

УДК 678.057

СІВЕЦЬКИЙ В. І., СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л.*, МАЛЬЧЕВСЬКИЙ О. Т.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІШУВАННЯ ПОЛІМЕРНОЇ КОМПОЗИЦІЇ В ДИНАМІЧНОМУ ЗМІШУВАЧІ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЕКСТРУДЕРА

Здійснено чисельне моделювання процесу змішування полімерної композиції в динамічному змішувачі, встановленому в зоні дозування черв'ячного екструдера. Черв'ячний екструдер оснащений додатковим інжекційним пристроєм, який подає додатковий компонент в зону динамічного змішування через інжекційний канал, розташований в корпусі черв'ячного екструдера. Наведено результати моделювання, які показують динаміку процесу змішування двох-компонентного полімерного розплаву у змішувачі типу СТМ по всій його довжині та дають можливість визначити найбільш оптимальні технологічні параметри зони динамічного змішування.

Ключові слова: черв'ячний екструдер, зона дозування, динамічний змішувач, моделювання.

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2023.283524

*Corresponding author: sokolkiev@ukr.net

Received 16 May 2023; Accepted 08 June 2023

Постановка проблеми. Процеси змішування відіграють важливу роль у переробці полімерних матеріалів, адже від якості змішування полімерного матеріалу залежить його рівень однорідності, що в свою чергу впливає на якість кінцевого продукту. Інша справа, коли полімерний матеріал складається з двох і більше компонентів, в такому випадку, питання процесу одержання однорідної полімерної композиції стає вкрай гостро. Тож для покращення якості кінцевого продукту та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів зони змішування необхідно дослідити закономірність якості змішування в динамічному змішувачі типу СТМ [1] черв'ячного екструдера.

Аналіз попередніх досліджень. Під час проведення аналізу існуючих робіт по визначенню якості змішування полімерного матеріалу [1-5], було визначено, що основні показники якості змішування полімерного матеріалу можна визначити з розв'язку системи диференційних рівнянь, що являють собою основні співвідношення механіки суцільних середовищ (МСС) і використовуються для стаціонарних процесів в системі координат Ейлера. Більшість промислових та лабораторних процесів змішування відбуваються за наявності двох однакових за густиною та близьких за в'язкістю нестисливих рідин, що відрізняються між собою тільки кольором [3]. В якості критерія однорідності змішування можна використовувати різницю концентрацій одного з компонентів в різних поперечних перерізах по довжині каналу [4].

Метою дослідження є отримання залежності однорідності змішування полімерної композиції від технологічних та конструктивних параметрів динамічного змішувача типу СТМ.

Виклад основного матеріалу. В даній роботі розглядається процес змішування полімерної композиції в динамічному змішувачі типу СТМ черв'ячного екструдера із додаванням додаткового компоненту, який за густиною і в'язкістю ідентичний до основного полімерного матеріалу і може відрізнятися тільки певною ознакою, яка не впливає на властивості компонентів, наприклад кольором. В якості подібної ознаки під час моделювання використовувався перепад температури, що являє собою різницю між максимальним та мінімальним значенням температури в перерізі каналу зони динамічного змішування по всій її довжині в кожному ряді технічних поглиблень. Причому залежність властивостей від температури не задавалась, коефіцієнт теплопровідності дорівнював нулю, дисипативна складова не враховувалась. Умовною температурою першого компонента задавалось 0 °С, а другого – 100 °С. За таких умов розподіл температур суміші повністю визначається конвективною складовою, тобто витікає тільки з умов механічного переміщення об'ємів компонентів.

Математична модель для опису процесу ізотермічного змішування двох ламінарних потоків неньютонівської рідини, наведена в [5] і являє собою систему диференціальних рівнянь нерозривності, імпульсу, енергії та рівняння об'ємної частки вторинної фази.

Рівняння нерозривності для композиції:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

де \vec{v}_m – усереднена за масою швидкість:

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (2)$$

ρ_m – густина композиції:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3)$$

α_k – об'ємна частка фази k .

Рівняння імпульсу для композиції отримується шляхом підсумовування індивідуальних рівнянь імпульсу для всіх фаз:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = & -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \\ & + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

де n – кількість фаз, \vec{F} – об'ємна сила, μ_m – в'язкість композиції:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (5)$$

$\vec{v}_{dr,k}$ – швидкість зсуву для вторинної фази k :

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (6)$$

Рівняння енергії для композиції:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (7)$$

де k_{eff} – ефективна провідність; $\nabla \cdot (k_{eff} \nabla T)$ – передача енергії внаслідок провідності; S_E включає будь-які інші об'ємні джерела тепла.

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (8)$$

для фази, що стискається, і $E_k = h_k$ для фази, що не стискається, де h_k – чутлива ентальпія для фази k .

Рівняння об'ємної частки для вторинних фаз:

З рівняння нерозривності для вторинної фази можна отримати рівняння об'ємної частки вторинної фази:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (9)$$

Процес змішування двох-полімерної композиції розглядається за різної швидкості обертання черв'яка та різної швидкості подачі додаткового компоненту. Рух компонентів суміші задається через швидкість їх потоку на вході в основний канал та на вході в додатковий інжекційний канал (рис. 1).

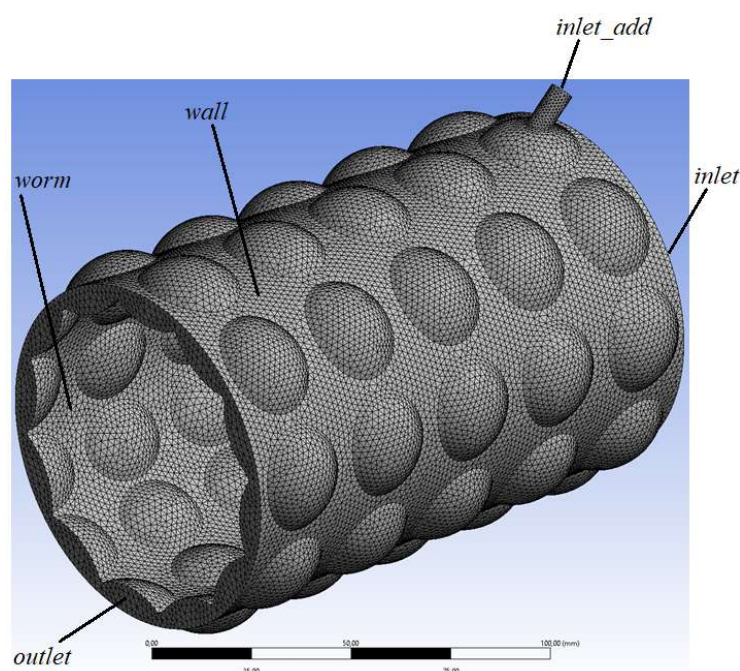


Рис. 1 – Схема задання граничних умов (inlet – вхідний переріз каналу для подачі основного полімерного матеріалу; inlet_add – вхідний переріз інжекційного каналу для подачі додаткового компоненту; outlet – вихідний переріз; wall – поверхня корпусу; worm – поверхня черв'яка)

Приймаємо: діаметр ротора змішувача – 83 мм; діаметр корпусу – 90 мм; діаметр додаткового інжекційного отвору – 6 мм; довжина зони динамічного змішування – 145 мм; швидкість подачі основного матеріалу – 0,02 м/с (рис. 2).

Реалізація поставленої задачі проводилась в програмному середовищі ANSYS Fluent на основі методу скінченних елементів.

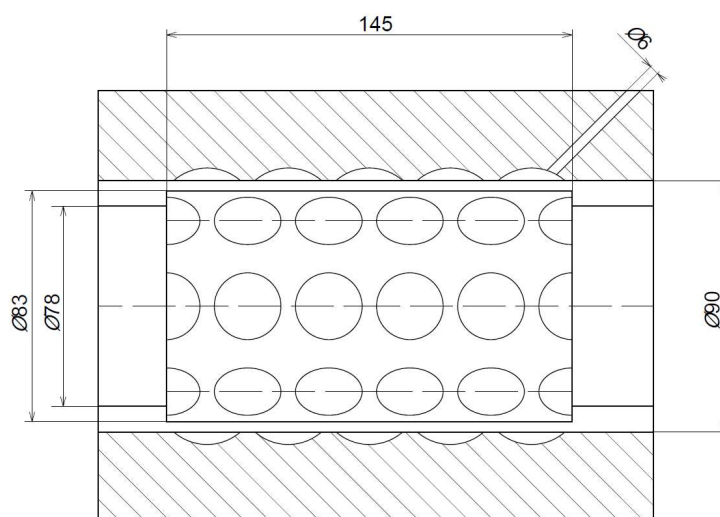


Рис. 2 – Конструктивна схема зони динамічного змішування

В результаті дослідження змішування полімерної композиції за різних швидкостей обертання черв'яка було виявлено тенденцію зменшення максимальної різниці температур на виході з каналу в зоні динамічного змішування за збільшення швидкості обертання черв'яка від 20 до 50 об/хв. За швидкості обертання 20 об/хв перепад температур становить 21,53 °С, за швидкості обертання 50 об/хв – 2,37 °С. Тобто з підвищенням швидкості обертання черв'яка з 20 до 50 об/хв рівень однорідності покращується у 9,07 рази (рис. 3). На проміжку від 14,6 до 28 мм по довжині каналу спостерігається інтенсивне підвищення значень перепаду температур, це зумовлене початком контакту додаткового матеріалу з основним, після чого починається активне змішування та вирівнювання температур.

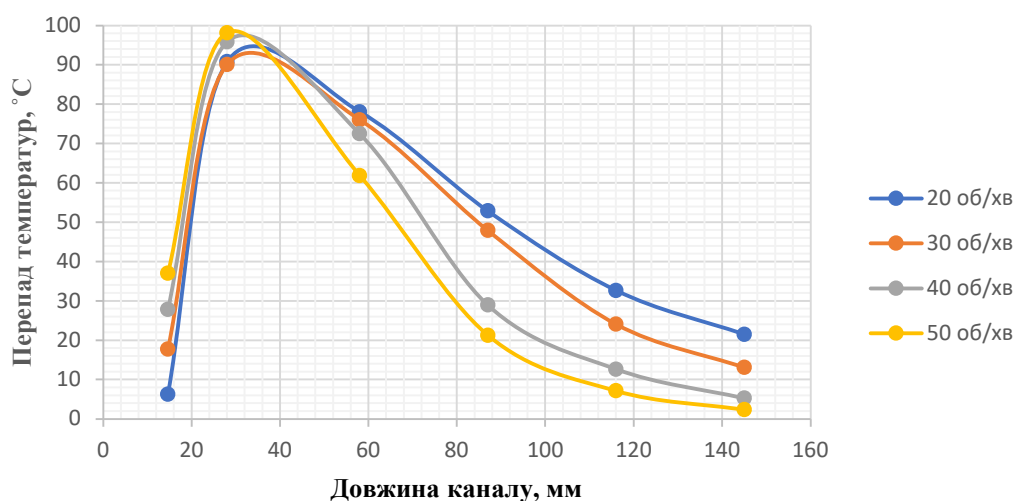


Рис. 3 – Графік однорідності матеріалу по довжині каналу за різної швидкості обертання черв'яка

Із наведених результатів по зміні швидкості обертання черв'яка випливає, що зі збільшенням швидкості обертання черв'яка допустимий рівень однорідності композиції досягається значно швидше (рис. 4). Так за швидкості обертання 20 об/хв мінімальний перепад температур, що досягається на кінці зони змішування (145 мм), становить $\Delta T = 21,53$ °С, в той момент як за 50 об/хв, цей рівень досягається вже на третьому ряді технічних поглиблень (87 мм), а на кінці зони змішування $\Delta T = 2,37$ °С.

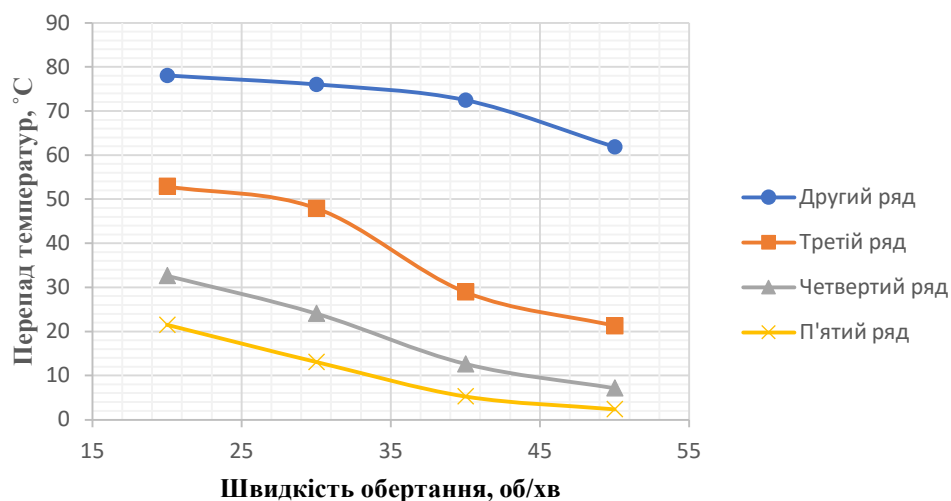


Рис. 4 – Залежність однорідності від швидкості обертання черв'яка в різних рядах технічних заглибин

Під час дослідження рівня гомогенізації полімерної композиції за різної швидкості подачі додаткового компоненту, було визначено тенденцію збільшення максимальної різниці температур на виході з каналу в зоні динамічного змішування зі збільшенням швидкості подачі додаткового компоненту від 50 до 300 мм/с (рис. 5). За швидкості подачі 50 мм/с перепад температур на виході з каналу становить 9,49 °С, за швидкості подачі 300 мм/с – 25,75 °С. Тобто з підвищенням швидкості подачі додаткового компоненту з 50 до 300 мм/с рівень гомогенізації погіршується у 2,71 рази. На проміжку від 14,6 до 28 мм по довжині спостерігається інтенсивне підвищення значень перепаду температур, причому зі збільшенням швидкості подачі додаткового компоненту процес підвищення значень перепаду температур набуває більшої інтенсивності, це зумовлене з тим, що більш повільна швидкість подачі додаткового компоненту сприяє більш активному захопленню змішувачем додаткового компоненту.

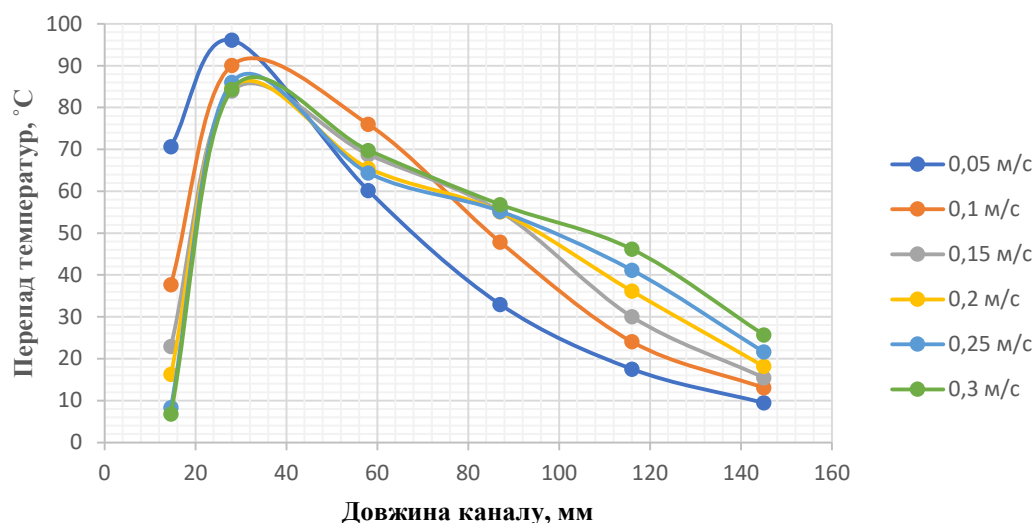


Рис. 5 – Графік однорідності матеріалу по довжині каналу за різної швидкості подачі додаткового компоненту

Із отриманої залежності можна зробити висновок, що зі збільшенням швидкості подачі додаткового компоненту допустимий рівень однорідності композиції досягається на значно повільніше (рис. 6).

Так при $V_{\text{інж}} = 300$ мм/с мінімальний перепад температур, що досягається на кінці зони змішування (145 мм), становить $\Delta T = 25,75$ °С, в той момент як при $V_{\text{інж}} = 50$ мм/с, цей рівень досягається між третім та четвертим рядами технічних поглиблень (≈ 100 мм), а наприкінці зони змішування $\Delta T = 9,49$ °С.

Висновки. З результатів дослідження однорідності змішування від різної швидкості обертання ротора змішувача, найліпший її рівень спостерігався за швидкості обертання черв'яка 50 об/хв.

В результаті аналізу впливу швидкості подачі додаткового компоненту на однорідність матеріалу, було виявлено, що зі збільшенням швидкості подачі другого компоненту, однорідність матеріалу погіршується. Але її можна компенсувати за рахунок збільшення швидкості обертання ротора змішувача.

За проведеними розрахунками можна виділити найбільш оптимальні технічні характеристики з метою досягнення найліпшого рівня рівномірності, а саме: швидкість потоку основного матеріалу $V_{\text{осн}} = 0,02$ м/с; швидкість обертання черв'яка $V_{\text{об}} = 50$ об/хв; швидкість подачі додаткового матеріалу $V_{\text{інж}} = 0,05$ м/с.

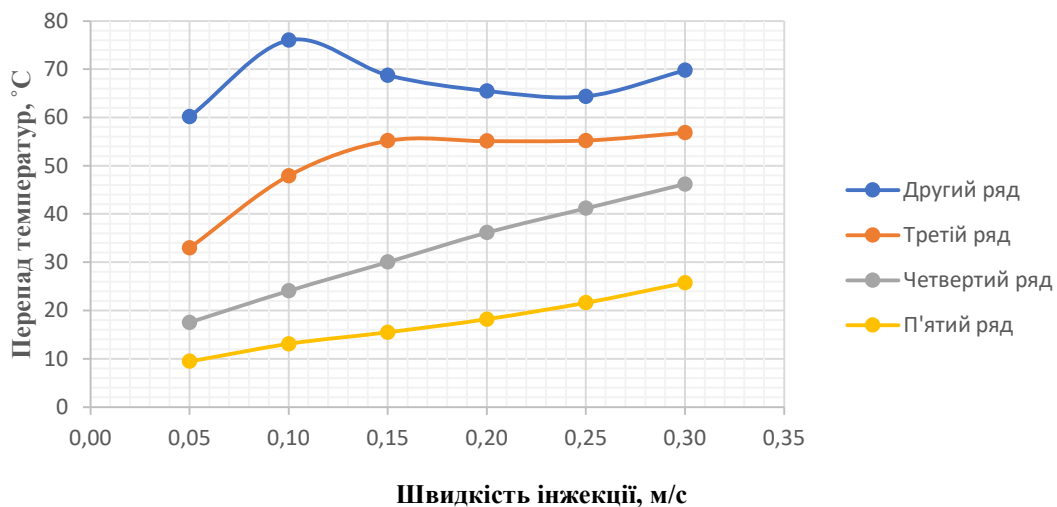


Рис. 6 – Залежність однорідності від швидкості подачі додаткового компоненту в різних рядах технічних заглибин

Перспективи подальших досліджень. У подальшому доцільне вивчення процесу змішування багатокомпонентних полімерних розплавів.

Список використаної літератури

1. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів : навч. посіб. / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 200 с.
2. Мікульонок І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини: монографія. – Київ : ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. – 265 с.
3. Мелешко В. В., Краснопольская Т. С. Смешивание вязких жидкостей // Нелинейная динамика. – 2005. – Т.1. - №1. – С. 69-109.
4. Дослідження процесу змішування модельних ньютонівських рідин / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, Н. М. Нікітенко, М. С. Кушнір, А. А. Лизогубенко // Машинобудування. – 2013. - №59. – С. 142-146.
5. ANSYS FLUENT 12.0 : Theory Guide. Canonsburg : ANSYS, Inc., – 2009. – 816 с.

Volodymyr Sivetskyi, Oleksandr Sokolskyi, Oleksiy Malchevskyi

MODELING OF MIXING PROCESS OF THE POLYMER COMPOSITION IN THE DYNAMIC MIXER OF THE WORM EXTRUDER

Mixing processes play an important role in the processing of polymer materials, because the quality of the mixing of the polymer material depends on its level of homogeneity, which in turn affects the quality of the final product. It is another matter when the polymer material consists of two or more components, in this case, the issue of the process of obtaining a homogeneous polymer composition becomes extremely acute. In order to improve the quality of the final product and justify the design and technological parameters of the mixing zone, it is necessary to investigate the regularity of the quality of mixing in a dynamic mixer of the CTM worm extruder type.

According to existing works on determining the quality of mixing of polymeric material, the difference in concentrations of one of the components in different cross-sections along the length of the channel can be used as a criterion for homogeneity of mixing.

Numerical modeling of the process of mixing the polymer composition in the dynamic mixer installed in the dosing zone of the worm extruder, which is equipped with an additional injection device that supplies the additional component to the dynamic mixing zone through the injection channel located in the body of the worm extruder, was carried out. Calculations were carried out on the basis of the finite element method (FEM) using the ANSYS software complex.

A mathematical model of the process of mixing the polymer composition in a dynamic mixer of the CTM type of a worm extruder with the addition of an additional component, which is identical in density and viscosity to the main polymer material and can differ only in a certain feature that does not affect the properties of the components, such as color, has been developed. Moreover, the properties were set in such a way that the temperature distribution of the mixture was completely determined by the convective component, that is, it resulted only from the conditions of the mechanical movement of the volumes of the components.

The dependence of the homogeneity of the polymer composition as a result of mixing on the technological and design parameters of the dynamic mixer of the CTM type was obtained. The research was carried out at different speeds of rotation of the mixer rotor and at different speeds of supplying the additional component. The movement of the components of the mixture was determined by their flow rate at the entrance to the main channel and at the entrance to the additional injection channel.

The most optimal technical characteristics were selected in order to achieve the best level of uniformity.

Key words: *worm extruder, dosing zone, dynamic mixer, modeling.*

References

1. Fundamentals of designing single-worm extruders: training manual / I. O. Mikulonok, O. L. Sokolskyi, V. I. Sivetskyi, L. B. Radchenko. - Kyiv: NTUU "KPI", 2015. - 200 p.
2. Mikulonok I. O. Equipment and processing processes of thermoplastic materials using secondary raw materials: monograph. - Kyiv: Polytechnic Publishing House, 2009. - 265 p.
3. Meleshko V.V., Krasnopolskaya T.S. Mixing of viscous liquids // Nonlinear dynamics. – 2005. – T.1. - #1. - pp. 69-109.
4. Study of the mixing process of model non-Newtonian fluids / O. S. Sakharov, V. I. Sivetskyi, O. L. Sokolskyi, N. M. Nikitenko, M. S. Kushnir, A. A. Lyzogubenko // Machine building. – 2013. - No. 59. - pp. 142-146.
5. ANSYS FLUENT 12.0 : Theory Guide. Canonsburg : ANSYS, Inc., – 2009. – 816 p.