

curve of water absorption on the concentration of ED-20 for PMPS II and one for the PMPS I. The article also studies the characteristics of interaction processes of the epoxide-organic silicon compounds of different composition with water in the dynamic and static conditions and when it is fully immersed in different concentration of ED-20, type and concentration of the polyorganic siloxane. It has been found that the compositions of the PMPS II less sensitive to water. A more detailed analysis of changes in the mechanical strength of the example polymethylphenylsiloxane compounds II showed the presence of the positive impact of the latter at concentrations that do not exceed 7.5 wt.%. The subsequent increase of its content is accompanied by a significant decline in strength and flexural clenching and after 20 wt.% These indicators are practically the same. The show features polymethylphenylsiloxanes behavior in the processes of structure formation of the epoxide-organic silicon compounds. The dependence of the physical and mechanical properties of the epoxide-organic silicon compounds (micro-hardness, impact strength, mechanical strength and compression of bending) in a wide range of concentrations of ED. The presence of areas of extreme changes in physical and mechanical properties of the compounds and found their concentration ranges.

**Keywords:** epoxide-organic silicon compounds, polyorganosiloxane, water absorption, microhardness, strength.

#### References

1. Brok T. Evropeiskoe rukovodstvo po lakokrasochnym materyalam y pokrytyam [European guidance for paints and coatings] / T. Brok. – Moscow : Paint Media, 2004. – 548 p.
2. Kariakyna M. Y. Yspytanye lakokrasochnykh materyalov y pokrytyi [Testing of paints and coatings] / M. Y. Kariakyna. – Moscow : Khymyia, 1988. – 252 p.

УДК 678.057

САХАРОВ О. С., д.т.н., проф.; СІВЕЦЬКИЙ В. І., к.т.н., проф.; СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., к.т.н., доц.;  
КУШНІР М. С., асп.; КОВАЛЕНКО К. Г., асп.; РОСЛОВ О. В., магістрант  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ЗМІШУВАННЯ РОЗПЛАВІВ ТЕРМОПЛАСТІВ У ЧЕРВ'ЯЧНОМУ ЕКСТРУДЕРІ

Здійснено чисельне моделювання змішування в черв'ячному каналі екструдера та динамічного змішувача бар'єрного типу. Наведено результати моделювання, що дозволяють дослідити динаміку зміни температур під час течії полімерів у змішувальних елементах та вибирати оптимальні параметри змішувальних елементів та/чи технологічні режими змішування.

**Ключові слова:** динамічний змішувач, моделювання, гомогенізація, змішування.

© Сахаров О. С., Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Кушнір М. С., Коваленко К. Г., Рослов О. В., 2013.

**Постановка проблеми.** Процеси змішування мають важливе значення в переробці полімерних матеріалів, оскільки якість змішування безпосередньо визначає якість виробу [1]. Для науково обґрунтованого конструктивного оформлення екструзійно-змішувального устаткування важливо знати основні закономірності змішування, що відбуваються в різних конструктивних зонах.

**Аналіз попередніх досліджень.** Якість змішування оцінюють за такими інтегральними показниками, як накопичена деформація, тривалість перебування, напруження зсуву [1-4]. Ці показники не завжди дозволяють отримати повне уявлення про змішування. Невирішеною частиною наукової проблеми прогнозування змішувальної ефективності устаткування є складність її кількісної оцінки [3]. Як критерій якості змішування іноді вибирають концентрацію диспергованого матеріалу в дисперсійному середовищі [4]. У разі введення компонентів композиції з різними температурами таким критерієм може бути рівномірність температурного поля.

**Метою** статті є вивчення динаміки та якості змішування полімерних композицій у черв'ячному екструдері, оснащеному динамічним змішувачем бар'єрного типу.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо змішування в черв'ячному каналі шнека в зоні дозування та динамічному змішувачі бар'єрного типу за трьох варіантів введення диспергованого матеріалу в дисперсійне середовище. Як критерій ефективності змішування оберемо зміну концентрації диспергованого матеріалу в дисперсійному середовищі та зміну температури суміші під час проходження зон гомогенізації в черв'ячному каналі та змішувачі в різних перерізах робочих каналів.

Математичну модель, частинним випадком якої є зона змішування, та її дискретизацію методом скінченних елементів (МСЕ) наведено в праці [4].

Рух суміші та її складових розглянемо в рамках механіки суцільних середовищ за таких припущень:

1. Суміш складається з окремих взаємно проникних компонент, що заповнюють один об'єм. Кожна компонента є неперервним однорідним середовищем (континуумом), стан якого безпосередньо визначається власними параметрами стану.

2. Маса, імпульс та енергія суміші дорівнюють сумі мас, імпульсів та енергій її компонент. Взаємодія між компонентами суміші не змінює загальну величину маси, імпульсу та енергії суміші.

Щоб розв'язати задачу змішування, слід розв'язати термомеханічну задачу розподілу швидкостей та стану рідини, а на її основі – задачу масообміну дифузією та конвекцією.

Кінематика руху багатофазного середовища досліджується з позиції Ейлера, тобто всі подальші висновки базуються на розгляді не окремих елементів середовища, а того, що відбувається в певній точці простору з координатами  $x_1, x_2, x_3$ . Геометричні координати простору  $x_i$  і час  $t$  називають змінними Ейлера. Рух у розумінні Ейлера вважається відомим, якщо всі невідомі (переміщення, швидкості, прискорення) визначено як функції  $x_i$  і  $t$ . За фіксованих  $x_i$  і змінній  $t$  ці функції описують змінення з часом у визначеній точці простору параметрів частинок середовища, що прямують крізь цю точку. Швидкість руху окремої фази визначають за її витратою протягом одиниці часу крізь одиницю площі перерізу каналів, в яких рухається фаза.

Запишемо співвідношення МСС у вигляді системи диференціальних рівнянь у координатах Ейлера для стаціонарних процесів:  $\nabla \cdot \hat{\sigma} + \vec{f} = \rho \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \vec{v}$  – рівняння руху;  $c_T \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot (\lambda_T \vec{\nabla} T) + \hat{\sigma} \cdot \hat{\zeta} + Q_{(V)}$  – рівняння енергії;  $\varphi \nabla^2 C = \vec{v} \cdot \vec{\nabla} C$  – рівняння дифузії;  $\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$  – рівняння збереження маси, де  $\rho$  – густина матеріалу;  $\vec{v}$  – вектор швидкості точки тіла;  $\vec{f}$  – вектор зовнішньої сили, що діє на одиницю об'єму;  $\hat{\sigma}$  – тензор напружень;  $\vec{\nabla} \vec{v}$  – градієнт вектора швидкості;  $Q_{(V)}$  – віднесена до одиниці маси швидкість зовнішнього об'ємного притоку теплоти разом з іншою немеханічною енергією;  $C$  – концентрація компонента;  $\varphi$  – коефіцієнт дифузії. До цих рівнянь слід додати геометричні рівняння Коші:  $\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\vec{\nabla} \vec{u} + (\vec{\nabla} \vec{u})^T)$ ,  $\hat{\zeta} = \frac{1}{2} (\vec{\nabla} \vec{v} + (\vec{\nabla} \vec{v})^T)$ , що зв'язують тензор деформацій  $\hat{\varepsilon}$  з вектором переміщень  $\vec{u}$  і тензор швидкостей деформацій  $\hat{\zeta}$  з вектором швидкостей  $\vec{v}$ , а також рівняння стану  $\hat{\phi}(\hat{\sigma}, \hat{\varepsilon}, \hat{\zeta}, T) = 0$ , що дозволяють описати основні властивості реальних тіл.

Реологічні властивості суміші моделювали за формулою [3]:  $\lg \mu_c = \alpha \lg \mu_1 + (100 - \alpha) \lg \mu_2$ , де  $\mu_c$  – в'язкість суміші;  $\mu_1$  – в'язкість дисперсійного середовища;  $\mu_2$  – в'язкість диспергованого матеріалу;  $\alpha$  – концентрація диспергованого матеріалу.

Змішування двох полімерів або полімерів з іншими інгредієнтами в черв'ячному каналі розглядали у двох варіантах, коли диспергований матеріал уводили біля осердя шнека (рис. 1, а) і біля зовнішнього циліндра (рис. 1, б) за різних умов обертання шнека й циліндра і різних співвідношень в'язкості диспергованого матеріалу й дисперсійного середовища. Моделювали також умови введення диспергованого матеріалу безпосередньо у вхідний кільцевий зазор змішувача (рис. 1, в). Для наочності експериментів різницю температур диспергованого матеріалу й дисперсійного середовища було взято рівною 100 °С.

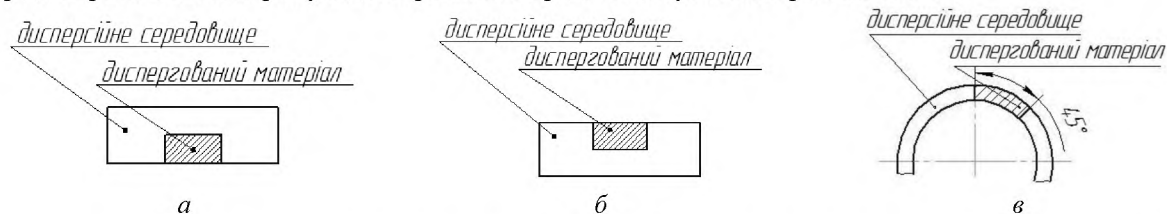


Рис. 1 – Схеми введення диспергованого матеріалу в дисперсійне середовище: у гвинтовий канал біля осердя шнека (а), біля внутрішньої поверхні циліндра (б), у вхідний кільцевий зазор бар'єрного змішувача (в)

Прийнято: діаметр осердя шнека – 72 мм; внутрішній діаметр циліндра – 90 мм; довжину зони гомогенізації – 300 мм; швидкість обертання шнека – 8 рад/с; швидкість осьової подачі рідин – 0,1 м/с (рис. 2).

Змішування в черв'ячному каналі досліджували за допомогою пакету Ansys Fluent, динамічного змішувача – пакету Ansys Polyflow, що входять до складу програмного комплексу ANSYS Academic Teaching POLYFLOW.

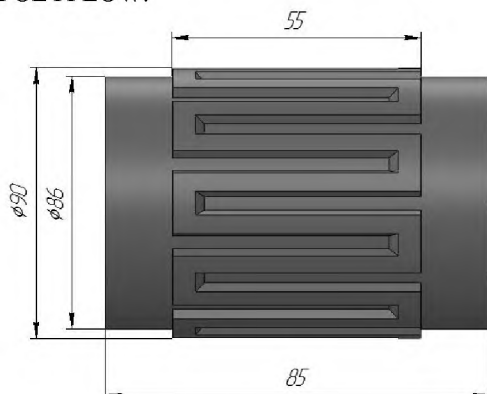
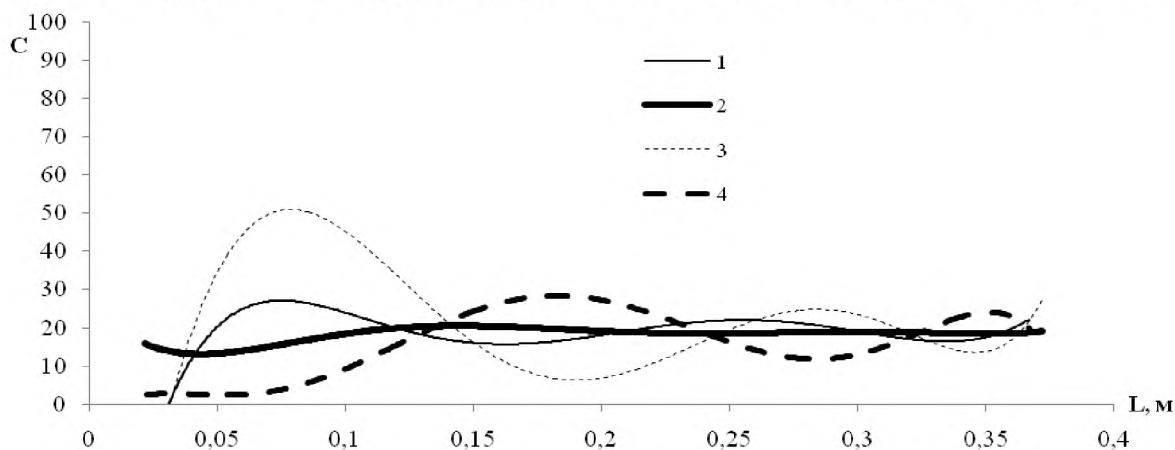


Рис. 2 – Конструктивна схема динамічного змішувача

Чисельні дослідження змішування в гвинтовому каналі екструдера за різних варіантів уведення диспергованого матеріалу в дисперсійне середовище свідчать, що завдяки обертовому рухові шнека спостерігається перерозподіл концентрації диспергованого матеріалу в дисперсійному середовищі вздовж гвинтового каналу. Змішування за рівної в'язкості компонентів відбувається активніше із введенням диспергованого матеріалу біля обертової поверхні, оскільки відбувається налипання матеріалу до рухомої поверхні.

У реальних експериментах важко визначитися, на якій глибині зони змішування слід вводити більш в'язкий полімер. Дослідження змішування полімерів з різною в'язкістю за різних умов обертання шнека та зовнішнього циліндра свідчать: коли в'язкість дисперсійного матеріалу в 50...100 разів більша, ніж диспергованого, змішування відбувається ефективніше в зоні біля обертового шнека, оскільки на більш

в'язкий матеріал діють великі сили зсуву, і відбувається його кращий розподіл у менш в'язкому (рис. 3).



1 – обертовий циліндр, співвідношення в'язкості 1:100; 2 – обертовий шнек, 1:100;  
3 – обертовий зовнішній циліндр, 1:1; 4 – обертовий шнек, 1:1

Рис. 3 – Розподіл концентрації за довжиною зони змішування за різних співвідношень в'язкості дисперсійного та диспергованого матеріалу за різних умов обертання

Коли співвідношення в'язкості диспергованого матеріалу та дисперсійного середовища становить 1:1, а диспергований матеріал уводять біля зовнішнього радіуса шнека, розподіл диспергованого матеріалу в дисперсійному середовищі відбувається менш активно, ніж за інших варіантів.

У разі введення диспергованого матеріалу біля внутрішнього радіуса шнека швидкість змішування є більшою. Уже після перших витків спостерігається суттєва зміна концентрації диспергованого матеріалу, особливо за співвідношення в'язкості компонентів 1:100. За співвідношення в'язкості 1:1 необхідну довжину зони змішування слід збільшити в декілька разів.

У разі використання бар'єрного змішувача в його вхідній зоні спостерігається підвищення різниці температур компонентів (рис. 4). Вочевидь, це зумовлено входженням полімеру в бар'єрні зазори і розподільні повздовжні канали, де швидкості зсуву різняться на декілька порядків. Внаслідок цього, в зазорах між гребенями і корпусом, де перебуває близько 87,5 % дисперсійного середовища з початковою температурою 190 °C і 12,5 % диспергованого матеріалу з температурою 90 °C, відбувається дисипація енергії. Певно, це зумовило підвищення максимальної різниці температур у суміші зі 100 до 118 °C. Із подальшим рухом суміші в каналах змішувача різниця температур у кожному з його наступних перерізів зменшується.

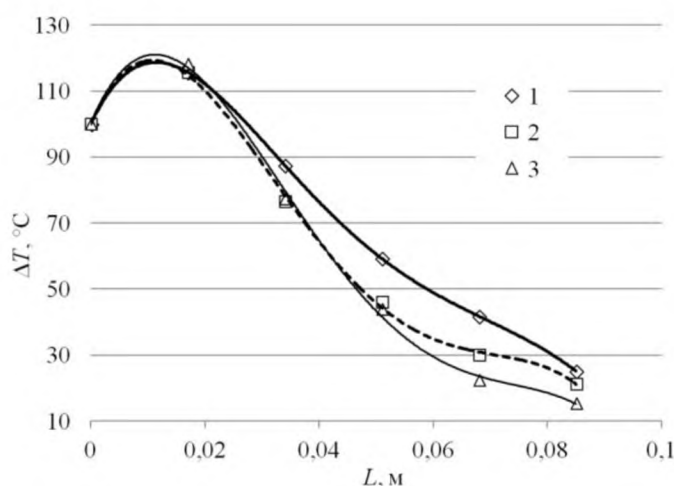


Рис. 4 – Зміна різниці температур компонентів суміші за довжиною бар'єрного змішувача за частоти обертання 30 (1), 60 (2) і 90 хв<sup>-1</sup> (3)

чисельним моделюванням із застосуванням Ansys Fluent і Polyflow із використанням як критеріїв зміни концентрацій і різниці температур суміші в контрольних об'ємах (перерізах).

У подальшому доцільно вивчити вплив конструктивного оформлення змішувачів бар'єрного типу на їхню ефективність.

#### Список використаної літератури

1. Ким В. С. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс / В. С. Ким, В. В. Скачков. – М. : Химия, 1988. – 240 с.
2. Власов С. В. Основы технологии переработки пластмасс / С. В. Власов, Э. Л. Калинин, Л. Б. Кандырин и др. ; под ред. В. Н. Кулезнёва и В. К. Гусева. – М. : Химия, 2004. – 596 с.
3. Сивецкий В. І. Комп'ютерне моделювання та проектування екструзійного полімерного устаткування / В. І. Сивецкий, Д. Е. Сідоров, О. Л. Сокольський. – К. : НТУУ «КПІ», 2007. – 188 с.
4. Сахаров А. С. Моделирование процесса смешения полимерных композиций в экструзионном смесителе барьерного типа / А. С. Сахаров, А. Е. Колосов, А. Л. Сокольский, В. И. Сивецкий // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 12. – С. 3-7.
5. Сахаров А. С. Метод конечных элементов в механике твердых тел / под общ. ред. А. Сахарова и И. Альтенбаха. – К. : Вища школа, 1982. – 480 с.
6. Киричевский В. В. Нелинейные задачи термомеханики конструкций из слабосжимаемых эластомеров / В. В. Киричевский, А. С. Сахаров. – К. : Будівельник, 1992. – 216 с.

Надійшла до редакції 15.03.2013.

Sakharov O. S., Sivetskyi V. I., Sokolskyi O. L., Kushnir M. S., Kovalenko K. H., Roslov O. V.

#### MIXING MELTS THERMOPLASTICS IN SCREW EXTRUDER

Mixing processes are important in the processing of polymeric materials, because the quality of mixing directly determines the quality of the product [1]. For science-based structural design of extrusion mixing equipment is important to know the basic patterns of mixing processes that occur in its various structural zones.

In many cases, the quality of mixing is estimated by the following integral indicators, as the accumulated deformation, time, shear stress, etc. [1-4]. Usually these indicators do not always allow for a full understanding of the mixing process. Unresolved part of the scientific problem forecast performance polymer mixing equipment is investigating the complexity of quantifying [3]. For straight mixing quality criterion accept concentration dispersed material in the dispersion environment [4]. If input component compositions with different temperatures such criteria

may be uniformity of temperature field. Research data are devoted to the numerical modeling of the mixing process by finite element method [5, 6], based on a mathematical model [4].

The purpose of research is to study the dynamics of the mixing process of polymer composites in screw extruder with a dynamic mixer barrier type.

The process of mixing considered in the zone and in the batching screw dynamic mixing barrier type for three dispersed variants introducing material into the dispersion environment. The criteria of efficiency of mixing polymers made the change the concentration of dispersed material in the dispersion medium and changes temperature uniformity of the mixture.

The numerical study of mixing two polymers with different versions of the introduction dispersed material in the dispersion environment. Simulation results show that the introduction of dispersed material in the dispersion environment at the core of a rotating screw is almost twice as fast, than when it is introduction at fixed external cylinder. To further improve the effectiveness of confusing extruder is advisable to use mixers barrier type. Using as criteria the mixing changes the distribution of concentration and temperature differences mixture showed the effectiveness of assessment processes of mixing of polymer composites in educational version Ansys Academic Teaching.

**Keywords:** dynamic mixer, modeling, homogenization, mixing.

### References

1. Kim V. S. Dispergirovanie i smeshenie v procesah proizvodstva i pererabotki plastmass [Dispersion and mixing processes in the production and processing of plastics] / V. S. Kim, V. V. Skachkov. – M. : Himija, 1988. – 240 s.
  2. Vlasov S. V. Osnovy tehnologii pererabotki plastmass [The basic technology of plastics] / S. V. Vlasov, Je. L. Kalinichev, L. B. Kandyrin i dr. ; pod red. V. N. Kuleznjova i V. K. Guseva. – M. : Himija, 2004. – 596 s.
  3. Sivetskyi V. I. Kompiuterne modeliuвання ta proektuvannia ekstruzijnogo polimernoho ustatkuvannia [Computer modeling and design of polymer extrusion equipment] / V. I. Sivetskyi, D. E. Sidorov, O. L. Sokolskyi. – K. : NTUU «KPI», 2007. – 188 s.
  4. Saharov A. S. Modelirovanie processa smeshenija polimernyh kompozicij v jekstruzionnom smesitele bar'ernogo tipa / A. S. Saharov, A. E. Kolosov, A. L. Sokol'skij, V. I. Siveckij // Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. – 2011. – № 12. – S. 3-7.
  5. Saharov A. S. Metod konechnyh jelementov v mehanike tverdyh tel [The finite element method in mechanics of solids] / pod obshh. red. A. Saharova i I. Al'tenbaha. – K. : Vishha shkola, 1982. – 480 s.
  6. Kirichevskij V. V. Nelinejnye zadachi termomehaniki konstrukcij iz slaboszhimaemyh jelastomerov [Nonlinear problems of thermomechanics designs from weakly compressible elastomers] / V. V. Kirichevskij, A. S. Saharov. – K. : Budivel'nik, 1992. – 216 s.
-