

СМОЛІЙ ОЛЕКСАНДР

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

e-mail: AlSmoliy@tntu.edu.ua**МИКИТИШИН АНДРІЙ**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

e-mail: mikitishin@tntu.edu.ua

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ СУШІННЯ ПЕЛЕТ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ СНЕКІВ

Сушіння пелет є важливим етапом виробництва, оскільки воно забезпечує їхню якість, тривале зберігання та належні кулінарні властивості. При цьому продукцію можна виробляти у великих обсягах і зберігати без потреби в охолодженні. На сьогодні в виробництві пелет використовуються різні типи сушок, зокрема конвекційні, інфрачервоні, вакуумні. Окрім досягнення певного рівня вологості готового продукту, важливо також забезпечити якісні показники продукції. Адже, надто швидке або нерівномірне сушіння може спричинити внутрішні напруження в тісті, що може призвести до утворення тріщин і підвищеної ламкості. Високі температури або нерівномірне сушіння можуть вплинути на білкову структуру та змінити смакові характеристики виробів. Теоретичне визначення кінетики сушіння включає в себе багато взаємозв'язаних процесів. Було досліджено, що процес сушіння пелет схожий на процес сушіння макаронних виробів, і добре описується моделями створеними для опису сушіння макаронних виробів. Досягнення якісних показників кінцевого продукту можливе лише за умови контролю та корекції сушіння на протязі всього технологічного процесу.

Зазвичай, системи керування побудовані таким чином, що режими сушіння задаються на основі попередньо визначених умов середовища сушіння, а саме необхідної вологості та температури в сушці, швидкості потоку повітря. Ці параметри формуються на основі попереднього досвіду для кожного конкретного виду продукції. Такий підхід можна назвати прогнозованим керуванням по температурі та вологості. При цьому очікується, що від партії до партії властивості сировини залишаються незмінними, або що розбіжність знаходиться в допустимих межах, що дозволяє витримувати режими однаковими для різних партій продукції одного типу. Та навіть невеликі зміни в структурі чи формі продукту можуть викликати значні відхилення швидкості сушіння.

В даній статті розглядається система керування конвекційною сушкою пелет, в якій процес сушіння здійснюється по наперед заданій траєкторії зміни вологості продукту. У зв'язку з нелінійністю системи та великою тривалістю в часі, забезпечення необхідної траєкторії потребує не лише реакції на зміни, але й прогнозування процесу в залежності від зміни параметрів. Такий прогноз може бути здійснений на основі математичної моделі. Модельний прогноз дозволяє скоректувати параметри сушіння в залежності від фактичних властивостей продукту. З метою забезпечення зворотного зв'язку було використано зважування продукту в реальному часі.

Використання прогнозування на основі математичної моделі та внесення додаткових зворотних зв'язків в класичну систему контролю сушіння дозволило в автоматичному режимі корегувати режими роботи сушильної шафи і забезпечувати задану швидкість сушіння, шляхом корегування характеристик середовища сушіння.

Ключові слова: Система керування, математичне моделювання, сушіння, вологість, пелети.

SMOLI OLEKSANDR**MYKYTYSHYN ANDRII**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR DRYING PELLETS FOR SNACK PRODUCTION

Drying of pellets is an important stage of production, as it ensures their quality, long-term storage and proper culinary properties. At the same time, the products can be produced in large quantities and stored without refrigeration. Nowadays, various types of dryers are used in the production of pellets, including convection, infrared, vacuum. As well as we have to achieving a certain level of moisture in the finished product, it is also important to ensure the quality of the product. After all, too fast or uneven drying can cause internal stresses in the dough, which can lead to the appears of cracks and increased brittleness. High temperatures or uneven drying can affect the protein structure and change the taste characteristics of the products. The theoretical definition of drying kinetics includes many interrelated processes. It has been studied that the drying process of pellets is similar to the drying process of pasta, and is well described by models created to describe the drying of pasta. Achieving quality indicators of the final product is possible only if drying is controlled and corrected throughout the entire technological process.

Typically, control systems are built in such a way that drying modes are set based on predetermined conditions of the drying environment, namely the required air humidity and temperature in the drying process, and the air flow rate. These parameters are formed based on previous experience for each specific type of product. This approach can be called predictive temperature and humidity control. In this case, it is expected that the properties of the raw material remain unchanged from batch to batch, or that the discrepancy is within acceptable limits, which allows maintaining the same modes for different batches of products of the same type. However, even small changes in the structure or shape of the product can cause significant deviations in the drying rate.

This article considers a control system for convection drying of pellets, in which the drying process is carried out along a predetermined trajectory of product humidity change. Due to the nonlinearity of the system and the long duration in time, ensuring the required trajectory requires not only a response to changes, but also a forecast of the process depending on the change in parameters. Such a forecast can be made on the basis of a mathematical model. Model forecasting allows to adjust the drying parameters depending on the actual properties of the product. In order to provide feedback, real-time product weighing was used.

Using forecasting based on a mathematical model and introducing additional feedback loops into the classical drying control system allowed automatically adjust the operating modes of the drying oven and ensure a given drying speed by adjusting the characteristics of the drying environment.

Keywords: Control system, , mathematical modeling, drying, moisture, pellets.

Постановка проблеми

Сушіння — це метод консервування харчових продуктів, який використовується при обробці та зберіганні харчових продуктів для збільшення терміну зберігання. Це явище базується на видаленні вологи з харчових матеріалів [1].

Хоча дослідження сушіння пелет рідко зустрічається в науковій літературі, рецептура і технологія виготовлення пелет схожа до рецептури і технології виготовлення макаронних виробів. Подальші дослідження, а саме вимірювання зміни маси пелет в реальному часі, показали, що крива добре корелюється з кривою при висушуванні макаронних виробів.

Процес сушки триває від моменту виготовлення виробів, до поміщення їх в кінцеву упаковку, і відіграє важливу роль в досягненні кінцевої якості продукту. Для виробів з тіста, таких як макарони чи пелети, важливими є не тільки доведення виробу до певного рівня вологості, але й забезпечення оптимальних режимів на протязі всього процесу. Встановлення неправильних режимів може викликати термічні і механічні пошкодження продукту, що впливає на кінцеву внутрішню текстуру. Більше того, параметри вологості готового продукту суттєво впливають на терміни зберігання і можуть призвести до значних втрат готових виробів.

У зв'язку з складністю моделі сушіння та з метою зменшення вартості системи керування, зазвичай, використовують заданий набір параметрів сушіння, заданих як функція від часу сушіння, визначених фахівцями для конкретного виду продукції. З широким впровадженням технологій IoT та появою недорогих мікроконтролерів, здатних проводити складні розрахунки, з'явилися можливості застосування нових стратегій. Запропонована стратегія передбачуваного управління на основі моделі, яка дозволяє враховувати параметри системи, що змінюються в допустимих межах для кожної конкретної партії продукції та врахувати умови зовнішнього середовища. При малих відхиленнях в властивостях сировини, запропоновано використовувати корекцію температурних режимів, щоб привести криву зміни вологості продукту в часі до заданої форми. При сушінні виробів іншої форми або з суттєвими відмінностями в властивостях сировини передбачено побудову прогнозованої кривої зміни вологості на основі зразка продукції. Такий підхід дозволяє оптимізувати дії управління для досягнення бажаних результатів з урахуванням обмежень, покращити якість продукції та уникнути браку.

Аналіз останніх джерел

Оскільки сушіння пелет для снєків практично не розглядається в літературі, за основу було взято процес сушіння макаронних виробів, які схожі за своєю структурою та рецептурою, а також технологічним процесом виготовлення.

Оскільки вміст вологи невідомий і неконтрольований під час сушіння, макаронні вироби промислово сушать до рівня вологості, який є набагато нижчим за законодавчо визначене порогове значення для мікробної безпеки [2]. Але такий підхід недопустимий при виробництві пелет для снєків, так як якісні показники виробів строго регламентують як верхній так і нижній рівень вологості.

У процесі сушіння спагеті утворюються тріщини, що знижує їх товарну цінність і якість; отже, дуже важливо виявити тріщини під час процесу виробництва сушених макаронних виробів [3]. При виготовленні пелет тріщини та дефекти набувають більш критичного значення, так як їх подальше використання передбачає обсмажування в олії а не насичення вологою. При цьому навіть невеликі тріщини призводять до значних деформацій і втрати товарного вигляду. В науково-технічній літературі описуються дефекти, що виникають під час сушіння, що включає передачу тепла та вологи по всій структурі їжі [4]. Під час сушіння виникають напруження, внаслідок нерівномірного розподілу вологи та температури.

Для прогнозування кінцевого вмісту вологи та параметрів сушіння використовуються математичні моделі, а кінетика сушіння потрібна для моделювання постійної спадної швидкості процесу сушіння. Існує кілька математичних моделей для опису кривих сушіння, таких як емпіричні, напівемпіричні моделі, експоненціальні, логарифмічні моделі тощо. Математичні моделі – це рівняння, що описують властивості тонкого шару сировини, що прогнозують вміст вологи в харчових продуктах за будь-якої температури протягом заданого часу сушіння. Кінетичні моделі дозволяють виробникам вибрати найбільш оптимальні умови сушіння, або мінімізувати час процесу сушіння для специфікацій кінцевого продукту [5].

Процес сушіння продуктів харчування є комплексним. Математичне моделювання процесу передбачає врахування переносу тепла та маси води в продукті, аналізу переходу води в водяну пару в зовнішніх шарах продукту, та інших процесів. Як було показано дослідженнями [9], швидкість сушіння макаронних виробів в основному обмежується дифузією води всередині виробу. Кінетика сушіння макаронних виробів з твердої манної крупи при температурі від 40 °C до 100 °C повністю контролюється внутрішнім масоперенесенням вологи. Таким чином, експериментальні криві сушіння можна описати за допомогою моделі дифузії що описується законом Фіка [6]. Ефективність таких моделей підтверджується і останніми дослідженнями [1]. Зміни у вмісті вологи в макаронах під час сушіння були помічені та успішно передбачені логарифмічною моделлю [7].

Такі дослідження дають можливість прогнозувати форму кривої сушіння на основі математичної моделі, розробити систему керування процесом сушіння пелет, що базується на засадах прогнозованого

контролю по формі траєкторії з зворотнім зв'язком по масі готового виробу.

Основною перевагою контролю на основі моделі є здатність вирішувати великі затримки часу, зворотні відгуки, значні нелінійності, багатофакторні взаємодії та обмеження [8].

Метою роботи є: розробка системи керування сушильною установкою пелет, яка забезпечить висихання виробів згідно заданої траєкторії зміни вологості продукту в часі та забезпечить необхідну точність залишкової вологості.

Виклад основного матеріалу

Для сушіння продуктів конвекційним методом, зазвичай, застосовують два типи сушок: у вигляді сушильних шаф, куди продукт завантажується партіями та поточні сушильні лінії, в яких продукт повільно рухається на конвеєрі. Запропоновано в статті методику можна застосувати в обох випадках, але практично було застосовано на моделі сушильної шафи. Для поточного контролю сушильної шафи було використано систему давачів та запропоновано зміни в структуру системи керування, які дозволяють здійснювати безпосередній контроль за змінами вологості продукту в реальному часі.

Широкого розповсюдження набули конвекційні сушки у вигляді шаф з керуванням по заданій програмі температури та вологості. Основні принципи керування полягають в тому, що просушивши промислові зразки при різних режимах, зупиняються на оптимальних значеннях температури та вологості для даного виду продукції. Таке керування приводить до значних похибок, тому що не враховує змін властивостей продукту від партії до партії, що виникають у зв'язку з неоднорідністю сировини, похибкою в геометричних параметрах виробу, властивостях повітря, що, зазвичай, забирається з приміщення. Додатковий контроль параметрів, таких як аналіз динаміки зміни ваги в процесі висихання в реальному часі, контроль повітря в приміщенні дозволяє скоректувати швидкість та час висихання продукту.

Спрощено структурну схему запропонованої системи керування представлено на рисунку 1. Якщо температура, вологість та швидкість потоку повітря регулюються за допомогою ПІД контролерів, то задання цих параметрів здійснюється не на основі попередньо визначеної кривої температури та вологості, а шляхом розрахунку цих параметрів базуючись на траєкторії швидкості сушіння і контролюється за допомогою зворотного зв'язку по залишковій масі продукту. Виходячи з технологічних режимів швидкість потоку повітря була виставлена максимальною. Зв'язок між швидкістю сушіння та параметрами, що регулюються (температура, вологість) є нелінійним і на кожному етапі потрібно враховувати граничні умови, які змінюються в процесі сушіння. Тобто, якщо необхідно отримати задану швидкість сушіння продукту, потрібно вирахувати температуру та вологість, перевірити чи всі параметри знаходяться в допустимих межах, скоригувати при необхідності ці дві величини у їхньому взаємозв'язку і здійснювати процес сушіння базуючись на цих скоригованих даних. Для цього потрібна математична модель, яка повинна бути достатньо точною для інженерних розрахунків та достатньо простою, щоб контролер встигав її розраховувати.

Як видно з літератури [9], система керування процесом сушіння не може базуватись на кривій, побудованій на основі висихання поверхневого шару, оскільки основну роль відіграє дифузія рідини всередині продукту. Тому виникає необхідність в використанні моделі, яка більш точно описує процес сушіння. Моделі представляють альтернативний підхід до скорочення часу визначення відповідних умов сушіння та досягнення необхідної вологості для виробництва пелет.

Пропонується в першому наближенні брати криву, отриману на основі попереднього досвіду. Далі, розбивати процес на окремі етапи і вносити корекції в параметри сушіння для кожного етапу, базуючись на зміні маси продукту. На початку, умови вхідного продукту та середовища сушіння кардинально різні, що призводить до швидкого протікання процесу випаровування рідини з поверхневого шару продукту. На першому етапі зміна ваги продукту вказує на забирання вологи з поверхневого шару, а швидкість з якою це відбувається на вологість поверхневого шару сировини.

На наступних етапах, з врахуванням моделі розподілу вологості всередині виробу та перенесенні тепла в виріб, можна передбачити швидкість надходження вологи до поверхневого шару. Для оптимізації параметрів сушіння важливо розуміти загальні закони розподілу вологи всередині продукту, динаміку випаровування. За цими параметрами також можна оцінити наскільки даний виріб відрізняється від еталонного.

Зазвичай, цей процес реалізується за рахунок одночасного перенесення тепла до продукту, що сушиться та маси рідини до повітря, з подальшим виведенням пари за межі системи. Хоча на сьогодні існує багато методів підведення тепла та виведення пари, в цій статті розглянемо такий, що передбачає підведення тепла за рахунок гарячого повітря та виведення пари в зовнішнє середовище шляхом подачі сухого повітря.

Моделювання показало, що приблизно 88% води транспортується в рідкому стані, конвективний потік рідкої води є незначним, а дифузія та конвекція водяної пари є важливими. Аналіз чутливості показав, що коефіцієнт дифузії та коефіцієнт масопередачі є параметрами, які найбільше впливають на час висихання моделі та оцінки профілю внутрішньої вологості [1].

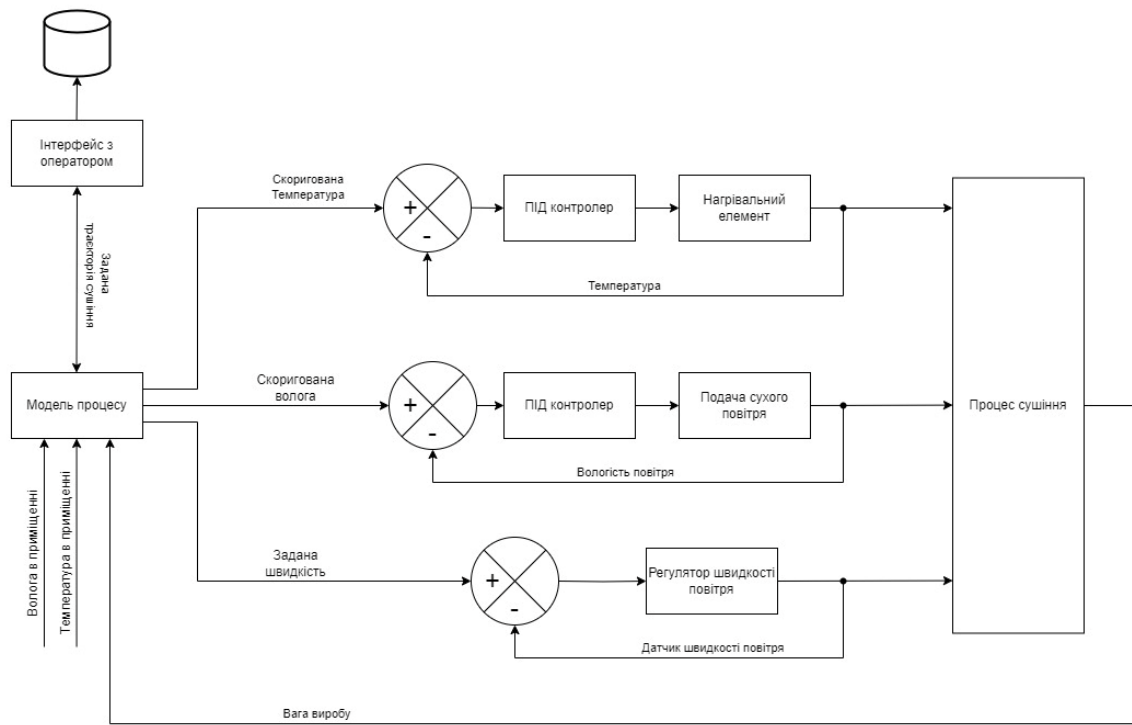


Рис.1. Структурна схема системи керування сушильною шафою зі зворотнім зв'язком по масі та використанням математичної моделі

Для опису зв'язку між вмістом вологи та рівноважною відносною вологістю використовували ізотерму сорбції вологи. Її знання є корисним для розуміння явищ, що відбуваються під час процесу сушіння або регідратації продуктів [9].

Як було зазначено вище, траєкторія сушіння обмежується в основному швидкістю дифузії та добре описується законом Фіка.

Швидкість втрати маси визначається рівнянням:

$$\frac{dM}{dt} = -k(T)(M - M_e) \quad (1)$$

t - час сушіння, с

M – маса продукту, кг

M_e – маса продукту при рівноважному стані вологості, кг

T – температура в Кельвінах

Визначення необхідних параметрів для побудови моделі:

$k(T)$ залежить від температури експоненційно за законом Арреніуса:

$$k(T) = k_0 e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

k_0 – передекспоненційний множник,

E_a – енергія активації (Дж/моль),

R – газова стала (8.314 Дж/(моль·К)),

T – температура в Кельвінах.

Так як енергія активації невідома, з метою визначення залежності k від температури, експериментально визначено значення $k(40^\circ\text{C})$, $k(60^\circ\text{C})$.

Враховуючи тривалість процесу сушіння, час сушіння вимірювався в годинах. Відповідно були розраховані і коефіцієнти.

$$k(40) = 0.27 \text{ при } T = 40^\circ\text{C} = 313.15\text{K},$$

$$k(60) = 0.42 \text{ при } T = 60^\circ\text{C} = 333.15\text{K}$$

Далі, вирішивши систему рівнянь, для будь-якої іншої температури T , використовуємо:

$$k(T) = 0.42 * e^{\frac{2304}{T}} \quad (3)$$

Таким чином, отримано всі вихідні дані для побудови моделі.

Враховуючи, що пелети мають складну геометричну форму і рецептура відрізняється від рецептури макаронних виробів, була здійснена експериментальна перевірка відповідності траєкторії сушіння запропонованій моделі. Для цього була змонтована лабораторна сушильна установка, зображена на рисунку 2.

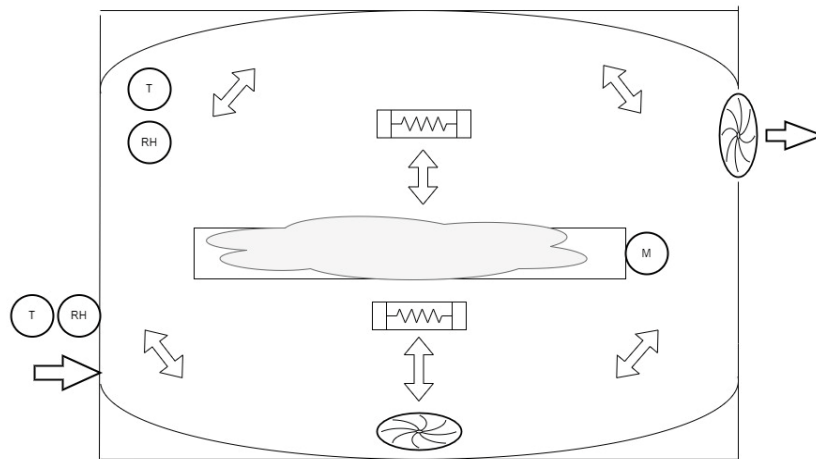


Рис.2. Лабораторна установка для сушіння пелет

На схемі (рисунок 2) використано такі позначення: T – давач температури, RH – давач вологості повітря, M – тензометричний давач маси.

Оскільки, метою випробувань було дослідити характеристики сировини при сталій температурі та вологості, система керування лабораторною установкою була реалізована за класичною схемою (рисунок 3). Задання встановленої температури та вологості проводилось за допомогою системи керування, яка задавала постійну температуру та вологість на базі мікроконтролера Raspberry Pi. Температура підтримувалась з точністю 1°C вологість в межах 2%. Маса зразка продукції, а також вологість та температура навколишнього середовища вимірювалась тим же контролером. Всі дані передавались на сервер з метою подальшої обробки. Дані записувались кожних 5 секунд. Фактична температура та вологість підтримувалась тим же контролером з використанням ПІД-контролю на програмному рівні. В подальшому, використання контролера для керування процесом сушіння, дозволило, не змінюючи апаратну частину системи керування, гнучко змінювати алгоритм роботи системи.

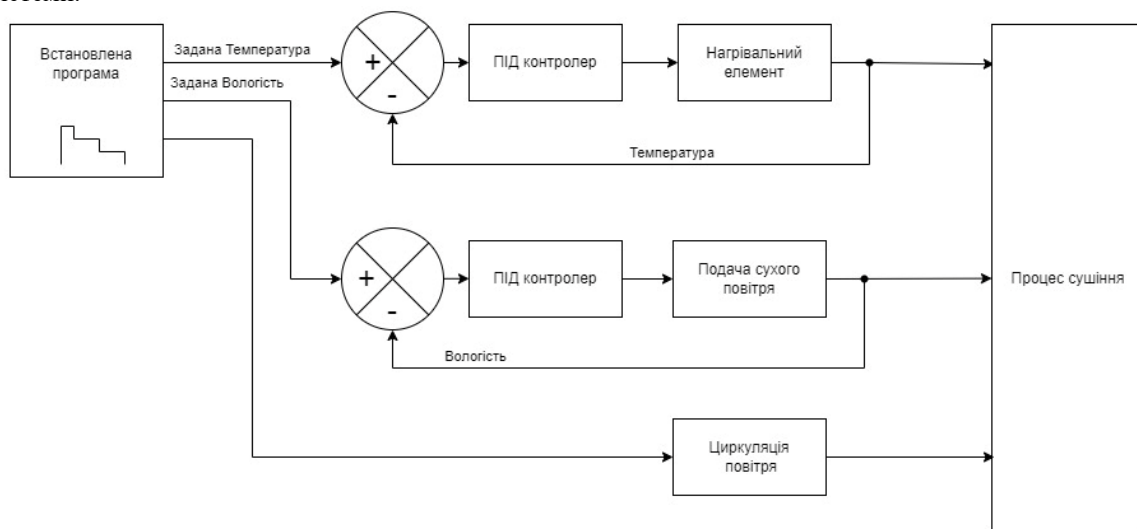


Рис.3. Структурна схема системи керування лабораторною установкою по траєкторії кривих температури та вологості

В результаті випробувань було встановлено, що траєкторія сушіння пелет добре описується законом Фіка і при апроксимації вимірних даних логарифмічною кривою з використанням оптимізації по методу найменших квадратів, максимальна відносна похибка не перевищувала 2% (рисунок 4). Таким чином, дана модель може бути використана для прогнозу траєкторії сушіння пелет складної форми з товщиною стінки до трьох міліметрів.

Експоненціальний коефіцієнт k та маса при рівноважній вологості M_e були визначені для трьох незалежних партій сировини при температурі 60 °C і експериментальним шляхом підтверджено, що k стабілізується протягом першої години сушіння і практично не змінюється в подальшому процесі. Після обробки даних було отримано наступні параметри: $k = 0.42$, $M_e = 0.22$. Ці дані, для конкретного виду виробів, можуть бути застосовані лише на початку сушіння, поки параметри продукту, що знаходиться в сушильній шафі, не буде перераховано.

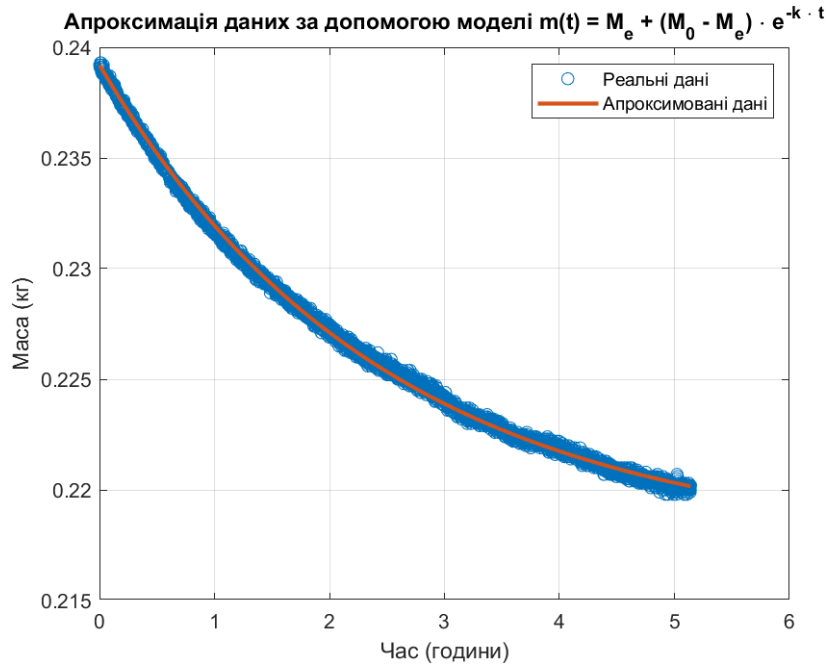


Рис.4. Апроксимація даних за допомогою кривої побудованої по запропонованій моделі

Зазвичай, початкова маса і вологість відомі і їх можна виміряти. В даному випадку початкова маса складала 250 г.

Для подальшого складання моделі необхідно розрахувати масу, до якої прямує крива при рівноважній вологості. Вона залежить властивостей матеріалу, а також від температури і вологості повітря, яке використовується для сушіння. Зв'язок між активною вологістю продукту та вологістю і температурою повітря активно вивчався на протязі останніх десятиліть, тому в першому наближенні можна скористатись ізотермами для макаронних виробів побудованих на основі рівняння Освіна [9].

$$a_w = \frac{\left[\frac{X}{(0,138 - 10,4 \cdot 10^{-4} T)} \right]^{\left[\frac{1}{(0,396 + 11,6 \cdot 10^{-4} T)} \right]}}{1 + \left[\frac{X}{(0,138 - 10,4 \cdot 10^{-4} T)} \right]^{\left[\frac{1}{(0,396 + 11,6 \cdot 10^{-4} T)} \right]}} \quad [4]$$

T – температура в Кельвінах

X – вміст вологості в сировині

На базі отриманої формули було розраховано ізотерми (рисунок 5), які співпадають з ізотермами з літературних джерел [9]. Це дозволило використати формулу в подальших розрахунках моделі.

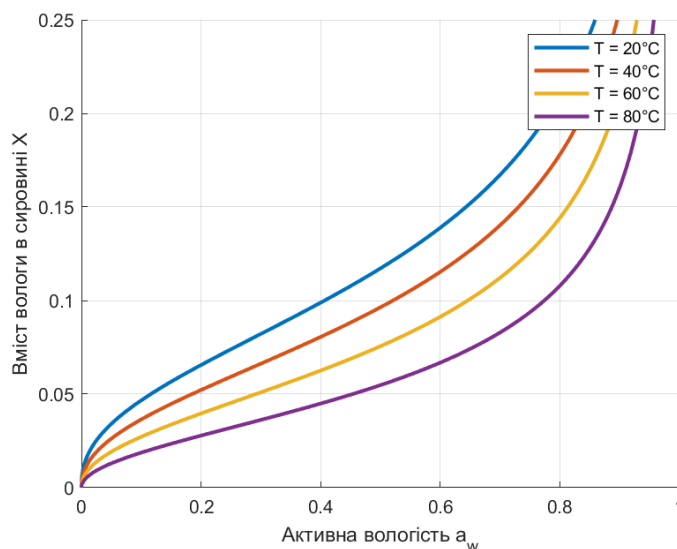


Рис.5. Ізотерми залежності вмісту вологи в сировині від активної вологості

Щоб знайти X через a_w , використано метод чисельного розв'язку Ньютона.

$$M_e = \frac{M_s}{1 + X_{final}} \quad (5)$$

де X_{final} — це вологість, яку матеріал досягає при досягненні рівноважного стану
 M_s – маса сухих речовин.

Для задання вихідних параметрів в початковий момент сушіння використовуємо величини M_e та k , взяті з літератури або на основі попередніх експериментальних випробувань. Надалі використовуються значення k та M_e отримані шляхом апроксимації фактичної кривої сушіння методом найменших квадратів (рисунок 6).

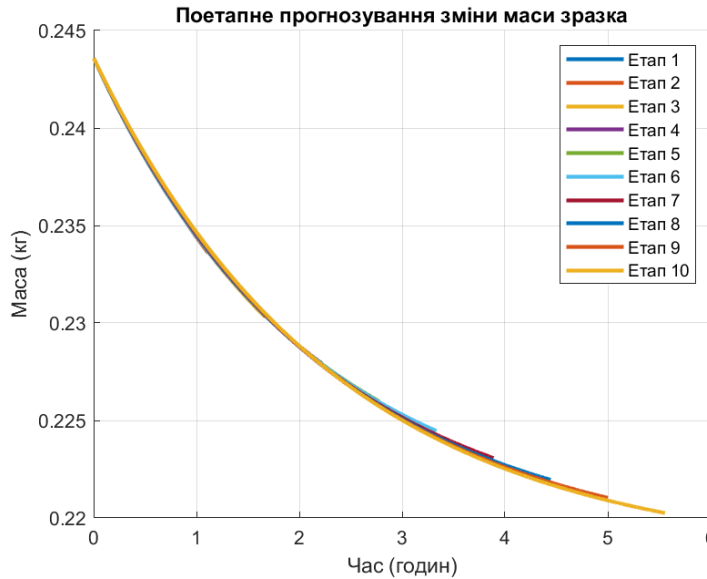


Рис.6. Прогнозування наступного етапу сушіння на основі фактичних даних

На рисунку 6 представлено процес сушіння зразка, базуючись на фактичних даних і параметрах порохованих на окремих відрізках (етапах). Кожен відрізок є апроксимованою функцією сушіння на основі запропонованої моделі.

Розроблена та перевірена на зразках модель дозволяє прогнозувати швидкість сушіння на кожному етапі в залежності від реальної температури та вологості повітря, а також властивостей матеріалу.

Модель є необхідною складовою для побудови системи керування. Алгоритм роботи системи повинен враховувати як технологічні вимоги до процесу сушіння так і обмеження, які накладаються реальними процесами та технологічними вимогами.

Практичні випробування проведені в лабораторних умовах показали хорошу прогнозованість траєкторії сушіння та її відповідність технологічним вимогам.

На основі проведених досліджень запропоновано систему керування для сушильної установки конвекційного типу, яка приведена на рисунку 7.

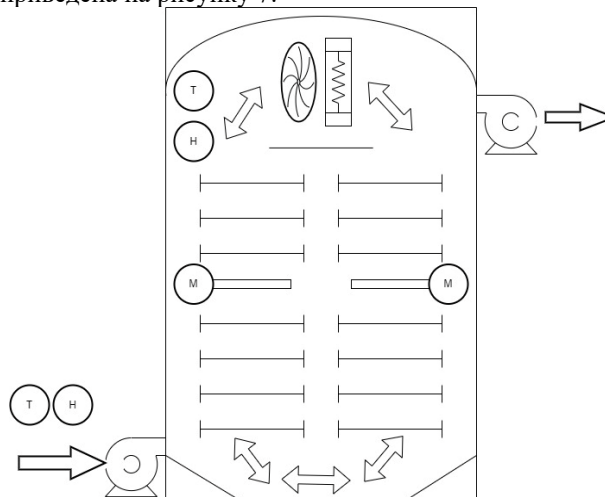


Рис.7. Умовна схема сушильної шафи з розташуванням датчиків

Висновки

Таким чином, було встановлено, що метод керування по траєкторії кривої зміни вологості на основі моделі забезпечує необхідні технологічні параметри сушіння в автоматичному режимі. Розроблено систему керування процесом сушіння по траєкторії. Випробування показали, що така система керування може бути застосована при сушінні пелет складної геометричної форми. Це дозволяє не лише покращити якість продукту та мінімізувати появу тріщин, а також досягти точного значення

заданого рівня вологості готової продукції. Дана розробка також дозволяє накопичувати дані щодо якісних характеристик продукції при сушінні в промислових масштабах.

Отже, керування по моделі дає технологу потужний інструмент, який дозволяє на кожному етапі встановлювати набір параметрів, що є визначальними для якості продукту, наприклад: вологість і швидкість сушіння, вологість і температура.

Література

1. Mercier, S., Marcos, B., Moresoli, C., Mondor, M., & Villeneuve, S. (2014). Modeling of internal moisture transport during durum wheat pasta drying. *Journal of Food Engineering*, 124, 19–27. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.028
2. GIOVANINI, Leonardo L. Predictive feedback control. *ISA transactions*, 2003, 42.2: 207-226.
3. LIU, HONG & ZHOU, LIUMING & HAYAKAWA, KAN-ICHI. (2006). Sensitivity Analysis for Hygrostress Crack Formation in Cylindrical Food During Drying. *Journal of Food Science*. 62. 447 - 450. 10.1111/j.1365-2621.1997.tb04403.x.
4. De Temmerman, Jeroen, et al. "MPC as control strategy for pasta drying processes." *Computers & Chemical Engineering* 33.1 (2009): 50-57.
5. Gamli, F. (2014). A Review Based On The Relationship Among Drying, Curve Fitting And Mathematical Models In Food Systems. In *Adv. Res. Agri. Vet. Sci* (Vol. 1, Issue 2). www.aravs.org
6. Antonio Vega-Gálvez, Margarita Miranda, Luis Puente Díaz, Lorena Lopez, Katia Rodriguez, Karina Di Scala, Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake, *Bioresource Technology*, Volume 101, Issue 19, 2010, Pages 7265-7270, ISSN 0960-8524, doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.040.
7. Thuy, N. M., Giau, T. N., Tai, N. v., & Minh, V. Q. (2023). Drying kinetics and mathematical modeling of dried macaroni supplemented with Gac aril. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica*, 22(3). doi.org/10.24275/rmiq/Alim23103
8. P Dufour, Y Touré, Multivariable model predictive control of a catalytic reverse flow reactor, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 28, Issue 11, 2004, Pages 2259-2270, ISSN 0098-1354, doi.org/10.1016/j.compchemeng.2004.04.006.
9. de Temmerman, J., Verboven, P., Delcour, J. A., Nicolai, B., & Ramon, H. (2008). Drying model for cylindrical pasta shapes using desorption isotherms. *Journal of Food Engineering*, 86(3), 414–421. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.10.016

References

1. Mercier, S., Marcos, B., Moresoli, C., Mondor, M., & Villeneuve, S. (2014). Modeling of internal moisture transport during durum wheat pasta drying. *Journal of Food Engineering*, 124, 19–27. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.028
2. GIOVANINI, Leonardo L. Predictive feedback control. *ISA transactions*, 2003, 42.2: 207-226.
3. LIU, HONG & ZHOU, LIUMING & HAYAKAWA, KAN-ICHI. (2006). Sensitivity Analysis for Hygrostress Crack Formation in Cylindrical Food During Drying. *Journal of Food Science*. 62. 447 - 450. 10.1111/j.1365-2621.1997.tb04403.x.
4. De Temmerman, Jeroen, et al. "MPC as control strategy for pasta drying processes." *Computers & Chemical Engineering* 33.1 (2009): 50-57.
5. Gamli, F. (2014). A Review Based On The Relationship Among Drying, Curve Fitting And Mathematical Models In Food Systems. In *Adv. Res. Agri. Vet. Sci* (Vol. 1, Issue 2). www.aravs.org
6. Antonio Vega-Gálvez, Margarita Miranda, Luis Puente Díaz, Lorena Lopez, Katia Rodriguez, Karina Di Scala, Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake, *Bioresource Technology*, Volume 101, Issue 19, 2010, Pages 7265-7270, ISSN 0960-8524, doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.040.
7. Thuy, N. M., Giau, T. N., Tai, N. v., & Minh, V. Q. (2023). Drying kinetics and mathematical modeling of dried macaroni supplemented with Gac aril. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica*, 22(3). doi.org/10.24275/rmiq/Alim23103
8. P Dufour, Y Touré, Multivariable model predictive control of a catalytic reverse flow reactor, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 28, Issue 11, 2004, Pages 2259-2270, ISSN 0098-1354, doi.org/10.1016/j.compchemeng.2004.04.006.
9. de Temmerman, J., Verboven, P., Delcour, J. A., Nicolai, B., & Ramon, H. (2008). Drying model for cylindrical pasta shapes using desorption isotherms. *Journal of Food Engineering*, 86(3), 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.10.016>