

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 678.023:678.053

І.О. Мікульонюк

ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ПРИВОДУ ЗМІШУВАЧА З ОВАЛЬНИМИ РОТОРАМИ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ПЛАСТМАС І ГУМОВИХ СУМІШЕЙ

Вступ

У технологічних лініях для одержання виробів масового виробництва з матеріалів на основі високомолекулярних сполук (шин, гумотехнічних виробів, транспортерних стрічок, лінолеуму та ін.) одним з основних видів обладнання є роторні змішувачі. У цих змішувачах до 60 % об'єму змішувальної камери займають ротори різної форми, при цьому одними з найпоширеніших є змішувачі з овальними роторами [1–7]. Роторні змішувачі належать до одного з найбільш матеріаломісткого та енергоємного обладнання (їх маса досягає майже 200 т, а потужність приводного двигуна – 4 МВт [8]), тому питання визначення потужності, що споживається приводом змішувача під час його роботи, набуває особливого значення.

Розраховані значення потужності змішування в роторних змішувачах за існуючими методиками, які враховують рух перероблюваного матеріалу в змішувальній камері лише в колісному напрямку роторів [3–6], зазвичай на 10–20 % менші від значень потужності, визначених безпосередньо у виробничих умовах на промисловому обладнанні [1, 9]. У той же час матеріал у змішувальній камері під дією двох гвинтоподібних лопатей кожного з роторів рухається також і в осьовому напрямку роторів, що не враховано жодною з існуючих методик розрахунку.

Постановка задачі

Метою статті є розробка методики розрахунку потужності приводу змішувача із врахуванням руху перероблюваного матеріалу не лише в колісному, а і в осьовому напрямку змішувальної камери.

Модель процесу переробки матеріалу в змішувачі з овальними роторами

Робочу ділянку кожного з овальних роторів змішувача виконують у вигляді переривчас-

тої спіралі, при цьому в будь-якому поперечному перерізі зазначена ділянка являє собою овал, що звужується в один бік. Поверхня кожного з роторів утворена двома гвинтоподібними лопатями, одна з яких (довша) має кут підйому гвинтової лінії $\alpha_d = 60^\circ$, а інша (коротка) – $\alpha_k = 45^\circ$. Кут обхвату ротора кожною з лопатей (кут закручення лопаті) зазвичай дорівнює 90° . Довжина довгої лопаті l_1 (точніше, довжина її проекції на діаметральну площину ротора) становить приблизно 70 % загальної довжини робочої частини ротора l (довжини змішувальної камери), а довжина короткої лопаті l_2 – від 38 до 43 % величини l . Гвинтова лінія короткої лопаті має лівий напрям, а довгої – правий (рис. 1).

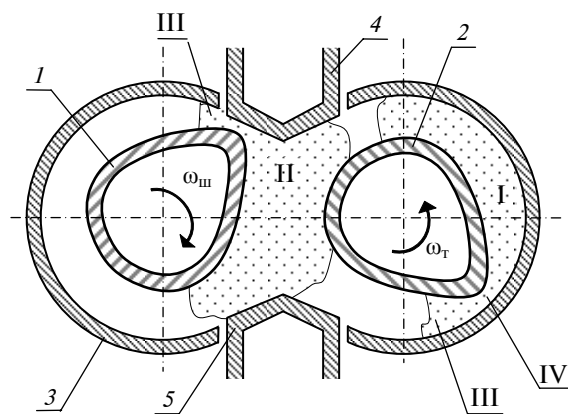


Рис. 1. Схема переробки матеріалу в змішувачі з овальними роторами: 1, 2 – швидкохідний і тихохідний ротори; 3 – змішувальна камера; 4, 5 – верхній і нижній затвори; I–IV – характерні області деформування матеріалу; $\omega_{ш}$ і $\omega_{т}$ – кутові швидкості швидкохідного й тихохідного роторів

Зазначена конфігурація роторів сприяє підвищенню змішувального ефекту. Розташування роторів у камері таке, що напроти довгої лопаті одного ротора розміщена коротка лопать іншого. Внаслідок цього, а також різної частоти обертання роторів, перероблюваний матеріал у камері набуває складного руху з траєкторією, що має вигляд просторової “вісімки”.

Ротори обертаються назустріч один одному в просторі, обмеженому стінками робочої камери, верхнім і нижнім затворами. Робочий об'єм камери змішувача умовно можна поділити на чотири характерні зони: серпоподібну область I ефективного змішування, утворювану стінкою однієї з півкамер змішувальної камери і передньою (лобовою) поверхнею відповідного ротора, область II між роторами, в якій здійсню-

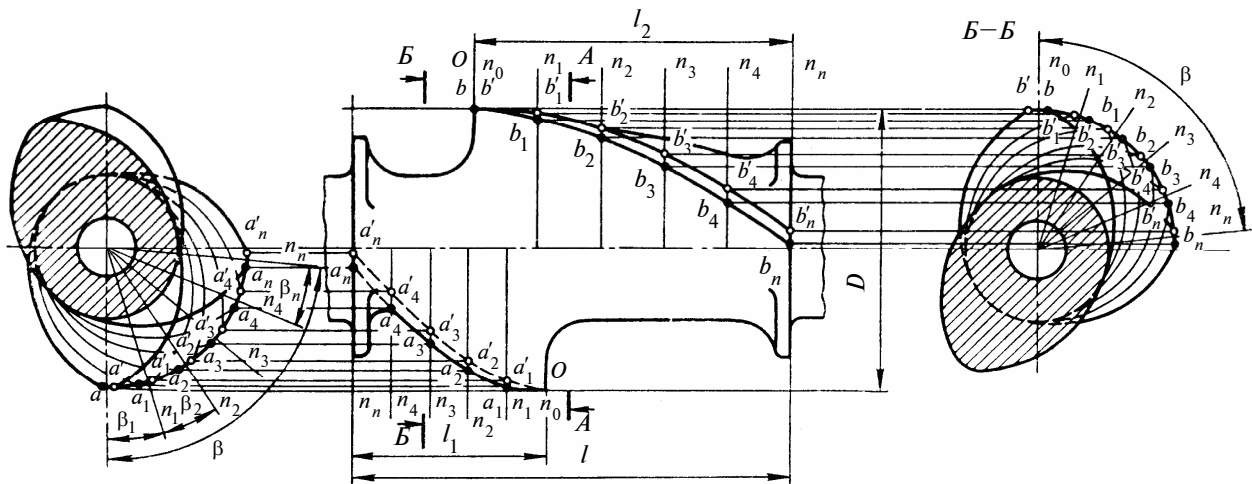


Рис. 2. До побудови профілю робочої частини ротора змішувача [1]: n_i , β_i , a_i , b_i – промені, центральні кути, точки та їх проекції

ється перерозподіл перероблюваного матеріалу між півкамерами, а також затилкову область III, до якої матеріал потрапляє після проходження нею області IV мінімального проміжку між стінкою півкамери і гребенем ротора [9–11] (рис. 2).

Під дією обертюв роторів основний процес змішування матеріалу і диспергування його компонентів відбувається в області I. При цьому матеріал рухається не лише в коловому напрямку, а і вздовж осі відповідного ротора (точніше, гвинтових поверхонь його лопатей). При цьому, якщо в коловому напрямку матеріал рухається під дією тиску, що розвивається в об'ємі матеріалу в результаті його деформування [2–11], вважатимемо, що в осьовому напрямку має місце безнапірна течія матеріалу. Також розглядатимемо зазначену безнапірну течію перероблюваного матеріалу як його рух у просторі, обмеженому кінцевою сукупністю 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 величині мінімального проміжку між внутрішньою поверхнею півкамери і гребенем ротора), тобто застосуємо ступеневу апроксимацію [12].

Визначення потужності приводу роторів змішувача

Питома потужність дисипації в перероблюваному матеріалі, поведінка якого опису-

ється степеневим реологічним рівнянням, визначається виразом [9–11]

$$q_{\text{дис}} = \tau_{yx} \left| \frac{\partial w_x}{\partial y} \right|, \quad (1)$$

де τ_{yx} – дотичні напруження; x , y – координати, спрямовані вздовж і поперек зони деформування, відповідно; w_x – складова швидкості елементарного об'єму перероблюваного матеріалу вздовж осі x .

Подальший аналіз зробимо для матеріалу, поведінка якого під час деформування описується степеневим реологічним рівнянням [9, 11–13, 15]. Тоді із врахуванням (1) для руху матеріалу в коловому напрямку серпоподібного проміжку (область I, див. рис. 1) [9–11] матимемо

$$q_{\text{дис сп}} = \frac{KW_p(\xi)^{n+1}}{h_n^{n+1}(1-\xi)^{n+1}} \left| -1 - (1+2n) \times \left(1 - \frac{2G_V}{h_n W_p(\xi)(1-\xi)} \right) \left(1 - \frac{1+n}{n} \varepsilon^{1/n} \right) \right|^{n+1}, \quad (2)$$

де K – коефіцієнт консистенції перероблюваного матеріалу; n – показник степеня реологічного рівняння; W_p – лінійна швидкість робочої поверхні ротора (функція радіуса поверхні ротора в точці, що розглядається); h_n – максимальна (початкова) висота серпоподібного проміжку; G_V – об'ємна витрата матеріалу крізь

одиницю ширини проміжку; ξ і ε – безрозмірні аналоги координат x і y [9, 11].

Інтегруючи рівняння (2) по всьому об'єму матеріалу, що деформується в серпоподібному проміжку, можна визначити загальну потужність дисипації в цьому проміжку:

$$Q_{\text{дис сп}} = \int_0^{L_{\text{д,к}}} \int_0^{x_{\text{сп}}} \int_0^h q_{\text{дис сп}} dx dy dz, \quad (3)$$

де z – координата, спрямована вздовж осі ротора; h – поточна висота серпоподібного проміжку (на довжині $x_{\text{сп}}$ серпоподібного проміжку змінюється лінійно від максимальної величини $h_{\text{п}}$ до мінімальної величини у вершині гребеня ротора $h_{\text{гр}}$); $L_{\text{д,к}}$ – загальна довжина довгої або короткої лопаті ротора:

$$L_{\text{д,к}} = N_{\text{д,к}} \frac{2\pi R_{\text{гр}}}{\cos \alpha_{\text{д,к}}},$$

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

Із врахуванням виразу (2) залежність (3) набуває вигляду [9]

$$Q_{\text{дис сп}} = \frac{L_{\text{д,к}} K}{m h_{\text{п}}^{n-1}} \int_0^1 \int_0^{\xi_{\text{сп}}} \left[W_{\text{р}}(\xi) - \frac{(1+2n)}{h_{\text{п}}(1-\xi)} \times \right. \\ \left. \times (h_{\text{п}}(1-\xi)W_{\text{р}}(\xi) - 2G_V) \left(1 - \left(\frac{1+n}{n} \right) \varepsilon^{1/n} \right) \right]^{n+1} \times \\ \times \frac{1}{(1-\xi)^n} d\xi d\varepsilon,$$

де $m = (h_{\text{п}} - h_{\text{гр}})/x_{\text{сп}}$.

У мінімальному проміжку потужність, що витрачається на деформацію матеріалу, з достатнім ступенем точності можна визначити за залежністю

$$Q_{\text{дис гр}} = (L_{\text{д}} + L_{\text{к}}) K x_{\text{гр}} \frac{W_{\text{гр}}^{n+1}}{h_{\text{гр}}^n}, \quad (4)$$

де $W_{\text{гр}}$ – лінійна швидкість гребеня ротора; $x_{\text{гр}}$ – ширина мінімального проміжку.

Для визначення потужності, що витрачається на рух перероблюваного матеріалу в осьовому напрямку роторів, скористаємося підходом, запропонованим для аналізу безнапір-

ної течії рідини, поведінка якої описується степеневим реологічним рівнянням, у каналі, обмеженому паралельними стінками, одна з яких рухома [13].

За аналогією з виразом (4) потужність, що витрачається під час руху матеріалу вздовж осі ротора, можна визначити за залежністю (окремо для довгої і короткої лопатей певного ротора – швидко- або тихохідного)

$$Q_{\text{дис ос}} = \int_0^{x_{\text{сп}}} L_{\text{д,к}} K \frac{W(x)_{\text{р ос ш,т}}^{n+1}}{h(x)^n} dx, \quad (5)$$

де $W(x)_{\text{р ос ш,т}}$ – швидкість в осьовому напрямку перероблюваного матеріалу на поверхні швидко- або тихохідного ротора в точці, що розглядається; dx – ширина ділянки, прийнята для ступеневої апроксимації.

Значення швидкості $W(x)_{\text{р ос}}$ у кожній точці можна визначити, скориставшись підходом, прийнятим для аналізу черв'ячної екструзії [14].

Враховуючи, що $W(x)_{\text{р ш,т}} = \omega_{\text{ш,т}} R_{\text{р}}(x) = \omega_{\text{ш,т}}(R_{\text{гр}} - h(x))$, де $h(x)$ – висота серпоподібного проміжку в точці, що розглядається, величину $W(x)_{\text{р ос}}$ визначаємо за залежністю:

$$W(x)_{\text{р ос ш,т}} = W(x)_{\text{р ш,т}} \sin \alpha_{\text{д,к}} \cos \alpha_{\text{д,к}} = \\ = 0,5 W(x)_{\text{р ш,т}} \sin(2\alpha_{\text{д,к}}) = \\ = 0,5 \omega_{\text{ш,т}}(R_{\text{гр}} - h(x)) \sin(2\alpha_{\text{д,к}}). \quad (6)$$

Із врахуванням (6) залежність (5) набуває вигляду

$$Q_{\text{дис ос}} = L_{\text{д,к}} K [0,5 \omega_{\text{ш,т}} \sin(2\alpha_{\text{д,к}})]^{n+1} \times \\ \times \int_0^{x_{\text{сп}}} \frac{\left[R_{\text{гр}} - \left(h_{\text{п}} - \frac{h_{\text{п}} - h_{\text{гр}}}{x_{\text{сп}}} x \right) \right]^{n+1}}{\left[h_{\text{п}} - \frac{h_{\text{п}} - h_{\text{гр}}}{x_{\text{сп}}} x \right]^n} dx.$$

Загальні значення потужності дисипації в півкамерах з розміщеними в них швидко- і тихохідними роторами становлять

$$Q_{\text{дис ш}} = (Q_{\text{дис сп}} + Q_{\text{дис гр}} + Q_{\text{дис ос}})_{\text{ш}},$$

$$Q_{\text{дис т}} = (Q_{\text{дис сп}} + Q_{\text{дис гр}} + Q_{\text{дис ос}})_{\text{т}}.$$

Остаточню, потужність приводу роторів змішувача можна визначити за залежністю

$$N_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{дис ш}} + Q_{\text{дис т}}}{\eta_{\text{пр}}},$$

де $\eta_{\text{пр}}$ – коефіцієнт корисної дії приводу роторів.

Як показують розрахунки, потужність, що витрачається на осьовий рух перероблюваного матеріалу, зазвичай не перевищує 15 % потужності, що витрачається на його рух у коловому напрямку.

З метою перевірки адекватності розробленої математичної моделі роторного змішувача було зроблено розрахунок процесу приготування композиції в змішувачах 250/40 ГОСТ 11996 (РСВД-140-40 [1]) і 250/20 ГОСТ 11996 (РСВД-140-20 [1]) і порівняння його результатів із результатами розрахунку за іншими відомими методиками [3, 14–16], а також результатами вимірювання потужності приводного двигуна безпосередньо в промислових умовах [1].

Основні параметри змішувачів:

- змішувач 250/40 ГОСТ 11996: вільний об'єм змішувальної камери 250 дм³, робочий об'єм 140 дм³; номінальні частоти обертання роторів 40 і 33,5 об/хв; потужність електродвигуна приводу роторів 800 кВт;

- змішувач 250/20 ГОСТ 11996: вільний об'єм змішувальної камери 250 дм³, робочий об'єм 140 дм³; номінальні частоти обертання роторів 20 і 17 об/хв; потужність електродвигуна приводу роторів 315 кВт.

Аналіз проводили для гумової суміші шинного виробництва з такими властивостями: $K = 80000 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$; $n = 0,2$ [15].

Для змішувача 250/40 похибка визначення потужності приводу за запропонованою методикою становить 3,2 %, у той час як розрахована за методикою В. Красовського і Р. Торнера [3, 15, 16] вона дорівнює 11,5 %, а за методикою З. Тадмора і К. Гогоса [14] – 30,7 %. Для змішувача 250/20 зазначені величини мають такі значення: 4,1, 18,8 і 37 %, відповідно.

Висновки

Порівняння теоретичних та експериментальних даних дає можливість зробити висновки про адекватність розробленої методики результатам експлуатації промислового обладнання. Таким чином, розроблений підхід до визначення потужності приводу роторів змішувачів з овальними роторами може бути рекомендований для застосування під час проектування, модернізації та експлуатації зазначеного обладнання.

И.О. Микулёнок

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ПРИВОДА СМЕСИТЕЛЯ С ОВАЛЬНЫМИ РОТОРАМИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛАСТМАСС И РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

Предложена методика расчета мощности привода смесителя с учетом движения перерабатываемого материала не только в круговом, но и в осевом направлении смесительной камеры. Показано, что мощность, затрачиваемая на осевое движение перерабатываемого материала, как правило, не превышает 15 % мощности, затрачиваемой на его движение в окружном направлении. Сравнение теоретических и экспериментальных данных дает возможность сделать вывод об адекватности разработанной методики результатам эксплуатации промышленного оборудования.

I.O. Mikulionok

ON DETERMINING THE DRIVE POWER OF THE INTERNAL MIXER WITH OVAL ROTORS FOR PRODUCING PLASTIC AND RUBBER MIXES

We develop the calculation procedure of drive power of the mixer taking into account the movement of processed material in a circular, as well as in an axial direction of the mixing chamber. We show that the power consumed for axial movement of the processed material usually does not exceed 15 % of the power consumed for its movement in a circular direction. We also compare theoretical and experimental data in order to conclude that the developed procedure is adequate to the results of operation of industrial equipment.

1. *Рябинин Д.Д., Лукач Ю.Е.* Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.
2. *Машины и аппараты резинового производства / Б.И. Андрашников, Л.М. Антонов, Д.М. Барсков и др.; Под ред. Д.М. Барскова.* – М.: Химия, 1975. – 600 с.
3. *Оборудование и основы проектирования заводов резиновой промышленности / Н.Г. Бекин, Н.Д. Захаров, Г.К. Пеунков и др.* – Л.: Химия, 1985. – 504 с.
4. *Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любартович В.А.* Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов. – Л.: Химия, 1986. – 488 с.
5. *Торнер Р.В., Акутин М.С.* Оборудование заводов по переработке пластмасс. – М.: Химия, 1986. – 400 с.
6. *Бекин Н.Г.* Расчет технологических параметров и оборудования для переработки резиновых смесей в изделия. – Л.: Химия, 1987. – 272 с.
7. *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. – 370 с.
8. *ГОСТ 11996–79.* Резиносмесители периодического действия. Общие технические условия.
9. *Мікульонок І.О.* Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2009. – 264 с.
10. *Мікульонок І.О.* Енергосилові параметри процесу приготування полімерних композиційних матеріалів у змішувачі з овальними роторами // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2004. – № 1. – С. 33–39.
11. *Вознюк В.Т., Мікульонок І.О., Радченко Л.Б.* Енергосилові параметри процесу приготування псевдопластичних композицій у змішувачі з овальними роторами // Наукові праці ОНАХТ. – 2007. – Вип. 30, т. 1. – С. 68–74.
12. *Радченко Л.Б.* Переробка термопластів методом екструзії. – К.: ІЗМН, 1999. – 220 с.
13. *Торнер Р.В.* Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов). – М.: Химия, 1977. – 464 с.
14. *Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос; Пер. с англ. под ред. Р.В. Торнера.* – М.: Химия, 1984. – 632 с.
15. *Сборник примеров и задач по технологии переработки пластических масс / В.Н. Красовский, А.М. Воскресенский.* – Минск: Вышэйш. шк., 1975. – 318 с.
16. *Смешение полимеров / В.В. Богданов, Р.В. Торнер, В.Н. Красовский, Э.О. Ререр.* – Л.: Химия, 1979. – 192 с.

Рекомендована Радою
інженерно-хімічного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
24 червня 2009 року