

СІВЕЦЬКИЙ В. І., к.т.н., проф.; СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., к.т.н., доц.;
КУШНІР М. С., асп.; КУРИЛЕНКО В. М., студ.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

МОДЕЛЮВАННЯ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВІВ ТЕРМОПЛАСТІВ У БАР'ЄРНОМУ ЗМІШУВАЧІ

Проведено чисельне моделювання гомогенізації розплаву полімеру в динамічному змішувачі бар'єрного типу. Наведено результати, що дозволяють досліджувати динаміку зміни температури під час течії полімерних матеріалів у змішувальних елементах та вибрати оптимальні конструктивні параметри змішувальних елементів, а також режими гомогенізації полімерних композицій.

Ключові слова: динамічний змішувач, моделювання, гомогенізація, полімер.

© Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Кушнір М. С., Куриленко В. М., 2014.

Постановка проблеми. Процеси змішування й гомогенізації в черв'ячних машинах мають важливе значення при переробці полімерних матеріалів, оскільки якість змішування визначає якість виробу [1]. Для науково обгрунтованого конструктивного оформлення екструзійно-змішувального устаткування важливо знати основні закономірності змішування та гомогенізації, що відбуваються в його конструктивних зонах.

Аналіз попередніх досліджень. У багатьох випадках якість змішування оцінюється за накопиченою деформацією зсуву, напруженням зсуву тощо [1]. Ці показники не завжди надають повне уявлення про змішування. Невирішеною частиною наукової проблеми прогнозування змішувальної ефективності полімерного устаткування є складність кількісного оцінювання останньої [2]. Прямим критерієм оцінки якості змішування є концентрація диспергованого матеріалу в дисперсійному середовищі [3]. У разі введення компонентів композиції з різними температурами цим критерієм може бути рівномірність температурного поля, тобто рівень температурної гомогенізації суміші.

Метою досліджень є аналіз температурної гомогенізації полімерних композицій у черв'ячному екструдері з динамічним змішувачем бар'єрного типу.

Виклад основного матеріалу. Температурну гомогенізацію розплаву полімеру розглядатимемо в динамічному змішувачі бар'єрного типу. Як критерій ефективності візьмемо однорідність розподілу температур у суміші при проходженні каналів змішувача на різних перерізах за довжиною його робочого каналу.

Математичну модель багатокомпонентної суміші, частковим випадком якої є деформований стан полімерного матеріалу в каналі бар'єрного змішувача, та її дискретизацію методом скінченних елементів (МСЕ) наведено в праці [3].

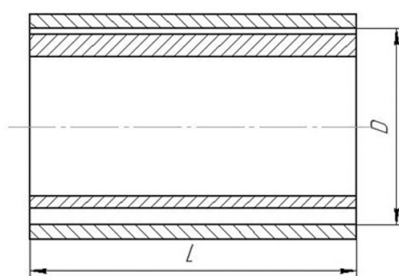
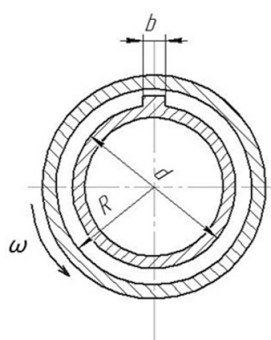
Рух суміші та її складових розглядається в цій праці в рамках механіки суцільних середовищ із такими припущеннями:

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

2. Для кожної компоненти є справедливими закони збереження маси, імпульсу та енергії. Маса, імпульс та енергія суміші дорівнює сумі мас, імпульсів та енергій її компонент. Взаємодія між компонентами суміші не змінює загальну величину маси, імпульсу та енергії суміші.

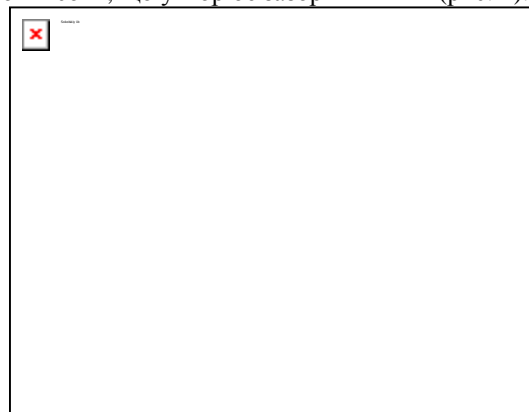
Чисельне моделювання гомогенізації полімеру виконано у програмному комплексі ANSYS за допомогою програми Polyflow.

Для визначення впливу зазора між гребнем змішувача та внутрішньою поверхнею корпусу розглядали кільцевий канал зі змішувачем, який містить один гребінь різної висоти, що утворює зазори 1 і 2 мм (рис. 1).



а

б



**Рис. 1 – Схема змішувача з одним гребенем:
а – конструктивна схема; б – розрахункова схема робочого каналу**

Чисельне моделювання вели для поліетилену високої густини ПЕВГ 15803–020. Реологічні й теплофізичні властивості матеріалу за температури 463 К: густина $\rho = 975 \text{ кг/м}^3$, питома масова теплоємність $c_p = 2,0 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. В'язкість задаємо степеневим законом Carreau-Yasuda:

$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left[1 + (t\dot{\gamma})^a \right]^{\frac{n-1}{a}},$$

де μ_0 – в'язкість зсуву за нульової поперечної швидкості; μ_∞ – в'язкість зсуву за високої поперечної швидкості; a – індекс, що контролює перехід від ньютонівської до степеневій поведінки; n – енергетичний показник; t – обернена швидкості зсуву, за якої відбувається перехід від ньютонівської до степеневій поведінки рідини; $\dot{\gamma}$ – швидкості зсуву.

Для вибраного матеріалу, якщо $\mu_\infty = 0$, $\mu = 0,1130877 \cdot 10^6 \cdot (1 + 1,34607\dot{\gamma}^{0,2620345})^{-2,4332}$.

Моделювання здійснюємо, надаючи обертання внутрішньому циліндру. Корпус вважаємо нерухомим. Дослідження ведемо як за умови прилипання, так і проковзування.

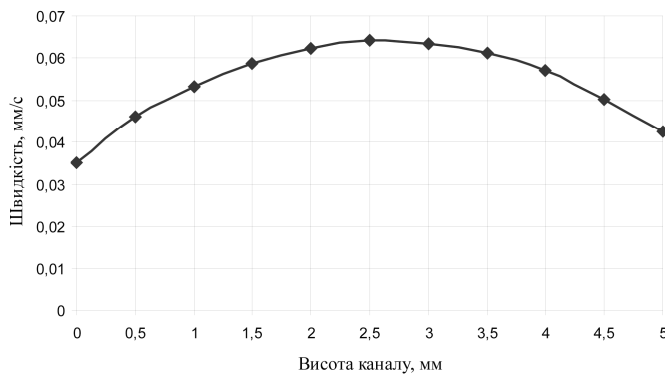
Межові умови: температура диспергованого матеріалу $t_1 = 363 \text{ К}$, дисперсійного середовища, змішувача і корпусу $t_2 = t_{3\text{м}} = t_{\text{к}} = 463 \text{ К}$. Швидкість руху полімеру на вході в канал змішувача – 60 мм/с. Геометричні параметри змішувача: довжина $L = 100 \text{ мм}$, внутрішній діаметр $D = 60 \text{ мм}$, діаметр внутрішнього циліндра $d = 50 \text{ мм}$, ширина гребеня $b = 7 \text{ мм}$, зовнішній радіус $R = 28 \text{ мм}$.

За умови прилипання в межових шарах швидкості дорівнюють нулю ($V_{\text{гр}} = 0$). Довжину вхідної кільцевої ділянки вибираємо такою, щоб на вході в зону бар'єрного змішувача виконувалася умова параболічного розподілу швидкостей. Ураховуємо коефіцієнт проковзування на стінці, визначений у праці [4] (рис. 2).

Щоб оцінити розподіл температури в робочих зазорах змішувача з одним бар'єром, чисельні дослідження ведемо в різних перерізах за висотою зазора між корпусом і гребенем, корпусом і ротором.

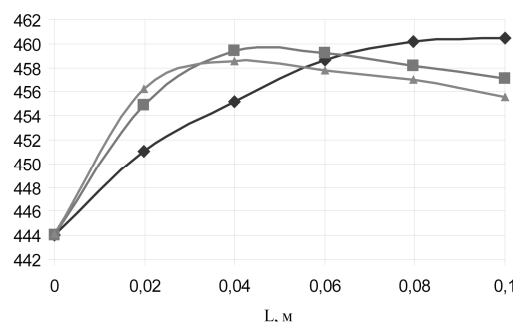
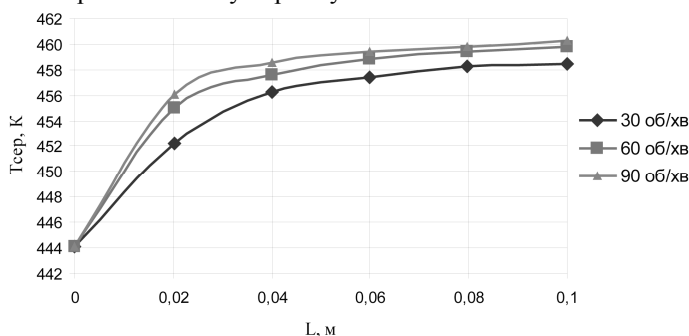
Результати свідчать, що з набіганням на гребень в робочому каналі спостерігається інтенсивний перерозподіл температури (рис. 3). Це спричинено зміненням режиму течії матеріалу перед гребенем і в зазорах.

Змінення висоти кільцевого каналу збільшує гідравлічний опір, що зумовлює розтікання диспергованого матеріалу в дисперсійному середовищі. Із збільшенням частоти обертання внутрішнього циліндра інтенсивність деформування підвищується. Крок руху за спіраллю в каналі змішувача зменшується.



**Рис. 2 – Епюра швидкості в кільцевому зазорі
за умови проковзування**

60 хв^{-1} на відстані 0...0,04 м спостерігається середня температура швидко зростає до 459 К. Далі відбувається її зменшення на 3 К завдяки змішуванню з дисперсійним середовищем. Для 90 хв^{-1} спостерігаємо схожу картину.

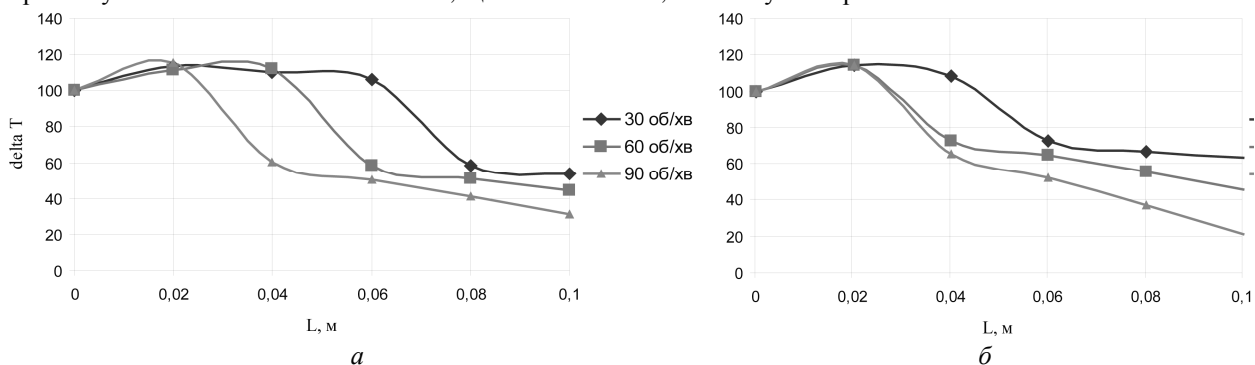


Коли зазор між корпусом і гребенем становить 2 мм (рис. 3, а), із збільшенням частоти обертання з 30 до 90 хв^{-1} різниця температур зменшується з 54 до 32 К, якість гомогенізації зростає в 1,67 раза. Середня температура на виході за частоти обертання 30 хв^{-1} є найменшою і становить 458 К. Це свідчить, що температура не встигає усереднитися. За частоти обертання 90 хв^{-1} вирівнювання температури відбувається вже на відстані 0,06 м від входу.

Коли зазор між корпусом і гребенем становить 1 мм (рис. 3, б), розподіл температури є схожим. Для 30 хв^{-1} нахил кривої є плавним за всією довжиною. Для

*a**b***Рис. 3 – Розподіл середньої температури за довжиною змішувача із зазором: *a* – 2 мм; *b* – 1 мм**

Різниця температур на виході є меншою, аніж різниця за умов прилипання (рис. 4). Це пов'язано не лише зі зміною інтенсивності гомогенізації, але й зі зменшенням дисипативних явищ, менших за умов проковзування. Вона становить 465 К, що на 7 К менше, аніж за умов прилипання.

**Рис. 4 – Розподіл різниці температур за довжиною змішувача із зазором: *a* – 2 мм; *b* – 1 мм**

Зменшення різниці температур на виході з робочого каналу є швидшим за більших частот обертання. Для 30 хв^{-1} інтенсивність гомогенізації є недостатньою, для 60 і 90 хв^{-1} різниця температур швидко зменшується внаслідок зростання швидкості зсуву і перерозподілу швидкостей до бар'єра і за ним. Зі зменшенням зазора з 2 до 1 мм рівномірність температурного поля покращується, що свідчить про доцільність оптимізації саме цього конструктивного параметра в промислових змішувачах бар'єрного типу.

Висновок. Моделювання гомогенізації полімерних матеріалів у бар'єрному змішувачі засвідчило доцільність використання як критерія оцінки її ефективності розподілу або різниці температур у контрольних перерізах. Подальші дослідження передбачають вивчення впливу технологічних і конструктивних параметрів 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. – 240с.
2. *Сівецький В. І.* Комп'ютерне моделювання та проектування екструзійного полімерного устаткування / В. І. Сівецький, Д. Е. Сідоров, О. Л. Сокольський. – К. : НТУУ «КПІ», 2007. – 188 с.
3. *Моделирование* процесса смешения полимерных композиций в экструзионном смесителе барьерного типа / А. С. Сахаров, А. Е. Колосов, А. Л. Сокольский, В. И. Сивецкий // Хим. и нефтегазовое машиностр. – 2011. – № 12. – С. 3-7.

Дослідження плавлення полімеру в каналі черв'ячного екструдера / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський та ін. // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київ. політехн. ін-т» ; сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2012. – № 1 (9). – С. 63-66.