

УДК 664.653.05:001.891.5

## SUBSTANTIATION THE EFFECTIVE CONSTRUCTION OF WORKING MEMBERS OF DOUGH KNEEDING MACHINES

**M. Shpak, O. Danyleichuk***Techinservice Manufacturing Group***O. Litovchenko, O. Chepeliuk***National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

kneading,  
dough,  
working member,  
uniformity,  
viscosity,  
speed,  
blade,  
pin

---

**Article history:**

Received 15.09.2019

Received in revised form  
07.10.2019

Accepted 26.11.2019

---

**Corresponding author:**

lenasandul@yahoo.com

---

**ABSTRACT**

The influence of four working types of dough mixing machines — blade, spiral, frame and stud — on the stages of the initial mixing of the components and the plasticization of the dough is shown in the article. The studies were performed using simulations in FlowVision licensed software. The simulation takes into account the properties of the test as a pseudo-plastic fluid, the viscosity and flow index  $n$  depend on the strain rate. In order to make an informed decision about the choice of a particular type of working member, it is necessary to analyze the distribution of the concentration of the mixing components at the first stage of the process and the speed of movement of the dough at the stage of plasticization.

The mixing conditions at the plasticization stage should facilitate the formation of circulating vortices. The most favorable zones of their formation are those where the product velocity is the highest and the viscosity is the lowest. The lowest dough viscosity values (20—30 Pags) are observed directly near the mixing elements in the area where they are moved. In other parts of the volume, the viscosity of the dough is much higher, reaching 200 Pá and above. Based on the analysis of the zones in which the formation of circulating vortices is observed, it is recommended to provide the following distances between the edges of the working elements and the surfaces of the equipment: for a device for mixing the frame 85...90 mm, spiral and pin 40...50 mm, blades 50...60 mm. The cross-sectional shape of the working element in which the largest area of the product's turbulence is the circle.

It is most advisable to use pins of work elements for kneading flour dough. They provide the necessary degree of mixing of the components within 40 s from the beginning of the process. Due to the small resistance, when the dough passes around the working members of this form, it becomes possible to increase the processing by increasing the speed. This, in turn, improves the performance of the kneading equipment.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-

## ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ КОНСТРУКЦІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ТІСТОМІСИЛЬНИХ МАШИН

М. С. Шпак, О. В. Данилейчук

ТОВ «ВГ «Техінсервіс»

О. І. Литовченко, О. О. Чепелюк

Національний університет харчових технологій

*У статті здійснено аналіз конструкцій робочих органів обладнання для замішування тістових напівфабрикатів. Продемонстровано вплив форми перемішувального пристрою на рівномірність розподілу компонентів на стадії їх змішування, а також на в'язкість тіста та його швидкість на стадії пластифікації. Обґрунтовано вибір форми поперечного перерізу робочого органа, при якій область турбулізації продукту найбільша. Доведено, що для замішування тіста середньої вологості з пшеничного борошна доцільно використовувати штифтові робочі органи, які забезпечують необхідний ступінь змішування компонентів вже за 40 с від початку процесу. Завдяки невеликому опору при обтіканні тістом робочих органів такої форми стає можливим інтенсифікувати процес шляхом збільшення частоти обертання.*

**Ключові слова:** замішування, тісто, робочий орган, рівномірність, в'язкість, швидкість, лопать, штифт.

**Постановка проблеми.** Процес замішування тістових напівфабрикатів відіграє важливу роль у виробництві хлібобулочної продукції, визначаючи якість готових виробів і впливаючи на економічні показники роботи підприємства, оскільки енергетичні витрати при перемішуванні високов'язких рідин, до яких належить тісто, досить великі [1].

Ефективність перемішування компонентів насамперед залежить від режиму руху середовища, тому більшість наукових досліджень спрямовано на визначення умов, які обумовлюють або підсилюють турбулізацію течії. Досягти цього можна як зміною конструкції обладнання, так і коригуванням режимів процесу замішування, однак ці способи потребують ґрунтовних досліджень. Виробники прагнуть підвищувати якість продукції та знижувати її собівартість, тому підвищення ефективності замішування пшеничного тіста як з технологічної, так і з економічної точок зору є актуальним завданням.

Важливою класифікаційною ознакою тістомісильних машин є форма робочих органів. Серед їх великого різноманіття чітко виділяються чотири основні типи, які використовуються для замішування тіста середньої вологості (40—44%): рамні (А2-ХТЗБ), спіральні (Л4-ХТВ, Diosna, VMI Berto, Pietroberto, Восход), штифтові (ІМК–150) та лопатеві (типовими представниками є машини І8-ХТА, Х12, Стандарт). Інші конструкції перемішувальних пристроїв можуть або бути зведені до перерахованих вище, або є їх комбінацією. Кожен з цих робочих органів має свої переваги і недоліки та застосовується в хлібопекарській галузі. Обґрунтувати вибір певного виду робочого органа і частоту його обертання досить складно.

У сучасних екологічних умовах слід звертати увагу не тільки на якість продукції, а й на ефективне використання енергії, необхідної для її виготовлення. Щоб забезпечувати та підтримувати стаціонарну течію тіста, зовнішні сили повинні виконувати роботу з подолання його внутрішніх сил. Ця робота поділяється на дві частини: механічну, що передбачає передачу руху від шару до шару тіста і роботу внутрішнього тертя, що переходить у тепло. Механічна робота пов'язана з подоланням сили інерції при зміні швидкості. Обумовлений нею опір називається інерційним. Очевидно, що його величина залежить від швидкості течії й маси тістового

напівфабрикату. Робота внутрішнього тертя визначається в'язкістю, а викликаний ним опір називається в'язкісним [3].

Умови обтікання в'язкою рідиною твердої поверхні суттєво залежать від її конфігурації. У випадку замішування тіста, крім виду робочого органа, — від форми поперечного перерізу перемішувального пристрою, серед яких на сьогодні найбільш вживаними є круг або еліпс [2]. Використання відомої формули (1) для визначення гідродинамічного опору лопатей з боку рідини, яка їх обтікає, при дослідженні руху лопатей складної форми у ньютонівській рідині потребує експериментального визначення коефіцієнта лобового опору:

$$F_l = C_x \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot S, \quad (1)$$

де  $C_x$  — коефіцієнт лобового опору, який залежить від форми тіла, його орієнтації в потоці й в'язкості рідини;  $\rho$  — густина,  $\text{кг/м}^3$ ;  $v$  — швидкість,  $\text{м/с}$ ;  $S$  — так званий міделевий переріз ( $\text{м}^2$ ), який являє собою найбільшу площу перерізу тіла площиною, перпендикулярною потоку.

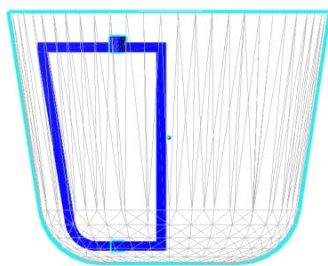
Нерівномірність розподілу тиску по поверхні тіла, несталий характер руху в області відривної течії суттєво обмежують коло завдань, які можуть бути вирішені аналітично. Вирішити цю проблему можна шляхом використання методів обчислювальної гідродинаміки, що надає можливість керувати процесом замішування, впливаючи на структуру і поведінку потоку речовини [4—6].

У хлібопекарській галузі України загальновідома тристадійна модель замішування тіста. Перша стадія — механічне змішування компонентів, друга — власне заміс, третя — пластифікація. В інших країнах традиційно виділяють більше стадій, зокрема, в США їх кількість дорівнює чотирьом [7].

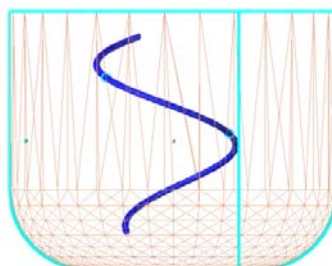
**Метою дослідження** є обґрунтування ефективної конструкції робочих органів тістомісильних машин на основі аналізу стадій первинного змішування компонентів і пластифікації.

**Матеріали і методи.** Дослідження виконані методом імітаційного моделювання. Для моделювання процесу замішування використано ліцензійний програмний комплекс FlowVision.

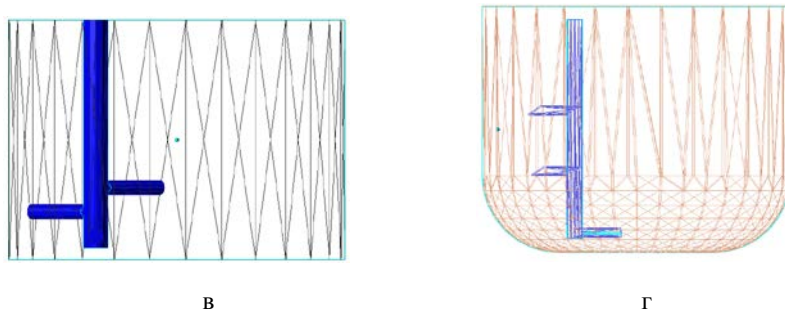
Процес замішування тіста промодельований окремо для стадії початкового змішування компонентів і для стадії пластифікації, що пояснюється суттєвими відмінностями властивостей тістових напівфабрикатів на цих етапах і мети, яку потрібно досягти. На першому — це суміш сипких і рідких компонентів, для якої слід забезпечити їх рівномірний розподіл, на другому — тісто, яке повинно зазнати певного механічного впливу і сформувати свою структуру. Для обох вказаних стадій процес замішування змодельований для чотирьох основних видів робочих органів (рис. 1) для вибору найбільш раціональної конструкції.



а



б



**Рис. 1. 3D моделі промислових тістомісильних машин з робочими органами:**  
а — рамним; б — спіральним; в — штифтовим; г — лопатеvim

На етапі первинного змішування розглядаємо зміну рівномірності розподілу двох компонентів — борошна та рідини. Параметрами, які проаналізовано на стадії пластифікації, є в'язкість тістової маси та швидкість її руху. Для моделювання процесу замішування хлібного тіста обрана модель «Вільна поверхня». Модель включає рівняння Нав'є-Стокса, нерозривності потоку, рівняння для турбулентної енергії  $k$  та швидкості дисипації турбулентної енергії  $\varepsilon$ . Перенесення змішуваних компонентів вирішується рівнянням конвективно-дифузійного перенесення.

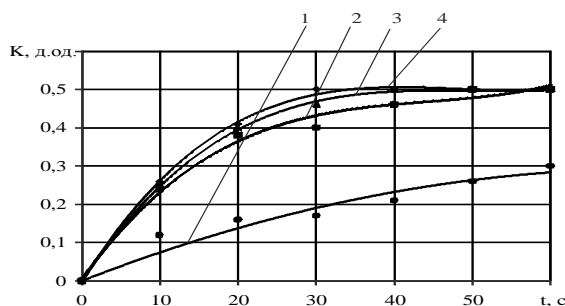
При моделюванні враховано властивості тіста як псевдопластичної рідини, в'язкість  $\eta$  та індекс течії  $n$  якої залежать від швидкості деформації [8]. У програмі FlowVision ці залежності представлені у вигляді:

$$\begin{aligned}\eta &= 206 / \text{GRAD\_MOD}(\text{МодШвидкості})^n \\ n &= 0,54 / \text{GRAD\_MOD}(\text{МодШвидкості})^{0,14},\end{aligned}\quad (2)$$

що надає можливість отримати адекватні математичні моделі.

При постановці задачі вказані об'єми, які займають компоненти до початку змішування, а також враховано демпфер градієнта тиску  $\varphi=1$ , який суттєво впливає на відрив приграничного шару від місильних лопатей та утворення циркуляційних вихорів.

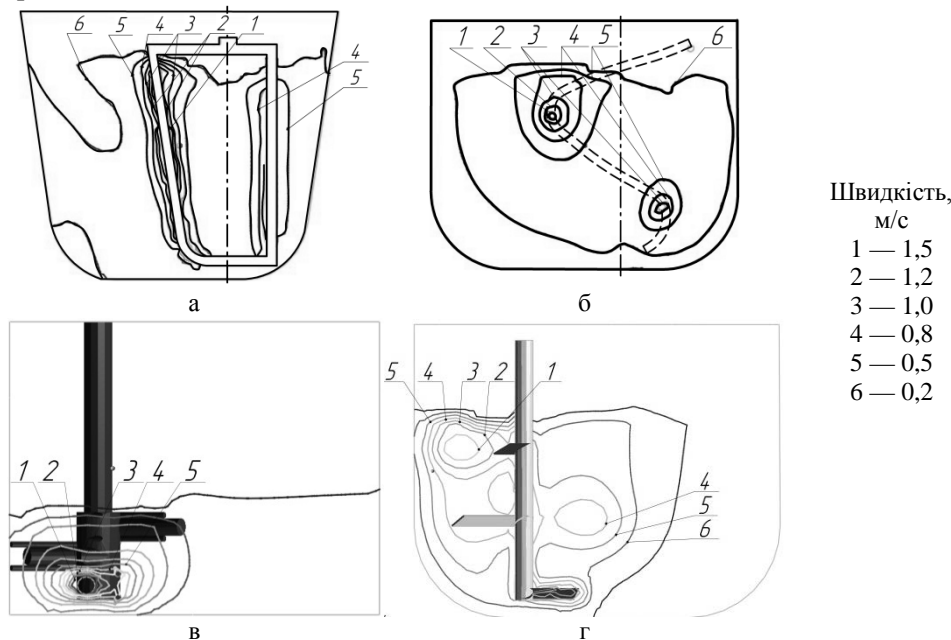
**Результати досліджень.** Ефективність перемішування визначає якість процесу, і, в нашому випадку, може характеризувати рівномірність розподілу компонентів  $K$  при їх змішуванні на початковому етапі протягом 60 с (рис. 2). Початкова концентрація борошна і рідкої фази позначена як 0 і 1. Концентрація замішаного тістового напівфабрикату повинна наближатись до 0,5.



**Рис. 2. Зміна рівномірності розподілу компонентів тіста в часі для робочих органів різної форми:** 1 — рамний; 2 — спіральний; 3 — штифтовий; 4 — лопатеvim

Встановлено, що спіральний, лопатевий і штифтовий робочі органи забезпечують достатньо рівномірний розподіл компонентів протягом заданого часу. Тривалість етапу первинного змішування для спірального місильного органа становить 55 с, для штифтового — 40 с, лопатевого — 34 с. Використання рамного робочого органа не забезпечує отримання суміші з рівномірним розподілом компонентів протягом 60 с.

Розподіл швидкостей суттєво впливає на якість перемішування, забезпечуючи оновлення поверхонь контакту рідкої і твердої фаз. Для машин із рамним робочим органом він нерівномірний (рис. 3а), внаслідок чого відбувається нерівномірне і недостатнє змішування компонентів. Максимальна швидкість спостерігається поблизу робочого органа в радіальному напрямку. Достатній рух компонентів в осьовому напрямку не забезпечується, тому використання машин із рамним робочим органом недоцільне.



**Рис. 3. Розподіл швидкості при замішуванні місильними органами:**  
а — рамним; б — спіральним; в — штифтовим; г — лопатевим

Швидкість переміщення компонентів при використанні спірального місильного органа більш рівномірна по всьому об'єму і досягає своїх максимальних значень поблизу робочого органа в радіальному напрямку (рис. 3б). Такий робочий орган забезпечує достатній рух компонентів в осьовому напрямку, тому його використання доцільне. Однак, враховуючи складність виготовлення спіральних органів різного поперечного перерізу, є потреба розглянути можливість використання для замішування тіста штифтових робочих органів. Крім простоти виготовлення, їх перевагою є малий опір. Максимальна швидкість при використанні штифтових робочих органів спостерігається поблизу і навколо них (рис. 3в). Для лопатевого робочого органа області з найбільш інтенсивним перемішуванням також розміщені поблизу місильних елементів, однак, порівняно зі штифтовими, їх розмір менший (рис. 3г).

На якість замішування на стадії пластифікації суттєвий вплив має виникнення циркуляційних вихорів в області проходження робочого органа. Їх утворення

залежить від в'язкості суміші, геометрії місильних органів і швидкості руху продукту в місткості. Для в'язких рідин критичним значенням критерію Рейнольдса  $Re_{кр}$ , при якому утворюються вихорі, є 20 [9]. Утворення вихорів є позитивним з точки зору гідродинаміки перемішування, однак призводить до підвищеної силової дії на місильні органи.

У результаті аналізу картини руху місильних органів у масі, яка замішується, отримано розподіл значень в'язкості тіста в місильній місткості. Відомо, що тісто належить до псевдопластичних неньютонівських рідин, в'язкість яких зменшується зі збільшенням градієнта швидкості деформації. Це підтверджується графічними і чисельними даними зміни в'язкості продукту в різних точках місткості (рис. 4). Області найменших показників в'язкості в цьому випадку і є, відповідно, областями найбільш ефективного перемішування.

Найменші значення в'язкості (20—30 Па·с) спостерігаються безпосередньо поблизу місильних органів. В інших частинах об'єму в'язкість тіста значно більша (досягає 200 Па·с та вище), що надає можливість визначити активну зону перемішування, тобто зону, в якій виникають сприятливі умови для виникнення циркуляційних вихорів [4]. Розмір цієї зони дуже важливий, оскільки розташування місильних лопатей відносно днища або стінок місткості на відстанях, що її перевищують, призведе до утворення застійних зон і погіршення якості тістових напівфабрикатів. На основі аналізу зон, в яких спостерігається утворення циркуляційних вихорів, рекомендовано забезпечити такі відстані між кромками робочих органів і поверхнями обладнання: для рамних перемішувальних пристроїв 85...90 мм, спіральних і штифтових 40...50 мм, лопатевих 50...60 мм.

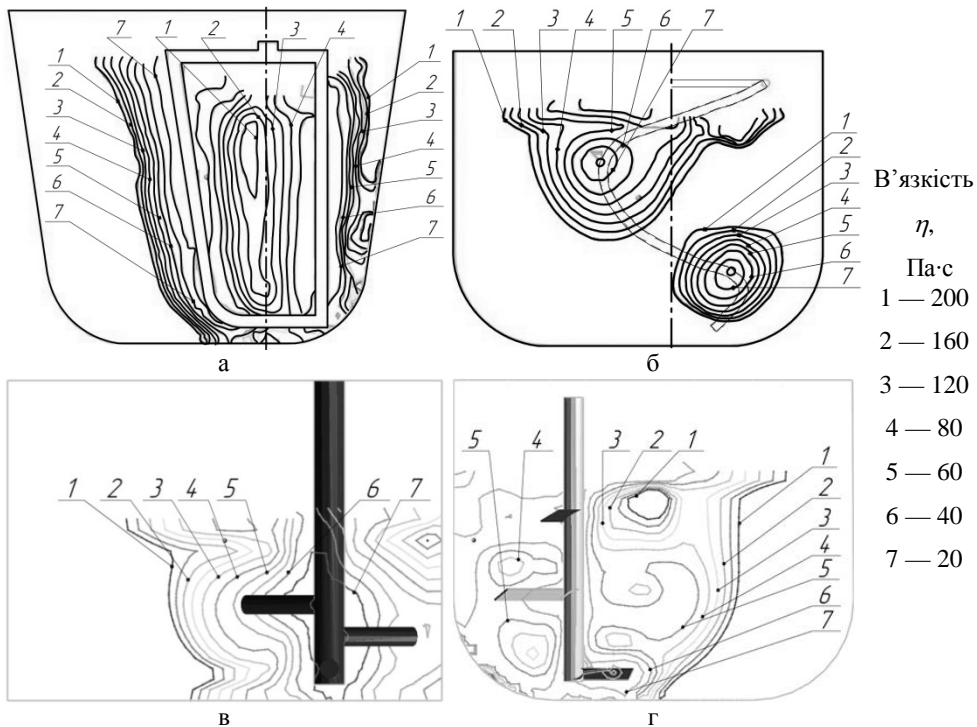


Рис. 4. Області розподілу в'язкості тіста при русі робочих органів: а — рамного; б — спірального; в — штифтового; г — лопатевого



Енергія, яка витрачається на утворення вихорів і внутрішнє тертя, пропорційна опору руху лопатей у в'язкій рідині. Основний вплив на силу лобового опору створює форма тіла, навколо якого відбувається вихороутворення. У випадку лопатей циліндричної форми сила опору циліндра потоку, який набігає, визначається залежністю:

$$F_l = \frac{4\pi \cdot \eta \cdot v}{\ln(3,7 / Re)}, \quad (3)$$

де  $\eta$  — в'язкість тістової маси.

Її значення для штифтових робочих органів є найменшим серед розглянутих форм, що обумовлено мінімальним коефіцієнтом лобового опору.

Проаналізувавши вплив геометрії робочих органів на величину роботи, що виконується для приведення часточок тіста в рух, і роботу, при здійсненні якої відбувається підвищення температури маси під час оброблення (для сучасних швидкісних машин вона становить понад половину витрат енергії [1]), слід зазначити, що прослідковується така тенденція: якщо зменшувати довжину робочого органа, то істотно зменшується нагрівання тіста; якщо підвищувати частоту його обертання, то корисна складова зростає набагато більше, ніж загальні витрати енергії. Виходячи з цього, а також урахувавши шляхи вдосконалення тістомісильної техніки, можна передбачити, що майбутнє за конструкціями тістомісильних машин, які мають малі розміри робочих органів стосовно місткості, але працюють на високих частотах обертання робочих органів. Найочевиднішими прикладами є робочі органи тістомісильних машин лопатевого та штифтового типу. Їх поперечний переріз являє собою прямокутник і коло відповідно.

У результаті моделювання процесу обтікання тістом робочих органів з такими профілями поперечного перерізу при набігаючому потоці зі швидкістю 1 м/с визначено геометричні параметри робочої зони, в якій відбувається інтенсивне змішування. Як робочу слід обирати зону, в якій швидкість продукту є найбільшою (рис. 5), що зумовлює значне зменшення в'язкості тіста, а це, у свою чергу, призводить до зниження енергетичних витрат у процесі змішування.

Найбільший розмір зон, де спостерігається активне перемішування, характерний для штифтових робочих органів із круглим поперечним перерізом.

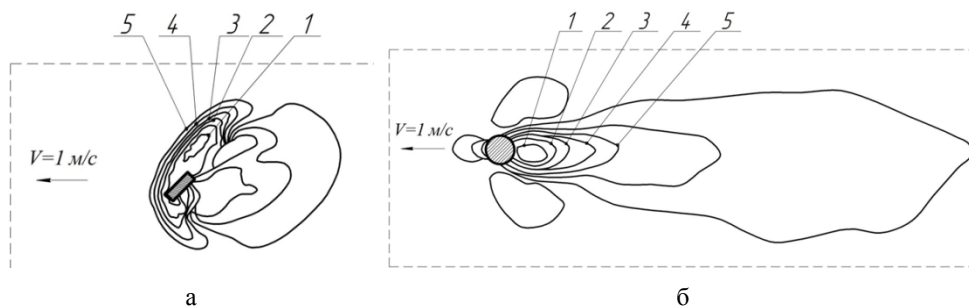


Рис. 5. Ізолнії швидкості при місильних органах різної форми поперечного перерізу (швидкість, м/с: 1 — 0,9; 2 — 0,7; 3 — 0,5; 4 — 0,3; 5 — 0,1): а — прямокутної; б — циліндричної

Незважаючи на отримання достатньо рівномірної суміші протягом найменшого часу від початку процесу (див. рис. 2), лопатеві змішувачі рідко використовуються у промисловості в конструкціях тістомісильних машин періодичної дії внаслідок створення ними несприятливих умов для обтікання тіста. Занадто велика частота обертання, необхідна для досягнення потрібної рівномірності розподілу компонентів, призводить до надлишкових витрат енергії.

**Висновки.** Найбільш доцільно для замішування тістових напівфабрикатів із пшеничного борошна використовувати штифтові робочі органи, які забезпечують необхідний ступінь змішування компонентів вже за 40 с від початку процесу. Завдяки невеликому опору при обтіканні тістом робочих органів такої форми стає можливим інтенсифікувати оброблення шляхом збільшення частоти обертання. Це, у свою чергу, збільшує продуктивність тістомісильної машини. При цьому слід простежити, щоб не відбувалось перегрівання тіста, і за потреби вносити відповідні зміни в конструкцію обладнання.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Баранов В. І. Технологічне забезпечення енергоефективності у хлібопекарській галузі / В. І. Баранов // Проект «Підвищення енергоефективності та стимулювання використання відновлюваної енергії в агро-харчових та інших малих та середніх підприємствах (МСП) України». — К.: ЮНІДО, 2015. — 48 с.
2. Литовченко І. М. Визначення раціональних параметрів первинного змішування компонентів в тістомісильних машинах / І. М. Литовченко, М. С. Шпак // Харчова промисловість. — 2008. — № 7. — С. 49—51.
3. Фукс Г. И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов / Г. И. Фукс. — Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. — 328 с.
4. Biletskii E. Theoretical aspects of non-newtonian fluids flow simulation in food technologies / Eduard Biletskii, Olena Petrenko, Dmytro Semeniuk // Ukrainian food journal. — 2014. — Volume 3, Issue 2. — P. 271.
5. Ötles S. Computer-aided engineering softwares in the food industry / Semih Ötles, Ata Onal // Journal of Food Engineering. — 2004. — Volume 65, Issue 2. — P. 311—315.
6. Experimental and numerical simulation of dough kneading in filled geometries / D. M. Binding, M. A. Couch, K. S. Sujatha, M. F. Webster // Journal of Food Engineering. — 2003. Volume 58, Issue 2. — P. 111—123.
7. Stauffer C. E. Principles of dough formation / C. E. Stauffer // Technology of Breadmaking. — 2007. — New York: Springer. — Pages 299—332.
8. Литовченко І. М. Визначення параметру нелінійності реологічних рівнянь при описанні процесу перемішування хлібного тіста / І. М. Литовченко, М. С. Шпак // Наукові праці НУХТ. — 2010. — С. 85 — 87.
9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. — М.: Наука, 1974.

## ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ТЕСТОМЕСИЛЬНЫХ МАШИН

**М. С. Шпак, О. В. Данилейчук**

ООО «ПГ «Техинсервис»

**А. И. Литовченко, Е. А. Чепелюк**

Национальный университет пищевых технологий

*В работе проведен анализ конструкций рабочих органов оборудования для замеса тестовых полуфабрикатов. Продемонстрировано влияние формы перемешивающего устройства на равномерность распределения компонентов на стадии их*



смешивания, а также на вязкость теста и его скорость на стадии пластификации. Обоснован выбор формы поперечного сечения рабочего органа, при которой область турбулизации продукта наибольшая. Доказано, что для замешивания теста средней влажности из пшеничной муки целесообразно использовать штифтовые рабочие органы, которые обеспечивают необходимую степень смешивания компонентов уже через 40 с после начала процесса. Благодаря небольшому сопротивлению при обтекании тестом рабочих органов такой формы становится возможным интенсифицировать процесс путем увеличения частоты вращения.

**Ключевые слова:** замес, тесто, рабочий орган, равномерность, вязкость, скорость, лопасть, штифт.