

## ОБРОБКА МЕТАЛІВ ТИСКОМ

УДК 691.175:628.4.04-405

© Кухар В.В.<sup>1</sup>, Нестеров О.Ю.<sup>2</sup>

### УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ШНЕКА ЕКСТРУДЕРА ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ВТОРИННИХ ПОЛІМЕРІВ

*В роботі проаналізовані деякі способи утилізації відходів полімерних матеріалів, показана перспективність розвитку теорії та технології процесів екструдювання та соекструдювання. Метою даної роботи було аналітичне дослідження та удосконалення роботи екструдера для переробки полімерних матеріалів шляхом визначення потрібних конструктивних параметрів шнека (черв'яка). Завдяки цьому покращуються умови роботи пристрою та досягається більш повна переробка прес-маси за рахунок вирівнювання протитиску і насосного ефекту у всіх зонах, вирівнювання продуктивності по зонах екструдера, що виключає його переривисту роботу, обриви та різнотовициність виробів. Шляхом аналітичного розгляду процесу екструдювання у різних зонах екструдера, які характеризуються різними температурними умовами й насосним ефектом, отримана розрахункова формула для визначення кута нахилу гвинта шнека на кожній ділянці екструдера, що дозволяє вдосконалити конструкцію машини.*

**Ключові слова:** утилізація, пресування, термопластичні полімерні матеріали, шнек, кут нахилу гвинта шнека.

**Кухарь В.В., Нестеров О.Ю. Усовершенствование конструкции шнека экструдера для переработки вторичных полимеров.** В работе проанализированы некоторые способы утилизации отходов полимерных материалов, показана перспективность развития теории и технологии процессов экструдирования и соэкструдирования. Целью данной работы было аналитическое исследование и совершенствование работы экструдера для переработки полимерных материалов путем определения необходимых конструктивных параметров шнека (червяка). Благодаря этому улучшаются условия работы устройства и достигается более полная переработка пресс-массы за счет выравнивания противодавления и насосного эффекта во всех зонах, выравнивание производительности по зонам экструдера, что исключает его прерывистую работу, обрывы и разнотолщинность изделий. Путем аналитического рассмотрения процесса экструдирования в различных зонах экструдера, которые характеризуются различными температурными условиями и насосным эффектом, получена расчетная формула для определения угла наклона винта шнека на каждом участке экструдера, что позволяет усовершенствовать конструкцию машины.

**Ключевые слова:** утилизация, экструдирование, термопластичные полимерные материалы, шнек, угол наклона винта шнека.

**V.V. Kukhar, O.Yu. Nesterov. Upgrading of the extruder screw design for secondary polymers processing.** Some methods of polymeric materials waste recycling have been analyzed in this paper and the prospects of the theory development as well as extrusion technology and co-extruding processes have been shown. The purpose of this work was an analytical research of the backpressure in different sectors of the extruder when the pressed bulk moves through it and improvement of the working conditions of the device to fit the technology of plastics waste processing. The recommendations as to the calculation of the required design

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [kvv.mariupol@gmail.com](mailto:kvv.mariupol@gmail.com)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [oleg-nesterov@mail.ru](mailto:oleg-nesterov@mail.ru)

*parameters of the screw, as the main structural element of the extruder, have been developed as a result of research, which makes it possible to achieve better processing of the pressed bulk under specified temperature and rate conditions due to the levelling of the backpressure and pumping effect in all sections of the device. The proposed upgrading provides productivity levelling in all sections of the extruder, which excludes intermittent work, breaks and thickness unevenness of the manufactured products. Through the analytical consideration of the extrusion process theory in various sectors of the extruder, which are characterized by different temperature conditions and the pumping effect, the equation for calculating of the auger screw inclination angle for each sector of the extruder has been obtained which makes it possible to improve the machine design. The example of the calculation of the screw design parameters for physical and chemical characteristics of low-pressure polyethylene under the conditions of its processing has been furnished.*

**Keywords:** recycling, extruding, the thermoplastic polymer material, a screw, auger screw inclination angle.

**Постановка проблеми.** За останні десятиріччя у промисловості суттєве розповсюдження отримали полімерні матеріали. При цьому перспективи їх виробництва та застосування у різних областях народного господарства та побуту постійно розширюються. В світі виробляється щорічно більш ніж  $3 \cdot 10^8$  тон пластичних мас на полімерній основі [1]. Слід зазначити, що експлуатація полімерних виробів та покриттів в промисловості найчастіше відбувається у агресивних середовищах (абразив, масло тощо). Це призводить до виходу полімерних виробів із ладу з тією чи іншою швидкістю та загостренню проблеми накопичення полімерних відходів. В теперішній час більшість країн, у тому числі і Україна та країни Західної Європи, інтенсифікували роботи зі створення ефективних процесів із утилізації та знешкодження відходів полімерних матеріалів. При цьому стали відомі технології, що дозволяють перетворювати відходи полімерів у вторинну сировину із виключенням ланцюгів агломерації та грануляції [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існуючі методики розрахунку технологічних параметрів екструзування полімерних матеріалів не завжди враховують залежність тиску формування пластичної маси на шляху її просування від зони завантаження до екструзійної головки від продуктивності на кожній окремо взятій ділянці шнека. Це призводить до переривистої роботи екструдера та негативно впливає на якість кінцевих виробів.

Серед машин для переробки термопластичних полімерів найбільш розповсюдження отримали екструдери та термопластавтомати [3, 4]. Наприклад, відомий екструзійний прес [5], що містить механізм дозування прес-маси, напрямний пристрій, теплообмінні плити, дистанційні планки та привод, а також вертикальний колектор із порожниноутворювачами у вигляді труб, в середині яких розміщені трубопроводи підводу теплоносія, що утворюють зону нагрівання. Крім того пристрій [3] містить нейтральну зону за зоною нагрівання у вигляді заповнених ізолятором поперечних каналів та зону охолодження, що утворена вихідною частиною труб порожниноутворювача та додатковим трубопроводом підводу хладагенту, який розташований по висоті колектора, проходить між трубопроводами подачі теплоносія і відділений від них ізолятором, при цьому колектор поперечними каналами нейтральної зони розділений на частини, що обігрівають та що охолоджуються.

Такий пристрій, для забезпечення якості продукції, передбачає розділення на зони (із різною температурою) шляху проходження прес-маси, що робиться, в основному, для утворення потрібних фізико-хімічних якостей (в'язкості) в кожній зоні, а тому і рівного протитиску екструзійного пресу. Причому для забезпечення потрібних температурних умов у зонах пресу використовують теплоносії та хладагенти. Це ускладнює конструкцію пресу та звужує його технологічні можливості через залежність в'язкості матеріалу та величини протитиску від температури теплоносія та хладагенту, що потребує додаткового використання додаткових нагрівачів та холодильників. При невідповідності температурних режимів деформування, через складність їх керування, унеможлиблюється процес отримання стержнів малого діаметру та тонких плівок, тому що екструдер починає працювати періодично, що викликає різну товщину виробів та може привести до обриву матеріалу.

Відомий двохпозиційний термопластавтомат [6], який складається із станини, в котрій вмонтовані два механізми запирання форм, один механізм інжекції з черв'ячною пластикацією і

механізм дотискання. У станині також розміщений гідропривід. Даний пристрій вимагає використання гідроприводу (тобто необхідний допоміжний енергоносіє – вода, масло або емульсія), а також його експлуатація передбачає охолодження та витримку виробів, що виробляють, у формі, причому час витримки матеріалу під тиском, по відношенню до часу загального циклу виробництва, може складати до 75%. Це суттєво обмежує технологічні можливості пристрою і робить його непридатним до використання для переробки великої кількості видів полімерів.

Використання двохстадійної шприц-машини для екструзійної переробки полімерів дозволяє проводити соекструзію полімерних відходів та первинної сировини [7]. Така шприц-машина (екструдер) містить обігрівальний корпус з завантажувальними отворами і приєднаними бункерами, спеціальний черв'як, що з'єднаний крізь редуктор з електроприводом та складений з двох з'єднаних в одне ціле окремих зон визначеної довжини, одна з яких порожня, при цьому з'єднання виконане за допомогою перехідного елемента, що виконує функції ущільнювального пристрою, в якому розміщені центральний і радіальний канали. Пристрій також містить екструзійну голівку з дроселем або змінним опором для більш точного дозування матеріалу на виході з центрального каналу.

Ця машина передбачає отримання різнокольорових виробів з полімерів. Технічним обмеженням пристрою є черв'як, який містить дві зони (елементи), що з'єднані складним перехідним ущільнювальним пристроєм. Кожна з зон черв'яка має свій крок, а, у зв'язку з цим, і кут нахилу та глибину гвинтового каналу. В зв'язку з тим, що обидві зони обертаються з однаковою швидкістю, а рекомендації для розрахунку величин зазначених параметрів відсутні, вони підбираються емпірично (шляхом «підгонки»), що суттєво обмежує технічні і технологічні можливості пристрою. Для вирівнювання продуктивності в двох зонах збільшують глибину гвинтових каналів найбільш завантажених ділянок шнека, що послаблює його міцності характеристики і викликає його швидке температурне зношування.

**Метою даної роботи** є аналітичне дослідження та удосконалення роботи екструдера для переробки полімерних матеріалів шляхом визначення потрібних конструктивних параметрів шнека (черв'яка), завдяки чому стає можливим покращення умов роботи пристрою та досягається більш повна переробка прес-маси за рахунок вирівнювання протитиску і насосного ефекту у всіх зонах, вирівнювання продуктивності по зонах екструдера, що виключає його переривисту роботу, обриви та різнотовщинність виробів.

**Виклад основного матеріалу.** Шнек є головним елементом у конструкції екструдера, причому він повинен конструюватись таким чином, щоб продуктивність кожної зони екструдера була рівномірною. Цього досягають зміною кута нахилу шнека у кожній зоні. Шнек виконують цільним, що підвищує надійність роботи екструдера через полегшення умов його роботи та полегшення процедури зміни шнека. По ходу просування прес-маси вздовж шнеку по зонах екструдера прес-маса перетворюється із твердої на в'язку суміш із різними фізико-хімічними характеристиками у кожній зоні. Тому протитиск екструдера, у випадку однакового кута нахилу гвинтового каналу шнека, різний у кожній зоні, що викликає різний насосний ефект, тобто неоднаковий розподіл тиску та різну продуктивність у кожній зоні (рис. 1). Тому після зони розплавлення попереду зони дозування утворюється «вузьке місце», яке призводить до переривистої роботи екструдера та погіршення якості виробів. Визначення величини кута нахилу гвинтового каналу шнека, в залежності від протитиску екструдера, дозволяє вирівнювати насосний ефект та продуктивність у кожній зоні екструдера. Зміна кута нахилу гвинтового каналу у кожній зоні призведе до покращення якості виробів, виключення їх різнотовщинності та обривів у процесі роботи.

Розглянуто схему екструзування (рис. 2). Вираз для визначення протитиску екструдера у кожній зоні, відповідно до роботи [8]:

$$\Delta P = \int_0^L \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot \left[ \left( \frac{h_2 - h_1}{L} \right) \cdot \ell + h_1 \right] \cdot \left( 1 - \frac{m \cdot e}{t} \right) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot N \cdot \left[ f_{ym} - \frac{\delta}{\left( \frac{h_2 - h_1}{L} \right)} \right] \cdot k_i \cdot \eta \cdot (n+1) \cdot 2^n}{\pi \cdot D \cdot 2 \cdot f_{np} \cdot \left( 1 - \frac{m \cdot e}{t} \right) \cdot \sin^n \varphi \cdot \left[ \left( \frac{h_2 - h_1}{L} \right) \cdot \ell + h_1 \right]^3} d\ell, \quad (1)$$

де  $\Delta P$  – протитиск екструдера у визначеній зоні, Па;  $D$  – діаметр шнека у визначеній зоні, м;  $h_1$  та  $h_2$  – товщини шару матеріалу на вході та виході у визначеній зоні екструдера, м;  $L$  – довжина визначеної зони шнека,  $L = L_a$ ,  $L = L_b$ ,  $L = L_c$ , та  $L = L_d$  відповідно для кожної зони, м;  $\ell$  – координата в здовж осі екструдера;  $m$  – число (кількість) заходів шнека, шт.;  $e$  – товщина гвинта черв'яка шнека, м;  $\varphi$  – кут нахилу гвинтового каналу черв'яка шнека у визначеній зоні, град.;  $N$  – частота обертання шнека екструдера,  $\text{с}^{-1}$ ;  $f_{ym}$  – коефіцієнт впливу втрат;  $f_{np}$  – коефіцієнт впливу протитоку;  $\delta$  – зазор між гвинтом черв'яка та корпусом, м;  $k_t$  – коефіцієнт впливу температури;  $\eta$  – в'язкість прес-маси при завданих температурно-швидкісних умовах, Па·с;  $n$  – індекс плинності матеріалу.

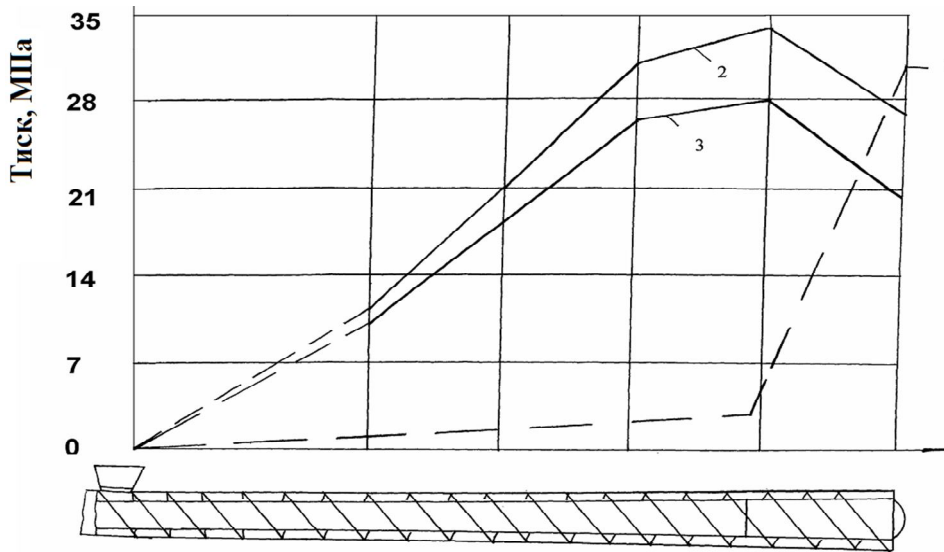


Рис. 1 – Загальний вигляд розподілу тиску по довжині шнека екструдера: 1 – теоретичний розподіл; 2 та 3 – експериментальний розподіл для матеріалів з більшою та меншою в'язкістю відповідно

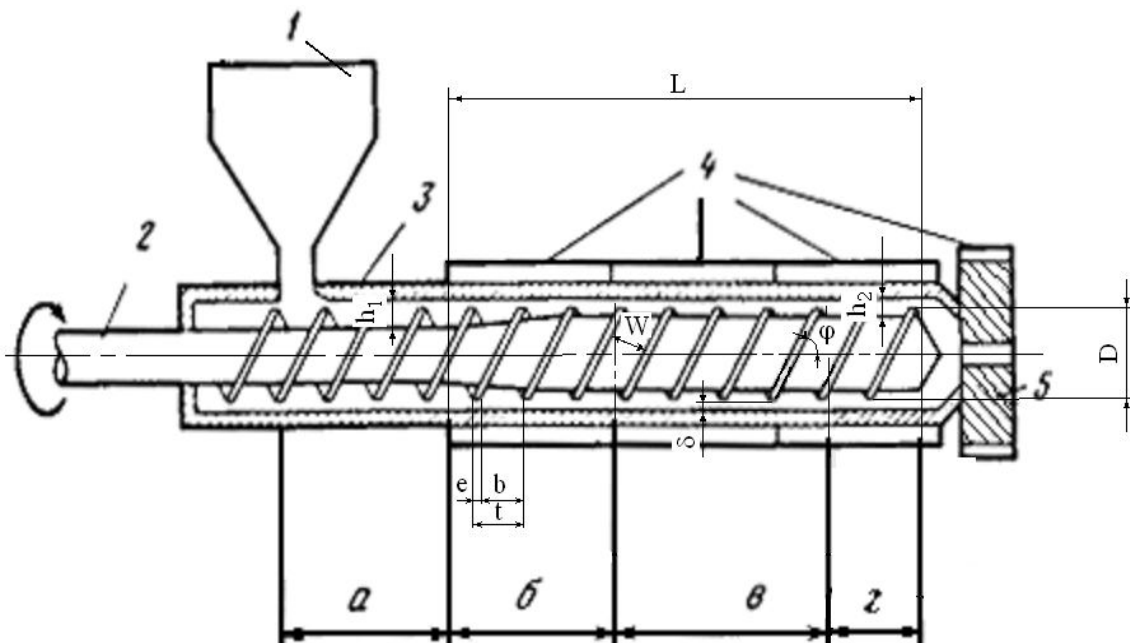


Рис. 2 – Схема процесу екструдювання для визначення протитиску екструдера

Звідки, після скорочень та перетворень виразу (1), запишемо:

$$\Delta P = A \cdot \int_0^L \frac{\left( f_{ym} - \frac{\delta}{\left( \frac{h_2 - h_1}{L} \right) \cdot \ell + h_1} \right)}{\left[ \left( \frac{h_2 - h_1}{L} \right) \cdot \ell + h_1 \right]^2} d\ell, \quad (2)$$

де

$$A = \frac{\pi \cdot D \cdot \cos \varphi \cdot N \cdot k_t \cdot \eta \cdot (n+1) \cdot 2^n}{2 \cdot f_{np} \cdot \sin^{n-1} \varphi}, \quad (2^*)$$

або

$$A = C \cdot \frac{\cos \varphi}{\sin^{n-1} \varphi}, \quad (2^{**})$$

тут

$$C = \frac{\pi \cdot D \cdot N \cdot k_t \cdot \eta \cdot (n+1) \cdot 2^n}{2 \cdot f_{np}}. \quad (2^{***})$$

Вирішимо інтегральний вираз (2):

$$\begin{aligned} \Delta P &= A \cdot \left[ f_{ym} \int_0^L \frac{d\ell}{(B \cdot \ell + h_1)^2} + \delta \int_0^L \frac{d\ell}{(B \cdot \ell + h_1)^3} \right] = A \cdot \left[ \left( -\frac{f_{ym}}{(B \cdot L + h_1)} - \frac{\delta}{2 \cdot (B \cdot L + h_1)^2 \cdot B} \right) - \left( -\frac{f_{ym}}{h_1 \cdot B} - \frac{\delta}{2 \cdot h_1^2 \cdot B} \right) \right] = \\ &= A \cdot \left[ -\frac{1}{(B \cdot L + h_1)} \cdot \left( f_{ym} + \frac{\delta}{2 \cdot (B \cdot L + h_1)} \right) + \frac{1}{h_1 \cdot B} \cdot \left( f_{ym} + \frac{\delta}{2 \cdot h_1} \right) \right] = \frac{A}{(B \cdot L + h_1)} \cdot \left( f_{ym} + \frac{\delta}{2 \cdot (B \cdot L + h_1)} \right) + \\ &+ \frac{A}{h_1 \cdot B} \cdot \left( f_{ym} + \frac{\delta}{2 \cdot h_1} \right) = \frac{A}{B} \cdot \left[ \frac{2 \cdot f_{ym} \cdot h_1 + \delta}{2 \cdot h_1^2} - \frac{f_{ym} + \frac{\delta}{2 \cdot (B \cdot L + h_1)}}{L + \frac{h_1}{B}} \right], \quad (3) \end{aligned}$$

де  $B = \frac{h_2 - h_1}{L}$  – коефіцієнт, що враховує конічний нахил зони шнека.

Для загального випадку отримаємо:

$$\Delta P = \frac{C \cdot \cos \varphi}{B \cdot \sin^{n-1} \varphi} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h_1 \cdot f_{ym} + \delta}{2 \cdot h_1^2} - \frac{f_{ym} + \frac{\delta}{2 \cdot (B \cdot L + h_1)}}{L + \frac{h_1}{B}} \right]. \quad (4)$$

У загальному випадку, при розписуванні параметрів  $C$  та  $B$ , коли  $n \neq 2$ , маємо вираз:

$$\Delta P = \frac{\pi \cdot D \cdot N \cdot k_t \cdot f_{ym} \cdot \eta \cdot (n+1) \cdot 2^n}{2 \cdot f_{np} \cdot B} \cdot \frac{\cos \varphi}{\sin^{n-1} \varphi} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h_1 + \delta}{2 \cdot h_1^2} - \frac{1 + \frac{\delta}{2 \cdot (B \cdot L + h_1)}}{L + \frac{h_1}{B}} \right]. \quad (5)$$

Звідки неважко оцінити вплив кута  $\varphi$  на величину  $\Delta P$  виразом:

$$\frac{\cos \varphi}{\sin^{n-1} \varphi} = \frac{\Delta P}{\frac{\pi \cdot D \cdot N \cdot f_{ym} \cdot k_t \cdot \eta \cdot (n+1) \cdot 2^n}{2 \cdot f_{np} \cdot B} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h_1 + \delta}{2 \cdot h_1^2} - \frac{1 + \frac{\delta}{2 \cdot (B \cdot L + h_1)}}{L + \frac{h_1}{B}} \right]}. \quad (6)$$

За даними джерела [8], значення індексу плинності матеріалу для досить широкого колу полімерних матеріалів знаходиться у межах  $n \cong 2 \dots 5$ . Тоді, наприклад, для конкретного полімеру із  $n = 2$ , запишемо параметри:

$$C = \frac{6 \cdot \pi \cdot D \cdot N \cdot k_t \cdot \eta}{f_{np}} \quad \text{та} \quad A = \frac{6 \cdot \pi \cdot D \cdot N \cdot k_t \cdot \eta \cdot \cos \varphi}{f_{np} \cdot \sin \varphi} \quad (7)$$

Введемо тут додаткову величину:

$$E = \frac{C}{B} \cdot \left[ \frac{2 \cdot f_{ym} + \delta}{2 \cdot h_1^2} - \frac{f_{ym} + \frac{\delta}{2 \cdot (B \cdot L + h_1)}}{L + \frac{h_1}{B}} \right] =$$

$$= \frac{6 \cdot \pi \cdot D \cdot N \cdot k_t \cdot \eta}{f_{np} \cdot B} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h_1 \cdot f_{ym} + \delta}{2 \cdot h_1^2} - \frac{f_{ym} + \frac{\delta}{2 \cdot (B \cdot L + h_1)}}{L + \frac{h_1}{B}} \right] \quad (8)$$

Тоді:

$$\Delta P = E \cdot \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} = E \cdot \operatorname{ctg} \varphi \quad (9)$$

Звідки, для конкретного полімеру із індексом плинності  $n = 2$ , одержимо:

$$\varphi = \operatorname{arccctg} \frac{\Delta P}{E} \quad (10)$$

Або, враховуючи тригонометричну залежність  $\left( 1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi = \frac{1}{\sin^2 \varphi} \right)$ , після перетворень неважко отримати:

$$\varphi = \arcsin \sqrt{\frac{1}{\left( \frac{\Delta P}{E} \right)^2 + 1}} \quad (11)$$

Таким чином, для розв'язання поставленої в статті задачі запропонована модель конструкції екструдера, що містить обігрівальний корпус із завантажувальним отвором та приєднаним бункером, екструзійну голівку та черв'ячний шнек із гвинтовим каналом, що з'єднаний крізь редуктор із електроприводом, при цьому черв'ячний шнек виконаний цільним із двома або більше зонами, причому кут нахилу гвинтового каналу в кожній зоні у загальному випадку визначається виразом (6).

Конструкція екструдера пояснюється кресленням (див. рис. 2), де показаний його загальний вигляд. Прес-масу засипають у завантажувальний бункер 1, що з'єднаний із корпусом 3, в якому розміщений шнек 2, який обертається за допомогою приводу обертання. Просуваючись крізь корпус 3 по гвинтовому каналу шнека 2, прес-маса проходить зону завантаження (а), після чого попадає у зони стиснення (б) та гомогенізації (в), які складають ділянку, що оснащена обігрівачами 4, призначеними для розплавлення прес-маси та перетворення її у в'язку суміш. У в'язкому стані прес-суміш пропускається крізь зону дозування (г) та екструзійну голівку 5, в якій надається кінцева форма виробу (плівка, стержень, труба тощо).

При конкретизуванні розрахунків використовували експериментальні дані за джерелом [7], звідки для екструдера з параметрами  $N = 80 \text{ об/хв.} = 1,33 \text{ с}^{-1}$ ,  $D = 63 \text{ мм} = 0,063 \text{ м}$ ,  $\delta = 2 \text{ мм} = 0,002 \text{ м}$ , загальною довжиною  $L = 22,2D = 1,4 \text{ м}$  та довжинами відповідних зон (за кресленням рис. 2):  $L_a = 9D = 0,568 \text{ м}$ ,  $L_b = 2D = 0,126 \text{ м}$ ,  $L_c = 0,63 \text{ м}$  та  $L_d = 0,076 \text{ м}$ , а також із параметрами для кожної зони (означені індексами)  $h_{1a} = 11,4 \text{ мм} = 0,0114 \text{ м}$ ,  $h_{2a} = h_{1b} = 5,4 \text{ мм} = 0,0054 \text{ м}$ ,  $h_{2b} = h_{1c} = 3,4 \text{ мм} = 0,0034 \text{ м}$ ,  $h_{2c} = h_{1d} = 2,4 \text{ мм} = 0,0024 \text{ м}$ ,  $h_{2d} = 2,0 \text{ мм} = 0,002 \text{ м}$  отримували значення протитиску по зонах:  $\Delta P_a = 9000000 \text{ Па}$ ,  $\Delta P_b = 14500000 \text{ Па}$ ,  $\Delta P_c = 14000000 \text{ Па}$ ,  $\Delta P_d = 1000000 \text{ Па}$ .

При цьому характеристики матеріалу (поліетилен низького тиску) складала  $n = 2,8$ ,

в'язкість  $\eta = 10000$  Па·с (температура 180°C, щільність 0,918 г/см<sup>3</sup>), а кут нахилу гвинтового каналу складає  $\varphi = 86$  град. Коефіцієнт впливу температури приймали  $k_t = 0,85$ .

Для вирівнювання протитиску у екструдері по всіх зонах приймаємо його значення постійним, тобто для розрахунків  $\Delta P = 11000000$  Па. Визначення коефіцієнтів  $f_{ym}$  та  $f_{np}$  проводили за методикою роботи [8]. Тоді для зони завантаження  $f_{ym(a)} = 0,9$ ,  $f_{np(a)} = 1,7$ ; для зони стискання  $f_{ym(\sigma)} = 0,76$ ,  $f_{np(\sigma)} = 2,92$ ; для зони гомогенізації  $f_{ym(\sigma)} = 0,61$ ,  $f_{np(\sigma)} = 4,95$ ; для зони дозування  $f_{ym(\varepsilon)} = 0,56$ ,  $f_{np(\varepsilon)} = 5,43$ .

Звідки за розрахунками по трансцендентному рівнянню для загального випадку неважко встановити значення кутів нахилу гвинтового каналу: для зони завантаження –  $\varphi_{(a)} = 85,5$  град., для зони стискання –  $\varphi_{(\sigma)} = 84,3$  град., для зони гомогенізації –  $\varphi_{(\sigma)} = 89,3$  град., для зони дозування –  $\varphi_{(\varepsilon)} = 88,5$  град. Виконання шнека екструдера із визначеними значеннями кутів нахилу гвинтового каналу по зонах забезпечить рівний протитиск по всіх зонах екструдера. Виготовлення шнеку можливо методами лиття, штампування або накатування по ділянках.

### Висновки

1. В статті показана перспективність напряму розвитку теорії та технології переробки вторинних полімерів, кількість відходів яких з кожним роком збільшується. Підтверджено, що для переробки термопластичних полімерів найбільш придатними та універсальними є способи екструзії та соекструзії.

2. Для вирівнювання протитиску прес-маси при її просуванні вздовж шнеку та покращення якості продукції і розширення технологічних можливостей екструдера, шляхом аналітичного розгляду схеми екструдювання встановлений вираз для визначення необхідного кута нахилу гвинта шнеку, що потрібно враховувати при конструюванні машини.

3. Розроблено методику розрахунку конструктивних параметрів шнеку екструдера та наведений приклад розрахунку для конкретного випадку, що відповідає умовам переробки поліетилену низького тиску.

### Список використаних джерел:

1. Филатов В.А. Вредные вещества в промышленности : справочник / Под общ. ред. В.А. Филатова, В.А. Курляндского. – Л. : Химия, 1993. – 463 с.
2. Дядичев В.В. Соекструзійна обробка вторинних полімерних матеріалів (теорія, технологія, обладнання) : автореф. дис. ...д-ра техн. наук : 05.03.05 / В.В. Дядичев; Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. – Луганськ, 2003. – 36 с.
3. Торнер Р.В. Оборудование заводов по переработке пластмасс : учеб. пособие для ВУЗов / Р.В. Торнер, М.С. Акутин. – М. : Химия, 1986. – 400 с.
4. Басов Н.И. Оборудование для производства объемных изделий из термопластов / Н.И. Басов, В.С. Ким, В.К. Скуратов. – М. : Машиностроение, 1972. – 272 с.
5. Пат. 2038206 Россия, МПК В 27 N 3/26, В 27 N 5/02. Экструзионный пресс.
6. А.с. 188654 СССР, МПК В 29 F. Двухпозиционный термопластавтомат / Э.Л. Калинин, И.С. Кричевер, Т.П. Николенко, И.М. Рабинович. – № 793085/23-5; заявл. 03.09.62; опубл. 01.11.66, Бюл. 22.
7. Шенкель Г.П.М. Влияние результатов исследовательских работ на конструкцию шприц-машины // Переработка полимеров : Сб. пер. / Под ред. Р.В. Торнера. – М.; Л. : Химия, 1964. – С. 9-81.
8. Якоби Г.Р. Механизм течения в одночервячной шприц-машине // Переработка полимеров : Сб. пер. / Под ред. Р.В. Торнера. – М.; Л. : Химия, 1964. – С. 105-127.

### References:

1. Filatov V.A. *Vrednyie veschestva v promyshlennosti. Spravochnik* [Hazardous substances in the industry. Reference book.]. Leningrad, Khimiya Publ., 1993. 463 p. (Rus.)
2. Diadichev V.V. *Soekstruziynna obrobka vtorynnykh polimernykh materialov (teoriya, tekhnologiya, obladnannia)*. Avtoref. diss. doc. techn. nauk [Co-extrusion procession of secondary polymer ma-

- trials (theory, technology, equipment). Thesis of doc. tech. sci. diss.]. Luhansk, 2003. 36 p. (Ukr.)
3. Torner R.V., Akutin M.S. *Oborudovaniye zavodov po pererabotke plastmass. Ucheb. posobiye dlia VUZov* [Equipment of the plastic procession plants. Text-book for high education institutions]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 400 p. (Rus.)
  4. Basov N.I., Kim B.C., Skuratov V.K. *Oborudovanie dlya proizvodstva ob'emnyih izdeliy iz termoplastov* [Equipment for the production of bulk products from thermoplastics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 272 p. (Rus.)
  5. Zhibul G.Ya. *Ekstruzionnyiy press* [Extrusion press]. USSR Certificate of authorship no. 2038206, 1993. (Rus.)
  6. Kalinchev E.L., Krichever I.S., Nikolenko T.P., Rabinovich I.M. *Dvukhpozitsionnyiy termoplastavtomat* [Two-way injection molding machine]. USSR Certificate of authorship no. 188654, 1966. (Rus.)
  7. Shenkel G.P.M. Vliyanie rezultatov issledovatel'skikh rabot na konstruktsiyu shprints-mashiny [Effects of recent fundamental investigation on extruder design]. *Pererabotka polimerov: sb. per. – Polymer processing*, 1964, pp. 9-81. (Rus.)
  8. Jacobi H.R. Mehanizm techeniya v odnochervyachnoy shprints-mashine [Flow mechanism in the single-screw spraying machine]. *Pererabotka polimerov: sb. per. – Polymer processing*, 1964, pp. 105-127. (Rus.)

Рецензент: В.О. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Статья надійшла 27.09.2016