

## ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСУ ПРИ КАСКАДНІЙ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ

Швед М.П., Швед Д.М., Великоіваненко С.П.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

В даній статті наведено аналіз процесу дозування при каскадній екструзії полімерів. Розглянуто основні параметри, які характеризують процес екструзії. Наведено рівняння продуктивності черв'ячного екструдера і екструдера з шестеренним насосом. Проаналізовано коливання тиску та продуктивності в класичному черв'ячному екструдері і в екструдері з шестеренним насосом.

**Ключові слова:** екструзія, полімер, гомогенізація, черв'ячний екструдер, шестеренний насос.

**Постановка проблеми.** Зростаючі обсяги виробництва та переробки пластичних мас вимагають від галузі полімерного машинобудування оптимізації процесів та ширшого використання ресурсоенергозберігаючих технологій.

Найбільш поширеною залишається одночерв'ячна екструзія. При цьому одночасно виконуються наступні операції: живлення, стискання, плавлення твердого полімеру, змішування, створення тиску та дозування розплаву. Всі названі процеси тісно пов'язані між собою і виконуються в черв'ячному екструдері одним робочим органом – черв'яком, що ускладнює можливість їх оптимізації. Така конструкція екструдера має суттєвий недолік, через наявність коливань тиску, а відповідно і продуктивності, які призводять до вимушеного встановлення завищених допусків на геометричні розміри виробів, що веде до перевитрати сировини та енергії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існуючі математичні моделі, що описують процес екструзії, представляють собою моделі з підмоделями зон живлення, плавлення та гомогенізації. Розрахунок екструзійної машини ведеться по кожній зоні окремо, однак, це дуже приблизний розрахунок, так як в реальності процеси в цих зонах протікають як одна ціла недостатньо контрольована операція, що не дає можливості встановити чіткі граничні умови для кожної зони.

Якщо процес переробки розділити на незалежні операції та сконструювати машину таким чином, щоб кожна із них мала автономне керування то такий підхід дозволив би вирішити проблему, як точності розрахунку екструдера, так і гнучкого керування процесом екструзії.

Систематизованим дослідженням процесів екструзії полімерних матеріалів приділялась значна частина уваги зарубіжними та вітчизняними вченими, такими як: Д.М. Мак-Келві, З. Тадмор, К. Раувендааль, Р.В. Торнер, В.С. Ким, Ю.Ю. Лукач, Л.Б. Радченко, та інші [1-5]. В дослідженнях цих авторів основна увага була спрямована на розгляд фізичних та математичних моделей процесів черв'ячної екструзії з метою отримання залежностей для визначення продуктивності та енергосилових параметрів екструзійних машин і майже не приділялась увага вивченню проблеми коливання продуктивності на виході екструдера, економії сировини та енергії.

На сьогоднішній день питання мінімізації перевитрат ресурсів та енергії є актуальними, тому при дослідженні процесів черв'ячної екструзії,

пріоритетним є створення нових екструзійних процесів та обладнання при максимальному заощадженні матеріальних та енергетичних ресурсів [6, 7].

Аналіз існуючих технічних умов, регламентів та стандартів на виготовлення полімерних виробів, таких як труби, плівки, листи та інше, показав [8, 9], що допуски на їх основні геометричні розміри часто на 10-15% перевищують номінально необхідні. Одним із шляхів заощадження ресурсів та енергії при екструзії полімерів могло б бути зменшення допусків на геометричні розміри. Дослідження та аналіз процесів одночерв'ячної екструзії показали, що процеси дозування в таких екструдерах в значній мірі чутливі до коливань тиску, що призводить до коливання продуктивності, які і є основною причиною встановлення завищених допусків на геометричні розміри. Усунення коливань продуктивності дало б змогу зменшити такі допуски, що призвело б до суттєвої економії полімеру і енергії, а також знизило б навантаження на екологію, за рахунок зменшення кількості сировини яка потребує утилізації.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Невирішеною залишається проблема коливань тиску та продуктивності в черв'ячному екструдері, які викликані флуктуацією параметрів сировини на вході в екструдер, нестабільністю процесів в попередніх зонах живлення та плавлення, відносно нестабільністю температури та в'язкості в різних зонах екструдера та формуючого інструменту.

**Формулювання цілей статті.** Метою дослідження є визначення та аналіз продуктивності та її коливання в класичному черв'ячному екструдері та в тому ж екструдері, який оснащено дозуючим шестеренним насосом.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В черв'ячних екструдерах зона гомогенізації та дозування побудовані таким чином, що для створення тиску фактично використовується в'язкісний гвинтовий насос (черв'ячний насос).

Одними із найважливіших параметрів при екструзії полімерів є тиск та продуктивність на виході з екструдера для визначення яких приймаються відповідні припущення: плоско – щільовий канал, режим стаціонарний, ширина плоского каналу набагато більша його висоти. Тоді продуктивність зони дозування з таким в'язкісним насосом може бути визначена за формулою [1-5]

$$Q = \frac{U_z \cdot b \cdot h}{2} \cdot F_d - \frac{b \cdot h^3 \cdot \Delta P}{12 \cdot \mu \cdot L} \cdot F_p \quad (1)$$

де  $b$  – ширина каналу;

$h$  – глибина каналу;

$\mu$  – не ньютонівська в'язкість, яка залежить від швидкості зсуву та температури;

$\Delta P$  – різниця тисків на вході і виході із зони дозування;

$L$  – середня довжина каналу зони;

$F_d, F_p$  – коефіцієнти які враховують гальмівну дію бокових стінок каналу черв'яка;

$U_z$  – швидкість рухомої поверхні відносно нерухомої в плоско паралельній моделі руху рідини.

Перший член в правій частині рівняння (1) визначає об'ємний видаток розплаву обумовлений вимушеною течією без градієнту тиску вздовж вісі каналу (прямотечія). Другий член – це об'ємний видаток за рахунок течії розплаву під дією градієнта тиску (протитечія), тобто, при відсутності руху між шнеком і циліндром (нульова швидкість шнека).

Таким чином, в рівнянні перший член характеризує величину продуктивності екструдера, а другий член – перемішуючу здатність зони дозування. Як видно із рівняння при збільшенні глибини каналу  $h$  протитечія зростає швидше чим прямотечія, тому продуктивність знижується, а перемішуюча здатність зони дозування зростає.

З іншого боку протитечія є чутливою до коливань тиску в кінці зони дозування, що неминуче призводить до нестабільності продуктивності на виході з екструдера. Тому, щоб коливання продуктивності менше залежали від перепадів тиску в формуючому інструменті, більшість шнеків конструюються так, щоб в зоні дозування течія під дією градієнта тиску була відносно малою при одночасно достатній перемішуючій здатності. Взаємозалежність між прямотечією і протитечією пояснюється профілем швидкостей вздовж вісі каналу для різних значень градієнта тиску, які представлені на рисунку 1 [5].

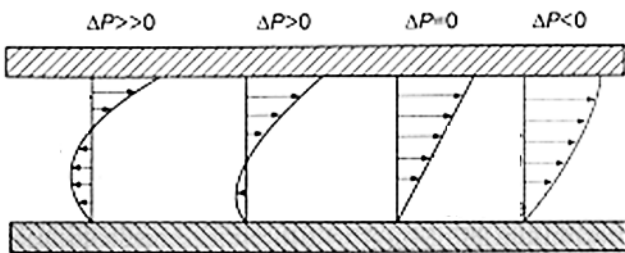


Рис. 1. Профілі швидкостей вздовж вісі каналу

Якщо градієнт тиску дорівнює нулю ( $\Delta P=0$ ), то профіль швидкості лінійний і відповідає вимушеній в'язкій течії. Коли перепад тиску негативний ( $\Delta P<0$ ), протитечія між шнеком і циліндром збільшує сумарну швидкість вимушеної течії. Коли перепад тиску позитивний ( $\Delta P>0$ ), в зоні течії розплаву створюється тиск, і сумарна швидкість зменшується, а протитечія збільшується покращуючи перемішування. В випадку якщо градієнт тиску значно більший нуля ( $\Delta P>>0$ ), то продуктивність дорівнює нулю, і полімер циркулює в екструдері, це означає що екструдер має закритий вихід, а протитечія дорівнює прямотечії з максимальним перемішуючим ефектом.

Таким чином, значні коливання тиску призводять до коливань об'ємного видатку протитечії, а відповідно, і до коливань загальної продуктивності, які і диктують завищені допуски на геометричні розміри, що призводить до перевитрати сировини та енергії, яка витрачається на її перероблення.

Рішеннями проблеми може бути вдосконалення процесу дозування іншим пристроєм, продуктивність якого менш чутлива до коливань тиску як на вході так і на виході з пристрою. Останнім часом все частіше для процесів дозування використовують об'ємний шестеренний насос характерною відзнакою якого є високий внутрішній гідравлічний опір. При використанні такого насоса, особливу увагу необхідно приділяти обертам насоса та тиску на вході, які повинні забезпечити повне заповнення міжзубних впадин. Величина зазорів між рухомими та нерухомими поверхнями в шестеренному насосі, після певних спрощень теж може бути представлено, як плоско-щільові канали по яких частина розплаву повертається на вхід насоса, змащуючи поверхні тертя. Продуктивність такого насоса може бути розрахована за залежністю [10-12]

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot v \cdot n \cdot \left( R_g^2 - R^2 - \frac{t_0^2}{12} \right) - \left( \frac{\Delta P}{12 \cdot \mu \cdot L} \cdot b \cdot h^3 \pm \frac{U \cdot b \cdot h}{2} \right) \quad (2)$$

де  $v$  – ширина шестерні;

$R_g$  – радіус кола виступів шестерні;

$R$  – радіус основного кола;

$t_0$  – крок зачеплення зубів по основному колу;

$n$  – число обертів шестерні.

$U$  – швидкість рухомої поверхні відносно нерухомої;

$b$  – ширина зазору;

$h$  – висота зазору;

$\Delta P$  – різниця тисків на вході і виході в шестеренному насосі;

$L$  – середня довжина зазору;

$\mu$  – ньютонівська в'язкість, яка залежить від температури та швидкості зсуву.

В наведеному виразі перша складова відображає теоретичну продуктивність шестеренного насоса, яка розраховується на основі теорії евольвентного зачеплення, або ж це паспортні дані заводу виробника насоса. Друга і третя складові відображають сумарні витоки через зазори між рухомими та нерухомими поверхнями шестеренного насоса.

В нових насосах фактична продуктивність складає 90-95% від розрахункової. Якщо продуктивність насоса знижується до 80%, то необхідно контролювати процес зношування поверхонь тертя, а якщо продуктивність падає до 70%, то слід подумати про його заміну, так як його подальше використання не призводить до очікуваної економії сировини та енергії.

Відомо, що витоки через будь який канал прямо пропорційні перепаду тисків і обернено пропорційні його гідравлічному опору  $R_{зідр}$ , який залежить від в'язкості рідини та розмірів каналу. Тому для черв'ячного та шестеренного насосів витоки та їх коливання за рахунок перепаду тисків можуть бути представлені в обох випадках залежністю:

$$Q_{\text{прот}} = \frac{\Delta P}{R_{\text{гидр}}} = \frac{\Delta P}{12 \cdot \mu \cdot L / b \cdot h^3} \quad (3)$$

Приймаючи до уваги, що висота каналу  $h$  в зоні дозування черв'ячного екструдера складає 5-8 мм, а в шестеренному насосі висота зазорів складає  $(50-100) \cdot 10^{-3}$  мм, при приблизно однаковій загальній ширині та довжині каналів. До того ж доля протитечії в черв'ячному насосі відноситься до всього видатку насоса, а в шестеренному насосі тільки до його частини, яка складає не більше 10% від загальної продуктивності екструдера. Тому гідравлічний опір шестеренного насосу в рази більший, ніж в черв'ячному, тобто, шестеренний насос практично не чутливий до коливань тиску як на вході так виході з насосу, забезпечуючи стабілізацію продуктивності на виході екструдера.

Характеристика впливу коливань тиску та продуктивності на товщину стінки труби при використанні традиційного екструдера з черв'ячним насосом та того ж екструдера оснащеного шестеренним насосом показано на рисунку 2, де в якості прикладу приведена поліпропіленова труба, діаметром 32 мм з номінальною товщиною стінки 3,6 мм та максимальним додатним допуском 0,6 мм.

З рисунку видно, що використання шестеренного насосу дозволяє зменшити середню товщину стінки на 4%, що дає змогу економити сировину та енергію.

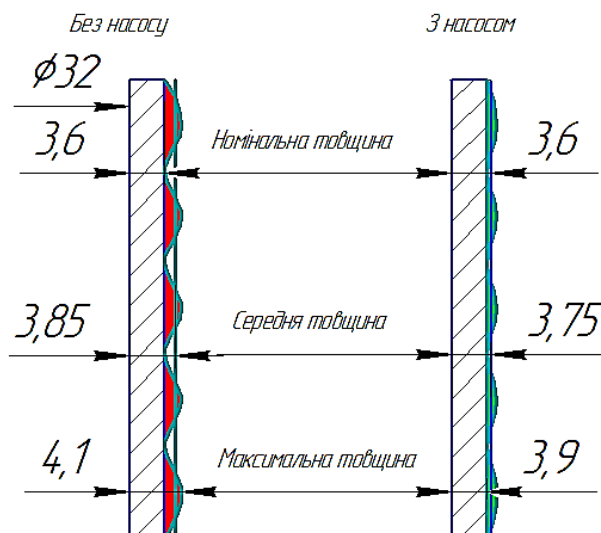


Рис. 2. Коливання товщини стінки труби

**Висновки.** Таким чином використання каскадних схем екструзії з дозуючим шестеренним насосом, який встановлюється між черв'ячним екструдером і формуючим інструментом, дозволяє практично повністю згладити коливання тиску і стабілізувати продуктивність в екструдері, що дозволяє мінімізувати допуски на геометричні розміри виробів і, тим самим, зменшувати перевитрати сировини та енергії на екструзію.

## Список літератури:

- Мак-Келви Д. М. Переработка полимеров [Текст] / Д. М. Мак-Келви. – М.: Химия. – 1965. – 442 с.
- Ким В. С. Теория и практика экструзии полимеров. – М.: Химия, Колос, 2005. – 568 с.: ил.
- Торнер Р. В. Оборудование заводов по переработке пластмасс / Торнер Р. В., Акутин М. С. // Химия, Москва, 1986.
- Радченко Л. Б. Управление интенсивностью и качеством подготовки расплава полимера / Л. Б. Радченко, А. Д. Петухов. – К., 1987. – 36 с. Деп. В УкрНИИТИ, № 1821-Ук 87.
- Раувендааль К. Экструзия полимеров / Пер. с англ, под ред. А. Я. Малкина – СПб.: Профессия, 2006. – 768 стр., ил.
- Раувендааль К. Выявление и устранение проблем в экструзии / К. Раувендааль, М. Д. Пилар Норьега Е., Х. Харрис; Пер. с англ, под ред. В. П. Володина – СПб.: Профессия, 2008. – 328 стр., ил.
- Гжибовский Н. О. Рынок импорта трубного полиэтилена в Украину в 2013 году. [Электронный ресурс] / Гжибовский Н. О. // Специализированное информационно-аналитическое издание «Полимерные трубы». Выпуск № 4, 2013. – 72 стр.
- ГОСТ 10354-82 Плівка поліетиленова. Технічні умови.
- ДСТУ Б В.2.7-144:2007 Труби для мереж холодного та гарячого водопостачання із поліпропілену. Технічні умови.
- Корнієнко Я. М. Високоточне ресурсоощадне екструдювання полімерів / Я. М. Корнієнко, В. О. Кузьміна, М. П. Швед, Д. М. Швед // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – № 1. – С. 91-94.
- Швед Д. М. Процес високошвидкісної каскадної дисково-шестеренної екструзії / Р. О. Мігусов, М. П. Швед, Д. М. Швед // Науково-виробничий журнал «Хімічна промисловість України». – 2015. – № 2(127). – С. 36-39.
- Швед М. П. Червячно-шестеренний екструдер при переробці полімерних матеріалів / М. П. Швед, Д. М. Швед, Д. А. Степанюк // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2014. – Випуск 45. – Т. 3. – С. 173-175. ISSN 2073-8730.

**Швед Н.П., Швед Д.Н., Великоиваненко С.П.**

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

## **ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА ПРИ КАСКАДНОЙ ЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРОВ**

### **Аннотация**

В данной статье приведен анализ процесса дозирования при каскадной экструзии полимеров. Рассмотрены основные параметры характеризующие процесс экструзии. Приведены уравнения производительности червячного экструдера и экструдера с шестеренным насосом. Проанализировано колебания давления и производительности в классическом червячном экструдере и в экструдере с шестеренным насосом.

**Ключевые слова:** экструзия, полимер, гомогенизация, червячный экструдер, шестеренный насос.

**Shved M.P., Shved D.M., Velikoivanenko S.P.**

National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## **SUBMISSION OF USE GEAR PUMP FOR CASCADE EXTRUSION POLYMERS**

### **Summary**

In this article describes the dosing process for cascade extrusion of polymers. The main parameters describing the process of extrusion are considered. The analysis of the basic schemes of extrusion installations is presented. The equations of the productivity of a worm extruder and an extruder with a gear pump are presented. Pressure and productivity fluctuations in a classical worm extruder and in an extruder with a gear pump are analyzed.

**Keywords:** extrusion, polymer, homogenization, worm extruder, a gear pump.