

**ДОДАТОК А**  
**ДЕМОНСТРАЦІЙНИЙ ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ**

**ДОДАТОК Б**  
**АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Міністерство освіти і науки України



**NURE**

Харківський національний університет  
радіоелектроніки

## **ЗБІРНИК**

**студентських наукових статей**

«Автоматизація та приладобудування»

«Automation and Development of Electronic Devices»

**ADED-2023**

(Випуск 2)

[електронне видання]



<http://nure.ua/department/kafedra-komp-yuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mchatroniki-kitap>



<http://itez.zntu.edu.ua/>



<http://kafea.kdu.edu.ua>

Харків 2023

<i>В.А. Савін</i>	
Класифікація роботизованих систем для пошуку вибухонебезпечних предметів .....	319
<i>М. Збітнев</i>	
Аналіз мобільних робототехнічних платформ для гуманітарного розмінування .....	329
<i>В.А.Сторожук В.А., М.А. Вісковатов</i>	
Розробка інтелектуального модуля для моніторингу параметрів на базі ІоТ .....	334
<i>М.В. Толстий</i>	
Аналіз методів намотування дротів на станках з ЧПУ у роботизованому виробництві .	340
<i>В.В. Цешевський</i>	
Огляд сучасних конструктивних схем роботів для переміщення сходами .....	354
<i>О.О. Зибенко</i>	
Інновації та досягнення в електророзробній обробці: формування комп'ютерно-інтегрованого виробництва .....	356
<i>К.О. Левченко</i>	
Моделювання автоматизованого комплексу безтарного сховища сировини .....	361
<i>О.Д. Нікулін</i>	
Конвеєрні технології та автоматизація у аддитивному виробництві .....	364
<i>Д.В. Пархоменко</i>	
Аналіз систем інжекції з'єднувальної речовини у технології 3D друку 3DP .....	370
<i>К.С. Скрипник</i>	
Моделювання та розрахунок дозування пластику у шнековому екструдері .....	374
<i>С.Ю. Мірошніченко</i>	
Автоматизована система управління для знешкодження вибухонебезпечних предметів	381
<i>В.Є. Тараненко</i>	
технологія екструзійного 3D друк без підтримок .....	386
<i>С.О.Зуєв, М.Ю. Лучанінов</i>	
Дослідження методів автономного позиціонування та навігації робототехнічних мобільних платформ .....	390
<i>О.С. Пащенко, К.О. Зозуля</i>	
Сучасне виробництво з використанням комп'ютерного управління та інформаційних технологій .....	394
<i>С.Г. Федосєєв</i>	
Аналіз методів імітаційного моделювання технологічних процесів складання .....	401
<i>К.С. Редькін</i>	
Локальна навігація мобільного робота в приміщенні .....	404

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ДОЗУВАННЯ ПЛАСТИКУ У ШНЕКОВОМУ ЕКСТРУДЕРІ

**К.С. Скрипник**

Кафедра КІТАР, Харківський національний університет радіоелектроніки  
Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14  
E-mail: kostyanskripnik@gmail.com

**Анотація:** У статті наведено методику розрахунку параметрів шнекового екструдера для екструзійного 3D друку за технологією FFF. Розрахунок проводиться виходячи з діаметру сопла та необхідної швидкості 3D друку.

**Ключові слова:** 3D-друк, шнековий екструдер, розрахунок продуктивності, параметри шнеку, полімери.

## MODELING AND CALCULATION OF PLASTIC DOSING IN A SCREW EXTRUDER

**К.Е. Skrypnyk**

Department of KИТАР, Kharkiv National University of Radioelectronics  
Ukraine, 61166, Kharkiv, 14 Nauky Ave.,  
E-mail: kostyanskripnik@gmail.com

**Annotation:** The materials used for FFF 3D printing are thermoplastic polymers, which are heated to the viscous transition temperature and extruded through a nozzle. The metering zone of the screw has a decisive influence on the extruder's performance. The efficiency of this zone depends on the geometric parameters of the screw. The material output from a screw extruder not only depends on the geometric dimensions of the screw and the screw speed, but also has a significant impact on the design of the material forming head. That is why the study and calculation of plastic dosage in a screw extruder will be carried out.

**Keywords:** 3D printing, screw extruder, calculation of productivity, screw parameters, polymers.

ІВСТУП. Для якісної роботи шнекового екструдера необхідно розрахувати та обрати такий шнек, який буде задовольняти усім технологічним вимогам для забезпечення якомога кращого результату процесу 3D друку.

Для того, щоб обрати шнек, який задовольнить усі вимоги, будуть проведені відповідні розрахунки, для визначення необхідних параметрів, такі як: розрахунки зон шнеку, кроку гвинтової нарізки, глибини гвинтового каналу, ступінь стиснення матеріалу, товщини витка та розрахунок радіального зазору.

Після проведення зазначених вище розрахунків, буде визначена лінійна продуктивність шнекового екструдера. За результатом якої можна буде зробити висновок, чи були значення параметрів шнеку обрані якомога ближче для забезпечення максимальної лінійної продуктивності шнекового екструдера.

ІІ. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ШНЕКУ. Розрахунок зон шнеку. Необхідно провести розрахунок параметрів шнека для майбутнього моделювання екструдера. Оскільки обраний шнек має змінну глибину спірального каналу, то в першу чергу необхідно визначити розміри зон живлення, пластифікації та дозування. Розміри цих зон стандартизовані для різних видів пластмас. Для подальших розрахунків були вибрані співвідношення, які зазначені у табл. 1.

Таблиця 1 – Розміри зон шнеку

Зона живлення	Зона пластифікації	Зона дозування
0.25L	0.35L	0.4L

Згідно з табл. 1, можна зробити висновок, що для обраної довжини шнека, яка складає 160мм, зона живлення має розмір – 40мм, зона пластифікації – 56мм, зона дозування – 64мм.

Розрахунок кроку гвинтової нарізки.

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

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

Зазвичай крок приймається рівним діаметру шнека, тобто  $t = D$ , що відповідає куту підйому гвинтового каналу  $17^\circ$ - $42^\circ$ , що одночасно надає хороше харчування екструдера матеріалом і знижує вартість виробництва шнека.

Глибина гвинтового каналу шнека.

Глибини гвинтового каналу шнека  $h$  у різних зонах визначаються за формулами:

$$h_1 = (0,12 \dots 0,16)D, \quad (2)$$

де,  $h_1$  – глибина гвинтового каналу у зоні живлення.

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

$$h_2 = 0,5 \left[ D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i}(D - h_1)} \right] \quad (3)$$

де  $h_2$  – глибина гвинтового каналу у зоні дозування;

$i$  – ступінь стиснення матеріалу.

Ступінь стиснення матеріалу є величиною, що обирається зі стандартного для кожного полімеру діапазону [1]. У зв'язку з розробкою екструдера для різних матеріалів ступінь стиснення вибирається рівним 4, так як ця величина потрапляє у діапазони всіх пластиків, які планується використовувати: ABS, PLA, PET, PC і т.д. Розмір гвинтового каналу у зоні дозування становить 0,621мм.

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_2}{L} L_0, \quad (4)$$

де  $h_2$  – глибина гвинтового каналу у зоні пластифікації, мм;

$L$  – довжина шнеку, мм;

$L_0$  – довжина шнеку до зони стиснення, мм.

$$L_0 = L - L_n \quad (5)$$

$L_n$  – довжина напірної частини шнека, мм.

$$L_n = (0,4 \dots 0,6)L \quad (6)$$

Приймаємо  $L_n = 0,5L$ . Відповідно до розрахунків глибина гвинтового каналу у зоні пластифікації становить 1,71 мм.

Розрахунок товщини витка.

При виборі товщини витка (ширини гребеня) важливо враховувати, що зі збільшенням цієї товщини зростає споживана потужність, у той час як зменшення призводить до утворення

значного потоку витоків через зазор між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та зовнішньою поверхнею витка шнека. Рекомендується взяти ширину гребеня витка рівною:

$$e = (0,06 \dots 0,1)D. \quad (7)$$

Оскільки вибраний шнек для екструдера має максимально коротку конструкцію, збільшення товщини витка не суттєво збільшить споживану потужність. Але слід бути обережним, оскільки будь-який виток через зазор між шнеком і циліндром може спричинити некоректну роботу екструдера, таку як недоекструзію та проблеми з відкатами. Таким чином, рекомендується вибирати товщину витка, яка не перевищує максимально допустимий розмір, що дорівнює 2 мм.

Розрахунок радіального зазору.

Радіальний зазор між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та зовнішньою поверхнею витка шнека рекомендується приймати:

$$\delta = (0,002 \dots 0,005)D. \quad (8)$$

Зниження радіального зазору призводить до збільшення вартості виготовлення шнека і циліндра через скорочення допусків. Однак це також призводить до зменшення витоків матеріалу та, відповідно, підвищення якості друку. Радіальний зазор встановлюється на рівні 0,04 мм.

**III. РОЗРАХУНОК ПРОДУКТИВНОСТІ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА.** Дозувальна зона шнека має визначальний вплив на продуктивність екструдера. Ефективність цієї зони залежить від геометричних параметрів шнека. Видача матеріалу з шнекового екструдера не лише залежить від геометричних розмірів шнека та обертів, але також значно впливає конструкція голівки, яка формує матеріал.

Основою є гідродинамічний метод для аналізу взаємодії робочих органів з перероблюваним матеріалом, у зоні дозування екструдера розглядається три компоненти потоку розплавленого матеріалу:

- плин розплавленого матеріалу, що переміщується між витками від зони завантаження до зони дозування вздовж осі шнека, виникає внаслідок обертання шнека відносно циліндра;
- плин розплавленого матеріалу, що рухається в напрямку, протилежному обертанню шнека, виникає через різницю тиску  $P$  вздовж довжини шнека;
- плин витоків, що переміщується в зазорі між зовнішньою поверхнею витків шнека та внутрішньою поверхнею матеріального циліндра, рухається в напрямку від дозувальної зони.

Розділення каналу шнека на три потоки слід розглядати приблизно, оскільки практично немає взаємодії між потоками, існує обмеження прямого потоку, спричинене опором сопла. Сопло - це виємний технологічний інструмент, призначений для екструзії пластмаси під час процесу 3D друку [2].

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

$$Q = \frac{AK}{K+B+C} n; \quad (9)$$

де  $Q$  – об'ємна продуктивність,  $\text{см}^3/\text{хв}$ ;

$K$  – коефіцієнт опору сопла екструдера,  $\text{см}^3$ ;

$n$  – частота обертання шнеку,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$A$  – постійна прямого потоку,  $\text{см}^3$ ;

$B$  – постійна зворотного потоку,  $\text{см}^3$ ;

$C$  – постійна потоку витоків,  $\text{см}^3$ .

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

$$A = \frac{\pi^3(t-\lambda e)\sigma}{a+t^2b}; \quad (10)$$

$$B = \frac{\pi t(t-\lambda e)}{12L_n(a+t^2b)}; \quad (11)$$

$$C = \frac{\pi D \delta^3 t^2}{10eL_n \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}}; \quad (12)$$

де  $D$  – зовнішній діаметр шнека, см;

$t$  – крок нарізки шнека, см;

$e$  – ширина гребня нарізки, см;

$\lambda$  – число заходів;

$\delta$  – величина зазору між гребнем шнека та внутрішньою стінкою циліндра, см;

$L_n$  – довжина зони дозування, см.

$\sigma$ ,  $a$ ,  $b$  – коефіцієнти, що характеризують конструкцію шнека зі змінною глибиною нарізки

Вони визначаються за такими формулами:

$$\sigma = 1 - \frac{6,9D}{2(h_2-h_3)} \lg \frac{h_2}{h_3} + \frac{D^2}{2h_2h_3}; \quad (13)$$

$$a = \frac{\pi^2}{h_2h_3} \left[ \frac{D(h_2+h_3)}{2h_2h_3} - 1 \right] \quad (14)$$

$$b = \frac{2,3}{(h_2-h_3)D^3} \lg \frac{h_2(D+d_3)}{h_3(D+d_1)} + \frac{2h_2h_3+(h_2+h_3)2D}{2D^2h_2^2h_3^2}; \quad (15)$$

де  $d_1$  – діаметр сердечника (валу) шнека під завантажувальною вирвою, см:

$$d_1 = D - 2h_1 \quad (16)$$

$d_3$  – діаметр сердечника шнека в зоні дозування, см:

$$d_3 = D - 2h_3. \quad (17)$$

По результатам розрахунків отримано:  $\sigma = 153,789$ ;  $a = 19452,553$ ;  $b = 11,892$ .

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

Щоб розрахувати об'ємну продуктивність екструдера, необхідно визначити опір сопла. 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:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_i}}, \quad (18)$$

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.



Рисунок 1 – Схематичне зображення сопла шнекового екструдера

Сопло можна розділити на чотири ділянки для коефіцієнта опору.

Перша секція включає в себе елементи фільтрації, призначені для очищення розплаву від різноманітних твердих включень, які неминуче потрапляють у матеріал на різних етапах виробництва та транспортування. Також вона відокремлює не повністю проплавлені частки матеріалу, які іноді можуть з'являтися на виході з каналу черв'яка під час роботи екструдера. Для цих шнекових пристроїв встановлюють фільтраційні пристрої з можливістю заміни сіток. Всі сітки утримуються решіткою, яка розташована між циліндром та соплом, щоб направляти потік розплаву, що виходить з останнього витка шнека [3]. Ця решітка представляє собою сталевий диск, товщина якого приблизно 1/5 діаметра циліндра; для описаного екструдера вона має товщину 4 мм. У розрахунках коефіцієнта опору у головці, решітці та фільтрі також слід враховувати. Коефіцієнт опору фільтра,  $\text{см}^3$ :

$$K_{\phi} = \frac{nFd_0^2}{32\delta_{\phi}}, \quad (19)$$

де  $n$  – число фільтрованих елементів;  $F$  – площа фільтрованого елемента,  $\text{см}^2$ ;  $\delta_{\phi}$  – товщина фільтруючих елементів,  $\text{см}$ .

Для фільтру обрана середня сітка з діаметром проволочки  $d = 0,16$  мм та розміром осередків  $d_0 = 0,025$  см; число сіток приймаємо  $n = 3$ ; площа фільтрованого елемента  $F = 1,608$   $\text{см}^2$ ; товщина фільтруючих елементів  $\delta_{\phi} = 2dn = 2 \cdot 0,16 \cdot 3 = 0,096$  см; коефіцієнт опору фільтру дорівнює  $K_{\phi} = 0,0000586$ .

Коефіцієнт опору решітки,  $\text{см}^3$ :

$$K_p = \frac{\pi z d_0^4}{128\delta_p}, \quad (20)$$

де  $z$  – кількість отворів у решітці;  $d_0$  – діаметр отворів,  $\text{см}$ ;  $\delta_p$  – товщина решітки,  $\text{см}$ .

Товщина решітки обрана  $\delta_p = 0,3$  см, діаметр отворів  $d_0 = 0,04$  см, число 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:

$$K_2 = \frac{\pi}{8L} \left[ R_n^4 - R_a^4 - \frac{(R_n^2 - R_a^2)^2}{\ln \frac{R_n}{R_a}} \right], \quad (21)$$

де  $L$  – довжина ділянки, 5 см,  $R_n$  – зовнішній радіус, 1,004 см,  $R_a$  – внутрішній радіус, 0,704 см.

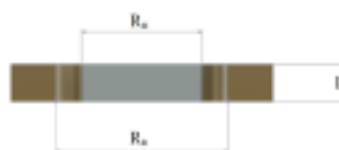


Рисунок 2 – Кільцевий циліндричний канал

$K_2 = 0,0024782$ . Третя ділянка сопла є конічним кільцевим каналом, коефіцієнт опору визначається за формулою:

$$K_3 = \frac{\pi(R_1\delta_1 - R_2\delta_2)}{6Lm}, \quad (22)$$

де  $R_1$  – середній радіус конуса на вході, см;  $R_2$  – середній радіус конуса на виході, см;  $\delta_1$  – зазор конічного кільцевого каналу на вході, см;  $\delta_2$  – зазор конічного кільцевого каналу на виході, см;  $L$  – довжина ділянки, см.

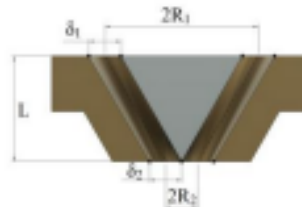


Рисунок 3 – Конічний кільцевий канал

$m$  – коефіцієнт, який визначається за формулою:

$$m = \frac{2.3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \lg \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2} \quad (23)$$

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

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

$$K_4 = \frac{\pi d^4}{128L}, \quad (24)$$

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



Рисунок 4 – Циліндричний круглий канал

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

Відповідно до конструкції сопла загальний коефіцієнт опору  $K$  розраховується за формулою:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_0} + \frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4}} \quad (25)$$

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

Підставляючи отримані значення формулу (2.9) і вибравши максимальну частоту обертання шнека  $n = 480 \text{ мин}^{-1}$ , визначимо максимальну об'ємну продуктивність екструдера. Вибір частоти обертання шнека обумовлений тим, що як привод буде використаний кроковий двигун. Відповідно до вироблених розрахунків об'ємна продуктивність  $Q=181,4418 \text{ см}^3/\text{хв}$  для сопла діаметром 5мм; та  $Q=87,9923 \text{ см}^3/\text{хв}$  для сопла діаметром 1мм. Отриманий результат використовуємо для визначення максимальної лінійної продуктивності екструдера (формула 3.1).

Для сопла діаметром 1мм максимальна лінійна продуктивність екструдера складе  $L = 924,075 \text{ см/хв} = 154 \text{ мм/сек}$ .

Для сопла діаметром 5мм максимальна лінійна продуктивність екструдера складе  $L = 11203,528 \text{ см/хв} = 1867,2 \text{ мм/сек}$ .

Для двох варіантів діаметра сопла отримане значення значно перевищує максимальну швидкість переміщення екструдера у робочому режимі, що має становити 50мм/сек. Що дозволить зменшити частоту обертання крокового двигуна, який є приводом екструдера і використовувати додатково редуктор (наприклад, планетарний) для збільшення моменту, що крутить..

**IV.ВИСНОВКИ.** У даній науковій роботі був проведений розрахунок параметрів шнекового екструдера, таких як:

- розрахунок зон шнеку (завдяки даному розрахунку стало відомо розміри трьох зон шнеку (живлення, пластифікації, дозування));
- крок гвинтової нарізки (було обране таке значення кроку, що відповідає значенню діаметра шнеку, бо за таких умов одночасно надається хороше харчування екструдера матеріалом і знижує вартість виробництва шнека);
- глибина гвинтових каналів шнека (дані параметри були розраховані за формулами, завдяки яким були отримані значення глибини кожного з трьох каналів шнека);
- товщина витка (значення товщини витка було обране максимальне для даного розміру шнеку, бо за таким значенням не буде значно підвищуватись витрата потужності та не буде утворюватись значний потік витіку пластику через зазор між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та зовнішньою поверхнею витка шнека);
- радіальний зазор (значення радіального зазору було обране максимальне, щоб не допустити витіку пластмасового матеріалу через зазор між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та зовнішньою поверхнею витка шнека).

Проведено розрахунок лінійної продуктивності шнекового екструдера, що становила 154мм/сек для сопла діаметром 1мм та 1867,2мм/сек для сопла 5мм, що перевищує заплановане значення швидкості друку, яку було прийнято 50мм/сек.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Kokini J. L. (2020), the effect of processing history on chemical changes in single-screw and twin screw extruders. Trends in Food Science and Technology, 4 (10), 324-329.
- [2] Tadmor, Z. and Klein, I., "Engineering Principles of Plasticating Extrusion," Van Nostrand Reinhold Co., New York (2020).
- [3] Chung, C. I. and Barr, R. A., "Energy Efficient Extruder Screw," U. S. Patent 4, 405, 239 (2019).

**Науковий керівник:** Разумов-Фризиук Євгеній Анатолійович, доц. каф. КІТАР Харківського Національного Університету Радіоелектроніки

