

На правах рукописи



Фам Куанг Банг

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕЛЕНОГО
ЧАЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь – 2025

Работа выполнена на кафедре информационных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственной технической университет» (ФГБОУ ВО «ТвГТУ»).

Научный руководитель: Богатиков Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы» ФГБОУ ВО «ТвГТУ»

Официальные оппоненты: Егоров Александр Фёдорович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Кибернетика химико-технологических процессов» ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», г. Москва

Каргин Виталий Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет», г. Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет», г. Тверь

Защита состоится «25» ноября 2025 г. В 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.410.01 в ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет» по адресу: 170026, г. Тверь, набережная Афанасия Никитина, 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тверского государственного технического университета и на сайте www.tstu.tver.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.410.01
д. ф.-м. н., проф.

С. М. Дзюба

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. 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 5 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.

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.

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.

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 зеленого 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.

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

Научные 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.

Достоверность научных положений подтверждается корректной постановкой задач исследования, обоснованным использованием теории и практики физической химии, математической статистики и современных достижений теории и практики вычислительной техники, сопоставлением результатов выполненных расчетов с экспериментальными данными, а также актами испытаний и свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023615211.

Участие автора. Все представленные в диссертации исследования непосредственно принадлежат автору. Автором лично разработан, реализован и апробирован комплекс алгоритмов для решения поставленных задач.

Апробация результатов 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 опубликовано 17 работа, в том числе 4 статьи 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цель

и задачи работы, определены объект и предмет исследования, доказана практическая и научная новизна, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы характеристики стадий переработки зеленого чая в промышленном производстве, и при проведении анализа состава и свойств зеленого чая показана необходимость процесса сушки.

Проведен обзор основных способов сушки пищевых продуктов в промышленном производстве с применением различных типов оборудования. Исходя из данного анализа обоснован выбор подходящего метода и оборудования для сушки зеленого чая в условиях промышленного производства.

Рассмотрены характеристики современных методов моделирования и управления, применяемых к технологическому промышленному процессу сушки пищевых продуктов, выявлены достоинства и недостатки таких методов.

На основе обзора научно-технической литературы по характеристике способов сушки пищевых продуктов в промышленном производстве и современных подходов к моделированию системы управления технологическим промышленным процессом сушки сформулированы основные научные задачи исследования.

Во второй главе произведен анализ теплофизических свойств (плотности, удельной теплоемкости и т.д.) зеленого чая при различных условиях сушки. Полученные результаты позволяют построить математические зависимости удельной теплоемкости C (Дж/(кг К)) и плотности ρ (кг/м³) от температуры и влажности зеленого чая, а также зависимость коэффициента массообмена сушки K (1/с) от температуры и скорости воздуха. Такие формулы описываются следующим образом:

Для плотности зеленого чая (ρ , кг/м³):

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

где $M(t)$ – влажность зеленого чая, %; M_0 – начальная влажность зеленого чая, %; β ($= 0,0368$) – коэффициент усадки высыхающего материала (1/кг испарившейся воды).

Функция зависимости C от M :

$$C(M) = 1440M(t) + 2746. \quad (2)$$

Функция зависимости коэффициента массообмена от скорости и температуры воздуха:

$$K = (0,00028(T_a - 45)v_a) - 0,00067, \quad (3)$$

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

Для определения значения равновесной влажности зеленого чая (M_e) в процессе сушки был проведен анализ влияния относительной влажности и температуры воздуха на эту величину. Из результата анализа построена аппроксимация равновесной влажности зеленого чая на основе нечеткой логики.

Входными переменными нечеткого блока являются относительная влажность M и температура T воздуха. А выходной величиной является равновесная влажность M_e (рисунок 1).

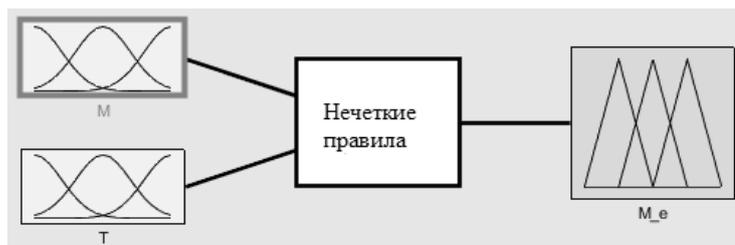


Рисунок 1 – Входы и выход переменных блока нечеткой логики

Аппроксимация зависимости равновесной влажности зеленого чая от относительной влажности и температуры воздуха реализована в компьютерной программе Fuzzy Logic Toolbox приложения Matlab (рисунок 2).

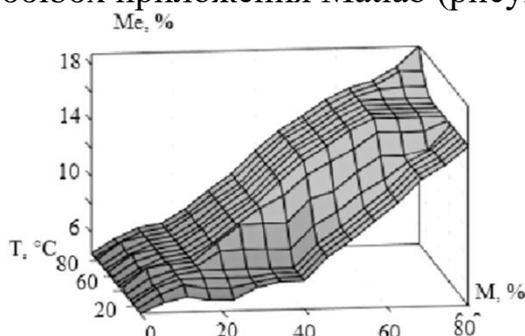


Рисунок 2 – Нечеткий вывод функций $M_e = f(T, M)$

Полученные математические зависимости теплофизических свойств зеленого чая от температуры, влажности и других параметров могут быть использованы для более удобного проектирования и моделирования процесса сушки в инженерной практике.

В третьей главе построена математическая модель процесса сушки зеленого чая в сушильном оборудовании конвейерного типа.

Уравнение баланса массы представлено формулой (4):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = K(M - M_e) - v_c \frac{\partial M}{\partial l}, \quad (4)$$

где M – влажность слоя зеленого чая, %; K – коэффициент массообмена, $1/c$; M_e – равновесная влажность зеленого чая, %, l – осевая координата, м.

Уравнение энергетического баланса представлено формулой (5):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K(M - M_e)}{C + C_w M} (C_v (T_a - T) + \lambda + C_w T) - v_c \frac{\partial T}{\partial l} + \frac{h(T_a - T)}{C + C_w M}, \quad (5)$$

где T – температура зеленого чая, °C; T_a – температура воздуха, °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, $Дж$.

Основные теплофизические характеристики представлены в таблице 1.

Для решения данных дифференциальных уравнений в частных производных использовали метод конечных разностей, имеющей первый порядок аппроксимации по координате и по времени.

Получили уравнения для прогнозирования изменений температуры и влажности чайных листьев во время сушки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{M_i^{j+1} - M_i^j}{\Delta t} = K(M_i^j - M_e) - v_c \frac{M_{i+1}^j - M_i^j}{\Delta l} \\ \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \frac{K(M_i^j - M_e)}{C + C_w M_i^j} (C_v (T_a - T_i^j) + \lambda + C_w T_i^j) - v_c \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta l} + \frac{h(T_a - T_i^j)}{C + C_w M_i^j} \end{array} \right. \quad (6)$$

Таблица 1 – Тепловые параметры процесса сушки зеленого чая

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} M_i^{j+1} = M_i^j + f_1(M_i, T_i) \Delta t \\ T_i^{j+1} = T_i^j + f_2(M_i, T_i) \Delta t \end{array} \right. \quad (7)$$

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

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

Блок-схема методики определения полей влажности и температуры зеленого чая, которая учитывает динамическое изменение теплофизических параметров (плотность, теплоемкость, коэффициент массообмена и равновесная влажность) в ходе сушки, представлена на рисунке 3. На рисунках 4 показаны графики сравнения расчетных кривых по модели с экспериментальными данными сушки зеленого чая.

Для оценки качества разработанной модели были использованы основные статистические показатели, включая среднеквадратическую ошибку (RMSE) и среднюю абсолютную ошибку (MAE). Формулы выражены в уравнениях (8) – (9). Эти показатели позволяют оценить степень соответствия модели экспериментальным данным (таблица 2).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{pre,i} - Y_{exp,i}, \quad (8)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{pre,i} - Y_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

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

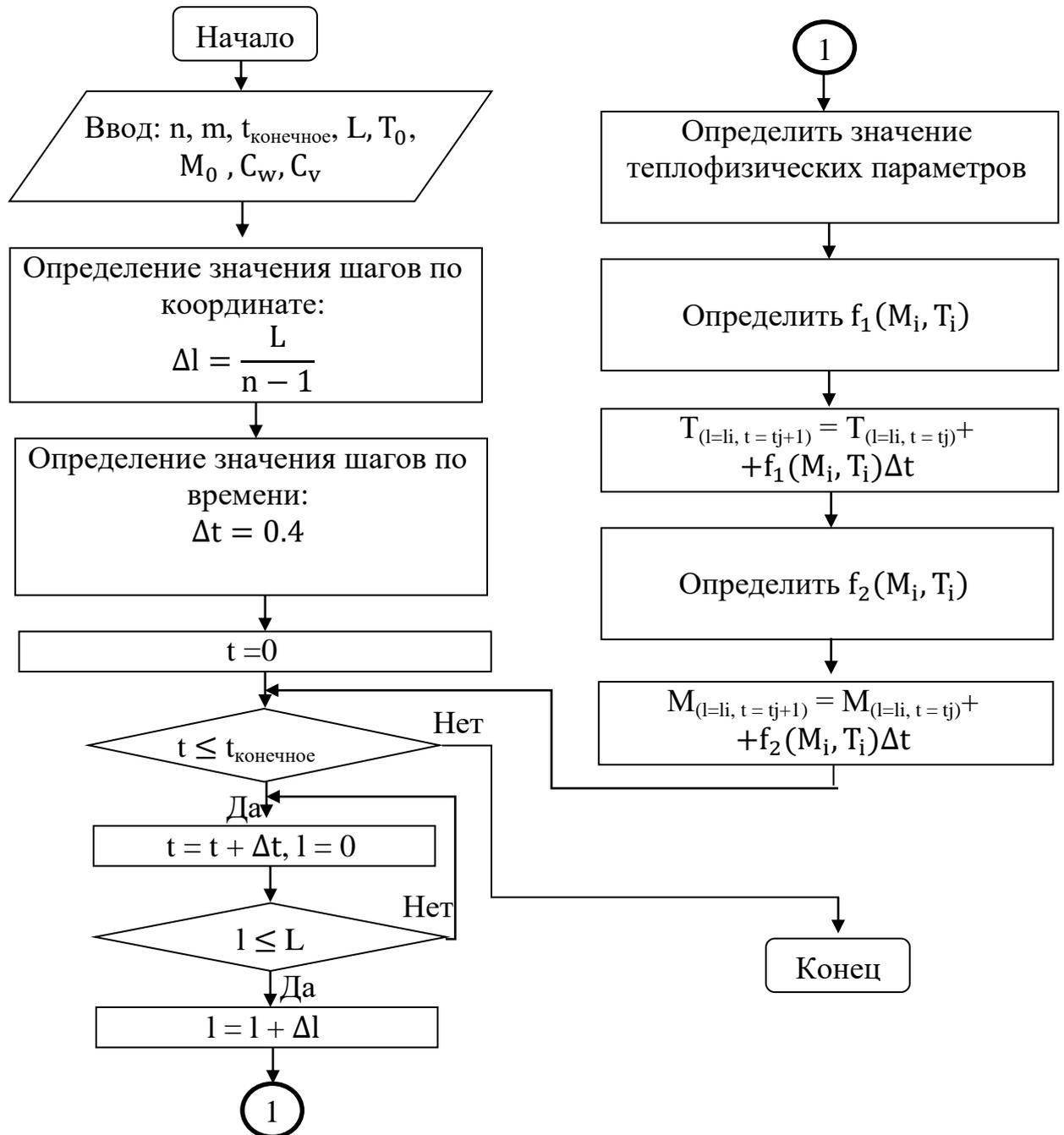
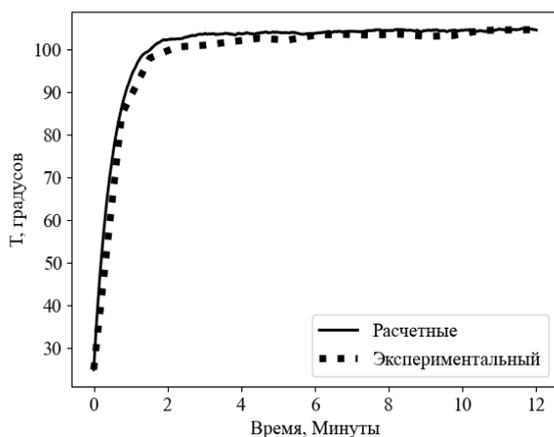


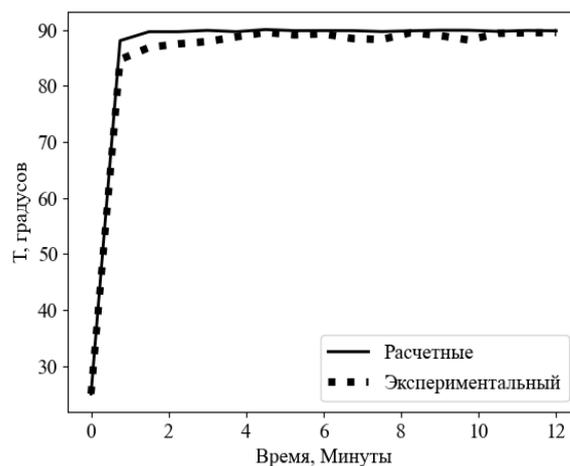
Рисунок 3 – Блок-схема моделирования процесса сушки зеленого чая

Таблица 2 – Статистические показатели качества разработанной модели

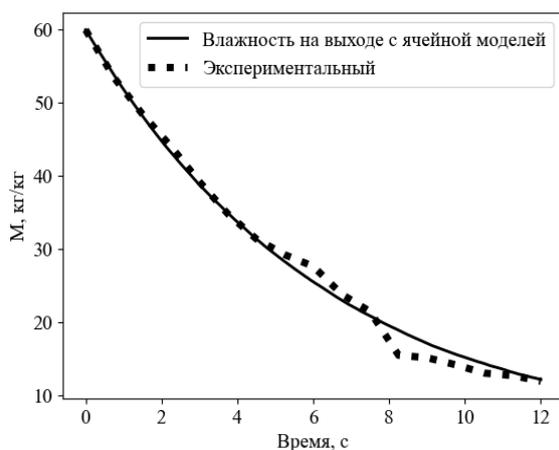
Статистические критерии	Влажность		Температура	
	Первой этап	Второй этап	Первой этап	Второй этап
Среднеквадратическая ошибка (RMSE)	0,5783	0,5108	2.2414	0.7086
Средняя абсолютная ошибка (MAE)	0,5041	0,3146	2.7753	0.5141



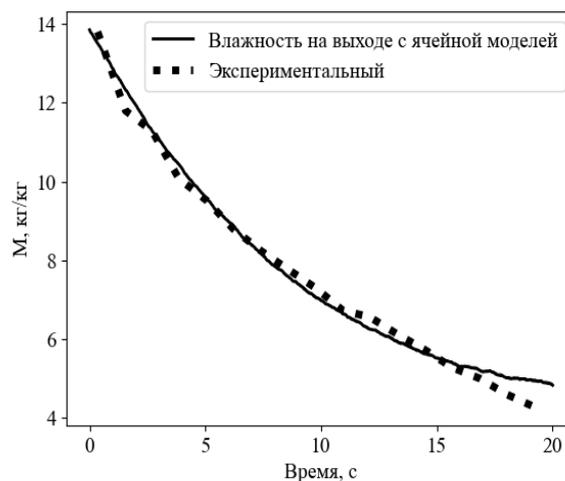
а,



б,



в,



д,

Рисунок 4 – Сравнения расчетных кривых по разработанной модели с экспериментальными данными сушки зеленого чая: а и б – температура, в и д – влажность

В четвертой главе рассматривается вопрос построения системы управления процессом сушки зеленого чая. Для решения данного вопроса в начале главы произведен анализ процесса сушки зеленого чая как объекта управления и его особенностей. Результаты анализа показали, что с точки зрения автоматизации процесс сушки является сложным нелинейным объектом, так как для построения математического описания процесса сушки и методики формирования системы управления необходимо решить систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, в которых содержится множество параметров сушильного материала, сушильного агента, а также условий окружающей среды.

Стратегия управления процессом сушки зеленого чая заключается в регулировании температуры (T_a), скорости движения ленты (v_c) и воздуха (v_a) для достижения необходимых показателей чайного продукта при рациональном использовании производственных затрат.

Структура схемы системы управления технологическим процессом сушки зеленого чая показана на рисунке 5. Блок-схема алгоритма системы управления процессом сушки зеленого чая представлена на рисунке 7.

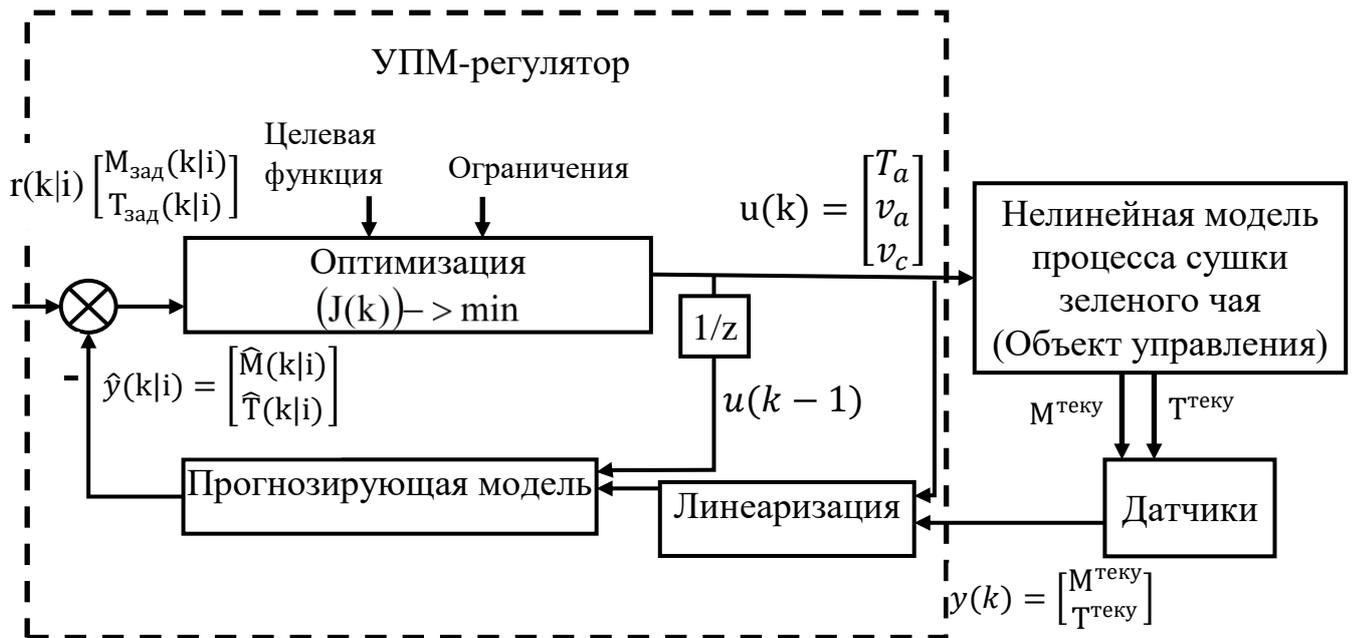


Рисунок 5 – Структурная схема системы управления

$R = [r(k|1) \quad r(k|2) \quad \dots \quad r(k|N_p)]^T$ – вектор заданных значений,
 $r(k|i) = [M_{\text{зад}}(k|i) \quad T_{\text{зад}}(k|i)]$, $\hat{Y}(k) = [\hat{y}(k|1) \quad \hat{y}(k|2) \quad \dots \quad \hat{y}(k|N_p)]^T$,
 $y(k) = [M^{\text{теку}} \quad T^{\text{теку}}]^T$, $u = [T_a \quad v_a \quad v_c]^T$, M – влажность чая, T – температура чая,
 $M^{\text{теку}}$ – текущее значение влажности, $T^{\text{теку}}$ – текущее значение температуры.

Методика синтеза системы управления, построенной на основе управления с прогнозирующими моделями, технологическим процессом сушки зеленого чая включает 4 этапа.

1. Первый этап: линеаризация (рисунок 6)

Исходная нелинейная модели процесса сушки зеленого чая:

$$\left\{ \begin{array}{l} x(k+1) = \begin{pmatrix} M_N(k+1) \\ T_N(k+1) \end{pmatrix} = T_k^j + \begin{pmatrix} M_N(k) + \left(K(k)(M_N(k) - M_e(k)) - v_c \frac{M_N(k) - M_{N-1}(k)}{\Delta t} \right) \Delta t \\ \frac{K(k)(M_N(k) - M_e(k))}{C_s(k) + C_w M_N(k)} (C_s(k)(T_a - T_N(k)) + \lambda + C_w T_N(k)) - \\ \frac{T_N(k) - T_{N-1}(k)}{v_c \Delta t} + \frac{h(T_a - T_N(k))}{C_s(k) + C_w M_N(k)} \end{pmatrix} \Delta t \\ y(k) = x(k) = \begin{pmatrix} M_N(k) \\ T_N(k) \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

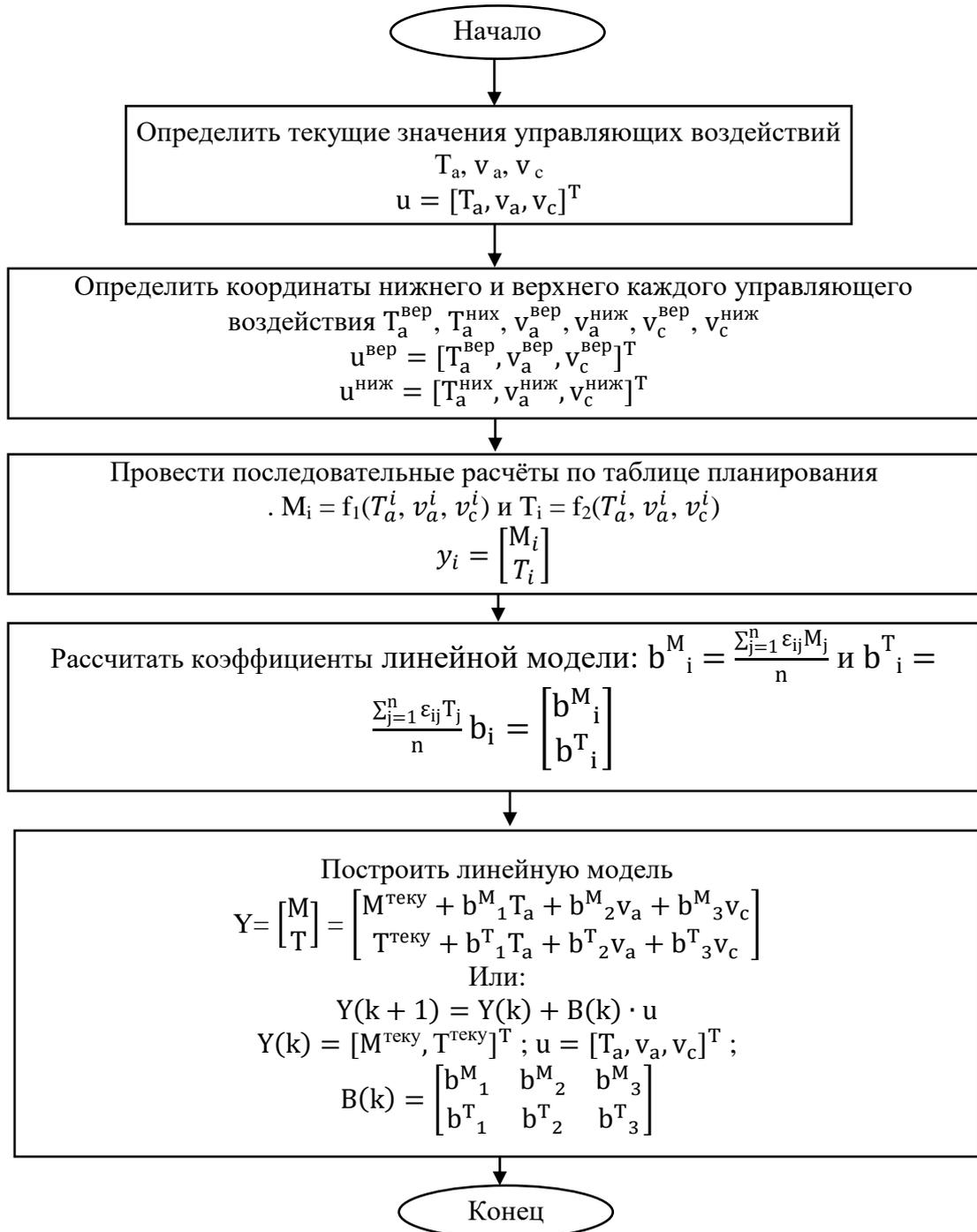
где M_N – влажность зеленого чая на выходе, %; T_N – температура зеленого чая на выходе, °C.

Для линеаризации процесса сушки зеленого чая в реальном времени используется метод Бокса-Уилсона:

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

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

$$u_{\text{вер}} = [T_a^{\text{вер}} \quad v_a^{\text{вер}} \quad v_c^{\text{вер}}]^T, \quad (10)$$



$$u_{\text{ниж}} = [T_a^{\text{ниж}} \quad v_a^{\text{ниж}} \quad v_c^{\text{ниж}}]^T. \quad (11)$$

Рисунок 6 – Блок-схема линейризации процесса

– Организация $n = 2^m$ (m – общее количество факторов, которые влияют на состояние объекта управления) параллельных расчетов – порядок их проведения задается с помощью таблицы планирования (таблица 3), обеспечивающей рандомизацию по заданному шаблону

– Оценка параметров локальной линейной модели (13) – на основе результатов расчетов выполняется приближенное определение коэффициентов локальной модели первого порядка по уравнению (12):

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} y_j}{n}, \quad (12)$$

$$y(k+1) = y(k) + \sum_{i=1}^m b_i(k) u_i(k), \quad (13)$$

где $y = [M, T]^T$, $y(k) = [M^{\text{теку}} \quad T^{\text{теку}}]^T$, $u = [T_a \quad v_a \quad v_c]^T$, ε_{ij} – значение в таблице 3.

Модель в виде матрицы:

$$y(k+1) = y(k) + B(k)u(k), \quad (14)$$

$$\text{где } B(k) = \begin{bmatrix} b_1^M & b_2^M & b_3^M \\ b_1^T & b_2^T & b_3^T \end{bmatrix}.$$

Таблица 3 – Таблица планирования расчетов

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

2. Второй этап – построение прогнозирующих моделей. На основе результатов процесса линеаризации построим прогнозирующие модели для N_p точек, расположенных во временном интервале, выходящем за границы текущего момента:

$$\begin{aligned} \hat{y}(k|1) &= y(k) + B(k|0)u(k|0), \\ \hat{y}(k|2) &= \hat{y}(k|1) + B(k|1)u(k|1) = y(k) + B(k|0)u(k|0) + B(k|1)u(k|1), \\ &\vdots \\ \hat{y}(k|N_p) &= \hat{y}(k|N_p - 1) + B(k)u(k|N_p - 1) = y(k) + B(k|0)u(k|0) + \\ &+ B(k|1)u(k|1) + \dots + B(k|N_p - 1)u(k|N_p - 1). \end{aligned}$$

При синтезе данной системы прогнозирующих моделей применяется вектор изменения сигнала управления $\Delta u(k|i)$ вместо $u(k|i)$. Модель прогноза может быть записана в виде:

$$\hat{Y}(k) = S_y + S_u u(k) + S_{\Delta u} \Delta U(k), \quad (15)$$

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

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

$$= [\Delta T_a(k|0) \quad \Delta v_a(k|0) \quad \Delta v_c(k|0) \quad \dots \quad \Delta T_a(k|N_p - 1) \quad \Delta v_a(k|N_p - 1) \quad \Delta v_c(k|N_p - 1)],$$

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

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

3. Третья этап – формирование целевой функции УПМ.

$$J(u) = \|\hat{Y} - R\|_Q^2 + \|\Delta U\|_S^2, \quad (16)$$

где Q, S – веса регуляризации; Y – вектор управляемых переменных показателей качества, $\hat{Y} = [\hat{y}(k|1) \quad \hat{y}(k|2) \quad \dots \quad \hat{y}(k|N_p)]$; R – вектор заданных значений показателей качества, $R = [r(k|1), r(k|2), \dots, r(k|N_p)]^T$,

$\Delta U = [\Delta u(k|0), \Delta u(k|1), \dots, \Delta u(k|N_p-1)]^T$ – вектор изменений управляющих воздействий.

4. Четвертый этап – оптимизация.

Для определения оптимальных управляющих воздействий необходимо найти решения по оптимизации функция (17) с ограничениями (18):

$$J(k) = \frac{1}{2} [S_y + S_u u(k) + S_{\Delta u} \Delta U(k) - R(k)]^T Q(k) [S_y + S_u u(k) + S_{\Delta u} \Delta U(k) - R(k)] + \frac{1}{2} \Delta U^T(k) S(k) \Delta U(k) \rightarrow \min, \quad (17)$$

$$A(k) \Delta U(k) \leq a(k). \quad (18)$$

Для решения данного выпуклого квадратичного программирования используется метод активного набора, установленного в оптимизации по алгоритму квадратичного программирования в виде:

$$\Delta U(k) = -E^{-1}(k)(F(k) + A^T(k)\lambda(k)). \quad (19)$$

Сигналы, поступающие на вход технологического процесса, можно записать следующим образом:

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u(k|0). \quad (20)$$

Алгоритм прогнозирующего управления процессом сушки зеленого чая представлен на рисунке 7.

Для оценки адекватности линеаризованной модели была использована среднеквадратическая ошибка (RMSE), уравнение (6). Эти показатели позволяют оценить степень соответствия линейной модели исходной нелинейной модели (таблица 4).

Таблица 4 – Статистический критерий для оценки адекватности линеаризованной модели

Статистический критерий	Влажность	Температура
Среднеквадратическая ошибка (RMSE)	0,14	0,905

Разница между линейной моделью и нелинейными значениями влажности и температуры чая составляет всего 0,142 % и 0,8 %. Такой результат говорит о высоком качестве модели для влажности и температуры чая, так как ошибка составляет менее 1% (что обычно считается очень хорошим результатом для большинства инженерных приложений).

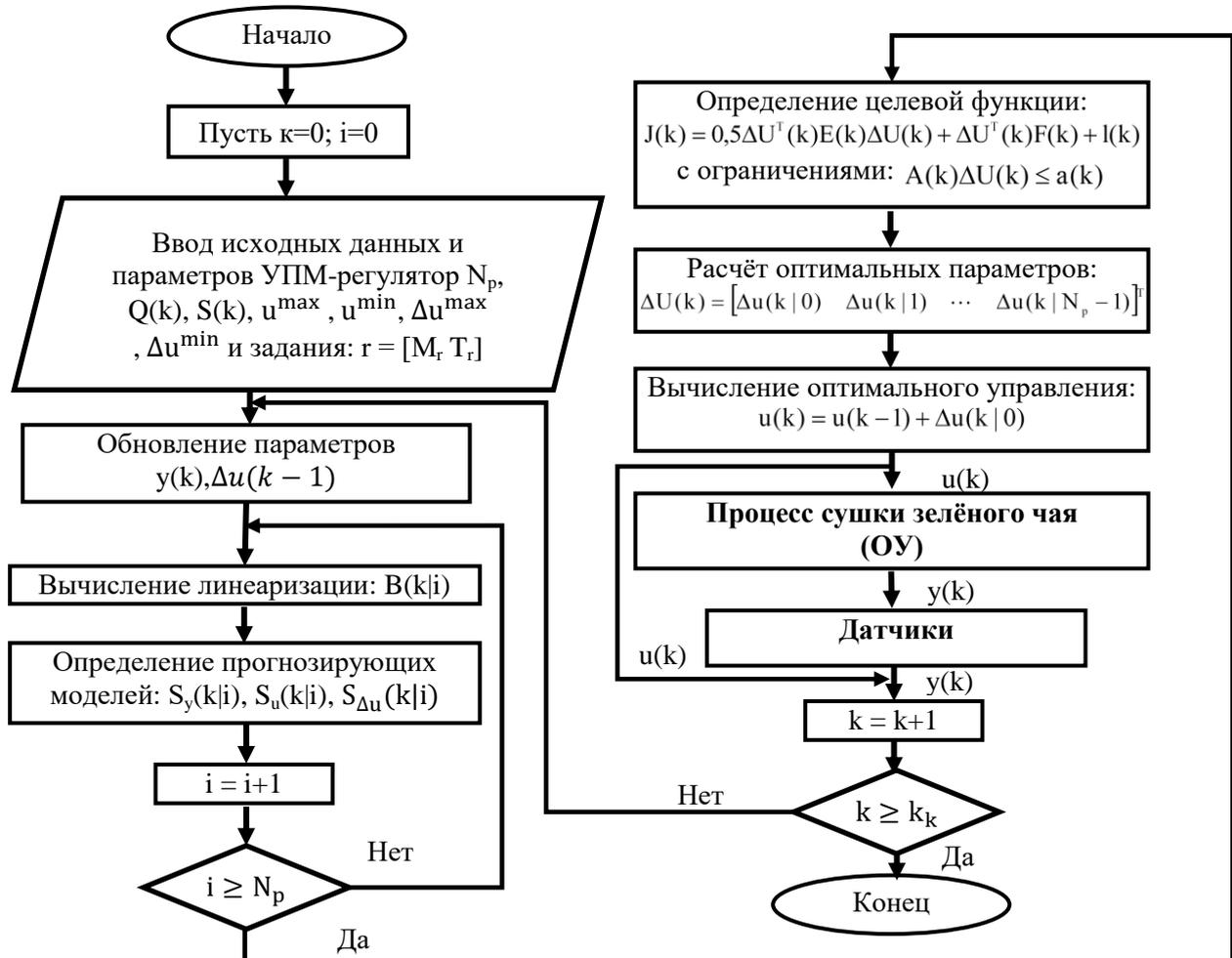


Рисунок 7 – Алгоритм прогнозирующего управления процессом сушки зеленого чая

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. Разработанный УПМ-регулятор быстрее достигает заданного значения температуры и поддерживает его с меньшими колебаниями по сравнению с традиционным регулятором. Время переходного процесса сокращено на 76,4 % 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 минуты (14,7 %), что позволяет увеличить производительность на 17,23 % и улучшить энергоэффективность на 14,7 %. (рисунок 8).

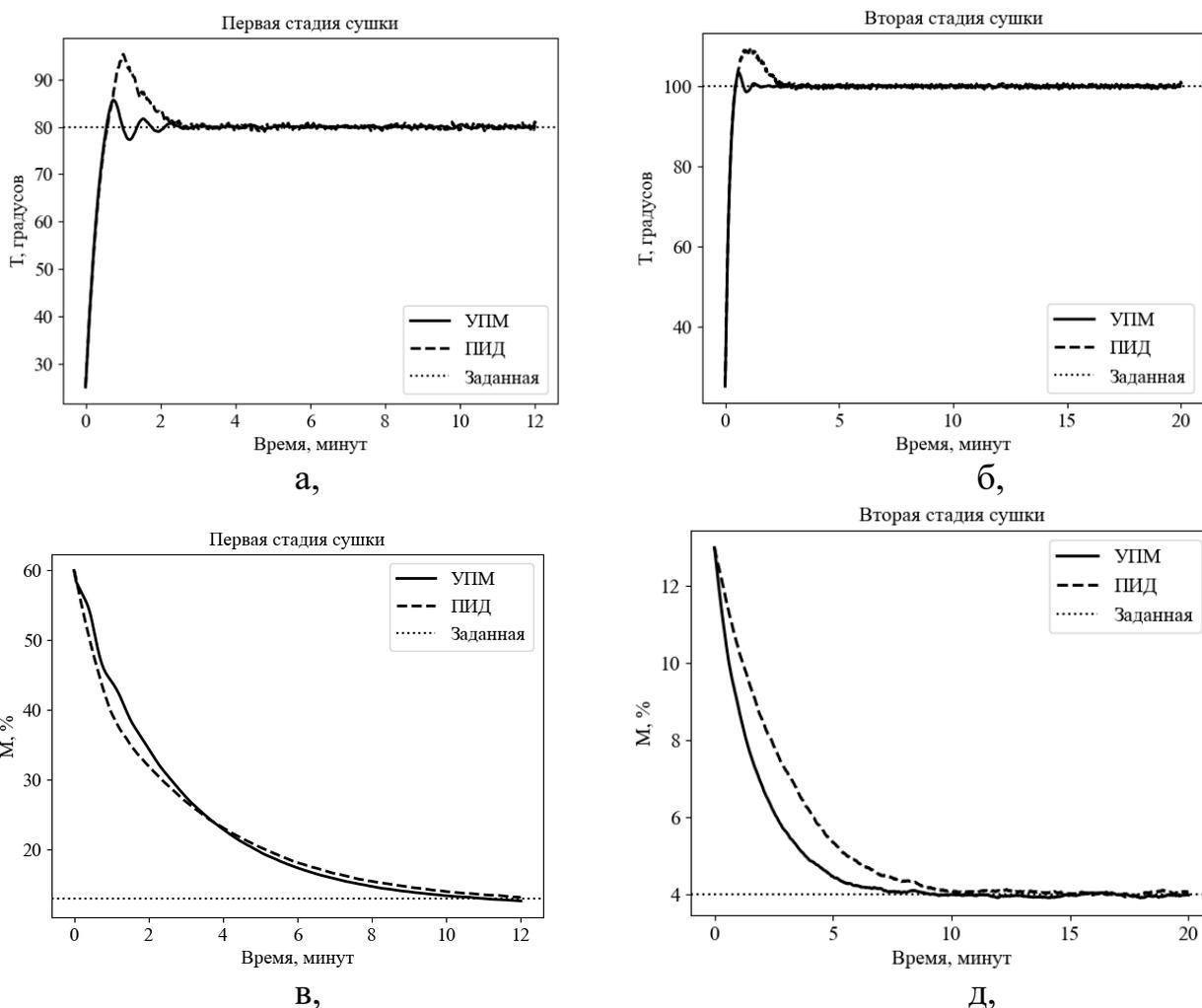


Рисунок 8 – Сравнение работы между традиционным регулятором и УПМ при внедрении метода Бокса-Уилсона для моделирования процесса: а и б – температура, в и д – влажность

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные полученные результаты в диссертационной работе:

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 (плотности, теплоемкости, коэффициента массообмена и равновесной влажности) 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 (плотности, теплоемкости, коэффициента массообмена и равновесной влажности) 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%.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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.

2. 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.

3. Разработка автомата сушильного оборудования зеленого чая / **К.Б. Фам** // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 11(119). – С. 301-310.

4. Автоматизированное управление процессом термообработки какао-бобов с помощью алгоритма с прогнозирующими моделями/ **К.Б. Фам**, П.М. Мурашев, В.Н. Богатиков, С.М. Киеу // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2024. – №2 (22). – С. 81-88.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах WOS и SCOPUS:

5. Application of Optimum Adaptive Generalized Predictive Control to Green Tea Drying / **К.В. Fam**, P.M. Murashev, V.N. Bogatikov // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. – 2023. – Vol. 33, No. 3. – P. 292-299.

6. Fuzzy Model of Diagnostics of Technological Processes / **К.В. Fam**, P.M. Murashev, V.N. Bogatikov // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. – 2024. – Vol. 34, No. 3. – P. 632-638.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023615211, Российская Федерация. Программа синтеза адаптивного регулятора для систем управления процессом сушки зеленого чая: №2023613844: заявл. 27.02.2023: опублик. 13.03.2023 / **К.Б. Фам**, В.Н. Богатиков, П.М. Мурашев.

Материалы на конференциях SCOPUS:

8. Development of a Management System with Forecasting Models of Technological Industrial Processes / **К.В. Фам**, P.M. Murashev, V.N. Bogatikov // Proceedings of the Seventh International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”, Switzerland, 01 февраля 2023 года. Vol. 777, 2. – Switzerland: Springer Nature Switzerland, 2023. – P. 321-333.

Публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ:

9. Исследование динамических свойств системы управления с нечеткими регуляторами процесса сушки зеленого чая / **К.Б. Фам**, В.Н. Богатиков // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте ИММВ-2022: сборник научных трудов XI Международной научно-практической конференции. Коломна, 16-19 мая 2022 г. В 2-х томах. Коломна. – 2022. – Т. 1. – С. 145-155 (3).

10. Проектирование алгоритма оценки состояния технологического процесса на основе индекса безопасности / В.Н. Богатиков, Н.А. Тоичкин, **К.Б. Фам**, П.М. Мурашев // Вестник международной академии системных исследований. Информатика, Экология, Экономика. – 2022. – № 24. – С. 79-89 (6).

11. Синтез системы управления процессом сушки зеленого чая с учетом индекса качества / В.Н. Богатиков, **К.Б. Фам**, П.М. Мурашев и др. // Вестник международной академии системных исследований. Информатика, Экология, Экономика. – 2022. – № 24. – С. 90-99(7).

12. Управление процессом сушки зеленого чая с помощью прогнозирующего управления на основе технологического индекса качества / **К.Б. Фам**, П.М. Мурашев, Богатиков В.Н., Санаева ГН. // Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2022 («ИС&ИТ-2022», «IS&IT'22»): труды Международного научно-технического конгресса. Дивноморское, 1-9 сентября 2022 года. Научное издание в 2-х т. Т. 2. – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., – 2022. – С. 140-147.

13. Нечеткий ПИД-контроллер для управления процессом сушки зеленого чая / **К.Б. Фам**, В.Н. Богатиков // Цифровизация агропромышленного комплекса: сборник научных статей III Международной научно-практической конференции. Тамбов, 25-27 октября 2022 года. В 2-х томах Том I. – Тамбов Изд. центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», – 2022. – С. 386-397.

14. Применение оптимального адаптивного обобщенного прогнозирующего управления к сушке зеленого чая (метод Бокса-Уилсона) / **К.Б. Фам**, В.Н. Богатиков // Конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2022): труды XX национальной конференции. Москва, 21-23 декабря 2022 года. Том 2. – Москва: изд-во МЭИ, – 2022. – С. 65-79.

15. Нечеткая модель диагностики технологических процессов / В.Н. Богатиков, А.Г. Лопатин, **К.Б. Фам** и др. // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. – 2023. – Т. 2, № 25. – С. 169-178.

16. Разработка системы управления безопасностью технологического процесса сушки зеленого чая / В.Н. Богатиков, **К.Б. Фам**, В.В. Кушнарченко // Вестник международной академии системных исследований. Информатика,

Экология, Экономика. – 2024. – Т. 26. – № 1. – С. 77-86.

17. Разработка алгоритма программной реализации управления с прогнозирующими моделями технологическими промышленными процессами / В.Н. Богатилов, Г.Н. Санаева, **К.Б. Фам**, А.Ю. Ключин // Вестник международной академии системных исследований. Информатика, Экология, Экономика. – 2024. – Т. 26. – № 1. – С. 87-94.

18. Внедрение процесса управления с прогнозирующими моделями с применением метода Бокса-Уилсона для управления технологическими процессами / В.Н. Богатилов, Г.Н. Санаева, **К.Б. Фам** и др. // Вестник международной академии системных исследований. Информатика, Экология, Экономика. – 2024. – Т. 26. – № 1. – С. 95-100.