

УДК 664.653.05:001.891.5

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
ШТИФТОВИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ МАШИНИ ДЛЯ ЗАМІШУВАННЯ ТІСТА****Шпак М. С.**, к.т.н. інженер-конструктор

ТОВ «ВГ «Техінсервіс», м. Київ, Україна

Гавва О. М., д.т.н., професор

завідувач кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв

Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна

ORCID ID: 0000-0003-2938-0230

Чепелюк О. О., к.т.н., доцент

доцент кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв

Національний університет харчових технологій, Київ, Україна

ORCID ID: 0000-0002-5417-9398

Литовченко І. М., к.т.н., доцент

доцент кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв

Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна

ORCID ID: 0000-0003-4581-2910

Чепелюк О. М., к.т.н., доцент

доцент кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв

Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна

ORCID ID: 0000-0001-6295-6305

<https://doi.org/10.31073/foodresources2019-13-19>

Для замішування тістових напівфабрикатів із пшеничного борошна доцільно використовувати штифтові робочі органи, які забезпечують необхідний результат як на стадії змішування компонентів, так і на етапі пластифікації. Але їх конфігурація і режими роботи потребують обґрунтування. Запропонована нова конструкція штифтового місильного органа, що являє собою вал із привареними до нього трьома циліндричними стержнями, розташованими по вершинах трикутника, при цьому один зі стержнів має діаметр в кілька разів більший, ніж діаметри інших двох. Для знаходження взаємозв'язку між незалежними змінними та цільовою функцією був спланований і реалізований повний факторний експеримент з урахуванням нелінійності та міжфакторних взаємодій. Дослідження виконано методом імітаційного моделювання в ліцензійному програмному комплексі FlowVision. Враховано властивості тіста як псевдопластичної рідини, в'язкість та індекс течії якої залежать від швидкості. Задача оптимізації вирішена аналітично. При замішуванні тіста на стадії пластифікації необхідно забезпечити створення циркуляційних вихорів. Найбільш сприятливими зонами їх формування є такі, де швидкість продукту найбільша, а в'язкість, відповідно, мінімальна. Для отримання найменших значень в'язкості в процесі замішування тіста робочими органами штифтового типу відстань між штифтами повинна становити 0,02 м і 0,019 м, а їх діаметри – 0,014 м і 0,005 м. Також на стадії пластифікації тіста доцільно забезпечити обертання місильного органа в такому напрямку, щоб потік тіста набігав спочатку на стержні меншого діаметру, які мають малий опір руху. При цьому в значній області продукту виникає зона пониженої в'язкості, в якій рухається стержень великого діаметра. Він зазнає меншого опору руху, завдяки чому створює більшу кількість вихорів при порівняно менших витратах енергії.

Ключові слова: замішування, тісто, в'язкість, робочий орган, штифт, геометричні параметри, частота обертання

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE PIN WORKING MEMBERS OF THE DOUGH KNEADING MACHINE

Shpak Maksym, PhD, design engineer
LLC "PG "Tekhinservis"

Gavva Oleksandr, D-r of Science, Technical, Professor
Head of the Department of machines and apparatus of food and pharmaceutical productions
National University of Food Technology, Kiev, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-2938-0230

Chepeliuk Olena, PhD, associate professor
docent of the Department of machines and apparatus of food and pharmaceutical productions
National University of Food Technology, Kiev, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-5417-9398

Litovchenko Igor, PhD, associate professor,
docent of the Department of machines and apparatus of food and pharmaceutical productions
National University of Food Technology, Kiev, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-4581-2910

Chepeliuk Oleksandr, PhD, associate professor
docent of the Department of machines and apparatus of food and pharmaceutical productions
National University of Food Technology, Kiev, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-6295-6305

<https://doi.org/10.31073/foodresources2019-13-19>

For kneading dough semi-finished products made from wheat flour, it is advisable to use pin working members that provide the desired result both at the mixing stage of the components and at the stage of plasticization. But their configuration and operating modes need justification. A new design of a pin kneading member is proposed, which is a shaft with three cylindrical pins welded to it, located on the vertices of a triangle, with one of the pins having a diameter several times larger than the diameters of the other two. To find the relationship between the independent variables (design parameters and the rotation speed of the kneading member) and the objective function – the bread dough viscosity – a full factorial experiment, taking into account nonlinearity and inter-factor interactions, was planned and implemented. The study was performed by simulation method in the FlowVision licensed software complex. The simulation takes into account the properties of the dough as a pseudoplastic fluid whose viscosity and flow index are velocity dependent. The optimization problem – finding the minimum dough viscosity – has been solved analytically. When kneading the dough at the plasticization stage, it is necessary to ensure the creation of circulating vortices. The most favorable areas of their formation are those where the product velocity is the highest and the viscosity, respectively, the lowest. To obtain the lowest values of viscosity in the process of dough kneading by working members of the pin type, the distance between the pins should be 0.02 m and 0.019 m, and their diameters – 0.014 m and 0.005 m. Also, at the stage of dough plasticization, it is advisable to ensure the kneading member rotation in such a way that the flow of dough first came on the pins of smaller diameter, which have low resistance to movement. At the same time, a low viscosity zone occurs in a large area of the product, in which a large diameter pin moves. It undergoes less resistance to movement, thus creating more vortices at relatively lower energy consumption.

Keywords: kneading, dough, viscosity, working member, pin, geometric parameters, rotation speed.

В хлібопекарській галузі на сьогодні переважно використовуються тістомісильні машини зі спіральним місильним органом. Насамперед, це обумовлено високою якістю

отримуваної продукції [1]. Однак складність виготовлення робочих органів такого типу і потреба підвищити ефективність замішування обумовлюють необхідність шукати альтернативу. Для замішування тістових напівфабрикатів із пшеничного борошна доцільно використовувати штифтові робочі органи, які на першій стадії замішування забезпечують необхідну рівномірність розподілу компонентів протягом науково обґрунтованого часу і створюють найбільш сприятливі умови для циркуляції продукту в місильній місткості на третій стадії – пластифікації [2]. Завдяки невеликому опору при обтіканні тістом робочих органів такої форми стає можливим інтенсифікувати оброблення шляхом збільшення частоти обертання. Це, в свою чергу, збільшує продуктивність тістомісильного обладнання. Однак конфігурація робочих органів і режими їх роботи потребують обґрунтування.

Завдяки наявності сучасного проблемно-орієнтованого програмного забезпечення мінімізуються проблеми, пов'язані з організацією фізичних експериментів, стало можливим візуалізувати процес, отримувати локальні та інтегральні значення параметрів, які визначають його перебіг [3]. Однак для отримання адекватних результатів необхідно виконати правильну постановку задачі, насамперед врахувати реологічні характеристики досліджуваного матеріалу [4].

Матеріали й методи. Після проведення попередніх досліджень із вивчення впливу геометричних параметрів робочих органів різних видів на реологічні та гідродинамічні параметри в процесі замішування хлібного тіста, запропонована нова конструкція штифтового (стержневого) місильного органа (рис. 1), що являє собою вал із привареними до нього трьома циліндричними стержнями, розташованими по вершинах трикутника, при цьому один зі стержнів має діаметр у кілька разів більший, ніж діаметри двох інших [5].

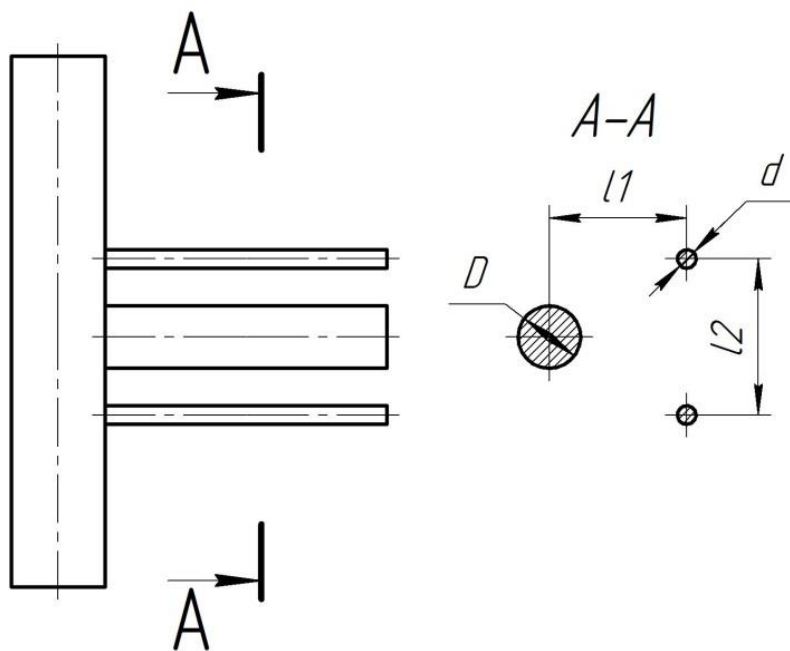


Рис. 1. Схема штифтового місильного органа розробленої конструкції

Відомо, що питома робота замішування залежить від в'язкості тіста, на яку, в свою чергу, суттєво впливають конструкційні параметри робочого органа і частота його обертання.

Для знаходження взаємозв'язку між незалежними змінними (конструкційними параметрами і частотою обертання місильного валу) та цільовою функцією – в'язкістю хлібного тіста – був спланований і реалізований повний факторний експеримент з урахуванням нелінійності та міжфакторних взаємодій. Дослідження виконано методом

імітаційного моделювання в ліцензійному програмному комплексі FlowVision. При моделюванні враховано властивості тіста як псевдопластичної рідини, в'язкість η та індекс течії n якої залежать від швидкості деформації [6]:

$$\begin{cases} \eta = \frac{206}{\dot{\gamma}^n} \\ n = \frac{0,54}{\dot{\gamma}^{0,14}} \end{cases} \quad (1)$$

Задача оптимізації – пошуку мінімальних значень в'язкості тіста – вирішена аналітично.

Результати й обговорення. Для обраних керованих параметрів межі варіювання (табл. 1), визначено на основі аналізу конструкцій робочих органів подібного типу для тістомісильних машин промислового зразка.

Таблиця 1

Межі варіювання факторів

Найменування	Фактори		
	l_1 , м (X_1)	l_2 , м (X_2)	n , об/хв (X_3)
Нульовий рівень	0,022	0,022	350
Інтервал варіювання	0,006	0,006	250

Рівняння регресії, яке характеризує залежність в'язкості тіста від відстаней між окремими штифтами l_1 , l_2 (див. рис. 1) і частотою обертання місильного валу n , отримана в результаті реалізації експерименту, спланованого згідно плану другого порядку типу ЦКОП (центральный композиционный ортогональный план). Його схема і отримані результати наведені в табл. 2. Вибір такого плану зумовлений його перевагами, а саме: завдяки оптимальній матриці планування, кількість дослідів в ньому невелика (15), що дає можливість швидко і якісно провести експеримент, при цьому отримуємо високу точність кінцевих результатів.

Таблиця 2

План експерименту по визначенню залежності в'язкості тіста від конструкційних параметрів робочого органа і частоти його обертання

№	X_1	l_1 , м	X_2	l_2 , м	X_3	n , об/хв	η_{cp} , Па·с
1	–1	0,016	–1	0,016	–1	100	85,3
2	1	0,028	–1	0,016	–1	100	91,0
3	–1	0,016	1	0,028	–1	100	101,0
4	1	0,028	1	0,028	–1	100	111,0
5	–1	0,016	–1	0,016	1	600	85,3
6	1	0,028	–1	0,016	1	600	83,6
7	–1	0,016	1	0,028	1	600	78,6
8	1	0,028	1	0,028	1	600	77,6
9	–а	0,015	0	0,022	0	350	84,0
10	а	0,029	0	0,022	0	350	86,3
11	0	0,022	–а	0,029	0	350	91,6
12	0	0,022	а	0,029	0	350	70,0
13	0	0,022	0	0,022	–а	46	68,3
14	0	0,022	0	0,022	а	653	66,0
15	0	0,022	0	0,022	0	350	67,0

Позначення в таблиці:

l_1, X_1 – натуральні, м, і кодовані значення відстані від лопаті більшого діаметра до менших;

l_2, X_2 – натуральні, м, і кодовані значення відстані між лопатями меншого діаметра;

n, X_3 – натуральні, об/хв, і кодовані значення частоти обертання місильного органа;

a – зіркове плече, для трифакторного експерименту $a = 1,215$.

Після математично-статистичного оброблення результатів експерименту отримано рівняння регресії в кодованих:

$$y = 66,7 + 1,44X_1 - 6,01X_3 - 6,04X_2X_3 + 12,52X_1^2 + 9,61X_2^2 \quad (2)$$

і в натуральних координатах, яке адекватно описує процес:

$$\eta = 204,82 + 0,24l_1 - 0,42n - 0,002l_2n + 19,4l_1^2 + 0,6l_2^2. \quad (3)$$

Задача оптимізації – пошуку мінімальних значень в'язкості тіста – вирішувалася аналітично, при цьому були перевірені необхідна і достатня умови існування екстремуму. Так, обчислені часткові похідні першого порядку:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial X_1} &= 1,44 + 25,04X_1 - 6,01X_3 - 6,04X_2X_3 + 9,61X_2^2 \\ \frac{\partial y}{\partial X_2} &= 1,44X_1 + 19,22X_2 - 12,05X_3 + 12,52X_1^2 \\ \frac{\partial y}{\partial X_3} &= -6,01 + 1,44X_1 - 6,04X_2 + 12,52X_1^2 + 9,61X_2^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Прирівнявши останні до нуля та вирішивши отриману систему рівнянь, отримаємо значення в кодованому вигляді: $X_1 = -0,25$; $X_2 = -0,51$ та $X_3 = -0,28$.

Перевіряючи достатню умову існування екстремуму, розраховані часткові похідні другого порядку:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 y}{\partial X_1^2} &= 25,04 - 6,01X_3 - 6,04X_2X_3 + 9,61X_2^2 \\ \frac{\partial^2 y}{\partial X_2^2} &= 19,22 + 1,44X_1 - 12,05X_3 + 12,52X_1^2 \\ \frac{\partial^2 y}{\partial X_3^2} &= 1,44X_1 - 6,04X_2 + 12,52X_1^2 + 9,61X_2^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Підставивши отримані значення змінних, отримаємо:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial X_1^2} = 28,36; \quad \frac{\partial^2 y}{\partial X_2^2} = 23; \quad \frac{\partial^2 y}{\partial X_3^2} = 6.$$

Всі значення більші нуля, отже отримана залежність є функцією мінімуму.

В натуральному вигляді значення факторів становлять: $l_1 = 0,02$ м; $l_2 = 0,019$ м і $n = 280$ об/хв.

Подальшим кроком є визначення діаметрів основного D і допоміжних d місильних штифтів із урахуванням попередньо отриманих конструкційних параметрів і частоти обертання.

Для знаходження рівняння регресії, яке описує залежність в'язкості тіста від вказаних факторів, побудуємо матрицю планування для повного факторного експерименту з урахуванням нелінійності та міжфакторних взаємодій (табл. 3).

Позначення в таблиці:

D, X_1 – натуральні, м, і кодовані значення діаметра більшого штифта;

d, X_2 – натуральні, м, і кодовані значення діаметра меншого штифта.

Рівняння регресії для двох факторів, що враховує ефекти парних міжфакторних взаємодій, має вигляд в кодованих координатах:

$$y = 87,5 - 5X_1 + 2,66X_2 + 8,75X_1X_2 - 3,7X_1^2, \quad (6)$$

в натуральних величинах:

$$\eta = 116,4 - 0,96D + 4,21d + 0,27Dd - 0,057D^2. \quad (7)$$

Отримане рівняння регресії з достатнім ступенем достовірності описує процес, який вивчається.

Таблиця 3

План експерименту та результати досліджень по визначенню залежності в'язкості тіста від діаметрів основного і допоміжних місильних штифтів

№	X_1	X_2	$X_1 \cdot X_2$	D	d	η_{cp}
1	-1	-1	+1	0,008	0,004	102,0
2	+1	-1	-1	0,024	0,004	73,0
3	-1	+1	-1	0,008	0,012	80,3
4	+1	+1	+1	0,024	0,012	87,0
5	0	0	0	0,016	0,008	92,0
6	+1	0	0	0,024	0,008	78,0
7	-1	0	0	0,008	0,008	85,0
8	0	+1	0	0,016	0,012	91,0
9	0	-1	0	0,016	0,004	80,0

Після перевірки необхідної і достатньої умов існування екстремуму за методикою, аналогічною наведеній вище, отримали оптимальні значення діаметрів місильних штифтів розробленого робочого органа тістомісильної машини: $D=0,014$ м; $d=0,005$ м.

Всі наступні результати отримані з використанням знайдених оптимальних конструкційних і режимних параметрів штифтового місильного органа.

Як було зазначено вище, на енергетичні показники роботи тістомісильних машин суттєво впливає в'язкість тіста. Підвищення останньої зменшує ефективність замішування за рахунок нераціональних енерговитрат та значного підвищення температури тіста в ході процесу, а це, в свою чергу, призводить до погіршення якості готових виробів. Тому, моделюючи процес замішування тіста на стадії пластифікації, необхідно основну увагу приділяти саме показникам інтегральних характеристик зміни в'язкості продукту в місильному об'ємі.

Для визначення впливу режимів замішування на ефективність роботи місильного органа процес промодельований при різних режимах роботи тістомісильної машини. При режимі 1 потік тіста спочатку набігає на стержень більшого діаметра, при режимі 2 напрям обертання змінюється на зворотній (рис. 2).

Необхідною умовою для точного розрахунку енергетичних параметрів процесу замішування є визначення числових значень в'язкості тіста, а також дослідження зон її розподілу в області проходження місильного органа. Напрямок обертання місильного органа істотно змінює умови перебігу процесу. Використовуючи метод комп'ютерного моделювання, маємо змогу отримати дані розподілу в'язкості в площині методом ізоліній (рис. 3) та отримати інтегральні числові значення.

Аналізуючи отримані результати можна стверджувати, що при використанні першого режиму (рис. 3 а), коли тісто спочатку обтікає стержень більшого діаметру, швидкість деформації продукту незначна, максимальні її значення при такому режимі спостерігаються в невеликих областях поблизу місильних стержнів. В'язкість тіста при такому режимі замішування (рис. 3 а) досягає значень 40 Па·с, що в 1,6 разів більше, ніж при режимі 2. Зони розподілу змінної розташовані хаотично.

Коли тісто спочатку обтікає допоміжні стержні меншого діаметру (рис. 3 б), вони суттєво розріджують тісто, швидкість деформації істотно зростає. За допоміжними стержнями утворюється зона з умовами, сприятливими для утворення циркуляційних вихорів позаду основного робочого стержня, ефективність процесу при цьому збільшується. Навколо основного стержня більшого діаметру виникає зона пониженої в'язкості, чисельно рівна 25 Па·с. Це явище можна пояснити значним збільшенням градієнта швидкості деформації продукту в цій області та утворенням турбулізаційної зони на мікрорівні. Це позитивно впливає на енергетичні витрати в процесі замішування.

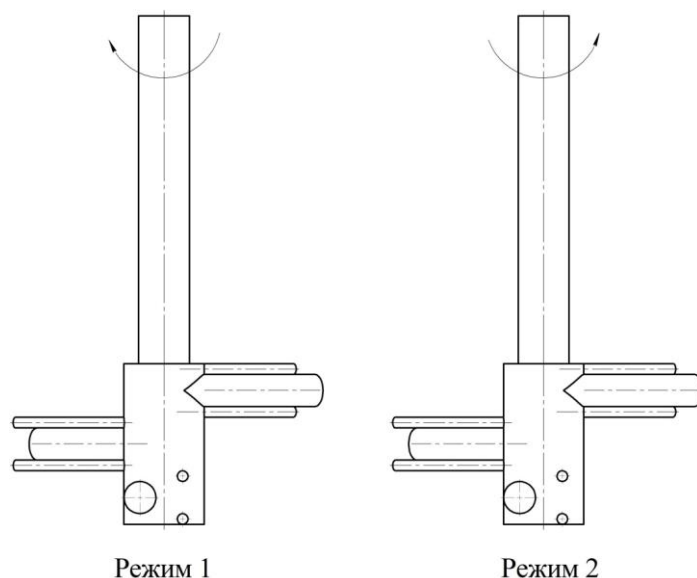


Рис. 2. Режими руху місильного органа

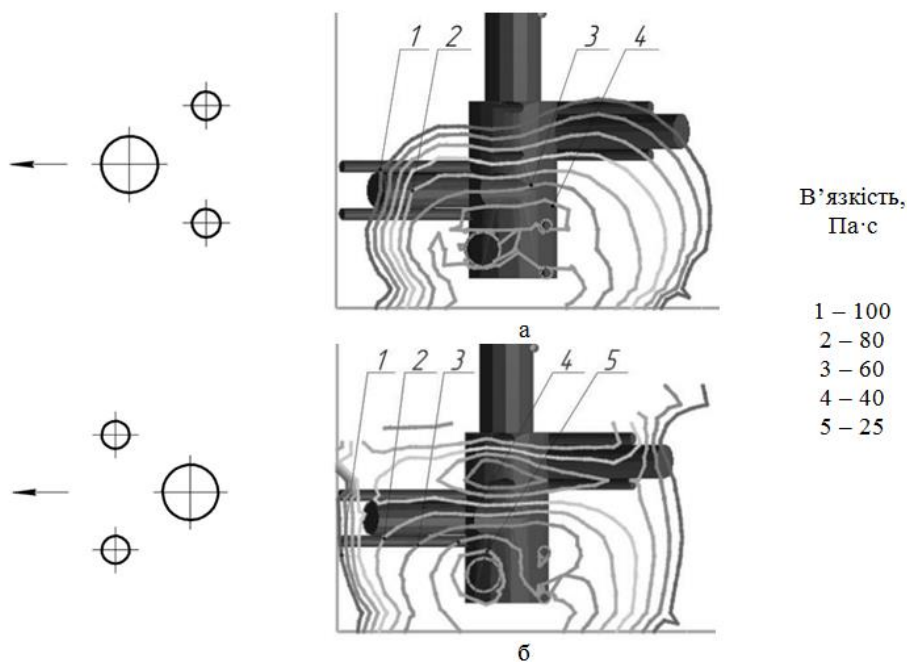


Рис. 3. Ізолінії розподілу в'язкості тіста в області проходження місильних штифтів при робочих режимах: а) – режим 1; б) – режим 2.

Висновки. Умови замішування тіста на стадії пластифікації мають призводити до утворення циркуляційних вихорів. Найбільш сприятливими зонами їх формування є такі, де швидкість продукту найбільша, а в'язкість, відповідно, мінімальна. Для отримання найменших значень в'язкості в процесі замішування тіста робочими органами штифтового типу відстань між штифтами повинна становити $l_1=0,02$ м, $l_2=0,019$ м, а їх діаметри – $D=0,014$ м; $d=0,005$ м.

На стадії пластифікації тіста доцільно забезпечити обертання місильного органа в такому напрямку, щоб потік тіста набігав спочатку на стержні меншого діаметру, які мають малий опір руху. При цьому в значній області продукту виникає зона пониженої в'язкості, в якій рухається стержень великого діаметра. Він зазнає меншого опору руху, завдяки чому створює більшу кількість вихорів при порівняно менших витратах енергії.

Бібліографія

1. Kresta S., Etchells A., Dickey D., Atiemo-Obeng V. *Advances in industrial mixing*. 2016. Wiley. 1034 p.
2. Горбач О., Чепелюк Е., Шпак М. Влияние формы месильных органов на эффективность процесса замеса теста. Сборник научных статей по материалам XV Международной студенческой научной конференции «Технология хранения и переработки сельскохозяйственной продукции», Гродно: ГГАУ, 2014, С. 37–39.
3. Ötles S., Önal A. Computer-aided engineering softwares in the food industry. *Journal of Food Engineering*. 2004. Volume 65, Issue 2. P. 311–315.
4. Biletskii E., Petrenko O., Semeniuk D. Theoretical aspects of non-newtonian fluids flow simulation in food technologies. *Ukrainian food journal*. 2014. Volume 3, Issue 2. P. 271.
5. Патент 98577 UA, МПК А21С 1/02 (2006.01) Тістомісильна машина. Шпак М. С., Литовченко І. М.; заявник Національний університет харчових технологій. № а201105303; заявл. 26.04.2011; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10. 8 с.
6. Литовченко І. М., Шпак М. С. Визначення параметру нелінійності реологічних рівнянь при описанні процесу перемішування хлібного тіста. *Наукові праці НУХТ*, 2010, С. 85–87.

References

1. Kresta S., Etchells A., Dickey D., Atiemo-Obeng V. (2016). *Advances in industrial mixing*. Wiley. 1034 p.
2. Horbach O., Chepeliuk E., Shpak M. (2014). Vliyanie formy mesilnykh organov na effektivnost protsessa zamesa testa. *Sbornik nauchnykh statey po materialam XV Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchnoy konferentsii «Tekhnologiya khraneniya i pererabotki selskokhozyaystvennoy produktsii»* [Vliyanie formy mesilnykh organov na effektivnost protsessa zamesa testa. *Sbornik nauchnykh statey po materialam XV Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchnoy konferentsii «Tekhnologiya khraneniya i pererabotki selskokhozyaystvennoy produktsii»*], Hrodno: HHAU, P. 37–39 [in Russian].
3. Ötles S., Önal A. (2004). Computer-aided engineering softwares in the food industry. *Journal of Food Engineering*. Volume 65, Issue 2. P. 311–315.
4. Biletskii E., Petrenko O., Semeniuk D. (2014). Theoretical aspects of non-newtonian fluids flow simulation in food technologies. *Ukrainian food journal*. Volume 3, Issue 2. P. 271.
5. Patent 98577 UA, MPK A21S 1/02 (2006.01) Tistomisylna mashyna. Shpak M. S., Lytovchenko I. M.; zaiavnyk Natsionalnyi universytet kharchovykh tekhnolohii. № a201105303; zaiavl. 26.04.2011; opubl. 25.05.2012, Biul. № 10. 8 p. [in Ukrainian].
6. Lytovchenko I., Shpak M. Vyznachennia parametru neliniinosti reolohichnykh rivnian pry opysanni protsesu peremishuvannia khlibnoho tista. *Naukovi pratsi NUKhT*, 2010, P. 85–87 [in Ukrainian].