

УДК (641.53:534.321.9)-047.84(045)

*Хорольський В. П., д-р техн. наук, професор<sup>1</sup>  
Коренець Ю. М.<sup>1</sup>  
Остапенко І. М.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг, Україна, e-mail: horolskiy@donnuet.edu.ua

### **ТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ВИРОБНИЦТВА ХЛІБА З РОБОТОТЕХНОЛОГІЧНИМИ ІНТЕНСИФІКАТОРАМИ**

UDC (641.53:534.321.9)-047.84(045)

*Khorolskiy V. P., Grand PhD  
of Engineering Science, Professor<sup>1</sup>  
Korenets Yu. M.<sup>1</sup>  
Ostapenko I. M.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky Kryvyi Rih, Kryvyi Rig, Ukraine, e-mail: horolskiy@donnuet.edu.ua

### **TECHNOLOGICAL COMPLEX OF BREAD PRODUCTION WITH ROBOTIC TECHNOLOGICAL INTENSIFIERS**

***Мета.** Метою статті є ідентифікація складного динамічного середовища, на яке впливають ультразвукові коливання, та розробка технологічного комплексу виробництва хліба з робототехнологічними інтенсифікаторами.*

***Методи.** В роботі використано аналітичні, теоретичні та експериментальні дослідження операційного процесу виробництва хлібобулочних виробів в полі ультразвукових коливань та теорії оптимізації з метою розробки архітектури інтелектуального управління технологічним комплексом виробництва хліба з робототехнологічними інтенсифікаторами.*

***Результати.** Розроблено багаторівневу інтелектуальну систему автоматизованого управління технологічним процесом виробництва хліба, в архітектурі якої використано робототехнологічний комплекс. Наведено інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень з блоками навчання, базами даних і знань, в якій блок виводу інформації на корпоративний монітор продуктивності, автоматизовані робочі місця з системою інтерфейсів та штучна нейронна мережа виконують розпізнавання аварійних, аномальних й нормальних ситуацій управління операційним виробництвом хліба.*

***Ключові слова:** комплекс, ультразвук, кавітація, технологічне середовище, автоматизація, інтелект, робототехнологічні інтенсифікатори.*

**Постановка проблеми.** Сучасний розвиток хлібопекарної галузі України тісно пов'язаний із впровадженням інноваційного технологічного обладнання для виробництва хліба.

Раціональне харчування населення України вимагає від науковців розробки високоякісного обладнання для виробництва продукції що мешкає на територіях з техногенним навантаженням. Безпечне харчування гірників, металургів, хіміків й людей і дітей що мешкають на територіях з високим рівнем забруднення вимагає прискореного розвитку робототехнологічних комплексів для виробництва хліба зі заданими лікувально-профілактичними характеристиками [1, 2].

Іншим важливим аспектом діяльності харчової промисловості є виробництво продуктів із біологічної сировини рослинного та тваринного походження з метою створення інноваційної продукції харчування для екологічно несприятливих регіонів. Це вимагає інженерних рішень щодо створення спеціалізованого робототехнологічного обладнання з технологіями очищення води, дезінтеграції, змішування, випікання [3]. Таким чином,

Надійшла до редакції 29.05.2018 р.

© В. П. Хорольський, Ю. М. Коренець,  
І. М. Остапенко, 2018

проектування робототехнологічних комплексів та інтелектуальних систем багаторівневого управління є актуальною задачею розвитку харчової промисловості до 2030 року.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню проблеми теорії і практики проектування технологічних комплексів виробництва хліба з автоматизованими системами управління технологічними процесами (АСУТП) присвячені праці С. С. Шаруди, В. Д. Кишенько [4], С. М. Швед, І. Е. Ельперін [5].

Питанню вивчення впливу ультразвукових коливань на технологічне середовище присвятили наукові праці українські вчені Г. Д. Дейниченко, Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, В. М. Червоний, Д. А. Нечипуренко [6], російські вчені С. В. Капустін, О. М. Красуля [7], С. Д. Шестаков [8], В. М. Хмелев, О. М. Слівін, Р. В. Барсуков [9].

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 стає дуже важливим для ідентифікації параметрів гетерогенного середовища і створення математичних моделей. Його рішення дозволить обґрунтувати раціональні параметри ультразвукової кавітаційної обробки води, дріжджів, інгредієнтів й м'ясних часточок з точки зору використання УЗК для виробництва продукції харчування. Таким чином, використання ультразвукового диспергування у вигляді робототехнологічних інтенсифікаторів є актуальним науково-технічним завданням, яке вимагає від науковців додаткових досліджень, а саме:

- моделювання процесу взаємодії гетерогенного середовища під дією ультразвукових коливань низької і високої частоти з частинками м'ясних додатків, борошна й розсолів;
- вдосконалення конструкції технологічних комплексів як робототехнологічних систем з ультразвуковими кавітаційними інтенсифікаторами.

**Метою статті** є ідентифікація складного динамічного середовища, на яке впливають ультразвукові коливання, та розробка технологічного комплексу виробництва хліба з робототехнологічними інтенсифікаторами.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Технологічне середовище опари й тіста представляє собою гетерогенну систему, яка включає газові бульбашки й частинки дріжджів, борошна, води інших підсилювачів. Кожна із перелічених складових характеризується складним функціональним складом. При розповсюдженні ультразвукових коливань в гетерогенному середовищі з частинками борошна, солі, олії інших інгредієнтів, дріжджів, м'ясних продуктів величина повинна бути близько або більшої довжини хвилі.

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 [7, 8, 9].

В 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, тому що 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, 9].

$$IK = \frac{V}{\Delta V}, \quad (1)$$

де  $V$  — об'єм рідини (тіста);  $\Delta V$  — об'єм кавітаційних бульбашок, утворених пучком ультразвукових коливань.

Концентрацію бульбашок будемо визначати наступним чином:

$$J_{\lambda}^0(z) = J_{\lambda 1} \times \exp \left\{ -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^{N_i} [(\Omega p(i, \lambda, R_i) z)] \right\}. \quad (2)$$

Вираз (2) 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:

$$J_{\lambda}^0(z) > J_{\lambda} < \exp \left\{ -\frac{1}{V} \sum_{i=a}^{N_1} \delta(\Gamma \lambda, R_i) z \right\} \geq n_1 \cdot V \text{ — числа бульбашок.} \quad (3)$$

Якщо позначити через  $\xi$  випадкову величину, то:

$$\xi = \exp \left\{ -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^{N_1} [(\Omega p(\Gamma \lambda, R_i) z)] \right\}. \quad (4)$$

Після знаходження середнього значення величини  $\xi$  і, враховуючи флуктуації числа бульбашок і розмірів частинок твердої фази, одержимо усереднене значення інтегральної інтенсивності:

$$\langle J_{\lambda}^0(z) \rangle > J_{0\Gamma} \lambda \exp \left\{ -V [n(1-\eta) + n(1-\eta n)] \right\}, \quad (5)$$

де

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

$\varphi(r)$  — функція розподілення числа частинок твердої фази борошна й частинок м'яса.

$$\eta_1 = \int_0^{\infty} \exp \left\{ -\frac{z}{V} \cdot \Omega \cdot (\Gamma \lambda, R) \right\} f(R) dR, \quad (6)$$

де  $f(R)$  — функція розподілення бульбашок по розмірам в кавітаційній камері.

Таким чином, бульбашки  $n_1$  відіграють суттєву роль в процесах контролю параметрів густини тіста. В системі контролю параметрів тіста й інтелектуального управління робототехнологічними інтенсифікаторами в якості індикаторів кавітаційних процесів використані залежності (1–6) диспергації в тісто частинок м'ясних додатків [7, 8].

На рис. 1 наведено експериментальну установку 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 й тістомісильного апаратів. В рамках експериментальних досліджень були використані випромінювачі В1, В2 з ІУЗК1, ІУЗК2 частотою ультразвукових коливань  $JB = 20\text{--}22$  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 дослідити процес диспергування за рахунок кавітаційних потоків рідини й частинок м'ясних продуктів та їх здатність рівномірно розподілятися по поверхні тіста; по-третє виконувати за допомогою ультразвукових коливань кероване зціплення частинок борошна й м'ясних продуктів.

Використання теорії взаємного проникнення речовин, яка базується на законі Фіка, надає можливість встановити зв'язок між градієнтом концентрації і потоком дифузії [10].

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:

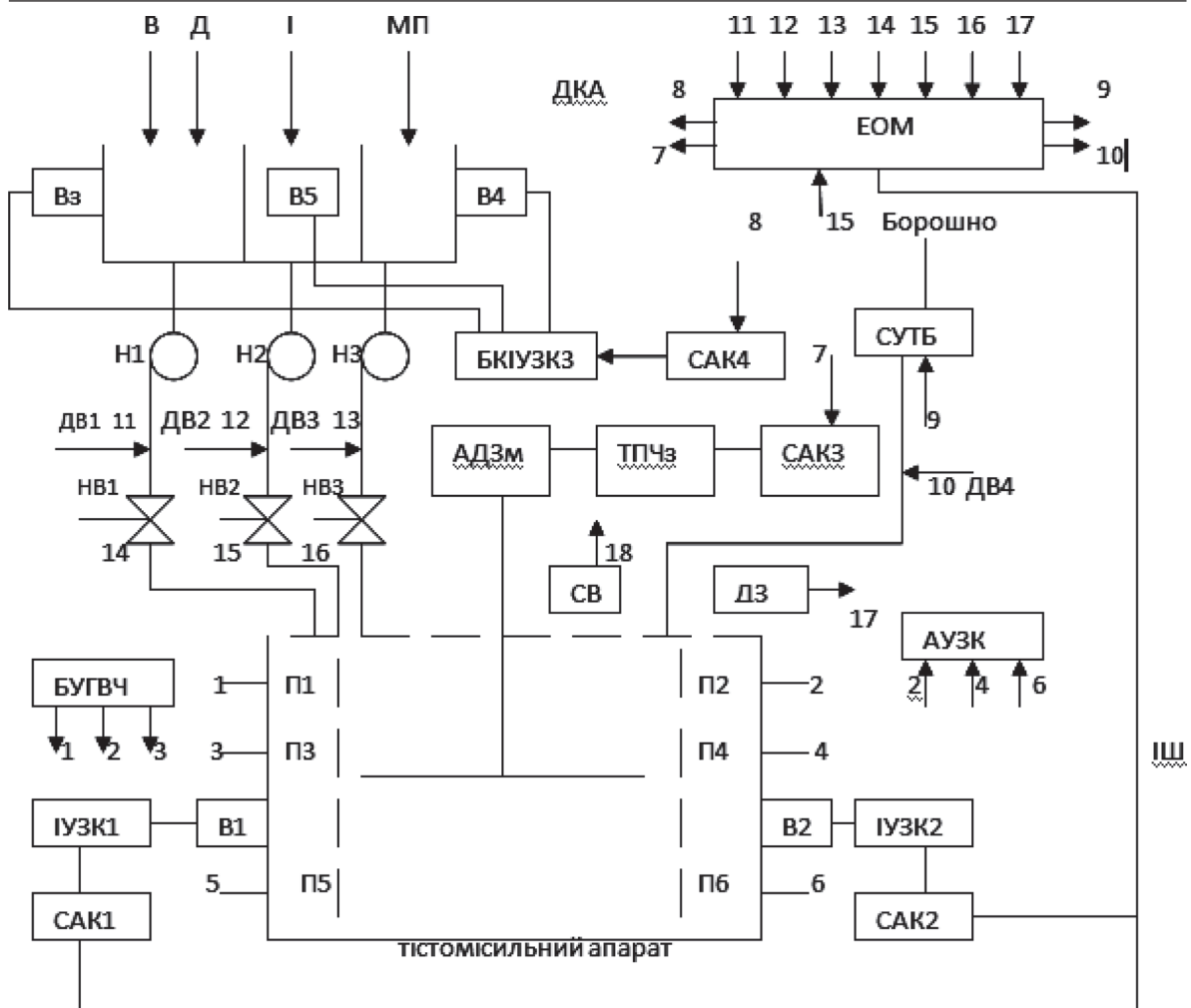
Цей процес опишемо залежністю виду:

$$dM = -D \frac{\partial C}{\partial x} dF d\tau, \quad (7)$$

де  $dM$  — кількість продифундованої речовини;  $D$  — коефіцієнт пропорційності, або коефіцієнт дифузії;

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

$dF$  — елементарна площа, через яку проходить дифузія;  $d\tau$  — тривалість дифузії.



**Рисунок 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; ТПЧз — тристоронній перетворювач частоти двигуна змішувача; ДКА — диспергаційно-кавітаційний апарат, САК1, САК2, САК3 — системи адаптивного керування; СУТЬ — система управління транспортування борошна; ІУЗК1, ІУЗК2 — інтенсифікатори ультразвукових коливань; БУГВЧ — блок ультразвукових генераторів високої частоти з датчиками-перетворювачами П1, П3, П5; ДЗ — датчик запаху; СВ — система візуалізації; АУЗК — аналізатор ультразвукових коливань з датчиками-приймачами П2, П4, П6; ЕОМ — електронна обчислювальна машина; ІШ — інформаційна шина

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

Знак мінус у правій частині рівняння (7) 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:

$$D = \frac{8,2 \cdot 10^{-12} \cdot T}{\mu \cdot V_A^{1/3}} \times \left[ 1 + \left( \frac{3V_B}{V_A} \right)^{2/3} \right], \quad (8)$$

де  $T$  — абсолютна температура, К;  $\rho$  — тиск, Па;  $V_A^{1/3} \cdot V_B^{1/3}$  — мольні об'єми рідин, що взаємодіють  $\text{см}^3/\text{моль}$ ;  $\mu$  — динамічна в'язкість рідини, в якій виникає дифузія, Па·сек.

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 (8) справедлива лише для розбавленої рідини. Для концентрованих розчинів необхідно виконати відповідний перерахунок по формулі:

$$D_k = D \frac{d \ln a}{d \ln C} = D \left( 1 + \frac{d \ln Y}{d \ln C} \right), \quad (9)$$

де  $D_k$  — коефіцієнт дифузії в рідині з концентрацією  $C$ ;  $a$  — активність речовини, що дифундує;  $C$  — концентрація речовини, що дифундує;  $Y$  — коефіцієнт активності.

При такому підході до аналізу та ідентифікації стану технологічного середовища гістомісильного апарату нижні шари опара-тісто під дією ультразвукових коливань будуть рухатися від вібратора-випромінювача до середовища верхніх шарів опари-тісто. Для опису цього процесу використаємо рівняння Нав'є-Стокса [10]. Ці рівняння в проекціях на вісь координат  $XYZ$  запишемо у наступному вигляді:

По вісі координат  $X$ :

$$\rho \left( \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + I_x. \quad (10)$$

По вісі координат  $Y$ :

$$\rho \left( \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + I_y. \quad (11)$$

По вісі координат  $Z$ :

$$\rho \left( \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + I_z, \quad (12)$$

де  $I_x, I_y, I_z$  — проекції масової сили  $I$  на вісь координат.

Аналогічно аналізуємо взаємні впливи параметрів, які характеризують рух суцільного технологічного середовища по іншим координатам.

Зв'язок сил внутрішнього тертя (низьких напруг) зі швидкістю середовища будемо задавати рівністю виду:

$$\tau_{xx} = 2\eta \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x}; \quad \tau_{yx} = \eta \cdot \left( \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \right); \quad (13)$$

$$\tau_{zx} = \eta \cdot \left( \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \right); \quad (14)$$

де  $\eta$  — в'язкість середовища.

Введемо позначення для похідних від проекцій швидкості:

$$V_x^x = \frac{\partial V_x}{\partial x}; \quad V_x^y = \frac{\partial V_x}{\partial y}; \quad V_x^z = \frac{\partial V_x}{\partial z}. \quad (15)$$

Аналогічно:

$$\tau_{xx}^x = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}; \quad \tau_{yx}^y = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}; \quad \tau_{zx}^z = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}. \quad (16)$$

Тоді рівняння Нав'є-Стокса набувають вигляд:

По координаті  $X$ :

$$\rho V_x^t + \rho V_x^x V_x^x + \rho V_y^y V_x^y + \rho V_z^z V_x^z = -\rho^x + \tau_{xx}^x + \tau_{yx}^y + \tau_{zx}^z + I_x. \quad (17)$$

По координаті  $Y$ :

$$\rho V_y^t + \rho V_x^x V_y^x + \rho V_y^y V_y^y + \rho V_z^z V_y^z = -\rho^y + \tau_{xy}^x + \tau_{yy}^y + \tau_{zy}^z + I_y \quad (18)$$

По координаті  $Z$ :

$$\rho V_z^t + \rho V_x V_z^x + \rho V_y V_z^y + \rho V_z V_z^z = -\rho^z + \tau_{xz}^x + \tau_{yz}^y + \tau_{zz}^z + I_z. \quad (19)$$

Нехай нам буде цікавим випадок, коли поведінку складної фізико-хімічної системи опара-тісто (СФХСОТ) під дією ультразвукових коливань в площині  $XOY$ , обмежимо наступними допущеннями:

- розглядаємо квазістаціонарну задачу;
- щільність  $\rho$  і в'язкість  $\eta$  технологічного середовища не залежать від координат;
- тиск в ТС визначається гідростатичним тиском як у спокійній рідині;
- не враховуємо конвективні члени.

Масова сила, визначається силою тиску тяжіння, яка діє впродовж осі  $Y$ .

Тоді рівняння руху середовища під дією ультразвукових коливань будуть мати наступний вигляд:

По вісі координат  $X$ :

$$\rho^x = \tau_{xx}^x + \tau_{yx}^y. \quad (20)$$

По вісі координат  $Y$ :

$$\rho^y + I_y = \tau_{xy}^x + \tau_{yy}^y. \quad (21)$$

При таких допущеннях:

$$\text{div} V = V_x^x + V_y^y = 0. \quad (22)$$

Будемо вважати, що причиною руху рідини «опара — тісто» є вплив ультразвукових коливань випромінювачів  $B_1, B_2$  на середовище технологічного апарату.

Зміна тиску по координатам  $XYZ$  визначається заданим полем кавітаційного впливу: зі зміною індексу кавітації ( $IK$ ) за координатами  $IK(x, y)$ .

В процесі впливу УЗК на технологічне середовище (тісто) за рахунок конвективної дифузії речовина переноситься із ядра потоком речовини до межі розділу фаз безпосередньо конвективною і молекулярною дифузиею яким відповідає модель Шукарева [10]. На рис. 2 наведено взаємодію УЗК з шаром гетерогенної рідини.

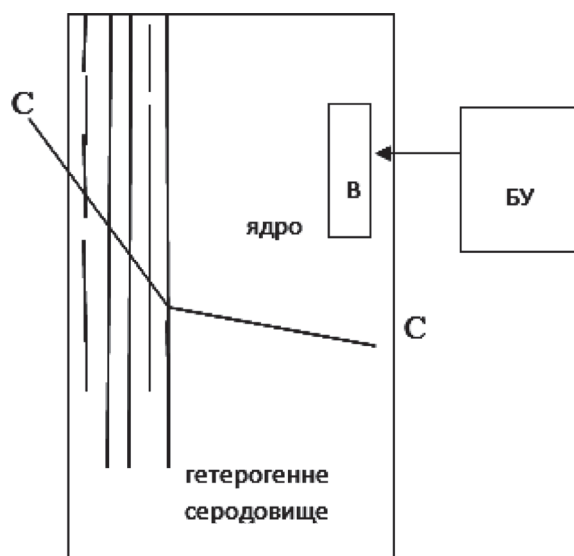


Рисунок 2 — Схема до пояснення формування закону Шукарева — положення речовини УЗК

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

В ядрі перенесення речовини здійснюється як за рахунок струму рідини, так і 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  $\tau$  (як у випадку лише молекулярної дифузії), але і складових швидкості ультразвукових коливань  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ .

Перенесення маси розподіленої речовини внаслідок молекулярної дифузії математично описано диференціальним рівнянням молекулярної дифузії (13). 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 може бути виражено за допомогою похідної. Остання, враховує зміни величини частинки тіста з м'ясопродуктам в часі, а також зміни, які пов'язані з переміщенням елемента із одної точки в іншу.

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \omega_x + \frac{\partial C}{\partial y} \cdot \omega_y + \frac{\partial C}{\partial z} \cdot \omega_z. \quad (23)$$

В рівнянні (14)  $\frac{\partial C}{\partial \tau}$  представляє собою локальну зміну концентрації розподіленої речовини під дією ультразвукових коливань.

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

Якщо в рівнянні молекулярної дифузії (13) замінити локальну зміну концентрації

$$\frac{\partial C}{\partial \tau}$$

повним його значенням,

$$\frac{\partial C}{\partial \tau},$$

відповідно (14), то в результаті одержимо диференціальне рівняння конвективної дифузії речовини під дією кавітаційних впливів, тобто одержимо диференціальне рівняння масообміну в рухомому середовищі викликане ультразвуковими коливаннями генерованих випромінювачів  $B_1, B_2$  і блоком управління БУ.

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \omega_x + \frac{\partial C}{\partial y} \cdot \omega_y + \frac{\partial C}{\partial z} \cdot \omega_z = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right). \quad (24)$$

Із рівняння (15) 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 (15) і коли її характеристики залежать від керованих параметрів: потужності випромінювача РУЗК ( $P_i$ ), густини тіста  $\rho$ ; кількісних параметрів м'ясних продуктів  $K_p$ :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha \cdot (H(x, P_i) - y) \\ \frac{dy}{dt} = \beta \cdot (x - \varphi(y, \rho)) \\ \frac{dz}{dt} = \gamma - \varphi \cdot (z, K_p) \end{cases} \quad (25)$$

де  $\alpha, \beta, \gamma = \text{const} > 0$ , а  $P_i, \rho, K_p$  — параметри біфуркації.

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

$$\begin{cases} H(\xi, R) = y_0 \\ \varphi(y_0, R) = \xi, \\ \gamma(x_0, P) = \omega \end{cases} \quad (26)$$

які ідентифікують процеси інтенсифікації прискореного приготування опари-тісто з м'ясними додатками.

При будь-яких  $P, e, \xi, \omega$  із деякого інтервалу  $I_{p_0}, (\xi \cdot y_0)$  — 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  $U_{\text{дон}}$  визначимо наступним чином:

$$U_{\text{дон}} = \{P_i \in KC[t_0, t_1] : P_{i\text{min}} \leq P_{i\text{max}} \forall t \in [t_0, t_1]\}, \quad (27)$$

де  $KC[t_0, t_1]$  — множина усіх шматково-безперервних функцій на відрізку  $[t_0, t_1]$ .

Згідно з принципами оптимального управління [10, 15]:

$$U_{\text{дон}} = [P_i, \rho, T, K_p, \xi] = \{P_i(t) + \rho \cdot \text{sgn}[\sin(T - 1 + \xi)] \in U_{\text{дон}}\}, \quad (28)$$

де  $P_i$  — потужність випромінювача ультразвукових коливань інтенсифікатора;  $\rho$  — густина тіста з м'ясними додатками;  $T$  — час;  $\xi$  — концентрація бульбашок;  $K_p$  — кількісні параметри м'ясних продуктів.

Тоді необхідно побудувати багатозв'язану систему управління робототехнологічним комплексом, в якій в 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.

У 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 вентилям 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.

У процесі експериментальних досліджень одержані наступні результати:

— обробка води ультразвуковими коливаннями на частоті 30 кГц потужністю 200 Вт (час взаємодії 3,1–3,2 хв.) дозволяє досягти найбільш раціональний вплив, на її показники якості:

— жорсткість зменшується на 15–21 % від попереднього значення;

— РН знизилось в середньому на 0,28–0,35 од.;

— вміст заліза зменшується в середньому на 25–28 %.

— встановлено ефективність використання ультразвукової кавітації для знезараження води, вплив ультразвукових коливань на частоті 22 кГц, потужністю 200 Вт (час взаємодії 3,5 хв.) призводить до зменшення ОМІ у 5 разів.

— визначено раціональні режими оброблення ультразвуком тіста з м'ясними додатками на стадії його приготування: звуковий тиск 135–140 ДБ на частоті  $22 \pm 1,50$  кГц, які збільшують продуктивність тістомісильної машини на 12–15 % і забезпечили одержання 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 добавки, тіста, кавітаційних бульбашок й інтелектуального управління процесами диспергування м'ясних додатків у тісто, шляхом багатозв'язаного адаптивного керування потужністю ультразвуку, випромінюючого в тісто й продуктивністю тістомісильної машини.

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

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

В процесі кавітаційного диспергування частинок борошна і м'ясних частинок в потужному полі ультразвукових хвиль з частотою 22 кГц волога з розчиненими білками і 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.

Таким чином, аналіз гетерогенного середовища та його ідентифікація під впливом ультразвукових кавітаційних коливань дозволили авторам запропонувати типову схему інтелектуального управління процесами підготовки опари — тісто з робототехнологічними інтенсифікаторами.

На рис. 3 наведено блок-схему технологічного комплексу виробництва хліба з робототехнологічними інтенсифікаторами. У технологічну лінію вбудовано: ультразвукові апарати очистки води, дезінтеграції, змішування та інтенсифікації мікробіологічних, біохімічних, колоїдних, хімічних, гідродинамічних процесів виробництва хліба.

У системі управління технологічним процесом підготовки сировини використані такі блоки з робототехнологічними УЗ комплексами:

— РУЗК 1, РУЗК 2, відповідно для очищення води та дезінтеграції дріжджів;  
— РУЗК 3 — в камерах А, Б, В використані методи диспергування для приготування соляного розчину, цукрового розчину та дозування жирових продуктів з підсилюючими компонентами.

Робототехнологічний УЗ комплекс складається із ультразвукової системи (УЗКС), яка взаємодіє з технологічним середовищем. До складу УЗКС входять: ЕГ — електронний генератор; ПУ — пристрій узгодження; ЕАП — електроакустичний перетворювач; К — концентратор; В — випромінювач. В процесі взаємодії п'єзоелектричної коливальної системи (К-В) з технологічним середовищем змінюється імпеданс системи за формулою [9]:

$$Z_K = R_K + jX_K = R_K - j\omega_m + j\frac{1}{\omega}E, \quad (29)$$

або після перетворень

$$Z = Z_H + K_S R_K, \quad (30)$$

де  $Z$  — еквівалентний опір системи;  $Z_H$  — опір навантаження;  $R_K$  — внутрішній опір п'єзоперетворювача (П) ЕАП;  $K_S$  — параметр, який опосередковано характеризує інформацію про стан технологічного середовища, з яким взаємодіє УЗКС.

За допомогою системи автоматизованого контролю (САК) виконано контроль параметрів, які характеризують технологічну операцію приготування опари-тісто. Для цього використано систему п'єзодатчиків  $\Pi_1 - \Pi_2$ ,  $\Pi_3 - \Pi_4$ ,  $\Pi_5 - \Pi_6$ , вбудованих в технологічне середовище апаратів. Аналізатор складається із трьох аналогічних каналів: 1-й канал (п'єзодатчики  $\Pi_1 - \Pi_2$ ) — опосередковано контролює густину та інші параметри опари (стадія замісу опари); 2-й канал (п'єзодатчики  $\Pi_3 - \Pi_4$ ) — опосередковано контролює стадію бродіння опари-тісто, оцінюючи їх однорідність та гідродинамічні параметри та його властивості; 3-й канал (п'єзодатчики  $\Pi_5 - \Pi_6$ ) — визначає концентрацію газових бульбашок в середовищі «опара — тісто».

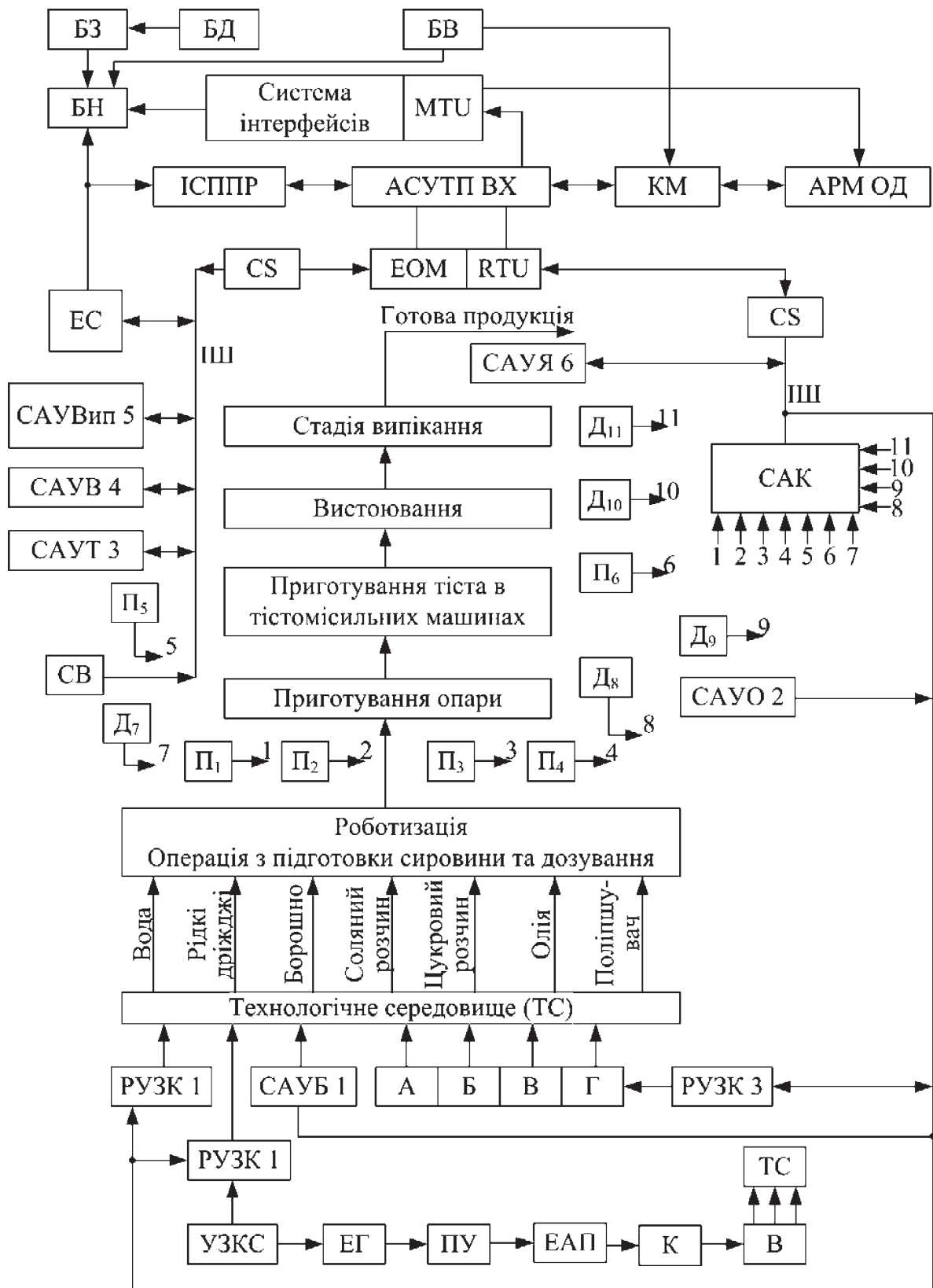


Рисунок 3 — Технологічний комплекс з виробництва хліба з робототехнологічними інтенсифікаторами

У процесі розробки інтелектуальної системи управління робототехнологічним комплексом побудовано: бази даних (БД), бази знань (БЗ), експертну систему, інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень. Ідентифікацію технологічного процесу виробництва «опари — тісто» виконано за допомогою системи датчиків  $П_2, П_4, П_6, Д_7 - Д_9$ , а та-

кож використано знання спеціалістів-технологів з експертного оцінювання технологічних процесів виробництва хліба. При цьому експерти звертались до апріорі одержаних знань, правил, моделей та характеристик опари й тіста, описаних авторами [1, 2, 3, 4, 5] та моделей взаємодії ультразвуку з біологічними об'єктами [6, 7, 8, 9] а також принципів розробки робототехнологічних комплексів та безлюдних технологій наведених авторами [2, 11, 12]. У процесі експертних досліджень встановлено наступне:

- початкова температура бродіння опари (28 °С) є нижчою, ніж температура бродіння тіста (30 °С). Бродіння опари триває 3,5–4,5 годин залежно від вмісту в ній борошна, його сорту, якості та кількості дріжджів. Вологість та температура опари, газоутворююча здатність борошна та його кислотність, густина опари та підйомна сила, активна кислотність опари визначають реологічні властивості опари та тіста;

- процес приготування опари та тіста опосередковано можна контролювати за ароматичними властивостями, тобто дифузії парів води з поверхні (датчик запаху TGS2620 (Tagushi Gas Sensor) й система візуалізації (СВ)).

У подальшому експертна система (ЕС) з навченою штучною нейромережею (ШНМ) і ЕОМ обробляє та оцінює інформацію, що надходить с датчиків: п'єзоелементів  $P_2, P_4, P_6$ ; з системи датчиків  $D_7 - D_{11}$ ; датчиків, які контролюють параметри системи УЗКС  $Z_{HP}, R_K, K_S, IK$ . В результаті ідентифікації ЕС:

- визначає оптимальний час роботи робототехнологічних комплексів РУЗК 1, РУЗК 2, РУЗК 3 та потужності;

- виконує прогнозування параметрів ( $K_2$  — гідродинамічні умови бродіння опари та замісу тіста;

- $P_o$  — підйомну силу опари;  $\rho_o, \rho_m$  — густину опари й тіста;

- $\lambda_m$  — коефіцієнт масопровідності;

- $a_m$  — коефіцієнт внутрішнього масо переносу, який залежить від температури і вологості та свідчить про інтенсивну властивість борошна до зовнішніх збурень води, розчинів та інших підсилювачів.

Основне завдання експертної системи вибрати оптимальні уставки ПІД-регуляторів САУБ 1, САУО 2, САУТ 3, САУВ 4, САУВИП 5.

У процесі експериментальних досліджень встановлено: на частоті УЗК  $f_1 = 600$  кГц сигнали з датчика  $P_2 (A_{y2})$  опосередковано ідентифікують чинники  $K_2, P_o, \rho_o$ ; на частотах УЗК  $f_2 = 400$  кГц сигнали з датчика  $P_4 (A_{y1})$  опосередковано ідентифікують чинники  $\rho_m, \lambda_m, a_m$ .

Архітектура інтелектуальної системи управління технологічним комплексом виробництва хліба з ІСППР включає:

- експертну систему (ЕС), блок навчання (БН), базу знань (БЗ), базу даних (БД), блок виводу (БВ), корпоративний монітор (КМ), автоматизовані робочі місця (АРМ) операторів та диспетчера хлібозаводу та системи інтерфейсів (взаємодії з експертом, об'єктом та користувачем);

- АСУТП виробництва хліба (АСУТПВХ) з електронно-обчислювальною машиною (ЕОМ) на верхньому рівні та локальними системами нижнього (оперативного) рівня. В АСУТП виробництва хліба, побудованої на базі SCADA-систем [13, 14] включено три структурних компонентів: RTU, MTU та CS. RTU (Remote Terminal Unit) — термінал, який обробляє інформацію з датчиків  $P_1 - P_6, D_1 - D_{11}$ , систем візуалізації (машинного зору) та робототехнічних ультразвукових інтенсифікаторів РУЗК 1, РУЗК 2, РУЗК 3. Системи RTU працюють в режимі жорсткого реального часу. В свою чергу MTU (Master Terminal Unit) представляє собою диспетчерський пункт управління з автоматизованими робочими місцями операторів та диспетчера. Основне завдання MTU — забезпечення інтерфейсу між оператором й системою управління хлібозаводом.

Система CS (CommunicationSystem) — це комунікаційна система (канали зв'язку, інформаційна шина ІШ).

Основне завдання системи CS передача сигналів управління на RTU.

Робототехнологічний комплекс включає:

1. Системи адаптивного управління окремими технологічними процесами та стадіями:
  - САУБ 1 — система адаптивного управління стадією підготовки борошна, САУО 2 — система адаптивного управління процесом приготування опари, САУТ 3 — система адаптивного управління приготуванням тіста,
  - САУВ 4 — система адаптивного управління стадією вистоювання, САУВип 5 — система адаптивного управління стадією випікання хліба,
  - САУЯ 6 — система адаптивного управління якістю продукції;
2. Систему автоматизованого контролю (САК), на вхід якої через порти 1–11 надходять сигнали з датчиків П2, П4, П6 — п'єзоелементів, які оцінюють опосередковано: реологічні властивості опари та тіста; підйомну силу опари; активну кислотність опари; кислотність опари та запах (Д7, Д8); формуючу здатність тістової заготовки (Д9); тривалість вистоювання тістових заготовок, температуру вистоювання, вологість в шафі вистоювання.

Масу тістової заготовки контролює системи датчиків (Д10). Пористість хліба, його кислотність, формостійкість, вологість, температуру центру м'якiща, тривалість випікання тістових заготовок контролює опосередковано система датчиків (Д11), та система візуалізації (СВ).

В системі використано апарат штучних нейронних мереж для реалізації пошуку рішень оптимальних режимів роботи стадій виробництва хліба. Це досягнуто розпізнаванням виробничих ситуацій та визначенням ( $S_n$ ) — проблемних ситуацій в темпі с процесом виробництва хліба.

Розпізнавання ситуацій ( $S_b$ ) й ( $S_n$ ) із множини  $n$  ситуацій будемо називати процесом класифікації. При такій інтерпретації в якості вихідного результату на виході блоку виводу (БВ) системи ІСППР одержуємо номер ситуації ( $S_b$ ) або ( $S_n$ ). Для навчання багатосарової ШНМ використано метод зворотного розповсюдження помилки [15]. У процесі навчання мережі експерт з навчання задає: швидкість навчання, число ситуацій ( $S_b$ ), ( $S_n$ ) по кожній із технологічних стадій [15]. Такий підхід дає можливість значно підвищити точність розпізнавання ситуацій та оцінку стану робочих характеристик технологічних процесів: бродіння опари, однорідності тіста та управління процесами випічки хліба.

В АСУТП виробництва хліба використано алгоритми інтелектуального управління процесами підготовки сировини, приготування опари, тіста, вистоювання та випікання з експертним оцінюванням якості сировини, напівфабрикатів і готової продукції з підсистемами підтримки прийняття рішень, детально розроблених авторами [2, 3, 15]. Інтелектуальна система підтримки прийняття рішень на основі інформації датчиків блоків БД, БЗ, БН, БВ, експертної системи ЕС та САУБ 1, САУО 2, САУТ 3, САУВ 4, САУВІП 5, САУ 6 через виконуючі механізми змінюють режими роботи ультразвукових систем РУЗК 1, РУЗК 2, РУЗК 3 шляхом відпрацювання оптимальних управлінських впливів на гетерогенне технологічне середовище. Параметри борошна оцінює експертна система (ЕС) управління якістю продукції САУЯ 6.

Рекомендації останньої через RTU, CS надходять до системи автоматизованого управління стадією підготовки й дозування борошна (САУБ 1). ІСППР рекомендує в діалоговому режимі з використанням КМ спосіб покращення властивостей борошна, опари та тіста щодо вітамінізації властивостей хліба.

Таким чином, комплексний вплив частоти, інтенсивності та швидкості ультразвукових коливань, створення ефектів кавітації, диспергування, дезінтеграції, коагуляції дозволяє за допомогою вбудованих у технологічний процес виробництва хліба робототехнологічних комплексів оптимізувати операції приготування опари та тіста, а отже одержати якісні показники хлібобулочних виробів.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень одержано:

1. Для виробництва хліба з лікувально-профілактичними характеристиками проведено дослідження керованих ультразвукових ефектів кавітації. Доведено, що процеси

ультразвукової кавітації, дезінтеграції, коагуляції води, борошна, олії, рідких дріжджів, соляного й цукрового розчинів та інших інгредієнтів сприяють одержанню продукції лікувального типу.

2. Розроблено експериментальну установку з системою автоматизованого контролю параметрів опари-тіста на базі височастотних ультразвукових коливань. В системі інтенсифікації виробництва продукції, очищення води, дезінтеграції дріжджів та диспергування розсолів запропоновано використати робототехнологічні інтенсифікатори. Доведено, що робототехнологічні комплекси з розвинутою сенсорною системою дозволяють знизити вміст солі та цукру в хлібі на 15–20 % без зміни смакових властивостей продукту.

3. Розроблено багаторівневу інтелектуальну систему автоматизованого управління технологічним процесом виробництва хліба, в архітектурі якої використано робототехнологічний комплекс. Наведено інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень з блоками навчання, базами даних і знань, в якій блок виводу інформації на корпоративний монітор продуктивності, автоматизовані робочі місця з системою інтерфейсів та штучна нейронна мережа виконують розпізнавання аварійних, аномальних й нормальних ситуацій управління операційним виробництвом хліба.

### Список літератури / References

1. Khorolskyi, V., Korenets, Yu. Ostapenko, I. (2018). Development of robototechnological complex of intellectual management by bread manufacturing for technological loading territories. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva [Technological audit and production reserves]*, no. 1/3 (39), pp. 53–58.

2. Возняк, А. В. Робототехнологічні комплекси в процесах виробництва хліба для регіонів з технологічним 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.

Vozniak, A. V., Korenets, Yu. M., Khorolskyi, V. P. (2017). Robototekhnologichni kompleksi v protsesakh vyrobnytstva khliba dlia rehioniv z tekhnologichnym tyskom. *Zbirnyk tez druhoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Innovatsiini aspekty rozvytku obladnannia kharchovoi i hotelnoi industrii v umovakh suchasnosti» [Collection of theses of the I-th International Scientific and Practical Conference «Innovative Aspects of the Development of the Equipment of the Food and Hotel Industry in the Contemporary Conditions»]*, pp. 32–33.

3. Хорольський, В. П. Інтелектуальна система управління та моніторингу робочих характеристик технологічного обладнання хлібобулочних заводів / В. П. Хорольський, Д. Ю. Ключев, С. М. Коржов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2016. — №6. — С. 55–62.

Khorolskyi, V. P., Kliuiev, D. Yu., Korzhov, S. M. (2016). Intelektualjna systema upravlinnja ta monitoryngnu robochykh kharakterystyk tekhnologichnogho obladnannja khlibobulochnykh zavodiv [Intelligent control system and monitoring of performance of technological equipment for bakery plants]. *Bulletin of Khmelnytsky national University. Engineering science*, no. 6, pp. 55–62.

4. Шаруда, С. С. Інтелектуальна система сценарного управління хлібопекарським виробництвом / С. С. Шаруда, В. Д. Кишенько // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2010. — №5/3 (47). — С. 66–70.

Sharuda, S. S., Kyshenko, V. D. (2010). Intelektualjna systema scenarnogho upravlinnja khlibopekarskym vyrobnytstvom [Intelligent system scenario management of bakery production]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5/3 (47), pp. 66–70.

5. Швед, С. М. Системний аналіз технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів / С. М. Швед, І. Е. Ельперін // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2012. — № 6/3 (60). — С. 44–46.

Shved, S. M., Elperin, I. E. (2012). Systemnyi analiz tekhnologichnoho protsesu vyrobnytstva khlibobulochnykh vyrobiv [System analysis of the technological production process of bakery products]. *Skhidno-Ievropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohii*, no. 6/3 (60), pp. 44–46.



6. Безвідходна переробка м'яса з високим вмістом сполученої тканини з В 39 використанням ультразвуку : монографія / Г. Д. Дейниченко, Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, В. М. Червоний, Д. А. Нечипуренко — Харків : Факт, 2012. — 192 с.

Denichenko, G. D., Postnov, G. M., Chervoniy, V. M., Nechipurenko, D. A. (2012). Bezvidkhodna pererobka miasa z vysokym vmistom spoluchenoї tkanyny z B 39 vykorystanniam ultrazvuku [Non-waste processing of meat with high content of combined tissue with B 39 using ultrasound]. Harkiv, Fact Publ., 192 p.

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

Kapustin, S. V., Krasulia, O. N. (2016). *Primeneniye ultrazvukovoy kavitatsii v pishchevoy promyshlennosti* [The use of ultrasonic cavitation in the food industry]. *Ynteraktyvnaia nauka*, no. 2, pp. 101–103.

8. Шестаков, С. Д. Основы технологии кавитационной дезинтеграции / С. Д. Шестаков // Санкт-Петербург : Нева-Пресс, 2001. — 173 с.

Shestakov, S. D. (2001). *Osnovyi tehnologii kavitatsionnoy dezintegratsii* [Basics of cavitation disintegration technology]. St. Petersburg, Neva-Press Publ, 173 p.

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

Hmelev, V. N., Sliyyn, A. N., Barsukov, R. V. (2010). *Primeneniye ultrazvuka vyisokoy intensivnosti v promyshlennosti* [The use of high-intensity ultrasound in industry]. Biysk, Altai State Technical University Publ., 203 p.

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

Ostrikov, A. N., Krasovitskiy, Yu. V., Petrov, S. M. (2006). *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Processes and apparatus of food production]. St. Petersburg, GIORД Publ., book 2. — 509 p.

11. Trends in Market for the Robot Industry in 2012. (2013). Industrial Machinery Division, Ministry of Economy, Trade and Industry. Available at : <http://www.meti.go.jp>.

12. Breuer, T., Giorgana Macedo, G. R., Miller, R., Paulus J., Reckhaus M., et al. (2012). Johnny: An Automomous ServiceRobot for Domestic Enviroments. *Journal of intelligent & robotic systems*, vol. 66, no. 1–2, pp. 245–272.

13. Флэцу, М. (2013). Robotic 'Alpha' machine can produce six hamburgers a minute. *Digital Trends*. Available at : <http://www.digitaltrends.com/cool-tech/robot-dishes-up-six-hamburgers-a-minute/#!VTdic>.

14. SCADA система SIMATIC WINCC V7.0 / Simatic-Market : интернет-магазин техники автоматизации Siemens. Режим доступа : <http://www.simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10007460>.

SCADA system SIMATIC WINCC V7.0. Retrieved from <http://www.simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10007460>.

15. Хорольський, В. П. Інтегроване інтелектуальне управління технологічними процесами в економічних системах корпоративних підприємств гірничо-металургійного комплексу : монографія / В. П. Хорольський, В. П. Хоцькіна, Т. В. Хорольська, Є. К. Бабєць ; за наук. ред. В. П. Хорольського. — Дніпропетровськ : Січ, 2008. — 443 с.

Khorolskiy, V. P., Khotskina, V. P., Khorolska, T. V., Babets, Ye. K. (2008). *Intehrovane intelektualne upravlinnia tekhnolohichnymu protsesamy v ekonomichnykh systemakh korporatyvnykh pidpriemstv hirnycho-metalurhiinoho kompleksu* [Integrated intellectual control of technological processes in the economic systems of corporate enterprises of the mining and metallurgical complex]. Dnipropetrovsk, Sich Publ., 443 p.



**Цель.** Целью статьи является идентификация сложной динамической среды, на которую влияют ультразвуковые колебания, и разработка технологического комплекса производства хлеба с робототехнологическими интенсификаторами.

**Методы.** В работе использованы аналитические, теоретические и экспериментальные исследования операционного процесса производства хлебобулочных изделий в поле ультразвуковых колебаний и теории оптимизации с целью разработки архитектуры интеллектуального управления технологическим комплексом производства хлеба с робототехнологическими интенсификаторами.

**Результаты.** Разработана многоуровневая интеллектуальная система автоматизированного управления технологическим процессом производства хлеба, в архитектуре которой использован робототехнологический комплекс. Приведена интеллектуальная система поддержки принятия решений с блоками обучения, базами данных и знаний, в котором блок вывода информации на корпоративный монитор производительности, автоматизированные рабочие места с системой интерфейсов и искусственная нейронная сеть выполняют распознавание аварийных, аномальных и нормальных ситуаций управления операционным производством хлеба.

**Ключевые слова:** комплекс, ультразвук, кавитация, технологическая среда, автоматизация, интеллект, робототехнологические интенсификаторы.

**Objective.** The purpose of the article is to identify the complex dynamic environment, which is influenced by ultrasonic vibrations, and the development of technological complex of bread production with robotic intensifiers.

**Methods.** The paper uses analytical, theoretical and experimental studies of the operational process of production of bakery products in the field of ultrasonic vibrations and optimization theory in order to develop an architecture of intelligent control of the technological complex of bread production with robotic intensifiers.

**Results.** A multi-level intelligent system of automated control of the technological process of bread production has been developed, the architecture of which uses a robotic system. An intelligent decision support system with training blocks, databases and knowledge is presented, in which the information output unit on the corporate performance monitor, automated workstations with an interface system and an artificial neural network perform recognition of emergency, abnormal and normal situations of operating bread production management.

**Keywords:** complex, ultrasound, cavitation, technological environment, automation, intelligence, robotics intensifiers.