

ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНЕ ЗМІШУВАННЯ БОРОШНЯНИХ КОМПОНЕНТІВ

І.Я. Стадник, Ю. Паньків, Н.В. Чорна, Т.О. Лісовська

Забезпечення хлібопекарської та кондитерської галузей найновішим високотехнологічним обладнанням, яке забезпечувало б якісне приготування сумішей для основних процесів виробництва борошняних напівфабрикатів при якісному змішуванні дозованих компонентів, є актуальною темою. Запропоновано конструкцію дискретно-імпульсного змішувача для рідинних борошняних сумішей. Описано вплив робочих органів та робочої камери на взаємодію компонентів, 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 псевдозрідження борошна, що впливають на підвищення продуктивності змішування компонентів. У результаті математичного моделювання процесу змішування компонентів у робочій камері дослідної установки побудовано траєкторії руху розпиленіх краплин рідких компонентів у розрідженому шарі борошна. Визначено швидкість руху та утворення повітряних бульбашок у трифазному середовищі.

Ключові слова: змішувач, диспергування, емульсія, процес, моделювання.

ДИСКРЕТНО-ИМПУЛЬСНОЕ СМЕШИВАНИЕ МУЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ

И.Я. Стадник, Ю. Паньков, Н.В. Черная, Т.О. Лисовская

Обеспечение хлебопекарной и кондитерской отраслей новейшим высокотехнологическим оборудованием, которое обеспечивало бы качественное приготовление смесей для основных процессов производства мучных полуфабрикатов при качественном смешивании дозированных компонентов, является актуальной темой. Предложена конструкция дискретно-импульсного смесителя для жидкостных мучных смесей. Описано влияние рабочих органов и рабочей камеры на взаимодействие компонентов, рассмотрена динамика трехфазного разреженного слоя образовавшейся среды при воздействии направленного потока мелкодисперсных капель жидких компонентов. Построены траектории движения и определено качество их распределения в зависимости от конструктивных параметров

смесителя. Проведено математическое описание процесса взаимодействия муки, жидких компонентов в псевдооживленном состоянии. Определены параметры псевдооживления муки, влияющие на повышение производительности перемешивания компонентов. В результате математического моделирования процесса смешивания компонентов в рабочей камере исследуемой установки построены траектории движения распыленных капель жидких компонентов в разреженном слое муки. Установлена скорость движения и образования воздушных пузырьков в трехфазной среде.

Ключевые слова: смеситель, диспергирование, эмульсия, процесс, моделирование.

DISCRETE-PULSE MIXING OF FLOUR COMPONENTS

I. Stadnyk, Ju. Pankiv, N. Chorna, T. Lisovska

The current state of food production requires the use of advanced technologies and equipment. It is necessary to provide the bakery and confectionery industry with new high-tech equipment that would ensure high-quality preparation of mixtures. The article describes discrete pulse introduction of the components when they are mixed in a new design of the mixer, which allows to increase its specific productivity while reducing the working chamber and energy costs. Variants of the components' interaction on the upper portion of the working chamber are described, and the dynamics of a three-phase rarefied layer of the formed medium, which is affected by a directed flow of fine droplets of liquid components, is considered. As a result of mathematical modeling of the process of mixing the dosing components into the working chamber of the machine, the trajectories of the atomized droplets of liquid components in the rarefied flour layer are constructed. The quality of their distribution is determined depending on technological parameters of the mixer. The parameters of the fluidization process of flour are determined, which influence the increase in productivity of the process of preliminary mixing of the components. The process of the interaction of flour and liquid components in a fluidized state are mathematically described. The speed of movement and formation of air bubbles in a three-phase medium is established. The validity of the accepted assumptions of theoretical calculation of the nucleation and motion of air bubbles in a liquid and the dispersion of gas energy in the experimental setup is confirmed.

Keywords: mixer, dispersion, emulsion, process, modeling.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Основними етапами технологічного процесу виробництва хлібобулочних та кондитерських виробів є підготовка вихідних компонентів, їх дозування, змішування. Однорідність змішуваних компонентів є основною вимогою якості утвореної суміші, адже від того, наскільки рівномірно окремі компоненти будуть взаємодіяти в основному об'ємі, значною мірою

залежать, характеристики одержаної готової продукції. Саме тому змішувальне обладнання є найбільш відповідальним обладнанням технологічного ланцюга з виготовлення емульсій, суспензій.

Сучасний стан розвитку харчової борошняної продукції потребує використання прогресивних технологій та обладнання. Виникає необхідність у забезпеченні хлібопекарської та кондитерської галузей найновішим високотехнологічним обладнанням, яке забезпечувало б якісне приготування сумішей. Вирішенням цієї проблеми є використання високоефективних малогабаритних змішувальних установок для основних процесів виробництва напівфабрикатів із якісним змішуванням дозованих компонентів.

З огляду на стадійність змішування можна відзначити, що найбільш характерним показником роботи цього класу машин є рівномірність змішування за оптимальної тривалості та завантаженості робочої камери. Це сприяє вирівнюванню концентрації окремих компонентів. Цей показник дозволяє оцінити співвідношення рецептурних компонентів і дотримання стадійності управління процесом змішування.

Ураховуючи швидкий розвиток і великі можливості сучасної обчислювальної техніки, для розв'язання завдання з визначення раціональних параметрів змішування і подальшої розробки відповідного обладнання варто користуватися методами математичного моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Змішування застосовується для інтенсифікації теплових і дифузійних процесів, для приготування суспензій, емульсій, отримання гомогенних систем (розчинів) тіста. Для проведення цих процесів в усіх випадках змішування здійснюють безпосередньо в призначеному технологічному устаткуванні. Для багатьох виробництв швидкість змішування компонентів є показником [1–3], що визначає загальну швидкість процесу. Особливо це стосується хлібопекарської та кондитерської галузей.

У харчовій промисловості механічне змішування широко використовується завдяки своїй відносній простоті, різноманітності типорозмірів і конструкцій місильних робочих органів. До його переваг належить інтенсивний та рівномірний масообмін між рідиною та твердою фазою. Робочі органи не тільки служать для змішування, але є універсальним засобом для гомогенізації малов'язких і в'язких середовищ. Поряд із лопатевими, використовують пропелерні, гвинтові, рамні змішувальні пристрої. Як стверджують деякі автори [2–4], ефективність використання механічних змішувальних пристроїв

є вищою, ніж у стаціонарному шарі матеріалу або обертовій робочій камері. Однак, як свідчить аналіз літературних джерел [4–7], вони мають низку недоліків, пов'язаних із великими витратами енергії, складним обслуговуванням внутрішньої конструкції апарата.

Сумарна швидкість взаємодії визначається інтенсивністю кінетичної та дифузійної стадій. Кінетика є одним із найважливіших аспектів взаємодії фаз компонентів. Вона визначає закономірності перебігу процесу в часі, швидкість процесу. Нею також визначається продуктивність змішувачів [5; 9]. Формування адекватних кінетичних моделей зазвичай базується на попередніх експериментальних дослідженнях. З огляду на це значний інтерес викликає дослідження, проведене в галузі гетерогенної взаємодії борошна з рідкими компонентами [3; 4].

Постійно зростаюча вартість електроенергії та розвиток сучасних технологій змішування часто приводять до перегляду класичних схем пристроїв. Постійно тривають роботи [1; 4; 6; 9] із упровадження менш енергоємних змішувачів та використання змішувальних пристроїв, зміщених відносно осі апарата. На ринку змішувального обладнання набувають розповсюдження пристрої з конусоподібними елементами (спіралі) та прецесійні змішувачі [1; 3] – один із удосконалених різновидів механічних змішувальних пристроїв.

Корпус робочої камери змішувачів впливає на гідродинамічні характеристики рухомого потоку. У працях [1; 2; 7; 9] описано змішувач із механічним змішувальним пристроєм, що містить циліндричний корпус із днищем, кришкою і патрубками, вертикальний вал із мішалкою та змонтовані на внутрішній поверхні корпусу гальмівні елементи. Така конструкція дає змогу значно знизити ймовірність утворення застійних зон в апараті, що особливо важливо під час змішування термомеханочутливих рідин.

Змішувач з вертикальною циліндричною робочою камерою, із кришкою, ввідним і вивідним патрубками, приводом із можливістю передачі обертового руху на центральний вал, на якому закріплені лопатеві робочі органи, використовується на підприємствах харчової промисловості для змішування компонентів. Основним недоліком такої мішалки є нерівномірне змішування суспензії, осідання твердих частинок на стінках і дні. Це обумовлено неоднорідним полем турбулентного змішування в робочому об'ємі апарата.

Псевдозрідження є одним із найбільш прогресивних методів здійснення технологічних процесів із дисперсною фазою. Цей метод використовується в хімічній, харчовій, будівельній та інших галузях промисловості. Широке використання псевдозрідженого шару в

багатьох галузях промисловості обумовлено рядом його переваг [11–14], до яких відносять інтенсивне змішування твердих частинок із розріджувальним агентом та розвиненою поверхнею контакту фаз. Псевдозрідження в шарі є низькозатратним процесом, тому застосовується в багатьох галузях промисловості під час проведення технологічних процесів.

Авторами праць [3; 11; 13] досліджено рух бульбашок повітря в пульсуючій рідині для визначення механізму коливальної флотації. Використання пульсуючого потоку рідини крізь шар дисперсних частинок дає змогу інтенсифікувати змішування та розчинення, 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 недостатньо вивчене дослідниками.

Мета статті полягає в науковому обґрунтуванні розрахунку і створенні на цій основі змішувача дискретно-імпульсної дії за умови розв'язання таких завдань: здійснити огляд і аналіз конструкцій і частковий розрахунок змішувача; розглянути фізику процесу приготування сумішей у разі використання зважувального стану й механічного впливу на компоненти.

Методи дослідження. Наукові розробки [3–6], виконані на кафедрі обладнання харчових технологій ТНТУ ім. Івана Пулюя передбачають змішування компонентів під час їх розпилення, що забезпечує збільшення поверхонь міжфазового контакту та рівномірне їх розподілення. На основі такого підходу до змішування компонентів, що визначається відношенням кількості рідких компонентів, які розподіляються в шарі концентрованого борошна, до їх кількості, що подається соплами, у відсотках роботи, проведено математичне моделювання процесу та визначення коефіцієнта корисної дії змішувача.

Виклад основного матеріалу дослідження. У циліндричній робочій камері для змішування компонентів (рис. 1) із діаметром d_0 зверху вздовж її поверхні рухається шар борошна, що дозується вібродозатором. По периметру циліндричної камери розташовані сопла, призначені для розпилення рідких компонентів направленої факелу в зону руху борошна. Борошно надходить зверху по центру і периметру циліндричної камери і рухається вниз у вигляді шару постійної товщини h_s . Числові розрахунки, пов'язані з розв'язанням систем звичайних диференціальних рівнянь, і побудову графічних залежностей розподілення рідких компонентів у шарі борошна виконано з використанням пакета прикладної програми MATLAB.

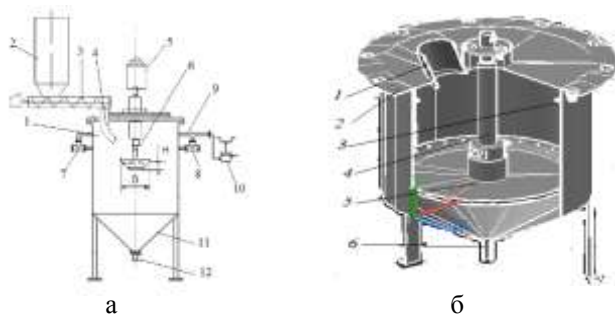


Рис. 1. Схема змішувача (а) та 3D-модель змішувача (б): 1 – патрубок для дозування борошна; 2 – кришка циліндричної робочої камери; 3 – сопло для розпилення рідких компонентів; 4 – патрубок; 5 – тарілчастий робочий орган; 6 – патрубок вивантаження змішаної суміші

Приготування борошняної суміші в змішувачі здійснюється у два етапи. На першому етапі у першій зоні змішувача, в результаті обертання вертикального вала з тарілками відбувається взаємодія компонентів. При цьому компоненти інтенсивно змішуються в результаті переміщень у зваженому режимі як зверху, так і знизу відносно центрального вала. Взаємодія компонентів суміші відбувається за наявності їхнього тертя один відносно одного, що 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 зі свіжоутвореною поверхнею. Комплексна робота двох зон змішувача дозволяє створити всі умови для одержання однорідної суміші. На першому етапі досліджень приймається модель ідеального змішування. Вона характеризується тим, що кількість компонентів у всіх зонах робочого простору змішувача та на виході з нього має бути однаковою $x_{ex} = x_{mix} = x$. Припустивши, що в змішувач надходить потік компонентів суміші за постійної об'ємної продуктивності Q_{ex} , у сталому режимі $Q_{ex} = Q_{mix} = Q$.

При цьому режимі подачі компонентів суміші в змішувач виражено таким чином:

$$M = \int_0^t (Q_{ex} - Q_{mix}) \cdot dt, \quad (1)$$

де M – це частота надходження водно-борошняної суміші в робочу камеру змішувача.

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

Для моделі ідеального змішування амплітудно-частотна характеристика змішувача визначається таким чином:

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

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

Процес змішування компонентів суміші розробленим змішувачем відбувається за законами гідродинаміки, а саме обтікання тарілчастого робочого органу і робочої камери потоком суміші. Рух досліджуваної суміші описується системою рівнянь Нав'є–Стокса. У випадку плоскої задачі ця система спрощується і для сталого руху виглядає таким чином:

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

Розподіл швидкостей у примежовому шарі, за сталого руху суміші відповідно до цієї системи виглядає як

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

У цьому випадку сила інерції, що діє вздовж напрямку руху суміші, дорівнює

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

Після прирівнювання сил інерції та сил тертя маємо таке рівняння:

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

Це рівняння дає змогу виразити силу тертя за законом Ньютона:

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

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

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

Таким чином, знаючи розміри дрібних агломератів, можна визначити діаметр тарілки для утворення такої товщини примежового шару, що створює умови для розчинної складової. І навпаки, знаючи діаметр, можна визначити умови руйнування розчинної складової суміші. Такий підхід дозволив розробити конструкцію нового тарілкового робочого органу (рис. 2).



Рис. 2. Модель тарілкового робочого органу

Під час вібродозування борошна відбувається сегрегація. На частинки впливають фізико-механічні властивості; сипучість; вологість; коефіцієнти внутрішнього та зовнішнього тертя частинок; співвідношення кількості легких, малих і 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 по висоті зонах шару. Причому всі компоненти борошняної суміші залишаються в псевдозрідженому стані до певного моменту. Під час проходження рідинного та повітряного потоків крізь шар борошна його гідравлічний опір збільшується зі збільшенням їх швидкості, одночасно збільшується аеродинамічна сила потоку F . За певної 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 після переходу у псевдозріджений шар дорівнюватиме [10]:

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

де S – площа поперечного перерізу псевдозрідженого шару, м².

Тобто втрата тиску ΔP дорівнює сумарній вазі шару, віднесеної до площі поперечного перерізу S , незалежно від величини швидкості рідинно-повітряного потоку.

З урахуванням Архімедових сил перепад втрати тиску обчислюємо таким чином:

$$\Delta P^* = gH_0(\rho_c - \rho_n)(1 - \varepsilon_0), \quad (11)$$

де ε_0 – об'ємна щільність шару борошна;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

H_0 – висота рухомого шару часток, м;

ρ_n – густина зріджуючого агента (рідкі компоненти), кг/м³;

ρ_c – густина твердих часток борошна, кг/м³.

У робочій камері по висоті перерізу швидкість псевдозрідження (V) досягається в різних перерізах неодноразомно. Під швидкістю псевдозрідження розуміють таку її величину, при якій зріджуються частинки в усіх перерізах робочої камери. Межі існування псевдозрідженого шару обмежені швидкістю початку псевдозрідження і швидкістю винесення частинок. Коли зростає швидкість руху дозованих компонентів, псевдозріджений шар борошна поступово розширюється, його висота збільшується, втрати тиску при цьому залишаються майже постійними.

Згідно з конструкцією змішувача в центральній частині циліндричної робочої камери по осі обертається робочий орган, який приймає значну частину утвореної суміші. Це приводить до того, що шар борошна по периметру не буде щільним і під час подальшого руху його можна розглядати як суцільне середовище частинок, що взаємодіють між собою. При цьому на частинки борошна діють сили тяжіння:

$$G = mg = g\rho_s \pi d_s^3 / 6 \text{ і сили Стокса,}$$

$$f_3 = -3\pi\mu_s g d_s V \text{ в'язкого опору,}$$

де $m = \rho_s \pi d_s^3 / 6$ – маса;

ρ – 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:

$$m = \frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{G} + \bar{f}_c \quad (12)$$

Побудуємо залежності швидкості падіння частинок борошна від змінної координати Z для різних значень його витрат Q_s і таких параметрів: $ds = 0,003$ м; $\rho_s = 600$ кг/м³; $\mu_g = 10^{-4}$ м⁻¹ с⁻¹. Координата Z представляє ділянку верхньої частини робочої камери, де відбувається псевдозрідження (рис. 3).

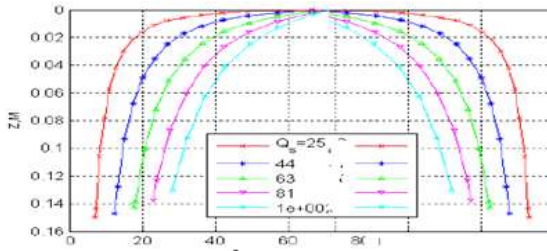


Рис. 3. Залежності швидкості падіння частинок борошна від змінної координати Z по периметру камери

На рис. 3 видно, що швидкість руху частинок борошна під час падіння з часом наближається до деякої граничної швидкості витання (V_B):

$$V^* = \tau_s \cdot g. \quad (13)$$

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

Параметр τ_s виражає час релаксації руху частинки борошна у повітрі й визначається таким чином:

$$\tau_s = \frac{\rho_s^0 \cdot d_s^2}{18 \cdot \mu_g}$$

де μ_g – в'язкість повітря;

ρ_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 межах вертикальної частини робочої камери має місце процес неустановленого руху частинок борошна. Відповідно, рух борошна під дією сили тяжіння ($\tau_s = \infty$) виразимо таким чином:

$$\frac{dV}{dt} = g. \quad (14)$$

За умови квазістаціонарного режиму в змішаному середовищі періодично утворюються бульбашки, що спливають з однаковою швидкістю 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).

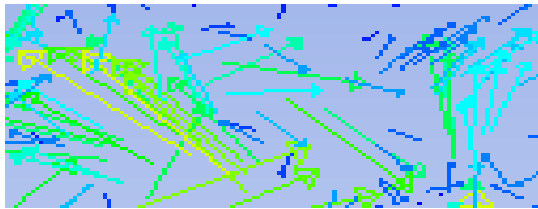


Рис. 4. Візуалізація розподілу в трифазному середовищі поля швидкості у вигляді векторних величин

Моделювання підтверджує правильність прийнятих допущень зародження та руху бульбашок повітря. Аналіз рис. 4 свідчить, що турбулізація фаз у об'ємі рідини є високою, спостерігаються пульсації газової фази в рідині, що додатково позитивно впливатиме на дисперсну тверду фазу. Більш наочно результати змішування компонентів з утворенням рідинної суміші подано на рис. 5.



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

Висновки. 1. Описано дискретно-імпульсне введення компонентів під час їх змішування в змішувачі нової конструкції, що дозволяє підвищити його питому продуктивність зі зменшенням робочої камери та енергетичних витрат.

2. Визначено параметри псевдозрідження борошна (швидкість початку псевдозрідження V_{pp} , швидкість витання V_{dp} , швидкість змішування, об'ємна щільність потоку ϵ_0), які впливають на підвищення продуктивності попереднього змішування компонентів.

3. У результаті математичного моделювання змішування дозованих компонентів у робочій камері

рі апарата побудовано траєкторії руху розпилених краплин рідких компонентів у розрідженому шарі борошна. Це підтверджує правильність прийнятих допущень під час теоретичного розрахунку зародження та руху бульбашок повітря в рідині та дисипацію енергії газу в експериментальній установці.

4. Запропонована конструкція змішувача дозволяє в подальшому проводити дослідження щодо змішування різних сумішей із вологістю 60–75%. Крім того, є можливість у робочій камері встановити інші тарілчасті робочі органи, розроблені з можливим використанням роторного робочого органу.

Список джерел інформації / References

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.

Stadnik, I. Y. (2015), *Scientific and technical bases of discrete action on components at hashing* [Naukovo-tehnichni osnovi diskretnoyi diyi na komponenti pri peremishuvanni], TNTU imeni Ivana Pulyuya, Ternopil, 240 p.

2. Strenk, F. (1971), *Mieszanie i mieszalniki (Mixing and mixing equipment)*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 367 p.

3. Стадник І. Я. Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого замішування тіста : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / І. Я. Стадник. – Київ, 2013. – 312 с.

Stadnik, I.Y. (2013), *Scientific and technical bases of processes and development of equipment for blade-free dough kneading* [Naukovo-tehnichni osnovi procesiv ta rozrobka obladnannya dlya bezlopatovogo zamishuvannya tista: dis. ... kand. tehn. nauk], Kyiv, 312 p.

4. Stadnyk, I., Pankiv, Ju., Havrylko, P., Karpyk, H. (2019), “Researching of the concentration distribution of soluble layers when mixed in the weight condition”, *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, Vol. 13, No. 1, pp. 581-592.

5. Соу С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу. – Москва : Мир, 1971. – 536 с.

Sou, S. (1971), *Hydrodynamics of multiphase systems* [*Gidrodinamika mnogofaznyh sistem*], Mir, Moscow, 536 p.

6. Седов Л. И. Механика сплошных сред. Т. 1 / Л. И. Седов. – Москва : Наука, 1976. – 536 с.

Sedov, L. (1976), *Continuum mechanics* [*Mehanika sploshnyh sred. T. 1*], Nauka, Moscow, 536 p.

7. Пат. 137278 Україна. Змішувач напівфабрикатів. – Заявл. 10.10.2017 ; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19. – 4 с.

Semi-finished mixer [*Zmishuvach napivfabrikativ*], Ukraine. Pat. 137278.

8. Пат. 134226 Україна. Змішувач рідких напівфабрикатів. – Заявл. 10.05.2017 ; опубл. 10.05.2019, Бюл. № 9. – 4 с.

Mixer of liquid semi-finished products [*Zmishuvach ridkih napivfabrikativ*], Ukraine. Pat. 134226.

9. Корнієнко Я. М. Процеси переносу в дисперсних системах : навч. посіб / Я. М. Корнієнко, Р. В. Сачок. – Київ, 2011. – 132 с.

Korniienko, Ya., Sachok, R. (2011), *Processes itransfer dispersed systems* [*Procesi perenosu v dispersnih sistemah: navch. posib*], Kyiv, 132 p.

10. Расслоение в псевдоожигеном слое [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://repetitora.com/rassloenie-v-psevdoozhizhenom-sloe>

Fluid Bed Separation [*«Rassloenie v psevdoozhizhenom sloe»*], available at: <https://repetitora.com/rassloenie-v-psevdoozhizhenom-sloe>

11. Расчеты аппаратов кипящего слоя : справочник / Баскалов А. П., Лучевский Б. П., Мухленов И. П., Ойгенблик А. А. – Ленинград : Химия, 1986. – 352 с.

Baskalov, A., Luchevskij, B., Muhlenov, I., Ojgenblik, A. (1986), *Fluidized bed apparatus calculations: reference book* [*Raschety apparatov kipyashego sloya: spravochnik*], Himiya, Leningrad, 352 p.

12. Ковенский Г. И. Управляемое псевдоожигение / Г.И. Ковенский. – Минск : АНК ИТМО НАНБ, 1999. – 144 с.

Kovenskiy, G. (1999), *Controlled fluidization* [*Upravlyaemoe psevdoozhizhenie*], Minsk, ANK ITMO NANB, 144 p.

13. Техника и технологии псевдоожигения: гидродинамика и теплообмен с погруженными телами : монография / С. И. Дворецкий и др. – Тамбов, 2005. – 168 с.

Dvoreckij, S., *Fluidization Technique and Technologies: Hydrodynamics and Heat Transfer with Submerged Bodies: Monograph* [*Tehnika i tehnologii psevdoozhizheniya: gidrodinamika i teploobmen s pogruzhennymi telami: monografiya*], Tambov, 168 p.

14. Бедарев С. В. Применение технологии кипящего слоя в энергетике : магистерская диссертация / С. В. Бедарев. – Барнаул, 2017.

Bedarev, S. (2017), *Application of fluidized bed technology in the energy sector: master's thesis* [*Primenenie tehnologii kipyashego sloya v energetike: masterskaya dissertaciya*], Barnaul.

15. Drobot, V. (2010), *Technological calculations in baking production*, Condor, 440 p.

16. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – Москва : Высшая школа, 1999. – 479 с.

Gmurman, V. (1999), *Theory of Probability and Mathematical Statistics* [*Teoriya*

veroyatnostej i matematicheskaya statistika], Vysshaya shkola, Moscow, 479 p.

17. Корнієнко Б. Я. Особливості моделювання процесів переносу в дисперсних системах / Б. Я. Корнієнко // Вісник Нац. техн. ун-ту «Київ. політех. ін-т». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – № 2 (8). – С. 5–9.

Korniienko, B. (2011), *Features of modeling of transfer processes in dispersed systems* [Osoblivosti modelyuvannya procesiv perenosu v dispersnih sistemah. Visn. nac. tehn. un-tu «Kyiv. politehn. in-t». Himichna inzheneriya, ekologiya ta resursozberezhennya], No. 2(8), pp. 5-9.

18. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 60 с.

Spiridonov, A. (1981), *Planning an experiment in the study of technological processes* [Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tehnologicheskikh processov], Mashinostroenie, Moscow, 60 p.

19. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Г. Ю. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Наука, 1976. – 279 с.

Adler, Yu., Markova, E., Granovskij, Yu. (1976), *Planning an experiment to find optimal conditions* [Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyh uslovij. 2-e izd., pererab. i dop.], Nauka, Moscow, 279 p.

Стадник Ігор Ярославович, д-р техн. наук, проф., кафедра обладнання харчових технологій, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя. Адреса: вул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна, 46001. Тел.: 0975454829; e-mail: igorstadnykk@gmail.com.

Стадник Игорь Ярославович, д-р техн. наук, проф., кафедра оборудования пищевых технологий, Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя. Адрес: ул. Руська, 56, г. Тернополь, Украина, 46001. Тел.: 0975454829; e-mail: igorstadnykk@gmail.com.

Stadnyk Igor, Dr. of Tech. Sc., Prof., Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Address: Ruska st., 56, Ternopil, 46001, Ukraine. Tel.: 0975454829; e-mail: igorstadnykk@gmail.com.

Паньків Юлія, асп., кафедра обладнання харчових технологій, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя. Адреса: вул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна, 46001. Тел.: 0975454829; e-mail: Juiliapankiv@gmail.com.

Паньків Юлия, асп., кафедра оборудования пищевых технологий, Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя. Адрес: ул. Руська, 56, г. Тернополь, Украина, 46001. Тел.: 0975454829; e-mail: Juiliapankiv@gmail.com.

Pankiv Julia, Graduate Student, Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Address: Ruska st., 56, Ternopil, 46001, Ukraine. Tel.: 0975454829; e-mail: Juiliapankiv@gmail.com.

Чорна Ніна Вікторівна, канд. техн. наук, доц., кафедра харчових

технологій в ресторанній індустрії, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: 0969961815; e-mail: ninelleblack@ukr.net.

Черная Нина Викторовна, канд. техн. наук, доц., кафедра пищевых технологий в ресторанной индустрии, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: 0969961815; e-mail: ninelleblack@ukr.net.

Chorna Nina, PhD in Tech. Sc., Assoc. Prof., Department of Food Technology in the Restaurant Industry, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: 0969961815; e-mail: ninelleblack@ukr.net.

Лісовська Тетяна Олегівна, канд. техн. наук, асист., кафедра харчової біотехнології і хімії, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя. Адреса: вул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна, 46001. Тел.: 0671602720; e-mail: t.lisowska82@gmail.com.

Лисовская Татьяна Олеговна, канд. техн. наук, кафедра пищевой биотехнологии и химии, Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя. Адрес: ул. Руська, 56, г. Тернополь, Украина, 46001. Тел.: 0671602720; e-mail: t.lisowska82@gmail.com.

Lisovska Tetiana, PhD in Technical Sciences, Assistant, Department of Food Biotechnology and Chemistry, Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Address: Ruska st., 56, Ternopil, 46001, Ukraine. Tel.: 0671602720; e-mail: t.lisowska82@gmail.com.

DOI: 10.5281/zenodo.3937783