УДК 681.51:664.65(045)

В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, Ю.М. КОРЕНЕЦЬ, А.В. ШЕЇНА
Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРИГОТУВАННЯ ТІСТА В ПОЛІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ

В роботі розглянуто математичні моделі взаємодії ультразвукових коливань з гетерогенним середовищем, насиченим повітряними бульбашками та частинками борошна, м'ясних продуктів, розсолів та інших інгредієнтів. Одержано залежності інтенсивності ультразвукового випромінювання від розміру бульбашок та частинок твердої фази. Використано теорію взаємного проникнення речовин та побудовано модель гетерогенного середовища у вигляді елементарного паралелепіпеда, через який за рахунок молекулярної дифузії і ультразвукових коливань переміщується речовина. Одержано модифіковані рівняння взаємодії ультразвукових коливань високої частоти з тістом і частинками м'ясних продуктів. Спроектовано експериментальну установку приготування тіста, в якій диспергаційно-кавітаційний апарат з системою інтелектуального управління виконує функції очищення води, підготовки інгредієнтів та м'ясних додатків. Тістомісильний апарат з системою датчиків контролю і візуалізації та ультразвуковими інтенсифікаторами виконує операції безопарного замісу тіста й диспергування частинок м'ясних продуктів та інших оздоровчо-лікувальних компонентів.

Ключові слова: ідентифікація, ультразвукова кавітація, диспергування, тісто, управління, інгредієнти.

V.P. KHOROLSKYI, YU.M. KORENETS, A.V. SHEYINA
Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih

IDENTIFICATION OF THE DOUGH PREPARATION PROCESS IN THE FIELD OF ULTRASONIC RADIATION

Analysis of processes of production of innovative kinds of bread showed that the existing automation systems should be supplemented with a digital control, robotic technology AIDS the process. The purpose of this article is to identify a complex dynamic environment which is exposed to ultrasonic vibrations for the development of systems of control and management robotic technology complex for the production of innovative varieties of bread. In the article the mathematical model of interaction of ultrasonic oscillations of the heterogeneous medium saturated by air bubbles and particles of flour, meat products, pickles and other ingredients. The dependences of intensity of ultrasonic radiation from the size of the bubbles and solid particles. Used the theory of mutual penetration of substances and constructed a model of heterogeneous environment in the form of the elementary parallelepiped, through which molecular diffusion and ultrasonic vibrations to move the substance. The obtained modified equations of interaction of ultrasonic fluctuations of high frequency test and the particles of meat products. Designed experimental setup preparation of the test, which dispergating cavitation machine with smart control system performs the purification of water, preparation of meat ingredients and applications. Dough kneading machine with a system of sensors and imaging and ultrasonic modulators performs dough kneading of the dough and dispersing particles of meat products and other health and medical components. Ultrasonic vibrations, forming a cavitation-dispergating effect, ensuring uniform distribution of moisture between the particles of flour, more rapid hydration of the particles of the dispersed phase is formed to relax the gluten. It causes the adhesion and cohesion effects flour with particles of meat products. Mixing dispersed particles of meat, particles of flour under the action of ultrasonic vibrations leads to the formation of homogeneous, heterogeneous environment. In the process of cavitation dispersion of the particles of flour and meat particles in a strong field of ultrasonic waves with a frequency of 22 kHz moisture with dissolved protein and sugar, and other ingredients will form a thin surface film, which improves not only the appearance of products, but also positively influences time saving innovative products.

Key words: identification, ultrasonic cavitation, dispersion, dough, control the ingredients.

Постановка задачі

Сучасне хлібопекарське виробництво відноситься до складних технологічних процесів, вихідні параметри яких залежать від якісних характеристик борошна, дріжджів, та інших інгредієнтів. Харчова цінність хлібобулочних виробів для населення, що проживає на території з техногенним навантаженням полягає, в першу чергу, в їх безпечності. Суттєвою є їх участь у створенні системи дієтично-профілактичного харчування.

Збагачення продуктів харчування макро- і мікроелементами вимагає від науковців розробки нового технологічного обладнання. Воно повинно відповідати концепції безлюдної технології, сучасним цифровим системам контролю якості продукції та автоматизованого управління на базі робото-технологічних комплексів з інтенсифікаторами, вбудованими в технологічний процес приготування тіста [1].

Аналіз процесів виробництва інноваційних сортів хліба показав, що існуючі системи автоматизації доцільно доповнити системами цифрового контролю, робото-технологічними інтенсифікаторами процесу (у випадку низьких хлібопекарських властивостей борошна, води, розсолів).

Ці фактори сформулювали необхідність проведення додаткових досліджень щодо ідентифікації технологічних процесів приготування тіста з лікувально-профілактичними інгредієнтами та м'ясними додатками в технологічному кавітаційному полі ультразвукових коливань низької і високої частоти.

Аналіз досліджень та публікацій

Питанням вивчення впливу ультразвукових коливань на технологічне середовище присвятили науковій праці українські вчені: Г.В. Дейниченко, Г.М. Постнов, М.А. Чеканов, В.М. Червоний, Д.А. Нечипуренко [2, 3], російські вчені С.В. Капустін, О.М. Красуля [4], С.Д. Шестаков [5], В.М. Хмельов, О.М. Слівін, Р.В. Барсуков [6].

Автори наведених публікацій довели наступне: в полі ультразвукових хвиль розподіл часточок за розмірами залежить від використання акустичних параметрів ультразвукової обробки (частоти, питомої енергії, тривалості обробки). Це питання постає дуже важливим для ідентифікації параметрів гетерогенного середовища і створення математичних моделей. Його рішення дозволить обґрунтувати раціональні параметри ультразвукової кавітаційної обробки води, дріжджів, інших інгредієнтів, наприклад, часточок продуктів тваринного походження, з точки зору використання ультразвукових коливань (УЗК) для виробництва продуктів харчування. Таким чином, удосконалення ультразвукового диспергування у вигляді робототехнологічних інтенсифікаторів є актуальним науково-технічним завданням, але вимагає від науковців додаткових досліджень, а саме:

- моделювання процесу взаємодії гетерогенного середовища під дією ультразвукових коливань низької і високої частоти з частинками борошна, розсолів і м’ясних додатків;
- дослідження взаємодії ультразвукових коливань з тістом, в яке диспергуються частинки м’ясних продуктів або інші інгредієнти з лікувально-профілактичними параметрами;
- вдосконалення конструкції тістомісильних машин, як робототехнологічної системи з ультразвуковими кавітаційними інтенсифікаторами.

Формулювання цілей

Метою статті є ідентифікація складного динамічного середовища, на яке впливають ультразвукові коливання, для розробки систем контролю та управління робототехнологічними комплексами виробництва інноваційних сортів хліба.

Виклад основного матеріалу дослідження

Технологічне середовище опари та тіста представляє собою гетерогенну систему, яка включає частинки борошна, дріжджів та підсилювачів, воду, жири у рідкому стані та бульбашки, заповнені газовою сумішшю. Кожна із перелічених складових характеризується складним функціональним складом.

При розповсюдженні в гетерогенному середовищі ультразвукові коливання зустрічаються з частинками борошна, солі, олії, дріжджів та інших інгредієнтів (частинок покращувачів та збагачувачів рослинного або тваринного походження). Розповсюдження ультразвукових коливань в тісті, яке містить газові бульбашки, має суттєві особливості. Наприклад, бульбашки, розміри яких близькі до резонансних для обраної частоти ультразвукових коливань викликають значні кавітаційні впливи на технологічне середовище [4, 5].

Припустимо, що одиничне дискове джерело одержує направлений пучок ультразвукових хвиль.

Таке джерело може бути описано функцією густини випромінювання:

$$S(r,\delta)=\Omega(z-z_0)\frac{\Omega(\cos v-1)S_t(\alpha-\rho)}{2\pi a^2} \qquad (1)$$

де cos *v* = *δ*×*K* (*K* – одиничний вектор, направлений впродовж осі *z*);

α – радіус дискового джерела;

$$\rho=\sqrt{x^2-y^2}\ ;$$

z_0 – координата щільності випромінювання дискового джерела.

S(t) – ступенева функція, яка має такі властивості:

$$S'_t(x)=\begin{cases}1 & якщо \quad x\succ 0\\ 0 & якщо \quad x\le 0\end{cases} \qquad (2)$$

Інтенсивність нерозсіяного ультразвукового випромінювання визначається через функцію щільності випромінювання джерела:

$$J_\ell^0(r,\delta)=\int_0^\infty S(r-\xi(\delta,\delta)e^{-\tau(\xi,\lambda\ell)d\xi}d\xi \qquad (3)$$

Інтегральну інтенсивність ультразвукових коливань отримаємо, підставивши в формулу (3) функцію (1). Після інтегрування отримуємо залежність:

$$J_\lambda^0(r,\delta)=J_{0\ell}\times S_t(\alpha-\rho)e^{-\Sigma(z-z_0)}\ , \qquad (4)$$

де $J_{0\ell}$ – значення інтенсивності пучка випромінювання в точках з координатою $z = z_0$. Якщо $z = 0$, то це означає, що джерело знаходиться на початку координат.

Якщо випромінювач УЗК розташований на вісі пучка, то його показники пропорційні величині:

$$J_\lambda^0(z)=J_{0\lambda\ell}e^{-\Sigma z}. \qquad (5)$$

В цьому виразі:

$$\sum z=n_1\alpha_D(\ell\lambda,R)+n\Omega(\lambda\ell,r), \qquad (6)$$

де n_1 – концентрація повітряних бульбашок;

n – концентрація частинок твердої фази;

R – радіус бульбашок;

$n\Omega(\lambda\ell,r)$ – повний перетин ослабленого сигналу на частинці з радіусом *r*.

У процесі впливу ультразвукових коливань в 22 кГц на технологічне середовище, газова фаза якого буде характеризуватися складною функціональною складовою, для коректної оцінки впливу бульбашок на послаблення пучка ультразвукових коливань необхідно врахувати як флокуляцію числа бульбашок в об’ємі, так і розподіл бульбашок за розміром. Останнє особливо суттєве, оскільки процес затухання ультразвукових коливань на бульбашках носить резонансний характер. Тоді утворені кавітаційно-дезінтеграційні процеси взаємодії УЗК з тістом стають керованими і дозволяють контролювати інтенсивність кавітаційного впливу за величиною індексу кавітації [7, 8].

$$I_K = \frac{V}{\Delta V}\ , \tag{7}$$

де V – об’єм рідини (тіста);

$\Delta\ V$ – об’єм кавітаційних бульбашок, утворених пучком ультразвукових коливань.

Концентрацію бульбашок будемо визначати таким чином:

$$J_\lambda^0(z) = J\ell \exp\left\{-\frac{1}{V}\sum_{i=1}^{N_1}\left[\Omega_\rho(\ell\lambda, R_i)z\right]\right\}. \tag{8}$$

Вираз (6) показує, як послаблюється сигнал ультразвукових коливань повітряними бульбашками в процесі взаємодії його з гетерогенним середовищем.

Показник $J_\lambda^0(z)$ – сигнал приймача випромінювання, який усереднений флуктуаціями числа і розмірами бульбашок, його можна визначити так:

$$\prec J_\lambda^0(z) \succ J_\ell \prec \exp\left\{-\frac{1}{V}\sum_{i=1}^{N_1}\left[\Omega_\rho(\ell\lambda, R_i)z\right]\right\} \succ\ , \tag{9}$$

де $<N_1> = n_1 V$ – число бульбашок.

Якщо позначити через ξ випадкову величину, то:

$$\xi = \exp\left\{-\frac{1}{V}\sum_{i=1}^{N_1}\left[\Omega_\rho(\ell\lambda, R_i)z\right]\right\}. \tag{10}$$

Після знаходження середнього значення величини ξ і, враховуючи флуктуації числа бульбашок і розмірів частинок твердої фази, отримаємо усереднене значення інтегральної інтенсивності:

$$\prec J_\lambda^0(z) \succ J_{0\ell}\lambda \exp\{-V[n(1-\eta) + n(1-\eta n)]\}\ , \tag{11}$$

де

$$\eta = \int_0^\infty \exp\left\{-\frac{1}{V}\Omega(\ell\lambda, r)z\right\}\varphi(r)dr\ , \tag{12}$$

де $\varphi(r)$ – функція розподілення числа частинок твердої фази борошна та частинок м’яса.

$$\eta_1 = \int_0^\infty \exp\left\{-\frac{z}{V}\Omega_p(л\lambda, R)f(R)dR\right\}, \tag{13}$$

де $f(R)$ – функція розподілу бульбашок за розмірами в кавітаційній камері.

Таким чином, бульбашки η_1 відіграють суттєву роль в процесах контролю параметрів густини тіста. В системі контролю параметрів тіста та інтелектуального управління робототехнологічними інтенсифікаторами в якості індикаторів кавітаційних процесів використані залежності (6–13) диспергації в тісто частинок м’ясних додатків [7, 8].

На рисунку 1 наведено схему експериментальної установки з дослідження впливу ультразвукових коливань низької частоти від 20 до 40 кГц і високочастотних УЗК з частотами від 100 кГц до 1800 кГц.

Установка складається з двох частин: диспергаційно-кавітаційного та тістомісильного апаратів.

В рамках експериментальних досліджень були використані випромінювачі В1, В2 з ІУЗК1, ІУЗК2 з частотою ультразвукових коливань JВ=20-22 кГц. Вибір такого частотного діапазону пояснюється наступним: по-перше властивістю ультразвукових коливань рівномірно проникати у незначні пори й капіляри тіста на всю товщину; по-друге можливістю дослідити процес диспергування за рахунок кавітаційних потоків рідини й частинок м’ясних продуктів та їх здатність рівномірно розподілятись по поверхні тіста; по-третє виконувати за допомогою ультразвукових коливань кероване зціплення частинок борошна та м’ясних продуктів.

Використання теорії взаємного проникнення речовин, яка базується на законі Фіка, надає можливість встановити зв’язок між градієнтом концентрації і потоком дифузії [9].

Молекулярна дифузія в речовині виникає в результаті хаотичного руху молекул. В цьому випадку має місце перенесення молекул розподільчої речовини з областей з високою концентрацією в області низької концентрації. Кінетика перенесення підпорядковується в цьому випадку першому закону Фіка.

Кількість продифундованої речовини пропорційна градієнту концентрації, площині, перпендикулярній напрямку дифузійного потоку, і часу:

Цей процес опишемо залежністю виду:

$$dM = -D\frac{\partial C}{\partial x}dFd\tau \tag{14}$$

де dM – кількість продифундованої речовини;

D – коефіцієнт пропорційності, або коефіцієнт дифузії;

$\frac{\partial C}{\partial x}$ – градієнт концентрації у напрямку дифузії;

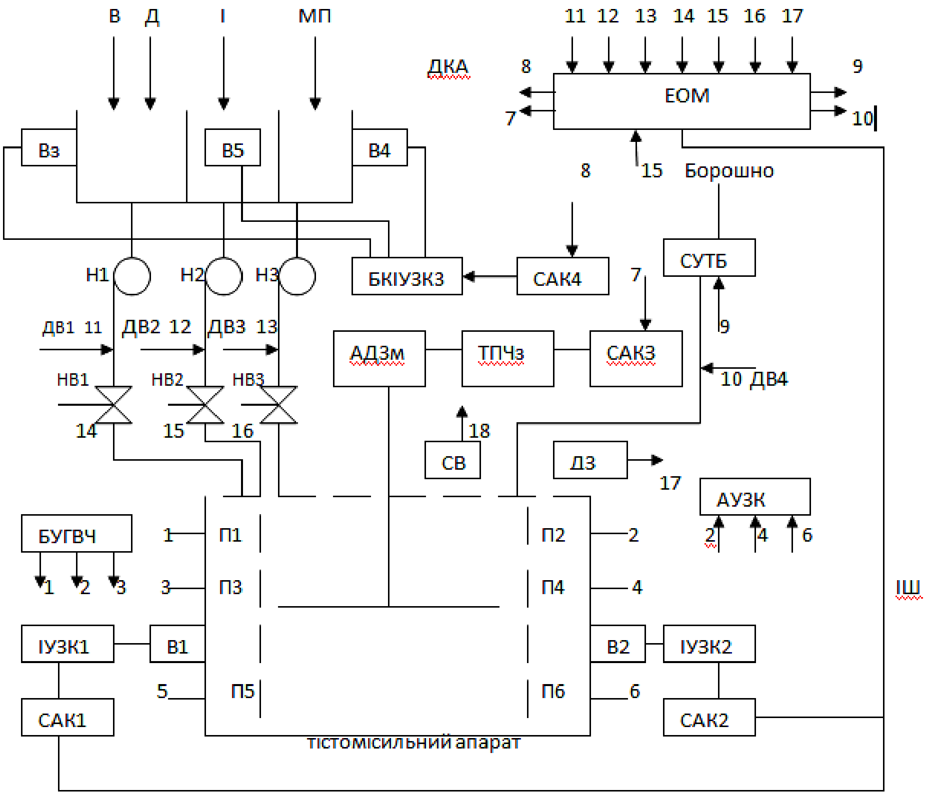

Рис. 1. Схема експериментальної установки приготування тіста з ультразвуковими інтенсифікаторами В1, В2, В3, В4, В5 – випромінювачі; В – вода; Д – дріжджі; І – інгредієнти; МП – м'ясопродукти; Н1, Н2, Н3 – насоси, ДВ1, ДВ2, ДВ3 – датчики витрат; ВК1, ВК2, ВК3 – клапани вентилів; АДЗМ – асинхронний двигун змішувача; ТПЧ – тристоронній перетворювач частоти двигуна змішувача; ДКА – диспергаційно-кавітаційний апарат, САК1, САК2, САК3 – системи адаптивного керування; СУТБ – система управління транспортування борошна; ІУЗК1, ІУЗК2 – інтенсифікатори ультразвукових коливань; БКІУЗК3 – багатоканальний інтенсифікатор ультразвукових коливань; БУГВЧ – блок ультразвукових генераторів високої частоти з датчиками–перетворювачами П1,П3,П5; Д3 – датчик запаху; СВ – система візуалізації; АУЗК – аналізатор ультразвукових коливань з датчиками – приймачами П2,П4,П6; ЕОМ – електронна обчислювальна машина; ІШ – інформаційна шина

dF– елементарна площина, через яку проходить дифузія;

$d\tau$ – тривалість дифузії.

Коефіцієнт дифузії D показує, яка кількість речовини дифундує через площину поверхні 1м^2 за 1с при різниці концентрації на відстані 1 м, рівній одиниці.

Знак мінус у правій частині рівняння (14) свідчить про те, що при молекулярній дифузії у напрямку переміщення речовини концентрація зменшується.

Очевидно, що спосіб визначення концентрації та її розмірності визначає коефіцієнт дифузії.

Для рідини цей коефіцієнт буде визначатись за формулою:

$$D = \frac{8{,}2\times10^{-12}T}{\mu\times V_A^{\frac{1}{3}}}\left[1+\left(\frac{3V_B}{V_A}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \tag{15}$$

де T – абсолютна температура, К;

ρ – тиск, Па;

$V_A^{1/3}\times V_B^{1/3}$ – мольні об'єми взаємодіючих рідин, см^3/моль;

μ – динамічна в'язкість рідини, в якій виникає дифузія, Па·с.

Дані, одержані в процесі експериментальних досліджень, показують, що коефіцієнт дифузії залежить від:

- агрегатного стану системи (вода – дріжджі – борошно – інгредієнти);
- коефіцієнтів дифузії рідин і газів.

Коефіцієнт дифузії збільшуватиметься зі зростанням температури і зменшуватиметься з підвищенням тиску.

Слід відзначити, що формула (15) справедлива лише для розбавленої рідини. Для концентрованих розчинів необхідно виконати відповідний перерахунок по формулі:

$$D_K = D\frac{d\ln a}{d\ln C} = D\left(1+\frac{d\ln y}{d\ln C}\right), \tag{16}$$

де D_K – коефіцієнт дифузії в рідині з концентрацією C;

a – активність речовини, що дифундує;

С – концентрація речовини, що дифундує;

у – коефіцієнт активності.

Якщо наочно представити гетерогенне середовище у вигляді елементарного паралелепіпеда з ребрами *dx*, *dy*, *dz*, то можна вивести диференційне рівняння молекулярної дифузії.

Через цей елементарний паралелепіпед за рахунок молекулярної дифузії переміщується речовина із складним гетерогенним середовищем (компоненти твердих частинок борошна, дріжджів, інгредієнтів, цукру, солі тощо).

Нехай через ліву, задню і нижню грані за час *dτ* в нього входить кількість речовини відповідно *Mx*, *My*, *Mz*, а через протилежну грань – праву, передню і верхню – виходить кількість речовини відповідно *Mx+dx*, *My+dy*, *Mz+dz*.

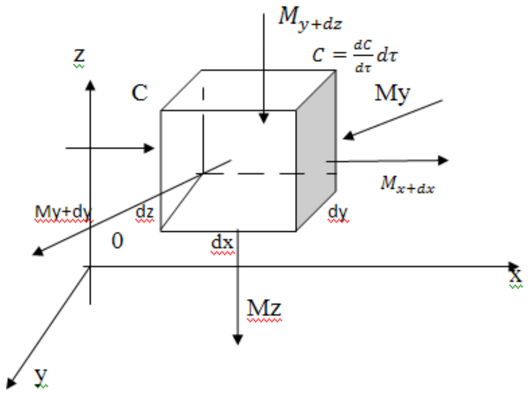

Рис. 2. До виводу диференційного рівняння молекулярної дифузії

Отже, елемент за час *dτ* одержує пріоритет, дифундуючи речовину в кількості:

$$M=\left(M_x-M_{x+dx}\right)+\left(M_y-M_{y+dy}\right)+\left(M_z-M_{z+dz}\right) \tag{17}$$

При цьому концентрація речовини, що дифундує, підвищується на $\frac{dC}{d\tau}d\tau$.

Згідно з основним законом молекулярної дифузії:

$$M_x=-D\frac{\partial C}{\partial x}dydzd\tau \tag{18}$$

Тоді:

$$M_{x+dx}=-D\frac{\partial\left(C+\frac{dC}{dx}dx\right)}{dx}dydzd\tau=-D\frac{dC}{dx}dydzd\tau-D\frac{\partial^2 C}{dx^2}dxdyd \tag{19}$$

Отже:

$$dM_x=M_x-M_{x+dx}=D\frac{\partial^2 C}{dx^2}dxdydzd\tau \tag{20}$$

Аналітично знайдемо:

$$dM_x=D\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}dxdydzd\tau\ , \tag{21}$$

$$dM_2=D\frac{\partial^2 C}{dz^2}dxdydzd\tau\,. \tag{22}$$

Складаючи ліві й праві частини трьох послідовних рівнянь, одержуємо:

$$dM=dM_x+dM_y+dM_\tau=D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right)dxdydzd\tau \tag{23}$$

З іншого боку, частину кількості речовини, що дифундує, в елементі можливо знайти множенням об’єму елементу на зміну концентрації в часі *dτ*, тобто:

$$dM=dxdydz\frac{\partial C}{\partial\tau}\,. \tag{24}$$

Співставляючи співвідношення (23) й (24), одержимо диференційне рівняння молекулярної дифузії:

$$\frac{\partial C}{\partial\tau}=D\left[\frac{\partial^{2C}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 C}{dz^2}\right]. \tag{25}$$

У процесі впливу УЗК на технологічне середовище (тісто) за рахунок конвективної дифузії речовина переноситься із ядра потоку речовини до межі розділу фаз безпосередньо конвективною і молекулярною дифузією. На рисунку 3 наведено взаємодію УЗК з шаром гетерогенної рідини. Шару (ДПШ) гетерогенної рідини в полі впливу ультразвукових коливань й дифузійного прикордонного шару (ДПШ) відповідає модель Щукарева [9].

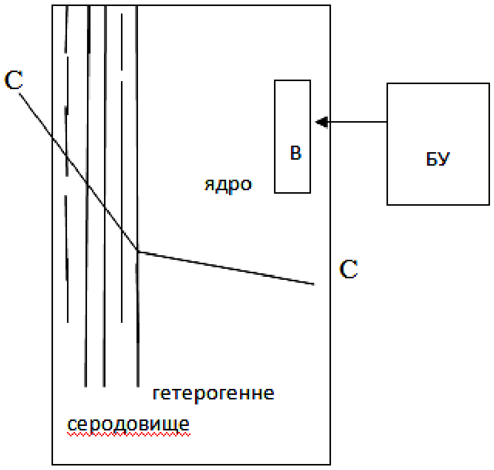

Рис. 3. Схема до пояснення формування закону Щукарева – положення речовини УЗК

У системі, яку ми вивчаємо, будемо вважати, що потік гетерогенної речовини складається із двох частин, ядра та граничного дифузійного шару.

В ядрі перенесення речовини здійснюється як за рахунок струму рідини, так і за рахунок створеного ультразвуковими коливаннями тиску і турбулентних течій.

При цьому будемо вважати, що концентрація перерізів в умовах квазістаціонарного режиму зберігається постійною.

По мірі наближення до граничного дифузійного шару турбулентність і, отже турбулентне перенесення затухає, а з наближенням до кордону поверхні випромінювача починає домінувати: з одного боку перенесення частинок речовини ультразвуковим тиском; а з іншого за рахунок молекулярної дифузії.

У цьому випадку концентрація розподіленої речовини буде функцією не лише координат x, y, z і часу τ (як у випадку лише молекулярної дифузії), але і складових швидкості ультразвукових коливань ω_x, ω_y, ω_z.

Перенесення маси розподіленої речовини внаслідок молекулярної дифузії математично описано диференційним рівнянням молекулярної дифузії (25). Ліва частина цього рівняння представляє собою локальні зміни концентрації розподіленої речовини.

Під дією ультразвукових коливань елемент буде переміщатися з однієї точки простору в інші. У цьому випадку зміни концентрації розподіленої речовини в елементі можуть бути виражені за допомогою похідної. Остання, враховує зміни величини частинки тіста з м’ясопродуктам в часі, а також зміни, які пов’язані з переміщенням елемента із однієї точки в іншу.

$$\frac{dC}{d\tau}=\frac{\partial C}{\partial \tau}+\frac{\partial C}{\partial x}\omega_x+\frac{\partial C}{\partial y}\omega_y+\frac{\partial C}{\partial z}\omega_z \cdot \tag{26}$$

В рівнянні (26) $\frac{\partial C}{\partial \tau}$ представляє собою локальну зміну концентрації розподіленої речовини під дією ультразвукових коливань.

$\frac{\partial C}{\partial x}\omega_x+\frac{\partial C}{\partial y}\omega_y+\frac{\partial C}{\partial z}\omega_z$ – конвективна зміна концентрації речовини під дією кавітаційних впливів.

Якщо в рівнянні молекулярної дифузії (25) замінити локальну зміну концентрації $\frac{\partial C}{\partial \tau}$ повним його значенням, $\frac{\partial C}{\partial \tau}$, відповідно (26), то в результаті одержимо диференційне рівняння конвективної дифузії речовини під дією кавітаційних впливів, тобто одержимо диференційне рівняння масообміну в рухомому середовищі, викликане ультразвуковими коливаннями генерованих випромінювачів В і блоком управління БУ.

$$\frac{\partial C}{\partial \tau}+\frac{\partial C}{\partial x}\omega_x+\frac{\partial C}{\partial y}\omega_y+\frac{\partial C}{\partial z}\omega_z=D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+\frac{\partial^{2C}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\div\right). \tag{27}$$

Із рівняння (27) витікає наступне: під дією ультразвукових коливань змінними є концентрація і швидкість потоку речовини. Ці явища необхідно дослідити з позиції виникнення біфуркаційних процесів в гетерогенному середовищі.

Будемо розглядати питання виникнення біфуркацій в системі опара-тісто під дією УЗК, коли народжується цикл в динамічній системі (26) і коли її характеристики залежать від керованих параметрів: потужності випромінювача РУЗК (P_i), густини тіста ρ; кількісних параметрів м’ясних продуктів K_p:

$$\begin{cases}\frac{dx}{dt}=\alpha\left(H\left(x_1 P_i\right)-y\right)\\ \frac{dy}{dt}=\beta\left(x-\varphi\left(y,\rho\right)\right)\\ \frac{dz}{dt}=\gamma-\varphi\left(z,K_p\right)\end{cases}, \tag{28}$$

де $\alpha, \beta, \gamma = \text{const} > 0, \alpha$;

Pi, ρ, K_p – параметри біфуркації.

Будемо вважати, що на частоті 22 кГц УЗК експериментально одержано залежності:

$$\begin{cases}H\left(\xi,R\right)=y_0\\ \varphi\left(y_0,R\right)=\xi\\ \gamma\left(x_0,P\right)=\omega\end{cases} \cdot \tag{29}$$

При будь-яких P, e, ξ, ω із деякого інтервалу $I_{P_0}\times\left(\xi\times y_0\right)$ – ізольована крапка системи, функції $H(x, P_i)$; $\varphi(y, P_i)$, $\gamma(z, \xi)$ – аналітичні на множинах $I_\xi \times I_{P_0}$, $I_{y_0}\times I_{P_0}$ відповідно.

Управлінським впливом є потужність інтенсифікатора P_i. За функціонал якості приймаємо однорідність частинок м’яса в технологічному середовищі (тісто).

Множину допустимих управлінь $U_{доп}$ визначимо таким чином:

$$U_{доп}=\left\{P_i\in KC\left[t_0,t_1\right]\div P_{i\min}\le P_i(t)\prec P_{i\max}\forall t\in\left[t_0,t_1\right]\right\}, \tag{29}$$

де $KC\left[t_0,t_1\right]$ – множина усіх шматково-безперервних функцій на відрізку $\left[t_0,t_1\right]$.

Згідно з принципами оптимального управління [10]:

$$U_{дon} = \lfloor P_i, \rho, T, K_p, \xi \rfloor = \{P_i(t) + \rho \operatorname{sgn}[\sin(T - 1 + \xi) \subset U_{on}]\} \qquad (30)$$

де P_i – потужність випромінювача ультразвукових коливань інтенсифікатора;
ρ – густина тіста з м’ясними додатками;
T – час;
ξ – концентрація бульбашок;
K_p – кількісні параметри м’ясних продуктів.

Тоді необхідно побудувати систему з великою кількістю зв’язків для управління робототехнологічним комплексом, в якій у якості локальних систем запропоновано: САК1, САК2 – системи адаптивного управління інтенсифікаторами; ІУЗК1, ІУЗК2, САК3 – системи адаптивного керування продуктивністю тістомісильної машини; САК4 – системи адаптивного керування багатоканальним інтенсифікатором УЗК з випромінювачами Б3, Б4, Б5.

В робототехнологічному комплексі в тістомісильний апарат очищену воду з диспергованими частинками дріжджів подають насосом Н1. В системі контролю продуктивності насоса Н1 передбачено визначення параметрів витрат ДВ1 і положення виконавчого механізму НВ1, сигнали 11 й 14 контролю й керування з яких надходять до ЕОМ. Подачу інгредієнтів (І) в тістомісильний апарат виконує насос (Н2) з датчиком витрат ДВ2 і регульованим вентилем НВ2, сигнали з яких 12, 15 надходять до ЕОМ. Подачу диспергованих частинок м’яса виконує насос (Н2), контроль витрат виконує система контролю ДВ3 з виконавчим механізмом НВ3, сигнали з яких 13,16 надходять до ЕОМ. В системі управління транспортування борошна передбачено контроль витрат за допомогою системи ДВ4, сигнал 10 з якої надходить до ЕОМ.

В диспергаційно-кавітаційному апараті (ДКА) виконується: кероване очищення води; приготування оздоровчо-лікувальних інгредієнтів, м’ясних додатків тощо. За допомогою УАЗК, розроблених програмних продуктів й розроблених способів управління [11] ЕОМ керує процесом ультразвукової кавітації. При цьому робототехнологічні інтенсифікатори ІУЗК1 і ІУЗК2 з системами САК1, САК2 і датчиками контролю параметрів технологічного середовища П2, П4, П6, взаємодіючи з тістом утворюють фазу розрідження хвилі УЗК. В результаті цього керованого явища в ядрі технологічного середовища тістомісильного апарату виникають розриви по слабких місцях (кавітаційні зародки). У даному випадку – це частинки борошна, дріжджів, повітряні бульбашки, м’ясні частинки, які дисперговані в тісто тощо. За допомогою АУЗК і перетворювачів П5, П6 ЕОМ визначає порогове значення інтенсивності ультразвуку, а отже, ІУЗК 1, ІУЗК2 за рахунок кавітаційно-диспергаційного процесу виконують диспергування частинок м’яса в тісто. Зі зростанням інтенсивності УЗК від 100 дБ до 140 дБ на частоті 22 кГц швидкість процесу ультразвукового диспергування збільшується. При цьому, вона залежить від характеристик борошна і величини сил взаємодії між окремими частинками борошна і м’ясних частинок. Продуктивність тістомісильного апарату регулюють за допомогою системи САК3, ТПЧ3 і АД3. Данні з системи візуалізації СВ і датчиків запаху Д3 (рис.1), яка передбачає використання інфрачервоних оптичних сенсорів, надходить в ЕОМ і, після обчислення за допомогою нейронних мереж [10], інформують оператора про готовність продукту.

В системі готовності тіста з додатками важливу роль відіграють датчики контролю П2 – густини тіста і П4 – однорідності.

Позначимо інтенсивність сигналу ультразвукового випромінювача через ξ_0. За умови, що сигнал УЗК проходить фіксовану відстань z_p в гетерогенному середовищі тісто-м’ясні додатки, то:

$$\xi_0 = \exp\left\{ -\frac{1}{V} \sum_{i-1}^{K} \delta(r_i) Z_p \right\}, \qquad (32)$$

де ξ_0 – інтенсивність сигналу випромінювання;
V – об’єм технологічного середовища, що контролюється;
δ_i – переріз затухання частинок радіуса r_i сформованого середовища борошна з м’ясним продуктом.

Дисперсію ультразвукового сигналу при проходженні ним шару товщиною δ_i визначимо із виразу:

$$D(\xi_0) = J_0^0 \exp\left\{ 2nZ_p \int_0^\infty \delta(r) P_\beta(r) dr \right\} \left[\exp \frac{2nz^2 p}{V} \times \int_0^\infty \delta^r(r) P_\beta(r) dr - \exp \frac{nZ^2 p}{V} \int_0^\infty \delta^2(r) P_\beta(r) dr \right] \qquad (33)$$

Якщо позначити $\varphi = \exp\left\{ \frac{nz^2}{V} \int_0^\infty \delta^2(r) P_\beta(r) dr \right\}$, то, після перетворення, можна визначити характеристичну функцію:

$$S' = \frac{\ln \varphi}{\ln \frac{J_0}{\prec \varepsilon \succ}} = \frac{Z^2 \int_0^\infty \delta^2(r) P_\beta(r) dr}{\delta(r) P_\beta(r) dr}, \qquad (34)$$

Аналіз виразу (33) показує, що величина S' є функцією густини технологічного середовища операції «тісто-м’ясні додатки».

Для цього потрібно вимірювати $J_{01} \prec \xi_0 \succ D(\xi_0)$ обчислюючи параметр S$^{/}$, та опосередковано визначати густину $\rho\tau$ технологічного середовища.

Розрахунок енергії, яку випромінює перетворювач, проводили за наступною формулою:

$$E_{ВИП} = \left(\frac{1}{2}\right)\rho\left(2\pi f\right)^2 A^2 V_{ОБ.р.к.} \qquad (35)$$

де $E_{ВИП}$ – енергія випромінювача, Дж/м^3;
ρ – густина середовища, кг/м^3;
f – частота випромінювання, кГц;
A – амплітуда коливань торця випромінювача, м;
$V_{ОБ.р.к.}$ – об’єм робочої камери, м^3.

Ці рівняння (14-35) описують, головним чином, взаємне проникнення частинок в потоці рідини й газових бульбашок, які рухаються зі швидкістю V.

Ультразвукові коливання в процесі кавітаційної диспергації забезпечують: рівномірний розподіл вологи між частинками борошна і частинками м’ясних продуктів, а отже більш швидше зволоження частинок дисперсної фази. В період дифузійного процесу взаємодії частинок різних продуктів й кавітаційних бульбашок утворюється клейковина, яка визиває адгезійний та когезійний ефекти. Це спричиняє склеювання тіста з частинками бульбашок, приводить до щільності укладання частинок борошна і свіжих м’ясних частинок. Останні, диспергуючісь в тісто, утворюють гетерогенне середовище – тісто з бульбашками повітря та м’ясними добавками.

У процесі імпульсного кавітаційного ефекту (впливу імпульсних ультразвукових коливань потужністю 259-300 Вт) на технологічне середовище рідина з розчиненими білками та цукром, проходячи через тісто з м’ясними частинками, утворює дуже тонку поверхневу плівку. Вона не лише покращує зовнішній вигляд хліба, але й позитивно впливає на термін збереження хліба з м’ясними інгредієнтами.

Необхідно відзначити, що робота робототехнологічного кавітаційного випромінювання ультразвукових коливань за рахунок імпульсного регулятора адаптивної системи керування процесами диспергування і перемішування дозволяє:

- ультразвуковим коливанням, проникаючи в технологічне середовище утворювати зони підвищеного і зниженого тиску, що позитивно впливає на інтенсифікацію процесу переносу рідини зі глибинних шарів до поверхні;
- ультразвукові коливання, проникаючи в дифузійний шар, турбулізують середовище «тісто-м’ясні додатки» і, тим самим, прискорюють процес приготування;
- ультразвукові коливання значно зменшують в’язкість тіста за рахунок кавітаційного ефекту, а також за рахунок радіаційного тиску.

Висновки

У процесі експериментальних досліджень одержані такі результати:

- обробка води ультразвуковими коливаннями на частоті 30 кГц потужністю 200 Вт (час взаємодії 3,1-3,2 хв) дозволяє досягти найбільш раціонального пливу на показники її якості: жорсткість води зменшується на 15–21% від попереднього значення, РН знижується в середньому на 0,28–0,35 од., вміст заліза зменшується в середньому на 25–28%;
- встановлено ефективність використання ультразвукової кавітації для знезаражування води, вплив ультразвукових коливань на частоті 22 кГц, потужністю 200 Вт (час взаємодії 3,5 хв) призводить до зменшення ОМІ в 5 разів;
- визначено раціональні режими оброблення ультразвуком тіста з м’ясними додатками на стадії його приготування: звуковий тиск 135–140 ДБ на частоті 22±1,50 кГц збільшує продуктивність тістомісильної машини на 12–15% і забезпечує отримання інноваційних продуктів харчування (хліба з 5…10% додатків м’ясних продуктів, макаронних виробів з м’ясними додатками 25–35%);
- розроблено спосіб диспергування м’ясних частинок в тісто за рахунок керованих кавітаційних процесів, створених ультразвуковими коливаннями низької частоти;
- розроблено спосіб контролю параметрів густини середовища «тісто-м’ясні додатки», тіста, кавітаційних бульбашок та інтелектуального управління процесами диспергування м’ясних додатків у тісто й продуктивністю тістомісильної машини шляхом адаптивного керування потужністю ультразвуку з великою кількістю зв’язків.

Ультразвукові коливання, утворюючи кавітаційно-диспергуючий ефект, забезпечують рівномірний розподіл вологи між частинками борошна, більш швидке зволоження частинок дисперсної фази – утворюється розслаблення клейковини, що викликає адгезійний та когезійний ефекти борошна з частинками м’ясних продуктів.

Перемішування диспергованих частинок м’яса з частинками борошна під дією ультразвукових коливань призводить до утворення однорідного гетерогенного середовища.

У процесі кавітаційного диспергування частинок борошна і м’ясних частинок в потужному полі ультразвукових хвиль з частотою 22 кГц волога з розчиненими білками, цукром, іншими інгредієнтами будуть утворювати на поверхні тонку плівку, яка покращує не лише зовнішній вид виробів, але й позитивно впливає на терміни збереження інноваційної продукції.

Література

Возняк А.В. Робототехнологічні комплекси в процесах виробництва хліба для регіонів з техногенним тиском / А.В. Возняк, Ю.М. Коренець, В.П. Хорольський // Збірник тез другої міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності». – Харків : ХДУХТ, 2017. – С. 32–33.

Отримання водно-жирових емульсій за допомогою ультразвуку : монографія / Г.В. Дейниченко [та ін.]. – Харків : ФАКТ, 2013. – 192 с.

Безвідхідна переробка м'яса з високим вмістом сполучної тканини з використанням ультразвуку : монографія / Г.В. Дейниченко [та ін.] – Харків : ФАКТ., 2012. – 192 с.

Федоткин И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности: Теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов / И.М. Федоткин, И.С. Гулий // под общ. ред. И.М. Федоткина. – Киев : Полиграфкнига. 1997. – 839 с.

Капустин С.В. Применение ультразвуковой кавитации в пищевой промышленности / С.В. Капустин, О.Н. Красуля // Интерактивная наука. – 2016. – № 2. – С. 101–103.

Шестаков С.Д. Основы технологии кавитационной дезитеграции / С.Д. Шестаков // Санкт-Петербург : Нева-Пресс. 2001. – 173 с.

Хмелев В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков / Алтайский государственный технический университет БТИ. – Бийся : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с.

Акопян Б.В. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / Акопян Б.В. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 224 с.

Процессы и аппараты пищевых производств : учебн. для вузов : в 2 кн. / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовицкий, С.М. Петров и др. ; gод ред. А.Н. Острикова. – СПб : ГИОРД, 2006. – Кн. 2. – 509 с.

Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник в 5 т. Т. 5: Методы современной теории автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егунова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.

Khorolskyi V., Korenets Yu., Ostapenko I. Development of robototechnological complex of intellectual management by bread manufacturing for technology loading territories // Technology audit and production reserver. – 2018. – № 1/3 (39). – P. 53–58.

References

Voznjak A.V. Robototekhnologhichni kompleksy v procesakh vyrobnyctva khliba dlja reghioniv z tekhnoghennym tyskom / A.V. Voznjak, Ju.M. Korenecj, V.P. Khoroljsjkyj // Zbirnyk tez drughoji mizhnarodnoji naukovo-praktychnoji konferenciji «Innovacijni aspekty rozvytku obladnannja kharchovoji i ghoteljnoji industriji v umovakh suchasnosti». – Kharkiv : KhDUKhT, 2017. – S. 32-33.

Otrymannja vodno-zhyrovykh emuljsij za dopomoghoju uljtrazvuku: monoghrafija / Gh.V. Dejnychenko [ta in.]. – Kharkiv : FAKT, 2013. – 192 s.

Bezvidkhidna pererobka m'jasa z vysokym vmistom spoluchnoji tkanyny z vykorystannjam uljtrazvuku : monoghrafija / Gh.V. Dejnychenko [ta in.] – Kharkiv: FAKT., 2012. – 192 s.

Fedotkin I.M. Kavitatsiya, kavitatsionnaya tehnika i tehnologiya, ih ispolzovanie v promyishlennosti: Teoriya, raschetyi i konstruktsii kavitatsionnyih apparatov / I.M. Fedotkin, I.S. Guliy // pod obsch. red. I.M. Fedotkina. – Kiev: Poligrafkniga. 1997. – 839s.

Kapustin S.V. Primenenie ultrazvukovoy kavitatsii v pischevoy promyishlennosti / S.V. Kapustin, O.N. Krasulya // Interaktivnaya nauka. – 2016 - 2 – S. 101-103.

Shestakov S.D. Osnovyi tehnologii kavitatsionnoy dezitegratsii / S.D. Shestakov // Sankt-Peterburg: Neva-Press. 2001. – 173 s.

Hmelev V.N. Primenenie ultrazvuka vyisokoy intensivnosti v promyishlennosti / V.N. Hmelev, A.N. Slivin, R.V. Barsukov // Altayskiy gosudarstvennyiy tehnicheskiy universitet BTI – Biysk: Izd-vo Alt. gos. tehn. un-ta, 2010 – 203 s.

Akopyan B.V. Osnovyi vzaimodeystviya ultrazvuka s biologicheskimi ob'ektami. M.: MGTU im. N.E.Baumana, 2005. – 224 s.

Protsessyi i apparatyi pischevyih proizvodstv: uchebn. dlya vuzov: v 2 kn. / A.N. Ostrikov, Yu.V. Krasovitskiy, S.M. Petrov i dr. ; Pod red. A.N. Ostrikova. – SPb : GIORD, 2006. – Kn 2. – 509 s.

Metodyi klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik v 5 t., 2-e izd. pererab. i dop. Metodyi sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya / Pod red. K.A. Pupkova, N.D. Egunova. – M.: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana, 2004. – 784 s.

Khorolskyi V., Korenets Yu., Ostapenko I. Development of robototechnological complex of intellectual management by bread manufacturing for technology loading territories / Technology audit and production reserver – № 1/3 (39), 2018. – p. 53-58.

Отримана/Received : 22.2.2018 р. Надрукована/Printed :26.3.2018 р.
Стаття рецензована редакційною колегією