

МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 678.057.3:678.073

В. В. НОВОДВОРСЬКИЙ^{1*}, Г. К. ІВАНИЦЬКИЙ², М. П. ШВЕД³

^{1*}Каф. машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, тел. +38 (096) 040 46 59, ел. пошта novodvorskiyvolodymyr@gmail.com, ORCID 0000-0002-2895-4506

²Каф. машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, тел. +38 (067) 145 61 35, ел. пошта gergey4@gmail.com, ORCID 0000-0002-0486-2359

³Каф. машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, тел. +38 (066) 740 25 45, ел. пошта npchved46@gmail.com, ORCID 0000-0001-7725-1447

Моделювання неізотермічної течії розплаву полімеру в конусному кільцевому каналі дискового екструдера

Мета. Зона гомогенізації складається з різних каналів із різними конфігураціями, для кожного з яких потрібно визначити проходження процесу течії розплаву, а на його основі – поля швидкостей, від яких залежить якість змішування та розподіл компонентів у розплаві. Для забезпечення гнучкого та керованого процесу гомогенізації з можливістю поліпшення якості розплаву необхідно дослідити процеси течії в каналах дискового екструдера. Тому основною метою роботи є гідродинамічне моделювання процесів під час течії розплаву в конусному каналі. **Методика.** Для досягнення встановленої мети запропоновано методику визначення процесів течії в конусному каналі, з'ясовано, які зони зручно розглядати в спеціальній конусній ортогональній системі координат. Для цього було описано зміну радіальної координати ψ , яка і в прямому, і в конусному зазорі має той самий сенс – це координата по ширині зазору. Це дає можливість застосовувати далі цю координату і для ширини дискового зазору – між рухомим і нерухомим дисками. **Результати.** Запропоновано метод, який описує процеси течії в конусному каналі зони гомогенізації дискового екструдера. Процедура розрахунку наведено в аналітичній формі, також наведено графічні залежності розподілу тангенціальних і подовжніх швидкостей та швидкостей зсуву течії розплаву по ширині кільцевого каналу за номінальної частоти обертів конуса 150 об/хв та ширині конусного каналу $h_k = 2,5$ мм. **Наукова новизна.** Уперше представлено методологію розрахунку в конусному каналі зони гомогенізації дискового екструдера, де описано процеси течії в конусній ортогональній системі координат, що дозволяє врахувати спільну координату ψ для всієї зони гомогенізації. Доповнено загальну процедуру розрахунку каналів зони гомогенізації. **Практична значимість.** Розширено розпочату раніше процедуру розрахунку каналів зони гомогенізації та застосовано до течії в конусному кільцевому каналі. Указана координата ψ дозволяє описати процеси течії по ширині каналу для всіх каналів зони гомогенізації дискового екструдера, що значно спрощує розрахунки. Для кільцевого каналу отримано важливі результати гідродинамічних і термічних процесів, що дає можливість розробляти дискові екструдери з більшою точністю, а також розраховувати оптимальні режими їх роботи.

Ключові слова: дисковий екструдер; полімери; кільцеві канали; конусні кільцеві канали; моделювання; неізотермічні процеси

Вступ

У процесах екструзії полімерів кінцева якість розплаву, його механічна й температурна однорідність залежать від багатьох чинників [1, 5, 7, 9]. Створення достовірних моделей процесів

екструзії на основі результатів багатофакторних експериментів дозволяє обґрунтувати вибір раціональної конструкції екструдера та оптимальних режимів його роботи. Це відкриває можливість забезпечення вискоефективного змішування та рівномірного розподілу компонентів

МАШИНОБУДУВАННЯ

у всьому об'ємі розплаву, що є базовою умовою отримання високоякісних полімерних виробів [5, 8–10].

Зона гомогенізації дискового екструдера, у якій відбуваються процеси змішування для надання однорідної структури, розміщена після завантажувально-пластикувальної зони і складається з кількох окремих підзон у вигляді набору кільцевих каналів різної форми та геометрії, які схематично зображено на рис. 1. Проблеми моделювання процесу екструзії полімерів у дисковому зазорі – третій підзоні гомогенізації – розглянуто в роботах [1, 2].

Процеси гомогенізації розплаву в прямому кільцевому каналі зони дозування детально описано в роботах [3, 4]. Друга підзона зони гомогенізації дискового екструдера – конусний кільцевий канал – є важливою перехідною ділянкою між прямим кільцевим каналом і дисковим зазором, але процеси, які відбуваються в ньому, досі не досліджували.

Для розробки гнучкого, керованого процесу гомогенізації, із можливістю забезпечення високої якості розплаву, необхідно дослідити процеси течії в каналах дискового екструдера з дозованим живленням. У цій роботі описано процес неізотермічної течії розплаву полімеру в конусному кільцевому каналі.

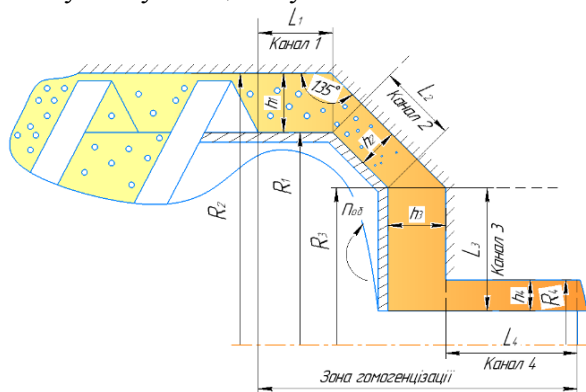


Рис. 1. Зона гомогенізації дискового екструдера

Fig. 1. The homogenization zone of a disk extruder

Мета

Основною метою такої роботи є моделювання гідродинамічних процесів під час течії неньютонівської рідини в конусному кільцевому каналі та вдосконалення аналітичної методики розрахунків для каналів зони гомогенізації.

Методика

Постановка задачі. Розплав полімеру тече через вузький конусний кільцевий канал, обтікаючи конусний наконечник шнека – конусну частину диска [2–4]. На рис. 2 схематично зображено переріз конусної частини шнека. Більша основа зрізаного конуса позначає перехід розплаву з прямого кільцевого каналу в конусний кільцевий канал, а менша основа – перехід розплаву з конусного каналу в дисковий зазор третьої зони.

Розглядаємо неізотермічний процес стаціонарної подовжньої течії неньютонівської рідини в каналі між двома співвісними конусними поверхнями, із яких внутрішня є поверхнею зрізаного конуса, що обертається з частотою обертання шнека ω_0 , а зовнішня є нерухомою. На всій довжині кільцевого зазору L_2 його ширина $h_k = R\chi_2 - R\chi_1$ залишається постійною. У подовжньому напрямі кільцевого зазору під кутом α до осьової лінії симетрії $O-O_3$ (рис. 2) рідина тече під дією градієнту тиску dp/dz із постійною заданою об'ємною витратою G_V .

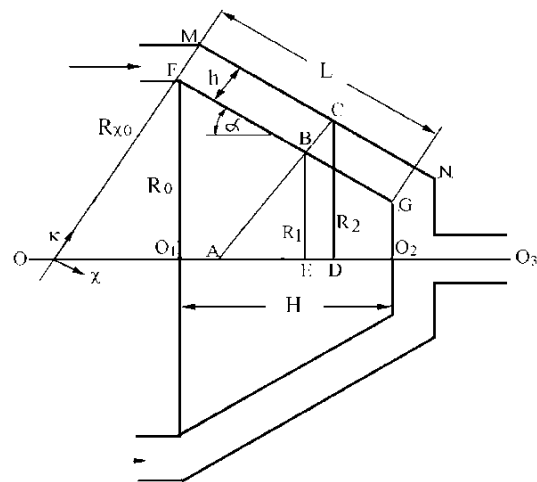


Рис. 2. Схематичне зображення конусного кільцевого зазору. Зв'язок між циліндричними та ортогональними координатами

Fig. 2. Schematic representation of the conical annular gap. Relationship between cylindrical and orthogonal coordinates

Потрібно визначити розподіл подовжньої й тангенціальної швидкостей, а також розподіл відповідних швидкостей зсуву по ширині конусного кільцевого зазору, розподіл градієнта ти-

МАШИНОБУДУВАННЯ

ску та усередненої температури розплаву по довжині, напруження зсуву та величину ефективної в'язкості в кожній точці каналу.

З урахуванням осьової симетрії течії розв'язувати задачу можна в циліндричній системі координат (z, r, θ) , які відповідають координатам першої зони [3]. Як видно з рис. 2, координата z збігається з віссю симетрії $O-O_3$, а напрям радіальної координати r – із прямою O_1F , так що початок координати z знаходиться в точці O_1 , а початок координати r лежить на осі $O-O_3$, яка проходить через центр кола. Стінки каналу FG та MN утворюють два співвісні зрізані конуси. Параметри конусної частини шнека – початковий радіус R_0 , висота конуса H , довжина твірної конуса L , кут α і ширина конусного каналу h_k – вважають відомими величинами. Розв'язання задачі течії в конусному кільцевому каналі в циліндричних координатах пов'язано з певними труднощами і призводить до складних громіздких рівнянь.

Перехід до ортогональних координат. Течію рідини в конусному каналі другої зони зручніше розглядати в спеціальній ортогональній системі координат (χ, κ, θ) , пов'язаній із напрямом твірної конуса FG . Ця система координат пов'язана з циліндричними координатами простими співвідношеннями, які наведено далі. Напрямок потоку рідини через конусний канал збігається з напрямом твірної конуса FG і зберігається постійним. Ширину каналу розглядаємо в напрямі, перпендикулярному стінці каналу. Напрямок осі χ збігається з напрямом твірної FG , а радіальна координата κ спрямована перпендикулярно до осі χ і збігається з напрямком прямої OF і прямої AC . Початок координати χ знаходиться в точці F , а початок координати κ лежить на осі $O-O_3$. Із рис. 2 видно, що аксіальні координати обох систем пов'язані між собою співвідношенням $\chi = z/\cos\alpha$, а радіальні координати κ та r – співвідношенням $\kappa = r/\cos\alpha$. На відстані χ від входу до каналу радіус R_{χ_1} – це довжина відрізка AB , а радіус R_{χ_2} – довжина відрізка AC . На будь-якій відстані χ радіуси R_{χ_1} і R_{χ_2} пов'язані співвідношенням

$$R_{\chi_2}(\chi) = R_{\chi_1}(\chi) + h_k. \quad (1)$$

На довільній відстані χ (відрізок FB) радіуси R_{χ_1} та R_{χ_2} в ортогональних координатах пов'язані з радіусом R_1 у циліндричних координатах залежностями:

$$R_{\chi_1} = R_1/\cos\alpha; \quad R_{\chi_2} = R_1/\cos\alpha + h_k, \quad (2)$$

Залежності цих радіусів від відстані χ визначаємо з рівнянь:

$$R_{\chi_1}(\chi) = R_{\chi_0} - \chi \cdot \operatorname{tg}\alpha; \quad (3, a)$$

$$R_{\chi_2}(\chi) = R_{\chi_0} - \chi \cdot \operatorname{tg}\alpha + h. \quad (3, б)$$

Площа прохідного перерізу каналу на відстані χ є площею бокової поверхні зрізаного конуса за його обертання навколо центральної осі. Так, на відстані χ (довжина відрізка FB) площу прохідного перерізу визначаємо як площу, утворену обертанням твірної зрізаного конуса $BCDE$. Користуючись позначенням відрізків на рис. 2, на підставі відомої формули геометрії запишемо: $S_h = \pi \cdot BC \cdot (CD + BE)$.

Підставляючи величини відрізків ($BC = h_k$, $CD = R_{\chi_1} \cos\alpha$, $BE = R_{\chi_2} \cos\alpha$), знаходимо, що $S_h(\chi) = \pi h_k (2R_{\chi_1} + h_k) \cdot \cos\alpha$.

З урахуванням формул (3) площу перерізу $S_h(\chi)$ визначаємо так:

$$S_h(\chi) = 2\pi h_k (R_{\chi_0} - \chi \operatorname{tg}\alpha + h_k/2) \cdot \cos\alpha. \quad (4)$$

Зміна радіальної координати. Уведемо в напрямі κ радіальну координату $\psi = \kappa - R_{\chi_1}$, яка визначає відстань заданої точки всередині зазору від поверхні рухомого конуса і яка є симетричною відносно осі обертання шнека OO_3 , тобто незалежна від кутової координати θ . Із врахуванням рівнянь (3) можна записати, що $\kappa = \psi + R_{\chi_1} = \psi + R_{\chi_0} - \chi \cdot \operatorname{tg}\alpha$, звідки

$$\psi = \kappa - R_{\chi_0} + \chi \cdot \operatorname{tg}\alpha. \quad (5)$$

Початок координати $\psi = 0$ лежить на лінії твірної конуса $F-G$ (рис. 2). На будь-якій відстані χ величина ψ визначена в інтервалі $0 \leq \psi \leq h_k$. Відповідно до рівняння (2) радіальна

МАШИНОБУДУВАННЯ

ортогональна координата ψ пов'язана з радіальною циліндричною координатою r співвідношенням

$$\psi = (r - R_1) / \cos \alpha. \quad (6)$$

Визначення швидкості і швидкості зсуву подовжньої течії розплаву. Для подовжньої течії в конусному кільцевому каналі рівняння руху в ортогональній системі координат у компонентах напружень записують у вигляді [3, 6]:

$$\frac{d(\tau_{\kappa} \cdot \kappa)}{d\chi} = -\frac{dp}{d\kappa} \cdot \kappa. \quad (7)$$

Інтегруючи рівняння (7) по κ за тією ж процедурою, що і для відповідного рівняння руху в прямому кільцевому каналі першої зони [3], знаходимо розподіл напруження зсуву подовжньої течії в конусному кільцевому каналі:

$$\dot{\gamma}_{\kappa\chi} = -\frac{1}{2} \frac{dp}{d\chi} \left(\frac{\kappa^2 - \kappa_b^2}{\kappa} \right). \quad (8)$$

Тут, як і в першій зоні, параметр κ_b – це деякий ще не визначений переріз $\kappa = \kappa_b$, у якому напруження зсуву $\tau_{\kappa\chi}(\kappa_b) = 0$.

Оскільки рівняння (8) містить невизначений параметр κ_b , розрахунки розподілу швидкості $v_\chi(\kappa)$ і швидкості зсуву подовжньої течії $\dot{\gamma}_{\kappa\chi} = dv_\chi/d\kappa$ потребують застосування чисельних методів, що ускладнює подальший розв'язок. Задачу доцільно розв'язувати в наближенні до плоскопаралельної моделі. Критерієм доцільності переходу від кільцевого каналу до плоскопаралельної щілини є виконання умови $\varepsilon = (h_\kappa/R_{\chi 1}) \cdot < 1$ [3, 6]. За умовами цієї задачі $\varepsilon \approx 0,02$, отже, цей критерій задовольняється. У плоскій щілині шириною h_κ профіль швидкості подовжньої течії по ширині зазору є симетричним відносно середньої лінії, так що максимальна швидкість $v_\chi = v_{\chi \max}$, відповідно, нульові значення швидкості зсуву $\dot{\gamma}_{\kappa\chi}$ та напруження зсуву $\tau_{\kappa\chi}$ знаходяться на відстані $h_\kappa/2$ від бокових поверхонь щілини [1, 3, 6]. В ортогональних координатах це відповідає відстані $\kappa_b = R_{\chi 1} + h_\kappa/2$.

У роботі [3] показано, що в рамках плоскопаралельної моделі доцільно користуватися введеною вище радіальною координатою ψ , для якої середня лінія зазору відповідає значенню $\psi = h_\kappa/2$. Тоді розподіл напруження зсуву по ширині зазору $\tau_{\psi\chi} = f(\psi)$ зведемо до вигляду:

$$\tau_{\psi\chi}(\psi) = -\frac{dp}{dz} \cdot \left(\psi - \frac{h_\kappa}{2} \right). \quad (9)$$

В рамках плоскопаралельної моделі рівняння (9) тотожне рівнянню (8). Рівняння (8) і (9) для конусного кільцевого зазору, отримані в ортогональній системі координат, за формою і фізичним сенсом аналогічні відповідним рівнянням для прямого кільцевого зазору першої зони, отриманих у циліндричній системі координат. Це дає можливість провести подальші розрахунки в другій зоні за тією ж процедурою, яку було застосовано в першій зоні [3].

Закон в'язкості для розплаву полімеру, який вважаємо неньютонівською псевдо-пластичною рідиною, будемо описувати степеневим рівнянням Оствальда–Вейля:

$$\tau_{\psi\chi} = -K_T \cdot |\dot{\gamma}_{\psi\chi}|^{n-1} \cdot \dot{\gamma}_{\psi\chi}. \quad (10)$$

Тоді за аналогією до першої зони розподіл швидкості зсуву подовжньої течії по ширині конусного кільцевого каналу $\dot{\gamma}_{\psi\chi} = dv_\chi/d\psi$ визначаємо з рівнянь:

$$\dot{\gamma}_{\psi\chi} = \left[\frac{1}{K_T} \frac{dp}{d\chi} \left(\psi - \frac{h_\kappa}{2} \right) \right]^{1/n} \quad \text{за } \psi < \frac{h_\kappa}{2}; \quad (11, \text{ а})$$

$$\dot{\gamma}_{\psi\chi} = - \left[-K_T \frac{dp}{d\chi} \left(\psi - \frac{h_\kappa}{2} \right) \right]^{1/n} \quad \text{за } \psi > \frac{h_\kappa}{2}. \quad (11, \text{ б})$$

Інтегруючи рівняння (11), знайдемо розподіл швидкості потоку по ширині зазору в інтервалі $0 \leq \psi \leq h$:

$$v_\chi(\psi) = \left(-\frac{1}{K_T} \frac{dp}{d\chi} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \times \left[\left(\frac{h_\kappa}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} - \left| \psi - \frac{h_\kappa}{2} \right|^{\frac{n+1}{n}} \right]. \quad (12)$$

МАШИНОБУДУВАННЯ

Середню швидкість \bar{v}_χ на відстані χ від входу до каналу визначаємо так:

$$\bar{v}_\chi(\chi) = \frac{1}{h_k} \int_0^{h_k} v_\chi(\psi) \cdot d\psi. \quad (13)$$

Після підстановки в (13) значення $v_\chi(\psi)$ з рівняння (12) отримаємо:

$$\bar{v}_\chi(\chi) = \left(-\frac{1}{K_T} \frac{dp}{d\chi} \right)^{1/n} \frac{2n \cdot (h_k/2)^{(1+2n)/n}}{(2n+1) \cdot (R\chi_2 - R\chi_1)}. \quad (14)$$

В ізотермічному процесі рівняння (10)–(14) слід розв'язувати з урахуванням впливу температури, яка входить до цих рівнянь через коефіцієнт консистентності $K_T = f(T)$, показник степені $n = f(T)$ та градієнт тиску $dp/d\chi = f(T)$. Отже, для розв'язання цих рівнянь треба спочатку визначити змінювання по довжині конусного кільцевого каналу χ коефіцієнта консистентності $K_T = f(\chi)$, показника степені $n = f(\chi)$ та градієнта тиску $dp/d\chi = f(\chi)$.

Розподіл градієнта тиску по довжині зазору. Об'ємну витрату розплаву через конусний зазор визначаємо так:

$$G_V = \bar{v}_\chi \cdot S_h(\chi) = \bar{v}_\chi \cdot \pi(R_{\chi_2}^2 - R_{\chi_1}^2) \cdot \cos\alpha.$$

Підставляючи в це рівняння значення середньої швидкості \bar{v}_χ з (14), запишемо:

$$G_V = A_2 \frac{2\pi n \cdot (R\chi_2 + R\chi_1) \cdot \cos\alpha}{2n+1} \left(\frac{h_k}{2} \right)^{\frac{2n+1}{n}}, \quad (15)$$

$$\text{де } A_2 = -\frac{K_T \cdot (G_V)^n}{(h_k/2)^{1+2n}} \cdot \left(\frac{1+2n}{2\pi \cdot n \cdot \cos\alpha} \right)^n.$$

Вирішуючи рівняння (15) відносно градієнту тиску dp/dz , отримаємо:

$$\frac{dp}{d\chi} = \frac{A_2}{(2R\chi_0 + h_k - 2\chi \cdot \text{tg}\alpha)^n}, \quad (16)$$

У неізотермічному процесі градієнт тиску dp/dz змінюється по довжині каналу не лише через зміну площі перерізу $S_h(\chi)$, але також і через зміну температури, оскільки коефіцієнт

консистентності K_T і показник степені n , які входять до рівняння (16), є функціями температури. Інтегруючи (16) за χ , одержимо аналітичне рівняння розподілу тиску по довжині конусного кільцевого каналу.

Визначення швидкості і швидкості зсуву тангенціальної течії розплаву. Подовжній рух рідини в конусному кільцевому каналі спрямовано вздовж осьової ортогональної координати χ , тоді як тангенціальний рух, пов'язаний з обертанням конусної насадки, відбувається в площині, перпендикулярній до лінії симетрії $O-O_3$ (рис. 2). Тобто, колова швидкість v_χ , як і в прямому кільцевому зазорі першої зони [3], змінюється по ширині конусного кільцевого зазору в напрямку циліндричної координати r (відрізок BC на рис. 2) відповідно до рівняння:

$$v_\theta(r) = \frac{\omega_0 \cdot R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_2^2 - r^2}{r} \right). \quad (17)$$

На основі співвідношення (2), (3) та (6) рівняння (17) можна переписати в ортогональних координатах (χ, ψ) й одержати аналітичне рівняння, яке описує залежність $v_\theta = f(\chi, \psi)$. Це рівняння не наводимо через його громіздкість, але саме на його основі розглянуто особливості тангенціальної течії в конусному кільцевому каналі, які представлені, зокрема, на рис. 4. На основі аналізу цього рівняння зроблено висновки, що розподіл колової швидкості по ширині зазору не залежить ні від температури ні від реологічних і теплофізичних властивостей рідини. Установлено що залежність $v_\theta = f(\psi)$ майже лінійно зменшується по ширині зазору, причому для будь-якого χ значення $v_\theta(0) = \omega_0 R_{\chi_1} \cos\alpha$, а $v_\theta(h_k) = 0$.

Припущення щодо лінійності залежності $v_\theta = f(\psi)$ дає можливість наближеного розрахунку усередненої по ширині швидкості зсуву тангенціальної течії за формулою:

$$\bar{v}_{\psi^0} \approx \frac{v_\theta(h_k) - v_\theta(0)}{h_k} = -\frac{\omega_0 R_{\chi_1} \cos\alpha}{h_k}. \quad (18)$$

МАШИНОБУДУВАННЯ

Під час застосування рівняння (18) для оцінки усередненої по ширині зазору швидкості зсуву тангенціальної течії похибка не перевищує 10 %.

Визначення ефективної в'язкості розплаву. У конусному кільцевому каналі другої зони під дією напірного тиску і швидкого обертання конусного наконечника шнека утворюється складна спіральна течія, у якій виникають дві складові швидкостей зсуву – подовжня $\dot{\gamma}_{\psi\chi}$ і тангенціальна $\dot{\gamma}_{\psi\theta}$. Відповідно до узагальненого степеневого закону ефективну в'язкість рідини всередині каналу визначають з рівняння:

$$\mu_{ef}(z, r, \theta) = K_T \cdot (\Phi_v)^{(n-1)/2}, \quad (19)$$

де Φ_v – так звана дисипативна функція, яка є квадратичним тензором швидкостей деформацій [1–3]. За наявності двох складових швидкостей зсуву – $\dot{\gamma}_{\psi\chi}$ та $\dot{\gamma}_{\psi\theta}$ – дисипативну функцію записують у формі: $\Phi_v = (\dot{\gamma}_{\psi\chi})^2 + (\dot{\gamma}_{\psi\theta})^2$. Підставляючи це значення дисипативної функції в рівняння (19), одержимо:

$$\mu_{ef}(\chi, \psi) = K_T \cdot (\dot{\gamma}_{\psi\chi}^2 + \dot{\gamma}_{\psi\theta}^2)^{(n-1)/2}. \quad (20)$$

Порівняння даних, представлених на рис. 5 і рис. 6, свідчить про те, що величина швидкості зсуву подовжньої течії $\dot{\gamma}_{\psi\chi}$ на порядок менша від величини швидкості зсуву тангенціальної течії $\dot{\gamma}_{\psi\theta}$, і під час визначення ефективної в'язкості нею можна знехтувати. Отже, розподіл ефективної в'язкості по ширині й довжині конусного кільцевого зазору можна визначити без порушення точності за допомогою спрощеного рівняння:

$$\mu_{ef}(\chi, \psi) = K_T \cdot \left[\omega_0 (R_{\chi 0} - \chi) \cdot \cos \alpha / h_k \right]^{n-1}. \quad (21)$$

Напруження зсуву аксіального й тангенціального руху рідини в конусному кільцевому зазорі визначають відповідно з рівнянь $\tau_{\psi\chi} = -\mu_{ef} \cdot \dot{\gamma}_{\psi\chi}$ і $\tau_{\psi\theta} = -\mu_{ef} \cdot \dot{\gamma}_{\psi\theta}$. Підставляючи в ці рівняння значення $\dot{\gamma}_{\psi\chi}$ з (11), значення $\dot{\gamma}_{\psi\theta}$ з (16) та значення μ_{ef} з (22), знаходимо кожен зі складових напруження зсуву.

Розрахунок зміни температури розплаву по довжині кільцевого зазору. У разі проходження високов'язкого розплаву полімеру через вузькі кільцеві канали, за наявності обертання з високою кутовою швидкістю конусного чи циліндричного наконечника шнека, температура розплаву суттєво змінюється.

Неізотермічність течії зумовлена високою інтенсивністю теплоти дисипації, яку визначає насамперед складова швидкості зсуву обертання циліндра, а також теплообмін розплаву з нагрітими або охолодженими стінками каналу [1, 2, 6, 9]. З урахуванням цих факторів рівняння теплопровідності в конусному кільцевому каналі зводимо до вигляду:

$$\rho_l c_l \bar{v}_\chi \frac{\partial T}{\partial \chi} = \lambda_l \frac{\partial^2 T}{\partial^2 \psi} + q_{dis}. \quad (22)$$

У цьому рівнянні ρ_l , c_l і λ_l – це, відповідно, густина, питома теплоємність і коефіцієнт теплопровідності розплаву, а q_{dis} – це потужність дисипації, яку визначають як $q_{dis} = \mu_{ef} \cdot \Phi_v$ [6], де Φ_v та μ_{ef} визначають відповідно з рівнянь (19) і (21). Перший член в правій частині (22) – кількість теплоти, що передається шляхом теплопровідності в радіальному напрямі за рахунок теплообміну розплаву зі стінками каналу [1, 2, 5, 6].

Аналіз показав, що в цій задачі кількість теплоти, яку втрачає чи набуває розплав за одиницю часу завдяки його теплообміну зі стінками каналу, зневажливо менший кількості теплоти дисипації, що надходить до каналу за цей час. Тому рівняння теплопровідності, яке описує зміну температури розплаву по довжині каналу в адіабатичному режимі, зведено до вигляду:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \chi} = \frac{K_T}{\rho_l \cdot c_l \cdot \bar{v}_\chi} \left[\frac{\omega_0 (R_{\chi 0} - \chi) \cdot \cos \alpha}{h_k} \right]^{1+n} \quad (23)$$

Залежності $K_T = f(T)$ й $n = f(T)$ для розплаву полімеру визначаємо відповідно за формулами:

$$K_T(T) = K_{st} \exp[-\beta \cdot (T - T_{st})]; \quad (24)$$

$$n(T) = n_{st} + \alpha_n \cdot (T - T_{st}), \quad (25)$$

МАШИНОБУДУВАННЯ

де T_{st} – задана стандартна температура; K_{st} й n_{st} – значення коефіцієнта консистенції K_T й показника степені n за $T=T_{st}$, які для цього виду полімеру визначають із таблиць і довідників; β і α_n – температурні коефіцієнти, які визначають із довідників.

Результати

Проведено обчислювальний експеримент для представленої моделі течії розплаву полімеру в конусному кільцевому каналі. Експеримент виконано за значення числа обертів шнека $\omega_0=150$ об./хв, ширини каналу $h_k = 2,5$ мм і довжини каналу $L_2 = 40$ мм.

Результати дослідження представлено у вигляді графічних залежностей на рис. 3–8. Модельний об'єкт – ПЕВТ марки 15803–020.

Через зміну площі прохідного перерізу вздовж каналу подовжня швидкість розплаву і швидкість зсуву збільшуються (рис. 3 та рис. 5).

Як видно з рівнянь (17) і (18), швидкості і швидкості зсуву тангенціального руху, на відміну від подовжнього руху, не залежать ні від коефіцієнта консистенції, ні від показника степені, ні від градієнта тиску. Тангенціальні складові швидкості і швидкості зсуву спадають з довжиною лише завдяки зменшенню радіуса конуса (рис. 4, 6). Відповідні складові подовжньої течії, навпаки, зростають із довжиною, як показано на рис. 3 та 5.

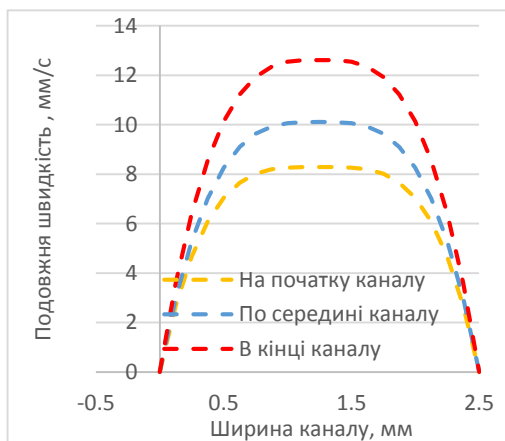


Рис. 3. Розподіл подовжньої швидкості по ширині каналу

Fig. 3. Distribution of longitudinal velocity across the channel width

Значення температури розплаву й тиску на вході до конусного кільцевого каналу дорівнюють значенням цих параметрів на виході з прямого кільцевого каналу першої зони. Температура розплаву зростає по довжині каналу, але темп зростання в кінці каналу суттєво спадає (рис. 7).

Згідно з рівнянням (23), це пов'язано зі зменшенням інтенсивності дисипативного нагрівання розплаву завдяки різкому зменшенню швидкості зсуву тангенціальної течії (рис. 7), а також ефективної в'язкості (рис. 8) по довжині.

Перепад тиску в каналі $\Delta p(L_2)$ становить близько 10 атм, причому темп спадання тиску поступово зменшується з довжиною.

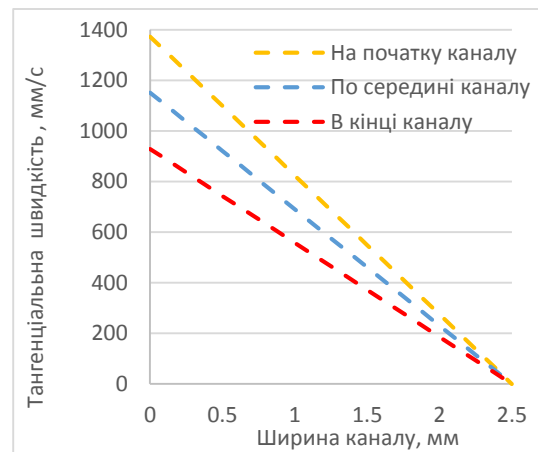


Рис. 4. Розподіл тангенціальної швидкості по ширині каналу

Fig. 4. Distribution of the tangential velocity across the channel width

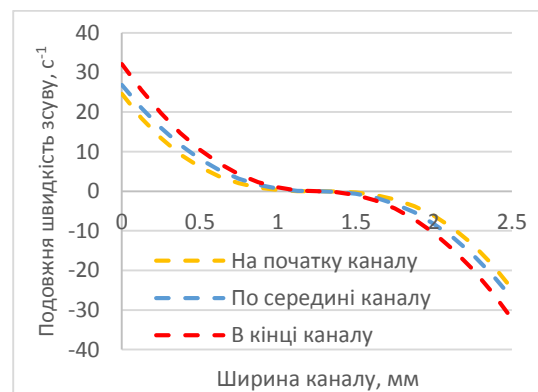


Рис. 5. Розподіл подовжніх швидкостей зсуву по ширині каналу

Fig. 5. Distribution of longitudinal shear rate across the channel width

МАШИНОБУДУВАННЯ

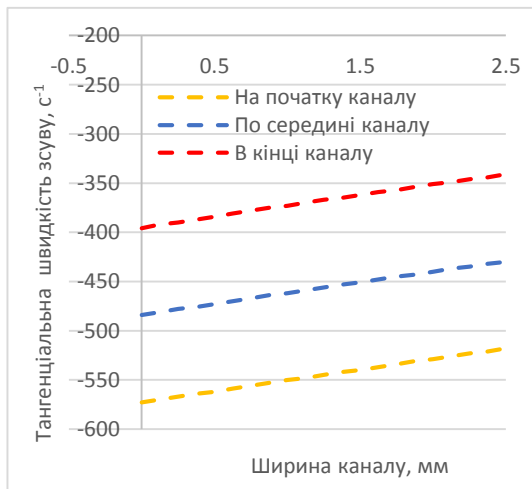


Рис. 6. Розподіл тангенціальних швидкостей зсуву по ширині каналу

Fig. 6. Distribution of tangential shear rate across the channel width

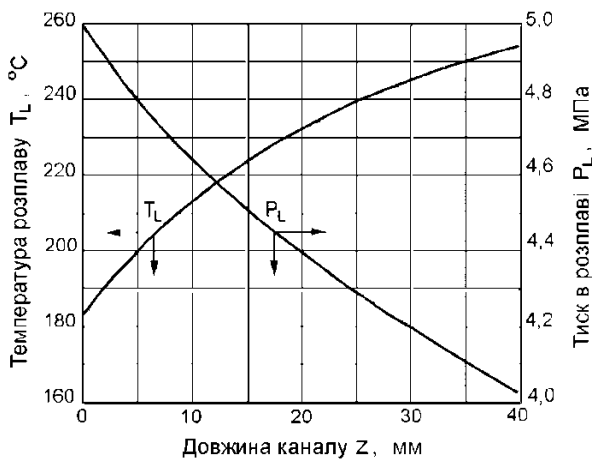


Рис. 7. Розподіл тиску p_l та усередненої температури розплаву T_l по довжині конусного кільцевого каналу

Fig. 7. Distribution of pressure p_l and averaged melt temperature T_l , along the length of the conical annular channel

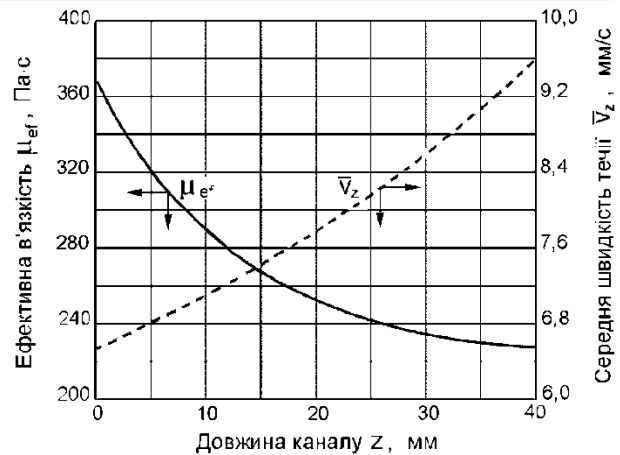


Рис. 8. Розподіл ефективної в'язкості розплаву μ_{ef} (суцільна лінія) та усередненої швидкості подовжньої течії \bar{v}_z (пунктир) по довжині конусного кільцевого каналу

Fig. 8. Distribution of the effective melt viscosity μ_{ef} (solid line) and the averaged longitudinal flow velocity \bar{v}_z (dotted line) along the length of the conical annular channel

Наукова новизна та практична значимість

Уперше розглянуто процеси течії в конусному каналі та представлено аналітичну методику розрахунку. Щоб отримати аналітичні рівняння, що описують гідродинамічні, термічні та реологічні процеси в такому каналі, уперше застосовано ортогональну систему координат. Для розрахунку розподілу параметрів течії по ширині кільцевого зазору введено координату ψ , яка є спільною для всіх трьох підзон гомогенізації. Отримані результати дають важливу інформацію про особливості процесів, які відбуваються в конусному кільцевому каналі. Це полегшує розробку раціональної конструкції дискових екструдерів та обґрунтування оптимальних режимів їх роботи.

Висновки

Уперше описано процеси течії в конусному каналі та процедуру розрахунку в аналітичному вигляді. Подано залежності, що описують процес гомогенізації. Розрахунок процесів течії проведено в конусній ортогональній системі ко-

МАШИНОБУДУВАННЯ

ординат таким чином, щоб була можливість застосувати спільну координату ψ для всієї зони гомогенізації. Додовнено наявну загальну про-

цедуру розрахунків для каналів зони гомогенізації. Показано, як змінюються швидкості і швидкості зсуву подовжньої й тангенціальної складових.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузьяев И. М., Свидерский В. А., Петухов А. Д. *Моделирование экструзии и экструдеров при переработке полимеров* : монография. Ч. 2. Киев : НТУУ «КПИ», 2016. 276 с.
2. Мікульонюк І. О., Радченко Л. Б. *Модельовання дискових екструдерів для перероблення полімерних матеріалів*. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 103 с.
3. Новодворський В. В., Іваницький Г. К. Модельовання течії розплаву полімеру в кільцевому каналі дискового екструдера. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 1 (101). С. 37–46. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/282982>
4. Новодворський В. В., Швед М. П. Процес гомогенізації розплаву в дисковому екструдері з дозованим живленням. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 3-4 (99-100). С. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/275702>
5. Abeykoon C., Martin P. J., Li K., Kelly A. L., Brown E. C., Coates P. D. Melt temperature consistency during polymer extrusion. *Polymer Engineering and Science*. 2014. Vol. 54. Iss. 10. P. 2430–2440. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.23784> (in English)
6. Bird R. B., Stewart W. E. Lightfoot E. N. *Transport Phenomena*. John Wiley and Sons Inc., New York, 1960. 780 p.
7. Campbell G. A., Spalding M. A. *Analyzing and troubleshooting single-screw extruders*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2020. 864 p.
8. Ding Y., Abeykoon C., Perera Y. S. The effects of extrusion parameters and blend composition on the mechanical, rheological and thermal properties of LDPE/PS/PMMA ternary polymer blends. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2022. Vol. 4. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100067>
9. Rauwendaal C. *Polymer extrusion*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014. 950 p.
10. Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K. J., Buziak K. Fundamentals of global modeling for polymer extrusion. *Polymers*. 2019. Vol. 11. Iss. 12. P. 1–31. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11122106>

V. V. NOVODVORSKYI^{1*}, G. K. IVANITSKY², N. P. SHVED³

^{1*}Dep. of Chemical Engineering and Oil Refining Industry, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Beresteiskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, tel. +38 (096) 040 46 59, e-mail novodvorskiyvolodymyr@gmail.com, ORCID 0000-0002-2895-4506

²Dep. of Chemical Engineering and Oil Refining Industry, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Beresteiskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, tel. +38 (067) 145 61 35, e-mail gergey4@gmail.com, ORCID 0000-0002-0486-2359

³Dep. of Chemical Engineering and Oil Refining Industry, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Beresteiskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, tel. +38 (066) 740 25 45, e-mail npchved46@gmail.com, ORCID 0000-0001-7725-1447

Modeling OF Non-Isothermal Polymer Melt Flow in a Conical Annular Channel of a Disk Extruder

Purpose. The homogenization zone consists of various channels with different configurations, for each of which it is necessary to determine the passage of the melt flow process, and on its basis – the velocity fields, which determine the quality of mixing and distribution of components in the melt. To ensure a flexible and controllable homogenization process with the possibility of improving the quality of the melt, it is necessary to study the flow processes in the channels of a disk extruder. Therefore, the main objective of this work is to perform hydrodynamic modeling of processes during melt flow in a conical channel. **Methodology.** To achieve this goal, we propose a methodology for determining the flow processes in a conical channel, and find out which zones are convenient to consider in a special conical orthogonal coordinate system. For this purpose, the change in the radial coordinate, which has the same meaning in both the straight and the conical gap, was described – it is a coordinate along the width of the gap.

МАШИНОБУДУВАННЯ

This makes it possible to further apply this coordinate for the width of the disk gap – between the moving and stationary disks. **Findings.** A method has been proposed that describes the flow processes in the conical channel of the homogenization zone of a disk extruder. The calculation procedure is presented in an analytical form, and graphical dependences of the distribution of tangential and longitudinal velocities and shear velocities of the melt flow along the width of the annular channel at the nominal and maximum disk speeds and at the nominal and maximum disk gap are also given. **Originality.** For the first time, a methodology for calculating the conical channel of the homogenization zone of a disk extruder is presented, which describes the flow processes in a conical orthogonal coordinate system, which allows taking into account the common coordinate for the entire homogenization zone. The general procedure for calculating the channels of the homogenization zone has been supplemented. **Practical value.** The procedure for calculating the channels of the homogenization zone, which was started earlier, was extended and applied to the flow in a conical annular channel. This coordinate allows us to describe the flow processes along the width of the channel for all channels of the homogenization zone of a disk extruder, which greatly simplifies the calculations. Important results of hydrodynamic and thermal processes were obtained for the annular channel, which makes it possible to design disk extruders with greater accuracy and calculate their optimal operating modes.

Keywords: disk extruder; polymers; annular channels; conical annular channels; modeling; non-isothermal processes

REFERENCES

1. Kuzyaev, I. M., Sviderskiy, V. A., & Petukhov, A. D. (2016). *Modelirovanie ekstruzii i ekstruderov pri pererabotke polimerov: monografiya* (Vol. 2). Kyiv: NTUU «KPI». (in Russian)
2. Mikulonok, I. O., & Radchenko, L. B. (2015). *Modelyuvannya diskovikh ekstruderiv dlya pereroblennya polimernikh materialiv*. Kyiv: NTUU «KPI». (in Ukrainian)
3. Novodvorskyi, V. V., & Ivanitsky, G. K. (2023). Modeling of Polymer Melt Flow in the Annular Channel of a Disk Extruder. *Science and Transport Progress*, 1(101), 37-46. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/282982> (in Ukrainian)
4. Novodvorskyi, V. V., & Shved, N. P. (2022). The Process of Melt Homogenization in a Metered-Discharge Disk Extruder. *Science and Transport Progress*, 3-4(99-100), 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/275702> (in Ukrainian)
5. Abeykoon, C., Martin, P. J., Kelly, A. L., Li, K., Brown, E. C., & Coates, P. D. (2013). Investigation of the temperature homogeneity of die melt flows in polymer extrusion. *Polymer Engineering & Science*, 54(10), 2430-2440. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.23784> (in English)
6. Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1960). *Transport Phenomena*. John Wiley and Sons, Inc., New York. (in English)
7. Campbell, G. A., & Spalding, M. A. (2020). *Analyzing and troubleshooting single-screw extruders*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. (in English)
8. Ding, Y., Abeykoon, C., & Perera, Y. S. (2022). The effects of extrusion parameters and blend composition on the mechanical, rheological and thermal properties of LDPE/PS/PMMA ternary polymer blends. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 4, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100067> (in English)
9. Rauwendaal, C. (2014). *Polymer extrusion*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. (in English)
10. Wilczyński, K., Nastaj, A., Lewandowski, A., Wilczyński, K. J., & Buziak, K. (2019). Fundamentals of Global Modeling for Polymer Extrusion. *Polymers*, 11(12), 1-31. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11122106> (in English)

Надійшла до редколегії: 20.02.2023

Прийнята до друку: 23.06.2023