

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

МОДЕЛЮВАННЯ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВІВ ТЕРМОПЛАСТІВ У БАР'ЄРНОМУ ЗМІШУВАЧІ З УРАХУВАННЯМ ЕФЕКТУ ПРИСТІННОГО ПРОКОВЗУВАННЯ

Проведено чисельне моделювання процесу температурної гомогенізації розплаву полімеру в динамічному змішувачі бар'єрного типу. Наведено результати моделювання, що дозволяють досліджувати динаміку зміни температур при течії полімерних матеріалів у змішувальних елементах, здійснювати вибір оптимальних конструктивних параметрів змішувальних елементів або обирати технологічні режими гомогенізації полімерних композицій.

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

© Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Кушнір М. С., Івіцький І. І., 2016.

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

Внаслідок різкого збільшення швидкості екструзії виникає ризик виносу непроплавлених частинок полімеру в зону формування, що може призвести до дефектів у виробі. Тому необхідно інтенсифікувати зсувні деформації та перемішування розплаву, що сприятиме остаточному плавленню частинок полімеру та його гомогенізації. Найкращим методом досягнення достатньої гомогенізації розплаву є наявність на черв'яку зони змішування. Такі зони корисні для зменшення розмірів непроплавлених частинок полімеру до їх повного розплавлення, статистичного розподілення наповнювачів і для зменшення коливань температури розплаву перед виходом у зону формування.

Аналіз попередніх досліджень. У багатьох випадках якість змішування оцінюється за такими інтегральними показниками, як накопичена деформація й напруження зсуву [1–4]. Зазвичай, ці показники не дають можливості отримати повне уявлення про змішування. Невирішеною частиною наукової проблеми прогнозування змішувальної ефективності полімерного устаткування є складність її кількісного оцінювання [3]. Прямим критерієм оцінки якості змішування є концентрація диспергованого матеріалу в дисперсійному середовищі [4]. У разі введення компонентів композиції, що мають різні температури, таким критерієм може бути рівномірність температурного поля, тобто рівень температурної гомогенізації суміші. Ці дослідження присвячені чисельному моделюванню гомогенізації методом скінченних елементів [5, 6] на базі математичної моделі [4].

Метою статті є вивчення динаміки процесу та якості температурної гомогенізації полімерних композицій в черв'ячному екструдері, оснащеному динамічним змішувачем бар'єрного типу.

Викладення основного матеріалу. Процес температурної гомогенізації розплаву полімеру розглядають у динамічному змішувачі бар'єрного типу. Як критерій ефективності гомогенізації полімерів прийнято однорідність розподілу температур у суміші при проходженні каналів змішувача на різних перерізах за довжиною його робочого каналу.

Математичну модель багатокомпонентної суміші, частинним випадком якої є деформований стан полімерного матеріалу в каналі бар'єрного змішувача, і її дискретизацію методом скінченних елементів (МСЕ) наведено в праці [4]. 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 середовища діють закони збереження маси, імпульсу та енергії. 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.

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

Для визначення впливу пристінних ефектів у процесі гомогенізації розглянуто кільцевий канал із модельним змішувачем, який містить один гребінь, що утворює зазор 1 мм (рис. 1).

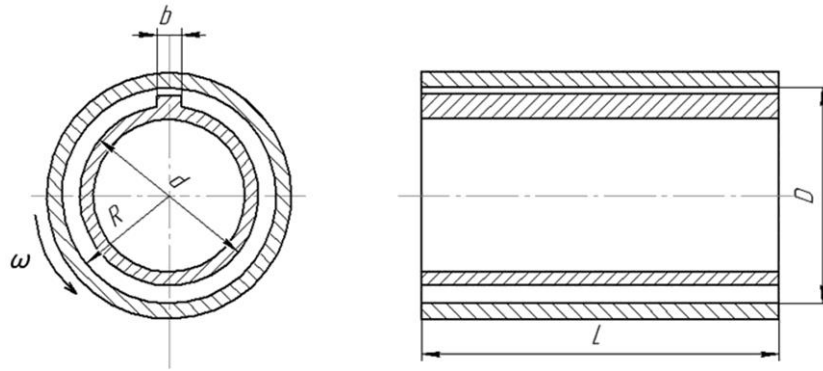


Рис. 1 – Схема модельного змішувача з одним гребенем

У цій статті наведено результати чисельного моделювання для температурної гомогенізації поліетилену високої густини марки ПЕВГ 15803-020. Реологічні й теплофізичні властивості матеріалу взято за температури 463 К: густина $\rho = 975 \text{ кг/м}^3$, теплоємність $c_p = 2,0 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, коефіцієнт теплопровідності $\lambda_T = 0,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. В'язкість задають степеневим законом Carreau-Yasuda:

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

де μ_0 – в'язкість зсуву за нульової поперечної швидкості; μ_∞ – в'язкість зсуву за високої поперечної швидкості; a – індекс, що описує перехід від ньютонівської до степеневі поведінки; n – енергетичний показник; t – шкала часу (тобто обернена швидкості зсуву, за якої поведінка рідини змінюється з ньютонівської до степеневі); $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву.

$$\text{Для досліджуваного матеріалу } \mu = 113087,7 \cdot \left(1 + 1,34607\dot{\gamma}^{0,2620345} \right)^{-2,4332}.$$

Межові умови. Швидкість обертання надаємо внутрішньому циліндру. Корпус вважаємо нерухомим. Досліджуємо умови прилипання й проковзування. Температури: диспергованого матеріалу $t_1 = 363 \text{ К}$; дисперсійного середовища $t_2 = 463 \text{ К}$; змішувача $t_{зм} = 463 \text{ К}$; корпуса $t_k = 463 \text{ К}$. За умов прилипання швидкості в межових шарах дорівнюють нулю ($V_{гр} = 0$). Довжину вхідної ділянки вибрано такою, щоб на вході в зону бар'єрного змішувача спостерігався параболічний розподіл швидкостей. Коефіцієнт проковзування на стінці (рис. 2) було визначено експериментальним шляхом [7]. Швидкість руху полімеру на вході в канал змішувача – 60 мм/с. 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 гребеня $R = 29 \text{ мм}$.

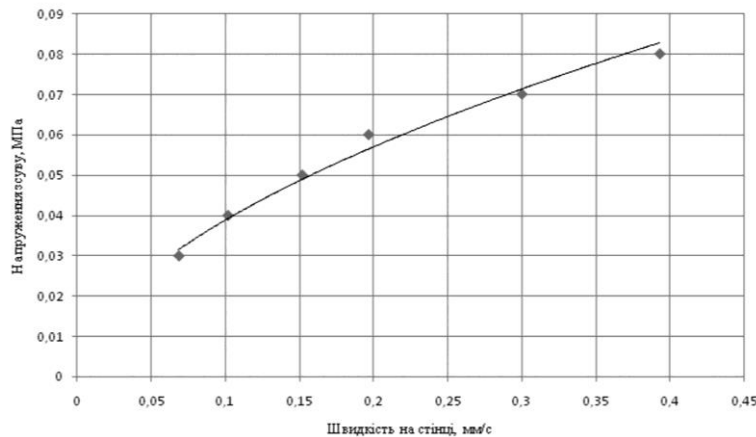


Рис. 2 – Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для ПЕВГ 15803-020 [7]

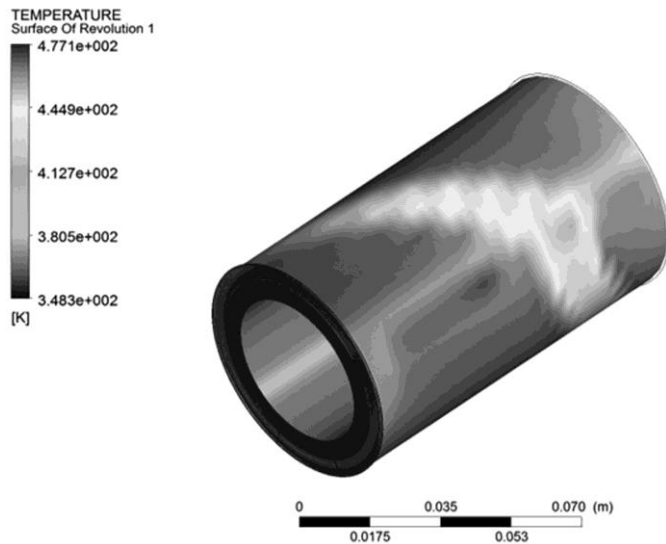


Рис. 3 – Розподіл температур у поздовжньому циліндричному перерізі робочого каналу на відстані 0,5 мм за швидкості обертання 60 хв⁻¹

Щоб оцінити температурне поле в робочих зазорах змішувача з одним бар'єром, досліджували різні площини за висотою зазора між корпусом і гребенем, корпусом і ротором (рис. 3). Установлено, що при набіганні на гребень внаслідок зміни режиму течії матеріалу перед гребенем, у зазорі над ним і за ним спостерігається інтенсивний перерозподіл температури. Унаслідок різкої зміни висоти кільцевого каналу зростає гідравлічний опір, що зумовлює розтікання диспергованого матеріалу в дисперсійному середовищі. Із збільшенням швидкості обертання інтенсивність деформування зростає. Крок руху за спіраллю в каналі змішувача зменшується.

Із зменшенням висоти зазора між поверхнею корпусу і гребенем інтенсивність розтікання компонентів

суміші зростає. У зазорі температура підвищується значно більше. За гребенем спостерігається зона усереднення температури суміші. Це зумовлено циркуляцією потоків матеріалу за висотою кільцевого каналу.

На рис. 4 наведено результати розрахунків середньої температури суміші у вузлових точках робочих каналів змішувача для шести перерізів за довжиною.

Із збільшенням швидкості обертання з 30 до 90 хв⁻¹ (рис. 4, а) різниця температур зменшилася з 54 до 32 К, тобто якість гомогенізації виросла в 1,67 раза. За більшої швидкості вирівнювання температури відбувається краще. Середнє значення температури на виході за 30 хв⁻¹ є найнижчим (458 К), нахил кривої плавно змінюється за всією довжиною. Це свідчить про те, що температура не встигла усереднитися. За 60 хв⁻¹ на відстані від 0 до 0,04 м спостерігається різке зростання середньої температури до 459 К. Далі відбувається її зниження на 3 К завдяки змішуванню з диспергованим середовищем. За 90 хв⁻¹ на відстані від 0 до 0,04 м середня температура зростає з 444 до 459 К, а далі зменшується до 457 К завдяки змішуванню з диспергованим матеріалом.

Зменшення різниці температур на виході з робочого каналу змішувача пришвидшується із зростанням швидкості обертання. За 30 хв⁻¹ інтенсивність гомогенізації ще недостатня, за 60 і 90 хв⁻¹ відбувається різке скорочення різниці температур, обумовлене зростанням швидкості зсуву й перерозподілом швидкостей перед бар'єром і за ним.

За різної швидкості обертання за умов проковзування розподіл середньої температури за довжиною змішувача відбувається за схожою схемою. Різниця температур у вихідному перерізі за 90 хв⁻¹ становить 21 К (рис. 4, б), тобто є меншою, ніж за умов прилипання. Максимальна температура за умов прилипання становить 474 К, за умов проковзування – 466 К.

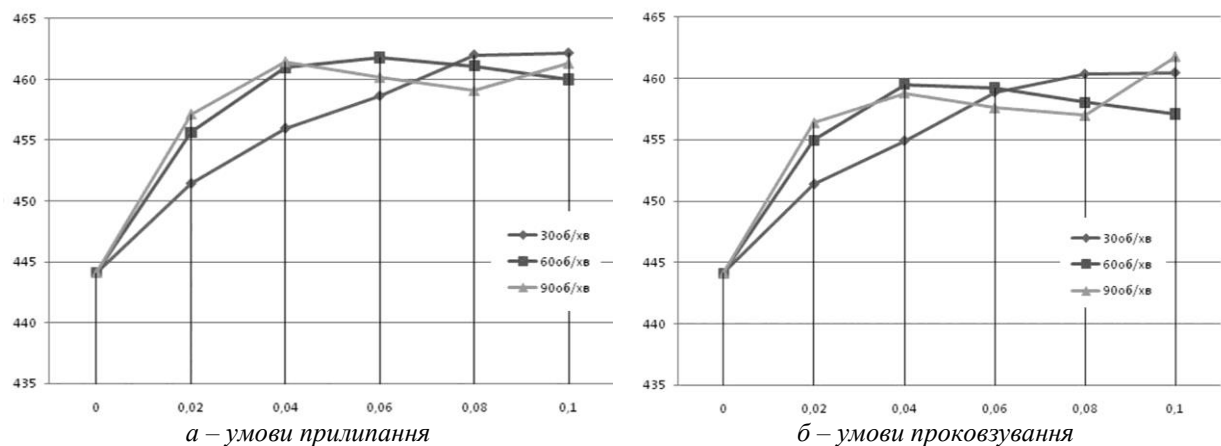


Рис. 4 – Розподіл середньої температури, К, у поперечних перерізах за довжиною змішувача, м

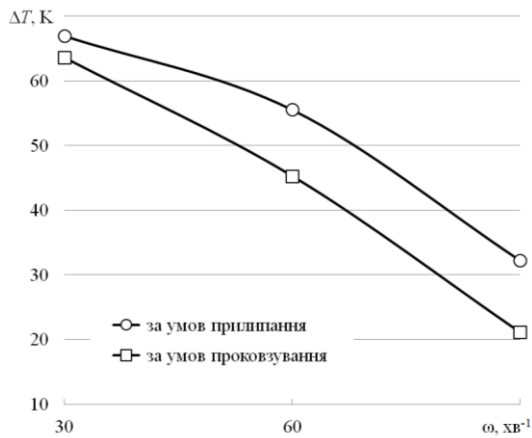


Рис. 5 – Розподіл різниці температур у вихідному перерізі бар’єрного змішувача за різної швидкості обертання

Порівняльний аналіз здійснювали за різницею температур суміші у вихідному перерізі змішувача за умов прилипання матеріалу до стінок і його проковзування (рис. 5). Установлено, що під час проковзування матеріал менше прогрівається, оскільки його швидкість біля стінок не дорівнює нулю. Дисипація енергії також зменшується, оскільки проковзування присутнє як на стінках, так і на роторі змішувача.

Висновок. Дослідження бар’єрного змішувача довели ефективність оцінки процесів гомогенізації полімерних композицій методом числового моделювання із використанням як критеріїв оцінки зміння розподілу й різниці температур полімерних матеріалів у контрольних перерізах. Установлено, що проковзування позитивно впливає на ефективність змішувачів бар’єрного типу, тому при їхньому проектуванні слід враховувати цей ефект.

У подальшому передбачається вивчити вплив на ефективність змішувачів бар’єрного типу інших технологічних параметрів та їхнього конструктивного оформлення.

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. Основы технологии переработки пластмасс / 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. Моделирование процесса смешения полимерных композиций в экструзионном смесителе бар’єрного типа // А. С. Сахаров, А. Е. Колосов, А. Л. Сокольский, В. И. Сивецкий // Хим. и нефтегазовое машиностр. – 2011. – № 12. – С. 3–7.
5. Метод конечных элементов в механике твердых тел / под общ. ред. А. Сахарова и И. Альтенбаха. – К. : Вища шк., 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.
7. Сокольский А. Л. Методика учета пристенного скольжения полимера при моделировании каналов перерабатывающего оборудования / А. Л. Сокольский, И. И. Ивицкий // SWorld : сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 3 (36). – Т. 4. – С. 106-112.

Надійшла до редакції 09.06.2015