

УДК 678.027.3

В.В. Лукашова, І.О. Мікульонок,  
Л.П. Гоженко**ГІДРОДИНАМІКА І ТЕПЛОБМІН У КАНАЛАХ ЗМІШУВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА ТИПУ “ШЕСТИРНЯ” ОДНОЧЕРВ’ЯЧНОГО ЕКСТРУДЕРА****Вступ**

Полімерні композиції зі спінювальними наповнювачами – спінені полімери – завдяки унікальним фізико-механічним властивостям і можливості утилізації вторинної полімерної сировини широко застосовуються в найрізноманітніших галузях промисловості і побуті. Коефіцієнт теплопровідності і густина спінених полімерів на порядок нижчі, ніж у чистих полімерів, через що ці матеріали широко використовуються насамперед як теплоізоляційні та пакувальні матеріали [1]. Так, застосування спінених полімерів під час будівництва та реконструкції житлових будинків забезпечує заощадження теплоти до 50 % і зменшує негативний тепловий вплив на навколишнє середовище.

Порівняльний аналіз методів виготовлення продукції із спінених полімерів свідчить про доцільність застосування екструзійного методу, переваги якого полягають у можливості перероблення відходів, безперервності процесу, можливості виготовлення продукції з широким спектром потрібних властивостей.

Існуючі моделі екструзії [2–7] задовільно описують процес перероблення традиційних полімерів, проте для аналізу перероблення композицій зі спінювальними наповнювачами вони малоприменні, оскільки не враховують низку особливостей, притаманних технології одержання спінених полімерів, зокрема можливість фазового переходу низькокиплячого спінювального агента в результаті локального підвищення температури, спричиненого інтенсивною дисипацією енергії в об’ємі перероблюваної композиції.

Теорія екструзії спінених полімерів на сьогодні розроблена для традиційного п’ятизонного черв’яка з послідовними зонами подавання гранульованого полімеру, плавлення полімеру, гомогенізації розплаву полімеру, декомпресії і введення спінювального агента, а та-

кож гомогенізації полімерної композиції зі спінювальним агентом [1].

У той же час зараз досить широко черв’яки в останній зоні оснащують змішувальними елементами, зокрема типу “шестірня”, які забезпечують інтенсивні зсувні деформації в об’ємі перероблюваної композиції, а отже, і можливість небажаного підвищення її температури.

**Постановка задачі**

Метою статті є розробка методики розрахунку процесу перероблення полімерів на ділянці черв’яка зі змішувальними елементами типу “шестірня”, яка може бути використана для комплексного аналізу процесу екструзії різноманітних спінених полімерів і композицій на їх основі для визначення раціональних технологічних режимів перероблення і конструкції робочих органів екструдера.

**Фізична модель процесу екструзії спінених полімерів**

Для виготовлення продукції зі спінених полімерів широко використовується схема однокерв’ячної екструзії із зоною декомпресії (рис. 1). Технологія виготовлення має такі стадії: завантаження полімеру в бункер; подавання (зона I), нагрівання і плавлення полімеру (зона II), компресія розплаву (зона III), насичення розплаву спінювальним агентом (зона IV, зона декомпресії); формування піновиробу у формувальній головці і спінювання розплаву, яке відбувається на виході з формувальної головки за різкого зменшення тиску. У зоні IV глибина

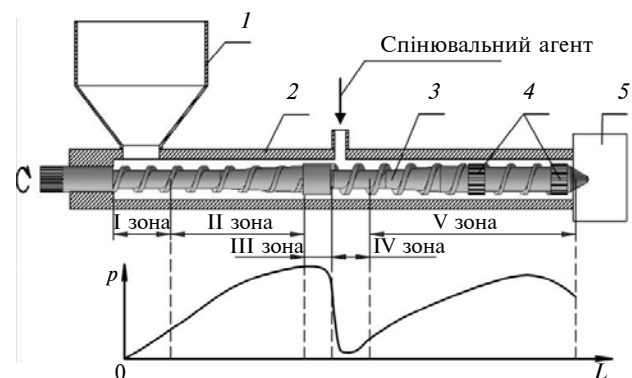


Рис. 1. Схема екструдера для одержання спінених полімерів: 1 – бункер; 2 – корпус екструдера; 3 – черв’як; 4 – змішувальні елементи типу “шестірня”; 5 – формувальна головка; I–V – функціональні зони екструдера; L – координата, спрямована вздовж осі черв’яка

каналу різко збільшується, завдяки чому зменшується тиск і відбувається дегазація розплаву. Під час гомогенізації композиції (зона V) відбувається збільшення тиску та перемішування розплаву полімеру зі спінювальним агентом.

Найвідповідальнішими вузлами установок для виготовлення продукції зі спінених полімерів є черв'ячний екструдер і формувальна головка. Основний принцип їх конструювання полягає у визначенні таких параметрів процесу перероблення (зокрема, тиску й температури розплаву), які запобігатимуть спінюванню всередині каналу екструдера і головки.

Геометрія черв'яка має забезпечити ретельне перемішування розплаву полімеру і спінювального агента, тому їх зазвичай виконують зі змішувальними елементами. Технологічні параметри процесу мають забезпечити розплавлення полімеру в зонах I–III за умови недопущення перегріву композиції в зоні V, який може спричинити недопустиме спінювання безпосередньо в каналі черв'яка. Для запобігання перегріванню композиції корпус і черв'як екструдера інтенсивно охолоджують (водою, повітрям, оливою).

Загальну математичну модель процесу екструзії та основних функціональних зон екструдера було розроблено авторами раніше і наведено в працях [1, 8–11]. При цьому процес екструзії запропоновано розглядати як сукупність послідовних процесів подачі, плавлення та гомогенізації полімеру [5, 8], що надає можливість аналізувати весь процес у цілому із врахуванням взаємного впливу окремих зон.

За розробленими на підставі зазначеного підходу алгоритмом і програмою розрахунку одночерв'ячного екструдера можна розраховувати основні параметри процесу екструзії, здійснювати їх аналіз і вибирати раціональні з точки зору енергоефективності геометрію робочих органів екструдера та режими його роботи.

Так, наприклад, дослідження зміни температури в каналі екструдера в зоні плавлення (рис. 2) надає змогу оцінити ступінь розплавлення полімеру, визначити координату закінчення процесу його повного розплавлення, а отже, і координату введення спінювального агента.

Проте розроблені моделі придатні лише для класичної геометрії черв'яків із гвинтовою нарізкою і не забезпечують можливості аналізу процесу змішування в динамічних змішувальних елементах, які зазвичай розміщують у зоні гомогенізації. У той же час застосування таких

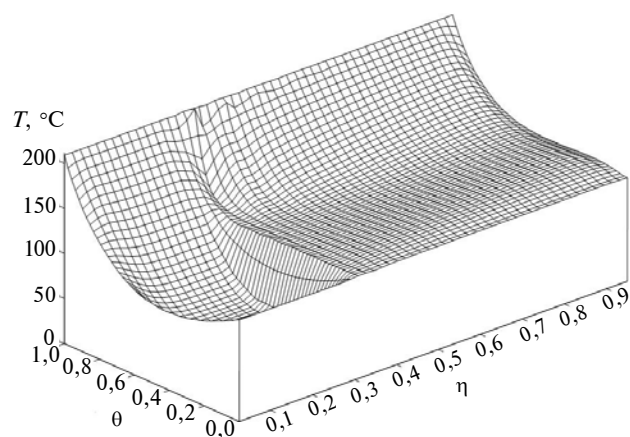


Рис. 2. Температурне поле в зоні плавлення полімеру:  $\eta$  і  $\theta$  – безрозмірні ширина і висота каналу;  $T$  – температура

елементів внаслідок великих швидкостей зсуву й дисипативних тепловиділень може призвести до перегріву композиції і, як наслідок, спінювання агента безпосередньо в каналі екструдера, що спричинить погіршення якості екструдованої продукції. Тому необхідно проаналізувати поведінку розплаву в каналах зазначених змішувальних елементів.

#### Гідродинаміка і теплообмін у каналах змішувального елемента типу “шестірня”

Типовою насадкою, яку застосовують для поліпшення якості змішування розплавленого полімеру зі спінювальним агентом, барвниками, стабілізаторами та іншими добавками, є елементи типу “шестірня” з каналами різного профілю та кутами нахилу зубів до осі черв'яка.

Для розгляду процесу руху композиції в каналах змішувального елемента з прямокутними прямими та похилими каналами доцільно здійснити перехід від осесиметричної до плоско-паралельної моделі з розділенням загального потоку екструзії на окремі потоки відповідно до кількості каналів змішувального елемента:

$$G_1 = G/n_k,$$

де  $G$  і  $G_1$  – масові загальна продуктивність екструдера і продуктивність окремого каналу змішувального елемента;  $n_k$  – кількість каналів змішувального елемента.

Схему руху розплаву в окремому каналі змішувального елемента наведено на рис. 3.

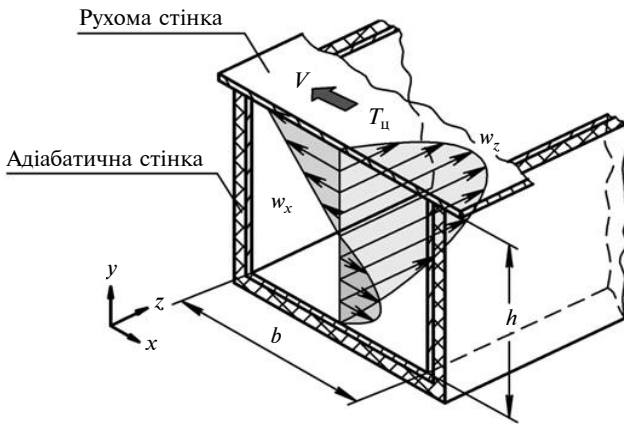


Рис. 3. Схема руху розплаву в одному каналі змішувального елемента:  $x, y, z$  – координати, спрямовані поперек каналу, по його висоті і вздовж каналу;  $w_x$  і  $w_z$  – складові швидкості розплаву, спрямовані поперек і вздовж каналу;  $h$  і  $b$  – висота й ширина каналу;  $V$  – швидкість, з якою черв'як обертається відносно стінки корпусу;  $T_{ц}$  – температура стінки циліндра

Граничні умови для визначення швидкості мають вигляд:

при  $y = 0$

$$w_x = 0, w_z = 0;$$

при  $y = h$

$$w_x = V, w_z = 0,$$

де  $D$  і  $n$  – діаметр і частота обертання черв'яка.

Рівняння руху вздовж осі  $x$  можна записати в такому вигляді:

$$\frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x},$$

де  $\mu$  – ефективна в'язкість розплаву;  $p$  – тиск.

Враховуючи умову прилипання розплаву до стінок каналу, після подвійного інтегрування отримуємо

$$w_x = -V \frac{y}{h} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (hy - y^2). \quad (1)$$

Вважаючи, що для розглянутого каналу при забезпеченні циркуляції виконується умова відсутності витрати в поперечному напрямку каналу [8]

$$G = \rho h \Delta z \frac{1}{h} \int_0^h w_x dy = 0,$$

де  $\Delta z$  – довжина каналу змішувального елемента, можна записати

$$\int_0^h w_x dy = \int_0^h \left[ -V \frac{y}{h} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (hy - y^2) \right] dy = 0.$$

У результаті інтегрування маємо

$$-V \frac{h}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = 0,$$

звідки отримуємо градієнт тиску

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{6\mu V}{h^3}. \quad (2)$$

Підставивши (2) у (1), визначимо швидкість у напрямку осі  $x$

$$w_x = V \left( 2 \frac{y}{h} - 3 \frac{y^2}{h^2} \right).$$

Складова швидкості деформації визначається за формулою

$$\dot{\gamma}_x = \frac{\partial w_x}{\partial y} = \frac{2V}{h} \left( 1 - 3 \frac{y}{h} \right),$$

де  $\dot{\gamma}_x$  – швидкість зсуву.

Рівняння руху по осі  $z$  можна записати у вигляді

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

Інтегруючи (3) з додаванням граничних умов, одержуємо

$$w_z = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} (hy - y^2). \quad (4)$$

Для визначення градієнта тиску застосуємо рівняння нерозривності

$$G = \rho b h \frac{1}{h} \int_0^h \left[ -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} (hy - y^2) \right] dy.$$

Після інтегрування маємо

$$G = -\rho b \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial z},$$

звідки визначаємо градієнт тиску вздовж каналу

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{G}{\rho b} \frac{12\mu}{h^3}. \quad (5)$$

Підставивши вираз (5) у (4), отримаємо

$$w_z = \frac{6G}{\rho b} \frac{1}{h^3} (hy - y^2).$$

Згідно з компонентом швидкості деформації матимемо

$$\dot{\gamma}_z = \frac{\partial w_z}{\partial y} = \frac{6G}{\rho b} \frac{1}{h^3} (h - 2y).$$

Інтегруючи вираз (5) у межах елемента (по  $z$ ), одержуємо приріст тиску

$$\Delta p = p_2 - p_1 = -\frac{12\mu \Delta z}{h^3} \frac{G}{\rho b}.$$

Для розв'язання цих рівнянь подамо в'язкість за степеневим законом із врахуванням температурного впливу

$$\mu = K_0 |\dot{\gamma}|^{n-1} \exp\left[-\frac{\beta(T - T_0)}{T_0 + 273}\right],$$

де  $K_0$  – коефіцієнт консистенції, визначений при температурі  $T_0$ ;  $n$  – показник неньютонівської поведінки розплаву;  $\beta$  – температурний коефіцієнт.

Для визначення поля температур у каналі враховуємо, що найбільша зміна температури відбувається по висоті каналу, а у функції дисипації найбільший вплив мають похідні  $\partial w_x / \partial y$  і  $\partial w_z / \partial y$ . Тоді рівняння збереження енергії можна записати у вигляді

$$\rho c V_{1L} \frac{\partial T}{\partial L} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \left[ \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_z}{\partial y} \right)^2 \right], \quad (6)$$

де  $\rho$ ,  $c$  і  $\lambda$  – густина, масова теплоємність і теплопровідність розплаву;  $V_{1L}$  – швидкість розплаву вздовж осі каналу:

$$V_{1L} = \frac{G_1}{\rho b h}.$$

Відповідно до рівняння (6) теплота дисипації в розплаві, яка виділяється внаслідок зміни швидкостей  $w_x$  і  $w_z$  у каналі, переноситься теплопровідністю по висоті каналу.

Граничні умови для рівняння (6) мають вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} &= 0, \\ T \Big|_{y=h} &= T_{\text{ц}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Підставивши вираз для визначення швидкості зсуву

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_x^2 + \dot{\gamma}_z^2} = \sqrt{\left( \frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2}$$

в рівняння (6), отримаємо

$$\rho c V_{1L} \frac{\partial T}{\partial L} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu \dot{\gamma}^2. \quad (8)$$

Для адиабатичних умов каналу черв'яка (7) рівняння (8) розв'язане із застосуванням методу скінченних різниць.

Потужність дисипації визначається як залежність від швидкостей деформування і для елемента каналу з кроком  $\Delta z$  по довжині становить

$$\Delta N_d = b h \Delta z \int_0^h \mu \left[ \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_z}{\partial y} \right)^2 \right] dy.$$

Приріст середньої температури розплаву можна визначити з рівняння

$$\Delta T = \frac{\Delta N_d}{G_1 c}.$$

Загальний приріст потужності дисипації, спричинений проходженням розплавом змішувального елемента, а також його гідравлічний опір обчислюються як добуток відповідних величин для одного каналу та їх кількості.

Покладаємо, що температура розплаву на вході в змішувальний елемент дорівнює середній температурі на виході з попередньої ділянки зони гомогенізації.

Для розрахунку каналів змішувальних елементів, поперечний переріз яких відрізняється від прямокутних (трапецієвидний, трикутний, напівкруглий), потрібно замінити їх еквівалентними каналами прямокутної форми.

За наведеною методикою здійснено розрахунки процесу екструзії пінополіетилену для промислового обладнання. Результати показали, що в змішувальній секції, розміщеній на кінці зони гомогенізації, відбувається істотне підвищення температури композиції (до 160 °C) в каналах елемента за рахунок теплоти дисипації (рис. 4).

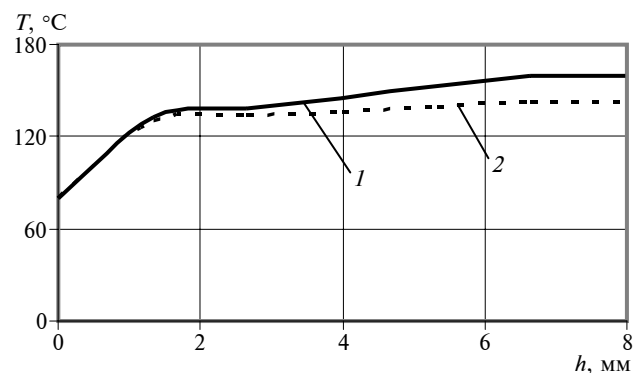


Рис. 4. Зміна температури по висоті каналу змішувального елемента: 1 – на відстані 30 мм від входу в змішувальний елемент; 2 – на відстані 80 мм від входу в змішувальний елемент

Інтенсифікація охолодження для зниження температури композиції в цьому разі недоцільна через низьку теплопровідність полімеру. Запобігти перегріву композиції при цьому можна заміною одного довгого змішувального елемента кількома короткими (див. рис. 1). Таке виконання змішувальної секції черв'яка дає можливість забезпечити потрібний температурний режим процесу, а отже, і виготовлення якісної продукції.

## Висновки

Розроблена методика розрахунку гідродинаміки й теплообміну в каналі змішувального елемента типу “шестірня” дає можливість визначити раціональні параметри геометрії зазначених змішувальних пристроїв і режимів перероблення.

Подальші дослідження будуть спрямовані на аналогічні дослідження перспективних змішувальних елементів іншої конструкції.

В.В. Лукашова, І.О. Мікулієнок, Л.П. Гоженко

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛАХ СМЕСИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ТИПА “ШЕСТЕРНЯ” ОДНОЧЕРВЯЧНОГО ЭКСТРУДЕРА

Предложена методика расчета параметров процесса переработки полимеров на участке червяка со смесительными элементами типа “шестерня”, которые широко применяются при экструзии вспененных полимеров. Результаты исследований могут быть использованы для анализа процесса экструзии разнообразных вспененных полимеров и композиций на их основе.

V.V. Lukashova, I.O. Mikulionok, L.P. Gozhenko

HYDRODYNAMICS AND HEAT EXCHANGE IN CHANNELS OF THE “GEAR WHEEL” MIXING ELEMENT OF ONE-SCREW EXTRUDER

We propose the design procedure of parameters of polymers processing on a screw site with mixing elements of “gear wheel” type, widely applied at extrusion of foamed polymers. Specifically, our research results can be used for analyzing the extrusion of various foamed polymers and their compositions.

1. Лукашова В.В. Моделивання процесу екструзії полімерних композицій зі спінюючими наповнювачами: Дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.17.08 “Процеси та обладнання хімічної технології”. – К., 2008. – 218 с.
2. Рябинин Д.Д., Лукач Ю.Е. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей. – М.: Машиностроение, 1965. – 364 с.
3. Фридман М.Л., Михайлов С.Н., Мухаметгалеев Д.М. Математическое моделирование одношнековых экструзионных машин: [обзор. информ.]. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1988. – 33 с. – (Сер. ХМ-2 “Оборудование для переработки пластмасс и резины”).
4. Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любартович В.А. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов. – М.: Химия, 1986. – 488 с.
5. Радченко Л.Б. Переробка термопластів методом екструзії. – К.: ІЗМН, 1999. – 220 с.
6. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров. – М.: Химия, КолосС, 2005. – 568 с.
7. Раувендааль К. Экструзия полимеров / Пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина. – СПб.: Профессия, 2006. – 768 с.
8. Лукашова В.В., Мікульєнок І.О., Радченко Л.Б. Черв'ячна екструзія. Узагальнена математична модель // Хімічна промисловість України. – 2007. – № 1. – С. 32–35.
9. Будзинська О.С., Лукашова В.В., Мікульєнок І.О., Радченко Л.Б. Моделивання процесу живлення одночерв'ячного екструдера // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2007. – № 1. – С. 49–57.
10. Лукашова В.В., Мікульєнок І.О., Радченко Л.Б. Моделивання процесу плавлення в одночерв'ячному екструдері // Упаковка. – 2005. – № 4. – С. 23–27; № 5. – С. 35–37.
11. Лукашова В.В., Радченко Л.Б. Моделивання процесу екструзії із врахуванням фазових перетворень в об'ємі маси // Там же. – № 1. – С. 22–25.

Рекомендована Радою  
інженерно-хімічного факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
24 грудня 2010 року