АНАЛИЗ СИСТЕМЫ МИКРОВОЛНОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ СУШКИ ПИЩЕВОГО ПРОДУКТА - ДИНЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СИСТЕМНОГО МЫШЛЕНИЯ

А.Артыков
Ташкентский химико-технологический институт
С.Халилов
Бухарском государственном техническом университет
Нарзиев М.С.
Бухарском государственном техническом университет

Аннотация. В статье представлен пошаговый анализ системы микроволновой непрерывной сушки пищевого продукта - дины с применением методологии системного мышления профессора. Метод включает представление объекта как единства материи, процесса и энергии, его иерархическую декомпозицию на квазиобъекты, определение их взаимосвязей и формирование комплексной компьютерной модели. Проведенный анализ демонстрирует эффективность данного подхода для глубокого понимания, моделирования и последующей оптимизации сложных инженерно-технологических систем.

Ключевые слова: системное мышление, иерархическая декомпозиция, квазиобъект, микроволновая сушка, непрерывный процесс, математическое моделирование, пищевые продукты.

Abstract. The article presents a step-by-step analysis of a continuous microwave drying system for a food product—melon—using the systems thinking methodology developed by the professor. The method involves representing the object as a unity of matter, process, and energy, its hierarchical decomposition into quasi-objects, identifying the interrelationships among them, and forming an integrated computer model. The conducted analysis demonstrates the effectiveness of this approach for in-depth understanding, modeling, and subsequent optimization of complex engineering and technological systems.

Keywords: systems thinking, hierarchical decomposition, quasi-object, microwave drying, continuous process, mathematical modeling, food products.

Annotatsiya. Maqolada oziq-ovqat mahsuloti — qovunni uzluksiz mikroto‘lqinli quritish tizimining tizimli fikrlash metodologiyasi asosida bosqichma-bosqich tahlili keltirilgan. Ushbu metod obyektni modda, jarayon va energiyaning yagona majmuasi sifatida ko‘rib chiqishni, uni kvaziobyektlarga iyerarxik dekompozitsiya qilishni, ularning o‘zaro bog‘liqliklarini aniqlashni hamda kompleks kompyuter modelini shakllantirishni o‘z ichiga oladi. O‘tkazilgan tahlil mazkur yondashuv

ISSN 3030-3907

murakkab muhandislik-texnologik tizimlarni chuqur tushunish, modellashtirish va keyinchalik optimallashtirishda yuqori samaradorlikka ega ekanligini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: tizimli fikrlash, iyerarxik dekompozitsiya, kvaziobyekt, mikroto‘lqinli quritish, uzluksiz jarayon, matematik modellashtirish, oziq-ovqat mahsulotlari.

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии пищевой промышленности, такие как микроволновая сушка, представляют собой сложные системы, где тесно взаимодействуют тепломассообменные процессы, электромагнитные поля и механика сыпучих сред. Эффективное проектирование и управление такими системами требует целостного подхода. Метод системного мышления предоставляет строгий семиступенчатый алгоритм для анализа и синтеза сложных объектов. Цель данной статьи – применить данный метод к системе непрерывной микроволновой сушки пищевого продукта - дины, построив ее иерархическую модель и определив пути для последующего компьютерного моделирования и оптимизации.

1. Методология системного мышления (краткий обзор)

Метод включает последовательные этапы:

1. **Представление объекта как субстанции:** Любой объект рассматривается как триединство **Материальной части** (из чего состоит), **Процесса** (что с ним происходит) и **Энергии** (что осуществляет процесс).
2. **Иерархическая декомпозиция материальной части:** Материальная часть разбивается на элементы (квазиобъекты) по иерархическим уровням, начиная с базовой системы.
3. **Определение входов/выходов для процессов квазиобъектов:** Для каждого квазиобъекта на каждом уровне определяется его локальный процесс с входными и выходными параметрами.
4. **Связывание параметров квазиобъектов:** устанавливаются связи между выходными параметрами одного квазиобъекта и входными параметрами другого, формируя сеть квазиобъектов.
5. **Построение моделей квазиобъектов:** Начиная с нижнего уровня, для каждого квазиобъекта разрабатывается математическая или компьютерная модель.
6. **Формирование комплексной модели:** Модели квазиобъектов интегрируются в единую модель всей системы согласно установленным связям.

ISSN 3030-3907

7. **Оптимизация системы:** На основе комплексной модели проводятся виртуальные эксперименты для оптимизации параметров системы.

2. Применение метода к системе микроволновой непрерывной сушки

2.1. Шаг 1: Представление объекта как субстанции

- **Материальная часть:** Аппарат непрерывной микроволновой сушки (конвейерная лента, рабочая камера, магнетроны, система вентиляции, бункер) + высушиваемый пищевой продукт.
- **Процесс:** Непрерывный конвективно-микроволновый тепломассообмен, приводящий к удалению влаги из продукта.
- **Энергия:** Электромагнитная энергия СВЧ-излучения; тепловая энергия подогретого воздуха; механическая энергия движения конвейера.

3.2. Шаг 2-4: Иерархическая декомпозиция и определение взаимосвязей

Ниже представлена схема декомпозиции и ключевые параметры квазиобъектов.

Иерархический уровень	Квази объект (Материальная часть)	Основной процесс квази объекта	Ключевые входные параметры	Ключевые выходные параметры	Связи с другими квази объектами
1. Базовая система	Установка микроволновой сушки	Непрерывная сушка продукта	Влажность сырого продукта (W_in), производительность (G)	Влажность (W_out), температура готового продукта, удельный расхо	Выходы – целевые показатели системы.

ISSN 3030-3907

				дэнергии	
2. Подсистемы	**2.1. Вводное устройство**	Дозирование и подача	W_in, G	Массовый поток на конвейере (M)	Выход M вход для Рабочей камеры.
	2.2. Рабочая камера	Тепломассообмен	M, мощность СВЧ (P), параметры воздуха (T, φ)	Изменение состояния продукта (W, T)	Интегрирует квазиобъекты всех внутренних элементов.
	2.3. Выводное устройство	Выгрузка продукта	Охлажденный продукт	Готовый продукт (W_out)	Выход Рабочей камеры
3. Элементы камеры	**3.1. Ленточный конвейер**	Транспортировка	Скорость (v)	Положение продукта во времени (L)	Задает время пребывания (τ = L/v) для всех процессов в камере.

ISSN 3030-3907

	3.2. СВЧ-излучатели	Генерация ЭМ-поля	P, частота	Объемная плотность мощности (Q_v)	Q_v – вход для квазиобъекта «Продукт».
	3.3. Продукт в камере	Нагрев и испарение	M, Q_v, T, φ, τ	Локальная W(z,t), T(z,t)	Самый сложный квазиобъект, требует дальнейшей декомпозиции.
	3.4. Система вентиляции	Удаление влаги	Параметры воздуха на входе	Параметры воздуха на выходе (T_out, φ_out)	φ_out влияет на скорость испарения.
4. Продукт (макро)	Кусочек (слой) продукта	Внутренний тепломасоперенос	Q_v, условия на поверхности	Температурное и влажностное поле внутри	Разбивается на квазислои.

ISSN 3030-3907

				кусочка	
5. Продукт (мезо)	Квазислой продукта	Поглощение СВЧ-энергии и перенос пара	Мощность, поглощенная в слое	Тепловой поток, поток пара	Связаны уравнениями переноса.
6. Продукт (микро)	**6.1. Макромолекулы** (белки, углеводы)	Связывание влаги, денатурация	Температура, влажность	Активность воды, структурные изменения	Определяют свойства материала (ε', ε'').
	6.2. Молекулы воды	Фазовый переход	Подведенное тепло	Давление пара	Движение пара – движущая сила сушки.

2.3. Шаг 5-6: Принципы построения комплексной модели

1. **Нижний уровень (6):** Разрабатываются реологические и диэлектрические модели, связывающие состав продукта (белки, углеводы, вода) с его свойствами (проницаемость, теплоемкость, диэлектрическая проницаемость ε'', определяющая поглощение СВЧ).

2. **Уровень 5-4:** На основе свойств материала и уравнений нестационарного тепломассопереноса (уравнения Фурье и Фика с объемным источником тепла Q_v) строится модель сушки отдельного кусочка. Q_v рассчитывается по распределению ε'' и напряженности поля.

3. **Уровень 3:** Модель продукта интегрируется с моделями конвейера (время τ) и СВЧ-резонатора (распределение поля в камере). Создается CFD-модель (Computational Fluid Dynamics) системы вентиляции.

4. **Уровень 2-1:** Все подмодели объединяются в комплексную 3D-модель всей рабочей камеры, а затем и всей установки. Входные параметры

ISSN 3030-3907

с уровня 2 (производительность, влажность сырья) становятся граничными условиями.

2.4. Шаг 7: Направления оптимизации на основе модели

Созданная комплексная модель позволяет проводить виртуальную оптимизацию по следующим параметрам:

- **Геометрия и режимы:** Расположение излучателей, форма камеры, скорость конвейера (v).
- **Энергетические:** Распределение мощности СВЧ (P) между магнетронами, температура подаваемого воздуха (T).
- **Качественные:** Минимизация неравномерности сушки, предотвращение перегрева (на основе модели температуры T(z,t)), сохранение питательных веществ (на основе моделей уровня 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода системного мышления к системе микроволновой непрерывной сушки позволило структурировать сложный междисциплинарный объект в четкую иерархическую систему взаимосвязанных квазиобъектов. Такой подход не только обеспечивает глубокое понимание физической сути процесса на всех уровнях – от молекулярного до аппаратурного, но и задает строгий алгоритм для построения адекватной компьютерной модели. Последняя является незаменимым инструментом для инженеров-разработчиков, позволяя сократить сроки и затраты на проектирование и вывести управление технологическим процессом на уровень предиктивной оптимизации. Представленный анализ подтверждает универсальность и практическую ценность методологии профессора Артыкова для задач современного инженерно-технологического проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артыков А. Системное мышление в процессе создания и управления инженерными технологиями: Учебное пособие / Под ред. Ю. Н. Абдуллаева. – Ташкент, 2023. – 216 с.
2. Артыков А. Modellashtirish va loyihalash tizimlari: Дарслик. – ТКТИ, 2024. – 223 бет.
3. Артыков А. Тизимли тахлилга кириш. Свидетельство о депонировании объектов авторского права № 000300. Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. 10.11.2016.
4. O`zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi Intellektual mulk agentligi IAP 20250427. 12.07.25.

ISSN 3030-3907