

**Ю.І. Єфремов**, канд. техн. наук  
**В.О. Потапов**, д-р техн. наук, проф.  
**М.С. Одарченко**, канд. техн. наук, проф.  
**С.В. Михайлова**, асист.

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІШУВАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

*Подано особливості процесу перемішування дрібнодисперсних систем на основі рослинної сировини. Показано вплив бульбашок газу (повітря) під час утворення дисперсної системи «рідина–газ». Одержано закономірності кінетики зміни об'єму перемішуваної суміші. Наведено результати експериментальних досліджень перемішування паст, пюре, порошків та соусу на основі грибів.*

*Представлены особенности процесса перемешивания мелкодисперсных систем на основе растительного сырья. Показано влияние пузырьков газа (воздуха) при образовании дисперсной системы «жидкость–газ». Получены закономерности кинетики изменения объема перемешиваемой смеси. Представлены результаты экспериментальных исследований перемешивания паст, пюре, порошков и соуса на основе грибов.*

*The article describes the peculiarities of the process of mixing of fine-dispersed systems on the basis of vegetative raw material, which shows the influence of the bubble gas (air) in the formation of disperse system «liquid–gas». Obtained regularities of the kinetics of changes the volume of mixing of the mixture. The presented results of experimental research pastes, mashed potatoes, powders and sauce on the basis of mushrooms.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** У наш час актуальною є проблема перемішування дрібнодисперсних систем на основі рослинної сировини. Необхідно розрахувати, як впливає утворення бульбашок газу при утворенні дисперсної системи «рідина–газ». Перспективним є отримання паст, пюре, порошків та соусу на основі грибів. Також необхідно розробити теоретичну модель цього процесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз літературних джерел свідчить [1; 2], що відсутні моделі процесу перемішування дрібнодисперсних систем на основі рослинної сировини. Тому необхідно розробити модель процесу перемішування, яка відповідала б технологічним умовам процесу.

**Мета та завдання статті.** Метою статті є дослідження кінетики зміни об'єму суміші паст, пюре, соусів та порошків, що дозволяє провести розрахунок тривалості перемішування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Рослинна сировина поділяється на дикорослу та культивовану. Особливістю дикорослої сировини, яка представлена грибами, плодами, ягодами та лікарськими рослинами є значний вміст біологічно активних речовин. Тому сьогодні в Україні різко збільшився попит на цю групу продукції, яка використовується у свіжому, сушеному та замороженому вигляді. Найдоцільнішим є отримання паст, порошоків, пюре та соусів на їх основі. Технологічний процес складається з первинної обробки (інспекція, сортування, мийка, подрібнення та перемішування компонентів) і тепломакообмінної обробки (сушіння, варіння та екстракція). Найменш вивченим є процес перемішування, тому теоретична база цієї проблеми викликає науковий інтерес.

У процесі перемішування в апараті [3] відбувається насичення перемішуваної рідини повітрям. Це гідродинамічний процес утворення двофазної дисперсної системи (рідина–газ) (піни), який досить складний для математичного опису, оскільки в рівняннях рух рідини потрібно врахувати процес формування бульбашок газу. Із практичної точки зору основне призначення такої моделі – розрахунок тривалості перемішування, що визначається бажаним ступенем насичення повітрям перемішуваної рідини, тобто ступенем збільшення об'єму продукту.

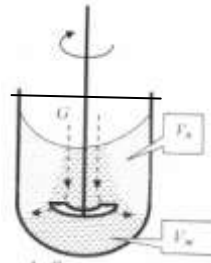
Одержимо закономірності кінетики зміни об'єму перемішуваної суміші. Фізичну модель утворення піни можна описати таким чином: під дією мішалки, що обертається, (рис.1) створюється перепад тиску в повітрі між осью обертання і стінкою мішалки, і в результаті певна кількість повітря постійно потрапляє в рідину.

Позначимо цю об'ємну витрату повітря  $G$ .

У результаті спільної дії відцентрової сили і сили поверхневого натягу в рідині формуються бульбашки газу, утворюючи піну. Об'єм піни починає зростати з периферійних областей мішалки, що викликано дією відцентрових сил, об'єм недиспергованої рідини  $V_{ж}$  при цьому зменшується пропорційно її поточному об'єму, тоді можна записати таке балансове рівняння:

$$\frac{dV_{ж}}{d\tau} = -k V_{ж} , \quad (1)$$

де  $V_{ж}$  – поточний об'єм рідини в апараті, м<sup>3</sup>;  $\tau$  – поточний час, с;  $k$  – коефіцієнт швидкості піноутворення, с<sup>-1</sup>.



**Рисунок 1 – Схема моделі процесу перемішування**

Швидкість зміни об'єму повітря, яке знаходиться в мішалці, з урахуванням введеного коефіцієнта швидкості піноутворення, може бути записана таким чином:

$$\frac{dV_g}{d\tau} = G - k V_g, \quad (2)$$

де  $V_g$  – поточний об'єм повітря в апараті, м<sup>3</sup>;  $G$  – об'ємні витрати повітря, яке потрапляє в апарат, м<sup>3</sup>/с.

Рішення диференціальних рівнянь (1), (2) з початковими умовами  $V_{ж}(0)=V_{ж0}$  та  $V_g(0)$ , мають такий вигляд:

$$V_{ж} = V_{ж0} e^{-k\tau}, \quad (3)$$

$$V_g = \frac{G}{k} (1 - e^{-k\tau}), \quad (4)$$

де  $V_{ж0}$  – об'єм рідини до початку перемішування, м<sup>3</sup>.

Об'єм піни в апараті в довільний момент часу розраховується таким чином:

$$V_n = V_g + V_{ж}, \quad (5)$$

де  $V_n$  – поточний об'єм піни в апараті, м<sup>3</sup>.

Швидкість піноутворення отримуємо диференціюванням виразу по часу:

$$\frac{dV_n}{d\tau} = \frac{dV_g}{d\tau} + \frac{dV_{ж}}{d\tau}. \quad (6)$$

Підставляючи у формулу (6) вираз (3) та (4) для кінетики зміни вмісту в піні рідини і повітря, після диференціювання отримуємо:

$$\frac{dV_n}{d\tau} = -k V_{ж0} e^{-k\tau} + G e^{-k\tau} \quad (7)$$

Рішення диференціального рівняння (7) і з початковими умовами  $V_n(0)=0$  має вигляд:

$$V_n = \frac{G - k V_{ж0}}{k} (1 - e^{-k\tau}) \quad (8)$$

Останній вираз, описує кінетику зміни об'єму піни в процесі перемішування. Перепишемо його для коефіцієнта кратності піни, який визначає відносне збільшення об'єму перемішувачої рідини:

$$\beta = \left( \frac{G}{V_{ж0} k} - 1 \right) (1 - e^{-k\tau}) \quad (9)$$

де  $\beta = V_n / V_{ж}$  – коефіцієнт кратності піни.

З аналізу виразу (9) випливає, що максимальна кратність піни, яка досягається при  $\tau \rightarrow \infty$ , дорівнює

$$\beta_{\max} = \frac{G}{V_{ж0} k} - 1, \quad (10)$$

де  $\beta_{\max}$  – максимальна кратність піни.

Аналізуючи останній вираз, можна зробити висновок, що ступінь насичення повітрям перемішувачої рідини прямо пропорційний витраті повітря, що потрапляє в мішалку, яка, перш за все, залежить від конструкції мішалки і обернено пропорційна коефіцієнту швидкості піноутворення, який, очевидно, залежить, як від фізичних властивостей перемішувачої рідини, так і від конструкції мішалки.

З'ясуємо фізичний сенс коефіцієнта швидкості перемішування. Для цього скористаємося методом аналізу розмірностей. Очевидно, що швидкість піноутворення повинна залежати від таких величин:

$$k = A \sigma^a \rho^b n^c d^d, \quad (11)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;  $\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $n$  – частота обертання мішалки, с<sup>-1</sup>;  $d$  – діаметр мішалки, м;  $A$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – емпіричні коефіцієнти.

Визначимо відношення між емпіричними коефіцієнтами, використовуючи метод аналізу розмірностей. Складемо таблицю аналізу розмірностей.

Таблиця 1 – Емпіричні коефіцієнти

Розмірність величин	k	$\sigma$	$\rho$	n	d
Маса, кг	0	a	b	0	0
Час, с	-1	-2a	0	-c	0
Довжина, м	0	0	-3b	0	d

На підставі таблиці 1 отримуємо систему рівнянь:

$$a+b=0, \quad (12)$$

$$-2a-c=-1, \quad (13)$$

$$-3b+d=0. \quad (14)$$

Вирішуючи систему рівнянь (12) та (14), виключаємо b, c, d:

$$k = A \left( \frac{\sigma}{\rho n^2 d^3} \right)^a n. \quad (15)$$

Останнє рівняння можна записати у вигляді критеріального

$$\frac{k}{n} = A We_{\eta}^{-a}, \quad (16)$$

де  $We_{\eta} = \frac{\rho n^2 d^2}{\sigma}$  – відцентровий критерій Вебера.

Отримана модель може використовуватись для аналізу експериментальних даних, із метою знаходження кінетичних коефіцієнтів процесу перемішування. З урахуванням (10) запишемо рівняння (9) в такому вигляді:

$$1 - \beta^* = e^{-k\tau}, \quad (17)$$

де  $\beta^* = \beta / \beta_{\max}$  – безрозмірний коефіцієнт кратності піни.

Логарифмуючи обидві частини (17), отримуємо лінійне рівняння для регресійного аналізу:

$$\ln \beta^* = -k\tau. \quad (18)$$

Рівняння (18) дає можливість за експериментальними даними визначити значення коефіцієнта швидкості піноутворення  $k$ .

$$k = -\frac{\ln(1 - \beta^*)}{\tau_{\max}}, \quad (19)$$

де  $\tau_{\max}$  – час отримання максимального об'єму продукту, с;  $\beta^* = \rho_k / \rho_0$  – відношення кінцевої густини продукту до його початкової густини.

У таблиці 2 наведено результати експериментальних досліджень з кінетики перемішування дрібнодисперсних систем.

**Таблиця 2 – Експериментальні дослідження кінетики перемішування дрібнодисперсних систем**

Продукт	Початкова густина продукту, кг/м <sup>3</sup>	Кінцева густина продукту, кг/м <sup>3</sup>	Кратність збільшення об'єму, $\beta^*$	Тривалість перемішування, с	$k \cdot 10^3$ , с <sup>-1</sup>
Паста на основі грибів	1150	950	0,83	300	5,83
Пюреподібний продукт на основі грибів	1250	920	0,74	250	5,33
Соус на основі грибів	1010	880	0,87	160	12,81

З таблиці 2 випливає, що коефіцієнт швидкості піноутворення збільшується зі зменшенням початкової густини продукту, що ми можемо побачити з рівняння (15). Це підтверджує адекватність отриманої моделі піноутворення.

**Висновки.** Визначено вплив бульбашок газу (повітря) під час утворення двофазної дисперсної системи «рідина–газ» (піна). Одержано закономірності кінетики зміни об'єму перемішуваної суміші. Результати теоретичних та експериментальних даних дозволяють визначити тривалість перемішування.

#### *Список літератури*

1. Рогов, И. А. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов. [Текст] / И. А. Рогов, С. В. Некрутман. – М. : Агропромиздат, 1986. – 351 с.
2. Рогов, И. А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов [Текст] / И. А. Рогов. – М. : Агропромиздат, 1988. – 272 с.

3. Пат. 57028 Україна, МПК А 23 L 1/025. Установка для концентрування (сушіння) харчових систем з використанням НВЧ-нагріву і вакуумування [Текст] / Черевко О. І., Єфремов Ю. І., Михайлов В. М., Потапов В. О., Михайлова С. В., Качалов В. В. ; заявник та патентовласник Харк. держ. ун-т харч. та торг. – № 201008088 ; заявл. 10.02.2010 ; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 3.

Отримано 30.10.2011. ХДУХТ, Харків.

© Ю.І. Єфремов, В.О. Потапов, М.С. Одарченко, С.В. Михайлова, 2011.

УДК 641.526.7

**В.М. Михайлов**, д-р техн. наук

**О.Г. Дьяков**, канд. техн. наук

**І.В. Бабкіна**, канд. техн. наук

**А.О. Шевченко**, асист.

**А.В. Долгих**, магістр

## **СТВОРЕННЯ ПЕРЕДУМОВ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ КУЛІНАРНИХ ВИРОБІВ**

*Наведено моделі зміни теплового стану харчового напівфабрикату під час традиційного смаження, двобічного нагрівання та комбінованого способу. Визначено передумови щодо необхідності регулювання режимних параметрів нагрівання окремих шарів напівфабрикату в умовах комбінованої теплової обробки.*

*Представлены модели изменения теплового состояния пищевого полуфабриката при традиционной жарке, двухстороннем нагреве и комбинированном способе. Определены предпосылки относительно необходимости регулирования режимных параметров нагрева отдельных слоев полуфабриката в условиях комбинированной тепловой обработки.*

*Presented the models of change of the thermal state of food intermediate product are at the traditional frying, bilateral heating and by the combined method. Certain the pre-conditions in relation to the necessity of adjusting of regime parameters of heating of separate layers of intermediate product in the conditions of the combined thermal treatment.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Технологічні процеси виробництва кулінарних виробів та їх апаратурне оформлення характеризуються значними енерговитратами, а також мають низку недоліків, пов'язаних зі значною тривалістю процесів, трудомісткістю та, в деяких випадках, незадовільною якістю продукції.