

RELATED PROBLEMS OF RADIO ENGINEERING

СУМІЖНІ ПРОБЛЕМИ РАДІОТЕХНІКИ

УДК 621.7.075

DOI:10.30837/rt.2022.2.209.21

Є.А. РАЗУМОВ-ФРИЗЮК, канд. техн. наук, Д.В. ГУРІН, Д.О. НІКІТІН,
Р.Є. СТРИЛЕЦЬ, Д.С. БЛИЗНЮК

МОДЕЛЮВАННЯ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА ДЛЯ FFF 3D ДРУКУ

Вступ

В наш час технології аддитивного тривимірного прототипування постійно розвиваються. Однією з найпопулярніших технологій 3D друку є технологія FFF – Fused filament fabrication («виробництво способом наплавлення ниток»). У якості матеріалу для принтерів, що функціонують за цією технологією, використовується філамент – прутки діаметром 1,75 або 2,85 мм, що виготовлені з термопластів. Вартість філаменту може бути досить значною у порівнянні з сировиною, з якої він виробляється. Тому досить перспективним є напрямок розробки для 3D принтерів шнекових екструдерів, які у якості матеріалу використовують гранульовані термопласти або подрібнену вторсировину. На даний час промислові підприємства не виробляють шнекові екструдери. Існує лише декілька проектів, що використовують стандартні шнеки та циліндри для термопласти-автоматів і не є оптимізовані для умов 3D друку. Автори пропонують моделювання шнекового екструдера, якій відповідає основним вимогам адитивного виробництва за технологією FFF.

Вибір шнека

При розробці шнекового екструдера для 3D принтера необхідно:

- максимально зменшити масогабаритні параметри екструдера, що дозволить збільшити швидкість друку через зменшення маси та як наслідок інерційності каретки екструдера, а також зменшити вартість координатної системи 3D принтера через зменшення необхідної жорсткості всієї конструкції;
- забезпечити необхідну лінійну продуктивність шнекового екструдера, яка повинна перевищувати максимальну швидкість друку 3D принтера (швидкість переміщення екструдера в робочому режимі).

Зображення шнека представлено на рис. 1.

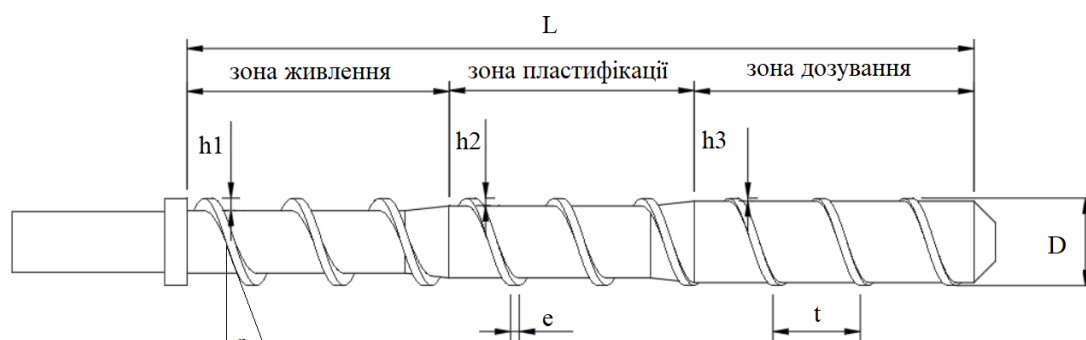


Рис. 1. Шнек екструдера

Основні геометричні параметри шнека:

- діаметр D ;
- довжина L ;
- крок гвинтової нарізки t ;
- глибина каналу по зонах (глибина нарізки) h ;
- ширина гребеня витка e ;

- величина зазору між гребенем шнека та внутрішньою стінкою циліндра δ ;
- кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека φ ; зонність;
- число заходів нарізки шнека λ (найчастіше $\lambda = 1$) [4, 5].

Для переробки термопластів зазвичай застосовуються циліндричні шнеки з постійним кроком та змінною глибиною гвинтового каналу. Вони порівняно прості у виготовленні та забезпечують високу продуктивність. Діаметр шнеків вітчизняних екструдерів регламентований ГОСТом 14773 та становить розмірний ряд: 20; 32; 45; 63; 90; 125; 160; 200; 320; 450; 630 мм. Чим більший діаметр шнека, тим вища продуктивність екструдера. Довжина шнеків L характеризується її відношенням до діаметра D (L/D). Це співвідношення може змінюватися в інтервалі 8 – 40 [2, 6]. Значення D та L/D є основними характеристиками одношнекового екструдера та вказуються у його марці. Для мінімізації масогабаритних параметрів екструдера вибрано шнек марки ЧП 20x8. Цей шнек має найменші серед стандартних шнеків розміри та масу, що значно впливає на швидкість переміщення екструдера в режимі друку через найменшу інерцію та навантаження на крокові двигуни осей X та Y .

Для перевірки достатності продуктивності даного екструдера необхідно розрахувати лінійну продуктивність шнекового екструдера, тобто. довжину дроту пластику, який екструдується за одну секунду. Ця величина залежатиме від діаметра встановленого сопла (передбачається використовувати сопла з діаметром від 1 до 5 мм). Отримане значення лінійної продуктивності має перевищувати максимальну швидкість друку екструдера 3D принтера, заявлену в технічному завданні, для екструдера, що розглядається, максимальна швидкість друку (переміщення екструдера в робочому режимі) повинна становити 50 мм/с.

Для визначення лінійної продуктивності шнека запропоновано формулу [1]:

$$L = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (1)$$

де L – лінійна продуктивність екструдера, см/хв.; Q – об'ємна продуктивність, см³/ хв; d – діаметр використовуваного сопла, см.

Екструдер передбачається розробляти одношнековий, без зони дегазації, однозахідний, зі змінною глибиною спірального каналу (зі змінною глибиною нарізки), що спричинено зниженням масогабаритних характеристик та вартості виготовлення екструдера.

Розрахунок параметрів шнека

Необхідно розрахувати параметри шнека для подальшого моделювання екструдера. Оскільки обраний шнек зі змінною глибиною спірального каналу, то насамперед необхідно визначити розміри зон живлення, пластифікації та дозування. Їхні розміри є стандартними для різних пластмас. Для подальшого розрахунку вибрано наступні співвідношення розмірів зон шнека представлений у табл. 1.

Таблиця 1

Зона живлення	Зона пластифікації	Зона дозування
0,25L	0,35L	0,4L

Для обраної довжини шнека 160 мм зона живлення має розмір 40 мм, зона пластикації – 56 мм, зона дозування – 64 мм.

Далі необхідно розрахувати або вибрати зі стандартних усі параметри шнека, представлені рис. 1.

Крок гвинтової нарізки t шнека рекомендується приймати постійним по довжині шнека (для шнеків зі змінною глибиною нарізки), він вибирається в діапазоні [1, 3]:

$$t = (0,8 \dots 1,2) D \quad (2)$$

Зазвичай крок приймається рівним діаметру шнека, тобто $t = D$, що відповідає куту підйому гвинтового каналу $17^{\circ}42'$, що одночасно забезпечує гарне живлення екструдера матеріалом та знижує вартість виробництва шнека.

Глибина гвинтового каналу шнека.

Глибини гвинтового каналу шнека h у різних зонах визначаються за формулами [2, 6]:

$$h_1 = (0,12 \dots 0,16) D \quad (3)$$

де h_1 – глибина гвинтового каналу у зоні живлення.

Так як екструдер передбачається використовувати для друку різними матеріалами, коефіцієнт формули обраний усереднений 0,14. Величина гвинтового каналу в зоні живлення становить 2,8 мм:

$$h_3 = 0,5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i}(D - h_1)} \right], \quad (4)$$

де h_3 – глибина гвинтового каналу у зоні дозування; i – ступінь стиснення матеріалу.

Ступінь стиснення матеріалу є величиною, що вибирається зі стандартного для кожного полімеру діапазону. У зв'язку з розробкою екструдера для різних матеріалів ступінь стиснення вибирається рівним 4, так як ця величина потрапляє в діапазони всіх пластиків, які планується використовувати: ABS, PLA, PET, PC тощо. Розмір гвинтового каналу у зоні дозування становить 0,621 мм;

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} L_0, \quad (5)$$

де h_2 – глибина гвинтового каналу у зоні пластикації, мм; L – довжина шнека, мм; L_0 – довжина шнека до зони стиснення, мм;

$$L_0 = L - L_H, \quad (6)$$

L_H – довжина напірної частини шнека, мм.

$$L_H = (0,4 \dots 0,6) L. \quad (7)$$

Приймаємо $L_H = 0,5 L$. Відповідно до розрахунків глибина гвинтового каналу в зоні пластикації становить 1,71 мм.

При виборі товщини витка e (ширини гребеня) необхідно враховувати, що збільшення товщини витка призводить до підвищення витрати потужності, а зменшення її – до утворення значного потоку витоків через проміжок між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та зовнішньою поверхнею витка шнека. Ширину гребеня витка шнека рекомендується приймати

$$e = (0,06 \dots 0,1) D. \quad (8)$$

У зв'язку з тим, що шнек для екструдера обраний максимально короткий, збільшення товщини витка не може значно підвищити витрату потужності, а витік через проміжок між шнеком і циліндром призведе до некоректної роботи екструдера – недоекструзії, проблем з відкатами (retrack), таким чином слід вибирати максимально допустиму товщину витка, що становить 2 мм.

Радіальний проміжок між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра і зовнішньою поверхнею витка шнека рекомендується приймати

$$\delta = (0,002 \dots 0,005) D. \quad (9)$$

Зменшення радіального проміжку призводить до підвищення вартості виготовлення шнека і циліндра у зв'язку зі зменшенням допусків, але водночас призводить до зменшення витоку матеріалу і як наслідок підвищення якості друку. Радіальний проміжок вибирається рівним 0,04 мм.

Розробка тривимірної моделі екструдера

Визначальний вплив на продуктивність екструдера має дозувальна зона шнека. Ефективність дозуючої зони залежить від геометричних параметрів самого шнека. Віддача ж шнекового екструдера в цілому залежить не тільки від геометричних розмірів шнека та числа обертів, але й значною мірою від конструкції голівки, що формує [7].

На основі гідродинамічного підходу до аналізу взаємодії робочих органів з матеріалом, що переробляється, в дозуючій зоні екструдера прийнято розглядати три складові потоку руху розплаву:

- потік розплаву, що рухається міжвитковим простором у напрямку від зони завантаження до зони дозування вздовж осі шнека; виникає внаслідок обертання шнека щодо циліндра;
- потік розплаву, що рухається у протилежному напрямку, що викликано перепадом тиску P по довжині шнека;
- потік витоку, що рухається в проміжку між зовнішньою поверхнею витків шнека та внутрішньою поверхнею матеріального циліндра у напрямку від зони дозування.

Подібний поділ на три потоки в каналі шнека слід вважати умовним, так як протитечії практично не існує, а має деяке обмеження прямого потоку, що виникає в результаті опору сопла [8, 9]. Сопло – це знімний технологічний інструмент, призначений для екструзії пластмаси у процесі 3D друку.

Об'ємна продуктивність екструдера, залежно від опору сопла та конструкції дозуючої зони, може бути виражена співвідношенням

$$Q = \frac{AK}{K+B+C} n; \quad (10)$$

де Q – об'ємна продуктивність, $\text{см}^3/\text{хв}$; K – коефіцієнт опору сопла екструдера, см^3 ; n – частота обертання шнека, хв^{-1} ; A – постійна прямого потоку, см^3 ; B – постійна зворотного потоку, см^3 ; C – постійна потоку витоків, см^3 .

Значення постійних прямого потоку A , зворотного B та потоку витоків C визначаються наступним чином:

$$A = \frac{\pi^3 (t - \lambda e) \sigma}{a + t^2 b}; \quad (11)$$

$$B = \frac{\pi t (t - \lambda e)}{12 L_H (a + t^2 b)}; \quad (12)$$

$$C = \frac{\pi D \delta^3 t^2}{10 e L_H \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}}; \quad (13)$$

де D – зовнішній діаметр шнека, см ; t – крок нарізки шнека, см ; e – ширина гребеня нарізки, см ; λ – кількість заходів; δ – величина проміжку між гребенем шнека та внутрішньою стінкою циліндра, см ; L_H – довжина зони дозування, см ; σ , a , b – коефіцієнти, що характеризують конструкцію шнека зі змінною глибиною нарізки визначаються за такими формулами:

$$\sigma = 1 - \frac{6,9D}{2(h_2 - h_3)} \lg \frac{h_2}{h_3} + \frac{D^2}{2h_2h_3}; \quad (14)$$

$$a = \frac{\pi^2}{h_2h_3} \left[\frac{D(h_2 + h_3)}{2h_2h_3} - 1 \right]; \quad (15)$$

$$b = \frac{2,3}{(h_2 - h_3)D^3} \lg \frac{h_2(D + d_3)}{h_3(D + d_1)} + \frac{2h_2h_3 + (h_2 + h_3)2D}{2D^2h_2^2h_3^2}; \quad (16)$$

де d_1 – діаметр осердя (валу) шнека під завантажувальною вірвою, см:

$$d_1 = D - 2h_1; \quad (17)$$

d_3 – діаметр сердечника шнека у зоні дозування, см:

$$d_3 = D - 2h_3. \quad (18)$$

За результатами розрахунків отримано:

- $\sigma = 153,789$;
- $a = 19452,553$;
- $b = 11,892$.

В результаті постійний прямий потік $A = 0,439 \text{ см}^3$.

Постійна зворотного потоку $B = 6,038 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3$.

Постійна потоку витоків $C = 1,524 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3$.

Для розрахунку об'ємної продуктивності екструдера також необхідно визначити опір сопла [1, 10]. Основною геометричною характеристикою сопла є її загальний коефіцієнт опору K , який визначається як сума коефіцієнтів опору окремих простих по геометрії ділянок $k_1, k_2 \dots k_i$ за допомогою рівняння

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_i}}, \quad (19)$$

де $k_1, k_2 \dots k_i$ – приватні коефіцієнти опору ділянок каналу із простою геометричною формою. При розрахунку K сопло умовно розбивають на ділянки, що відрізняються конфігурацією, і для кожної ділянки визначають частковий коефіцієнт опору.

Для розрахунку коефіцієнта опору сопла екструдера необхідно розглянути розроблену тривимірну модель сопла представлену на рис. 2.

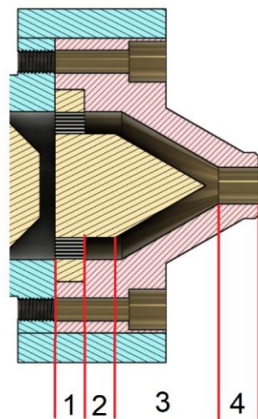


Рис. 2. Схематичне зображення сопла шнекового екструдера

Сопло можна розділити на чотири ділянки для коефіцієнта опору.

Перша ділянка – елементи фільтрації, він призначається для очищення розплаву від різноманітних твердих включень, що неминуче потрапляють у матеріал на різних стадіях його виробництва та транспортування, а також від неповністю проплавлених у каналі черв'яка частинок матеріалу, які іноді з'являються на виході з цього каналу при роботі екструдера. На таких шнекових пристроях встановлюють сито-змінні фільтрувальні пристрої. Весь набір сіток підтримується решіткою, ділянка встановлюється між циліндром і соплом, що служить для спрямування потоку розплаву, що виходить із останнього витка шнека. Вона є сталевим диском товщиною приблизно 1/5 діаметра циліндра. Для екструдера, що описується, товщина складе 4 мм. При розрахунку коефіцієнта опору в голівці опорір у решітці та фільтри також повинні враховуватися. Коефіцієнт опору фільтра, см³:

$$K_{\phi} = \frac{nFd_0^2}{32\delta_{\phi}}, \quad (20)$$

де n – кількість фільтрувальних елементів; F – площа фільтрувального елемента, см²; δ_{ϕ} – товщина фільтруючих елементів, см.

Для фільтра вибрано середню сітку з діаметром дроту. $d = 0,16$ мм та розміром вічок $d_0 = 0,025$ см; кількість сіток приймаємо $n = 3$; площа фільтрувального елемента $F = 1,608$ см²; товщина фільтруючих елементів $\delta_{\phi} = 2dn = 2 \cdot 0,16 \cdot 3 = 0,096$ см; коефіцієнт опору фільтра $K_{\phi} = 0,0000586$.

Коефіцієнт опору решітки, см³:

$$K_p = \frac{\pi z d_0^4}{128\delta_p}, \quad (21)$$

де z – кількість отворів у решітці; d_0 – діаметр отворів, см; δ_p – товщина решітки, см.

Товщина решітки обрана $\delta_p = 0,3$ см, діаметр отворів $d_0 = 0,04$ см, кількість отворів у решітці $z = 552$. Коефіцієнт опору решітки дорівнює $K_p = 0,0001156$.

Друга ділянка сопла являє собою кільцевий циліндричний канал, коефіцієнт опору визначається за формулою

$$K_2 = \frac{\pi}{8L} \left[R_H^4 - R_B^4 - \frac{(R_H^2 - R_B^2)^2}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \right], \quad (22)$$

де L – довжина ділянки, 5 см; R_H – зовнішній радіус, 1,004 см; R_B – внутрішній радіус, 0,704 см.

Кінцевий циліндричний канал представлено на рис. 3.

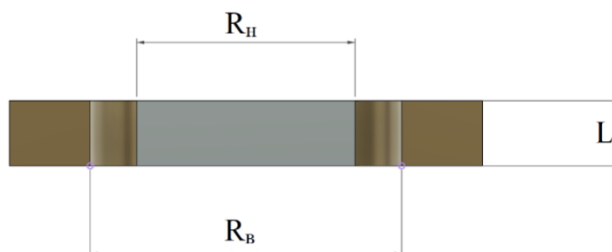


Рис. 3. Кільцевий циліндричний канал

$$K_2 = 0,0024782.$$

Третя ділянка сопла є конічним кільцевим каналом, коефіцієнт опору визначається за формулою

$$K_3 = \frac{\pi(R_1\delta_1 - R_2\delta_2)}{6Lm}, \quad (23)$$

де R_1 – середній радіус конуса на вході, см; R_2 – середній радіус конуса на виході, см; δ_1 – зазор конічного кільцевого каналу на вході, см; δ_2 – зазор конічного кільцевого каналу на виході, см; L – довжина ділянки, см; m – коефіцієнт, що визначається за формулою

$$m = \frac{2,3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)} \lg \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2}. \quad (24)$$

Конічний кільцевий канал представлено на рис. 4.

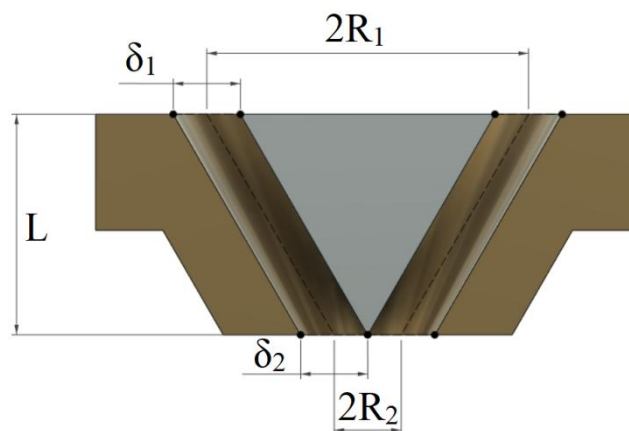


Рис. 4. Конічний кільцевий канал

У запропонованій конструкції коефіцієнт $m = 19,3067$, а коефіцієнт опору третьої ділянки дорівнює $K_3 = 0,004697$

Четверта ділянка являє собою циліндричний круглий канал, коефіцієнт опору визначається за формулою

$$K_4 = \frac{\pi d^4}{128L}, \quad (25)$$

де d – діаметр отвору циліндра, см; L – довжина ділянки, см.

Циліндричний круглий канал представлено на рис. 5.

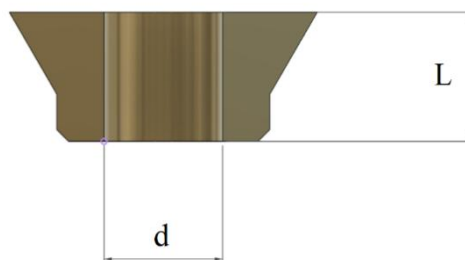


Рис. 5. Циліндричний круглий канал

Відповідно до першого варіанта аналізованої конструкції (сопло 5 мм) $K_4 = 0,003068$, з другим (сопло 1 мм) $K_4 = 4,9 \cdot 10^{-6}$.

Відповідно до конструкції сопла, загальний коефіцієнт опору K розраховується за формулою

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_\phi} + \frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4}} \quad (26)$$

$K = 37,513 \cdot 10^{-6}$ для сопла діаметром 5 мм та $K = 4,34 \cdot 10^{-6}$ для сопла діаметром 1 мм.

Підставляючи отримані значення в формулу (10) і вибравши максимальну частоту обертання шнека $n = 480 \text{ хв}^{-1}$, визначимо максимальну об'ємну продуктивність екструдера. Вибір частоти обертання шнека обумовлений тим, що в якості приводу буде використаний кроковий двигун. Відповідно до вироблених розрахунків об'ємна продуктивність $Q = 181,4418 \text{ см}^3/\text{хв}$ для сопла діаметром 5 мм; і $Q = 87,9923 \text{ см}^3/\text{хв}$ – для сопла діаметром 1 мм. Отриманий результат використовуємо для визначення максимальної лінійної продуктивності екструдера (1).

Для сопла діаметром 5 мм максимальна лінійна продуктивність екструдера становитиме $L = 924,075 \text{ см}/\text{хв} = 154 \text{ мм}/\text{с}$.

Для сопла діаметром 1 мм максимальна лінійна продуктивність екструдера становитиме $L = 11203,528 \text{ см}/\text{хв} = 1867,2 \text{ мм}/\text{с}$.

Для обох варіантів діаметра сопла набуто значення значно перевищує максимальну швидкість переміщення екструдера в робочому режимі, яка повинна становити 50 мм/с, що дозволить зменшити частоту обертання крокового двигуна, який є приводом екструдера, та використовувати додатково редуктор (наприклад, планетарний) для збільшення крутного моменту.

Висновки

Проведено розробку конструкції шнекового екструдера для використання в FFF 3D принтерах. Розраховано основні параметри шнеку та циліндру. Розроблено конструкції сопел з отворами 1 та 5 мм. Проведено розрахунок лінійної продуктивності розробленого шнекового екструдера, результат підтвердив можливість 3D друку із запланованою швидкістю 50 мм/с.

Запропонована конструкція має дві основні переваги у порівнянні із стандартними рішеннями. Шнековий екструдер дозволяє знизити собівартість деталей, що виготовляються за технологією FFF за рахунок використання гранульованих термопластів або подрібненої вторсировини, як наслідок зниження вартості матеріалу. Також з'являється можливість друку соплами великого діаметру. Стандартні сопла зазвичай не перевищують діаметр 1,2 мм, це обмеження викликано, насамперед, діаметрами стандартного філаменту, які становлять 1,75 або 2,85 мм. Запропонований шнековий екструдер дозволяє друкувати значно більшими діаметрами сопла, що у свою чергу прискорює виготовлення деталей великих розмірів.

Список літератури:

1. Басов Н.И., Ким В.С., Скуратов В.К. Оборудование для производства объемных изделий из термопластов. М.: Машиностроение, 1972. 217 с.
2. Радченко Л.Б. Переробка термопластів методом екструзії. Київ, 1999. 214 с.
3. Ogorkiewicz R. M. (1977). The Engineering Properties of Plastics, Oxford University Press.
4. Kalpakjian S. and Schmid S.R. (2008). Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed., Pearson Education.
5. Tim A. Oswald, Juan Pablo Hernandez-Ortiz (2009), Polymer processing [www.books.google.uk (online) Available, <http://books.google.co.uk/books>].
6. Rauwendaal C. Polymer extrusion. 5th ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2014. 950 p. doi: 10.3139/978156990539

7. Donovan R. C. A theoretical melting model for plasticating extruders // Polymer Engineering and Science. 1971. Vol. 11, Issue 3. P. 247–257. doi: 10.1002/pen.760110313
8. Analysis of a Single Screw Extruder with a Grooved Plasticating Barrel – Part I: The Melting Model / Alfaro J. A. A., Grün-schloß E., Epple S., Bonten C. // International Polymer Processing. 2015. Vol. 30, Issue 2. P. 284–296. doi: 10.3139/217.3021
9. Сокольський О.Л., Івіцький І.І., Олексишен В.О. Моделювання течії розплавів полімерів за наявності низьков'язкого пристінного шару // Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Сер.: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2019. N 1. С. 35-40. DOI: 10.20535/2617-9741.1.2019.171033
10. Wilczyński K. J., Lewandowski A., Wilczyński K. Experimental study of melting of polymer blends in a starve fed single screw extruder // Polymer Engineering & Science. 2016. Vol. 56, Issue 12. P. 1349–1356. doi: 10.1002/pen.24368.

Надійшла до редколегії 07.05.2022

Відомості про авторів:

Разумов-Фризюк Євгеній Анатолійович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Україна; e-mail: ievgenii.razumov-fryziuk@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7426-3805>

Гурін Дмитро Валерійович – старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківський національний університет радіоелектроніки Україна; e-mail: dmytro.gurin@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2272-5227>

Нікітін Дмитро Олександрович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки; Харківський національний університет радіоелектроніки Україна; E-mail: dmytro.nikitin@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5591-4438>

Стрілець Роман Євгенійович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки; Харківський національний університет радіоелектроніки Україна; e-mail.roman.strilets@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5123-8703>

Близнюк Данило Сергійович – аспірант, старший лаборант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки; Харківський національний університет радіоелектроніки Україна; e-mail: danylo.blyzniuk@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3041-1885>