

УДК 678.057

С.А. Кривко,

Д.Д. Рябінін, канд. техн. наук

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

ПРОФІЛІ ШВИДКОСТЕЙ ТЕЧІЇ РОЗПЛАВУ ПОЛІЕТИЛЕНУ У ПРЯМОКУТНОМУ КАНАЛІ

Течение расплавов полимеров в каналах прямоугольных сечений широко применяется в процессах химического машиностроения. Распределение скоростей расплавов в таких каналах (профиль скорости) имеет большое значение при анализе структуры потока расплава, определении эффектов на стенках и напряжений по сечению канала, верификации математических моделей движения расплава. Приведена обработка данных экспериментальных исследований течения расплава полиэтилена низкой плотности с целью получения профилей скоростей.

Polymer melt flow in rectangular channel is widely used in processes of chemical engineering. Velocity distribution in such channels (velocity profiles) has a great importance during structure analysis of melt flow, determination effect on boundaries and stresses in channel section, melt movement mathematical model verification. In this article is shown data analysis of experimental research of low density polyethylene melt flow in purpose of velocity profile obtaining.

Вступ

Течії ньютонівських рідин у прямокутних каналах широко використовуються у процесах хімічного машинобудування. Зокрема, при переробці та формуванні виробу полімери знаходяться у в'язкотекучому стані і мають властивості сильно-нелінійних, в'язкопружних рідин [1]. Течія полімерів у каналах супроводжується структурними перетвореннями, які призводять до гідродинамічних аномалій, наприклад, до пристінного ковзання або проковзування агрегатів надмолекулярних структур відносно одної у центральних областях потоку полімеру [2]. Форма каналу суттєво впливає на розподіл швидкостей і напружень у потоці полімеру [3]. Точність визначення гідродинамічних характеристик при течії розплавів у прямокутних каналах має важливе практичне значення тому, що гідродинамічний вплив визначає розмірну точність і фізико-механічні властивості полімерних виробів. Математичні методи опису даного процесу [3] потребують чималої кількості даних, тому величезне практичне значення має експеримент для визначення кінематичних характеристик. Але і вони не завжди дають всю необхідну інформацію про течію.

Актуальність визначення профілів швидкостей матеріалу полягає в тому, що профіль швидкостей у потоці розплаву дає інформацію про:

- структуру потоку та характеристику в'язкості матеріалу за різних температурних умов та зсуву;
- наявність пристінних ефектів, неврахування яких призводить до значного зниження якості продукції під час процесу вичавлювання [4];
- розподіл напружень по перерізу потоку розплаву, що дозволить створювати більш ефективне обладнання в плані енергоефективності та отримання більш якісної продукції;
- дозволяє проводити верифікацію математичних моделей.

Проблематика визначення повного профілю швидкості полягає в недостатності отриманих експериментальних даних для його побудови, тому виникає необхідність у розробці алгоритму, який дозволить визначити повний профіль за наявних даних.

Метою статті є розроблення алгоритму визначення профілів швидкостей у каналі 32x16 мм для розплаву поліетилену низької густини П-2010-В за неповних експериментальних даних.

Визначення профілів швидкостей

З літературних джерел відомо декілька методів експериментального дослідження профілів швидкості у потоці розплаву полімеру. Так, у роботі [5] запропоновано проводити такі дослідження за допомогою методу лазерної доплерівської анемометрії (laser-Doppler velocimetry). Суть методу полягає у вимірюванні швидкості розплаву поліетилену низької густини при температурі 180°C та об'ємній витраті 0,4 см³/с за допомогою доплерівського зсуву частоти випромінюваного лазером променя, розсіяного на додані до розплаву включення TiO₂, які сприяли покращенню сигналу. Варто зауважити, що такого роду експериментальне обладнання мало обмеження по виміру швидкості в пристінних шарах і складало 30 мкм. Для завершення профілю швидкостей у досліджуваному каналі у роботі [5] були розраховані значення швидкості в пристінній зоні згідно закону Освальда де Віля та далі екстрапольовані до стінки.

У роботі [6] представлено метод виміру профілю швидкостей за допомогою визначення температури розплаву сіткою теплопровідних дротів, що з'єднані з датчиками температури, та через малість розмірів не впливають на профіль швидкостей. Вимір проводився через визначення температури розплаву полімеру, що був охолоджений за допомогою встановленої перед дротами спеціальної системи трубок із охолоджуючою рідиною, поданою у певні

періоди часу, та визначення часу проходження охолодженого полімеру від трубки до теплопровідного дроту. Знаючи розміщення охолоджуючих трубок та час проходження до дротів, визначались швидкості по перерізу каналу.

У роботі [7] для дослідження профілю швидкостей розплаву поліетилену низької густини марки П-2010-В у каналах круглої форми запропоновано установку, яка дозволяла створювати мітки у потоці розплаву імпульсним введенням підфарбованого матеріалу. Варто зауважити, що пристроєм для створення витрати розплаву полімеру був циліндр з підігрівом, температурний режим якого можна було контролювати, та поршень, який давав можливість створювати необхідні витрати. Також установка забезпечувала відсутність впливу ефекту входу в досліджуваному об'ємі поліетилену, про що свідчить симетричність профілів швидкостей при дослідженні каналів круглої форми. Вимірювальна апаратура дозволяла проводити вимірювання: температури в декількох точках циліндру; перепад тиску в двох - трьох точках по довжині досліджуваного каналу; зусилля, що діяло на канал в осьовому напрямку.

Для дослідження профілю швидкостей розплаву поліетилену низької густини марки П-2010-В було застосоване створення міток імпульсним введенням підфарбованого матеріалу [7]. Розміри обраного прямокутного каналу складали: висота $B = 15,83$ мм, ширина $H = 31,99$ мм. Мітки вводились в потік за температур 150°C , 170°C , 190°C по діагоналі з довжиною $L = 35,69$ мм на безрозмірних відстанях L_i від кута до центру каналу, що розраховувались як $L_i/(L/2)$ та складали $0,955$, $0,9$, $0,85$, $0,8$, $0,625$, $0,6$, $0,4$, $0,2$, $0,0$ [8]. Також мітки вводились у переріз каналу, для якого $H/2 = 15,995$ мм, на безрозмірній відстані H_i від стінки до центру каналу, що розраховувалась як $H_i/(H/2)$. Безрозмірні відстані складали $0,95$, $0,9$, $0,8$, $0,6$, $0,4$, $0,2$, $0,0$ [8].

На рисунках 1–3 зображені залежності швидкостей від безрозмірної координати H_i в перерізі каналу за різних витрат Q та при різних температурах T для розплаву вищезгаданого поліетилену П-2010-В. Завдяки саме візуалізації цих даних стає можливим охарактеризувати течію в каналі.

У роботі [7] наведено криві течії матеріалу П-2010-В, дослідженого у широкому діапазоні температур. Ці криві інваріантні відносно діаметрів циліндричних каналів, що свідчить про відсутність пристінних ефектів, про неньютонівський характер течії розплаву та відповідність степеневому закону [9].

Для випадку ж прямокутного каналу 32×16 мм на рисунках 1а, 2а, 3а видно, що із зростанням витрати розплаву, за умови сталої температури, швидкість поблизу стінок стає відмінною від нуля та зростає. Це пояснюється збільшенням градієнту швидкості та напружень зсуву в розплаві [10] та обмеженням експериментального обладнання при здійсненні вимірів на відстані від стінки ($0,7$ мм). Математична залежність безрозмірної координати H_i та швидкості у по ширині каналу (1), отримано методом лінійної регресії, доводить факт відсутності пристінного ковзання для розплаву поліетилену П-2010-В за $T = 150^\circ\text{C}$ та об'ємної витрати $Q = 17,3$ см³/с. При підстановці у залежність (1) координат стінки каналу $H_i = 1$ значення швидкості v дорівнює нулеві.

$$v = a_0 + a_1 \cdot H_i + a_2 \cdot H_i^2 + a_3 \cdot H_i^3 + a_4 \cdot H_i^4, \quad (1)$$

де коефіцієнти $a_0 = 3,22811733$; $a_1 = 25,191206$;
 $a_2 = -89,15913389$; $a_3 = 125,33262$; $a_4 = -64,670457$.

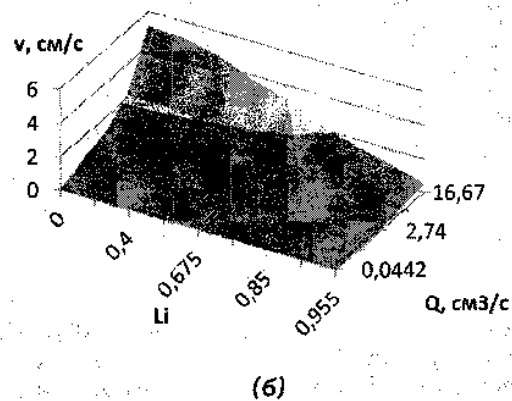
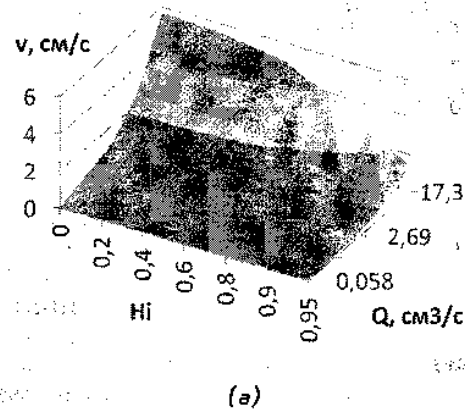
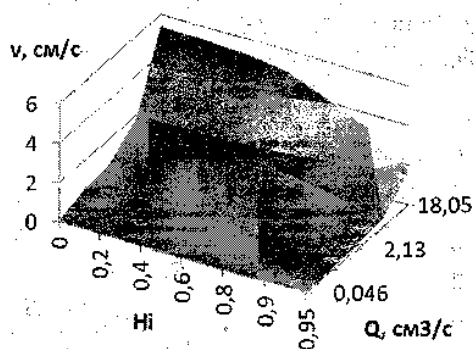


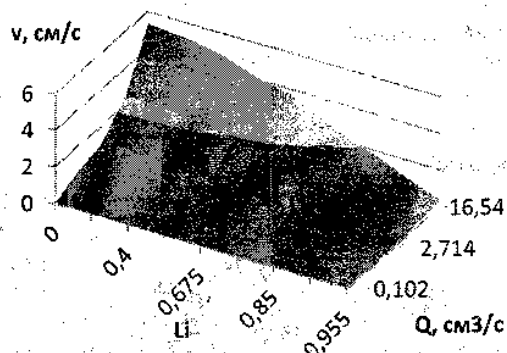
Рисунок 1 — Профілі швидкостей розплаву v поліетилену П-2010-В в каналі $31,99 \times 15,83$ мм за температури 150°C за різних витрат розплаву Q . а — по перерізу каналу за безрозмірних відстаней від стінки до центру каналу H_i ; б — по діагоналі каналу за безрозмірних відстаней від кута до центру каналу L_i .

На рисунках 1б, 2б, 3б показано залежності швидкостей v від безрозмірної відстані по діагоналі від центру до кута L_i у перерізі каналу за різних витрат Q та при різних температурах T . За значень L_i , що дорівнюють $0,995$, при різних витратах та температурах можна спостерігати мале значення швидкості розплаву v порівняно із відповідними значеннями для H_i у межах постійних значень температури та витрати. Це свідчить про застій розплаву в кутах каналу.

Рисунки 1, 2, 3 не дають чіткої картини розподілу швидкостей по перерізу каналу, тому на рисунку 4 показано отриманий профіль швидкостей у каналі 32×16 мм за температури $T = 150^\circ\text{C}$ та витрати $Q = 2,69$ см³/с для поліетилену низької густини П-2010-В. Даний профіль є замкнутими кривими постійної швидкості, як залежності від геометрії, у перерізі каналу.



(a)



(б)

Рисунок 2 — Профілі швидкостей розплаву v поліетилену П-2010-В у каналі $31,99 \times 15,83$ мм за температури 170°C за різних витрат розплаву Q . а — по перерізу каналу за безрозмірних відстаней від стінки до центру каналу H_i ; б — по діагоналі каналу за безрозмірних відстаней від кута до центру каналу L_i .

Профілі швидкостей на рисунку 4 отримано за умов, що профіль симетричний по V , H та по діагоналям, згідно наступного алгоритму:

1. З масиву експериментальних даних залежностей швидкості, безрозмірних координат та витрат для побудови профілю був відібраний випадок для $T = 150^\circ\text{C}$ та $Q = 2,69 \text{ cm}^3/\text{s}$ так як різниця значень витрат розплаву поліетилену для діагоналі та ширини становлять менше ніж 10% різниці. У випадку відомої залежності між швидкістю та витратою, для підвищення точності профілю, необхідно звести значення швидкостей до однієї витрати. Для даного випадку був розрахований коефіцієнт пропорційності.

2. За допомогою методу лінійної регресії експериментально отримані точки профілю швидкостей були приведені до математичної залежності безрозмірної відстані по діагоналі L_i як функції швидкості v . Для вищевказаного випадку витрати та температури залежність має вигляд:

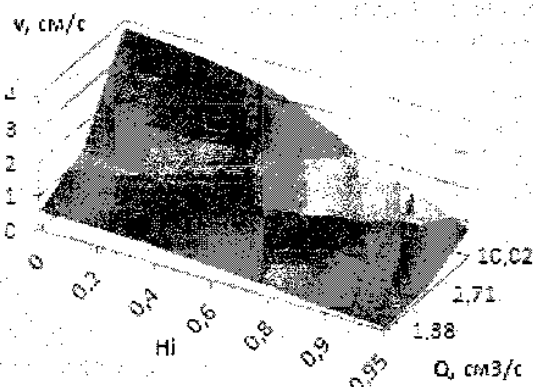
$$L_i = a_0 + a_1 \cdot v + a_2 \cdot v^2 + a_3 \cdot v^3 + a_4 \cdot v^4 + a_5 \cdot v^5, \quad (2)$$

де коефіцієнти $a_0 = 316,82065$; $a_1 = 315,01013$; $a_2 = 159,90032$; $a_3 = 46,890211$; $a_4 = 19,962853$; $a_5 = 315,80863$.

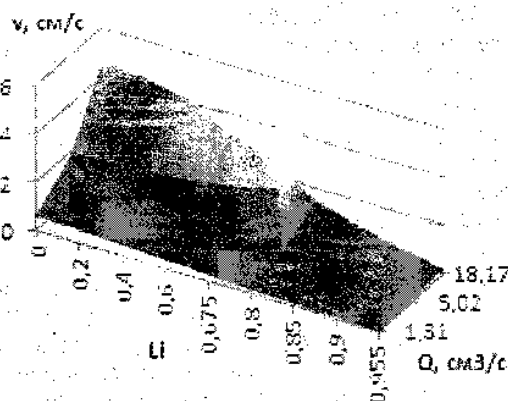
3. Підставимо у (2) значення швидкостей v для H_i , отримаємо точки з деякими значеннями L_i , що відповідають значенням швидкості для H_i . Далі отримаємо координати точки в мм.

4. Припустимо, що розподіл швидкостей по висоті та ширині каналу носить однаковий характер, координати точок по висоті каналу V , перетворимо у координати, вказані у міліметрах, згідно безрозмірних H_i .

5. Замкнені криві постійних швидкостей (рисунок 4) отримемо з'єднанням відповідних точок одного значення швидкості та згладжені.



(a)



(б)

Рисунок 3 — Профілі швидкостей розплаву v поліетилену П-2010-В у каналі $31,99 \times 15,83$ мм за температури 190°C за різних витрат розплаву Q . а — по перерізу каналу за безрозмірних відстаней від стінки до центру каналу H_i ; б — по діагоналі каналу за безрозмірних відстаней від кута до центру каналу L_i .

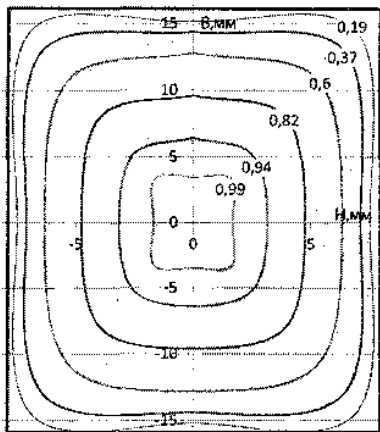


Рисунок 4 — Профіль швидкості поліетилену П-2010-В за температури $T=150\text{ }^{\circ}\text{C}$ та за витрати $Q = 2,69\text{ см}^3/\text{с}$.

Висновок

У низці випадків розподіл швидкостей у перерізі каналу може використовувати при верифікації математичної моделі, аналізі присутності ефектів у течії полімеру чи структури потоку або отримання необхідних параметрів матеріалу. У випадку експериментального дослідження течії розплаву поліетилену низької густини П-2010-В отриманих даних за різних умов виміру недостатньо для побудови повного профілю швидкостей у каналі. Запропонований алгоритм, що базується на визначенні математичних залежностей профілів швидкостей по діагоналі та ширині каналу методом лінійної регресії, дозволяє побудувати повний профіль швидкостей для каналу $32 \times 16\text{ мм}$. Додаткове використання математичних залежностей дозволяє довести відсутність пристінного ковзання матеріалу.

Література

1. Виноградов, Г.В. Реология полимеров / Г.В. Виноградов, А.Я. Малкин. — М.: Химия, 1977. — 438 с.
2. Жданов, Ю.А. Исследование профиля скоростей при течении расплава полиэтилена в цилиндрических каналах / Ю.А. Жданов, В.Ф. Дубовицкий // Сб. «Химическое машиностроение». — К.: Техніка, 1968. — Вып. 8 — С. 42—47.
3. Литвинов, В.Г. Движение нелинейно-вязкой жидкости / В.Г. Литвинов. — М.: Наука, 1982. — 376 с.
4. Denn, Morton M Extrusion instabilities and wall slip / Morton M Denn // Annu. Rev. Fluid Mech. — 2001. — No. 33. — P. 265—287.
5. Hertel, Daniela Flow of polyethylene melts within and into rectangular ducts investigated by laser — Doppler velocimetry: Dissertation / Daniela Hertel; [Universitet Erlangen-Numberg]. — Erlangen, 2008. — 194 p.
6. Sombatsompop, N. A novel method for velocity profile measurements in flowing polymer melts/ N. Sombatsompop, Alan Wood // Materials Research Innovations. — 1999. — Vol. 3, No. 2. — P. 107—111.
7. Жданов, Ю.А. Исследование течения расплавов полимеров в каналах головок червячных машин: автореф. дис. канд. тех. наук / Ю.А. Жданов; [Киевский политехнический ин-т]. — К., 1969. — 24 с.
8. Пристінні ефекти в процесах переробки полімерних матеріалів [Текст] / В.І. Сивецький, О.С. Сахаров, О.Л. Сокольський, Д.Д. Рябинін. — К.: НТУУ «КПІ», 2009. — 140 с.
9. Исследование течения полиэтилена низкой плотности в прямоугольных цилиндрических каналах / И.И. Чернобильский, Д.Д. Рябинин, Ю.А. Жданов, Л.А. Иванова // Химическая технология. — 1973. — № 5. — С. 15—18.
10. Особенности течения расплава полимера в прямоугольных каналах [Текст] / Д.Д. Рябинин, О.М. Яхно, В.Н. Тонконог, В.Н. Тимков, Н.В. Омельченко // сб. Химическое машиностроение. — К.: Техніка, 1982. — Вып. 35. — С. 40—43.

Надійшла 20.05.2011 р.