

## ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 678.023

НОВОДВОРСЬКИЙ В. В.\*, ШВЕД М. П., ШВЕД Д. М.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ РОЗПЛАВУ ПРИ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ

Полімерні матеріали широко розповсюджені, їх застосовують у всіх галузях промисловості. Експлуатаційні властивості полімерних виробів роблять їх практично незамінними у різних галузях та набули значного поширення і з кожним роком прогнозується зростання їх обсягів виробництва. Екструзія полімерів є одним з основних методів для переробки полімерних матеріалів. Однорідність розплаву є одним із основних факторів, що впливають на якість продукції і визначається рівнем змішування, тобто, перерозподілом добавок у дисперсійному середовищі при додаванні цих добавок до основного полімеру. Визначено вплив робочих умов, геометрії робочих органів та інших параметрів на температурну однорідність розплаву. Наразі уже існує багато методів визначення однорідності розплаву, які можуть використовуватися безпосередньо в процесі екструзії, або після, бути коротко або довготривалими, що власне і визначає привабливість кожного з методів. Для визначення однорідності розплаву часто використовують статистичні методи оцінювання, які були підтверджені в багатьох експериментах і є відомими. Аналіз показав, що найбільш чутливим, з описаних ним критеріїв, є індекс змішування.

Статистичні критерії оцінювання однорідності розплаву хоч і є широко поширеними, але при екструзії полімерів краще використовувати параметри, що дозволяють аналізувати стан суміші безпосередньо в процесі роботи, визначаючи ті, від яких істотно залежить процес змішування. Проаналізовано методи та критерії для перевірки якості розплаву та визначено можливість використання температурної однорідності для вимірювання та оцінювання якості розплаву безпосередньо в процесі екструзії, в такому випадку відпадає досить затратний процес відбору проб.

**Ключові слова:** змішування, екструзія полімерів, температурна однорідність

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2021.248854

\*Corresponding author: novodvorskiyvolodymyr@gmail.com

Received 12 April 2021; Accepted 30 August 2021

**Постановка проблеми.** Полімерні матеріали використовуються в усіх галузях промисловості за рахунок їх властивостей, які досягаються завдяки рівномірному розподілу компонентів легуючих добавок у розплаві. Досліджуючи однорідність розплаву автори акцентують увагу на його якості, основною характеристикою якої може бути температурна однорідність [1-5].

Досягнення кращого змішуючого ефекту дозволяє зменшити використання легуючих добавок, таких як барвники, пластифікатори, стабілізатори та інші, що зменшує можливість виникнення браку та веде до економії сировини та енергії для переробки цієї сировини.

**Метою статті** є аналіз параметрів, що впливають на змішуючу здатність екструзійного обладнання при переробці полімерів, а також методів визначення механічної та температурної однорідності розплаву при екструзії полімерів.

#### **Виклад основного матеріалу.**

Класично температура і тиск є найважливішими параметрами при екструзії полімерів. Завдяки досягненню температурної однорідності можливо отримати продукцію високої якості, але таку однорідність неможливо досягнути лише налаштуванням відповідних температур нагрівачів, а необхідно розуміти вплив різноманітних параметрів процесу на температуру розплаву та його однорідність. Після певного значення швидкості обертання черв'яка продуктивність установки зростає, а якість перемішування падає, що обумовлено незмінною геометрією черв'яка [6].

Якість виробів із полімерів залежить від їх фізико-механічних та теплофізичних характеристик, а якість розплаву з якого формуються вироби залежить в основному, від реологічних властивостей полімерних композицій, температури та від механічної та температурної однорідності розплаву полімеру.

Аналіз вище приведених параметрів показав, що тільки два останні параметри можливо змінювати на стадії підготовки розплаву за рахунок зміни геометрії робочих органів та регулювання режимів роботи в процесі екструзії.

У роботі [7], для оцінки ступеня змішування, сформульований критерій в основі якого лежить оцінка коливань температури розплаву від середнього значення. Як критерій достатньої якості температурної однорідності розплаву встановлено, що максимальна амплітуда коливань температури розплаву не повинна перевищувати двох градусів.

Автори також прийшли до висновку, що коливання температури розплаву зростає із збільшенням масової витрати полімеру, глибини шнекового каналу та питомої теплоємності розплаву і зменшується зі збільшенням довжини робочого органу, ширини шнекового каналу і теплопровідності розплаву. Очевидно і те, що параметри, які збільшують швидкість плавлення полімеру, зменшують коливання температури [7].

Зазвичай, класичні термопари, що використовуються для вимірювання температури, забезпечують її вимірювання лише в одній точці і, таким чином, не надають інформації про температурні коливання у потоці розплаву [2]. Експериментально було показано, що температура розплаву в процесі суттєво змінювалася в поперечному перерізі потоку розплаву, тому термопари, які вимірюють значення в одній точці не здатні визначати коливання температури. В такому випадку пропонується використовувати сіткові термопари [4].

Результати експериментальних досліджень, що приведені в роботі [5], показують, що температура зони дозування має найбільший вплив на температурну однорідність розплаву, при цьому вплив температури зон живлення та плавлення є мінімальним.

У роботі [3] кожен полімер демонстрував значно різну теплову поведінку при різній геометрії гвинтів та налаштуваннях процесу. Ці спостереження підкреслюють важливість відповідного вибору геометрії гвинтів та встановлення умов екструзії для даного полімеру, щоб уникнути непотрібних теплових коливань, які можуть зашкодити якості продукту.

В роботі [8] було виявлено, що невеликі зміни швидкості руху твердої пробки можуть мати великий вплив на температурне поле. А також виявили, що невеликі зміни (на 20%) в реології полімеру (коефіцієнт консистенції, індекс розплаву або енергія активації) можуть призвести до значних змін пікового тиску. Також було встановлено, що коли гідравлічний опір потоку високий, коливання температури зменшуються, тоді як падіння тиску в потоці призводить до значних коливань.

У роботі [9] безпосередньо спостерігали процес екструзії за скляним вікном фіксуючи процес на фотокамеру та аналізуючи знімки по інтенсивності світла кожного пікселя. Було визначено, що чим більша швидкість обертання шнека, тим коротший час перебування розплаву в екструдері, отже, гірша якість змішування і те, що температура впливає на якість змішування менше, ніж швидкість шнека. Також вказано максимальну швидкість обертання шнека після якої неможливо отримати прийнятну якість змішування

Небажані теплові умови можуть спричинити різні проблеми такі, як деградація розплаву, нестабільність розмірів, погіршення механічних властивостей тощо. Точний термічний контроль є ключовим для досягнення необхідного рівня теплової стабільності процесу, де стабільність визначається з точки зору просторової та часової термічної однорідності [10].

У роботах [11-14] пропонується визначати рівень перемішування при екструзії по енергії, що споживається відповідною зоною одночерв'ячного екструдера, який було умовно розділено по зонах в яких вимірювалися різні параметри.

Моніторинг споживання енергії в реальному часі для кожного компонента бажаний для оптимізації загальної енергоефективності. При цьому було визначено, що висока енергоефективність не означає кращу якість розплаву [12].

Автори [12, 13] прийшли до висновку, що швидкість обертання шнека є найбільш значимим параметром, який впливає на споживання потужності електродвигуном екструдера.

Температурна та механічна однорідності взаємозв'язані і при досягненні температурної однорідності можна стверджувати про досягнення і механічної та відповідної якості розплаву, що власне і стверджуються в роботах [2-5].

Однорідність розплаву визначається рівнем змішування. Змішування – це технологічний процес, що застосовується при введенні в полімер ряду добавок при яких вони перерозподіляються у дисперсійному середовищі.

Статистична теорія змішування передбачає, що розподілення числа частинок дисперсної фази у відібраних пробах має підпорядковуватися біноміальному закону, який описує ймовірність розподілення певного компонента в суміші [1]:

$$p(x) = \frac{n!}{b!(n-b)!} q^b (1-q)^{n-b} \quad (1)$$

Де  $x=b/n$  – прогнозований відносний вміст диспергуючої фази у пробі ( $b$  - прогнозоване число частинок диспергуючої фази у пробі,  $n$  – загальне число граничних частинок в пробі);  $q$  - відносний вміст диспергуючої фази у суміші.

В роботах [1, 15] розглядаються критерії (2-7) для оцінювання якості змішування, які базуються на методах статистичного аналізу.

Мірою критичної неоднорідності є генеральна дисперсія  $\sigma^2$ , що може бути визначена як:

$$\sigma^2 = q \frac{(1-q)}{n} \quad (2)$$

При аналізі відібраних проб використовують отриманні дані для визначення середньої концентрації  $\bar{x}$  і експериментальної дисперсії диспергованої фази  $s^2$  в пробах та використовують як показник якості змішування:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i^2 - N \cdot \bar{x}^2) \quad (3)$$

де,  $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ ;  $N$  – число паралельних проб,  $x_i$  - значення концентрації диспергуючої фази в  $i$ -й пробі.

де,  $q$ - частка частинок ключового компонента.

Часто для оцінки однорідності композиції використовують індекс змішування:

$$I_1 = \frac{\sigma^2}{s^2} \quad (4)$$

Показник  $I$  змінюється від 0, що відповідає цілковито незмішаній системі до 1, що відповідає ідеально змішаній системі.

Однорідність суміші також характеризують наступним індексом змішування  $I$  (критерій Лейсі):

$$I_2 = \frac{\sigma_0^2 - s^2}{\sigma_0^2 - \sigma^2} \quad (5)$$

де,  $\sigma_0^2 = q(1-q)$  – дисперсія вихідної системи.

В якості індексу змішування використовують також і простіший показник:

$$I_3 = \frac{\sigma}{s} \quad (6)$$

Найбільш чутливим з представлених критеріїв є індекс змішування  $I_1$  з рівняння 4, [1].

Кількість полімерних добавок в багатьох випадках, як правило, не перевищує 5% від їх маси, тому до якості змішування пред'являють високі вимоги. Якість змішування часто оцінюється коефіцієнтом неоднорідності, який визначається на основі експериментальних даних. В процесі змішування через певні проміжки часу із змішувача в різних точках відбирають проби, в яких визначають масову концентрацію компонента вміст якого в суміші найменший, наприклад пігменту, стабілізатора і т.д. Коефіцієнт неоднорідності суміші розраховується по формулі [2]:

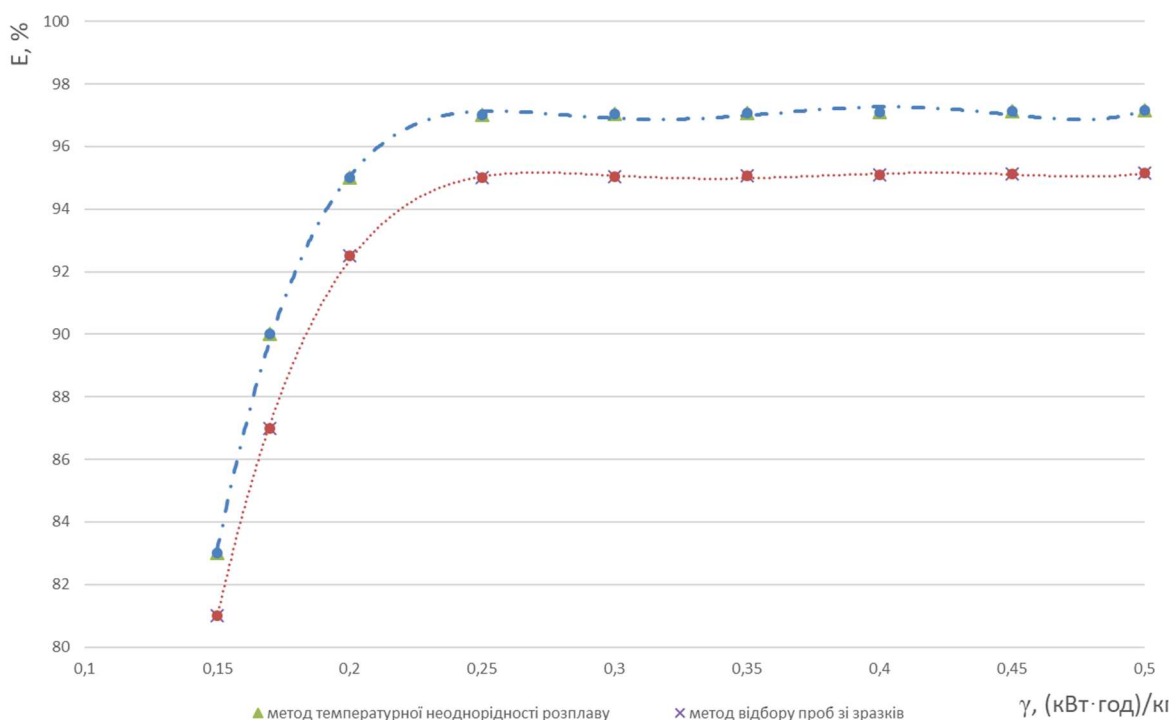
$$\varphi = \frac{100}{x_n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_n)^2 N_i}{N-1}} \quad (8)$$

де  $x_n$  – значення концентрації компонента при рівномірному розподіленні.

Статистичні критерії оцінювання однорідності широко поширені [1], але при екструзії полімерів краще використовувати параметри, що дозволяють аналізувати стан суміші безпосередньо в процесі роботи, визначаючи параметри від яких істотно залежить процес змішування.

В найкращому випадку вимірювання однорідності доцільне при безпосередній оцінці розплаву в процесі екструзії, в такому випадку виключається досить затратний процес відбору проб і їх подальший аналіз.

Авторами проведені попередні дослідження, які передбачали статистичне оцінювання ефективності змішування від інтенсивності підведеної енергії по класичних вищеприведених методиках з відбором проб з охолоджених зразків полімеру. Одночасно, при тих же умовах, сканувалося температурне поле розплаву по перерізу каналу за допомогою багатоточкової сіткової термопари, яка встановлювалася на виході з екструдера. Аналогічне статистичне оцінювання ефективності змішування від інтенсивності підведеної енергії по неоднорідності температурного поля та їх порівняльна характеристика (рис. 1), показали, що розбіжність в оцінюванні ефективності змішування за двома вищеприведеними методиками не перевищує 8%. Тому метод оцінки гомогенізації розплаву по неоднорідності температурного поля може бути використаний в промисловості при проектуванні, модернізації чи експлуатації полімерпереробного обладнання.



**Рис. 1 – Залежність ефективності змішування від інтенсивності при сталій продуктивності**

**Висновок.** Проаналізовано вплив режимів роботи та геометрії робочих органів екструзійного обладнання на ефективність змішування. Визначено взаємозв'язок між механічною та температурною однорідністю розплаву та обґрунтована можливість оцінювати гомогенність розплаву по температурній однорідності безпосередньо в реальному процесі екструзії на працюючому обладнанні.

**Перспективи подальших досліджень.** В екструзійному обладнанні взаємозв'язані процеси живлення, плавлення та гомогенізації, які виконуються одночасно одним робочим органом - черв'яком, що унеможливує оптимізацію кожного із них. Тому екструзійне обладнання, в більшості випадків, працює не на повну потужність, причиною чого є недостатня гомогенність розплаву. За результатами даних досліджень планується створення нового універсального типу екструзійного обладнання, де вищезазвані процеси будуть розділені з можливістю автономного керування ними з метою оптимізації кожного із них. Процес гомогенності розплаву в такій установці планується контролювати по його температурній однорідності.

#### Список використаної літератури

1. Торнер Р.В., Акутин М.С., Оборудование заводов по переработке пластмасс. М.: Химия. 1986. 400 с.
2. Wood A.K., 2003, Determination of melt temperature and velocity profiles in flowing polymer melts, pp. 1378-1381.

3. Abeykoon, C., et al., 2014, Investigation of the temperature homogeneity of die melt flows in polymer extrusion, *Polymer Engineering and Science*, 54(10), pp. 2430-2440.
4. Abeykoon, C., 2014, A novel model-based controller for polymer extrusion, *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 22(6), 1413-1430.
5. Abeykoon, C., et al., 2014, Dynamic modelling of die melt temperature profile in polymer extrusion, *IEEE Conference on Decision and Control*, pp.2550-2555.
6. N. Domingues, A. Gaspar-Cunha, J. A. Covas, 2008, Global mixing indices for single screw extrusion, Springer, Suppl 1:723–726, DOI 10.1007/s12289-008-0317-4.
7. Wilczyński, K., 1988, A method for estimation of polymer melt temperature fluctuation in a single screw extrusion process, *Polymer Engineering & Science*, 28(7), 429-433.
8. L. X. Bu, Y. Agbessi, Y. Beraux, and J.-Y. Charneau, 2018, Thermal homogeneity of plastication processes in single-screw extruders, P.6, doi: 10.1063/1.5034974.
9. Wong, A. Y., and Lam, Y. (2008). Visualization study on the dynamic mixing quality during single-screw extrusion, *Journal of Polymer Research*, 15(1), 11-19.
10. Abeykoon, C., et al., 2020, Investigation of the temperature homogeneity of die melt flows in polymer extrusion, *Polymer Engineering and Science*, 54(10), pp. 2430-2440, <https://doi.org/10.1002/pen.23784>.
11. Martínez-Pastor, J., Franco, P., Moratilla, D., Lopez-Garcia, P. J. 2018, Optimization of Forming Processes for Gelled Propellant Manufacturing, In *Modeling and Simulation in Industrial Engineering*, Springer, (pp. 1-28).
12. J. Deng et al., 2013, Energy consumption analysis for a single screw extruder, Springer, 533-540.
13. Chamil Abeykoon et al., 2010, Modelling the effects of operating conditions on motor power consumption in single screw extrusion, Springer, 9-20.
14. A. Shcherbinin, A. Terlych, E. Subbotin, 2012, Extruder power consumption, Russian electrical engineering, №11, pp. 609-612, DOI: 10.3103/S1068371212110132.
15. Кавецкий Г.Д. Оборудование для производства пластмасс. М.:Химия. 1986, 224 с.

---

**Volodymyr Novodvorskyi, Nikolai Shved, Dmytro Shved**

#### **EVALUATION OF MELT QUALITY DURING POLYMER EXTRUSION**

*Polymer materials are widely spread and used in all industry sectors. The operating properties of polymer products make them practically indispensable in various industries. They have acquired widespread popularity and their production volumes are predicted to grow every year. The extrusion of polymers is one of the main methods for their processing. The melt uniformity is one of the main factors that influence the quality of the products and is determined by the level of mixing, i.e., by the redistribution of additives in a dispersion medium when these additives are introduced into the main polymer. The influence of working conditions, geometry of working bodies and other parameters on the melt temperature uniformity was determined. Nowadays, there are a lot of methods for determining the melt uniformity. They can be used indirectly in or after the extrusion process and can be short or long lasting, which in fact determines the acceptability of each of the methods. To determine the melt uniformity, statistical evaluation methods, which have been verified by many experiments and are well known, are often used. The analysis showed that the mixing index is most sensitive among the criteria described.*

*Although statistical criteria of evaluating the melt uniformity are widespread, it is better to use parameters that allow the state of the mixture to be analyzed directly in the work process for the extrusion of polymers, to identify those that depend on the mixing process. Methods and criteria for verifying the melt quality were analyzed and potential use of their temperature uniformity for measuring and evaluating the melt quality directly in the extrusion process, to eliminate the costly sampling process, was determined.*

**Keywords:** mixing, polymer extrusion, temperature homogeneity

#### **References**

1. Torner R.V., Akutyn M.S., Oborudovanye zavodov po pererabotke plastmass. M.: Khymyia. 1986. p. 400.
2. Wood A.K., 2003, Determination of melt temperature and velocity profiles in flowing polymer melts, pp. 1378-1381.
3. Abeykoon, C., et al., 2014, “Investigation of the temperature homogeneity of die melt flows in polymer extrusion”, *Polymer Engineering and Science*, 54(10), pp. 2430-2440.
4. Abeykoon, C., 2014, A novel model-based controller for polymer extrusion, *IEEE Transactions on fuzzy systems*,

- 22(6), 1413-1430.
5. Abeykoon, C., et al., 2014, Dynamic modelling of die melt temperature profile in polymer extrusion, *IEEE Conference on Decision and Control*, pp.2550-2555.
  6. N. Domingues, A. Gaspar-Cunha, J. A. Covas, 2008, Global mixing indices for single screw extrusion, Springer, Suppl 1:723–726, DOI 10.1007/s12289-008-0317-4.
  7. Wilczyński, K., 1988, A method for estimation of polymer melt temperature fluctuation in a single screw extrusion process, *Polymer Engineering & Science*, 28(7), 429-433.
  8. L. X. Bu, Y. Agbessi, Y. Bereaux, and J.-Y. Charneau, 2018, Thermal homogeneity of plastication processes in single-screw extruders, P.6, doi: 10.1063/1.5034974.
  9. Wong, A. Y., and Lam, Y. (2008). Visualization study on the dynamic mixing quality during single-screw extrusion, *Journal of Polymer Research*, 15(1), 11-19.
  10. Abeykoon, C., et al., 2020, Investigation of the temperature homogeneity of die melt flows in polymer extrusion, *Polymer Engineering and Science*, 54(10), pp. 2430-2440, <https://doi.org/10.1002/pen.23784>.
  11. Martínez-Pastor, J., Franco, P., Moratilla, D., Lopez-Garcia, P. J. 2018, Optimization of Forming Processes for Gelled Propellant Manufacturing, In *Modeling and Simulation in Industrial Engineering*, Springer, (pp. 1-28).
  12. J. Deng et al., 2013, Energy consumption analysis for a single screw extruder, Springer, 533-540.
  13. Chamil Abeykoon et al., 2010, Modelling the effects of operating conditions on motor power consumption in single screw extrusion, Springer, 9-20.
  14. A. Shcherbinin, A. Terlych, E. Subbotin, 2012, Extruder power consumption, Russian electrical engineering, №11, pp. 609-612, DOI: 10.3103/S1068371212110132.
  15. Kavetskyi H.D, Oborudovanye dlia proyzvodstva plastmass, M. Khymyia. 1986, 224