

УДК 678.023:678.053

І.О. Мікульонок

ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ПРИГОТУВАННЯ КОМПОЗИЦІЇ В ЗМІШУВАЧІ ЗАКРИТОГО ТИПУ З ОВАЛЬНИМИ РОТОРАМИ

This paper deals with the design procedure of mixing time of polymer or rubber mixtures taking into account its movement not only in circular, but also in an axial direction of a mixing chamber. The preliminary comparison of theoretical and experimental data shows the possibility of implementing the developed technique.

Вступ

Упродовж тривалого часу роторні змішувачі закритого типу залишаються одними з найбільш поширених видів технологічного обладнання високопродуктивних технологічних ліній для приготування композицій з використанням високомолекулярних сполук – пластмас і гумових сумішей [1, 2].

Основне призначення змішувального обладнання – забезпечення потрібної якості одержуваної композиції. Це пов'язано з кількісним описом стану суміші. У більшості випадків під час аналізу дисперснонаповнених композиційних матеріалів кожний з розподілених у полімерній матриці компонентів можна розглядати як сукупність умовних частинок певного розміру [3].

Для аналізу складу суміші такий підхід дає можливість застосовувати методи статистичного аналізу. Оцінку якості змішування за допомогою статистичних критеріїв здійснюють обробленням даних, отриманих під час аналізу проб, відібраних у масі готової суміші [4]. Для оцінювання якості реальної суміші використовуються такі критерії, як індекс змішування, критерій Лейсі, інтенсивність розділу та коефіцієнт неоднорідності [4]. За допомогою перших двох критеріїв визначається ступінь наближення реальної суміші до граничного технологічно можливого стану випадкової суміші, одержуваної за умови нескінченно тривалого оброблення. Останні два критерії являють собою порівняння реальної суміші з її ідеальним станом, тобто системою з рівномірно розподіленими компонентами.

Застосування статистичних критеріїв потребує виконання вимірювань на реальних сумішах і не дає можливості безпосередньо з їх участю теоретично прогнозувати результат змішування. Тому особливого значення набуває використання нестатистичних критеріїв, які ґрунтуються на визначенні накопиченої роз-

плавом деформації, температурної неоднорідності розплаву та ін. [2, 5, 6].

Одним із найпоширеніших нестатистичних критеріїв оцінки якості композиції є загальна (накопичена сумішшю впродовж процесу змішування) деформація зсуву γ_{Σ} , яка дорівнює добутку середньої швидкості зсуву $\bar{\dot{\gamma}}$ на тривалість зсуву t [2, 7]:

$$\gamma_{\Sigma} = \bar{\dot{\gamma}} t.$$

Існуючі методики розрахунку тривалості змішування композиції в роторному змішувачі відрізняються значною складністю і враховують рух композиції лише в коловому напрямку роторів, нехтуючи при цьому її рухом в осьовому напрямку роторів [4, 5, 8].

Постановка задачі

Дослідження спрямоване на розроблення методики розрахунку тривалості змішування в роторному змішувачі закритого типу композиції, поведінка якої описується степеневим реологічним законом з урахуванням її руху як в коловому, так і в осьовому напрямках роторів.

Методика визначення тривалості змішування

Оптимальне значення загальної деформації зсуву γ_{Σ} , яка забезпечує одержання композиції високої якості і підтверджена численними дослідженнями, становить 2000–2500 [2, 4].

Тоді тривалість змішування t , потрібна для накопичення деформації γ_{Σ} матеріалом загальною масою M_{Σ} , що перебуває у змішувачі, становить [8]

$$t = \frac{M_{\Sigma} \gamma_{\Sigma}}{M \bar{\dot{\gamma}}}, \quad (1)$$

де $M_{\Sigma} = \varphi_{3,к} V_{3,к} \rho$; $\varphi_{3,к}$ – коефіцієнт завантаження змішувальної камери; $V_{3,к}$ – вільний об'єм змішувальної камери; ρ – густина композиції; M – маса композиції, що активно деформується в даний момент в серпоподібному і мінімальному проміжках півкамер швидко- і тихохідного роторів ($M_{ш}$ і $M_{т}$ відповідно):

$$M = M_{ш} + M_{т} = [(V_{сп} + V_{гр})\rho]_{т} + [(V_{сп} + V_{гр})\rho]_{ш} = 2L\rho(S_{сп} + S_{гр}),$$

де $V_{сп}$ і $V_{гр}$ – об'єми серпоподібного й мінімального проміжків; L – глибина змішувальної камери (у напрямку поздовжніх осей роторів); $S_{сп}$ і $S_{гр}$ – площі поперечного перерізу серпоподібного й мінімального проміжків (рис. 1, 2).

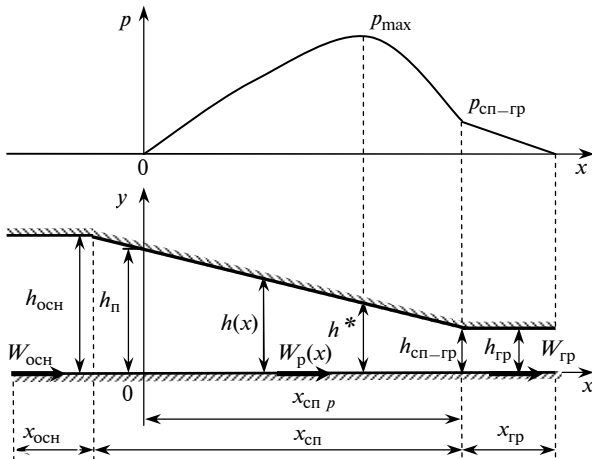


Рис. 1. Схема максимального, серпоподібного й мінімального проміжків після розвертання поверхні ротора на площину: x, y – поточні координати уздовж і поперек каналу; p, p_{\max} – поточний і максимальний тиск у каналі; $p_{сп-гр}$ – тиск у місці переходу серпоподібного проміжку в мінімальний; $x_{осн}, x_{сп}, x_{гр}$ – довжини максимального (на ділянці основи ротора), серпоподібного й мінімального (на ділянці гребеня ротора) проміжків; $x_{сп p}$ – довжина активної ділянки серпоподібного проміжку (ділянки з наявністю тиску p); $h_{осн}, h, h_{гр}$ – максимальна (відповідає основи ротора), поточна й мінімальна висоти каналу; $h_{сп-гр}$ – висота проміжку в місці переходу серпоподібного проміжку в мінімальний; $h_{п}, h^*$ – висоти проміжку на початку ділянки активного деформування матеріалу в серпоподібному проміжку та в місці переходу серпоподібного проміжку в мінімальний; $W_{осн}, W_{п}, W_{гр}$ – лінійні швидкості робочої поверхні ротора (основи, лобової частини й гребеня)

Для довільного поперечного перерізу серпоподібного проміжку швидкість зсуву компо-

зиції в коловому напрямку визначається залежністю [9]

$$\dot{\gamma}_{сп} = \left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)_{сп}, \quad (2)$$

відповідно, величина середньої швидкості зсуву $\bar{\dot{\gamma}}_{сп}$ в серпоподібному проміжку становитиме

$$\left| \bar{\dot{\gamma}}_{сп} \right| = \frac{2}{(h_{осн} + h_{гр})x_{сп}} \int_0^{x_{сп}} \int_0^h \left| \dot{\gamma}_{сп} \right| dy dx. \quad (3)$$

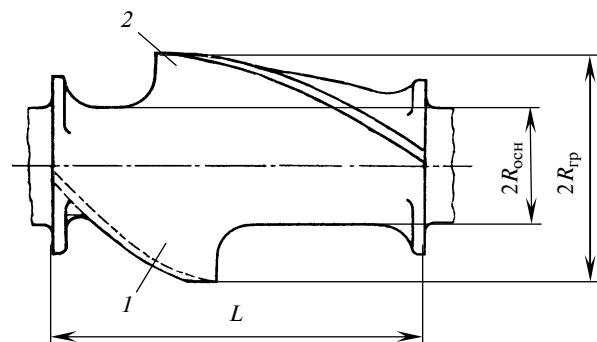


Рис. 2. Схема ротора змішувача закритого типу: 1 – коротка лопать; 2 – довга лопать

Аналіз процесу оброблення композиції в серпоподібному проміжку зазвичай здійснюється з використанням безрозмірних аналогів змінних x і y , що перетворюють серпоподібний проміжок на прямокутний [9]:

$$\xi = \frac{xm}{h_{осн}}, \quad \varepsilon = \frac{y}{h}, \quad (4)$$

де $m = (h_{осн} - h_{гр})/x_{сп}$.

У новій системі координат висота проміжку h на відстані x від початку серпоподібного проміжку визначається залежністю $h(x) = h_{осн}(1 - \xi)$. Тоді вираз (2) набуває вигляду

$$\dot{\gamma}_{сп} = \left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)_{сп} = \frac{W_p(\xi)}{h_{осн}(1 - \xi)} \times \left[-1 - \frac{(1 + 2n)}{h_{осн}(1 - \xi)} \left(h_{осн}(1 - \xi) - \frac{2G_V}{W_p(\xi)} \right) \times \left(1 - \left(\frac{1 + n}{n} \right) \varepsilon^{1/n} \right) \right], \quad (5)$$

де n – показник степеня реологічного рівняння; $W_p(\xi)$ – лінійна швидкість робочої поверх-

ні ротора як функція радіуса поверхні ротора в точці, що розглядається, а отже, і безрозмірного аналога змінної ξ :

$$\begin{aligned} W(\xi)_p &= \omega R_p(\xi) = \omega(R_{гр} - h(\xi)) = \\ &= \omega(R_{гр} - h_{осн}(1 - \xi)) = \\ &= \omega[R_{гр} - (h_{осн} - x(h_{осн} - h_{гр})/x_{сн})], \end{aligned}$$

де ω – кутова швидкість ротора (швидкохідного або тихохідного).

Із врахуванням виразів (3) і (5) залежність для визначення абсолютної величини середньої швидкості зсуву в коловому напрямку серпоподібного проміжку набуває вигляду

$$\begin{aligned} \left| \bar{\dot{\gamma}}_{сн} \right| &= \frac{2m^2 h_{осн}}{(h_{осн}^2 - h_{гр}^2)} \times \\ &\times \int_0^{\xi_{сн}} \int_0^1 W_p(\xi) \left| 1 - \frac{(1+2n)}{h_{осн}(1-\xi)} \left(h_{осн}(1-\xi) - \frac{2G_V}{W_p(\xi)} \right) \right| \times \\ &\times \left(1 - \left(\frac{1+n}{n} \right) \varepsilon^{1/n} \right) d\varepsilon d\xi. \end{aligned}$$

Тоді середня швидкість зсуву в коловому напрямку серпоподібних проміжків обох роторів становитиме

$$\bar{\dot{\gamma}}_{сн} = \frac{|\bar{\dot{\gamma}}_{сн}|_ш + |\bar{\dot{\gamma}}_{сн}|_т}{2}.$$

Середню швидкість зсуву $\bar{\dot{\gamma}}_{гр}$ в мінімальному проміжку можна визначити за залежністю [8]

$$\bar{\dot{\gamma}}_{гр} = \frac{W_{гр}}{h_{гр}}.$$

Тепер визначимо середню швидкість зсуву композиції, що деформується в серпоподібному проміжку й рухається вздовж поздовжньої осі роторів z .

Враховуючи, що в коловому напрямку матеріал рухається під дією тиску, який розвивається в об'ємі матеріалу в результаті його деформування [8, 9], вважатимемо, що в осьовому напрямку має місце безнапірна течія матеріалу [10]. Також розглядатимемо зазначену безнапірну течію перемішуваного матеріалу як його рух в просторі, обмеженому кінцевою су-

купністю каналів, утворених паралельними стінками (висота каналів при цьому змінюється від максимальної, що дорівнює різниці радіусів внутрішньої поверхні півкамери і осердя ротора, до мінімальної, що відповідає мінімальному проміжку між внутрішньою поверхнею півкамери і гребенем ротора), тобто застосуємо ступеневу апроксимацію [10].

Абсолютне значення швидкості зсуву $\bar{\dot{\gamma}}_z$ у серпоподібному проміжку в напрямку осі z можна визначити за залежністю (див. рис. 1)

$$\bar{\dot{\gamma}}_z = \frac{W(x)_{pz}}{h(x)},$$

де $W(x)_{pz}$ – значення швидкості поверхні ротора в напрямку осі z [10]:

$$W(x)_{pz} = 0,5\omega(R_{гр} - h(x))\sin(2\alpha), \quad (6)$$

де α – кут підйому гвинтової лінії лопаті ротора (для довгої лопаті $\alpha = \alpha_d = 60^\circ$, для короткої – $\alpha = \alpha_k = 45^\circ$); $R_{гр}$ – радіус гребеня ротора.

Середнє значення швидкості зсуву дорівнює

$$\bar{\dot{\gamma}}_z = \frac{1}{x_{сн}} \int_0^{x_{сн}} \frac{W(x)_z}{h(x)} dx. \quad (7)$$

Із врахуванням того, що $h(x) = h_{осн} - x(h_{осн} - h_{гр})/x_{сн}$, і залежності (6) вираз (7) набуває вигляду

$$\begin{aligned} \bar{\dot{\gamma}}_z &= \frac{1}{x_{сн}} \int_0^{x_{сн}} \frac{W(x)_z}{h(x)} dx = \\ &= \frac{0,5\omega \sin(2\alpha)}{x_{сн}} \int_0^{x_{сн}} \frac{\left(R_{гр} - \left(h_{осн} - \frac{(h_{осн} - h_{гр})}{x_{сн}} x \right) \right)}{h_{осн} - \frac{(h_{осн} - h_{гр})}{x_{сн}} x} dx = \\ &= 0,5\omega \sin(2\alpha) \left[\frac{R_{гр}}{h_{осн} - h_{гр}} \ln \frac{h_{осн}}{h_{гр}} - 1 \right]. \quad (8) \end{aligned}$$

За залежністю (8) потрібно розраховувати величину $\bar{\dot{\gamma}}_z$ для довгої $\bar{\dot{\gamma}}_{zd}$ і короткої $\bar{\dot{\gamma}}_{zk}$ лопатей як швидкохідного, так і тихохідного роторів. Тоді середнє значення швидкості зсуву в серпоподібному проміжку в напрямку осі z для

швидкохідного й тихохідного роторів можна визначити за залежностями

$$(\bar{\dot{\gamma}}_z)_{\text{ш}} = \left(\frac{\bar{\dot{\gamma}}_{z\text{д}} l_{\text{д}} + \bar{\dot{\gamma}}_{z\text{к}} l_{\text{к}}}{l_{\text{д}} + l_{\text{к}}} \right)_{\text{ш}}$$

і

$$(\bar{\dot{\gamma}}_z)_{\text{т}} = \left(\frac{\bar{\dot{\gamma}}_{z\text{д}} l_{\text{д}} + \bar{\dot{\gamma}}_{z\text{к}} l_{\text{к}}}{l_{\text{д}} + l_{\text{к}}} \right)_{\text{т}}$$

де $l_{\text{д}}$ і $l_{\text{к}}$ – середні значення загальної довжини гвинтової поверхні довгої й короткої лопатей ротора відповідно [10]:

$$l_{\text{д,к}} = N_{\text{д,к}} \frac{\pi(R_{\text{гр}} + R_{\text{осн}})}{\cos \alpha_{\text{д,к}}},$$

де $N_{\text{д,к}}$ – кількість повних обертів відповідної лопаті (для кута закручення лопатей у 90° $N = 0,4$).

Середня швидкість зсуву в осьовому напрямку серпоподібних проміжків обох роторів становить

$$\bar{\dot{\gamma}}_z = \frac{(\dot{\gamma}_z)_{\text{ш}} + (\dot{\gamma}_z)_{\text{т}}}{2}.$$

Остаточні середні швидкості зсуву в півкамерах швидкохідного й тихохідного роторів визначаються за залежностями

$$\bar{\dot{\gamma}}_{\text{ш}} = \left(\frac{(|\bar{\dot{\gamma}}_{\text{сп}}| + \bar{\dot{\gamma}}_z) S_{\text{сп}} + \bar{\dot{\gamma}}_{\text{гр}} S_{\text{гр}}}{S_{\text{сп}} + S_{\text{гр}}} \right)_{\text{ш}} \quad (9)$$

і

$$\bar{\dot{\gamma}}_{\text{т}} = \left(\frac{(|\bar{\dot{\gamma}}_{\text{сп}}| + \bar{\dot{\gamma}}_z) S_{\text{сп}} + \bar{\dot{\gamma}}_{\text{гр}} S_{\text{гр}}}{S_{\text{сп}} + S_{\text{гр}}} \right)_{\text{т}} \quad (10)$$

а середня швидкість зсуву $\bar{\dot{\gamma}}$ у змішувальній камері – за формулою

$$\bar{\dot{\gamma}} = \frac{\bar{\dot{\gamma}}_{\text{ш}} + \bar{\dot{\gamma}}_{\text{т}}}{2} \quad (11)$$

або

$$\bar{\dot{\gamma}} = \frac{(\bar{\dot{\gamma}}_{\text{сп}} + \bar{\dot{\gamma}}_z) S_{\text{сп}} + \bar{\dot{\gamma}}_{\text{гр}} S_{\text{гр}}}{S_{\text{сп}} + S_{\text{гр}}}. \quad (12)$$

Підставляючи значення середньої швидкості зсуву в змішувальній камері, обчислене за формулою (11) або (12), в залежність (1), можна визначити тривалість приготування композиції в роторному змішувачі.

Наприклад, під час приготування гумової суміші шинного виробництва ($n=0,2$) у змішувачі 250/40 ГОСТ 11996 (РСВД-140-40 [1]) середні швидкості зсуву, розраховані за наведеною методикою, становлять: у серпоподібному проміжку в коловому напрямку – $\bar{\dot{\gamma}}_{\text{сп}} = 12,3 \text{ с}^{-1}$, у

мінімальному проміжку – $\bar{\dot{\gamma}}_{\text{гр}} = 355 \text{ с}^{-1}$, а в серпоподібному проміжку в осьовому напрямку –

$\bar{\dot{\gamma}}_z = 10,8 \text{ с}^{-1}$. При цьому середня швидкість зсуву в змішувальній камері дорівнює $\bar{\dot{\gamma}} = 24,1 \text{ с}^{-1}$

(відомі оціночні значення швидкості зсуву, які враховують рух матеріалу лише в коловому напрямку серпоподібного проміжку, становлять приблизно 10 с^{-1} [2]). З урахуванням об'єму матеріалу, що піддається деформуванню у відповідних проміжках і напрямках (згідно із залежностями (9) і (10)), внесок складових $\bar{\dot{\gamma}}_{\text{сп}}$, $\bar{\dot{\gamma}}_{\text{гр}}$ і $\bar{\dot{\gamma}}_z$

у швидкість зсуву в змішувальній камері становить 51,0, 4,0 і 44,0 % відповідно.

Час змішування, розрахований за формулою (1) для зазначеного змішувача залежно від коефіцієнта завантаження змішувальній камери (від 0,5 до 0,85) становить 3,7–6,3 хв, що задовільно узгоджується з даними експлуатації промислового обладнання [1, 2].

Висновки

Запропонована методика визначення загальної деформації зсуву дає можливість уточнити тривалість змішування “степеневі” композиції в роторному змішувачі з овальними роторами. Ця методика передбачає врахування руху одержуваної композиції як в коловому, так і в осьовому напрямках роторів змішувача.

Розрахунки за наведеною методикою загальної деформації зсуву і тривалості змішування гумової суміші для виготовлення протектора автомобільних шин показали достатню збіжність з даними експлуатації промислового обладнання. В подальшому передбачається здійснити детальні дослідження для широкої номенклатури композицій різноманітного призначення.

1. *Рябинин Д.Д., Лукач Ю.Е.* Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.
2. *Переработка* каучуков и резиновых смесей (реологические основы, технология, оборудование) / Е.Г. Вострокнутов, М.И. Новиков, В.И. Новиков, Н.В. Прозоровская. – Изд. 2-е, перераб. – М.: Максипресс, 2005. – 369 с.
3. *Мікульонок І.О.* Термопластичні композитні матеріали та їх наповнювачі. Класифікація та загальні відомості // Хім. промисловість України. – 2005. – № 5. – С. 30–39.
4. *Красовский В.Н., Воскресенский А.М., Харчевников В.М.* Примеры и задачи по технологии переработки эластомеров: Учеб. пособие для вузов. – Л.: Химия, 1984. – 240 с.
5. *Смещение* полимеров / В.В. Богданов, Р.В. Торнер, В.Н. Красовский, Э.О. Регер. – Л.: Химия, 1979. – 192 с.
6. *Радченко Л.Б., Петухов А.Д.* Управление интенсивностью и качеством подготовки расплава полимера. – К.: КПИ, 1987. – 36 с. – Деп. в УкрНИИНТИ 01.07.87, № 1821-Ук87.
7. *Соколов М.В.* Определение суммарной величины сдвига при переработке резиновых смесей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 8. – С. 3–4.
8. *Мікульонок І.О.* Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини: Монографія. – К.: ІВЦ “Видавництво “Політехніка”, 2009. – 265 с.
9. *Мікульонок І.О.* Моделирование процесса переработки “степенной” композиции в смесителе с овальными роторами // Хим. промышленность. – 2010. – Т. LXXXVII, № 6. – С. 306–316.
10. *Мікульонок І.О.* Визначення потужності приводу змішувача з овальними роторами для одержання пластмас і гумових сумішей // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2009. – № 5. – С. 83–87.

Рекомендована Радою
інженерно-хімічного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
17 лютого 2011 року