилятора, м³/ч;

– влажность и температура воздуха перед калорифером (M_{a0} , %; T_{a0} , °С), он нагревается в калорифере до температуры (T_{a1} , °С) и подается в камеру со скоростью (v_a , м/с);

– масса влажного зеленого чая в камере (G_c , кг) и его характеристики: плотность (ρ , кг/м³) и удельная теплоемкость (C , Дж/(кг·К));

– масса влажного воздуха в камере (G_a , кг) и его характеристики: плотность (ρ_a , кг/м³) и удельная теплоемкость (C_a , Дж/(кг·К));

– физические характеристики нагревателя: мощность нагревателя (N_n , кВт);

– физические характеристики вентилятора: мощность вентилятора (N_b , кВт) и производительность (подача) вентилятора (L_b , м³/ч).

Рассмотрим информационную модель, построенную в стиле «черный ящик», показанную на рисунке 3.2.

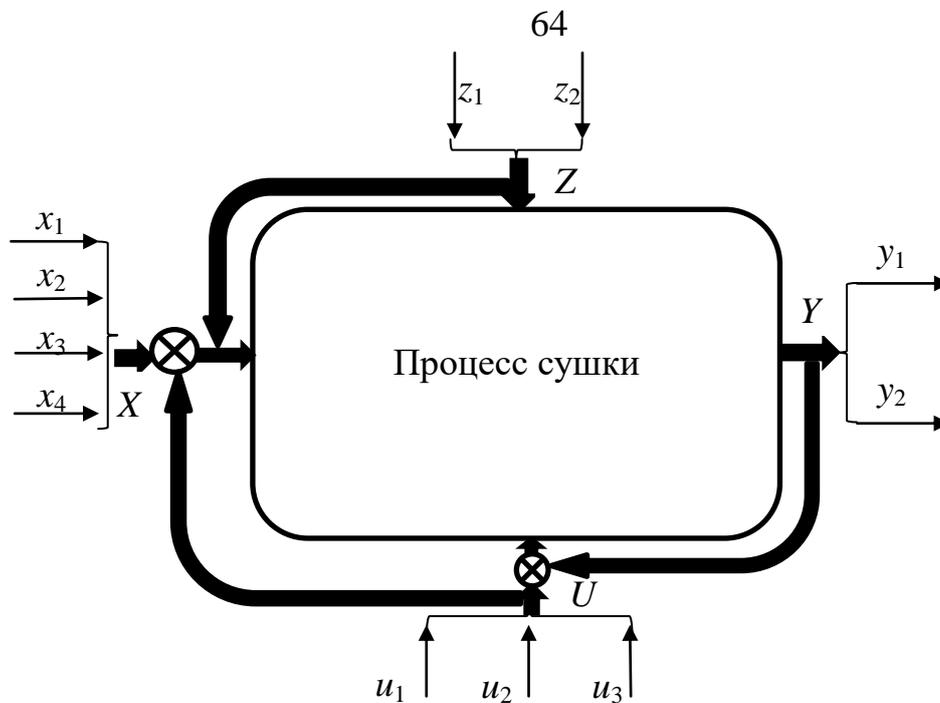


Рисунок 3.2 – Информационная модель процесса сушки зеленого чая как объекта управления

В качестве входной переменной:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\},$$

где x_1 – входная влажность продукта; x_2 – входная температура продукта; x_3 – температура воздуха; x_4 – влажность воздуха.

Выходными переменными являются качественные показатели процесса сушки:

$$Y = \{y_1, y_2\},$$

где y_1 – влажность в продукте на выходе; y_2 – выходная температура продукта.

Управляющие воздействия объекта:

$$U = \{u_1, u_2, u_3\},$$

где u_1 – скорость движения продукта, u_2 – температура сушильного агента, u_3 – скорость движения сушильного агента в сушильной камере.

Параметры возмущения объекта:

$$Z = \{z_1, z_2\},$$

где z_1 – изменение влажности среды и материала, z_2 – изменение температуры среды и материала.

Основное преимущество математического моделирования: оно позволяет

прогнозировать изменения технических состояний системы без процесса анализа результатов экспериментов. Математические модели технологических промышленных процессов, в том числе конвейерной сушки, основаны на фундаментальных законах физики. Они включают уравнения сохранения массы и энергии, процессы передачи массы и тепла, а также законы равновесных состояний. Кроме того, модели опираются на математические выражения, описывающие динамику и состояние объекта.

Несмотря на то, что в области моделирования сушки имеется достаточное количество исследований, относительно небольшое их количество непосредственно связано с конвейерными сушильными установками. Это, скорее всего, связано с тем, что процесс сушки конвейерного типа является процессом, имеющими сложные, нелинейные характеристики, а также неопределенные условия и факторы, которые оказывают влияние на процесс (как внутренние, так и внешние возмущения).

Общая модель сушильной конвейерной установки состоит из двух подпроцессов: один описывает изменение температуры и влажности продукта в сушильной камере, т.е. кинетические кривые сушки, а другой — работу сушилки, т.е. определяет время, которое материал проводит в камере сушилки. Объединение этих моделей позволяет смоделировать процесс сушки в конвейерной сушилке.

При изучении процесса сушки необходимо учитывать два явления: теплопередачу, необходимую для испарения жидкости, и массообмен с поверхности твердого тела, а также диффузию внутренней влаги. Факторы, влияющие на каждый из этих процессов, определяют скорость сушки материала.

В промышленности разработаны различные типы сушилок с учетом характеристик и физических свойств материалов, подлежащих сушке.

Многие исследователи подходили к проблеме моделирования процессов сушки с разных сторон, подчеркивали трудности в получении общей модели сушки и указывали на необходимость использования корреляций данных, полученных эмпирическим путем, которые, в свою очередь, специфичны для

материалов, подлежащих сушке, а также для конкретных установок.

Математические модели процесса сушки можно классифицировать на два типа. Первый тип основан на статических моделях, описывающих стационарные пространственные распределения температуры и влажности, как в твердых материалах, так и в сушильном агенте. Второй тип представлен динамическими моделями, основанными на дифференциальных уравнениях с распределенными параметрами, которые позволяют получить скорость изменения температуры и влажности в ходе сушки.

Факторы, влияющие на моделирование процесса сушки, можно классифицировать следующим образом [97]:

- физические свойства продукта, такие как форма частиц, плотность, удельная теплоемкость, коэффициент массообмена, равновесная влажность и т.д.;
- параметры камеры сушилки (ширина, длина и высота) и технические характеристики оборудования (вентилятор, нагреватель, двигатель и т.д.);
- рабочие условия, такие как расход, температура материала и сушильного воздуха в камеру, а также скорость движения ленты.

В данной работе разработана полная динамическая модель, включающая различные части установки. Входными переменными, рассматриваемыми для этой модели, являются поток влажного твердого вещества и поток горючего топлива, используемый для сушки продукта, при этом входной поток сухого воздуха считается постоянным. Основными выходами модели являются остаточная влажность и температура высушенного продукта на выходе из камеры сушилки.

Получение параметрической модели сушилки служит двум интересам: с одной стороны, станет возможным моделирование различных рабочих точек установки, что позволит провести дальнейшие исследования, чтобы определить, какие рабочие точки являются наиболее выгодными с экономической точки зрения. С другой стороны, модель, учитывающая доминирующую динамику, позволит получить упрощенные динамические модели для различных рабочих

точек, которые затем можно будет использовать для проектирования регуляторов.

Эти знания могут быть использованы для целей управления и даже позволяют одновременно управлять двумя выходными переменными.

Модель дифференциальных уравнений, сконструированная в этой работе, основана на балансах энергии и массы, применяемых к элементам объема с распределенными параметрами.

Хотя это исследование сосредоточено на конкретном растении, этот метод можно распространить на моделирование других подобных растений.

3.2 Разработка математической модели процесса сушки зеленого чая в конвейерной сушилке

Исследование в этой диссертации было сосредоточено на экспериментальной установке, упрощенная схема которой изображена на рисунке 3.3.

Конвейерная сушилка в основном имеет три различных области:

Зона подачи, состоящая из нагревателя, вентилятора и бункера. Воздух подается вентилятором через трубу диаметром 5 см в нагреватель и нагревается до заданной температуры. Расход воздуха оценивается по перепаду давления, измеренному датчиком давления, расположенным на воздухозаборном трубопроводе. Для этого измерения использовался датчик давления (AUTOTRAN Inc., $0-3,5 \times 10^4$ Па). Бункер содержит влажный продукт, который подается в камеру с помощью ленточного конвейера. Эта конфигурация позволяет контролировать как горячий поток, так и входной поток влажного продукта.

Зона камеры сушилки. Влажный материал из зоны подачи непрерывно перемещается благодаря движению ленты. В нижней части сушильной камеры осуществляется распределение воздушного потока. С использованием проточного анемометра (АКСО, АК833) проводили измерения скорости воздуха в 17 различных местах сушильной секции с целью оценки равномерности воздушного потока. Конструкция конвейерной сушилки представляет собой камеру прямоугольной формы (высота – 0,7 м, ширина – 3 м и длина – 12 м), построенную из оцинкованного железа и перфорированного движущегося ремня

из нержавеющей стали. Лента поддерживается четырьмя роликами, вращаемыми электродвигателем 380В/1,5 кВт. При такой скорости проход конвейера через сушильную камеру длиной 12 м занимает примерно 15-30 мин. Скорость воздуха колеблется от 0,25 м/с до 0,65 м/с.

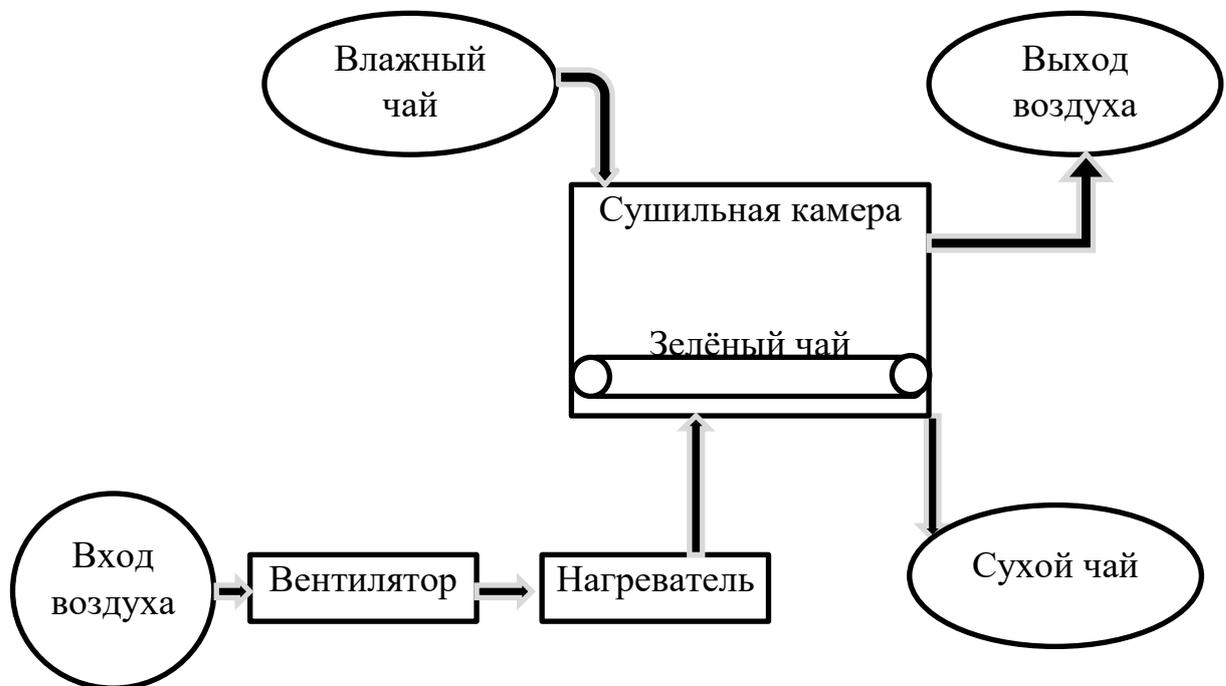


Рисунок 3.3 – Схема конвейерной сушилки зеленого чая

Выходная зона. В этой зоне высушенный продукт и отработанный воздух извлекаются из камеры и выводятся за пределы сушилки.

В связи с разделением установки на три зоны (загрузка, ленточная камера и вывод) для каждой из них логично использовать разные модели. Но на практике можно обойтись без моделирования зоны выхода, где вентилятор нагнетает поток газа через камеру; этот поток является граничным условием входа в зону горения. Следовательно, моделирование необходимо только для областей сгорания и ленточной камеры сушилки.

Математическая модель сушилки была разработана на основе балансов массы и энергии с учетом твердой фазы, состоящей из чая.

Конвейерная сушилка для зеленого чая представляет собой нелинейный объект, в котором температурные и влажностные характеристики материала изменяются в зависимости от времени и пространственного положения. Такие зависимости имеют следующий общий вид:

$$f(y_i, l, t) = \frac{\partial y_i(l, t)}{\partial t} + v_c(t) \frac{\partial y_i(l, t)}{\partial l},$$

где: y_i – температурные и влажностные характеристики зеленого чая, v_c – скорость движения слоя чая, l – осевая координата.

Математическое описание конвейерной сушилки с непосредственным контактом подразумевает формулировку балансов массы и энергии, которые связаны временем удерживания [99] и моделями теплообмена [20].

Массовой баланс

Уравнение баланса массы для влаги в зеленом чае представлено формулой (3.1) [101, 20]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = K(M - M_e) - v_c \frac{\partial M}{\partial l}, \quad (3.1)$$

где M – влажность слоя зеленого чая в сушилке, %; K – коэффициент массообмена, $1/c$; M_e – равновесная влажность зеленого чая в процессе сушки, %.

Энергетический баланс

Уравнение энергетического баланса представлено уравнением [101, 20]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K(M - M_e)}{C + C_w M} (C_v (T_a - T) + \lambda + C_w T) - v_c \frac{\partial T}{\partial l} + \frac{h(T_a - T)}{C + C_w M}, \quad (3.2)$$

где T – температура слоя зеленого чая в сушилке, °C; T_a – температура сушильного агента, °C; h – коэффициент теплопередачи, $Вт/М^2 \cdot °C$; C , C_w и C_v – соответственно удельная теплоемкость зеленого чая, жидкой воды и водяного пара, $Дж / (кг \cdot °C)$; λ – скрытая теплота испарения воды, $Дж$.

Начальные условия:

$$T(l, 0) = T_0,$$

$$M(l, 0) = M_0.$$

Расчетный коэффициент массообмена K в уравнениях (3.1), (3.2) проведен в разделе 2. Результат представлен в формуле (3.3). Коэффициент массопереноса K является функцией, которая зависит от скорости движения воздуха v_a в камере сушилки и его температуры T_a .

$$K = (0,00028(T_a - 45)v_a) - 0,00067. \quad (3.3)$$

Коэффициент теплопередачи h , показанный в уравнениях (3.1), (3.2), которые представляют собой определенную комбинацию внутреннего и поверхностного барьера для теплопередачи, был настроен на экспериментальные результаты температуры поверхности продуктов, найденные в этом исследовании в сушилке периодического действия [100]. В случае зеленого чая использовалось постоянное значение h , которое равно $181 \text{ Вт} / \text{М}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$ [101].

Обычный подход к математическому моделированию подразумевает создание замкнутой системы уравнений с учетом начальных и граничных условий (дифференциальных, интегральных и алгебраических). Далее задача сводится к конечно-разностному представлению и решается численными методами [102]. Сущность метода конечных разностей МКР для решения краевых задач проста и заключается в том, что вместо производных в дифференциальных уравнениях используются их конечно-разностные аппроксимации.

При использовании МКР для задач теплопроводности твердый материал представляется как набор узлов. Аппроксимируя (заменяя) частные производные дифференциального уравнения сохранения массы и энергии материала конечными разностями, получаем систему линейных алгебраических уравнений для определения локальных значений температуры и влажности в каждом узле сетки [20].

Конечно-разностное решение системы уравнений материального и теплового балансов (3.1), (3.2) выполняется на однородной сетке с количеством разбиений по длине камеры сушилки (i) и по времени (j) [20].

Сетка для расчетной области [$0 \leq l \leq L$, $0 \leq t \leq T$] имеет постоянный шаг как по пространству $\Delta l = \frac{L}{N}$, так и по времени $\Delta t = \frac{T}{M}$ (рисунок 3.4).

Для решения задачи нахождения температуры и влажности листьев зеленого чая в процессе сушки на $(j + 1)$ -м временном уровне необходимо иметь решение на j -м временном уровне [20].

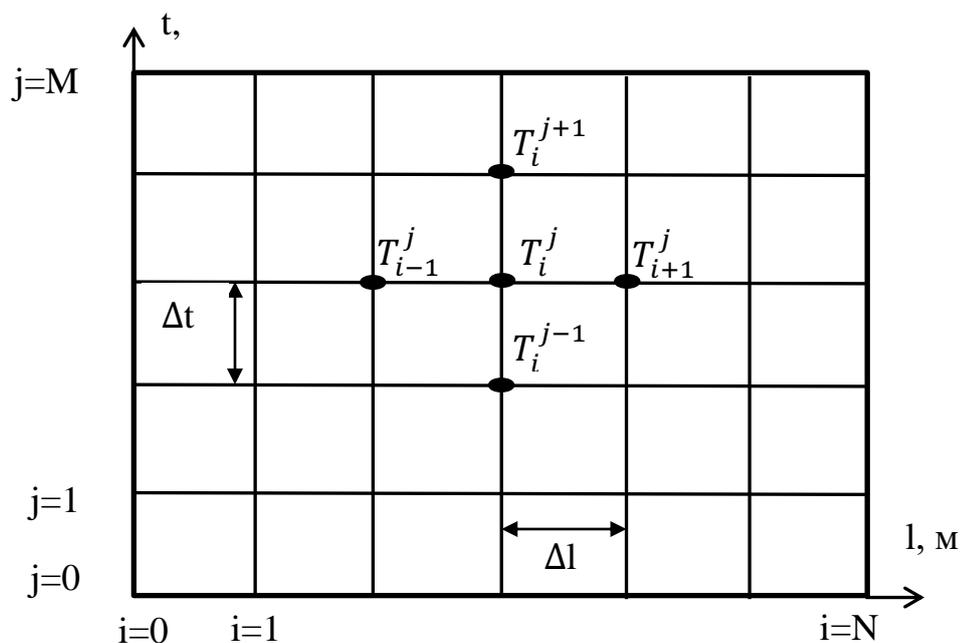


Рисунок 3.4 – Сетка для расчетной области

Производные от функций $T(l, t)$ и $M(l, t)$ по времени и длине слоя зеленого чая в приведенном выше дифференциальном уравнении теплопроводности представляются конечно-разностным методом следующим образом [20]:

$$\left(\frac{\partial T(l, t)}{\partial t} \right)_i \approx \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t}, \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{\partial T(l, t)}{\partial l} \right)_j \approx \frac{\Delta T}{\Delta l} = \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta l}, \quad (3.5)$$

$$\left(\frac{\partial M(l, t)}{\partial t} \right)_i \approx \frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{M_i^{j+1} - M_i^j}{\Delta t}, \quad (3.6)$$

$$\left(\frac{\partial M(l, t)}{\partial l} \right)_j \approx \frac{\Delta M}{\Delta l} = \frac{M_{i+1}^j - M_i^j}{\Delta l}. \quad (3.7)$$

В явных методах конечных разностей выбор шагов по времени (Δt) и пространству (Δl) критически важен для устойчивости расчётов. Как упоминалось выше, сушильная камера имеет длину 12 м и 17 позиций для измерения параметров состояния процесса сушки, поэтому в данном случае Δl выбрано равным 0,75 м.

Учитывая наличие в уравнениях конвективного члена $(v_c \frac{\partial M}{\partial l}$ и $v_c \frac{\partial T}{\partial l})$,

устойчивость схемы однозначно определяется условием Куранта–Фридрихса–Леви [35]:

$$v_c \frac{\Delta t}{\Delta l} \leq 1.$$

Скорость конвейерного потока, определяющая величину конвективного члена в уравнении, варьируется в пределах:

$$v_c \in [0,5;1,5] \text{ м/с}.$$

Чтобы обеспечить устойчивость на всём диапазоне скоростей, нужно взять значение Δt , которое будет корректно даже при максимальной скорости $v_c = 1,5 \text{ м/с}$. Для надёжности (обычно берут с коэффициентом запаса = 0.8):

$$\Delta t = 0,8 \frac{\Delta l}{v_c} = 0,8 \frac{0,75}{1,5} = 0,4.$$

Поставим (3.4) – (3.7) в уравнения (3.1) – (3.2) и проведем преобразование. Уравнения для прогнозирования изменений температуры и влажности чайных листьев во время сушки:

$$\begin{cases} \frac{M_i^{j+1} - M_i^j}{\Delta t} = K(M_i^j - M_e) - v_c \frac{M_{i+1}^j - M_i^j}{\Delta l} \\ \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \frac{K(M_i^j - M_e)}{C + C_w M_i^j} (C_v (T_a - T_i^j) + \lambda + C_w T_i^j) - v_c \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta l} + \frac{h(T_a - T_i^j)}{C + C_w M_i^j} \end{cases} \quad (3.8)$$

Из решения данной системы уравнений получим следующие выражения для прогнозирования изменений температуры и влажности в сушилке:

$$\begin{cases} M_i^{j+1} = M_i^j + f_1(M_i, T_i) \Delta t \\ T_i^{j+1} = T_i^j + f_2(M_i, T_i) \Delta t \end{cases}, \quad (3.9)$$

$$f_1(M_i, T_i) = K(M_i^j - M_e) - v_c \frac{M_{i+1}^j - M_i^j}{\Delta l}, \quad (3.10)$$

$$f_2(M_i, T_i) = \frac{K(M_i^j - M_e)}{C + C_w M_i^j} (C_v (T_a - T_i^j) + \lambda + C_w T_i^j) - v_c \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta l} + \frac{h(T_c - T_i^j)}{C + C_w M_i^j}. \quad (3.11)$$

Из приведенного выше решения дифференциального уравнения в частных производных с помощью метода конечных разностей и нечеткой аппроксимации зависимости равновесной влажности листьев зеленого чая от относительной

влажности и температуры слоя чая можно описать блок-схему алгоритма программы для вычисления параметров термообработки слоя зеленого чая, представленную на рисунке 3.5.

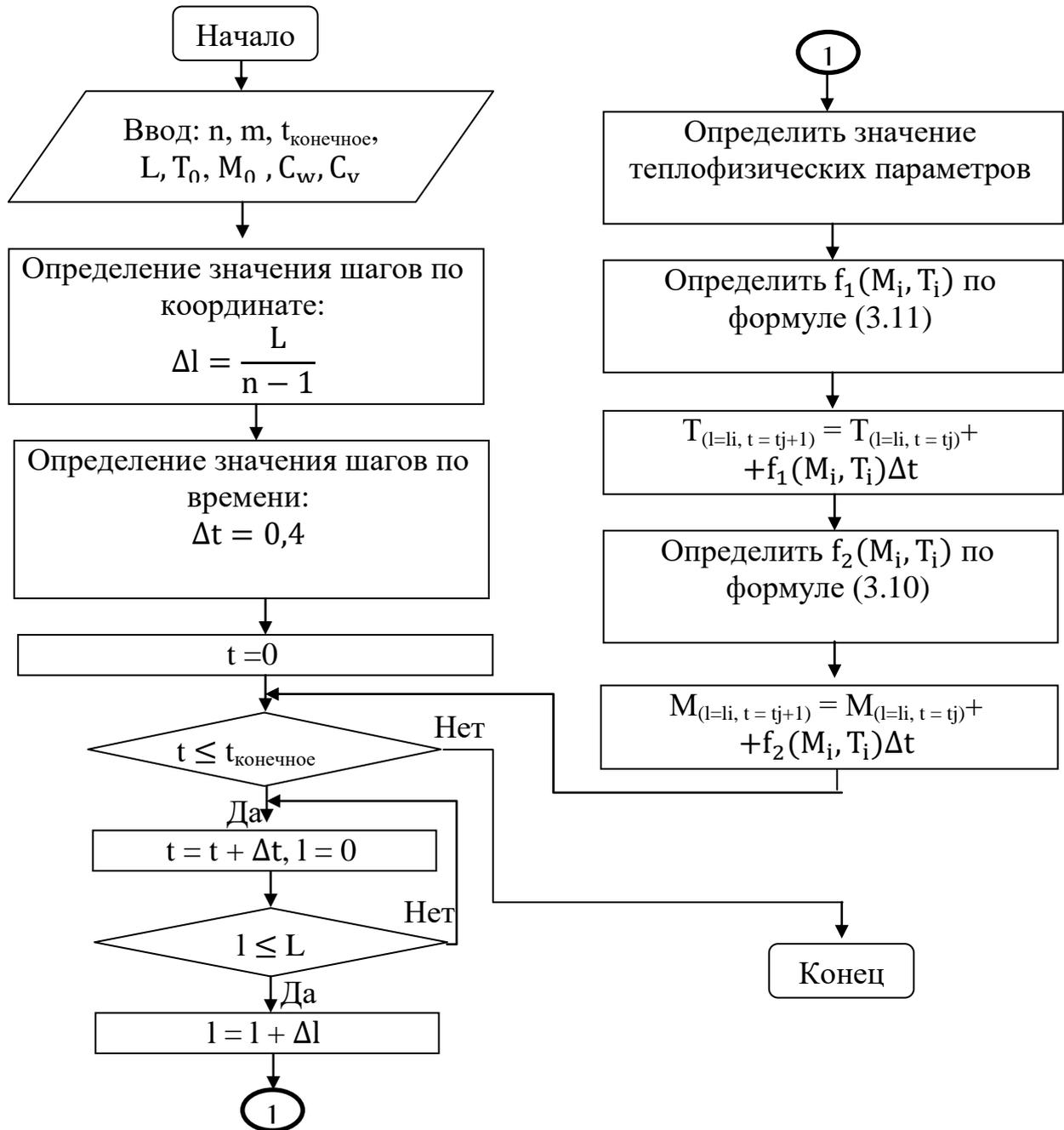


Рисунок 3.5 – Блок-схема моделирования процесса сушки зеленого чая [20]

Основные теплофизические характеристики известны и представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Тепловые параметры процесса сушки зеленого чая [101]

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
Удельная теплоемкость жидкой воды	C_w	4220	Дж / кг °С

Продолжение таблицы 3.1

Удельная теплоемкость водяного пара	C_v	2200	Дж / кг °С
Плотность жидкой воды	ρ_w	998,2	кг/м ³
Плотность водяного пара	ρ_v	720	кг/м ³
Коэффициент теплопередачи	h	181	Вт / М ² °С
Скрытая теплота испарения воды	λ	2300	Дж/кг
Начальная влажность	M_0	55-65	%

3.3 Результат процесса моделирования и проверка адекватности математических моделей

Для проверки адекватности полученных математических моделей экспериментально исследовали кинетические кривые процесса сушки зеленого чая в конвейерной сушилке.

Графики экспериментального исследования сушки использованы для оценки влияния температуры воздуха на влажность и температуру слоя зеленого чая, а также для оценки минимального времени пребывания, необходимого для достижения заданных уровней влажности.

Перед экспериментом по сушке свежесобранные чайные листья, собранные в чайном саду, обрабатываются посредством процесса увядания, фиксации, скручивания. Общая масса образца чая, подготовленного для настоящего эксперимента, составила приблизительно 180 кг. Операция сушки была инициирована искусственным путем подачи чая на подъемник для материалов. Весь чай внутри сушильной камеры транспортировался с помощью компонентов трансмиссии. Таким образом, чай поднимался подъемником к загрузочному отверстию, далее транспортировался перемещением цепной пластины с левой стороны на правую сторону. И так далее, в конечном итоге чай перемещается к выходному отверстию сушильной камеры.

В этом исследовании эксперимент проводился на основе фактического производства и включая два основных периода: начальный период сушки и период повторной сушки. На первом этапе сушки температура воздуха находится

в диапазоне 100–110 °С, а скорость перемещения чая составляет 1 м/мин, что соответствует 12 минутам от начала до завершения процесса. На втором этапе температура снижается до 80–100 °С, а скорость транспортировки уменьшается до 0,6 м/мин, что увеличивает время прохождения материала через сушильную камеру до 20 минут.

Во время эксперимента температура сухого воздуха, подаваемого в сушильную камеру, устанавливалась шкафом управления и измерялась терморезистором РТ100 (таблица 3.2), подключенным к шкафу управления. Кроме того, измерение температуры сухого воздуха и влажности чая внутри сушильной камеры может использовать метод, который фиксирует точку сбора данных и образцов. Согласно введению в принцип работы сушильного оборудования выше, процесс сушки можно рассматривать как последовательный процесс, соединенный четырьмя слоями сушки. Таким образом, установив порт подачи в качестве начального положения (0 м), выходной продукт в качестве конечного положения (12 м), устанавливаем 0,75 м в качестве расстояния между двумя точками, всего 17 точек для измерения данных температуры воздуха и влажности чая во время процесса сушки [20].

В результате были получены кривые зависимости температуры от времени в периодическом режиме. Скорость воздуха, рассчитанная на основе площади поперечного сечения конвейерной ленты, была установлена равной 0,25 м/с, а температура воздуха на входе составляла 105 °С. Температура и влажность слоя зеленого чая во время сушки является ключевым фактором для сохранения биоактивных соединений, и важно оценить эту переменную для создания адекватных условий сушки [20].

Рисунки 3.6а и 3.6б показывают, что математическая модель (уравнения (3.1) и (3.2)), которая теоретически описывает операцию периодической сушки, предсказывала почти правильное значение температуры поверхности листьев чая во времени сушки.

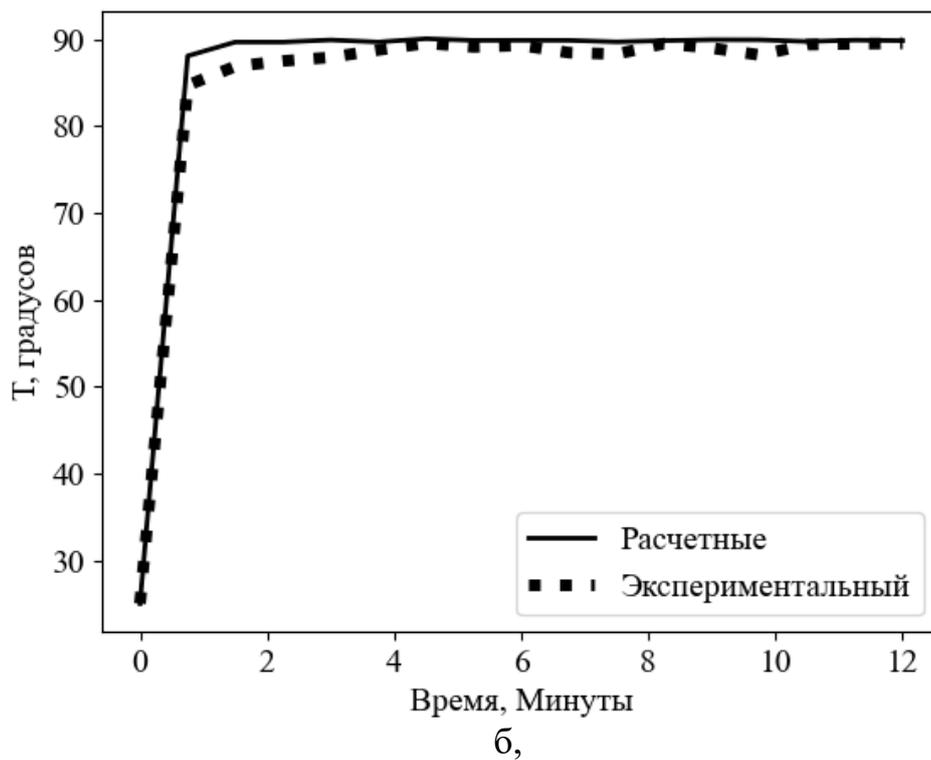
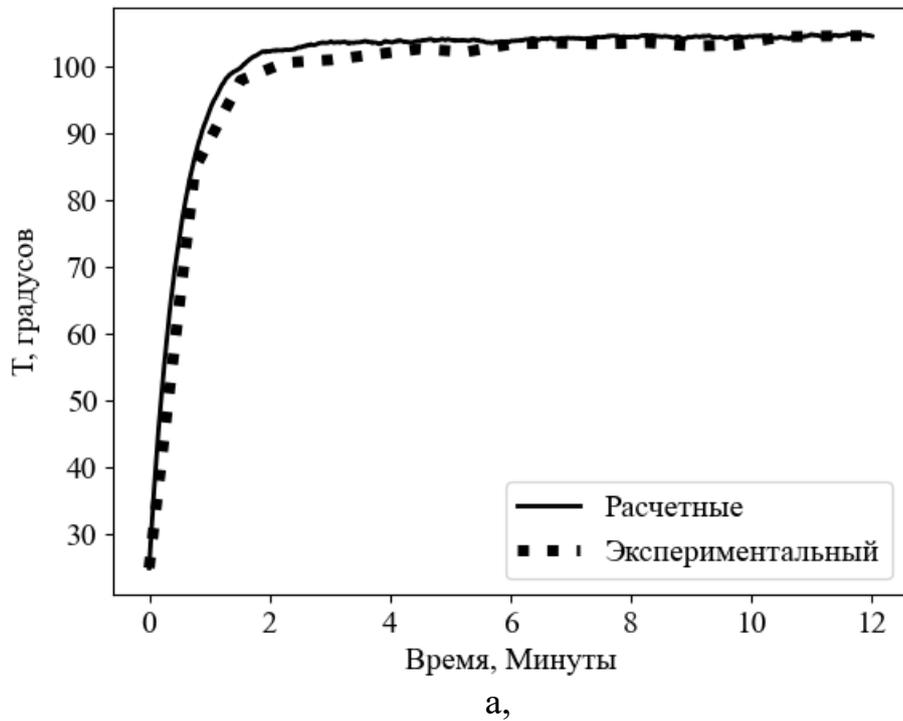


Рисунок 3.6 – Экспериментальные (символы) и расчетные с помощью математической модели (линии) температуры на первом (а) и втором (б) этапах

Результаты экспериментов при изучении изменения влажности материала во время сушки показаны на рисунках 3.7.

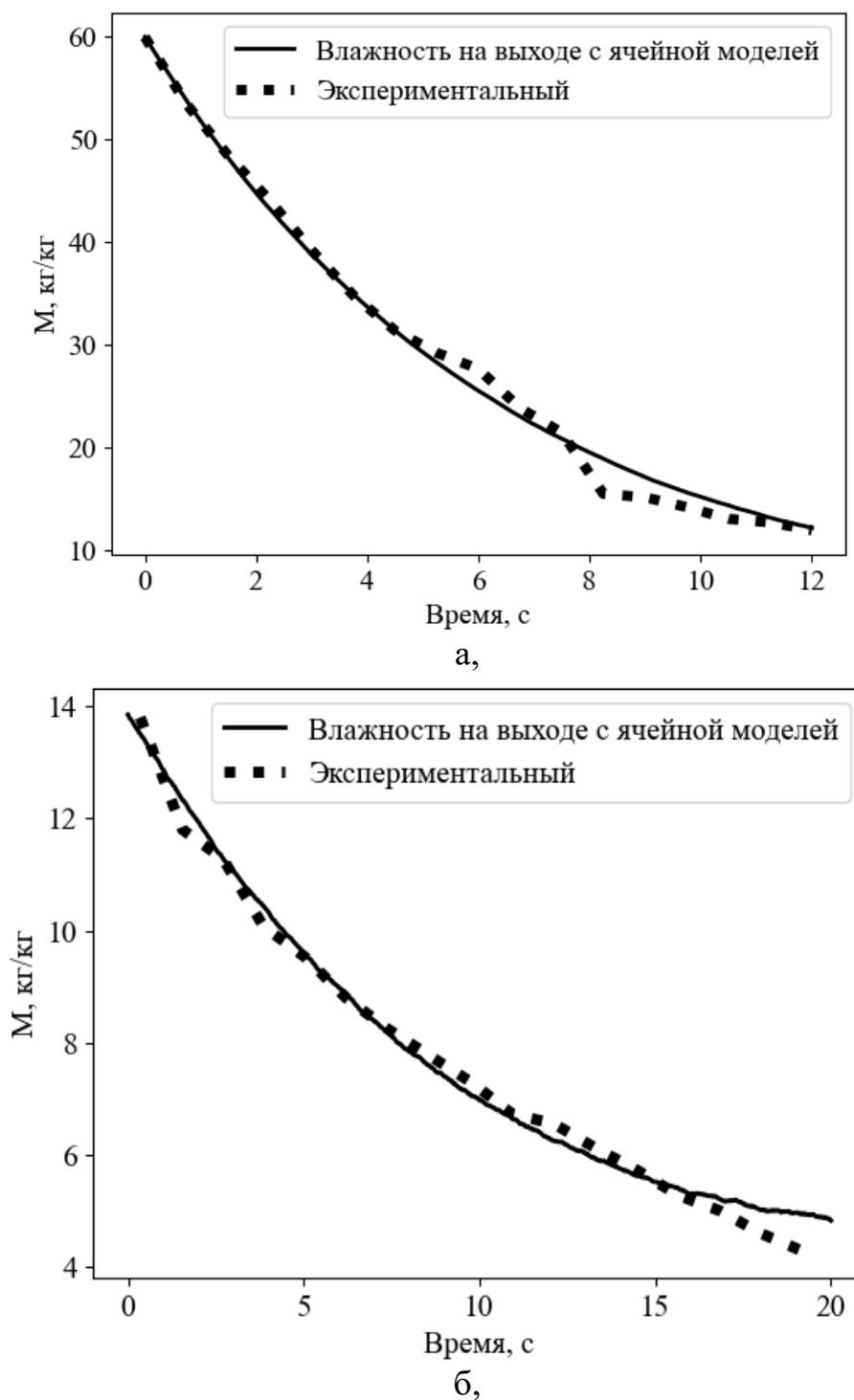


Рисунок 3.7 – Экспериментальная (точки) влажность и расчетная влажность в листьях чая по модели (линии) на первом (а) и втором (б) этапах

На рисунках 3.7 представлено относительное отклонение между расчетной (по модели) и экспериментальной влажностями поверхности чайных листьев в диапазоне начальной влажности приблизительно 60 % и температуры воздуха 100 °С на первом этапе сушки и 90 °С во втором.

Таблица 3.2 – Подробная информация об инструментах

Датчики	Модель	Диапазон действия	Погрешность
Электронные весы	Mettler Toledo	0–380g	±0.01g
Терморезистор	PT100	-200 – 450 °C	±0.1 °C
Датчики влажности	M-Sens 2	0 – 100%	±0,1% – 0,5%
Анемометры	Testo 405i	0 – 30 м/с	± 0,05 м/с

Для оценки качества разработанной модели были использованы основные статистические показатели, включая коэффициент детерминации (D^2), среднеквадратическую ошибку (RMSE) и среднюю абсолютную ошибку (MAE). Формулы выражены в уравнениях (3.12) – (3.14). Эти показатели позволяют оценить степень соответствия модели экспериментальным данным.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{pre,i} - Y_{exp,i}, \quad (3.12)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{pre,i} - Y_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.13)$$

$$D^2 = 1 - \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{pre,i} - Y_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{pre,i} - \bar{Y}_{exp,i})^2}, \quad (3.14)$$

где: $Y_{pre,i}$ – полученное значение от модели, $Y_{exp,i}$ – значение, измеренное в эксперименте, $\bar{Y}_{exp,i}$ – среднее значение эксперимента, n – количество точек данных, измеренных в эксперименте.

На рисунках 3.6 и 3.7 видно, что независимо от начального периода сушки или периода повторной сушки, тренд, нарисованный моделью, может дать приемлемый прогноз и соответствие содержания влаги в чае.

Значения статистических показателей влажности и температуры за весь период сушки приведен в таблице 3.3.

Значения статистических показателей для описания содержания влаги: коэффициент детерминации, среднеквадратическая ошибка и средняя абсолютная ошибка составляют 0,9896, 0,5783 и 0,5041 на первом этапе сушки и 0,9708,

0,5108 и 0,5146 в период пересушки соответственно.

Значение статистических показателей для описания температуры: коэффициент детерминации, среднеквадратическая ошибка и средняя абсолютная ошибка составляют 0,9626; 2,2414 и 2,7753 на первом этапе сушки и 0,9872; 0,7086; 0,5141 в период пересушки соответственно.

Таблица 3.3 – Статистические показатели качества разработанной модели

Статистические показатели	Влажность		Температура	
	Первой этап	Второй этап	Первой этап	Второй этап
Коэффициент детерминации (D^2)	0,9896	0,9708	0,9626	0,9872
Среднеквадратическая ошибка (RMSE)	0,5783	0,5108	2,2414	0,7086
Средняя абсолютная ошибка (MAE)	0,5041	0,3146	2,7753	0,5141

Сравнение расчётных и экспериментальных данных сушки зелёного чая в конвейерной сушилке (рисунки 3.6, 3.7 и таблица 3.3) демонстрирует хорошее соответствие между модельными и фактическими значениями, как по влажности, так и по температуре материала.

Значения коэффициента детерминации превышают 0,96 на всех этапах сушки, что свидетельствует о высокой точности аппроксимации. Также наблюдаются достаточно низкие значения среднеквадратической и средней абсолютной ошибок, что подтверждает адекватность модели.

Таким образом, разработанная модель обладает удовлетворительным качеством описания процессов переноса влаги и тепла и может быть использована в инженерных расчётах и дальнейших исследованиях, направленных на оптимизацию режимов сушки.

3.4 Выводы главы

Третья глава посвящена построению математической модели процесса сушки зеленого чая в сушильном оборудовании конвейерного типа при условии неопределенности теплофизических параметров. Математическое описание конвейерной сушилки с непосредственным контактом подразумевает формулировку балансов массы и энергии твердой фазы, которые являются

дифференциальными уравнениями в частных производных. Была построена блок-схема методики определения полей влажности и температуры зеленого чая, которая учитывает динамические изменения теплофизических параметров (плотность, теплоемкость, коэффициент массообмена и равновесная влажность) в ходе сушки (раздел 2).

Из сравнения расчетных кривых по разработанной модели и экспериментальных данных сушки зеленого чая в конвейерной сушилке, можно сделать вывод об том, что разработанная модель обладает удовлетворительным качеством описания процессов переноса влаги и тепла и может быть использована в инженерных расчётах и дальнейших исследованиях, направленных на оптимизацию режимов сушки.

ГЛАВА 4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ

4.1 Анализ процесса сушки зеленого чая как объекта управления и его особенностей

Сушка представляет собой сложный процесс переноса массы и тепла, вызывающий физические и химические изменения в высушиваемом материале. Параметры управления процессом сушки подразделяют на три основные группы: энергетические, физико-химические, механические и геометрические.

В первую группу входят температура, расход и влажность, характеризующие подачу и распределение тепловой энергии, а также тепловые характеристики высушиваемого материала. Во вторую – качественные показатели готового продукта, характерные для цвета, запаха и т.д. В третью – параметры, определяющие состав материала, механическую прочность, геометрическую форму.

Качество сушки продуктов из зеленого чая зависит не только от входных параметров чайного продукта после процесса скручивания, но и от качества управления технологическим процессом сушки и типа используемого оборудования. В данной работе рассматривается оборудование конвейерной ленты для сушки зеленого чая в непрерывном режиме. Как правило, качество зеленого чая после сушки зависит от температуры, скорости воздуха, а также скорости движения слоя зеленого чая в сушилке. Рассмотрим подробнее влияние таких параметров на качество готового продукта зеленого чая.

1. Влияние температуры сушки на качество процесса сушки.

Если температура сушки чая увеличится примерно до 120 °С, то увеличится скорость сушки и сократится время сушки на 40-50%. Это позволяет снизить стоимость производства зеленого чая, повысить экономическую эффективность использования топлива и энергии, то есть, снизить производственные затраты. Однако, при таких температурах чай будет перегорать.

При температуре сушки менее 60 °С процесс сушки продлевается, ферменты в чае не приостанавливаются во времени.

2. Влияние скорости воздуха (осушающий агент) на качество процесса сушки.

Увеличение скорости осушающего агента приводит к увеличению интенсивности испарения и сокращению времени сушки. Но если скорость сушки будет увеличена слишком сильно, то процесс сушки значительно сократится, что вызовет потерю тепла из-за выносимого воздуха, а также скажется на аромате чая.

3. Влияние скорости движения ленты на качество процесса сушки.

Если скорость конвейера не контролировать, слой чая в сушильной камере не будет однородным по толщине, а содержание влаги в чае будет неравномерным. Кроме того, скорость конвейера определяет время сушки чая, что тоже является важным фактором в процессе сушки.

Поэтому температуру, скорость движения ленты и осушающего агента необходимо выбирать для достижения необходимых показателей чайного продукта при рациональном использовании производственных затрат.

Таким образом, для обеспечения качества чайной продукции необходимо разработать соответствующий метод управления процессом сушки чая.

Функциональная модель компонентов модели сушки зеленого чая представлена на рисунке 4.1.

Принцип ее работы состоит в следующем: чайные листья после скручивания поступают в сушильную камеру через системы подачи с расходом $G_{M-ВХ}$ (кг/с), температурой T_{M-0} ($^{\circ}C$) и начальной влажностью M_{M-0} (%). Слой зеленого чая перемещают на конвейерной ленте в сушильной камере. Чайный слой получает теплоту от горячего воздуха и влага его испаряется и уходит вместе с воздухом. Через определенное время пребывания в сушильной камере (t – время сушки, секунд) высушенные листья зеленого чая выходят из камеры с расходом $G_{M-ВЫХ}$ (кг/с), температурой $T_{ВЫХ}$ ($^{\circ}C$) и конечной влажностью $M_{ВЫХ}$ (%) (обычно 3-5%)

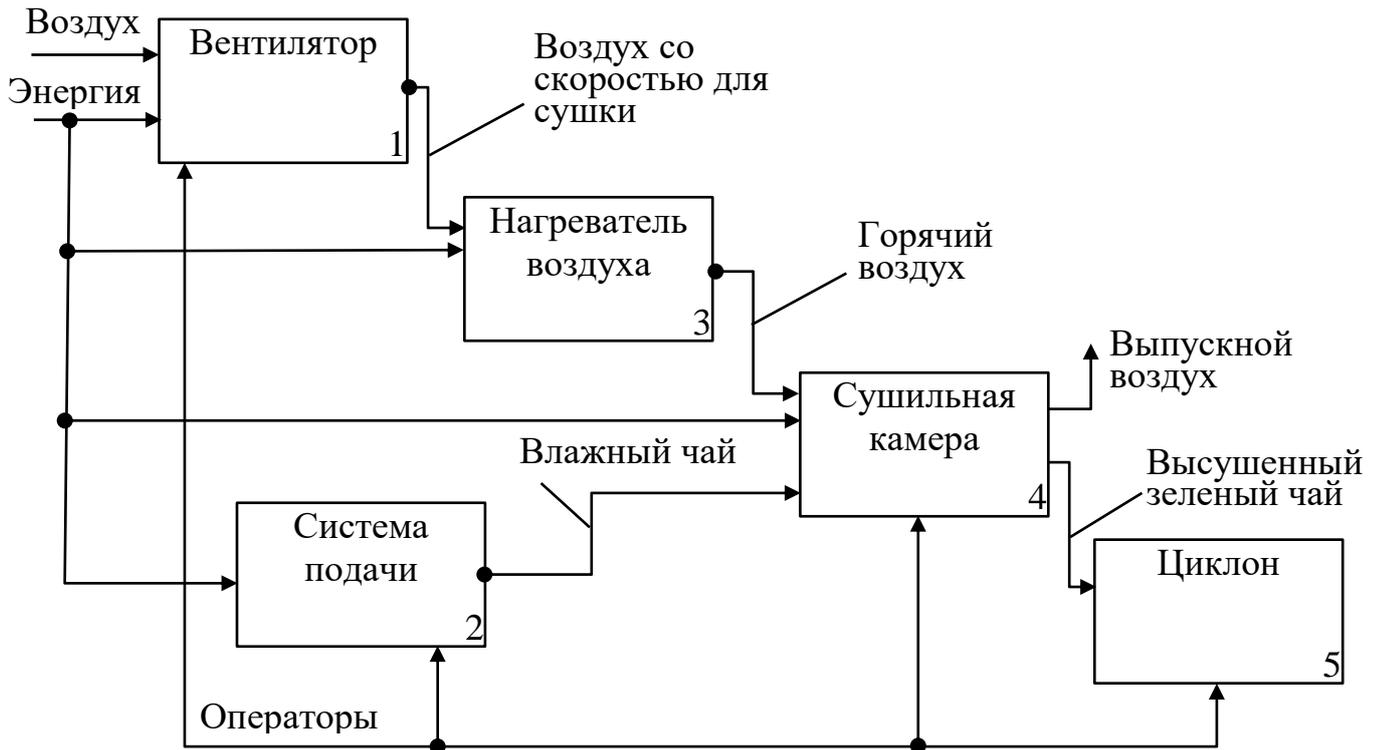


Рисунок 4.1 – Функциональная модель оборудования сушки зеленого чая

Сушильная камера состоит из конвейерных лент, изготовленных из металлической сетки и размещенных на роликах, при этом ролики благодаря вращению мотора с мощностью электрической энергии E_m (кВт) способствуют движению конвейерных лент с равномерной скоростью v_c (м/с), которая определяет время, необходимое для сушки зеленого чая до требуемой влажности.

Воздух поступает в сушилку с помощью вентилятора при мощности электрической энергии E_v (кВт). Воздух перед поступлением в нагреватель имеет начальную температуру и влажность соответственно равной температуре наружного воздуха T_{a-0} ($^{\circ}\text{C}$) и влажности M_{a-0} (%), после нагревателя воздух нагревается до температуры T_a ($^{\circ}\text{C}$) и начинает поступать в сушильную камеру со скоростью потока G_a ($\text{м}^3/\text{с}$). Параметры компонентов конвейерной системы сушки зеленого чая описаны в таблице 4.1.

Процесс сушки как объект управления характеризуется следующими основными группами параметров (рисунок 4.2):

- 1) X – входные параметры;
- 2) Y – выходные контролируемые переменные, которыми оценивается

качество работы объекта и которые необходимо поддерживать на заданном уровне;

- 3) V – управляющие воздействия;
- 4) U – возмущающие факторы.

Таблица 4.1 – Параметры компонентов конвейерной системы сушки зеленого чая

Компонент	Параметры		Обозначение
Зеленый чай	Скорость движения, кг/с		v_c
	Вход	Влагосодержание, %	M_{s-0}
		Температура, °C	T_{s-0}
	Выход	Влагосодержание, %	$V_{s-ВЫХ}$
Температура, °C		$T_{s-ВЫХ}$	
Вентилятор	Энергопотребление, кВт		$E_{вент}$
Нагреватель	Энергопотребление, кВт		$E_{наг}$
Конвейерная Система	Энергопотребление, кВт		E_k
	Площадь, м ²		S
	Длина, м		L
Сушильная Камера	Высота, м		h
	Интенсивность сушки, кг/ч		MR
Сушильный агент	Расход, м ³ /с		G_a
	Скорость, м ² /с		v_a
	Относительная влажность, %		W_a
	Температура, °C		T_a

К входным параметрам процесса сушки относятся:

- характеристики горячего воздуха (температура T_a , скорость v_a);
- техническая характеристика оборудования (энергопотребление ленты $E_{вент}$, вентилятора $E_{наг}$);
- характеристики продукта (начальная температура T_{s-0} , начальная влажность M_{s-0} , скорость движения ленты v_s , и теплофизические характеристики – коэффициент теплопередачи h , коэффициент массообмена K , плотность ρ , удельная теплоемкость C).

В группу выходных контролируемых переменных входят:

- температура высушенного выходного чая $T_{s-ВЫХ}$;
- конечное влагосодержание высушенного выходного чая $M_{s-ВЫХ}$.

В группу управляющих воздействий:

- температура горячего воздуха T_a ;

- скорость воздуха в камере v_a ;
- скорость конвейерной ленты v_c .

К возмущающим факторам относятся:

- изменение влагосодержания исходного чая ΔM_{s-0} ;
- изменение температуры исходного чая ΔT_{s-0} ;
- погрешность датчиков.

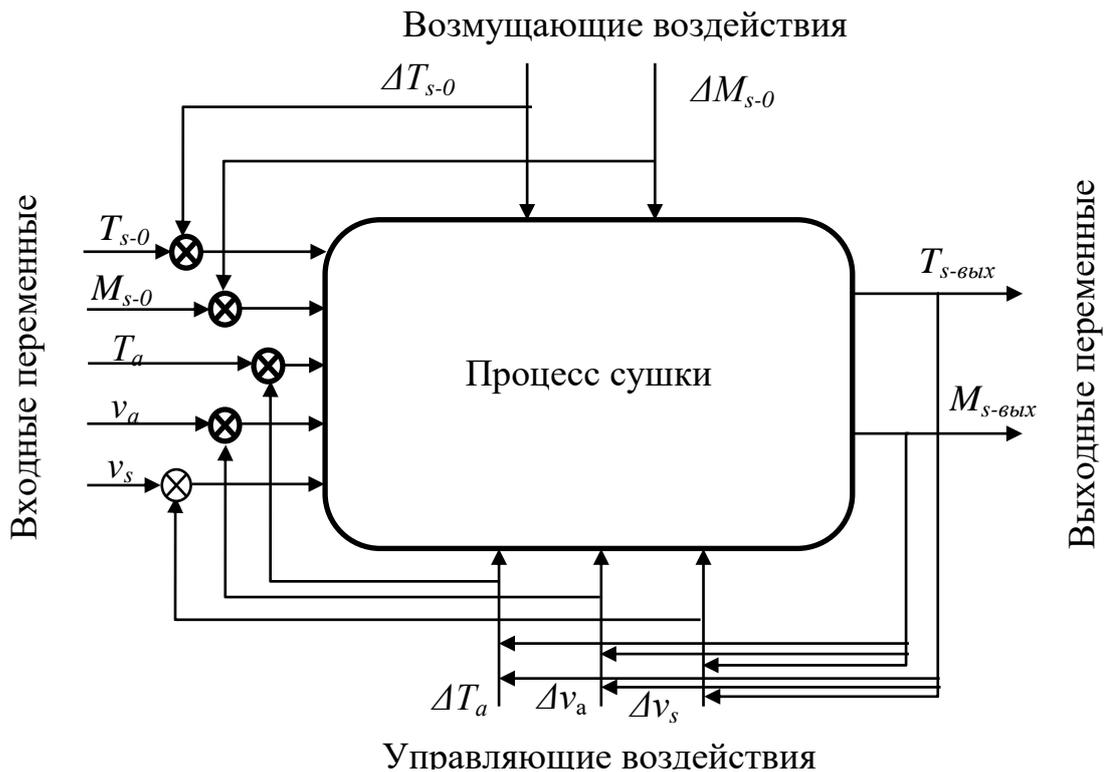


Рисунок 4.2 – Процесс сушки зеленого чая как объект управления

С точки зрения автоматизации процесс сушки является сложным нелинейным объектом. Так как для построения математического описания процесса сушки и методики формирования СУ необходимо решить систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, в которых содержится множество параметров сушильного материала, сушильного агента, а также условий окружающей среды (например, коэффициент внутренней теплопередачи зеленого чая, коэффициент равновесной влажности, качество исходного материала и т.д.). Эти параметры представляют собой неопределенные величины, изменяющиеся в процессе обезвоживания высушиваемого материала.

4.2 Структура и функциональная организация автоматизированной системы

управления технологическим процессом сушки зеленого чая

Система управления технологическим процессом сушки зеленого чая работает на основе программируемого логического контроллера, который собирает и регистрирует информацию с измерительных приборов и выдает управляющие воздействия на исполнительный механизм.

Система автоматического управления процессом сушки зеленого чая должна обеспечивать следующие функции [113]:

- сбор, анализ и первичная обработка полученных данных;
- осуществление связи и обмена данными между компонентами системы;
- отображение данных;
- сохранение и архивирование данных;
- измерение технологических параметров процесса сушки;
- управление насосами, вентиляторами, нагревателем, двигателем и запорно-регулирующей арматурой.

Функциональная структура автоматизированной системы управления технологическим процессом сушки (АСУ ТП процесса сушки) состоит из взаимосвязанных подсистем [114]. Модульная организация взаимодействий между подсистемами базируется на магистральном (шинном) принципе обмена информацией между устройствами (рисунок 4.3).

В качестве основной коммуникационной среды используется системная шина, состоящая из трех многоразрядных шин: данных, адреса и управления [114]. Шина данных обеспечивает передачу информации между различными элементами системы, включая датчики, базу данных и исполнительные механизмы. Шина адреса выполняет функцию выбора конкретного устройства или ячейки памяти, участвующих в обмене данными. Шина управления передает управляющие сигналы, определяющие параметры и режимы обмена информацией в рамках магистральной архитектуры.

К магистрали подключаются мультиагентная система и оперативная память, а также исполнительский механизм и база данных, которые обмениваются информацией на машинном языке (последовательностями нулей и единиц в

форме электрических импульсов) [114].



Рисунок 4.3 – Структура обмена информации АСУ ТП сушки

Структурная схема системы обеспечения автоматизированной системы управления технологическим процессом сушки состоит из трех уровней. На рисунке 4.4 показана схема структуры обеспечения АСУ технологическим процессом сушки зеленого чая.

Верхний уровень – это уровень визуализации, диспетчеризации (мониторинга) и сбора данных. В оперативном контуре управления АСУ ТП сушки располагается автоматизированное рабочее место оператора-технолога (АРМ ОТ), с которого осуществляется контроль и управление оборудованием.

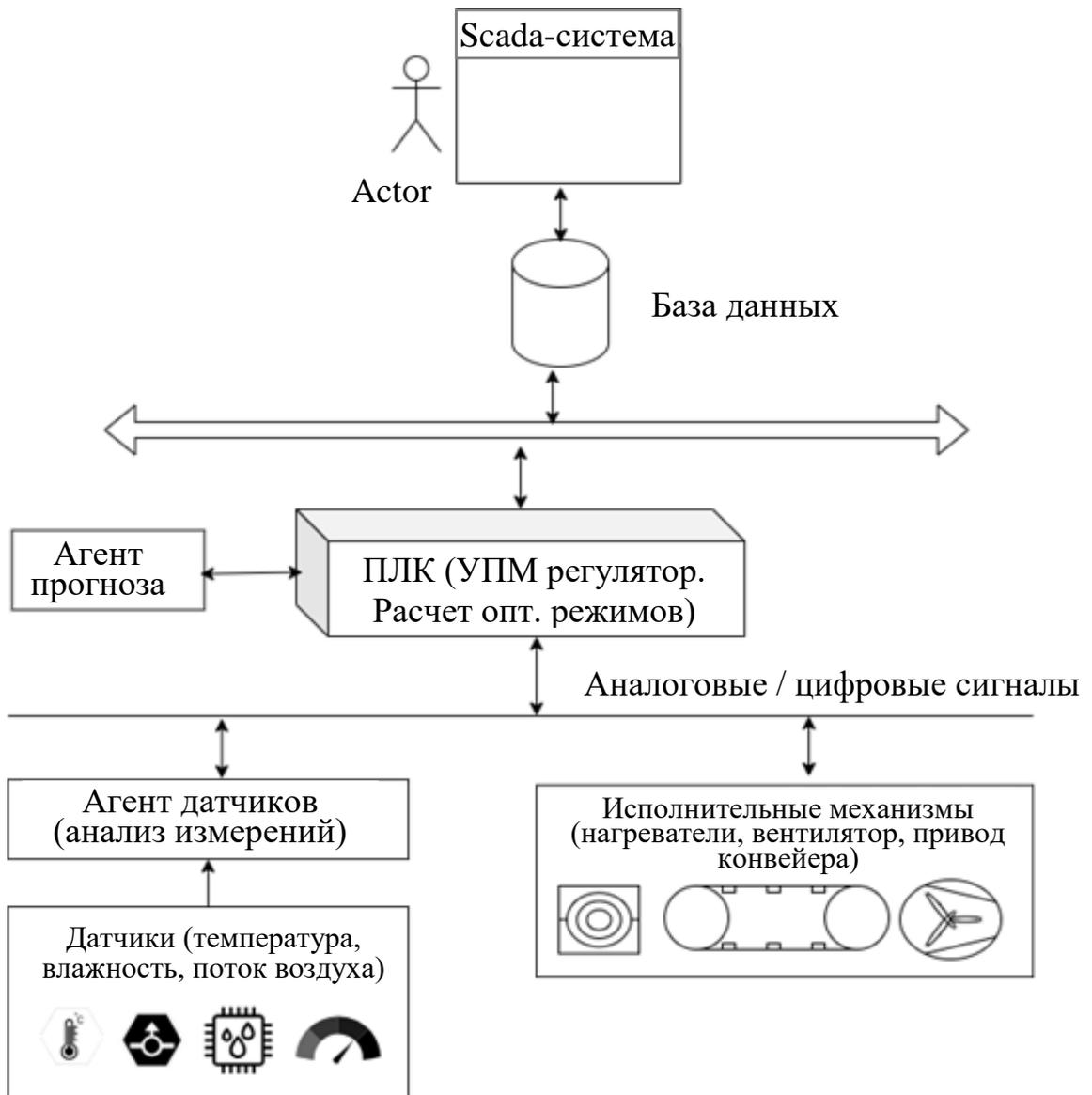


Рисунок 4.4 – Структура системы управления технологическим процессом сушки зеленого чая

На этом уровне интеллектуальный агент обрабатывает комплексные данные, поступающие со среднего уровня, и визуализирует их для оператора. Он предоставляет оператору доступ к информации о текущем состоянии процесса, прогнозируемых изменениях параметров и потенциальных аварийных ситуациях. Оператор может взаимодействовать с агентом, получать предупреждения о рисках для безопасности, отклонениях качества и рекомендации для корректировки параметров процесса сушки. Интеллектуальный агент помогает в принятии решений и оперативном управлении, особенно в нестандартных ситуациях, когда требуется человеческое вмешательство.

До начала работы оборудования оператор должен авторизоваться

(зарегистрироваться), запустить машину. Оператор имеет возможность полной или частичной остановки сушильного оборудования при возникновении отказа элементов системы, также может изменить режим работы оборудования с помощью человеко-машинного интерфейса. Во время реализации процесса система записывает все происходящее, в том числе действия оператора. Это обеспечивает индивидуальную ответственность управляющего оператора. И система управления в случае аварии или другой чрезвычайной ситуации обеспечивает возможность предупредить оператора и выдать ему рекомендации.

Для эффективного мониторинга и управления процессом сушки зеленого чая была разработана реляционная база данных, позволяющая хранить, анализировать и использовать данные, полученные в процессе работы сушильной установки.

База данных включает в себя несколько взаимосвязанных таблиц, каждая из которых выполняет определенную функцию:

1. Сушильные установки.
2. Сушильный агент.
3. Материал.
4. Датчики.
5. Измерения с датчиков
6. Операторы
7. Журнал событий

Все перечисленные множества связаны друг с другом. Для создания базы данных была использована система управления базы данных (СУБД) SQL Server.

Сушильные установки характеризуются их конструктивными параметрами (длина, высота), параметрами движения конвейерной ленты и потребления энергии.

Для мониторинга параметров процесса используются датчики, установленные в различных зонах сушильной камеры. Таблица содержит информацию о типах датчиков и месте их установки.

Измерения с датчиков. В этой таблице хранятся показания датчиков

температуры, влажности и скорости воздуха в зависимости от времени. Эти данные необходимы для анализа эффективности процесса сушки и корректировки режима работы сушильной установки.

Материал термообработки (продукт) характеризуется своей первоначальной M_0 , конечной M_k и равновесной M_e влажностями; начальной T_0 , и выходной T_k температурами; скоростью движения V_c и другими свойствами сушки, такими как теплоёмкости, коэффициент массообмена и т.д.

Сушильный агент характеризуется скоростью, камерной температурой воздуха T_a , выходной температурой T_k и относительной влажностью.

Операторы. В процессе управления сушильной установкой участвуют операторы. В данной таблице хранятся сведения о персонале и их привязка к конкретной сушильной установке.

Журнал событий. Для анализа работы системы регистрируются все события, связанные с изменением режимов сушки, срабатыванием датчиков и действиями операторов. Это позволяет оперативно выявлять возможные сбои и оптимизировать технологический процесс.

Нижний уровень АСУ ТП состоит из различных датчиков (сенсоров) и исполнительных механизмов. Он должен обеспечивать возможность ремонта, испытания механизмов без связи с верхними уровнями автоматизированной системы управления и аварийного отключения механизма при выходе из строя среднего и верхнего уровней системы.

1. Измерительные устройства – датчики.

Датчики играют ключевую роль в мониторинге параметров процесса в реальном времени. Они собирают данные о текущем состоянии системы и передают их регулятору для анализа и корректировки управления.

- Датчики температуры: измеряют температуру воздуха и чая внутри сушильной камеры.
- Датчики влажности: определяют влажность, как воздуха, так и самого чая.
- Датчики потока воздуха: мониторят скорость и направление потока

воздуха, что важно для равномерного распределения тепла.

- Датчики давления: контролируют давление внутри сушильной камеры для предотвращения отклонений.
- Датчики окружающей среды: могут быть использованы для измерения влажности и температуры в помещении, что позволяет учитывать влияние внешних условий.

2. Исполнительные устройства.

Эти устройства непосредственно управляют процессом на основе сигналов, получаемых от контроллера. Исполнительные устройства изменяют параметры работы оборудования, чтобы поддерживать оптимальные условия сушки.

- Нагревательные элементы: регулируют подачу тепла в сушильную камеру.
- Вентиляторы: управляют скоростью потока воздуха, обеспечивая равномерное распределение тепла и удаление влаги.
- Клапаны: контролируют подачу воздуха и регулируют давление внутри системы.
- Конвейеры или вращающиеся лотки: могут использоваться для перемещения листьев чая через сушильную камеру, чтобы обеспечить равномерную сушку.

Средний уровень (уровень контроллеров) состоит из программируемых логических контроллеров (ПЛК). Он принимает необходимые данные от других уровней системы, затем формирует и выдает команды управления на нижний уровень. В данном уровне находится в ПЛК, осуществляется по разработанным алгоритмам УПМ.

Этот уровень выполняет функции управления и координации работы оборудования на основе данных с нижнего уровня. Основные элементы:

- Программируемые логические контроллеры (ПЛК) или промышленные компьютеры.
- Алгоритмы управления (УПМ).
- Локальные панели оператора для отображения параметров процесса и

внесения изменений.

- Коммуникационные интерфейсы для связи с верхним уровнем.

Для управления сложными системами был использован метод декомпозиции (объектно-ориентированный), то есть, при проектировании большой системы необходимо разбить ее на множество подсистем (агентов), каждый из которых характеризуется активностью, автономностью и вовлеченностью в обеспечение функционирования соответствующего этапа производства [115].

Мультиагентные системы (МАС) позволяют разделить управление на агенты, которые взаимодействуют между собой и адаптируются к изменениям в процессе. Архитектура агентов представлена обобщенная информационная зона сушильного оборудования, построенная на основе интеллектуальных агентов предложенного типа.

В рамках данной архитектуры интеллектуальный агент (ИА) способен получать информацию от всех датчиков, находящихся в его информационной зоне. Это позволяет одному и тому же датчику «делиться данными» с несколькими агентами, обеспечивая более гибкую и адаптивную систему управления.

Агент датчиков (анализ измерений)

- Собирает данные с датчиков температуры, влажности и потока воздуха.
- Анализирует полученные значения и передаёт их в контроллер (ПЛК с УПМ-регулятором).

Агент прогноза

- Использует исторические данные и текущие измерения для прогнозирования будущих значений параметров сушки.
- Передаёт прогнозные данные в ПЛК, чтобы регулятор мог заранее рассчитать оптимальные режимы работы.

ПЛК с УПМ-регулятором

- Получает данные от агентов (реальные и прогнозные).

- Вычисляет оптимальные режимы работы системы на основе модели процесса.
- Управляет исполнительными механизмами (нагреватели, вентиляторы, привод конвейера).

SCADA-система

- Собирает данные о процессе сушки.
- Отображает информацию оператору.
- Может хранить данные для дальнейшего анализа и улучшения алгоритмов прогнозирования.

4.3 Разработка автоматической системы управления процессом сушки зеленого чая

4.3.1 Постановка задачи проектирования системы управления

На сегодняшний день большинство контроллеров в управлении сушилки разработаны на основе классической теории управления. Например, применение пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулирования широко распространено благодаря его простой структуре и реализации. Однако, когда входные сигналы системы управления процессом сушки зеленого чая представляют собой только показатели температуры и влажности в текущий момент, выходная ошибка регулятора относительно велика из-за временной задержки системы. Следовательно, контроллер, отслеживающий температуру и влажность слоя зеленого чая в сушилке, должен учитывать информацию не только об идеальных заданных значениях их выходных параметров в текущем моменте, но о будущих таких значениях. В настоящей работе предлагается архитектура управления с отслеживанием температуры и влажности на основе алгоритма прогнозирующего управления [116].

Основная идея прогнозирующего управления состоит в том, чтобы предсказать поведение системы и получить ее локально-оптимальное решение путем вычисления оптимизации функционала качества по алгоритму квадратичного программирования. Результатом решения оптимизации является

управляющий сигнал, соответствующий предсказанным переменным состояния системы в будущем временном периоде [116].

Структура модуля управления с прогнозирующими моделями представлена на рисунке 4.5.

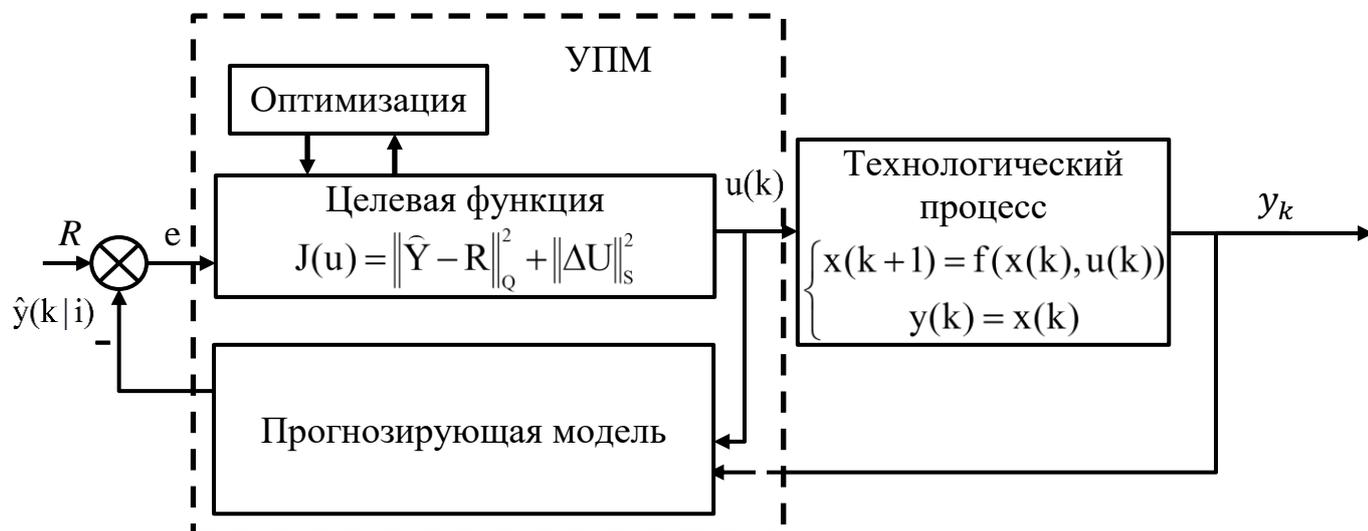


Рисунок 4.5 – Структура модуля управления с прогнозирующими моделями

Данный регулятор состоит из 3 основных компонентов [6]:

1. Блок прогнозирующей модели [6]. Этот блок отвечает за определение будущей последовательности выходных сигналов $\hat{y}(k|i)$ в текущем окне прогноза $[1, N_p]$ в виде зависимых функций от управляющих воздействии $u(k|i)$.

$$\hat{y}(k|i) = f(x(k), u(k|0), u(k|1), \dots, u(k|i)). \quad (4.1)$$

Для нелинейного процесса сушки модель объекта имеет следующий вид:

$$\begin{cases} x(k+1) = f(x(k), u(k)) \\ y(k) = x(k) \end{cases}, \quad (4.2)$$

где f являются нелинейными функциями, указанными в уравнениях (3.10) и (3.11), полученных в главе 3; $x(k) = [M^{\text{теку}} \quad T^{\text{теку}}]^T$; $M^{\text{теку}}$ – текущее значение влажности; $T^{\text{теку}}$ – текущее значение температуры.

Тогда его прогнозирующую модель можно описать следующим образом:

При $i = 1$:

$$\hat{y}(k|1) = \hat{x}(k|1) = f(x(k), \hat{u}(k|0)),$$

При $i = 2$:

$$\begin{aligned}\hat{y}(k|2) &= \hat{x}(k|2) = f(\hat{x}(k|1), \hat{u}(k|1)) = f(f(x(k), \hat{u}(k|0)), \hat{u}(k|1)) = \\ &= (f \circ f)(x(k), \hat{u}(k|0), \hat{u}(k|1)),\end{aligned}$$

$$\vdots$$

При $i = N_p$:

$$\hat{y}(k|N_p) = (f \circ f \dots \circ f)(x(k), \hat{u}(k|0), \hat{u}(k|1), \dots, \hat{u}(k|N_p - 1)).$$

2. Блок целевой функции [6]. Этот блок определяет целевую функцию (4.3) для задачи оптимизации, удовлетворяющей требованиям качества задачи управления.

$$J(u) = \|\hat{Y} - R\|_Q^2 + \|\Delta U\|_S^2, \quad (4.3)$$

где Q, S – веса регуляризации; Y – вектор управляемых переменных, показателей качества, $\hat{Y} = [\hat{y}(k|1), \hat{y}(k|2), \dots, \hat{y}(k|N_p)]$; R – вектор заданных значений показателей качества, $R = [r(k|1), r(k|2), \dots, r(k|N_p)]$; $\Delta U = [\Delta u(k|0), \Delta u(k|1), \dots, \Delta u(k|N_p)]$ – вектор управляющих воздействий; $\Delta u(k|i) = u(k|i+1) - u(k|i)$.

3. Блок оптимизации [6]. Этот блок выполняет задачу оптимизации (4.4) с помощью заранее выбранных алгоритмов для определения управляющего воздействия в данный момент.

$$\Delta U = \arg \min(J(\Delta U)). \quad (4.4)$$

При нахождении решения оптимизации целевой функции (4.3) трудность, обусловленная нелинейностью элемента Y . Для решения данной проблемы в данной работе предположено использовать метод Бокса-Уилсона, на основе которого процесс линеаризации нелинейной модели объекта осуществлялся в каждом временном интервале.

Задача синтеза алгоритма прогнозирующего управления нелинейными объектами включает три основные подзадачи:

- 1) линеаризация исходных нелинейных функций ОУ в параметрическую псевдолинейную модель;
- 2) построение прогнозирующей модели на основе полученной локальной

линейной модели;

3) расчет оптимальных управляющих воздействий на ОУ путем оптимизации целевой функции с помощью алгоритма квадратичного программирования.

4.3.2 Применение метода Бокса-Уилсона к линеаризации в задаче управления нелинейным процессом сушки зеленого чая

Для линеаризации в каждом определенном интервале времени процесса сушки зеленого чая в диссертации используется метод Бокса-Уилсона [106].

Пусть математическая нелинейная модель объекта управления имеет следующий вид:

$$y(k+1) = f(x(k), u(k)), \quad (4.5)$$

где $f(x(k), u(k))$ – нелинейные непрерывные функции; $x(k)$ – вектор переменных состояния объекта; $y(k+1)$ – вектор выходов; $u(k)$ – вектор управляющих воздействий.

Совокупность последовательных состояний объекта управления рассматривается как траектория движения точки в m -мерном пространстве. Значение m – это количество факторов (управляющих воздействий), которые влияют на состояние объекта управления.

В точке текущего состояния системы $y(k)$ проводятся полные расчеты по заданному планированию и нелинейной математической модели (3.10)-(3.11), чтобы оценить влияние варьирования каждого фактора на траекторию состояния объекта управления. На основе полученной оценки строится линейная регрессионная модель объекта в текущий момент.

На цикле данного метода для решения задачи линеаризации используется следующая процедура:

1 – Определение текущего состояния системы: $y(k) = [M^{\text{теку}} \quad T^{\text{теку}}]^T$.

2 – Формирование уровней управляющих воздействий – рассчитываются координаты точек их нижнего и верхнего уровней:

$$u_{\text{вер}} = [T_a^{\text{вер}} \quad v_a^{\text{вер}} \quad v_c^{\text{вер}}]^T, \quad (4.6)$$

$$u_{\text{ниж}} = \begin{bmatrix} T_a^{\text{ниж}} & v_a^{\text{ниж}} & v_c^{\text{ниж}} \end{bmatrix}^T. \quad (4.7)$$

4 – Организация параллельных расчетов – порядок их проведения задается с помощью таблицы планирования (таблица 4.2), обеспечивающей рандомизацию по заданному шаблону.

В таблице цифра «1» обозначает, что в расчете параметр u_i применяет верхнее значение (4.6), а цифра «-1» – нижнее (4.7). После того как проведено 2^m расчетов по плану таблицы 4.2, получим множество значений выходов, заполненных в столбце «Y» таблицы [117].

Число n серий параллельных расчетов определяется по формуле (4.8) [106]:

$$n = 2^m, \quad (4.8)$$

где m – общее количество факторов, которые влияют на состояние объект управления.

5 – Оценка параметров локальной линейной модели – на основе результатов расчетов выполняется приближенное определение коэффициентов локальной модели первого порядка по уравнению (4.11).

$$y(k+1) = y(k) + \sum_{i=1}^m b_i(k)u_i(k), \quad (4.9)$$

где $y = [M, T]^T$, $y(k) = [M^{\text{теку}} \quad T^{\text{теку}}]^T$, $u = [T_a \quad v_a \quad v_c]^T$, M – влажность чая, T – температура чая, $M^{\text{теку}}$ – текущее значение влажности, $T^{\text{теку}}$ – текущее значение температуры.

Модель в виде матрицы:

$$Y(k+1) = Y(k) + B(k)u(k), \quad (4.10)$$

где $B(k) = \begin{bmatrix} b_1^M & b_2^M & b_3^M \\ b_1^T & b_2^T & b_3^T \end{bmatrix}$, $u = [T_a \quad v_a \quad v_c]^T$, $b_i; i = 1, 2, 3$ – коэффициенты нормированного уравнения регрессии первого порядка, определенные по формуле (4.11).

Блок-схема линеаризации процесса сушки зеленого чая представлена на рисунке 4.6.

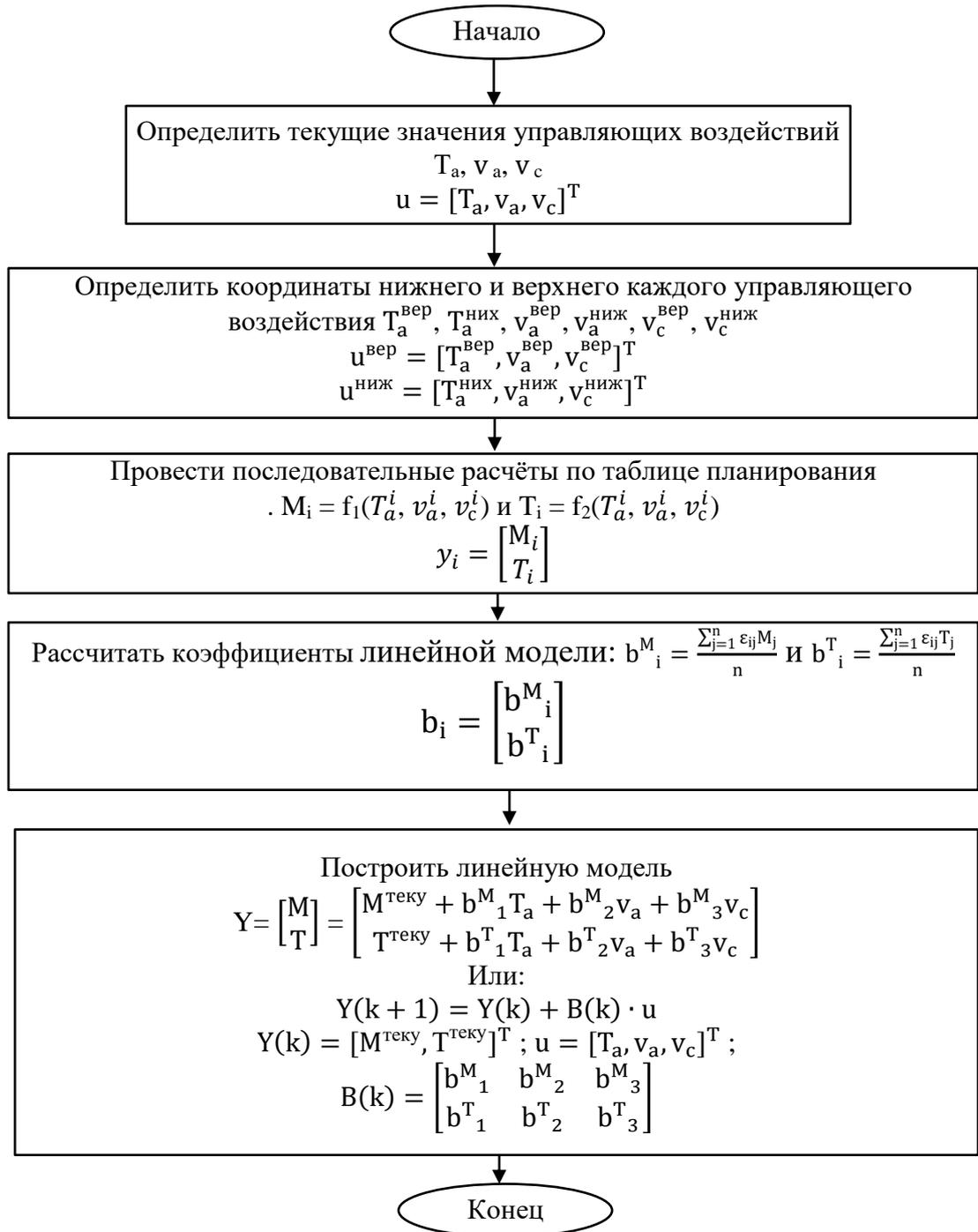


Рисунок 4.6 – Блок-схема линейризации процесса сушки зеленого чая

Коэффициенты (уровень влияния варьирования каждого фактора на объект в текущем моменте) нормированного уравнения регрессии первого порядка определяются по формуле [106]:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} y_j}{n}, \quad (4.11)$$

где ε_{ij} – коды значений параметров, приведенных в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Таблица планирования расчетов [117]

Номер расчета	u_1	u_2	u_3	Y
1	-1	-1	-1	y_1
2	1	-1	-1	y_2
3	-1	1	-1	y_3
4	1	1	-1	y_4
5	-1	-1	1	y_5
6	1	-1	1	y_6
7	-1	1	1	y_7
8	1	1	1	y_8

4.3.3 Оптимизация функционала качества системы сушки зеленого чая

Линеаризация нелинейного объекта N_p раз в каждый момент времени k с использованием результата (4.12) выражена так:

$$\hat{y}(k | i) = \hat{y}(k | i - 1) + B(k)u(k), \quad (4.12)$$

где $i = \overline{1:N_p}$

Более подробно его можно переписать следующим образом (4.13-4.16) (рисунок 4.7):

$$\hat{y}(k | 1) = y(k) + B(k | 0)u(k | 0), \quad (4.13)$$

$$\hat{y}(k | 2) = \hat{y}(k | 1) + B(k | 1)u(k | 1) = y(k) + B(k | 0)u(k | 0) + B(k | 1)u(k | 1), \quad (4.14)$$

⋮

$$\hat{y}(k | N_p) = \hat{y}(k | N_p - 1) + B(k | N_p - 1)u(k | N_p - 1) = y(k) + B(k | 0)u(k | 0) + B(k | 1)u(k | 1) + \dots + B(k | N_p - 1)u(k | N_p - 1). \quad (4.15)$$

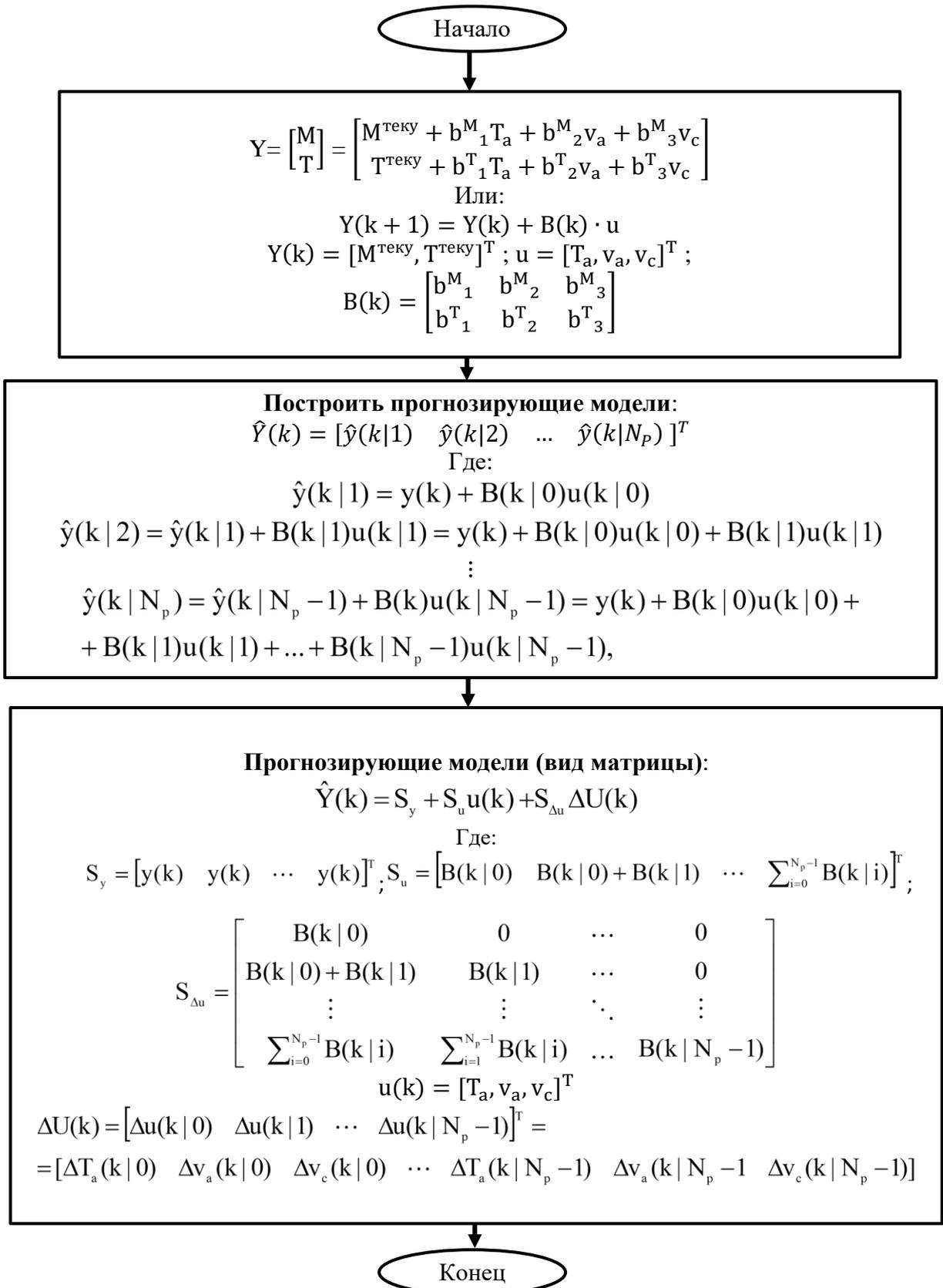


Рисунок 4.7 – Блок-схема построения прогнозирующих моделей

При синтезе данной системы прогнозирующего управления применяется вектор изменения сигнала управления $\Delta u(k|i)$ вместо $u(k|i)$.

$$\hat{u}(k|0) = u(k) + \Delta u(k|0),$$

$$u(k|1) = u(k) + \Delta u(k|0) + \Delta u(k|1),$$

$$\vdots$$

$$\hat{u}(k|N_p - 1) = u(k) + \Delta u(k|0) + \Delta u(k|1) + \dots + \Delta u(k|N_p - 1).$$

Модель прогноза сигналов выходов:

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(k|1) \\ \hat{y}(k|2) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+N_p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B(k|0) \\ B(k|0) + B(k|1) \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_p-1} B(k|i) \end{bmatrix} u(k) \quad (4.16)$$

$$+ \begin{bmatrix} B(k|0) & 0 & \dots & 0 \\ B(k|0) + B(k|1) & B(k|1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_p-1} B(k|i) & \sum_{i=1}^{N_p-1} B(k|i) & \dots & B(k|N_p - 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k|0) \\ \Delta u(k|1) \\ \vdots \\ \Delta u(k|N_p - 1) \end{bmatrix}.$$

Или можно переписать выражения как:

$$Y(k) = S_{B_0} + S_u u(k) + S_{\Delta u} \Delta U(k), \quad (4.17)$$

где $\hat{Y}(k) = [\hat{y}(k|1) \ \hat{y}(k|2) \ \dots \ \hat{y}(k|N_p)]^T$,

$$\Delta U(k) = [\Delta u(k|0) \ \Delta u(k|1) \ \dots \ \Delta u(k|N_p - 1)]^T,$$

$$S_y = [y(k) \ y(k) \ \dots \ y(k)]^T, S_u = [B(k|0) \ B(k|0) + B(k|1) \ \dots \ \sum_{i=0}^{N_p-1} B(k|i)]^T,$$

$$S_{\Delta u} = \begin{bmatrix} B(k|0) & 0 & \dots & 0 \\ B(k|0) + B(k|1) & B(k|1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_p-1} B(k|i) & \sum_{i=1}^{N_p-1} B(k|i) & \dots & B(k|N_p - 1) \end{bmatrix}.$$

При решении задачи оптимизации системы управления процессом сушки зеленого чая используется функционал качества в квадратичной форме с входными ограничениями:

$$J(k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_p} \|\hat{y}(k|i) - r(k|i)\|_Q^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_c} \|\Delta u(k|i)\|_S^2. \quad (4.18)$$

Целевую функцию (4.18) можно переписать как:

$$J(k) = \frac{1}{2} [\hat{Y}(k) - R(k)]^T Q(k) [\hat{Y}(k) - R(k)] + \frac{1}{2} \Delta U(k)^T S(k) \Delta U(k), \quad (4.19)$$

где $R(k) = [r(k|1) \ r(k|2) \ \dots \ r(k|N_p)]^T$ – вектор заданных значений выхода объекта управления на итерации k , $r(k|i) = [M_{\text{зад}}(k|i) \ T_{\text{зад}}(k|i)]$, $Q(k) = \text{diag}[q_1 \ q_2 \ \dots \ q_{N_p}]$, $S(k) = \text{diag}[s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{N_p}]$ – весовые матрицы ($q_i > 0$ и $s_i > 0$).

Подставляя (4.17) в (4.19), получим целевую функцию СУ в виде линейной квадратичной функции вектора управляющих воздействия $\Delta U(k)$ (4.20):

$$J(k) = \frac{1}{2} [S_y + S_u u(k) + S_{\Delta u} \Delta U(k) - R(k)]^T Q(k) [S_y + S_u u(k) + S_{\Delta u} \Delta U(k) - R(k)] + \frac{1}{2} \Delta U^T(k) S(k) \Delta U(k). \quad (4.20)$$

Или можно переписать выражения как:

$$J(k) = J(\Delta U(k)) = \frac{1}{2} \Delta U^T(k) E(k) \Delta U(k) + \Delta U^T(k) F(k) + l(k), \quad (4.21)$$

где $E(k) = S_{\Delta u}^T Q(k) S_{\Delta u} + S(k)$, $F(k) = S_{\Delta u}^T Q(k) [S_y + S_u u(k-1|k) - R(k)]$,

$$l(k) = \frac{1}{2} [S_y + S_u u(k-1|k) - R(k)]^T Q(k) [S_y + S_u u(k-1|k) - R(k)].$$

Таким образом, основная задача системы управления процессом сушки зеленого чая заключается в нахождении вектора оптимальной траектории изменения сигналов управления $\Delta U(k)$ путем минимизации функционала качества (4.21):

$$J(\Delta U(k)) \rightarrow \min. \quad (4.22)$$

При этом:

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta \hat{u}(k+1) \leq \Delta u_{\max}, i = \overline{0: N_c - 1}. \quad (4.23)$$

Уравнения неравенства (4.23) можно записать в форме матрицы, как:

$$\begin{bmatrix} I & 0 & \dots & 0 \\ -I & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & I \\ 0 & 0 & \dots & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k) \\ \Delta \hat{u}(k+1) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k+N_c) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta u_{\max} \\ -\Delta u_{\min} \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta u_{\max} \\ -\Delta u_{\min} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\max} - u(k) \\ -\Delta u_{\min} + u(k) \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta u_{\max} - u(k) \\ -\Delta u_{\min} + u(k) \end{bmatrix}. \quad (4.24)$$

Ограничения в (4.24) являются линейными неравенствами и могут быть выражены в нормальной форме следующим образом:

$$A(k)\Delta U(k) \leq a(k). \quad (4.25)$$

Отметим, что оптимизация целевой функции (4.21) с учетом ограничений неравенства (4.25) сводит к решению стандартной задачи выпуклого квадратичного программирования [107, 108]. Для нахождения оптимальных решений данной задачи (рисунок 4.8) используем условия Куна-Таккера [109, 110], определяющие ограничения по множителю Лагранжа:

$$J(k) = \frac{1}{2} \Delta U^T(k)E(k)\Delta U(k) + \Delta U^T(k)F(k) + l(k) + \lambda^T(k)[A(k)\Delta U(k) - a(k)], \quad (4.26)$$

где $\lambda(k)$ – вектор множителей Лагранжа.

Найдем оптимальные решения векторов $\Delta U(k)$ и $\lambda(k)$ в момент времени k с помощью метода активного набора, установленного в оптимизации по алгоритму квадратичного программирования в виде [111]:

$$\Delta U(k) = -E^{-1}(k)(F(k) + A^T(k)\lambda(k)), \quad (4.27)$$

$$\lambda(k) = -(A(k)E^{-1}(k)A^T(k))^{-1}(a(k) + A(k)E^{-1}(k)F(k)).$$

На основе алгоритма прогнозирующего управления (УПМ) [112] управляющее воздействие на процесс сушки формируется с учётом текущего состояния объекта, ограничений и прогноза поведения системы на несколько шагов вперёд. Из полученного оптимального вектора изменения управления $\Delta U(k)$ используется только первый элемент $\Delta u(k|0)$, как наиболее актуальный на текущий момент времени, с учётом ограничений. Управляющий сигнал на следующем шаге формируется как:

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u(k|0), \quad (4.28)$$

где $\Delta u(k+1) = [1 \ 0 \ \dots \ 0]\Delta U(k)$ – первый элемент вектора решения целевой функции (4.19).

Таким образом, система управления сушки в каждый момент времени анализирует текущее состояние процесса и прогнозирует его поведение на будущее. На основе прогноза рассчитывается, каким должно быть изменение

управляющих сигналов, чтобы достичь желаемого качества сушки.

Начало

Прогнозирующие модели (вид матрицы):

$$\hat{Y}(k) = S_y + S_u u(k) + S_{\Delta u} \Delta U(k)$$

Где:

$$S_y = [y(k) \quad y(k) \quad \dots \quad y(k)]^T; S_u = [B(k|0) \quad B(k|0) + B(k|1) \quad \dots \quad \sum_{i=0}^{N_p-1} B(k|i)]^T;$$

$$S_{\Delta u} = \begin{bmatrix} B(k|0) & 0 & \dots & 0 \\ B(k|0) + B(k|1) & B(k|1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_p-1} B(k|i) & \sum_{i=1}^{N_p-1} B(k|i) & \dots & B(k|N_p-1) \end{bmatrix}$$

$$u(k) = [T_a, v_a, v_c]^T$$

$$\Delta U(k) = [\Delta u(k|0) \quad \Delta u(k|1) \quad \dots \quad \Delta u(k|N_p-1)]^T$$

Целевая функция:

$$J(k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_p} \|\hat{y}(k|i) - r(k|i)\|_Q^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N_p} \|\Delta u(k|i)\|_S^2$$

Или:

$$J(k) = \frac{1}{2} [\hat{Y}(k) - R(k)]^T Q(k) [\hat{Y}(k) - R(k)] + \frac{1}{2} \Delta U(k)^T S(k) \Delta U(k)$$

где $R(k) = [r(k|1) \quad r(k|2) \quad \dots \quad r(k|N_p)]^T$ – вектор заданных значения выхода объекта управления на итерации k ; $Q(k) = \text{diag}[q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_{N_p}]$ и $S(k) = \text{diag}[s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_{N_p}]$ – весовые матрицы ($q_i > 0$ и $s_i > 0$).

$$J(k) = \frac{1}{2} [S_y + S_u u(k) + S_{\Delta u} \Delta U(k) - R(k)]^T Q(k) [S_y + S_u u(k) + S_{\Delta u} \Delta U(k) - R(k)] + \frac{1}{2} \Delta U^T(k) S(k) \Delta U(k),$$

$$J(k) = J(\Delta U(k)) = \frac{1}{2} \Delta U^T(k) E(k) \Delta U(k) + \Delta U^T(k) F(k) + l(k)$$

где $E(k) = S_{\Delta u}^T Q(k) S_{\Delta u} + S(k)$;

$$F(k) = S_{\Delta u}^T Q(k) [S_y + S_u u(k-1|k) - R(k)];$$

$$l(k) = \frac{1}{2} [S_y + S_u u(k-1|k) - R(k)]^T Q(k) [S_y + S_u u(k-1|k) - R(k)]$$

1

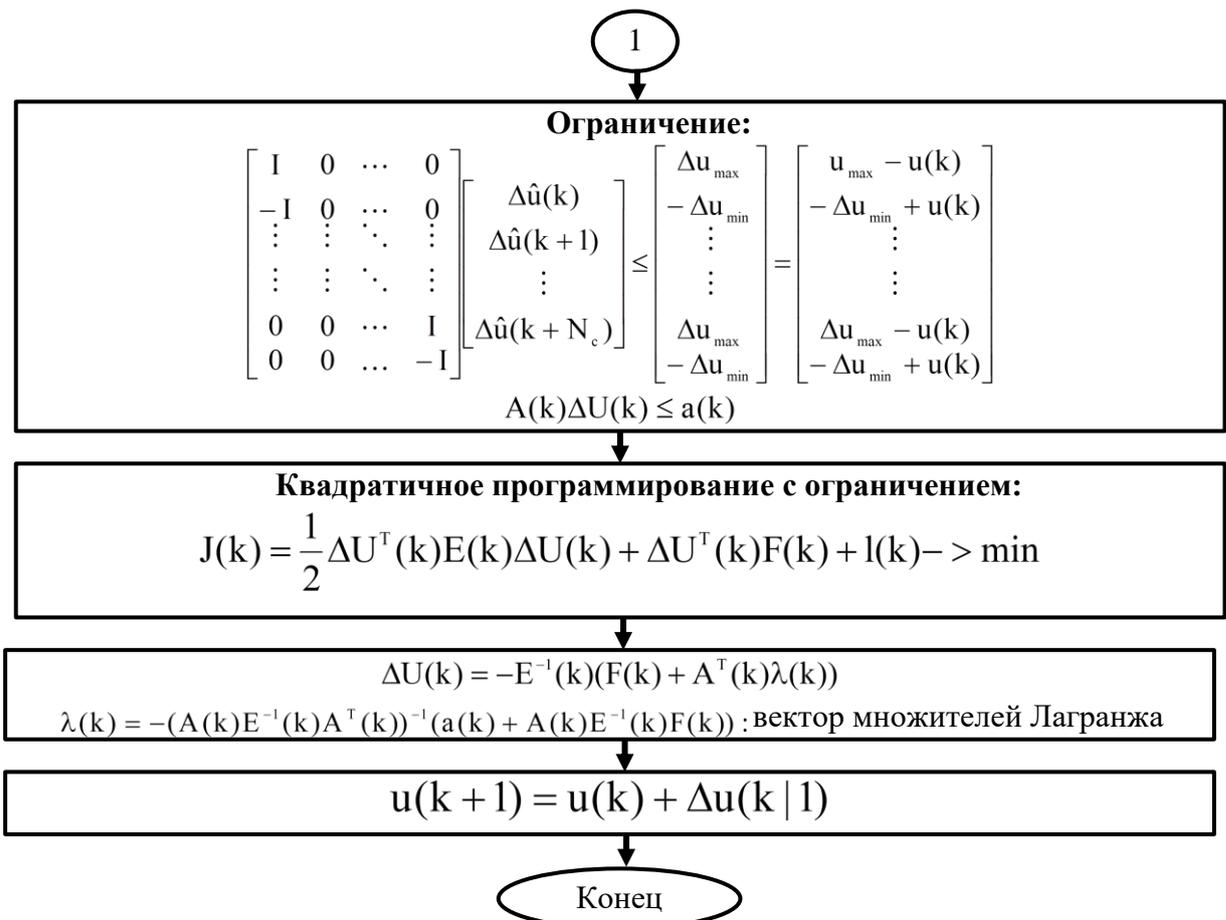


Рисунок 4.8 – Блок-схема оптимизации

Однако, чтобы избежать резких и нежелательных изменений, из вычисленного вектора выбирается только первый шаг – это и есть управляющий сигнал, подаваемый в реальную систему. Такой подход обеспечивает плавное и стабильное управление процессом сушки зелёного чая при соблюдении технологических ограничений.

Сигнал в обратной связи изменяется после процедуры оптимизации и служит начальным условием для следующего момента времени $k + 1$.

4.3.4 Алгоритм формирования управляющих воздействий в системе управления сушкой зелёного чая на основе прогнозирующих моделей

Блок-схема стратегии управления технологическим процессом сушки зеленого чая представлена на рисунке 4.9.

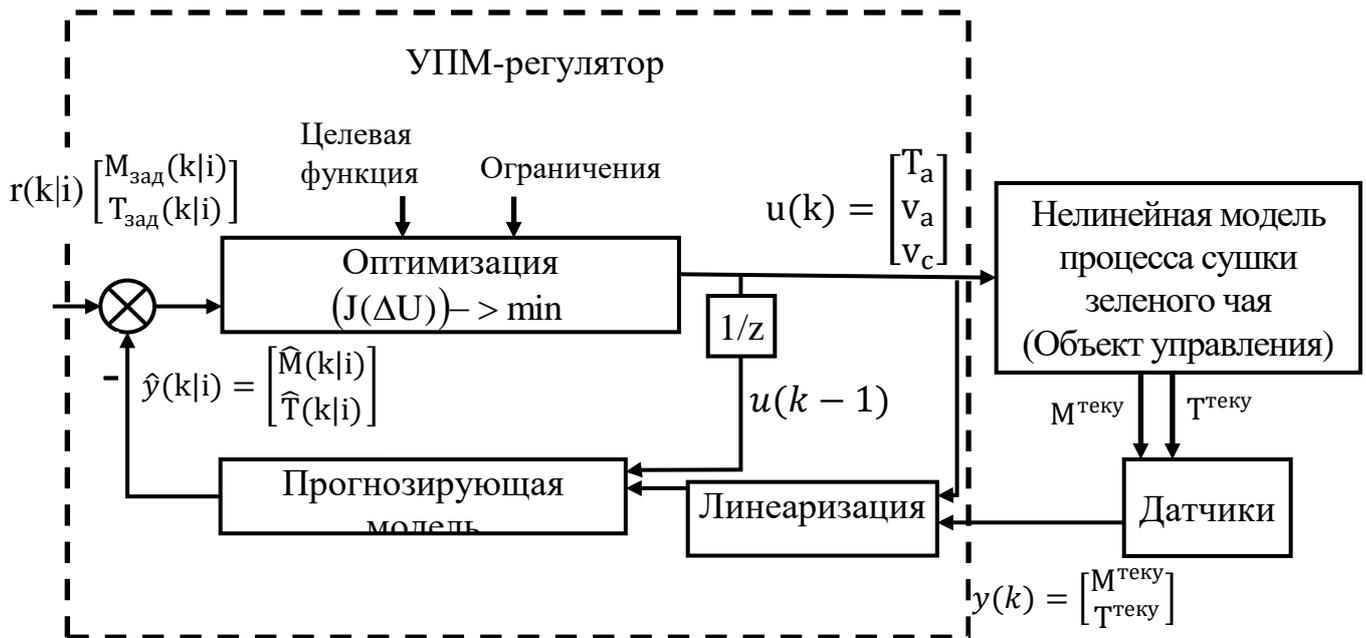


Рисунок 4.9 – Блок-схема управления технологическим процессом сушки зеленого чая

$$R = [r(k|1) \quad r(k|2) \quad \dots \quad r(k|N_p)]^T$$
 – вектор заданных значений,

$$r(k|i) = [M_{\text{зад}}(k|i) \quad T_{\text{зад}}(k|i)];$$

$$\hat{Y}(k) = [\hat{y}(k|1) \quad \hat{y}(k|2) \quad \dots \quad \hat{y}(k|N_p)]^T,$$

$$u = [T_a \quad v_a \quad v_c]^T, y(k) = [M^{\text{теку}} \quad T^{\text{теку}}]^T,$$
 M – влажность чая, T – температура чая, $M^{\text{теку}}$ – текущее значение влажности, $T^{\text{теку}}$ – текущее значение температуры.

Она отражает основные этапы регулирования параметров сушки, включая контроль температуры, скорости воздуха и скорости транспортировки чая, обеспечивая оптимальные условия для достижения требуемого качества продукта.

Модель управляемого объекта выполняет прогнозирование температуры и влажности слоя зеленого чая в сушильной камере на основе сигналов, полученных от технологических датчиков. Измеренные параметры поступают в блок линеаризации, где анализируется их влияние на качество зеленого чая с целью построения локальной линейной модели. Полученные оценки передаются в блок «Прогнозирующие модели», который вычисляет будущие значения параметров.

Разность между прогнозируемыми значениями и заданными параметрами качества чая направляется в процесс оптимизации программного управления. Основная цель этого процесса – минимизация отклонений регулируемых переменных прогнозирующей модели от их заданных значений. При этом в

расчетах учитываются все ограничения, накладываемые на управление и управляющие переменные [117].

Оптимальное управление заключается в определении вектора управляющего сигнала из допустимого множества U таким образом, чтобы достичь поставленной цели и минимизировать значение целевой функции.

Алгоритм системы прогнозирующего управления процессом сушки зеленого чая представлен на рисунке 4.10.

На первом этапе вышеуказанной схемы разрабатывается модель технологического процесса сушки зеленого чая.

Следующим шагом является вычисление заданного значения входа объекта управления, а также ограничений на управляющие воздействия. Далее настраиваются параметры и рассчитываются ограничения прогнозирующего управления.

На следующем этапе из нелинейной построенной модели процесса сушки зеленого чая (раздел 4.3.2) строится линейная прогнозирующая модель качества процесса сушки зеленого чая на основе метода Бокса-Уилсона.

Для оценки адекватности линеаризованной модели была использована среднеквадратическая ошибка (RMSE). Формулы выражены в уравнениях (4.29). Эти показатели позволяют оценить степень соответствия линейной модели исходной нелинейной модели.

Значение статистического критерия для оценки адекватности линеаризованной модели, приведенное в таблице 4.3.

Разница между линейной моделью и нелинейными значениями влажности чая составляет всего 0.142% от значения влажности. Такой результат говорит о высоком качестве модели для влажности чая, так как ошибка составляет менее 1% (что обычно считается очень хорошим результатом для большинства инженерных приложений).

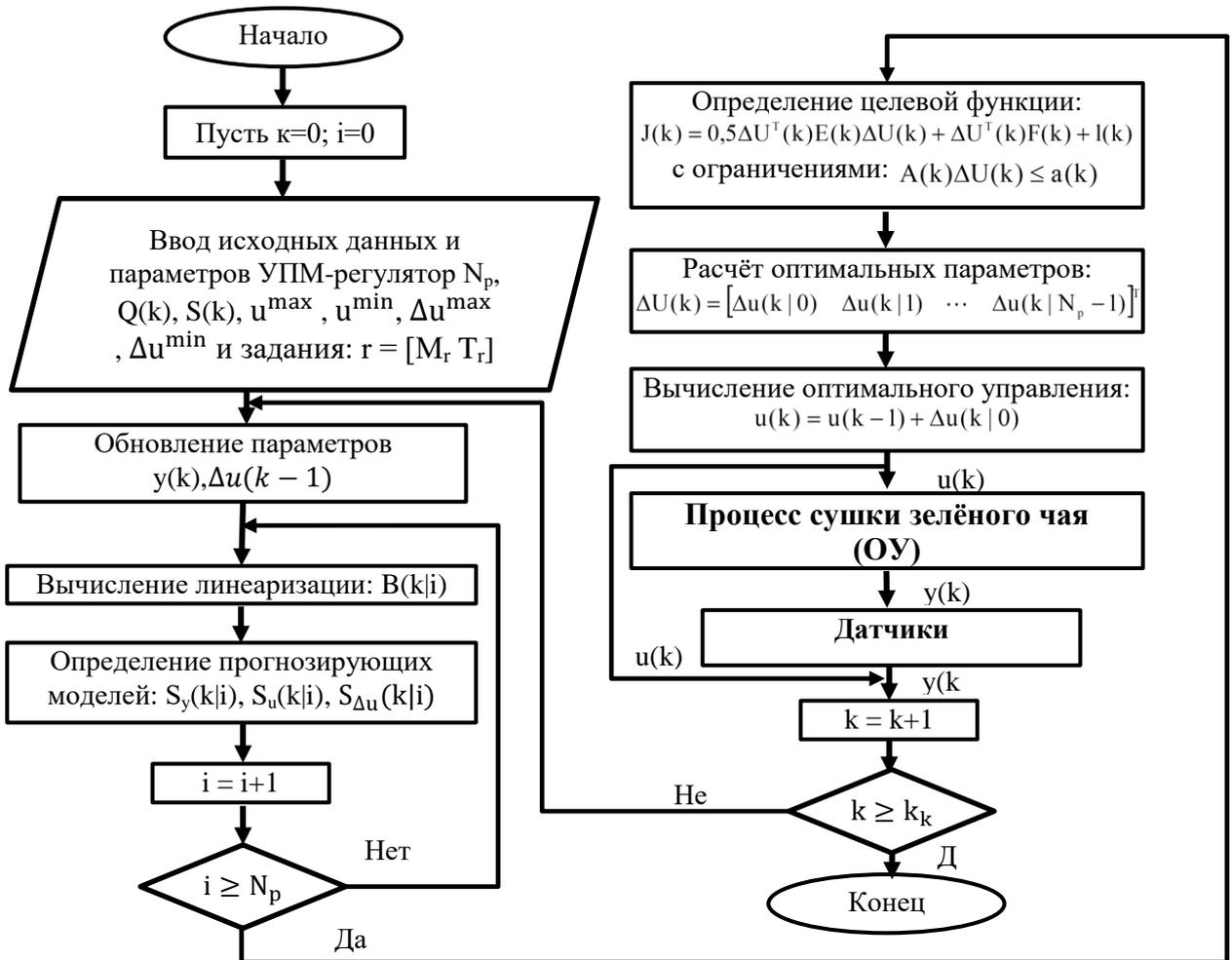


Рисунок 4.10 – Алгоритм прогнозирующего управления процессом сушки зеленого чая

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{nonlin,i} - Y_{lin,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \tag{4.29}$$

где: $Y_{nonlin,i}$ – полученное значение от нелинейной модели, $Y_{lin,i}$ – значение от линейной модели, N – количество точек данных.

Таблица 4.3 – Статистические критерии для оценки адекватности линеаризованной модели

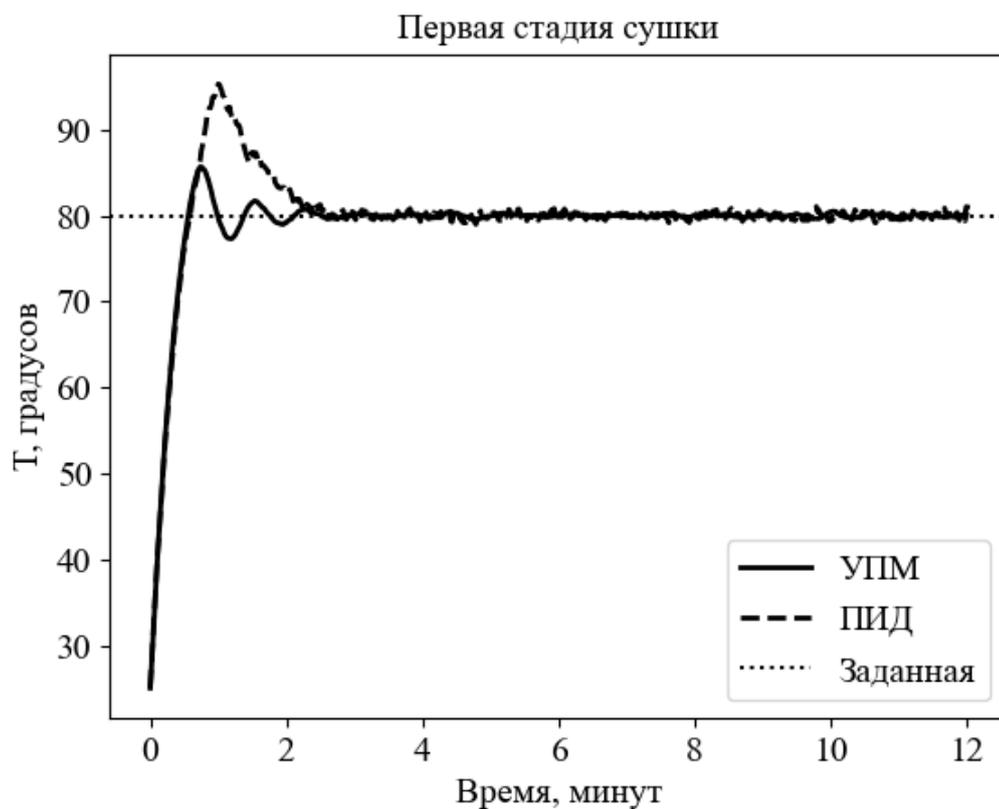
Статистические критерии	Влажность	Температура
Среднеквадратическая ошибка (RMSE)	0,14	0,905

Ошибка для температуры может быть интерпретирована как абсолютная ошибка в градусах. Если вы используете такие параметры, как температура на определенном этапе сушки, то это значение (0,905°C) составляет около 0,86% от максимального значения 105°C, что вполне приемлемо для большинства

процессов, так как ошибка составляет менее 1%.

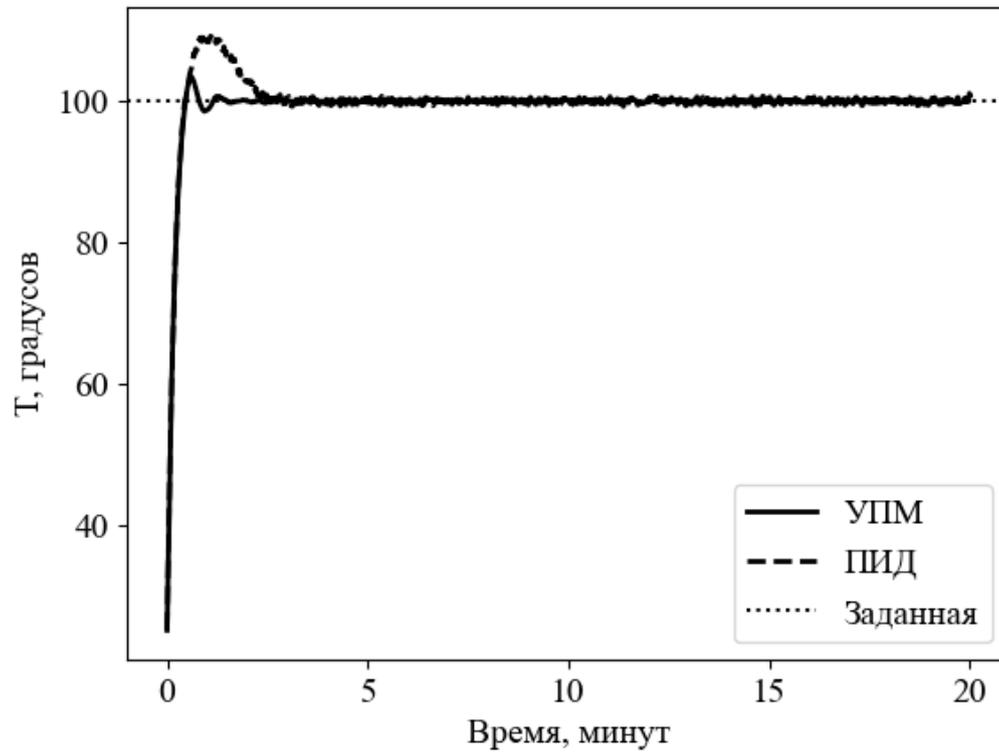
Далее необходимо задать начальный режим работы установки. Определяются расхождения между прогнозируемыми и рассчитанными значениями при заданных условиях управления. После чего проводится минимизация функционала качества для получения оптимального значения управляющих воздействий. Затем производится возврат к началу цикла, чтобы снова осуществить повтор и найти оптимальное решение для управления сушилкой, пока не завершится технологический процесс сушки зеленого чая.

Результат моделирования системы управления процессом сушки зеленого чая показал, что разработанный УПМ-регулятор стабилен и устойчив с точки зрения подавления входных возмущений и обеспечивает более эффективную работу по сравнению с традиционным регулятором (ПИД-регулятор) (рисунок 4.11).



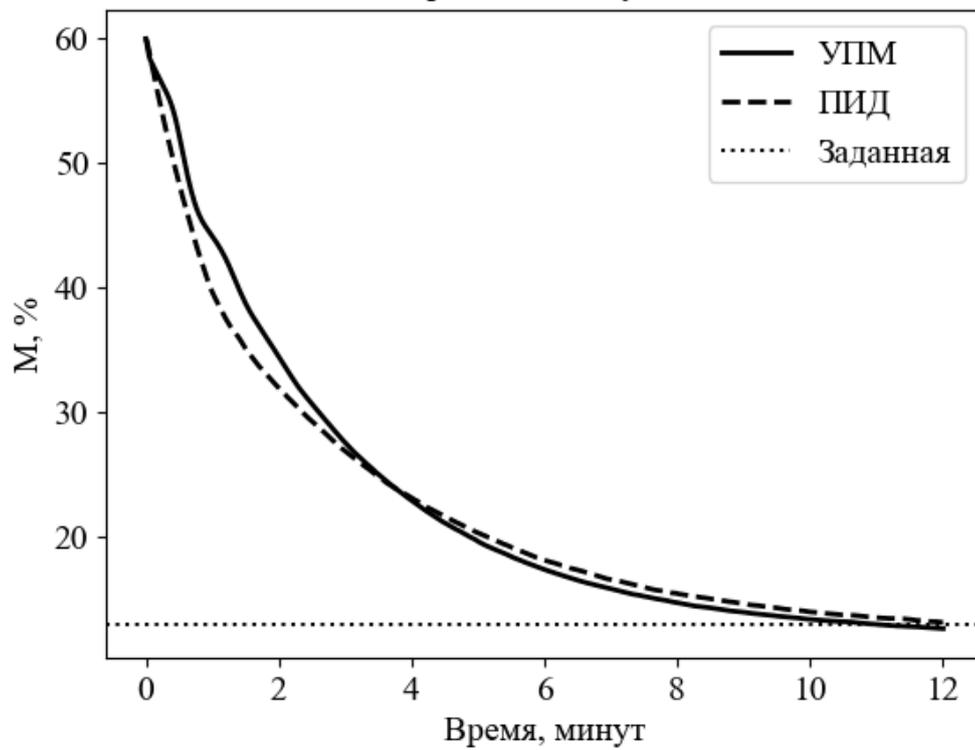
а

Вторая стадия сушки



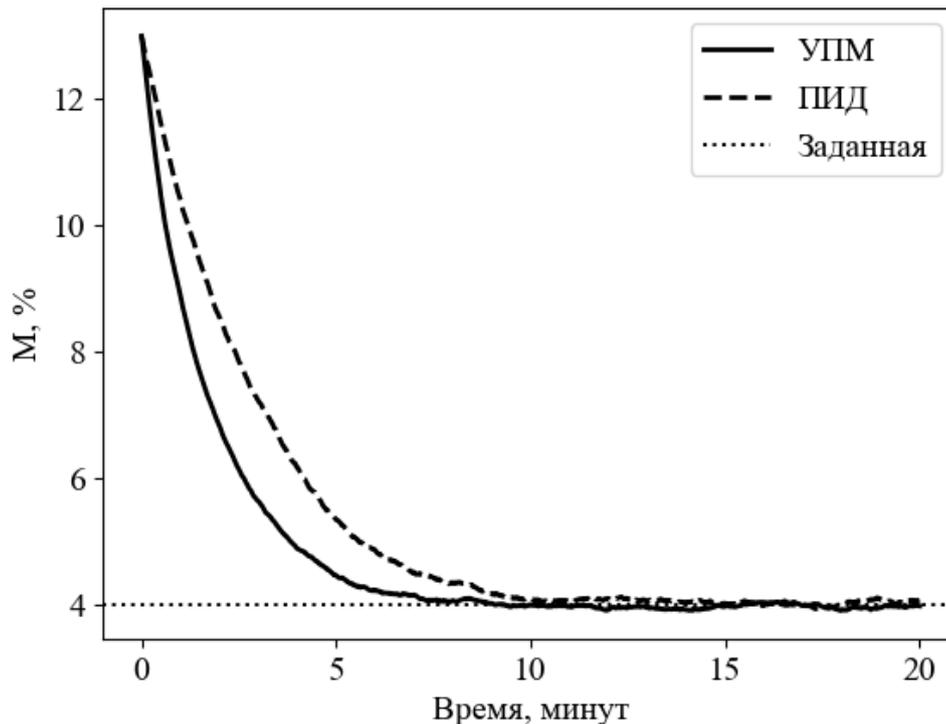
б

Первая стадия сушки



в

Вторая стадия сушки



г

Рисунок 4.11 – Сравнение работы традиционного ПИД-регулятора и УПМ с внедрением метода Бокса–Уилсона в контексте процесса сушки зелёного чая на двух стадиях: а и б – температура, в и д – влажность

На основе представленных графиков можно сделать следующие выводы о повышении эффективности процесса сушки при использовании УПМ-регулятора, в котором использован метод планирования экспериментов для локальной линейной модели в каждом интервале времени:

1. Более точное слежение за температурой

- Графики температуры (4.11 а и 4.11 б) показывают, что разработанный УПМ-регулятор быстрее достигает заданного значения температуры и поддерживает его с меньшими колебаниями по сравнению с традиционным регулятором. Время переходного процесса сокращено на 50% и значение перерегулирования уменьшено на 7,2% (таблица 4.4). Эти условия позволяют уменьшать локальные перегревы, пересушивания и сохранять структуру и аромат зелёного чая.

- Традиционный регулятор демонстрирует плавное выходное воздействие, но он хуже справляется с колебаниями в начальный момент и

дольше стабилизируется.

2. **Более интенсивное снижение влажности:** График влажности (4.11 г) показывает, что использование разработанного УПМ-регулятора позволяет быстрее снижать влажность зеленого чая. Время переходного процесса сокращено на 1,7 минуты (14,7 %).

Таблица 4.4 – Сравнение показателей качества переходных процессов

	Перерегулирование σ , %		Время переходного процесса $t_{п}$, мин	
	Температура	Влажность	Температура	Влажность
Разработанный УПМ-регулятор	2	0,1	1,21	9,8
Традиционный регулятор	9,2	0,2	5,16	11,5

4.4 Оценка эффективности системы управления процессом сушки зеленого чая

Одной из основных задач проектирования системы управления процессом сушки зеленого чая является повышение эффективности процесса сушки зеленого чая.

Разработанные математические модели и автоматическая система управления процессом сушки позволили повысить эффективность процесса зеленого чая более чем на 14,7 % за счет сокращения продолжительности процесса. Используя исходные данные, представленные в таблице 4.5, производился расчет эффекта.

Таблица 4.5 – Таблица планирования расчетов

Показатель	Обозначение	Значение	Единица измерения
Время работы сушилки в день	Ч	16	час
Производительность аппарата	G	100	кг / час
Число рабочих дней в году	D _p	260	дней
Скорость подачи сырого чая в сушилку	P	190	кг / час
Потребляемая мощность	W	15	кВт
Капитальные вложения	K	1,000,000	Руб.

1. Производительность (P , кг/ч)

До оптимизации было $P_{\text{до}}$ 100 кг / час. После сокращения времени сушки на 14,7 % производительность увеличится:

$$P_{\text{после}} = \frac{100}{0,853} = 117,23(\text{кг/час}).$$

То есть производительность выросла на 17,23%.

2. Энергоэффективность (E , кВт·ч/кг испаренной влаги):

До оптимизации:

$$E_{\text{после}} = \frac{W}{m_{\text{испар}}} = \frac{W}{P - G} = \frac{15}{190 - 100} = 0.167(\text{кВт/ч} \cdot \text{кг}).$$

После оптимизации (учитываем снижение энергозатрат на 14,7%):

$$E_{\text{после}} = 0,853 \cdot E_{\text{до}} = 0.142(\text{кВт/ч} \cdot \text{кг}).$$

Энергоэффективность улучшилась на 14,7%.

3. Экономия электроэнергии:

$$W_{\text{год}} = W \cdot \text{Ч} \cdot D_p.$$

До оптимизации:

$$W_{\text{год,до}} = W \cdot \text{Ч} \cdot D_p = 15 \cdot 16 \cdot 260 = 62400(\text{кВт}).$$

После оптимизации:

$$W_{\text{год,после}} = W_{\text{год,до}} \cdot 0,853 = 53227,2(\text{кВт}).$$

Экономия электроэнергии:

$$\Delta W = W_{\text{год,до}} - W_{\text{год,после}} = 9172(\text{кВт}).$$

Стоимость экономии электроэнергии:

$$\mathcal{E}_{\text{эл}} = \Delta W \cdot C = 9172 \cdot 2,85 = 25867,3(\text{руб/год}).$$

4. Дополнительная прибыль от увеличения производительности:

$$\Delta P = P_{\text{год,до}} - P_{\text{год,после}} = 117.23 - 100 = 17.23(\text{кг}).$$

Годовой прирост производства:

$$\Delta A = \Delta P \cdot \text{Ч} \cdot D_p = 17.23 \cdot 16 \cdot 260 = 71676.8(\text{кг/год}).$$

Годовая дополнительная прибыль:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}} = \Delta A \cdot \Pi_{\text{чай}} = 71676,8 \cdot 100 = 7167680(\text{руб}) \cdot$$

Срок окупаемости:

$$T = \frac{K}{\mathcal{E}} = \frac{K}{\mathcal{E}_{\text{эл}} + \mathcal{E}_{\text{пр}}} = \frac{1000000}{7167680 + 25867,3} = 0,14(\text{год}) \cdot$$

Разработанная система управления конвейерной сушилкой позволила повысить производительность процесса сушки зеленого чая на 17,23%. Благодаря сокращению времени прохождения продукта через сушильную установку объем производства увеличился с 100 кг/ч до 117,23 кг/ч, что дало прирост производства на 71,6 тонн чая в год при 16-часовом рабочем дне.

Энергоэффективность процесса также улучшилась – энергопотребление на 1 кг испаренной влаги снизилось на 14,7%, что позволило уменьшить годовые затраты на электроэнергию на 9172 кВт·ч, эквивалентно экономии ≈ 25800 руб./год (при тарифе 2,85 руб./кВт·ч).

Дополнительная прибыль за счет роста объемов производства составила $\approx 2,6$ млн руб./год (при цене реализации 100 руб./кг). Совокупный экономический эффект от внедрения усовершенствованной системы управления составил 2,6 млн руб./год, а срок окупаемости модернизации – менее 2 месяцев.

Таким образом, проведенная оптимизация не только повысила техническую эффективность процесса сушки, но и значительно улучшила его экономические показатели, что подтверждает целесообразность внедрения предложенной системы управления.

4.5 Выводы главы

Проведено исследование технологического процесса сушки зеленого чая как объекта управления, сделан вывод о том, что процесс термообработки зеленого чая в конвейерной сушилке представляет собой сложный и нелинейный объект. Основная задача управления технологическим процессом сушки зеленого чая заключается в поддержании заданной температуры продукта и обеспечении правильного содержания влаги в чайных листьях путем регулирования температуры, скорости воздуха, а также скорости движения слоя зеленого чая.

Предложена методика синтеза системы управления технологическим процессом сушки зеленого чая, построенная на основе методики управления с прогнозирующими моделями. Для построения прогнозирующей модели процесса сушки зеленого чая в данной работе использовался метод оптимизации Бокса-Уилсона.

Результат моделирования системы управления процессом сушки зеленого чая показал, что разработанный УПМ-регулятор стабилен и устойчив с точки зрения подавления входных возмущений и обеспечивает более эффективную работу по сравнению с традиционным регулятором (ПИД-регулятор). Разработанный УПМ-регулятор быстрее достигает заданного значения температуры и поддерживает его с меньшими колебаниями по сравнению с традиционным регулятором. Время переходного процесса сокращено на 50%, и значение перерегулирования уменьшено на 7,2%. Эти условия позволяют уменьшать локальные перегревы, пересушивания и сохранять структуру и аромат зеленого чая. Кроме того, данная методика позволяет быстрее снижать влажность зеленого чая. Время переходного процесса сокращено на 1,7 минут (14,7%), это позволяет увеличить производительность на 17,23% и улучшить энергоэффективность на 14,7%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача для улучшения качественной системы управления технологическим производственным процессом сушки зеленого чая в условиях неопределенности. В диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. В результате анализа особенностей и физико-химических свойств материала, методов и типов сушильного оборудования сушки зеленого чая было выявлено, что технологический процесс сушки зеленого чая является сложным и нелинейным объектом, имеющим нечеткие значения теплофизических параметров. При построении системы автоматического управления необходимо учитывать варьирование теплофизических параметров во время сушки зеленого чая.

2. Проведены экспериментальные исследования, анализ основных закономерностей процесса сушки зеленого чая в конвейерном оборудовании. На основе экспериментальных данных проведен анализ влияния основных параметров (плотность, теплоемкость, коэффициент массообмена и равновесная влажность) на поля влажности и продолжительность сушки, позволивший определить наилучшие режимы процесса.

3. Разработана математическая модель процесса сушки зеленого чая в конвейерном сушильном оборудовании, учитывающая динамическое изменение теплофизических параметров (плотность, теплоемкость, коэффициент массообмена и равновесная влажность) в ходе сушки, что позволяет более точно описывать реальный процесс и повышать эффективность управления. Основой модели является решение дифференциальных систем уравнения в частных производных балансов массы и энергии в процессе сушки зеленого чая.

4. Предложена методика синтеза системы автоматического управления процессом сушки зеленого чая с помощью УПМ-регулятора, в котором линеаризация нелинейного процесса осуществляется с помощью метода Бокса-Уилсона (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023615211). Разработанный алгоритм управления позволяет сократить время

переходного процесса и обеспечить необходимое качество выходного продукта. Что приводит к увеличению производительности сушки зеленого чая в среднем на 17,23% и энергоэффективности на 14,7%.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСУ – Автоматизированные системы управления

ТП – Технологические процессы

ИНС – Искусственная нейронная сеть

УПМ – Управление с прогнозирующими моделями

ПИ – Пропорционально-интегральный

ПИД – Пропорционально-интегрально-дифференцирующий

ДСК – Дифференциальный сканирующий калориметр

ПК – Персональный компьютер

МКР – Метод конечных разностей

ПЛК – Программируемые логические контроллеры

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Похлебкин, В.В. Чай, его история, свойства и употребление / В.В. Похлебкин. – Москва: Центрполиграф, 2004. – 122 с.
2. Кузина, С.А. Изучение полезных свойств зелёного и чёрного чая / С.А. Кузина, А.В. Тимохина // Научная дискуссия современной молодёжи: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей Международной научно-практической конференции, Пенза, 28 сентября 2016 года. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2016. – С. 346-347.
3. Славянский, А.А. Лабораторный практикум по технокимическому контролю чайного сырья и готовой продукции чайного производства: Утверждено Президиумом НМС МГУПП 6 декабря 2006 года / А.А. Славянский, Г.А. Вовк, М.С. Жигалов, М.Б. Мойсеяк. – Москва: Издательский комплекс МГУПП, 2007. – 56 с.
4. Черноусов, Я.О. Изучение отдельных компонентов химического состава чайного листа. Качественный анализ алкалоидов / Я.О. Черноусов // Чай в историческом, культурном, медицинском аспекте: Материалы I научно-теоретической онлайн-конференции с международным участием, Курск, 15 декабря 2020 года. – Курск: Курский государственный медицинский университет, 2020. – С. 414-417.
5. Савельевских, А.В. Чай: книга о том, как наслаждаться вкусом настоящего чая / А.В. Савельевских. – Екатеринбург: У-Фактория, 2003. – 191 с.
6. Патент № 2515902 С2 Российская Федерация, МПК А23F 3/00. Способ производства зеленого чая: № 2012139012/10: заявл. 11.09.2012: опубл. 20.05.2014 / А.В. Рындин, Э.К. Пчихачев, Б. В. Корзун [и др.]; заявитель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт цветоводства и субтропических культур Россельхозакадемии.
7. Васюкова, А.Т. Технология продукции общественного питания: Учебник для бакалавров / А.Т. Васюкова, А.А. Славянский, Д.А. Куликов. – Москва: Дашков и К, 2015. – 496 с.
8. Алтухов, И. В. Анализ способов сушки пищевых продуктов / И.В.

Алтухов, В.Д. Очиров // Вестник ИрГСХА. – 2009. – № 36. – С. 16-21.

9. Иночкина, Е.В. Технология конвективной сушки овощей в среде инертного газа / Е.В Иночкина, Г.И. Касьянов, С.М. Силинская // Техника и технология пищевых производств. – 2014, – № 3 (34). – С. 47-51.

10. Артюхова, С.И. Биопродукт сублимационной сушки - "Целебный" / С.И. Артюхова, Т.Т. Толстогузова // Переработка молока. – 2012. – № 7(153). – С. 54-55.

11. Патент № 2285876 С1 Российская Федерация, МПК F26В 5/06. Способ вакуумной сублимационной сушки: № 2005106076/06: заявл. 28.02.2005: опубл. 20.10.2006 / С.А. Ермаков.

12. Гаврилов, Н.И. Обзор способов сушки пищевых продуктов / Н.И. Гаврилов, Д.В. Поздняков, М.Э. Устинова // Инновационные технологии пищевых производств : сборник тезисов докладов IV Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) студентов, аспирантов и молодых ученых, Севастополь, 22–25 декабря 2021 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2021. – С. 49-51.

13. Trojosky, M. Rotary drums for efficient drying and cooling / M. Trojosky // Drying Technology. – 2019, – № 37 (5), – P. 632-651.

14. Падалко, И.Ю. сушилка с кипящим слоем / И.Ю. Падалко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Посвящена 165-летию В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2018 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 4433-4435.

15. Пахомов, А.Н. Особенности формирования надслоевого пространства в сушилке с кипящим слоем инерта / А.Н. Пахомов, Р.Ю. Банин, Е.А. Черных, Е.Ю. Ловягина // Потенциал современной науки. – 2015. – № 2(10). – С. 36-39.

16. Авторское свидетельство № 1103064 А1 СССР, МПК F26В 25/18, F26В 9/06, F26В 15/18. Тележка туннельной сушилки : № 3542349 : заявл. 10.01.1983 : опубл. 15.07.1984 / С.В. Зубик, Б.И. Шудлив, С.П. Федорович ; заявитель

проектно-конструкторский технологический институт министерства лесной и деревообрабатывающей промышленности УССР.

17. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: Учебное пособие / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – 2-е изд., пер. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2018. – 403 с.

18. Дорохов, И.Н. Системный анализ процессов химической технологии: основы стратегии : Монография / И.Н. Дорохов, В.В. Кафаров, Н.М. Жаворонков. – 2-е изд., пер. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2019. – 499 с.

19. Левинзон, Д.И. Экспериментально-статистические модели оценки степени неоднородности полупроводниковых материалов / Д.И. Левинзон // Сложные системы и процессы. – 2009. – № 1. – С. 9-14.

20. Фам, К.Б. Моделирование процесса сушки зеленого чая / К.Б. Фам, П.М. Мурашев, В.Н. Богатиков // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 3(19). – С. 71-83.

21. Мельников, В.Н. Общая характеристика основных видов математических моделей теории рыболовства / В.Н. Мельников // Вестник астраханского государственного технического университета. Серия: рыбное хозяйство. – 2009. – № 1. – С. 17-22.

22. Shahari, N.A. Mathematical Modelling of Drying Food Products: Application to Tropical Fruits: PhD Thesis. – Nottingham, 2012. – P. 247.

23. Erbay, Z.A. Review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results / Z.A. Erbay // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2010. – Vol. 50, №5. – P. 441-464.

24. Corzo, O. Determination of suitable thin layer model for air drying of mango slices (*mangifera indica* L.) at different air temperatures and velocities / O. Corzo, N. Bracho, C. Alvarez // Journal of Food Process Engineering. – 2011. – Vol. 34. – № 2. – P. 332-350.

25. Cuperaa, J. Sampling times influence the estimate of parameters in the Weibull dissolution model / J. Cuperaa, P. Lansky, Z. Sklupalova // European Journal of Pharmaceutical Sciences. – 2015. – V.78. – P. 171-176.

26. Medina, J.R. Comparative in vitro dissolution study of carbamazepine immediate-release products using the USP paddles method and the flow-through cell system / J.R. Medina, D.K. Salazar, M. Hurtado, A.R. Cortés, A.M. Domínguez Ramírez // Saudi Pharmaceutical Journal. – 2014. – V.22, №2. – P. 141–147.

27. Shittu, T.A. Thin layer drying of African breadfruit (*Treculia africana*) seeds: modeling and rehydration capacity / T.A. Shittu, A.O. Raji // Food and Bioprocess Technology. – 2011. – V. 4. – № 2. – P. 224-231.

28. Doymaz, I. Mathematical modelling of thin-layer drying of kiwifruit slices / I. Doymaz // Journal of Food Processing and Preservation. – 2009. – V. 33. – № 1. – P. 145-160.

29. Doymaz, I. An experimental study on drying of green apples / I. Doymaz // Drying Technology. – 2009. – V. 27. – № 3. – P. 478-485.

30. Shi, J. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating / J. Shi // LWT – Food Science and Technology. – 2008. – V. 41. – № 10. – P. 1962-1972.

31. Гороховский, А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05 / Гороховский Александр Григорьевич. – СПб., 2008. – 40 с.

32. Алексанян, И.Ю. Математическое моделирование тепломассопереноса при распылительной сушке растительных экстрактов / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2013. – № 1. – С. 9-13.

33. Липин, А.А. Моделирование процессов тепломассопереноса при капсулировании гранул в фонтанирующем слое / А.А. Липин, В.О. Небукин, А.Г. Липин // Известия высших учебных заведений: Химия и химическая технология. – 2018, – № 61.4-5 – С. 98-104.

34. Чохонелидзе, А.Н. Математическая модель для процесса термообработки какао-бобов/ А.Н. Чохонелидзе, Л. Форгор, В. Браун-Аквей //

Вестник евразийской науки. – 2014. – № 6 (25). – С. 126.

35. Лемпого, Ф. Моделирование и управление технологическим процессом термообработки какао-бобов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Лемпого Форгор. – Тверь, 2015. – 22 с.

36. Рудобашта, С.П. Теоретические модели кинетики сушки дисперсных материалов / С.П. Рудобашта, Зуева Г.А. // Промышленная теплотехника. – 2009. № 7. С. 109-115.

37. Гальцева, О.А. Микроскопическое описание процесса диффузии примеси из водоема в упругий пористый грунт / О.А. Гальцева // Прикладная математика & Физика. – 2017– №20 (269). – Вып.48. – С. 151-162.

38. Стрелов, В.И. Управление ростом кристаллов и моделирование процессов тепломассопереноса для условий микрогравитации: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.18. – М., 2004. – 32 с.

39. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. - 2-е изд. - М. : Энергия, 1968. - 471 с.

40. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса. / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов.– М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.

41. Лыков, А.В. Тепломассообмен: Справочник. / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 560 с.

42. Whitaker, S. Coupled Transport in Multiphase Systems: a Theory of Drying / S. Whitaker // Advances in Heat Transfer. – New York: Academic Press Inc, 1998. – V.31. – P. 1-104.

43. Whitaker, S. Heat and Mass Transfer in Granular Porous Media / S. Whitaker // Advances in Drying. – 1980. – V.1. – P. 23-61.

44. Whitaker, S. Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying / S. Whitaker // Advances in Heat Transfer. – New York: Academic Press Inc, 1977. – V.13. – P. 119–203.

45. Рудобашта, С.П. Использование теоретических положений академика А.В. Лыкова в современных моделях тепломассообмена при сушке / С.П. Рудобашта // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки

материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова, Москва, 22–23 сентября 2015 года. – Москва: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2015. – С. 21-28.

46. Антипов, С.Т. Моделирование процесса вакуум-сублимационной сушки гранулированных продуктов / С.Т. Антипов, А.С. Шахов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2016. – № 3(69). – С. 56-60.

47. Никитенко, Н.И. Математическое моделирование динамики процесса обезвоживания слоя диспергированного коллоидного капиллярно-пористого материала / Н.И. Никитенко, Ю.Ф. Снежкин, Н.Н. Сороковая // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т.28. – № 4. – С. 34-36.

48. Шишацкий, Ю.И. Повышение эффективности процесса тепловой обработки какао-бобов и арахиса / Ю.И. Шишацкий, Г.В. Агафонов, С.А. Никель, О.А. Семенихин. – Москва: Пищепромиздат, 2007. – 133 с.

49. Будников, Д.А. Интенсификация сушки зерна активным вентилированием с использованием электромагнитного поля СВЧ: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Будников Дмитрий Александрович. – зерноград, 2008. – 164 с.

50. Афоничев, Д.Н. Повышение качества сушки окрашиваемых поверхностей машин / Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев, В.В. Василенко, И.И. Аксенов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 3(50). – С. 159-164.

51. Файзрахманов, Р.А. Моделирование процесса контроля сушки и пропитки древесины с использованием измерений на основе нечеткой логики / Р.А. Файзрахманов, С.В. Смагин, В.С. Байков // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – Т. 12, № 9. – С. 21-26.

52. Палюх, Б.В. Основы построения и разработки автоматизированной системы управления эксплуатационной надежностью химических производств:

дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Палюх Борис Васильевич – М., 1991. – 336 с.

53. Заде, Л.А. Нечеткие системы и мягкие вычисления / Л.А. Заде // *Information and Control*. – 1965, – № 8.3. – С. 338-353.

54. Гороховский, А.Г. Моделирование процесса сушки пиломатериалов / А.Г. Гороховский, В.В. Побединский, Е.Е. Шишкина, Е.В. Побединский // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2020, – № 1 (373). – С. 154-166.

55. Гороховский, А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05 / Гороховский Александр Григорьевич. – Екатеринбург, 2008. – 290 с.

56. Ткачев, В.В. Моделирование управления сушкой зерна в шахтной зерносушилке / В.В. Ткачев, К.В. Соснин // *Научные труды Одесской национальной академии пищевых технологий*. – 2014. – Т. 46, № 1. – С. 223-229.

57. Нгуен, Д.Т. Управление и моделирование процессов сушки риса с использованием нечетких регуляторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.16 / Нгуен Дык Тханг. – М., 1998. – 12 с.

58. Pirrello, L. Development of a Fuzzy Logic Controller for a Rotary Dryer with Self-Tuning of Scaling Factor / L. Pirrello, L. Yliniemi, K. Leiviskä // *Control Engineering Laboratory-Report A*. – 2001. – № 17.

59. Бобков, В.И. Нечётко-логическая кинетическая модель сушки окатышей / В.И. Бобков, В.В. Борисов, М.В. Черновалова // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2019. – № 5(121). – С. 15-21.

60. Абдурагимов, Т.Т. Технические науки информатика, вычислительная техника и управление / Т.Т. Абдурагимов, В.Б. Мелехин, В.М. Хачумов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. – 2017. – № 44 (1). – С. 48-60.

61. Волынский, В.Ю. Математическое моделирование процесса термообработки полотенных материалов в сушильно-ширильной машине / В.Ю. Волынский, Я.С. Стороженко // *Известия высших учебных заведений. Серия:*

Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57, № 2. – С. 108-111.

62. Стороженко, Я.С. Нейросетевая модель термообработки полотенных материалов в сушильно-ширильной машине / Я.С. Стороженко, В.Ю. Волинский, В.А. Зайцев // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2013. – № 1(33). – С. 86-91.

63. Лихтенберг, С.Р. Моделирование промышленного процесса сушки с применением искусственных нейронных сетей / С.Р. Лихтенберг, Н.В. Мячин // Молодежный научно-технический вестник. – 2014. – № 4. – С. 23.

64. Дивеев, А.И. Нейронечеткое управление процессом сушки пиломатериалов / А.И. Дивеев, А.В. Полтавский, А. Алхатем // Надежность и качество сложных систем. – 2021. – № 3(35). – С. 93-97.

65. Tayfun, M. Modeling of Freeze-Drying Behaviors of Strawberries by using Artificial Neural Network / M. Tayfun // Journal of Thermal Science and Technology: Printed in Turkey. – 2009. – V. 29. – № 2. – P. 11–21.

66. Канатова, А.М. Модельный прогноз контроля процесса сушки зерна / А.М. Канатова, Е.С. Умбетов // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 73-3. – С. 100-104.

67. Ali, E. Optimization-based tuning of nonlinear model predictive control with state estimation / E. Ali, E. Zafiriou // Journal of Process Control. – 1993. – № 3.2. – P. 97-107.

68. Kiriya, E. Three-state extended kalman filter for mobile robot localization / E. Kiriya, M. Buehler // McGill University. – Montreal, Canada, Tech. Rep. TR-CIM. – 2002. – № 5. 23 pp.

69. Algöwer, F. Nonlinear model predictive control / F. Algöwer, A. Zheng // Springer International Publishing, 2017. – P. 112.

70. Теличкин, Р.С. Разработка и научное обоснование способа распылительной сушки экстракта зеленого чая: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Теличкин Роман Сергеевич, 2020. – 187 с.

71. Didriksen, H. Model based predictive control of a rotary dryer / H. Didriksen // Chemical Engineering Journal. – 2002. – № 86(1-2), – P.53-60.

72. Musch, H.E. Nonlinear model predictive control of timber drying / H.E. Musch, G.W. Barton, T.A.G. Langrish, A.S. Brooke // *Computers & chemical engineering*. – 1998, – № 22(3). – P. 415-425.

73. Abukhalifeh, H. Model predictive control of an infrared-convective dryer / H. Abukhalifeh, R. Dhib, M.E. Fayed // *Drying technology*. – 2005, – № 23(3), – P. 497-511.

74. Фам, К.Б. Прогнозирующее управление индексом качества процесса сушки зеленого чая / К.Б. Фам, П.М. Мурашев, В.Н. Богатилов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. – 2022. – № 4(16). – С. 63-76.

75. Короткий, И.А. Определение теплофизических свойств компонентов плодовоовощной смеси в процессе замораживания / И.А. Короткий, Г.Ф. Сахабутдинова, М.И. Ибрагимов // *Техника и технология пищевых производств*. – 2016. – № 1(40). – С. 81-86.

76. Пузик, Л.М. физические и теплофизические свойства капусты брюссельской / Л.М. Пузик, В.А. Бондаренко // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2015. – № 3. – С. 107-110.

77. Петрашева, М.А. Измерительное устройство для определения теплофизических свойств жидкой фазы дефектных растительных тканей картофеля / М.А. Петрашева, П.В. Балабанов, А.Г. Дивин [и др.] // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 37-43.

78. Chen, L.I. Research on Main Physical Properties of Tea Leaves in High-quality Green Tea Processing / L.I. Chen, A.I. Zeyi, Y.U. Zhi // *Journal of Tea Science*. – 2019. – № 39(6).

79. Zanoelo, E.F. Thermophysical properties of mate leaves: experimental determination and theoretical effect of moisture content / E.F. Zanoelo, C. Beninca, E. Ribeiro // *Journal of Food Process Engineering*. – 2011. – № 34(6). – P. 2124-2136.

80. Patil, R.T. Thin layer drying of components of fresh alfalfa / R.T. Patil, S. Sokhansanj, E.A. Arinze, G.J. Schoenau // *Transactions of the ASAE*. – 1992. – №

34(6), – P. 343-346.

81. Jayas, D.S. Review of thin-layer drying and wetting equations / D.S. Jayas, S. Cenkowski, S. Pabis et al. // *Drying technology*. – 1991. – № 9(3). – P. 551-588.

82. Henderson, S.M. Grain drying theory, I / S.M. Henderson // *Temperature effect on drying coefficient J. Agr. Eng. Res.* – 1961. – № 6(3). – P. 169-173.

83. Bruce, D.M. Apparatus for determining mass transfer coefficients at high temperatures for exposed particulate crops, with initial results for wheat and hops / D.M. Bruce, R.A. Sykes // *Journal of Agricultural Engineering Research*. – 1983. – № 28(5). – P. 385-400.

84. Panchariya, P.C. Thin-layer modelling of black tea drying process / P.C. Panchariya, D. Popovic, A.L. Sharma // *Journal of food engineering*. – 2002. – № 52(4). – P. 349-357.

85. Yan, J.W. Influence of Moisture Content and Bulk Density on Thermal Diffusivity of Green Teas / J.W. Yan, L. He, L. Y. Yang // *Advanced Materials Research*. – 2012. Vol. 452, – P. 56-60.

86. Astatke A., Gebresenbet G. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. – 1998. – P. 29-31.

87. Irtwange, S.V. Influence of moisture content on thermal diffusivity and specific heat of African Yam Bean (*Sphenostylis stenocarpa*) / S.V. Irtwange, J.C. Igbeka // *Transactions of the ASABE*. – 2003. – № 46 (6), P. 1633–1636.

88. Алексанян, И.Ю. *Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование* / И.Ю. Алексанян, А.А. Буйнов // – Астрахань: АГТУ, 2004. – 380 с.

89. Алексанян, И.Ю. *Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.18.12* / Алексанян Игорь Юрьевич. – Астрахань, 2001. – 266 с.

90. Алексанян, И.Ю. *Оптические и теплофизические характеристики баклажанов* / И.Ю. Алексанян, А.В. Ревина // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. – 2005. – № 4(287). – С. 49-52.

91. Фоменко, Е.В. Определение гигроскопических свойств и десорбционных параметров в технологии гранулирования пшеничной клейковины / Е.В. Фоменко, И.Ю. Алексанян, О.А. Петровичев, В.Н. Лысова // Вестник Международной академии холода. – 2019. – № 2. – С. 86-94.

92. Гинзбург, А.С. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов / А.С. Гинзбург, И.М. Савина. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982, –280 с.

93. Гинзбург, А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов: учебник для вузов / А.С. Гинзбург. – М.: Энергия, 1973. – 528 с.

94. Ярыгин, О.Н. Системная динамика как основа современной управленческой компетентности / О.Н. Ярыгин, А.А. Коростелев // Актуальные проблемы экономики и права. – 2014. – № 4. – С. 196-205.

95. Колесов, Ю. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы / Ю. Колесов, Ю. Сениченков. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. – 224 с.

96. Тоичкин, Н.А. Система обнаружения предаварийных ситуаций шаровой мельницы процесса измельчения руды / Н.А. Тоичкин, С.В. Охота, Б.В. Палюх и др. // Программные продукты, системы и алгоритмы. – 2014. – № 4. – С. 17-34.

97. Пономарев, В.Б. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций. / В.Б. Пономарев, А.Б. Лошкарев // Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. – 114 с.

98. Ядровская, М.В. Средства моделирования в обучении / М.В. Ядровская // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2010, – № 7(1). – С. 89-95.

99. Kamke, F. Computer simulation of a rotary dryer. Part I: Retention time / F. Kamke, J. Wilson // AIChE Journal. – 1986, – № 32(2). – P. 263–268.

100. Chen, G. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying / G. Chen // Computers and Electronics in Agriculture. – 2009, – № 68. – P. 78–87.

101. Koop, L. A dynamic two-dimensional model for deep-bed drying of mate leaves (*Plex paraguariensis*) in a single-pass/single-zone conveyor-belt dryer / L. Koop, L. Tussolini, F.A. Pedersen Voll, E.F. Zanoelo // *Drying Technology*. – 2015. – № 33(2) – pp. 185-193.
102. Системный анализ процессов химической технологии: методы неравновесной термодинамики: Монография / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, Э.М. Кольцова, Н.М. Жаворонков. – 2-е изд., пер. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2018. – 367 с.
103. Леоненков, А. Нечеткое моделирование в средах MATLAB и fuzzyTECH / А. Леоненков. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2010. – 736 с.
104. Круглов, В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети: учебное пособие/ В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
105. MATLAB Release Notes for R2008a. MathWorks [Электронный ресурс] – 2019 – URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/release-notes.Highlight/> (дата обращения 15.02.2019). – Текст: электронный.
106. Vox, G.E.P. On the Experimental Attainment, of Optimum Conditions / G.E.P. Vox, K.B. Wilson // *Journal of the Royal Statistical society, series B*, 13. – 1992. – № 1,1. – P. 270-310.
107. Пупков, К.А. Методы синтеза оптимальных систем автоматического управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 510 с.
108. Nocedal, J. Numerical optimization / J. Nocedal, S. Wright – London: Springer Science & Business Media, 2006. – 664 pp.
109. Camacho, E.F. Nonlinear Model Predictive Control. In: Model Predictive control / E.F. Camacho // *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*. – London: SpringerVerlag, 2007. – 495 pp.
110. Camacho, E F. Model Predictive Control / E.F. Camacho, C.B. Alba – London: Springer-Verlag, 2004. – 405 pp.
111. Чан Хыу Фыонг. Исследование системы управления следящими

электроприводами наведения крупного радиотелескопа под воздействием возмущений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. [Электронный ресурс]. – Москва, 2020. – URL:

[https://vak.minobrnauki.gov.ru/az/server/php/filer_new.php?table=att_case&fld=autoref&key\[\]=100051421](https://vak.minobrnauki.gov.ru/az/server/php/filer_new.php?table=att_case&fld=autoref&key[]=100051421) (дата обращения: 27.05.2022)

112. Jadbabaie, A. Unconstrained receding-horizon control of nonlinear systems / A. Jadbabaie, J. Yu, J. Hauser // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2001. – V. 46(5). – P. 776-783.

113. Макаш, И.С. Структура системы управления технологическим процессом сушки основного отхода производства в спиртовой отрасли / И.С. Макаш, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 11. – С. 152-154..

114. Павловец, П.В. Микропроцессорные средства и системы: учебно-методический комплекс для студентов специальности 1-40 02 01 «Вычислительные машины, системы и сети». – Новополюцк: ПГУ, 2011. – 363 с.

115. Аксенов, К.А. Моделирование и принятие решений в организационно-технических системах: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 220400 – Управление в технических системах / К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова. – : М.: Флинта, 2015. – 104 с.

116. Фам, К.Б. Прогнозирующее управление индексом качества процесса сушки зеленого чая / К.Б. Фам, П.М. Мурашев, В.Н. Богатиков // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – № 4(16). – С. 63-76.

117. Богатиков, В.Н. Разработка алгоритма программной реализации управления с прогнозирующими моделями технологическими промышленными процессами / В.Н. Богатиков, Г.Н. Санаева, К.Б. Фам, А.Ю. Ключин // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 87-94.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023615211

**«Программа синтеза адаптивного регулятора для систем
управления процессом сушки зеленого чая»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ) (RU)*

Авторы: *Фам Куанг Банг (VN), Богатиков Валерий
Николаевич (RU), Мурашев Павел Михайлович (RU)*

Заявка № **2023613844**
Дата поступления **27 февраля 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **13 марта 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 **Ю.С. Зубов**



ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акт о внедрении результатов диссертации в учебный процесс на факультете «Кибернетика» Новомосковского института РХТУ им. Д.И. Менделеева

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
по учебной и научной работе
НИ (Ф) РХТУ им. Менделеева
К.т.н., доцент

 А.В. Овчаров

«03» сентября 2025г.

АКТ

о внедрении результатов диссертации работы Фама Куанга Банга в учебный процесс на факультете «Кибернетика» Новомосковского института (филиала) Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева

Результаты диссертационной работы Фама Куанга Банга на тему «Управление технологическим процессом сушки зеленого чая в условиях неопределённости», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)», показали, что алгоритмы системы обеспечивают:

1. адаптивное управление процессом сушки за счёт учета динамических изменений теплофизических параметров материала;
2. эффективное использование прогнозирующих моделей для коррекции управляющих воздействий, что позволило достичь равномерности высушивания и минимизации энергозатрат;
3. использование прогнозирующих моделей и метода Бокса–Уилсона для нахождения градиентов обеспечивает оперативную корректировку параметров управления в реальном времени, что особенно важно в условиях изменяющихся внешних факторов;
4. своевременную оценку рисков и предотвращение опасных ситуаций благодаря диагностическим моделям, построенным на основе анализа текущего состояния системы;
5. применение технологий интеллектуальных агентов для улучшения гибкости и адаптивности системы управления, что позволило обрабатывать данные в распределённой среде и оперативно реагировать на изменения внешних условий.

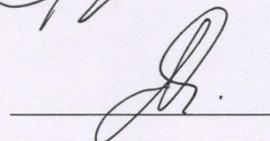
Внедрены в учебный процесс на факультете «Кибернетика» Новомосковского института (филиала) Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева и используются в курсах «Моделирование процессов и систем», «Интеллектуальные системы управления», читаемых на кафедре «Автоматизация производственных процессов» для студентов 3 и 4 курсов по направлению подготовки 15.03.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств» и по дисциплинам «Интеллектуальные системы в химической технологии», «Методы искусственного интеллекта в управлении химическими производствами» для магистров по направлению подготовки 18.04.01 – Химическая технология.

Декан факультета
«Кибернетика»
к.т.н., доцент



Гербер Ю.В.

Заведующий кафедрой «Автоматизация
производственных процессов»
к.т.н., доцент



Лопатин А.Г.