

**В.А. Піддубний, д.т.н., проф.**

*Київський національний торговельно-економічний університет*

**І.Я. Стадник, д.т.н., проф.**

*Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя*

**А.О. Чагайда, к.т.н., доц.**

*Державний університет «Житомирська політехніка»*

**Є.А. Петриченко, к.т.н., доц.**

*Уманський національний університет садівництва*

## Обґрунтування параметрів змішувача для борошняних компонентів

*Необхідність у забезпеченні хлібопекарської та кондитерської галузей новішим високотехнологічним обладнанням, яке забезпечувало б якісне приготування сумішей для основних процесів у виробництві борошняних напівфабрикатів при якісному змішуванні дозуючих компонентів, завжди є актуальною темою. Запропоновано конструкцію дискретно-імпульсного змішувача для рідинних борошняних сумішей. Описано вплив робочих органів та робочої камери на взаємодію компонентів й розглянуто динаміку трифазного розрідженого шару утвореного середовища при дії направленої потоку дрібнодисперсних краплин рідких компонентів. Побудовано траєкторії руху і визначено якість їх розподілення залежно від конструктивних параметрів змішувача. Проведено математичний опис процесу взаємодії борошна, рідких компонентів у псевдозрідженому стані. Визначено параметри процесу псевдозрідження борошна, що впливають на підвищення продуктивності перемішування компонентів. У результаті математичного моделювання процесу змішування компонентів у робочій камері дослідної установки побудовано траєкторії руху розпиленних краплин рідких компонентів у розрідженому шарі борошна. Встановлено швидкість руху та утворення повітряних бульбашок у трифазному середовищі.*

**Ключові слова:** змішувач; диспергування; емульсія; процес; моделювання.

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із практичними завданнями.** Основними етапами технологічного процесу виробництва хлібобулочних та кондитерських виробів є підготовка вихідних компонентів, їх дозування, перемішування. Однорідність змішуваних компонентів є основною вимогою якості утвореної суміші, адже від того, наскільки рівномірно окремі компоненти будуть взаємодіяти в основному об'ємі, залежать, головним чином, характеристики одержаної готової продукції. Саме тому змішувальне устаткування є найбільш відповідальним обладнанням технологічного ланцюга з виготовлення емульсій, суспензій.

Сучасний стан розвитку харчової борошняної продукції вимагає використання прогресивних технологій та обладнання, і виникає необхідність у забезпеченні хлібопекарської та кондитерської галузей новітнім високотехнологічним устаткуванням, яке забезпечувало б якісне приготування сумішей. Розв'язанням цієї проблеми є використання високоефективних малогабаритних змішувальних установок для основних процесів у виробництві напівфабрикатів із якісним змішуванням дозуючих компонентів. З огляду стабільності змішування найбільш характерним показником роботи цього класу машин є рівномірність перемішування при оптимальній тривалості та завантаженості робочої камери, що сприяє вирівнюванню концентрації окремих компонентів. Цей показник дозволяє оцінити співвідношення рецептурних компонентів і дотримання стабільності управління процесом змішування. Враховуючи швидкий розвиток і великі можливості сучасної обчислювальної техніки, під час розв'язання проблеми визначення раціональних параметрів процесу змішування і подальшої розробки відповідного обладнання найбільш доцільно використовувати методи математичного моделювання.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Перемішування застосовується для приготування суспензій, емульсій, отримання гомогенних систем (розчинів), тіста, а також для інтенсифікації теплових і дифузійних процесів. В усіх випадках перемішування здійснюють безпосередньо в призначеному технологічному обладнанні для проведення цих процесів. У багатьох виробництвах швидкість перемішування компонентів є стадією [1–3], що визначає загальну швидкість процесу, особливо це стосується хлібопекарської та кондитерської галузей. Механічне перемішування у харчовій промисловості має широке використання завдяки своїй відносній простоті, а також різноманітності типорозмірів і конструкцій мисильних робочих органів. До переваг перемішування належить рівномірний та інтенсивний масообмін між твердою фазою та рідиною. Робочі органи не тільки слугують для перемішування, але є універсальним засобом для гомогенізації малов'язких і в'язких середовищ. Поряд із лопатевими, використовують пропелерні, гвинтові, рамні перемішувачі пристрої. Як стверджують автори [2–4],

ефективність використання механічних перемішувачів пристроїв є вищою, ніж у стаціонарному шарі матеріалу або обертовій робочій камері. Однак, як свідчить аналіз джерел літератури [4–7], вони мають ряд недоліків, пов'язаних із великими затратами енергії, складним обслуговуванням внутрішньої конструкції апарата.

Сумарна швидкість процесу взаємодії визначається інтенсивністю кінетичної та дифузійної стадій. Кінетика є одним із найважливіших аспектів взаємодії фаз компонентів, що встановлює закономірності перебігу процесу у часі, визначає швидкість процесу та продуктивність змішувачів [5, 9]. Формування адекватних кінетичних моделей зазвичай базується на попередніх експериментальних дослідженнях. У цьому аспекті значний інтерес становить дослідження, проведене в області гетерогенної взаємодії борошна з рідкими компонентами [3, 4].

Вимоги сучасних технологій змішування та зростаюча вартість електроенергії потребують перегляду класичної схеми пристроїв. Постійно проводяться роботи [1, 4, 6, 9] із впровадженням менш енергоємних змішувачів та використанням змішувальних елементів, зміщених відносно осі апарату. На ринку змішувального обладнання розповсюдження набувають змішувальні пристрої з конусоподібними елементами (спіралі) та прецесійні змішувачі [1, 3] – один із удосконалених різновидів механічних перемішувачів пристроїв.

Окрім конструкції змішувальних елементів, корпус робочої камери також впливає на гідродинамічні характеристики рухомого потоку. У [1, 2, 7, 9] наведено змішувач з механічним перемішувачем пристроєм, що містить циліндричний корпус з днищем, кришкою і патрубками, вертикальний вал з мішалкою, а також змонтовані на внутрішній поверхні корпусу гальмівні елементи. Така конструкція дає змогу істотно знизити ймовірність утворення застійних зон в апараті, що особливо важливо під час перемішування термомеханочутливих рідин.

Змішувачі із вертикальною циліндричною робочою камерою з кришкою, ввідним і вивідним патрубками, привід з можливістю передачі обертового руху на центральний вал, на якому закріплені лопатеві робочі органи, використовуються для перемішування компонентів на підприємствах харчової промисловості. Основним недоліком такої мішалки є нерівномірне перемішування суспензії, осідання твердих частинок на стінках і дні, що обумовлюється неоднорідним полем турбулентного перемішування у робочому об'ємі апарата.

Псевдозрідження є одним із найбільш прогресивних методів здійснення технологічних процесів із дисперсною фазою. Цей метод використовується у хімічній, харчовій, будівельній та інших галузях промисловості. Широке використання псевдозрідженого шару у багатьох галузях промисловості обумовлено рядом його переваг [11–14], до яких належить інтенсивне перемішування твердих частинок зі зріджуючим агентом та розвиненою поверхнею контакту фаз. Псевдозрідження в шарі є низьковитратним процесом і тому має своє використання в багатьох галузях промисловості під час проведення технологічних процесів.

Авторами робіт [3, 11, 13] проведено дослідження руху бульбашок повітря в пульсуючій рідині для встановлення механізму коливальної флотажії. Використання пульсуючого потоку рідини крізь шар дисперсних частинок дає змогу інтенсифікувати процес перемішування, розчинення та забезпечити збільшення коефіцієнта масовіддачі. Разом з тим, використання пульсуючого потоку рідини та борошна призводить до збільшення коефіцієнта масовіддачі, продуктивності змішування. Аналіз процесу змішування дозволяє стверджувати, що застосування пульсуючих потоків не достатньо вивчена дослідниками.

**Метою статті** є наукове обґрунтування розрахунку і створення на цій основі змішувача дискретно-імпульсної дії з урахуванням фізики процесу приготування сумішей під час використання зважувального стану й механічної дії на компоненти.

**Викладення основного матеріалу.** Наукові розробки [3–6], виконані на кафедрі обладнання харчових технологій ТНТУ ім. Івана Пулюя, передбачають процес змішування компонентів при їх розпиленні, що забезпечує збільшення поверхонь міжфазного контакту та рівномірного їх розподілення. На основі такого підходу до змішування компонентів, що визначається відношенням  $M$  кількості рідинних компонентів, які розподіляються в шарі концентрованого борошна, до їх кількості, що подаються соплами, у відсотках роботи (проведення математичного моделювання процесу та визначення «коефіцієнта корисної дії» змішувача).

У циліндричній робочій камері (рис. 1) діаметром  $d_0$  для змішування компонентів зверху, уздовж її поверхні, рухається шар борошна, що дозується вібродозатором. По периметру циліндричної камери розташовані сопла, які призначені для розпилення рідких компонентів направленим факелом у зону руху борошна. Борошно поступає зверху по центру й периметру циліндричної камери і рухається уздовж неї вниз у вигляді шару постійної товщини  $hs$ .

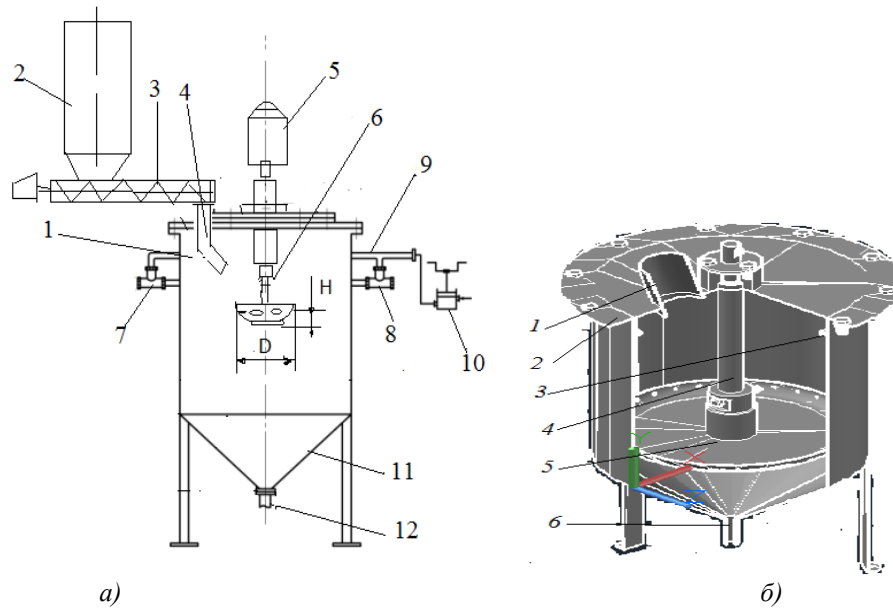


Рис. 1. Схема змішувача (а) та 3Д – модель змішувача (б): 1 – патрубок для дозуючого борошна; 2 – кришка циліндричної робочої камери; 3 – сопло для розпилювання рідких компонентів; 5 – тарільчастий робочий орган; 6 – патрубок вивантаження змішаної суміші

Числові розрахунки, пов'язані з розв'язанням систем звичайних диференціальних рівнянь і побудовою графічних залежностей розподілення рідинних компонентів в шарі борошна, виконано з використанням пакета прикладної програми MATLAB.

Процес приготування борошняної суміші в змішувачі здійснюється у два етапи. На першому етапі, у першій зоні, в результаті обертання вертикального вала з тарілками відбувається взаємодія компонентів. При цьому компоненти піддаються інтенсивному перемішуванню в результаті відносних переміщень у зваженому режимі як зверху, так і знизу щодо центрального вала. Взаємодія компонентів суміші відбувається за наявності їхнього тертя відносно один одного, що вірогідно сприяє утворенню чистих, свіжих ділянок на поверхнях зерен борошна. Таким чином, на першому етапі спостерігається активна підготовка компонентів до подальшого утворення суміші.

На другому етапі відбувається активний контакт із розчинною складовою, яка взаємодіє із свіжоутвореною поверхнею. Комплексна робота двох зон змішувача дозволяє створити всі умови для одержання однорідної суміші.

На першому етапі досліджень приймається модель ідеального перемішування, яка характеризується тим, що кількість компонентів у всіх зонах робочого простору змішувача та на виході з нього має бути однаковою  $x_{ex} = x_{вux} = x$ .

Припустивши, що в змішувач надходить потік компонентів суміші при постійній об'ємній продуктивності  $Q_{ex}$ , в сталому режимі  $Q_{ex} = Q_{вux} = Q$ .

При цьому особливості режиму подачі компонентів водно-борошняної суміші в змішувач будуть виглядати так:

$$M = \int_0^t (Qx_{ex} - Qx_{вux}) dt, \quad (1)$$

Коливання сталого процесу визначаються частотою надходження та взаємодіючих чергових порцій суміші в робочій камері.

Для моделі ідеального змішування амплітудно-частотна характеристика змішувача визначається:

$$\omega = \frac{\sqrt{1 - |\Phi(i\omega)|^2}}{t|\Phi(i\omega)|}. \quad (2)$$

Це рівняння дозволяє визначити інтервал часу, за який необхідно подати в робочу камеру змішувача, згідно з рецептурою, всі компоненти у заданому співвідношенні та у наступному інтервалі забезпечити ту ж подачу для приготування однорідної суміші.

Процес перемішування компонентів суміші розробленим змішувачем вирішується за допомогою законів гідродинаміки, а саме обтікання тарільчастого робочого органу і робочої камери потоком суміші.

Рух суміші описується системою рівнянь Нав'є – Стокса. У випадку плоскої задачі ця система спрощується, для сталого руху може бути представлена:

$$\begin{cases} W_x \cdot \frac{dW_x}{dx} + W_y \cdot \frac{dW_x}{dy} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx} + \nu \cdot \left( \frac{d^2W_x}{dx^2} + \frac{d^2W_x}{dy^2} \right) \\ W_x \cdot \frac{dW_y}{dx} + W_y \cdot \frac{dW_y}{dy} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dy} + \nu \cdot \left( \frac{d^2W_y}{dx^2} + \frac{d^2W_y}{dy^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

Відповідно до цієї системи, розподіл швидкостей у межах прикордонного шару за сталого руху суміші:

$$\frac{dW_x}{dt} = \frac{dW_x}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = W_x \cdot \frac{dW_x}{dx} \quad (4)$$

У такому випадку сила інерції, що діє вздовж напрямку руху суміші, дорівнюватиме:

$$\rho \cdot \frac{dW_x}{dt} dx dy dz \quad (5)$$

Після прирівнювання сил інерції та сил тертя матимемо:

$$\frac{d\tau}{dy} = \rho \cdot W_x \cdot \frac{dW_x}{dx} \quad (6)$$

Рівняння (6) дає змогу представити силу тертя за допомогою закону Ньютона:

$$\mu \cdot \frac{d^2W_x}{dy^2} = \rho \cdot W_x \cdot \frac{dW_x}{dx} \quad (7)$$

Отже, оцінка параметрів руху суміші навколо тарілки дозволяє визначити величину й характер зміни товщини прикордонного шару:

$$\delta \approx \sqrt{\frac{\mu \cdot l}{\rho \cdot W_0}}, \quad \text{або} \quad \frac{\delta}{l} \approx \frac{1}{\sqrt{\text{Re } i}} \quad (8)$$

Таким чином, знаючи розміри дрібних агломератів, можна визначити діаметр тарілки, що забезпечує таку товщину прикордонного шару, яка створює умови розчинної складової. І навпаки, знаючи діаметр, можна визначити умови руйнування розчинної складової суміші. Такий підхід дозволив розробити конструкцію нового тарільчастого робочого органу (рис. 2).

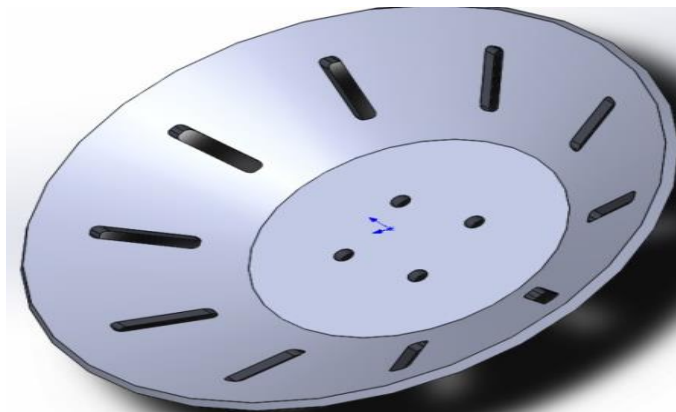


Рис. 2. Модель тарільчастого робочого органу

При вібродозуванні борошна проходить процес сегрегації. На частинки впливають: фізико-механічні властивості; сипучість; вологість; коефіцієнти внутрішнього та зовнішнього тертя часток; співвідношення кількості легких, малих та великих краплин розпиленних рідких компонентів; різниця компонентів за формою, станом поверхні, щільністю, аеродинамічними властивостями [11, 13].

Сегрегація полягає в накопиченні частинок певного розміру і щільності в різних за висотою зонах шару. Причому всі компоненти борошняної суміші залишаються в псевдозрідженому стані до певного моменту. При проходженні рідинного та повітряного потоку через шар борошна, його гідравлічний опір збільшується зі збільшенням їх швидкості, одночасно збільшується і аеродинамічна сила потоку  $F$ . При певній швидкості рідинно-повітряного потоку аеродинамічна сила  $F$  зрівноважить зведену силу тяжіння частини ( $G-A$ ), тобто [11]:

$$F = G - A, \quad (9)$$

де  $G$  – вага твердих частинок борошна, Н;

$A$  – Архімедова сила, Н.

При цьому втрата тиску при переході у псевдозріджений шар буде дорівнювати [10]:

$$\Delta P = G / S, \quad (10)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу псевдозрідженого шару, м<sup>2</sup>.

Тобто втрата тиску  $\Delta P$  дорівнює сумарній вазі шару, що належить до площі поперечного перерізу  $S$ , незалежно від величини швидкості рідинно-повітряного потоку.

З урахуванням Архімедових сил, перепад втрати тиску:

$$\Delta P^* = gH_0(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{п}})(1 - \varepsilon_0), \quad (11)$$

де  $\varepsilon_0$  – об'ємна щільність шару борошна;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$H_0$  – висота рухомого шару часток, м;

$\rho_{\text{п}}$  – густина зріджуючого агента (рідкі компоненти), кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{ч}}$  – густина твердих часток борошна, кг/м<sup>3</sup>.

У робочій камері по висоті перерізу швидкість псевдозрідження  $V$  досягається в різних перерізах неодноразомно. Під швидкістю псевдозрідження розуміють таку її величину, за якої зріджуються часточки в усіх перерізах робочої камери. Межі існування псевдозрідженого шару є обмеженими швидкістю початку псевдозрідження і швидкістю винесення часток. Коли відбувається зростання швидкості дозуючих компонентів, псевдозріджений шар борошна поступово розширяється, його висота збільшується і втрати тиску при цьому залишаються практично постійними.

Згідно з конструкцією змішувача у центральній частині циліндричної робочої камери по осі обертається робочий орган, який приймає значну частину утворюючої суміші. Це призводить до того, що шар борошна по периметру не буде щільним і при подальшому русі його можна розглядати як суцільне середовище частинок, що взаємодіють між собою. При цьому на частинки борошна діють сили тяжіння  $G = mg = g\rho_s \pi d_s^3 / 6$  і сили Стоксу  $f_3 = -3\pi\mu_s g d_s V$  в'язкого опору, де  $m = \rho_s \pi d_s^3 / 6$  – маса;  $\rho$  – густина;  $d_s$  – діаметр частинок борошна [5].

На початку руху головного вектора цих сил є нерівність нулю і частинка рухається з прискоренням згідно з другим законом Ньютона

$$m = \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{G} + \vec{f}_C. \quad (12)$$

Побудуємо залежності швидкості падіння частинок борошна від змінної координати  $z$  для різних значень його витрат  $Q_s$  і наступних параметрів  $d_s = 0,003$  м;  $\rho_s = 600$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_g = 10^{-4}$  м<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup>. Координата  $Z$  представляє дільницю верхньої частини робочої камери, де відбувається псевдозрідження (рис. 3).

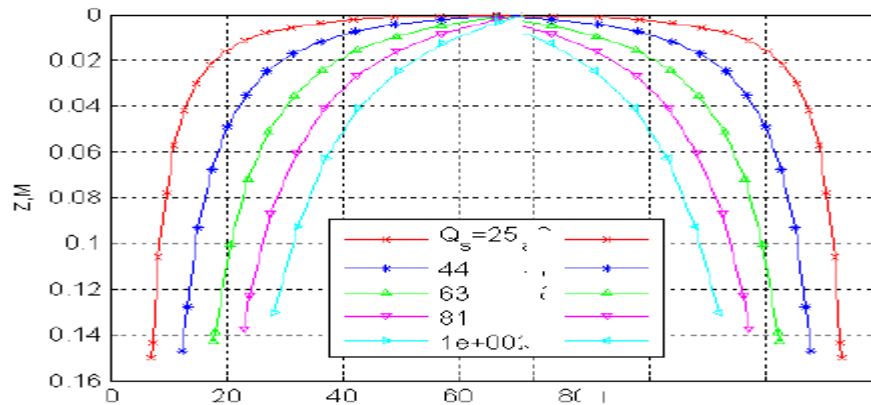


Рис. 3. Залежності швидкості падіння частинок борошна від змінної координати  $z$  по периметру камери

Із рисунка випливає, що швидкість руху частинок борошна при падінні з часом наближається до деякої граничної швидкості «витання»  $V_*$

$$V_* = \tau_s g, \quad (13)$$

Швидкість руху визначається із умови рівності нулю правої частини рівняння (9) і зменшення щільності шару борошна.

Параметр  $\tau_s$  відіграє роль часу релаксації руху частинки борошна в повітрі і визначається:

$$\tau_s = \frac{\rho_s^0 d_s^2}{18\mu_g}, \quad (14)$$

де  $\mu_g$  – в'язкість повітря;

$\rho_s^0$  – дійсна густина частинки борошна.

Проведені розрахунки показують, що в нашому випадку досягнення швидкості «витання» відбувається на незначній відстані від місця входження частинок борошна в камеру ( $z = 0$ ). Тому в границях вертикальної частини робочої камери має місце неустановлений рух частинок борошна. Відповідно рух борошна під дією сили тяжіння ( $\tau_s = \infty$ ):

$$\frac{dV}{dt} = g. \quad (15)$$

За умов квазістаціонарного режиму в змішувачу середовищі періодично утворюються бульбашки розміру, що спливають з однією і тією ж швидкістю одна за одною та залишаються всередині середовища. Зі збільшенням інтенсивності змішування їх розміри і швидкість спливання залишаються незмінними, зменшується лише відстань між ними. Подальше зростання швидкості обертання робочих органів призводить до такого режиму утворення бульбашок, за якого вони, стикаючись, рухаються ланцюжком або у струменевому режимі (рис. 4).

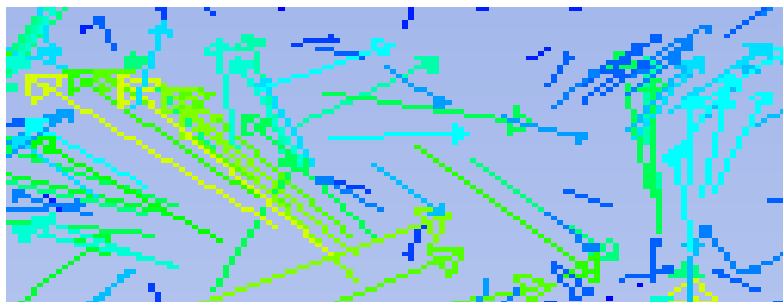


Рис. 4. Візуалізація розподілу у трифазному середовищі поля швидкості у вигляді векторних величин

Моделювання підтверджують справедливність прийнятих допущень зародження та руху бульбашок повітря. Аналіз рисунка 4 свідчить, що турбулізація фаз у об'ємі рідини є високою, спостерігаються пульсації газової фази у рідині, що додатково позитивно впливатиме на дисперсню тверду фазу. Більш наглядно результати змішування компонентів з утворенням рідинної суміші подано на рисунку 5.

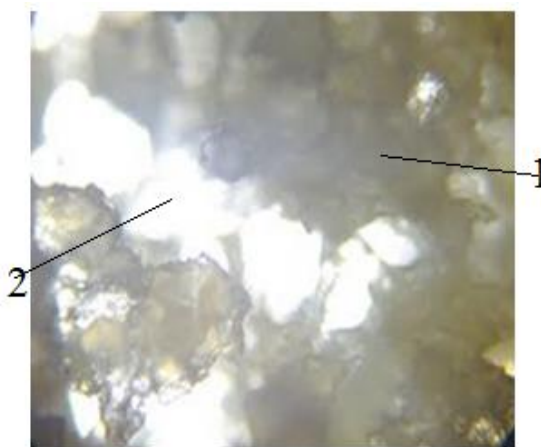


Рис. 5. Мікроструктура (1:1000) середовища: 1 – бульбашки повітря; 2 – зерна крохмалю пшеничного борошна

**Висновки.** Описано дискретно-імпульсне введення компонентів при їх змішуванні в новій конструкції змішувача, що дозволяє підвищити його питому продуктивність при зменшенні робочої камери та енергетичних витрат. Визначено параметри процесу псевдозрідження борошна (швидкість початку псевдозрідження  $V_{mn}$ , швидкість «витання»  $V_{dp}$ , швидкість змішування, об'єм щільності потоку  $\epsilon_0$ ), які впливають на підвищення продуктивності процесу попереднього перемішування компонентів. У результаті математичного моделювання процесу змішування дозуючих компонентів у робочу камеру машини побудовані траєкторії руху розпиленних краплин рідких компонентів у розрідженому шарі борошна. Це підтверджує справедливість прийнятих припущень під час теоретичного розрахунку зародження та руху бульбашок повітря у рідині та дисипацію енергії газу у експериментальній установці. Запропонована конструкція змішувача дозволяє в подальшому проводити дослідження в напрямі змішування різних сумішей з їх вологістю від 60...75 %. Крім цього, в робочій камері є можливість проводити встановлення інших тарільчастих робочих органів, які розроблені з можливим використанням і роторного робочого органу.



## Список використаної літератури:

1. Стадник І.Я. Науково-технічні основи дискретної дії на компоненти при перемішуванні : монографія / І.Я. Стадник. – Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2015. – 240 с.
2. Strenk F. Mieszanieimieszalniki (Mixing and mixingequipment) / F.Strenk. – Warszawa : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1971. – 367 p.
3. Стадник І.Я. Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого змішування тіста : дис ... д.т.н. : 05.18.12 / І.Я. Стадник. – Київ. – 2013. – 487 с.
4. Researching of the concentration distribution of soluble layers when mixed in the weight condition / I.Stadnyk, J.Pankiv, P.Havrylko, H.Karpyk // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. – 2019. – Vol. 13. – № 1. – P. 581–592. DOI: 10.5219/1129.
5. Соу С. Гидродинамика многофазных систем / С.Соу. – М. : Мир, 1971. – 536 с.
6. Седов Л.И. Механика сплошных сред / Л.И. Седов. – М. : Наука, – 1976. – Т. 1. – 536 с.
7. Стадник І.Я. Патент на корисну модель 137278 UA, МПК А21С1/00 В01F7/00 (2019.01) Змішувач напівфабрикатів / І.Я. Стадник, Ю.Ю. Паньків, В.М. Гіджельський // Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя. – 2019. – № u201903951; заявл. 15.04.2019; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19.
8. Стадник І.Я. Патент на корисну модель 134226 UA, МПК А21С1/02 В01F7/00 (2019.01) Змішувач рідких напівфабрикатів / І.Я. Стадник, Ю.Ю. Паньків, О.М. Лясота // Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя. – 2019. – № u201811745; заявл. 28.11.2018; опубл. 10.05.2019, Бюл. № 9.
9. Корнієнко Я.М. Процеси переносу в дисперсних системах : навч. посіб. / Я.М. Корнієнко, Р.В. Сачок. – Київ, 2011. – 132 с.
10. Расслоение в псевдоожигеном слое [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://repetitora.com/rassloenie-v-psevdoozhizhenom-sloe>.
11. Расчеты аппаратов кипящего слоя : справочник / А.П. Баскалов и др. – Ленинград : Химия, 1986. – 352 с.
12. Ковенский Г.И. Управляемое псевдоожигение / Г.И. Ковенский. – Минск : АНК ИТМО НАНБ, 1999. – 144 с.
13. Техника и технологии псевдоожигения: гидродинамика и теплообмен с погруженными телами : монограф. / С.И. Дворецкий и др. – Тамбов, 2005. – 168 с.
14. Бедарев С.В. Применение технологии кипящего слоя в энергетике : магистерская / С.В. Бедарев. – Барнаул, 2017.
15. Drobot V.I. Technological calculations in baking production / V.I. Drobot. – Condor, 2010. – 440 p.
16. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 1999. – 479 с.
17. Корнієнко Б.Я. Особливості моделювання процесів переносу в дисперсних системах / Б.Я. Корнієнко // Вісник Нац. техн. ун-ту України «Київ. політехн. ін-т». Сер. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – № 2 (8). – С. 5–9.
18. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 60 с.
19. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.

## References:

1. Stadnyk, I.Ja. (2015), *Naukovo-tehniczni osnovy dyskretnoi' dii' na komponenty pry peremishuvanni*, monografija, TNTU im. Ivana Puljuja, Ternopil', 240 p.
2. Strenk, F. (1971), *Mieszanieimieszalniki (Mixing and mixingequipment)*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 367 p.
3. Stadnyk, I.Ja. (2013), *Naukovo-tehniczni osnovy procesiv ta rozrobka obladnannja dlja bezlopatyevogo zamishuvannja tista*, dys... d.t.n., 05.18.12, Kyi'v, 487 p.
4. Stadnyk, I., Pankiv, J., Havrylko, P. and Karpyk, H. (2019), «Researching of the concentration distribution of soluble layers when mixed in the weight condition», *Potravarinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, Vol. 13, No. 1, pp. 581–592, doi: 10.5219/1129.
5. Sou, S. (1971), *Gidrodinamika mnogofaznykh sistem*, Mir, Moskva, 536 p.
6. Sedov, L.I. (1976), *Mekhanika sploshnykh sred*, Nauka, Moskva, Vol. 1., 536 p.
7. Stadnyk, I.Ja., Pan'kiv, Ju.Ju. and Gidzhelic'kyj, V.M. (2019), *Patent na korysnu model' 137278 UA*, МПК А21С1/00 В01F7/00 (2019.01) Zmishuvach napivfabrykativ, Ternopil's'kyj nacional'nyj tehnicznyj universytet im. Ivana Puljuja, No. u201903951; zajavl. 15.04.2019; opubl. 10.10.2019, Bjul. No. 19.
8. Stadnyk, I.Ja., Pan'kiv, Ju.Ju. and Ljasota, O.M. (2019), *Patent na korysnu model' 134226 UA*, МПК А21С1/02 В01F7/00 (2019.01) Zmishuvach ridkyh napivfabrykativ, zajavnyk Ternopil's'kyj nacional'nyj tehnicznyj universytet im. Ivana Puljuja, No. u201811745; zajavl. 28.11.2018; opubl. 10.05.2019, Bjul. No. 9.
9. Kornijenko, Ja.M. and Sachok, R.V. (2011), *Procesy perenosu v dyspersnyh systemah*, navch. posib., Kyi'v, 132 p.
10. «Rassloenie v psevdoozhizhenom sloe», [Online], available at: <https://repetitora.com/rassloenie-v-psevdoozhizhenom-sloe>
11. Baskalov, A.P. et al. (1986), *Raschety apparatov kipyashchego sloya*, spravochnik, Khimiya, Leningrad, 352 p.
12. Kovenskii, G.I. (1999), *Upravlyaemoe psevdoozhizhenie*, ANK ITMO NANB, Minsk, 144 p.
13. Dvoretiskii, S.I. et al. (2005), *Tekhnika i tekhnologii psevdoozhizheniya: gidrodinamika i teploobmen s pogruzhennymi telami*, monograf., Tambov, 168 p.
14. Bedarev, S.V. (2017), *Primenenie tekhnologii kipyashchego sloya v energetike*, magisterskaya, Barnaul.

15. Drobot, V.I. (2010), *Technological calculations in baking production*, Condor, 440 p.
16. Gmurman, V.E. (1999), *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika*, Vysshaya shkola, M., 479 p.
17. Kornijenko, B.Ja. (2011), «Osoblyvosti modeljuvannja procesiv perenosu v dyspersnyh systemah», *Visnyk Nac. tehn. un-tu Ukrainy «Kyiv. politehn. in-t»*. Ser. *Himichna inzhenerija, ekologija ta resursozberezhenja*, No. 2 (8), pp. 5–9.
18. Spiridonov, A.A. (1981), *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov*, Mashinostroenie, M., 60 p.
19. Adler, Yu.P., Markova, E.V. and Granovskii, Yu.V. (1976), *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii*, 2-e izd., pererab. i dop., Nauka, M., 279 p.

**Піддубний** Володимир Антонович – доктор технічних наук, професор, член-кореспондент Національної академії аграрних наук України, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, професор кафедри технології і організації ресторанного господарства Київського національного торговельно-економічного університету.

<https://orcid.org/0000-0002-1497-7133>.

Наукові інтереси:

- динаміка перехідних процесів у харчових технологіях;
- енерго- та ресурсозбереження в харчових технологіях.

E-mail: profpod@ukr.net.

**Стадник** Ігор Ярославович – доктор технічних наук, професор кафедри обладнання харчових технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

<https://orcid.org/0000-0003-4126-3256>.

Наукові інтереси:

- динаміка перехідних процесів у харчових технологіях;
- енерго- та ресурсозбереження в харчових технологіях.

E-mail: igorstadnykk@gmail.com.

**Чагайда** Андрій Олегович – кандидат технічних наук, доцент кафедри туризму та готельно-ресторанної справи Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-1826-9545>.

Наукові інтереси:

- динаміка перехідних процесів у харчових технологіях;
- енерго- та ресурсозбереження в харчових технологіях.

E-mail: andreyl1081968@ukr.net.

**Петриченко** Євгеній Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва.

<https://orcid.org/0000-0003-1037-077X>.

Наукові інтереси:

- енерго- та ресурсозбереження в харчових технологіях.

E-mail: 22102210g@ukr.net.

**Piddubnyi V.A., Stadnyk I.Ya., Chahaida A.O., Petrychenko Ye.A.**

#### **Justification of mixer parameters for flour components**

The need to provide the bakery and confectionery industries with new high-tech equipment that would ensure high-quality preparation of mixtures for the main processes in the production of flour semi-finished products with high-quality mixing of dosing components is always a hot topic. The design of a discrete-pulse mixer for liquid flour mixtures is proposed. The influence of working bodies and the working chamber on the interaction of components is described and the dynamics of a three-phase rarefied layer of the formed medium under the action of a directed flow of fine droplets of liquid components is considered. The trajectories of movement are constructed and the quality of their distribution is determined depending on the design parameters of the mixer. A mathematical description of the interaction process of flour and liquid components in a pseudo-liquefied state is carried out. The parameters of the flour fluidization process that affect the increase in mixing productivity of components are determined. As a result of mathematical modeling of the process of mixing components in the working chamber of the experimental unit, the trajectories of the movement of sprayed drops of liquid components in the rarefied flour layer are constructed. The speed of movement and formation of air bubbles in a three-phase medium is determined.

**Keywords:** mixer; dispersion; emulsion; process; modeling.

Стаття надійшла до редакції 11.05.2022.