

ПРОЦЕС КАСКАДНОЇ ДИСКОВО-ШЕСТЕРЕННОЇ ЕКСТРУЗІЇ ТА ЙОГО АНАЛІЗ

Швед М.П., Швед Д.М., Новодворський В.В., Ковба А.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
вул. Політехнічна, 39, 03056, м. Київ
npchved46@gmail.com, qwertyqwerty641@ukr.net,
anastasianikolaevnakovba@gmail.com

Під час дослідження ринку екструзійного обладнання неможливо не помітити, що останнім часом у зв'язку зі зростаючими обсягами виробництва полімерної продукції стають серйознішими і вимоги до екструдерів. Аналіз відомих каскадних схем екструзії показує, що на першій стадії, як правило, застосовується екструдер, який володіє високим пластифікуючим і змішувачим ефектом. На другій стадії для дозування розплаву застосовують черв'ячний екструдер або шестеренний насос. На основі аналізу літературних і патентних матеріалів пропонується схема каскадної дисково-шестеренної екструзії з використанням як генератора розплаву дискового екструдера з дозованим живленням, а для створення тиску та дозування розплаву – шестеренного насоса. Теоретичного та експериментального доведення потребує припущення, що застосування такої каскадної схеми в технологічних лініях для екструзії полімерів дає змогу гнучко керувати процесом екструзії та встановлювати оптимальні режими операцій. Плавлення і гомогенізація в такому екструдері будуть відбуватися за високих швидкостей зсуву й відносно невеликих тисків із можливістю регулювання термомеханічного навантаження на розплаву завдяки можливості зміни швидкості обертання черв'ячно-дискової частини. В дисковій зоні буде відбуватися кероване диспергуюче перемішування завдяки можливості зміни величини робочого зазору за сталої продуктивності. Каскадні схеми екструзії дають змогу шляхом оптимізації процесів і можливості перерозподілу потужності між каскадами збільшити продуктивність на 50–100% з одночасним підвищенням якості продукції і покращенням питомих показників на 20–30%. Застосування шестеренного насоса для створення тиску і дозування розплаву дасть змогу шляхом зменшення допусків на геометричні розміри заощаджувати до 4% полімеру та енергії. *Ключові слова:* екструзія, полімер, гомогенізація, екструдер, шестеренний насос, каскадна установка, екологічна безпека.

The process of cascade disk-gear extrusion and its analysis. Shved M., Shved D., Novodvorskyi V., Kovba A. When researching the market for extrusion equipment, it is possible not to notice that in the recent years, due to the growing volume of production of polymer products, the requirements for extruders are becoming more serious. Analysis of known cascade extrusion schemes shows that in the first stage, as a rule, an extruder is used which has a high plasticizing and mixing effect. In the second stage, a screw extruder or gear pump is used to dispense the melt. Based on the analysis of the literature and patent materials, a scheme of cascade disk-gear extrusion with the use of a melt generator – a disk extruder, and to create pressure and dosage of the melt – a gear pump is proposed. Theoretical and experimental proofing requires the assumption that the use of such a cascade scheme in the process lines for the extrusion of polymers allows flexible control of the extrusion process and to establish the optimal modes of operation. Melting and homogenization in such an extruder will occur at high shear rates and relatively low pressures, with the ability to adjust the thermomechanical melt load due to the rotational speed of the screw disk. In the disk zone will be controlled dispersive mixing due to the possibility of changing the size of the working gap with constant productivity. Cascade extrusion schemes allow for optimization of processes and the ability to redistribute power between cascades to increase productivity by 50–100%, while improving product quality and improving specific performance by 20–30%. The use of a gear pump for pressure generation and melt dosing will save up to 4% of polymer and energy by reducing tolerances on geometric dimensions. *Key words:* extrusion, polymer, homogenization, extruder, gear pump, cascade installation, environmental safety.

Постановка проблеми. Нині вироби з полімерів набули значного поширення, адже заміна металу на полімер значно знижує ціну на виріб, що пояснює актуальність і стрімкий розвиток полімерної галузі, який сприяє розробленню нових і вдосконаленню наявних технологій і машин, що, у свою чергу, допомагають розширити номенклатуру матеріалів, які перероблюються, та виробів, що отримуються в результаті цієї переробки.

Актуальність дослідження. До 2100 року прогнозується десятикратний ріст використання полімерних матеріалів у народному господарстві, причому продукція полімерного машинобудування буде рости на 2–3% щорічно [1].

Така динаміка і обсяги виробництва та переробки полімерних матеріалів зумовлюють створення нових економічно обґрунтованих, високопродуктивних, ресурсо-енергоощадних процесів та обладнання для переробки полімерів, завдяки яким можна буде отримувати вироби відомої якості та з'явиться можливість гнучкого керування всім екструзійним процесом загалом.

Аналіз властивостей полімерів, які використовуються в господарстві та промисловості, дає змогу зробити висновок про те, що основним методом переробки полімерів є термомеханічний метод, а одним із основних способів переробки – екструзія, де відбувається безперервний процес перевер-

дення матеріалу з твердого у в'язкотекучий стан із наступним продавлюванням розплаву через фільтру, профіль якого визначає конфігурацію та геометричні розміри виробу. При цьому одночасно в екструдері послідовно виконуються операції живлення, стискання, плавлення твердого полімеру, гомогенізація розплаву, створення тиску та дозування розплаву через формуючий інструмент. Сьогодні в процесах екструзії найпоширенішим обладнанням є одночерв'ячні екструдери, на яких базується більшість технологічних ліній. Основна вимога, що може бути висунута до екструзійної машини в зоні живлення, є хороший захват матеріалу, незалежно від того, гранульований чи порошкоподібний матеріал.

У зоні плавлення необхідно, щоб весь термопласт якомога швидше перейшов із твердого стану у в'язкотекучий.

Достатня температурна та механічна гомогенність розплаву по всьому об'єму [2; 3], необхідний тиск та його стабільність, відсутність коливання продуктивності на виході – усе це необхідно, щоб забезпечувати зону гомогенізації.

Більшість вищеперерахованих завдань можна реалізувати як конструкцією екструзійної машини чи окремих її частин (наприклад, завдяки як зміні геометрії черв'яка (шнека), так і схемі переробки).

Аналіз наявних технічних умов, регламентів і стандартів на полімерні вироби (труби, плівка, листи) показав, що допуски на геометричні розміри виробів часто на 10–15% перевищують номінально необхідні [4–6].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Одним із шляхів заощадження ресурсів та енергії під час екструзії полімерів могло би бути зменшення допусків на геометричні розміри виробів. Дослідження та аналіз процесів одночерв'ячної екструзії показали, що зона дозування екструдера значною мірою чутлива до пульсацій тиску, які виникають через нестабільність процесів у попередніх зонах плавлення та живлення, що призводить до коливання продуктивності, які і є основною причиною встановлення завищених допусків на геометричні розміри виробів. Усунення пульсацій продуктивності дало б змогу зменшити допуски, що сприяло б суттєвій економії полімеру та енергії, а також знизило б навантаження на екологію завдяки зменшенню кількості сировини, яка потребує утилізації.

Іншим шляхом удосконалення процесу екструзії є створення каскадних схем екструзії, коли весь процес розділяється на окремі операції з можливістю автономного керування [7–9]. Такий підхід дає змогу:

- гнучко керувати процесом екструзії;
- розширити номенклатуру перероблюваних матеріалів;
- економити енергію завдяки можливості автономно вибирати раціональні режими для окремих операцій.

Методологічне значення полягає у визначенні методики експериментального дослідження гнучко керованого процесу екструзії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи наявні схеми каскадних екструдерів та їхнє апаратне оформлення [1; 7–9], можна зробити висновок, що майже у всіх екструдерах процеси створення тиску та дозування виконуються в'язкісним черв'ячним екструдером, максимальна теоретична енергоефективність якого становить 33,3%, а на практиці вона не перевищує і 10% [1–3; 10]. Тому такі каскадні екструдери не завжди можуть задовольнити вимоги переробників, особливо, в плані гомогенізації, гнучкого безінерційного керування процесом переробки та стабільності продуктивності на виході з екструдера.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Напрямок досліджень безпосередньо пов'язаний із визначальною проблемою ресурсоенергозбереження, вирішення якої дає змогу створити якісно новий процес екструзії полімерів, за якого краща якість продукції, відбувається економія енергії та сировини за меншого навантаження на екологію.

Новизна роботи полягає в дослідженні та отриманні даних ресурсоенергоощадного процесу екструзії.

Виклад основного матеріалу. Теоретичні й експериментальні дослідження з удосконалення процесів екструзії, які проводяться на кафедрі МАХНВ КПІ ім. Ігоря Сікорського, показали, що процеси плавлення та гомогенізації полімерів ефективніше проводити в полі високих швидкостей зсуву за незначних тисків [10], тобто реалізуючи модель дисперсійного плавлення, яка у 4–5 разів ефективніша за класичну пробкову модель плавлення Тадмора і полягає в тому, що частинки твердого полімеру дисперговані в його розплаві [10].

Процеси створення тиску та дозування розплаву ефективніше виконувати не в'язкісним черв'ячним насосом, продуктивність якого є чутливою до коливань тиску, а об'ємним дозуючим насосом із жорсткою напірною характеристикою, наприклад шестеренним насосом, продуктивність якого практично не залежить від таких коливань [11].

З урахуванням вищесказаного було розроблено систему каскадної дисково-шестеренної екструзії, яка передбачає виведення в автономно керуючі таких операцій: на першій стадії – дозованого живлення, плавлення і гомогенізації, а на другій – створення тиску, його стабілізації та дозування розплаву.

Апаратне оформлення такої системи представлено на рисунку 1.а, де на першій стадії як розплавлювач-гомогенізатор використовується дисковий екструдер, який працює в режимі дозованого живлення, що дає змогу за невисоких тисків реалізувати модель дисперсійного плавлення, завдяки якій інтенсивність плавлення зростає на 200–300%, тем-

пература розплаву більш однорідна і нижча, довжина зони плавлення зменшується в 2–4 рази [10]. До того ж на 30% покращується енергоефективність процесів плавлення і гомогенізації завдяки можливості незалежного гнучкого регулювання термо-механічного навантаження на полімер за незмінної продуктивності. Це можливо в завантажувально-пластикувальній зоні за допомогою регулювання частоти обертання шнека, а в дисковій зоні – величиною робочого зазору.

Шестеренний насос у каскадній схемі екструзії завдяки жорсткій напірній характеристиці вирівнює пульсацію розплаву і стабілізує коливання продуктивності, які здебільшого не більше 1% проти 5–8% в черв'ячному екструдері, що дає змогу випускати продукцію з меншими допусками на геометричні розміри зі значною економією сировини та енергії, що і є головною економічною підставою використання таких насосів для дозування розплавів полімерів.

Особливістю каскадного дисково-шестеренного екструдера є те, що всі три пристрої: 1 – шнековий дозатор, 2 – дисковий екструдер і 3 – шестеренний насос – оснащені приводами 5, 6, 7 з можливістю безступінчастого регулювання кутової швидкості робочих органів, а також те, що між дисковим екструдером і шестеренним насосом встановлено компенсатор (4), який має зворотний зв'язок із приводом дозатора та узгоджує продуктивність дозатора і шестеренного насоса завдяки стабільності тиску на вході в шестеренний насос.

Перероблюваний полімер шнековим дозатором (1) подається в завантажувальну горловину диско-

вого екструдера (2), де він захоплюється багатозахідною гвинтовою нарізкою завантажувально-пластикувальної зони (9), розігрівається, плавиться завдяки енергії дисипації та у вигляді розплаву надходить у торцевий робочий зазор (8) дискового екструдера, де завершується плавлення полімеру та його гомогенізація. Під дією тиску, який створюється завантажувально-пластикувальною зоною та ефектом Вайсенберга, розплав попадає на вхід шестеренного насоса (3), де заповнює міжзубні западини шестерень, які під час їх обертання забезпечують перенесення розплаву із зони низького тиску в зону високого, створюючи необхідні умови для проходження розплаву через дроселюючий пристрій (10).

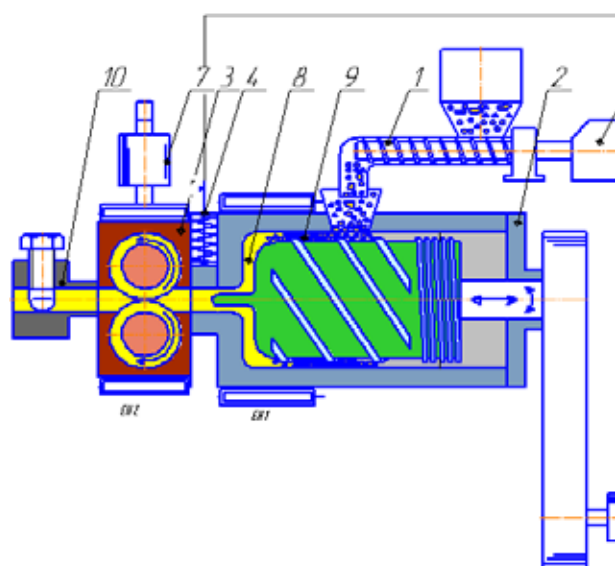
У таблиці 1 надано технічну характеристику експериментального каскадного дисково-шестеренного екструдера [12].

Як модельне середовище під час проведення експериментальних робіт було використано поліетилен низької густини (високого тиску) марки 15803-020 ГОСТ 16337–85 [13].

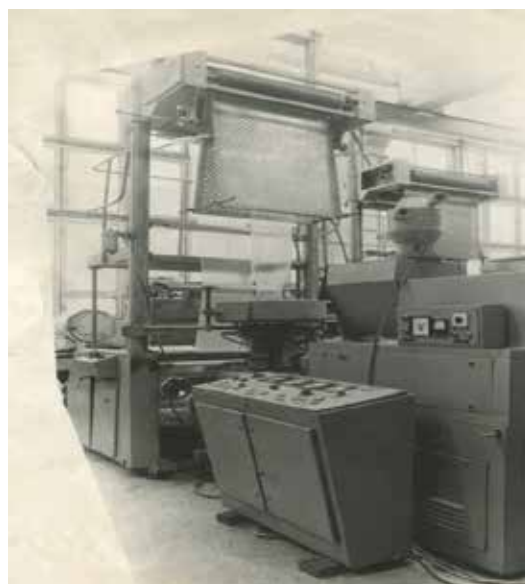
Основні фізико-механічні, теплофізичні і реологічні характеристики поліетилену визначалися за [13; 14] і в лабораторних умовах із використанням капілярного віскозіметра ПРТ–3.

За результатами досліджень розроблено номограми для визначення узгоджених режимів роботи пристроїв каскадного дисково-шестеренного екструдера, одна з яких для поліетилену низької густини (ПНГ) марки 15803-020 приведена на рисунку 2.а [15].

У каскадному екструдері продуктивність та її коливання залежать тільки від обертів дозу-



а



б

Рис. 1: а) схема каскадного дисково-шестеренного екструдера: 1 – шнековий дозатор; 2 – дисковий екструдер; 3 – шестеренний насос; 4 – компенсатор; 5, 6, 7 – приводи обертів органів каскадного екструдера; 8 – торцевий робочий зазор; 9 – завантажувально-пластикувальна зона; 10 – дроселюючий пристрій; б) загальний вигляд пілотної установки

Таблиця 1

Технічна характеристика експериментального каскадного дисково-шестеренного екструдера

| Найменування параметра | Показник |
|--|---|
| Перероблюваний матеріал | Поліетилен низького тиску марки 15803-020 |
| Максимальна продуктивність лінії, кг/год | 40 |
| Діаметр диска, мм | 150 |
| Частота обертів диска, регульована, об./хв | 20–200 |
| Діпазони регулювання робочого зазору, мм | 0,5–5 |
| Кількість шестеренних коліс | 2 |
| Модуль зачеплення, <i>m</i> | 3,5 |
| Кількість зубів, <i>z</i> | 16 |
| Ширина зуба, мм | 24 |
| Частота обертів шестерень, регульована, об./хв | 0–40 |
| Опір формуючого інструменту, МПа | 10–30 |
| Встановлена потужність, КВт | |
| – Шнекового дозатора | 0,2 |
| – Дискового екструдера | 7,5 |
| – Шестеренного насоса | 2,5 |
| – Нагрівників | 3,5 |

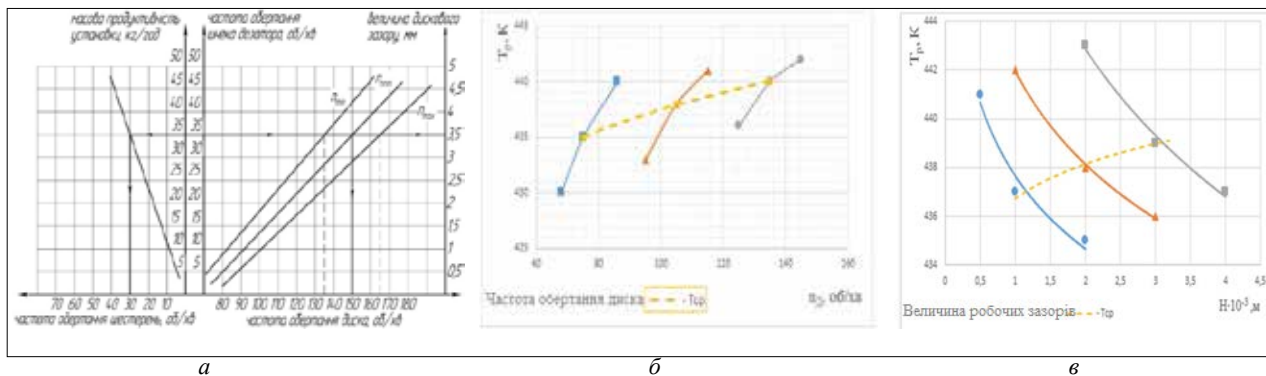


Рис. 2: а – номограма та залежності температури розплаву: б – від частоти обертання диска, в – від величини робочих зазорів

Матеріал – ПНГ марки 15803-020. G_p , кг/год: ■ – 8,38; ▲ – 16,81; ● – 25,27.

T_{cp} – середня температура розплаву

ючого шестеренного насоса (лівої частини номограми). Коливання тиску, які вимірюються після шестеренного насоса на вході у формуючу головку, є непрямим параметром, який визначає нестабільність продуктивності. Якщо такі коливання спричинені режимом роботи шестеренного насоса, то з метою їх усунення необхідно плавно зменшити частоту обертів шестеренного насоса до повного зникнення пульсацій тиску.

Якість розплаву, тобто температура, температура та механічна гомогенність розплаву, залежать від параметрів розплавлювача-гомогенізатора (правої частини номограми),

Використання в такій ролі дискового екструдера, що працює за дозованого живлення, дає можливість оперативно, без зупинки процесу, не змінюючи продуктивність, підвищувати або знижувати температуру розплаву, регулюючи термомеханічне наванта-

ження на перероблюваний матеріал, що рівносильно для звичайного черв'ячного екструдера установленню нового черв'яка. Причому якщо технологічно необхідно змінити температуру чи швидкість зсуву в зонах сухого тертя і напіврозплаву, тобто на периферії диска, то доцільно використовувати можливість зміни частоти обертання дискового екструдера в межах $\pm 30\%$ від номінального значення. А якщо необхідно змінити навантаження на розплав, наприклад, з метою покращення гомогенізації та диспергування, то ефективніше змінювати величину робочих зазорів у тих же межах.

Отже, температуру та гомогенність розплаву в дисковому екструдері можна регулювати як частотою обертання диска, так і величиною робочого зазору, або ж варіювати ці два параметри (рис. 2).

З рисунку 2.б видно, що зміною частоти обертання диска в межах $\pm 30\%$ від номінального зна-

чення за однієї і тієї самої продуктивності температуру можна регулювати в межах ± 5 °С, а зміна величини робочого зазору в межах від 2 ± 1 мм може змінювати температуру в межах $\pm 3,5$ °С.

Головні висновки. Створено ресурсоенергоощадну систему каскадної дисково-шестеренної екструзії для перероблення полімерних матеріалів із використанням як розплавлювача-гомогенізатора дискового екструдера з дозованим живленням, а як дозатора розплаву та генератора тиску – шестеренного насоса.

За результатами експериментальних досліджень розроблено номограму для визначення узгоджених режимів роботи агрегатів каскадного дисково-шестеренного екструдера.

Проведені експериментальні дослідження екструдера показали, що використання запропо-

нованої каскадної схеми екструзії дало можливість регулювати під час екструзії температуру та гомогенність розплаву за незмінної продуктивності, а дозуючий шестеренний насос забезпечує стабілізацію тиску та продуктивність на виході з екструдера.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати досліджень можуть бути використані на: кафедрі «Машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв» інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського; ПАТ «НВП Більшовик»; ООО «Пластмодерн» (Україна); та інших підприємствах, які виготовляють машини для переробки полімерів, за модернізації наявного та проектування нового обладнання.

Література

1. Раувендааль К. Экструзия полимеров / пер. с англ., под ред. А.Я. Малкина. Санкт-Петербург : Профессия, 2006. 768 с., ил.
2. Мак-Келви Д.М. Переработка полимеров. Москва : Химия, 1965. 442 с.
3. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров. Москва : Химия, КолосС, 2005. 568 с.
4. Оборудование для производства ПЭ труб. Москва, 2014–2015. URL: <http://www.evropolymer-trading.ru>.
5. ГОСТ 10354-82 Плівка поліетиленова. Технічні умови.
6. ДСТУ Б А.1.1-28-94. Вироби полімерні погонажні профільні та оздоблювальні стінові (рулонні і листові). Терміни та визначення.
7. Krauss Maffei. URL: <http://www.kraussmaffei.com/ru>.
8. URL: <http://www.extrudercn.ru>.
9. URL: <http://www.gmash.ru>.
10. (104) Переваги використання каскадних схем та дозуючих шестеренних насосів при екструзії полімерів / І.В. Луценко, Д.М. Швед, М.П. Швед, А.С. Богатир // *Міжнародний науковий журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва»*. 2013. № ½ (9). С. 21–25. ISSN 2226-3780.
11. (109) Пат. України на корисну модель № 94012, МПК В29С 47/00. Каскадний екструдер / Р.О. Мітусов, Д.М. Швед, М.П. Швед // Заявник та власник Мітусов Р.В. № u201404891; заявл. 07.05.2014; опубл. 27.10.2014. Бюл. №20.
12. Каскадний дисково-шестеренний екструдер для переробки полімерних матеріалів / Н.В. Мурдід, М.П. Швед, І.О. Мікульонок, Д.М. Швед // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. Київ, 2009. № 2. С. 74–77.
13. ГОСТ 16337-85 Полиэтилен высокого давления. Технические условия.
14. Теплофизические и реологические характеристики полимеров : справочник / А.И. Иванченко, В.А. Пахаренко, В.П. Привалко и др. Киев : Наукова думка, 1977. 44 с.
15. Швед Д.М. Процес екструзії полімерів на каскадному дисково-шестеренному екструдері : дис. ... канд. тех. Наук : 05.17.08, Київ, 2017. 148 с.