

УДК 678.057

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ ПОЛІМЕРУ ПРИ ЧЕРВ'ЯЧНІЙ ЕКСТРУЗІЇ

Л. Г. Воронін

Кандидат технічних наук, доцент*

М. П. Швед

Кандидат технічних наук, доцент*

Д. М. Швед

Провідний інженер*

А. С. Богатир*

E-mail: annabogatyr@mail.ru

*Кафедра машин та апаратів хімічних і

нафтопереробних виробництв

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

Розроблено загальний підхід до математичного моделювання черв'ячних екструдерів в зоні дозування, який максимально відповідає реальним умовам переробки, та аналітичне дослідження основних параметрів процесу у каналі одночерв'ячного екструдера. Наведено порядок розрахунку для визначення потужності дисипації та отримано підвищення середньої температури в зоні гомогенізації. Аналіз розрахунків дозволяє надати рекомендації щодо застосування екструзійного устаткування

Ключові слова: черв'ячна екструзія, зона гомогенізації, полімер, температура, потужність дисипації, плоскопаралельна модель

Разработан общий подход к математическому моделированию червячных экструдеров в зоне дозирования, который максимально отвечает реальным условиям переработки, и аналитическое исследование основных параметров процесса в канале одночервячного экструдера. Приведен порядок расчета для определения мощности диссипации и получено повышение средней температуры в зоне гомогенизации. Анализ расчетов позволяет дать рекомендации по применению экструзионного оборудования

Ключевые слова: червячная экструзия, гомогенизация, полимер, температура, мощность диссипации, плоскопаралельная модель

1. Вступ

Проблема ощадливого використання природних сировинних ресурсів для виготовлення полімерів пов'язана з впровадженням ресурсо- і енергозберігаючих технологій.

Процесам переробки приділяється значна увага, оскільки з року в рік зростає питома вага виробів із полімерів. Екструзійні методи за останні роки знайшли широке застосування для переробки полімерів та композиційних матеріалів на їх основі. Поширення екструдерів можна пояснити тим, що в них можливо створити такі умови переробки, які неможливо реалізувати в іншому технологічному обладнанні: регульовані тиск та термомеханічні навантаження на розплав, а також відносно невеликий час перебування в активній зоні переробки маси і відсутність контакту розплаву з оточуючим середовищем [1, 7].

Метою роботи є розробка математичної моделі процесу та аналітичне дослідження основних параметрів процесу у каналі одночерв'ячного екструдера.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Широке застосування протягом останнього півстоліття полімерів спричинило інтенсивні наукові дослідження в цій галузі.

Моноклатура сучасних термопластів дуже велика. До того ж останнім часом суттєво збільшилася частка композитних матеріалів, біосировини, продук-

тів сільського господарства, які переробляються екструзійними методами.

У переважній більшості праць [2, 3, 4] для досліджень процесу екструзії використовується плоскопаралельна модель, у якій гвинтовий канал, утворений нарізкою черв'яка і циліндром, умовно розгортається в площину, рис. 1а. При цьому вводяться такі припущення: не враховується кривизна каналу, який вважається розгорнутим у площину і нерухомим, а розгорнута поверхня циліндра рухається зі швидкістю V , рівною коловій швидкості черв'яка. Процес розглядається в декартовій системі координат, вісь x якої спрямована перпендикулярно гребеню витка, вісь y – по висоті нарізки, а вісь z , вздовж розгорнутого каналу нарізки, рис. 1а. Проекція швидкості V_x враховує циркуляцію розплаву в напрямку осі x , а V_z , відповідно, переміщення розплаву вздовж каналу, яке забезпечує продуктивність. Профілі швидкостей W_x і W_z зображені на рис. 1б. У цій моделі найбільше значення швидкості має місце біля поверхні циліндра, рис. 2а, в той час як у реальному процесі навпаки, найбільше значення швидкості буде біля поверхні черв'яка, рис. 2б.

Це значить, що у плоскопаралельній моделі профіль швидкості обернений на 180° у порівнянні з реальним процесом. Таке припущення не має суттєвого значення для розрахунку гідродинаміки і визначення потужності, а також при обчисленні інтенсивності дисипації без врахування умов теплообміну з поверхнею циліндра, проте для розрахунку температурних полів із врахуванням такого теплообміну це може привести до суттєвих похибок. У зв'язку з цим виникає не-

обхідність розробки математичної моделі, яка більше наближена до реальних умов.

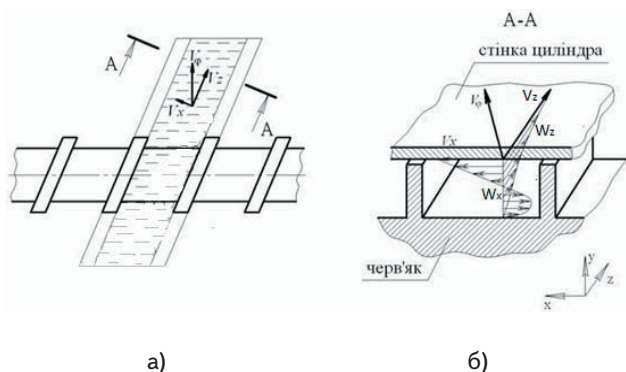


Рис. 1. Плоскопаралельна модель екструзії: а) – розгорнутий канал черв'яка; б) – профілі швидкостей

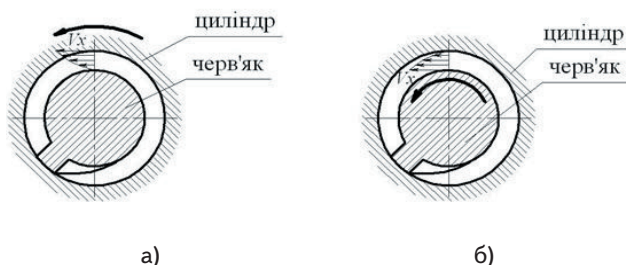


Рис. 2. Схеми процесу екструзії: а) – нерухомий черв'як; б) – рухомий черв'як

Для побудови моделі процесу, яка буде відрізнятись від плоскопаралельної з нерухомим черв'яком і обертовим циліндром будемо розглядати процес екструзії в плоскопаралельній системі координат із нерухомим циліндром і обертовим черв'яком, рис. 3.

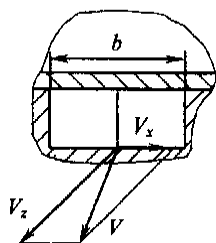


Рис. 3. Схема профілю швидкості

3. Математична модель зони гомогенізації

У зоні дозування відбувається гомогенізація розплаву і розвивається тиск, під дією якого розплав продавлюється через формуючий інструмент. Відбувається остаточне розплавлення дрібних включень і вирівнювання температурного поля. Для нормальної роботи екструдера необхідно, щоб розплав, що надходить до робочого інструменту (до голівки), мав задану, однорідну температуру. Тому час перебування розплаву в зоні дозування повинен бути достатнім для його прогріву і гомогенізації.

Тому екструзійний агрегат повинен працювати при частоті обертання шнека, що забезпечує задану продуктивність і певний тиск на вході в формуючий інструмент.

Якщо прийняти, що: рідина – ньютонівська, течія стала, в'язкість розплаву не залежить від температури та нехтуючи силами інерції і тяжіння через їх відносно малу величину, а ширина каналу вважається необмеженою, кривизна каналу незначна (наближення плоских поверхонь), то модель можна розглядати, як плоско-паралельну.

З врахуванням сказаного, для нестисливої ньютонівської рідини рівняння руху записується так:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} = 0, \tag{1}$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} = 0. \tag{2}$$

Оскільки секція замкнена, то сумарні витрати в напрямках x і z дорівнюють нулю і рівняння нерозривності набувають вигляду:

$$\int_0^H W_x dy = 0, \tag{3}$$

$$\int_0^H W_z dy = 0. \tag{4}$$

Вигляд функцій, що є розв'язком системи рівнянь (1) – (4), залежить від граничних умов.

У випадку плоскопаралельної моделі, коли циліндр нерухомий, а черв'як обертається:

$$W_x /_{y=0} = v_x, \tag{5}$$

$$W_z /_{y=0} = v_z, \tag{6}$$

$$W_x /_{y=H} = 0, \tag{7}$$

$$W_z /_{y=H} = 0. \tag{8}$$

Розв'язання рівнянь (1) – (4) за цих умов дає змогу отримати вирази для складових швидкості:

$$W_x = v_x \left(1 - 4 \frac{y}{H} + 3 \frac{y^2}{H^2} \right), \tag{9}$$

$$W_z = v_z \left(1 - 4 \frac{y}{H} + 3 \frac{y^2}{H^2} \right). \tag{10}$$

Одержані розв'язки наводяться в багатьох працях по теорії одночерв'ячних екструдерів [5-10].

Компоненти швидкості деформації:

$$\gamma_x = \frac{\partial W_x}{\partial y} = \frac{2v_x}{H} \left(\frac{3y}{H} - 2 \right), \tag{11}$$

$$\gamma_z = \frac{\partial W_z}{\partial y} = \frac{2v_z}{H} \left(\frac{3y}{H} - 2 \right). \tag{12}$$

Швидкість обертання черв'яка:

$$v = \pi D n. \tag{13}$$

Складові швидкості черв'яка:

$$v_x = v \sin \varphi = \pi D n \sin \varphi, \tag{14}$$

$$v_z = v \cos \varphi = \pi D n \cos \varphi, \tag{15}$$

$$\varphi = \arctg \frac{s}{\pi D}, \tag{16}$$

де s – крок гвинтової нарізки, D – діаметр черв'яка, φ - кут нахилу гвинтової нарізки.

Коефіцієнт консистентності:

$$K = K_0 e^{-\frac{\beta(T - T_0)}{T_0 + 273}}, \tag{17}$$

де K_0 – коефіцієнт консистентності, β – температурний коефіцієнт.

Тоді в'язкість:

$$\mu = K |\dot{\gamma}|^{n-1}, \tag{18}$$

де n – показник реологічності, $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, яка може бути представлена як:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_x^2 + \dot{\gamma}_z^2}. \tag{19}$$

Таким чином, об'ємна потужність дисипації:

$$q_v = \mu (\dot{\gamma}_x^2 + \dot{\gamma}_z^2) = \mu \dot{\gamma}^2. \tag{20}$$

Де швидкість зсуву приймає вигляд:

$$\dot{\gamma}^2 = \frac{4V^2}{H^4} (3y + 2H)^2 \tag{21}$$

Отже,

$$q_v = K \frac{2V}{H^2} (3y - 2H)^{n+1}. \tag{22}$$

Якщо прийняти довжину одного кроку:

$$\Delta z = \frac{s}{\sin \varphi}. \tag{23}$$

Тоді потужність дисипації на цій ділянці:

$$N = b \Delta z \int_0^H \mu \dot{\gamma}^2 d_y, \tag{24}$$

де b – ширина каналу дорівнює:

$$b = (s - e) \cos \varphi, \tag{25}$$

e – ширина гвинтової нарізки.

Після інтегрування виразу (24) потужність дисипації визначається:

$$N = \frac{K b \Delta z}{3(n+2)} (2V)^{n+1} H^{-n} (1 + 2^{n+2}). \tag{26}$$

Підвищення середньої температури в зоні гомогенізації можна визначити з рівняння теплового балансу:

$$\Delta T = \frac{iN}{G C_p}, \tag{27}$$

де C_p – теплоємність розплаву при його середній температурі, G – масова продуктивність.

4. Висновки

Таким чином, рівняння (26) і (27) можуть бути використані для визначення потужності в зоні гомогенізації.

Аналіз розрахунків дозволяє надати рекомендації щодо модернізації існуючого чи застосування нового екструзійного устаткування для переробки полімерів.

Література

1. Раувендааль, К. Экструзия полимеров [Текст] : пер. с англ. – А. Я. Малкина – СПб.: Профессия, 2006. – 768 с.
2. Тадмор, З. Теоретические основы переработки полимеров [Текст] / З. Тадмор, К. Тогос. – М.: Химия, – 1984. – 632 с.
3. Мак Келви, Д. М. Переработка полимеров [Текст] / Д. М. Мак-Келви, – М.: Химия, – 1965. – 442 с.
4. Власов, С.В., Кандырин, Л.Б и д.. Основы технологии переработки пластмасс [Текст] / С.В. Власов. Л.Б. Кандырин: под ред. В. Н. Кулезнева и В.К. Гусева. - М.: Химия, 2004. – 596 с.
5. Todd David B. Improving incorporation of fillers in plastics. [Текст]/ В. Todd David // Adv.Polym.Technol. – 2000. – Vol.19, № 1. – с.54 – 64.
6. Cincinnati Milacron. Parallel und gegenlaufig. [Текст]/ Cincinnati Milacron // Kunststoffe.- 1998. – Bd 88, №9. – с.1460.
7. Jacobi, H. R. Screw Extrusion of Plastics [Текст] / H. R. Jacobi // Karl Hanser Verlag – 1960 – Т 31 (1). – с. 105-127.
8. Griffith, R.M. Fully Developed Flow in Screw Extruders. [Текст]/ R.M. Griffith// Ind. Eng. Chem. Fundam. - 1962. - с. 180- 187.
9. Japan Plastics Age. – 1982. – 20,№187. – с.14.
10. Collings, S. Plastics Machinery and Equipment. [Текст] / S. Collings // Nature. – 1982 –Т. 5 (2). – с. 26-29 6.