

ПОЛІЩУК Андрій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>e-mail: andrepol215@gmail.com

ПОЛІЩУК Олег

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6623-2523>e-mail: opolishchuk71@gmail.com

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОЄКТУВАННЯ ШНЕКА ЕКСТРУДЕРА 3D-ПРИНТЕРА

В статті здійснено розробку методу проєктування шнека екструдера 3D-принтера. Описано ключові аспекти, які необхідно застосовувати при проєктуванні. Наведено основні механічні властивості, які слід враховувати при розробці гвинтового елемента екструдера. Розглянуто різні конструкції шнеків, їх переваги та недоліки. Вибрано одношнековий екструдер для 3D-принтера, що використовує гранули, подрібнені відходи полімерних матеріалів в якості вихідної сировини. Запропоновано використати трьохзонний циліндричний однозахідний шнек із постійним кроком та без зони дегазации шнек для переробки гранул чи подрібнених часток полімеру. Рекомендовано для шнекових екструдерів для яких не потрібен високий тиск дозування розплавленого полімерного матеріалу та які переробляють не пористі однорідні полімерні матеріали однозонні шнеки з постійним кроком і глибиною гвинтової нарізки. Запропоновано їх використання при переробці нарізаних стрічок з відходів пластику. Визначено основні геометричні параметри шнека з постійним кроком та змінною глибиною гвинтового каналу для проєктування. Здійснено вибір діаметра для екструдера 3D-принтера. Наведено залежності для визначення довжини шнека, кроку гвинтової нарізки, ширини гребеня витка, кута підйому гвинтової лінії нарізки шнека, глибини гвинтового каналу шнека. Наведено залежності для визначення меж зон живлення, пластифікації, дозування. Визначено ступінь стиснення шнека для основних полімерних матеріалів, що використовуються при 3D-друку. Наведено геометрію шнеків в залежності від ступеня стиснення для різних матеріалів. Представлено формулу для визначення об'ємної продуктивності екструдера 3D-принтера в залежності від конструкції зони дозування та опору сопла. Наведено формули для визначення постійної прямого потоку, постійної зворотного потоку і постійної потоку матеріалу, що витікає та залежності коефіцієнтів, що характеризують конструкцію шнека зі змінною глибиною нарізки. Описано геометричні параметри шнеків з постійним кроком і глибиною гвинтової нарізки та вирази для їх визначення.

Ключові слова: полімерний матеріал, 3D-друк, 3D-принтер, екструдер, шнек, діаметр шнека, довжина шнека, ступінь стиснення.

POLISHCHUK Andrii, POLISHCHUK Oleh

Khmelnitskyi National University

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF DESIGNING THE MICRO SCREW EXTRUDER OF A 3D PRINTER

The article deals with the development of a design method for a 3D printer extruder screw. The key aspects that must be applied during design are described. The main mechanical properties that should be taken into account when designing the screw element of the extruder are given. Various designs of screws, their advantages and disadvantages are considered. A single-screw extruder was selected for a 3D printer, which uses granules, crushed waste polymer materials as raw materials. It is proposed to use a three-zone cylindrical one-way screw with a constant pitch and without a degassing zone of the screw for processing granules or crushed polymer particles. Recommended for screw extruders that do not require high dosing pressure of molten polymer material and that process non-porous homogeneous polymer materials, single-zone screws with a constant pitch and depth of screw cutting. Their use in the processing of cut strips from plastic waste is proposed. The main geometric parameters of the screw with a constant pitch and a variable depth of the screw channel were determined for designing. The diameter for the 3D printer extruder has been selected. Dependencies are given for determining the length of the screw, the pitch of the screw thread, the width of the crest of the turn, the angle of elevation of the screw line of the screw thread, and the depth of the screw channel of the screw. Dependencies are given for determining the boundaries of feeding, plasticizing, and dosing zones. The degree of screw compression was determined for the main polymer materials used in 3D printing. The geometry of screws depending on the degree of compression for different materials is given. A formula is presented for determining the volume performance of a 3D printer extruder depending on the design of the dosing zone and nozzle resistance. The formulas for determining the forward flow constant, the reverse flow constant and the flow constant of the flowing material and the dependence of the coefficients characterizing the design of the auger with a variable cutting depth are presented. The geometric parameters of screws with a constant pitch and depth of screw cutting and expressions for their determination are described.

Keywords: polymer material, 3D printing, 3D printer, extruder, screw, screw diameter, screw length, degree of compression.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Розробка новітнього обладнання, яке могло б конкурувати на ринку виробництва полімерних виробів для широкого спектру промислових застосувань та побутових потреб, стоїть як значуще завдання для економіки України. Збільшення об'ємів виробництва та обробки полімерних матеріалів вимагає оптимізації виробничих процесів та інтеграції технологій, що зберігають ресурси. Екструзія, яка є безперервним процесом, де тверді полімери перетворюються на в'язкісний стан та далі витісняються через

формоутворювальний інструмент, визнається як передова технологія для виготовлення пластикових виробів [1, 2].

Цей процес включає послідовне плавлення термопластичного матеріалу, що є ключовою частиною виробництва широкого спектру полімерних виробів. Екструдер, основним робочим елементом якого є шнек, здійснює цілий ряд операцій: подачу матеріалу, його стиснення, плавлення, змішування, створення тиску та дозування розплаву [3].

Хоча екструдери мають багато переваг, вони також мають недоліки, такі як обмежені технологічні можливості, велику витрату металу при виготовленні, недостатню довговічність і надійність. В результаті, виникає необхідність у подальшому вдосконаленні конструкцій екструдерів для покращення їх експлуатаційних характеристик, продуктивності, функціональності та безпеки виробничого персоналу [4].

Шнекові екструдери знаходять застосування в різних галузях індустрії, але машини, налаштовані на обробку конкретного виду матеріалів, часто показують низьку ефективність при обробці інших матеріалів. Така ситуація вимагає індивідуального підходу до підбору геометричних параметрів силових шнеків і формувальних головок, а також визначення оптимальних умов обробки.

У контексті сталого розвитку акцент робиться на створенні енергоефективного обладнання та новітніх технологічних рішень [3]. Зокрема, адитивні технології, які стрімко розвиваються у світі, сприяють зростанню попиту на інноваційні рішення. Екструзія, яка традиційно вважається надійною та простою в застосуванні, тепер знаходить застосування в FDM-друку. Але відсутність точних розрахункових методик ускладнює проектування екструдерів 3D-принтерів із оптимальними параметрами. Таким чином, розробка ресурсоенергоефективного процесу екструзії термопластів та відповідних методів розрахунку є актуальним завданням. Правильний розрахунок шнеку впливає на стабільність тиску, продуктивність, ефективність використання енергії та сировини, роблячи оптимізацію його геометричних параметрів актуальною задачею.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень є процеси, що протікають під час виготовлення полімерних виробів з використанням 3D-принтерів з екструдерами, що використовують гранули, подрібнені відходи чи нарізані стрічки полімерних матеріалів в якості вихідної сировини. При вирішенні поставлених задач використано метод системного аналізу. Теоретичні дослідження базуються на основних положеннях екструзії полімерів.

Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання створення нових технологій швидкого виробництва продукції, завданням досліджень є розробка методу проектування деталей екструдера 3D-принтера для виготовлення готових виробів з полімерних матеріалів.

Результати та їх обговорення

При проектуванні робочих елементів шнекового екструдера для 3D-друку ключовими аспектами, які необхідно враховувати, є [4]: функціональне призначення пристрою; можливість використання в різноманітних моделях принтерів від різних виробників; властивості полімерів для обробки; дотримання технологічних вимог, таких як підтримання температури і тиску; експлуатаційні характеристики; зручність у обслуговуванні; вимоги до розмірів та ваги вузла; врахування естетичних та ергономічних факторів; особливості технологічного процесу та матеріалів, які використовуються для створення шнекових елементів; застосування стандартизованих компонентів і зниження їхньої кількості у конструкції; оптимізація вартості виробництва екструдера; високий рівень якості компонентів; забезпечення довговічності та надійності у використанні; дотримання норм безпеки під час експлуатації.

Основні механічні властивості, які слід враховувати при розробці гвинтового елемента екструдера, включають стійкість до корозії та зношування, витривалість при крутному та вигинному навантаженні, еластичність та довговічність.

Розробка робочих частин шнекового екструдера здійснюється відповідно до вимог Державних стандартів України, які включають, згідно з [4], такі стандарти: ДСТУ 3973:2000 [5], ДСТУ 3278:95 [6], ДСТУ 3974:2000 [7], ДСТУ ГОСТ 2.001:2006 [8], ДСТУ ГОСТ 2.601:2006 [9].

При виборі конструкції шнека для екструдера 3D-принтера враховуються кілька ключових аспектів. Шнек є центральним компонентом екструдера і відіграє важливу роль у визначенні якості кінцевого продукту, його продуктивності та загальної ефективності екструзійного процесу [10].

Екструдер перетворює пластичну сировину в розплавлену форму, головним чином за рахунок тертя, яке генерує тепло, та додаткової подачі тепла ззовні. Конструкція шнека має значний вплив на цей процес перетворення механічної енергії на теплову. Щоб оптимізувати процес плавлення для досягнення найкращої продуктивності, потрібно максимізувати тертя в межах екструдера, одночасно уважно контролюючи механічні навантаження і температурні показники, щоб уникнути надмірного зносу компонентів системи [11].

Ключові вимоги до розробки шнекових екструдерів включають забезпечення ефективного переміщення твердої полімерної сировини, такої як гранули, подрібнені частки або порошок, їх наступну пластифікацію, гомогенізацію, а також подачу розплавленого полімеру через екструзійну головку.

Різноманіття конструкцій шнеків включає моделі з різними перевагами і недоліками. Так, не всі конструкції, що використовуються в промислових екструдерах, підходять для 3D-принтерів, оскільки останні мають свої специфічні вимоги [12].

Найпоширенішими у використанні є одношнекові екструдери, оскільки вони характеризуються простою конструкцією, доступністю, міцністю, надійністю та вигідним співвідношенням продуктивності до вартості [13]. Саме такі екструдери часто розробляються для використання в 3D-принтерах, які працюють з використанням гранул або подрібнених часток полімерів.

Тризонні шнеки (рис.1, 2, а) стали стандартом у багатьох застосуваннях переробки полімерів, оскільки вони ефективно працюють із широким спектром пластиків, менш чутливі до змін у матеріалі, що переробляється, і забезпечують стабільність процесу плавлення [11, 13, 14].

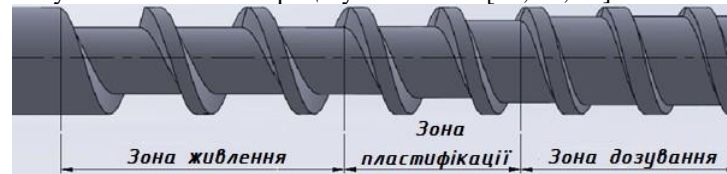


Рис. 1. Геометрія шнека одношнекового екструдера

Фази перетворення матеріалу всередині шнека номінально відповідають геометричним сегментам шнека за глибиною канавки, але їхні фактичні межі не співпадають. У зоні подачі шнек захоплює гранули термопласту, що взаємодіють з більш прохолодними частинами шнека порівняно з нагрітою стінкою циліндра. Висока температура стінки та низька теплопровідність спричиняють передчасне плавлення матеріалу, знижуючи тертя. Проковзування матеріалу уздовж стінок супроводжується його ущільненням та формуванням твердої «пробки», на поверхні якої біля стінки формується розплавлений шар. Місце, де товщина розплавленого шару зрівнюється з зазором між стінкою і краєм шнека, визначає межу між зонами подачі та пластифікації.

У зоні пластифікації «пробка» плавиться за рахунок тепла, що генерується внутрішнім тертям матеріалу та зовнішнім теплом від нагрівача на корпусі. Тонкий розплавлений шар створює потік, який натискається на стінку каналу шнека і рухається уздовж неї, витісняючи «пробку» до передньої стінки, при цьому висота «пробки» залишається майже незмінною, але її ширина зменшується. Точка, де «пробка» починає розпадатися, визначає границю між зонами пластифікації та видавлювання. Розплав, що рухається по шнеку, набуває спіральної траєкторії, яка є сумою лінійного потоку вздовж осі шнека та циркуляційного потоку перпендикулярно до осі. Циркуляційний потік сприяє однорідності розплаву, тому екструдери також застосовуються для змішування компонентів.

Графік приведений на рис.2, а, показує зміну градієнта тиску, спричиненого наявністю сопла, що протидіє потоку розплавленого полімеру, який створюється шнеком. Існує чітка зона стиснення $L_{з.ст.}$, де тиск швидко зростає вздовж гвинта. Загальний тиск вздовж шнека дорівнює сумі тисків різних зон [12]:

$$P_{з.т.} = \Delta p_{з.ж.} + \Delta p_{з.ст.} + \Delta p_{з.д.} \quad (1)$$

де $\Delta p_{з.ж.}$ - тиск в зоні живлення; $\Delta p_{з.ст.}$ - тиск в зоні стискання; $\Delta p_{з.д.}$ - тиск в зоні дозування.

Однією з проблематичних характеристик трьохзонних шнеків є необхідність забезпечення значного обертового моменту, який необхідний від приводного двигуна для створення потрібного тиску та подолання опору тертя, що виникає при транспортуванні матеріалу. Додатково, у випадку екструдерів, що використовуються у 3D-друку, часті запуски та зупинки пристрою можуть спричинити збільшене навантаження на механізм приводу.

Під час обробки полімерів за допомогою екструзії із застосуванням трьохзонного шнека, висока температура, що генерується через стиснення полімеру, може негативно впливати на процес пластифікації матеріалу. Одним зі способів зниження цього тепловиділення є використання шнека без стиснення, де глибина каналу та крок шнека залишаються незмінними на всьому протязі [14]. Така конструкція шнека, що забезпечує сталу глибину нарізки, є ефективною для транспортування полімеру до зони нагріву та подальшого видавлювання розплавленого полімеру через формуюче сопло екструдера, знижуючи при цьому необхідний обертовий момент і, відповідно, навантаження на двигун [15]. Зниження обертового моменту дозволяє використовувати менш потужний електродвигун. Однак, такі шнеки можуть бути неефективними для обробки деяких видів полімерів [12].

Зменшення тиску в екструдері можна добитися, видаливши зони стискання та дозування. Таким чином весь шнек стає однією довгою зоною подачі (рис.2, б). Тоді

$$\Delta p_{з.ж.} = \frac{dp}{dz} \cdot L_{шн.} \quad (2)$$

де $L_{шн.}$ - довжина робочої частини шнека; $\frac{dp}{dz}$ - градієнт тиску по довжині шнеку.

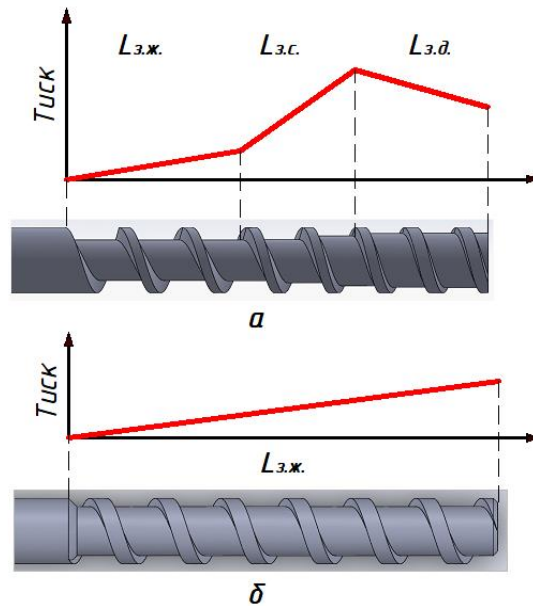


Рис. 2. Порівняння двох конструкцій гвинта екструдера: а - звичайний трьохсекційний шнек з його профілем тиску; б - шнекове свердло з його профілем тиску

Використання запропонованого типу шнека призведе до зниження тиску всередині екструдера. Згідно з представленим графіком, рівень тиску відчутно корелює з довжиною шнека. Таким чином, будь-яке збільшення довжини робочої частини шнека понад мінімально необхідну довжину може забезпечити тиск, який потрібен для екструзії в 3D-друку. Якщо ж тиск виявляється недостатнім для видавлювання розплавленого полімеру через сопло, можливе вирішення полягає у збільшенні подачі полімерного грануляту. Це спричинить збільшення ефективної довжини зони живлення шнека, що, у свою чергу, підвищить тиск, і розплавлений полімер почне видавлюватися через сопло.

Під час створення шнекового екструдера для 3D-принтера необхідно враховувати два ключових аспекти:

- максимально зменшити масу та габаритні параметри екструдера, що, в свою чергу, дозволить знизити інерцію каретки екструдера та сприятиме зростанню швидкості друку, а також допоможе зменшити вартість координатної системи 3D-принтера за рахунок зниження вимог до її жорсткості;
- забезпечення необхідної лінійної продуктивності екструдера, яка повинна бути вищою за максимальну швидкість переміщення каретки під час друку [16].

Для екструдера, що проектується було обрано циліндричний однозахідний шнек із постійним кроком та без зони дегазації. Такі шнеки відомі своєю високою продуктивністю та відносною простотою у виробництві.

Для полімерів, що будуть оброблятися у вигляді гранул або подрібнених часток, розробляється шнек із змінною глибиною гвинтового каналу. Така конструкція шнека з постійним кроком та змінною глибиною нарізки представлена на рис. 3.

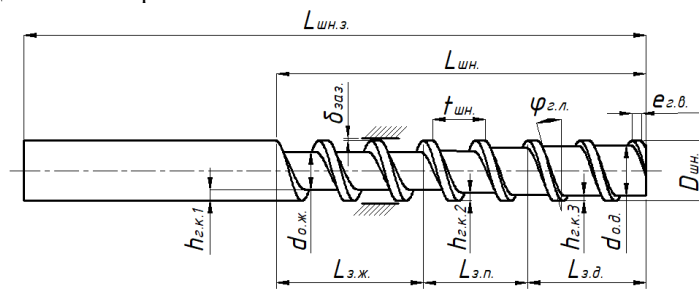


Рис. 3. Шнек з постійним кроком та змінною глибиною гвинтового каналу

Основні геометричні параметри шнека з постійним кроком та змінною глибиною гвинтового каналу: діаметр $D_{шн}$; загальна довжина $L_{шн.з}$; довжина робочої частини $L_{шн.}$; крок гвинтової нарізки $t_{шн.}$; глибина гвинтового каналу по зонах (глибина нарізки) $h_{г.к.}$; ширина гребеня витка $e_{г.в.}$; величина зазору між гребенем шнека та внутрішньою стінкою матеріального циліндра $\delta_{зав.}$; кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека $\varphi_{г.л.}$; кількість зон $n_{зон}$; довжина зони живлення $L_{з.ж.}$; довжина зони пластифікації $L_{з.п.}$; довжина зони дозування $L_{з.д.}$; число заходів нарізки шнека $\lambda_{зах.}$ (найчастіше $\lambda_{зах.} = 1$) [16-19].

Для полімерів, що будуть перероблятися у вигляді стрічки полімерного матеріалу розробляється шнек з постійним кроком та постійною глибиною гвинтового каналу (із постійною глибиною нарізки). Конструкція шнека представлена на рис. 4.

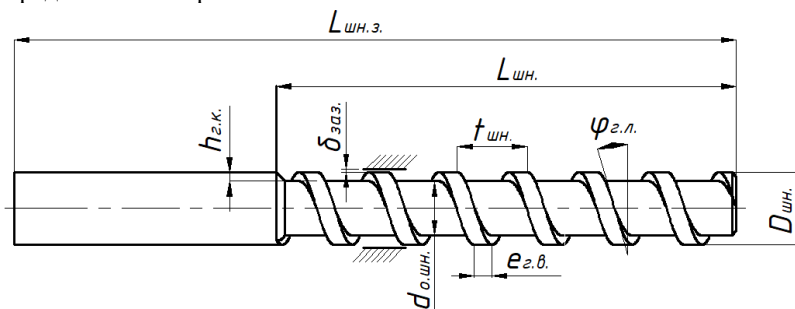


Рис. 4. Шнек з постійним кроком та постійною глибиною гвинтового каналу

Основні геометричні параметри шнека з постійним кроком та змінною глибиною гвинтового каналу: діаметр $D_{шн}$; загальна довжина $L_{шн.з}$; довжина робочої частини $L_{шн}$; крок гвинтової нарізки $t_{шн}$; глибина гвинтового каналу (глибина нарізки) $h_{г.к.}$; ширина гребеня витка $e_{г.в.}$; величина зазору між гребенем шнека та внутрішньою стінкою матеріального циліндра $\delta_{заз.}$; кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека $\varphi_{г.л.}$; число заходів нарізки шнека $\lambda_{зах.}$ (найчастіше $\lambda_{зах.} = 1$) [16-18].

Використання таких шнеків (рис.3, 4) приведе до зменшення масогабаритних характеристик, що, в свою чергу, відіб'ється на вартості виготовлення екструдера.

Вибір діаметра шнека.

Діаметр шнека $D_{шн}$ відіграє ключову роль у визначенні продуктивності екструдера. Існує пряма залежність між діаметром шнека та продуктивністю екструдера $Q_{ек.}$: з підвищенням діаметра шнека зростає і продуктивність устаткування [16].

Стандартизовані діаметри шнеків для вітчизняних екструдерів включають розмірний ряд: 20, 32, 45, 63, 90, 125, 160, 200, 320, 450, 630 мм, як зазначено у [20]. Загальноприйняті діаметри для низькошвидкісних одношнекових промислових екструдерів Європейського виробництва охоплюють 32, 45, 63, 125, 160, 200 мм, відповідаючи класичному Європейському стандарту. Азійські екструдери характеризуються різноманітністю діаметрів, зокрема 25, 30, 40, 50, 65, 75, 80, 90, 100, 120, 135, 150 мм [21].

Згідно Європейської класифікації, екструдери з діаметром шнека менше 32 мм вважаються лабораторними або експериментальними. Для високошвидкісних одношнекових екструдерів з прямим приводом, які широко використовуються, типові діаметри становлять 20, 30, 45, 60, 70, 72, 90, 100, 130 мм.

Довжина шнека $L_{шн.}$ характеризується її відношенням до діаметра шнека $D_{шн}$ ($L_{шн.} / D_{шн.}$). Це співвідношення може змінюватися в широкому інтервалі від 8 до 40 [14, 22, 23]. Значення $D_{шн}$ та $L_{шн.} / D_{шн.}$ є основними характеристиками одношнекового екструдера та вказуються у його марці.

На сьогодні в Україні та світі відсутнє промислове виготовлення шнеків для екструдерів, які можна використати в 3D-принтерах. Ті, що спроектовані та виготовлені, використовуються в експериментальних зразках екструдерів 3D-принтерів для різних галузей [15, 24, 25].

Завдання розробки та створення компактних шнеків для 3D-принтерів, що мають відносно невелику масу і габаритні розміри, є дуже актуальним. Такі шнеки можуть сприяти підвищенню швидкості переміщення каретки екструдера під час друку, знизити її інерційність та зменшити навантаження на крокові двигуни, відповідальні за переміщення по осях X і Y.

В якості вихідного параметру для розрахунку геометрії шнека задається або розраховується його діаметр $D_{шн.}$

Лінійна продуктивність шнекового екструдера 3D-принтера визначається кількістю розплавленого полімеру видавленого через сопло за одну секунду та залежатиме від його діаметра.

Лінійну продуктивність шнекового екструдера $Q_{л.пр.}$ можна визначити за наступною формулою [16]:

$$Q_{л.пр.} = \frac{Q_{о.пр.}}{S_c} \quad (3)$$

де $Q_{о.пр.}$ - об'ємна продуктивність екструдера, $\text{см}^3/\text{хв}$;

S_c - площа поперечного перерізу сопла, см^2 .

Оскільки шнековий екструдер буде інтегровано у 3D-принтер, призначений для друку полімерною ниткою, ключовим параметром для розрахунків стає максимальна швидкість екструзії (або швидкість друку) $v_{ек.}$ [26]. Важливо, щоб лінійна продуктивність екструдера перевищувала цю максимальну швидкість друку, яка вказана у технічних специфікаціях 3D-принтера.

Об'ємна продуктивність принтера розраховується за формулою, $\text{мм}^3/\text{с}$:

$$Q_{o.np.} = v_{ек.} \cdot S_c \quad (4)$$

де S_c - площа поперечного перерізу сопла, мм^2 .

Площа поперечного перерізу сопла визначається за формулою, мм^2 :

$$S_c = \frac{\pi d_c^2}{4} \quad (5)$$

Підставивши рівняння (3) в (4) отримаємо, $\text{мм}^3/\text{с}$:

$$Q_{o.np.} = v_{ек.} \cdot \frac{\pi d_c^2}{4} \quad (6)$$

З іншої сторони продуктивність екструзійної машини можна розрахувати із залежності, $\text{мм}^3/\text{с}$ [4]:

$$Q_{e.m.} = 0,68 D_{шн.}^{2.5} \quad (7)$$

Прирівнявши ліві сторони рівнянь (6) і (7) та зробивши необхідні перетворення було визначено діаметр шнека екструдера $D_{шн.}$ 3D-принтера:

$$D_{шн.} = \sqrt[2.5]{\frac{v_{ек.} \cdot \pi \cdot d_c^2}{0,68 \cdot 4}} \quad (8)$$

Визначення довжини шнека.

Довжина шнека $L_{шн.}$ є не менш важливою характеристикою, ніж діаметр $D_{шн.}$. Вона кратна діаметру. Від довжини шнека насамперед залежить ефективність змішування полімеру, пластикації та гомогенізації. Чим довшим є шнек екструдера, тим змішувальний ефект є кращим. З негативної сторони у занадто довгому шнеку зростає ймовірність його вигину під дією радіальних та поздовжніх навантажень. А це, в свою чергу, може призвести до його поломки.

Від марки полімерного матеріалу, що піддається екструзії залежить довжина шнека [27-31]. Вона може змінюється в межах $(15...40) \cdot D_{шн.}$. Від довжини шнека також буде залежати потужність електричного приводу екструдера. Зі збільшенням довжини вона практично лінійно буде зростати.

В технічній літературі відсутня інформація стосовно співвідношення $L_{шн.} / D_{шн.}$ для мікро екструдерів, що можуть використовуватися в 3D-принтерах. Виходячи з конструктивних міркувань та аналізу інформації щодо застосування шнеків в різних типах машин для литва під тиском та екструзії було визначено, що дане співвідношення може лежати в межах $L_{шн.} / D_{шн.} = 8...15$.

Визначення загальної довжини шнека $L_{шн.з.}$.

Загальна довжина шнека визначається із формули:

$$L_{шн.з.} = L_{шн.} + L_{шн.кр.}, \quad (9)$$

де $L_{шн.кр.}$ - довжина шнека для закріплення в муфті.

Визначення кроку гвинтової нарізки.

Крок гвинтової нарізки $t_{г.н.}$ має значний вплив на ефективність роботи екструдера. Цей параметр залежить від коефіцієнта тертя між матеріалом та шнеком, а також від стінок матеріального циліндра, а також від типу матеріалу, що переробляється.

Крок гвинтової нарізки $t_{г.н.}$ для вибраного типу шнека є постійним по його довжині. Для шнеків зі змінною глибиною нарізки, він вибирається в межах [16]:

$$t_{г.н.} = (0,7...1) \cdot D_{шн.} \quad (10)$$

Ширина гребеня витка.

Збільшення ширини гребеня $e_{г.в.}$ шнека може спричинити зростання споживаної потужності. Натомість, якщо ширина гребеня буде недостатньою, це може спровокувати витік розплавленого полімеру через зазор між зовнішньою частиною спіралі шнека та внутрішньою поверхнею циліндра. Таким чином, при визначенні оптимальної товщини гребеня ці аспекти необхідно враховувати [16]. Рекомендується приймати ширину гребеня витка рівною:

$$e_{г.в.} = (0,06...0,15) \cdot D_{шн.} \quad (11)$$

Зазвичай, для шнеків з діаметром понад 125 мм вибирають менші значення ширини гребеня, тоді як для шнеків діаметром менше 125 мм - більші. У розроблюваному екструдері планується використання короткого шнека, де збільшення ширини гребеня не буде значно впливати на зростання витрат потужності, а також не призведе до проблем з екструзією полімерного матеріалу через зазор між шнеком та матеріальним циліндром. Таким чином, для розрахунків рекомендується вибір максимально допустимого значення ширини гребеня у діапазоні 0,06...0,15.

При роботі екструдера критично важливим є підтримання оптимального радіального зазору між гребенями нарізки шнека та внутрішньою поверхнею матеріального циліндра, а також дотримання заданого допуску. Збільшення цього зазору може призвести до зниження продуктивності, збільшення витрат на виробництво та погіршення якості продукції [32]. Зменшення зазору, навпаки, сприяє зниженню витоку полімеру та підвищенню якості друку на 3D-принтері [16].

Якщо в шнеку формується тверда «пробка» з полімерних частинок, витік матеріалу через зазор між нарізкою та циліндром є мінімальним. Типово, цей зазор менший за розмір часток полімеру, тому навіть при недостатньо щільній упаковці частинок, радіальний зазор не має вирішального значення для транспортування твердого матеріалу [23].

Таким чином, радіальний зазор між зовнішньою поверхнею гребенів нарізки шнека та внутрішньою поверхнею матеріального циліндра екструдера рекомендується вибирати відповідно до рекомендацій, наведених у технічній літературі [16, 33]:

$$\delta_{\text{з.з.}} = (0,02...0,005)D_{\text{шн.}} \quad (12)$$

Кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека.

Для «дрібних» каналів (характерних для шнекових екструдерів 3D-принтерів), в розрахунках приймають кут підйому по зовнішньому діаметру шнека. Тоді кут підйому пов'язаний з кроком і діаметром залежністю [34]:

$$\varphi_{\text{з.л.}} = \arctg \frac{t_{\text{шн.}}}{\pi \cdot D_{\text{шн.}}} \quad (13)$$

Глибина гвинтового каналу шнека.

Конструкція гвинтового каналу, що формується між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та спіралями шнекового валу, є ключовою для процесу переробки полімерів, впливаючи на такі параметри, як подача матеріалу та тиск у системі. Точне знання цих геометричних характеристик та їх розумний вибір є необхідними при проектуванні екструдерів і розрахунку їх елементів [34].

Глибина гвинтового каналу $h_{\text{з.к.}}$ шнека варіюється залежно від типу оброблюваного полімеру та діаметра шнека $D_{\text{шн.}}$. Глибша нарізка використовується для переробки м'яких полімерів при низькому тиску. Шнеки із меншою глибиною нарізки забезпечують краще змішування, але це може знижувати продуктивність та збільшувати тиск [35]. Важливо знайти оптимальну глибину каналу, яка максимізує швидкість переміщення твердого полімеру [23].

У сучасних одношнекових екструдерах глибина гвинтового каналу в зоні живлення для полімерних матеріалів варіюється в наступних межах [16, 23]:

$$h_{\text{з.к.1}} = (0,12...0,2)D_{\text{шн.}} \quad (14)$$

Глибини гвинтового каналу $h_{\text{з.к.3}}$ шнека у зоні дозування визначається за формулою [16]:

$$h_{\text{з.к.3}} = 0,5 \left[D_{\text{шн.}} - \sqrt{D_{\text{шн.}}^2 - \frac{4h_{\text{з.к.1}}}{i_{\text{см}}} (D_{\text{шн.}} - h_{\text{з.к.1}})} \right] \quad (15)$$

де $i_{\text{см}}$ - ступінь стиснення матеріалу.

Ступінь стиснення (коефіцієнт стиснення) – це відношення об'єму витка зони живлення шнека у завантажувального отвору до об'єму витка зони завантаження біля сопла [36].

З іншої сторони ступінь стиснення можна виразити співвідношенням між двома глибинами, глибиною каналу живлення та глибиною каналу дозування [37]:

$$i_{\text{см}} = \frac{h_{\text{з.к.1}}}{h_{\text{з.к.3}}} \quad (16)$$

Ступінь стиснення трьохзонного шнека можна вважати основним параметром при переробці різних полімерних матеріалів з різними в'язкопружними властивостями. Це співвідношення зазвичай становить від 1,5:1 до 4,5:1. Деякі полімери краще переробляються шнеками зі ступенем стиснення 2,5:1, тоді як інші - шнеками зі ступенем стиснення 4:1. В екструдерах часто використовуються так звані шнеки загального призначення (GP) із співвідношенням приблизно 2,5-3:1, які підходять для переробки більш широкого діапазону матеріалів.

Проаналізувавши технічну літературу [27-31, 38, 39] було визначено ступінь стиснення шнека для основних полімерних матеріалів, що використовуються при 3D-друку (табл.1).

Ступінь стиснення шнека екструдера

№ з/п	Матеріал	Ступінь стиснення
1	Полілактид PLA [27, 37, 38]	2,5-3,0:1
2	Акрилонітрил-бутадієн-стирол ABS [28, 39]	2,75:1
3	Термопластичний поліуретановий еластомер TPU [29]	2,0-3,0:1
4	Термопластичний еластомер TPE* [30, 31]	2,0-3,5:1
5	Полівінілхлорид PVC [31]	1,75-2,5:1
6	Полістирол PS [31]	3,0-3,5:1
7	Поліпропілен PP [31]	3,0-4,0:1
8	Поліетилен PE [31, 40]	2,0-4,0:1
9	Полікарбонат PC [31]	2,25:1
10	Поліамід PA [31]	3,0-4,0:1

* - для спеціальних шнеків з короткими ділянками, що працюють на малих швидкостях коефіцієнт стиснення може складати 3,0-4,0:1 [31].

Геометрію шнеків в залежності від ступеня стиснення для різних матеріалів (табл.1) було розбито на 3 групи (рис.4) [41, 42].

Глибина гвинтового каналу в зоні пластифікації визначається із формули:

$$h_{2.к.2} = h_{2.к.1} - \frac{h_{2.к.1} - h_{2.к.3}}{L_{шн.0}} L_{шн.0} \quad (17)$$

де $L_{шн.0}$ - довжина шнеку до початку етапу стиснення матеріалу, мм.

Найкращий варіант коли довжина конструктивної зони стиснення співпадає з зоною пластифікації шнека [ж].

В свою чергу довжина шнеку до початку етапу стиснення матеріалу $L_{шн.0}$ визначається із виразу [16]:

$$L_{шн.0} = L_{шн.} - L_{н.ч.}, \quad (18)$$

де $L_{н.ч.}$ - довжина напірної частини шнека, мм.

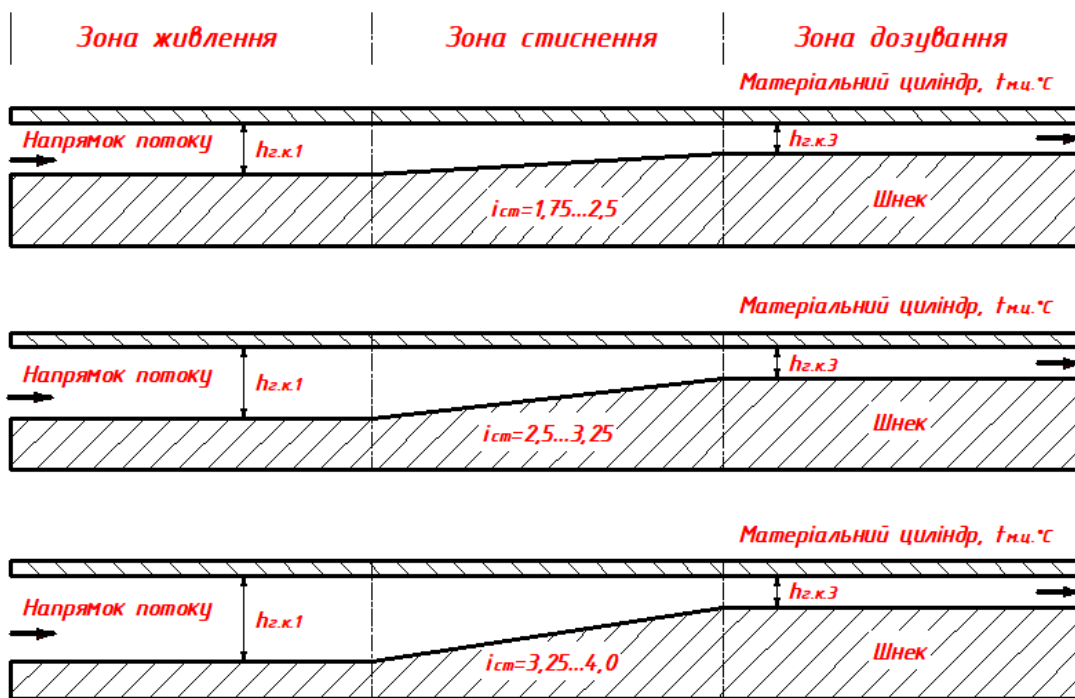


Рис. 4. Геометрії шнеків з різним ступенем стиснення

Напірна частина шнеку представляє собою зону, що повністю заповнена по його перерізу полімером (матеріал знаходиться в розплавленому стані) та визначається із залежності:

$$L_{н.ч.} = (0,4...0,5) \cdot L_{шн.} \quad (19)$$

У роботі [43] розглядаються шнеки для переробки полімерних матеріалів, що класифіковані на основі їхніх властивостей на три основні категорії:

- шнеки для полімерів з великим діапазоном температур пластифікації. Ці шнеки характеризуються трохи довшою зоною завантаження в порівнянні з зонами стиснення та дозування. Довжини зон стиснення

та дозування зазвичай мають бути приблизно однаковими. Це може бути важко досягти при різних режимах екструзії, особливо з огляду на те, що довжина зони дозування сильно залежить від технологічних режимів переробки конкретних полімерів. Шнеки цього типу повинні забезпечувати ступінь стиснення матеріалу в межах $i_{cm}=2,0-3,5$;

- шнеки для матеріалів з великим діапазоном температур пластифікації та низькою термостабільністю. Довжина зони завантаження аналогічна попередній групі, але зона стиснення трохи більша. Зона дозування зазвичай відсутня. Рекомендований ступінь стиснення матеріалу складає $i_{cm}=1,5-2$;

- шнеки для висококристалічних матеріалів. Вони мають збільшену зону завантаження порівняно з шнеками першої групи, зменшену зону стиснення та подібну зону дозування. Характеризуються максимальним ступенем стиснення матеріалу i_{cm} від 3 до 4,5.

Оскільки більшість полімерів, використовуваних у 3D-друку (таких як PLA, ABS, PS, PC), мають широкий температурний інтервал пластифікації, а кристалічні полімери (PLA, PA, PE, PP) не вважаються висококристалічними, для екструдера 3D-принтера було обрано конструкцію шнека першої групи [44].

Згідно з роботами [16, 40, 43], довжина зон екструдера визначається в залежності від діаметра екструдера $D_{ин}$ або кроку гвинтової нарізки $t_{ин}$. шнека та знаходиться в певних межах, залежно від типів полімерів, які підлягають екструзії. В інших дослідженнях [29, 45] довжини зон шнека визначаються як відсоток від його загальної (робочої) довжини $L_{ин}$.

Виходячи з цього аналізу, при проектуванні мікро шнека екструдера для 3D-принтера, який працює з гранулами або подрібненими частками полімеру, було вирішено визначати довжини зон шнека у відсотках від його загальної (робочої) довжини $L_{ин}$.

Проведений аналіз технічної літератури [29, 45] дав змогу визначити межі зон живлення, пластифікації, дозування.

Довжина зони живлення для некристалічних (ABS, PS) та кристалічних (PA, PE, PP) полімерів складає:

$$L_{з.ж.} = (0,48...0,58)L_{ин}. \quad (20)$$

Довжина зони пластифікації для некристалічних пластиків (ABS, PS) становить:

$$L_{з.п.} = (0,25...0,35)L_{ин}. \quad (21)$$

Для кристалічних пластиків (PA, PE, PP):

$$L_{з.п.} = (0,22...0,32)L_{ин}. \quad (22)$$

Для термочутливих пластиків (PVC):

$$L_{з.п.} = (0,28...0,4)L_{ин}. \quad (23)$$

Довжина зони дозування для некристалічних пластиків (ABS, PS) становить:

$$L_{з.д.} = (0,15...0,58)L_{ин}. \quad (24)$$

Для кристалічних пластиків (PA, PE, PP тощо)

$$L_{з.д.} = (0,48...0,58)L_{ин}. \quad (25)$$

Зона дозування шнека відіграє ключову роль у визначенні продуктивності екструзійного обладнання. Ефективність роботи екструдера залежить від точності розрахунків його геометричних параметрів. Продуктивність екструдера впливає не лише на геометрію шнека та його швидкість обертання, але й на конструкцію та розрахунок формуючої головки (сопла).

Для аналізу взаємодії між шнеком, матеріальним циліндром та перероблюваним полімерним матеріалом у зоні дозування часто застосовують гідродинамічний підхід [16]. Він передбачає розгляд трьох основних потоків руху розплавленого полімеру в каналі шнека:

- потік розплавленого полімеру в міжвитковому просторі, що рухається уздовж осі шнека від зони живлення до зони дозування, створюється обертанням шнека відносно матеріального циліндра;

- протитечія розплаву, що виникає через перепади тиску вздовж робочої довжини шнека, рухається у зворотному напрямку;

- потік матеріалу, що витікає через зазор між зовнішньою поверхнею витків шнека та внутрішньою поверхнею циліндра, направлений від зони дозування.

У контексті екструдера 3D-принтера, можна припустити, що протитечія матеріалу є майже відсутньою через невеликі розміри робочих частин і дуже малі зазори між ними, і цим можна знехтувати при подальших розрахунках. Подача розплавленого полімеру з зони дозування на робочу платформу 3D-принтера буде залежати лише від опору, який створює формуюча головка (сопло) [46, 47].

Об'ємна продуктивність екструдера 3D-принтера в залежності від конструкції зони дозування та опору сопла може бути визначена за наступною формулою:

$$Q_{o.n.e.} = \frac{A_{n.n.} \cdot K_{o.c.}}{K_{o.c.} + B_{з.п.} + C_{в.п.}} \cdot n_{ш.}, \quad (26)$$

де $Q_{o.n.e.}$ - об'ємна продуктивність екструдера, $\text{см}^3/\text{хв}$;

- $A_{н.п.}$ - постійна прямого потоку, см³;
- $K_{о.с.}$ - коефіцієнт опору сопла екструдера, см³;
- $n_{ш.}$ - частота обертання шнека, хв⁻¹;
- $B_{з.п.}$ - постійна зворотного потоку, см³;
- $C_{в.п.}$ - постійна потоку матеріалу, що витікає, см³.

Значення постійної прямого потоку $A_{н.п.}$ визначається із формули:

$$A_{н.п.} = \frac{\pi^3 \cdot (t_{ш.} - \lambda_{зак.} \cdot e_{з.в.}) \cdot \sigma_{з.н.}}{a_{з.н.} + t_{ш.}^2 \cdot b_{з.н.}} \quad (27)$$

де $\sigma_{з.н.}$, $a_{з.н.}$, $b_{з.н.}$ – коефіцієнти, що характеризують конструкцію шнека зі змінною глибиною нарізки.

Значення постійної зворотного потоку $B_{з.п.}$ визначається із формули:

$$B_{з.п.} = \frac{\pi \cdot t_{ш.} \cdot (t_{ш.} - \lambda_{зак.} \cdot e_{з.в.})}{12 \cdot L_{н.ч.} \cdot (a_{з.н.} + t_{ш.}^2 \cdot b_{з.н.})} \quad (28)$$

Значення постійної потоку матеріалу, що витікає $C_{в.п.}$ знаходиться із формули:

$$C_{в.п.} = \frac{\pi \cdot D_{ш.} \cdot \delta_{зак.}^3 \cdot t_{ш.}^2}{10 \cdot e_{з.в.} \cdot L_{н.ч.} \cdot \sqrt{\pi^2 \cdot D_{ш.}^2 + t_{ш.}^2}} \quad (29)$$

Коефіцієнти $\sigma_{з.н.}$, $a_{з.н.}$, $b_{з.н.}$, що характеризують конструкцію шнека зі змінною глибиною нарізки визначаються за наступними формулами:

$$\sigma_{з.н.} = 1 - \frac{6,9 \cdot D_{ш.}}{2 \cdot (h_{з.к.2} - h_{з.к.3})} \cdot \lg \frac{h_{з.к.2}}{h_{з.к.3}} + \frac{D_{ш.}^2}{2 \cdot h_{з.к.2} \cdot h_{з.к.3}}, \quad (30)$$

$$a_{з.н.} = \frac{\pi^2}{h_{з.к.2} \cdot h_{з.к.3}} \cdot \left[\frac{D_{ш.} \cdot (h_{з.к.2} + h_{з.к.3})}{2 \cdot h_{з.к.2} \cdot h_{з.к.3}} - 1 \right], \quad (31)$$

$$b_{з.н.} = \frac{2,3}{(h_{з.к.2} - h_{з.к.3}) \cdot D_{ш.}^3} \cdot \lg \frac{h_{з.к.2} \cdot (D_{ш.} + d_{о.д.})}{h_{з.к.3} \cdot (D_{ш.} + d_{о.ж.})} + \frac{2 \cdot h_{з.к.2} \cdot h_{з.к.3} + 2 \cdot D_{ш.} \cdot (h_{з.к.2} + h_{з.к.3})}{2 \cdot D_{ш.}^2 \cdot h_{з.к.2}^2 \cdot h_{з.к.3}^2}, \quad (32)$$

де $d_{о.ж.}$ – діаметр осердя (валу) шнека в зоні живлення, см.

Діаметр осердя (валу) шнека в зоні живлення визначається із співвідношення:

$$d_{о.ж.} = D_{ш.} - 2 \cdot h_{з.к.1}. \quad (33)$$

Діаметр осердя (валу) шнека в зоні дозування визначається із виразу:

$$d_{о.д.} = D_{ш.} - 2 \cdot h_{з.к.3}. \quad (34)$$

Для того, щоб розрахувати геометричні параметри шнека необхідно отримати значення коефіцієнтів $\sigma_{з.н.}$, $a_{з.н.}$, $b_{з.н.}$.

Підставивши значення коефіцієнтів у формули (27), (28) і (29) розраховуються постійні прямого потоку, зворотного потоку та потоку матеріалу, що витікає: $A_{н.п.}$; $B_{з.п.}$; $C_{в.п.}$.

Коефіцієнт опору сопла розраховується за формулами приведеними в роботі [16].

Задавши максимальною частотою обертання шнека та підставивши у формулу (26) отримані значення можна розрахувати максимальну об'ємну продуктивність екструдера. Частота обертання шнека визначається частотою обертання планетарного крокового мотор-редуктора, що використовується в якості приводу. Такі системи використано для приводу шнекового екструдера завдяки великому зусиллю на валу електричного приводу і невеликій швидкості обертання та які забезпечують більш плавну та стабільну роботу пристрою [48].

Використовуючи отримане значення за формулою (26) розраховується максимальне значення лінійної продуктивності екструдера.

Отримане значення має перевищувати максимальну швидкість переміщення шнекового екструдера в робочому режимі. Значне перевищення дозволить зменшити частоту обертання крокового мотор-редуктора шнекового екструдера та подачу розплавленого полімерного матеріалу.

Для шнекових екструдерів для яких не потрібен високий тиск дозування розплавленого полімерного матеріалу та які переробляють не пористі однорідні полімерні матеріали можна використовувати шнеки з постійним кроком і глибиною гвинтової нарізки (рис.4). В даному випадку значно спрощується розрахунок і процес його виготовлення.

Діаметр шнека $D_{шн.}$, крок гвинтової нарізки $t_{г.н.}$, ширина гребеня витка $e_{г.в.}$; величина зазору між гребенем шнека та внутрішньою стінкою матеріального циліндра $\delta_{з.з.}$; кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека $\varphi_{г.л.}$ розраховуються за формулами (8, 10, 11, 12, 13). Довжина робочої частини шнека $L_{шн.}$ визначається із співвідношення $L_{шн.} / D_{шн.} = 8...15$, а загальна довжина шнека – за формулою (9).

Глибина гвинтового каналу $h_{г.к.}$ залежить від товщини стрічки полімерного матеріалу, яка буде подаватися в екструдер, а також від зовнішнього діаметру шнека $D_{шн.}$. Вона знаходиться в межах:

$$h_{г.к.} = (0,1...0,25) \cdot D_{шн.} \quad (34)$$

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У статті детально розглянуто різні аспекти проектування шнека для екструдера 3D-принтера. Визначено, що ключовими параметрами шнека є його діаметр, довжина, крок гвинтової нарізки, глибина гвинтового каналу та ширина гребеня. Ці параметри безпосередньо впливають на продуктивність, ефективність та якість друку 3D-принтера.

Було враховано вид перероблюваного полімерного матеріалу при його проектуванні, оскільки різні полімери вимагають різних умов екструзії. Наприклад, для полімерів з широким температурним інтервалом пластифікації потрібен шнек з певними характеристиками ступеня стиснення. Ступінь стиснення в трьохзонному шнеку є фундаментальним параметром, що визначає ефективність переробки різних полімерних матеріалів з урахуванням їхніх в'язкопружних властивостей. У статті встановлено даний показник для різних типів полімерних матеріалів. Це важливо для досягнення оптимального балансу між забезпеченням достатнього тиску та уникненням надмірного тепловиділення, що може погіршити якість полімеру при його переробці.

Підходи, запропоновані у статті, спрямовані на підвищення енергоефективності та оптимізацію конструкції шнека для забезпечення кращої продуктивності та якості друку, зокрема шляхом вибору оптимального діаметра шнека та його геометричних характеристик.

Розроблений метод проектування шнека враховує потреби універсальності для використання в різних моделях 3D-принтерів, дозволяючи адаптувати конструкцію під різні типи полімерних матеріалів та умови експлуатації.

Подані в статті методики та рекомендації відкривають нові можливості для проектування більш ефективних та високопродуктивних шнеків, що можуть вплинути на майбутнє розвитку технологій 3D-друку.

Таким чином, запропонований метод забезпечує можливість точного розрахунку мікро шнеків з оптимальними параметрами для екструдерів 3D-принтерів, які використовуються для екструзії пластмас. Впровадження цього методу в рамках системи автоматизованого проектування сприятиме значному скороченню часу, необхідного для розробки трьохмірних моделей деталей та підготовки відповідної конструкторської документації.

У цілому, стаття вносить цінний внесок у сферу проектування шнекових екструдерів для 3D-принтерів, що може стати основою для подальших досліджень та розробок в цій області.

Література

1. Швед М. П. Новий ресурсоенергоощадний процес екструзії полімерів / М. П. Швед, Д. М. Швед, С. П. Великоіваненко. // Молодий вчений. – 2018. – №1. – С. 447–449.
2. Plastic Extrusion: A Complete Guide To Know Its Process [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://waykenrm.com/blogs/plastic-extrusion-process>.
3. Швед Д. М. Процес екструзії полімерів на каскадному дисково - шестеренному екструдері : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08 "Процеси та обладнання хімічної технології" / Швед Д. М. – Київ, 2017. – 26 с.
4. Ляшук О.Л., Третьяков О.Л., Дмитренко В.П., Колесник О.А. Технологічність конструкцій механізмів гвинтових робочих органів екструдерів. Сільськогосподарські машини: 36. наук. ст. – Вип. 33. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. - С.94-101.

5. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання науково-дослідних робіт. Загальні положення : ДСТУ 3973:2000. – [Чинний від 2001-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2001. – 46 с.
6. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Основні терміни та визначення : ДСТУ 3278:95. – [Чинний від 1996-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 1996. – 142 с.
7. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання дослідно-конструкторських робіт. Загальні положення : ДСТУ 3974:2000. – [Чинний від 2001-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2001. – 54 с.
8. ЄСКД. Загальні положення : ДСТУ ГОСТ 2.001:2006. – [Чинний від 2007-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 144 с.
9. Єдина система конструкторської документації. Експлуатаційні документи : ДСТУ ГОСТ 2.601:2006. – [Чинний від 2007-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 144 с.
10. A. Patel, Krishnanand, M. Taufik. Design and Analysis Studies in Pallet Extrusion Additive Manufacturing Processes. Applications of Computational Methods in Manufacturing and Product Design. 2022. - p. 351–359.
11. The 3 most important extruder screws – design, fields of application, advantages and disadvantages [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/mraar>.
12. Whyman S., Arif Kh.M., Potgieter J. Design and development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. 96:3417–3428 <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1843-y>.
13. Polishchuk A., Polishchuk O., Skyba M., Rubanka M. Dependence of the form of the 3D printer extruder screw from the properties of the polymer material. Технічна творчість: Збірник наукових праць./ Укл.: Скиба М.Є., Полішук О.С., Романець Т.П. - Хмельницький: ХНУ, 2023. № 6. – С.5-6.
14. The Screw and Barrel System [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.dynisco.com/userfiles/files/The_Screw_and_Barrel_System.pdf.
15. Polishchuk O., Zozulia P., Polishchuk A. Development and research of equipment for processing of granulated polymeric materials via 3D printing for the needs of light industry. Fibres and Textiles. 2020. №4. - P.75-80.
16. Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку / Є. А.Разумов-Фризюк, Д. В. Гурін, Д. О. Нікітін, Р. Є. Стрілець. // Radiotekhnika. – 2022. – №209. – С. 206–214.
17. Tim A. Osswald. Polymer processing: modeling and simulation / Tim A. Osswald, Juan P. Hernández-Ortiz. – Munich: Carl Hanser Verlag, 2006. 651p.
18. C. Marschik, W. Roland, J. Miethlinger. A Network-Theory-Based Comparative Study of Melt-Conveying Models in Single-Screw Extrusion: A. Isothermal Flow. Polymers. 2018. 10. – p.1-22, [doi:10.3390/polym10080929](https://doi.org/10.3390/polym10080929).
19. Інноваційні технології глибокої переробки органічних матеріал: конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. / уклад.: М.П. Швед, А.Р. Степанюк, Д.М. Швед. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 221 с.
20. Метод екструзії полімерів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://granula.at.ua/index/0-35>.
21. Single Screw Extruder knowledge-Part 1 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.fusion-plastech.com/news/single-screw-extruder-SJ.html>.
22. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії: наук. посіб. / Л. Б. Радченко. - К.: ІЗМН, 1999. - 220 с.
23. Rauwendaal C. Polymer Extrusion. 4th ed. – Munich: Hanser, 2001. – 781p.
24. Hu F., Mikolajczyk T., Pimenov D.Yu., Gupta M.K. Extrusion-Based 3D Printing of Ceramic Pastes: Mathematical Modeling and In Situ Shaping Retention Approach. Materials. 2021. №14. P.1-22, <https://doi.org/10.3390/ma14051137>.
25. J. Boniatti, P. Januskaite, L.B. da Fonseca. Direct Powder Extrusion 3D Printing of Praziquantel to Overcome Neglected Disease Formulation Challenges in Paediatric Populations. Pharmaceutics. 2021. №13. – p.1-19. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13081114>.
26. Anycubic i3 Mega-S3D принтер [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/mzckz>.
27. Ingeo Biopolymer 4043D [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/lejyq>
28. Extrusion Processing Guide: ABS – Acrylonitrile-butadiene-styrene [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/lekbu>
29. Thermoplastic Polyurethane Elastomers (TPU) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/lekdu>
30. TPE extrusion guide. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.hexpol.com/tpe/resources/tpe-academy/tpe-processing/tpe-extrusion-guide/>
31. Plastic Extrusion Guide Book. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.plastics.gl/construction/extrusion-guide-book/>

32. Зносостійкість деталей екструдерів і термопластавтоматів в абразивному середовищі / Під загальною редакцією В.Г.Каплуна. – ХНУ. – 2014. – 244с.
33. Устаткування виробництва високомолекулярних сполук : конспект лекцій / укладач В. К. Лукашов. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – 275 с.
34. Вплив геометричних особливостей гвинтового каналу на процес переробки олійної сировини [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/mpdzg>
35. Шнеки [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://msd.com.ua/teoriya-i-praktika-ekstruzii-polimerov/shneki/>
36. Polymers [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/mzdfd>.
37. Левицький В. Є. Технологічні особливості одержання екструзійних виробів з полілактиду / В.Є. Левицький, А.С. Масюк, Д.С. Катрук. // Chemistry, Technology and Application of Substances. Vol. 4. – №2 – 2021. – С. 179–187.
38. Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/lejzw>
39. Analysis Of ABS Plastic Injection Molding Process [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/lekav>
40. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів : навч. посіб. / І.О. Мікульонко, О.Л. Сокольський, В.І. Сівецький, Л.Б. Радченко. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – 200 с.
41. N. Domingues, A. Gaspar-Cunha, J.A. Covas. Global Mixing Indices for Single Screw Extrusion. International Journal of Material Forming. 2008, doi: 10.1007/s12289-008-0317-4.
42. Куз'яев І. М. Моделювання екструзії і екструдерів при переробці полімерів: монографія. В 2 ч / І. М. Куз'яев, В. А. Свідерський, А. Д. Петухов. // К.: НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка». – 2016. – С. 412.
43. Сівецький В. І., Куриленко В. М., Івіцький І. І. Технологічне обладнання виробництва будівельних та полімерних виробів - 1. Обладнання будівельних матеріалів і виробів. Лабораторний практикум з навчальної дисципліни [Електронний ресурс]: навч. посіб. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 45 с.
44. Масюк А., Кисіль Х., Скорохода В., Катрук Д., Левицький В. Теплофізичні властивості модифікованих полілактидних матеріалів. Збірник наукових праць за матеріалами III (дистанційної) Міжнародної наукової конференції «Advanced Polymer Materials and Technologies» м. Київ, КНУТД, 14-15 квітня 2020 р. – С.28-33.
45. Andrés Sacristán, Arturo. Design a small extrusion head for 3D printer using plastics granulates. Vives University, Kortrijk. Valladolid, Agosto, 2016. -81 p.
46. Сокольський О.Л., Івіцький І.І., Олексішен В.О. Моделювання течії розплавів полімерів за наявності низьков'язкого пристінного шару. Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2019. № 1. С.35-40, doi: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171033>.
47. J. A. Avila Alfaro, E. Grünschloß, S. Eppele, C. Bonten. Analysis of a Single Screw Extruder with a Grooved Plasticating Barrel – Part I: The Melting Model. International Polymer Processing. 2015. Vol. 30, Issue 2. P. 284–296, doi: 10.3139/217.3021.
48. Крокові мотор-редуктори JK60. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/mpquc>.

References

1. M. P. Shved New resource-energy-saving process of polymer extrusion / M. P. Shved, D. M. Shved, S. P. Velikoivanenko. // Young scientist. – 2018. – No. 1. - pp. 447–449.
2. Plastic Extrusion: A Complete Guide To Know Its Process [Electronic resource] - Resource access mode: <https://waykenrm.com/blogs/plastic-extrusion-process>.
3. Shved D. M. Polymer extrusion process on a cascade disk-gear extruder: autoref. thesis for obtaining sciences. candidate degree technical Sciences: spec. 05.17.08 "Processes and equipment of chemical technology" / Shved D. M. – Kyiv, 2017. – 26 p.
4. Lyashuk O.L., Tretyakov O.L., Dmytrenko V.P., Kolesnyk O.A. Technology of designs of mechanisms of screw working bodies of extruders. Agricultural machines: Coll. of science Art. - Issue 33. – Lutsk: State University of Lutsk National Technical University, 2015. - P.94-101.
5. The system of development and supply of products for production. Rules for performing scientific research works. General provisions: DSTU 3973:2000. – [Effective from 2001-01-01]. - K.: Derzhspozhivstandard of Ukraine, 2001. - 46 p.
6. The system of development and supply of products for production. Basic terms and definitions: DSTU 3278:95. – [Effective from 1996-01-01]. - K.: Derzhspozhivstandard of Ukraine, 1996. - 142 p.
7. The system of development and supply of products for production. Rules for performing research and development works. General provisions: DSTU 3974:2000. – [Effective from 2001-01-01]. - K.: Derzhspozhivstandard of Ukraine, 2001. - 54 p.
8. ESCD. General provisions: DSTU GOST 2.001:2006. – [Effective from 2007-01-01]. - K.: Derzhspozhivstandard of Ukraine, 2007. - 144 p.
9. Unified system of design documentation. Operating documents: DSTU GOST 2.601:2006. – [Effective from 2007-01-01]. - K.: Derzhspozhivstandard of Ukraine, 2007. - 144 p.
10. A. Patel, Krishnanand, M. Taufik. Design and Analysis Studies in Pallet Extrusion Additive Manufacturing Processes. Applications of Computational Methods in Manufacturing and Product Design. 2022. - p. 351–359.
11. The 3 most important extruder screws – design, fields of application, advantages and disadvantages [Electronic resource] – Resource access mode: <http://surl.li/mraar>.
12. Whyman S., Arif Kh.M., Potgieter J. Design and development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. 96:3417–3428 <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1843-y>.

13. Polishchuk A., Polishchuk O., Skyba M., Rubanka M. Dependence of the form of the 3D printer extruder screw from the properties of the polymer material. Technical creativity: Collection of scientific works./ Add.: Skyba M.E., Polishchuk O.S., Romanets T.P. - Khmelnytskyi: KhNU, 2023. No. 6. – p.5-6.
14. The Screw and Barrel System [Electronic resource] - Resource access mode: https://www.dynisco.com/userfiles/files/The_Screw_and_Barrel_System.pdf.
15. Polishchuk O., Zozulia P., Polishchuk A. Development and research of equipment for processing granulated polymeric materials via 3D printing for the needs of light industry. Fibers and Textiles. 2020. No. 4. - p.75-80.
16. Modeling of a screw extruder for FFF 3D printing / E. A. Razumov-Fryzyuk, D. V. Gurin, D. O. Nikitin, R. E. Strelets. // Radiotekhnika. – 2022. – No. 209. - p. 206–214.
17. Tim A. Osswald. Polymer processing: modeling and simulation / Tim A. Osswald, Juan P. Hernández-Ortiz. - Munich: Carl Hanser Verlag, 2006. 651p.
18. C. Marschik, W. Roland, J. Miethlinger. A Network-Theory-Based Comparative Study of Melt-Conveying Models in Single-Screw Extrusion: A. Isothermal Flow. Polymers. 2018. 10. – p.1-22, doi:10.3390/polym10080929.
19. Innovative technologies of deep processing of organic material: lecture notes [Electronic resource]: education. manual for students / comp.: M.P. Shved, A.R. Stepaniuk, D.M. Swede. - K.: KPI named after Igor Sikorskyi, 2022. – 221 p.
20. Method of extrusion of polymers [Electronic resource] – Mode of access to the resource: <https://granula.at.ua/index/0-35>.
21. Single Screw Extruder knowledge-Part 1 [Electronic resource] - Resource access mode: <https://www.fusion-plastech.com/news/single-screw-extruder-SJ.html>.
22. Radchenko L. B. Processing of thermoplastics by the extrusion method: Sci. manual / LB Radchenko. - K.: IZMN, 1999. - 220 p.
23. Rauwendaal C. Polymer Extrusion. 4th ed. - Munich: Hanser, 2001. - 781p.
24. Hu F., Mikolajczyk T., Pimenov D.Yu., Gupta M.K. Extrusion-Based 3D Printing of Ceramic Pastes: Mathematical Modeling and In Situ Shaping Retention Approach. Materials. 2021. No. 14. R.1-22, <https://doi.org/10.3390/ma14051137>.
25. J. Boniatti, P. Januskaite, L.B. da Fonseca. Direct Powder Extrusion 3D Printing of Praziquantel to Overcome Neglected Disease Formulation Challenges in Pediatric Populations. Pharmaceuticals. 2021. No. 13. - p. 1-19. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13081114>.
26. Anycubic i3 Mega-S3D printer [Electronic resource] - Resource access mode: <http://surl.li/mzckz>.
27. Ingeo Biopolymer 4043D [Electronic resource] – Resource access mode: <http://surl.li/lejqy>.
28. Extrusion Processing Guide: ABS – Acrylonitrile-butadiene-styrene [Electronic resource] – Resource access mode: <http://surl.li/lekbu>
29. Thermoplastic Polyurethane Elastomers (TPU) [Electronic resource] – Resource access mode: <http://surl.li/lekdu>.
30. TPE extrusion guide. [Electronic resource] - Resource access mode: <https://www.hexpol.com/tpe/resources/tpe-academy/tpe-processing/tpe-extrusion-guide/>.
31. Plastic Extrusion Guide Book. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://www.plastics.gl/construction/extrusion-guide-book/>.
32. Wear resistance of parts of extruders and thermoplastic machines in an abrasive environment / Under the general editorship of V.G. Kaplun. - KHNU. - 2014. - 244 p.
33. Equipment for the production of high molecular weight compounds: lecture notes / compiled by V. K. Lukashov. – Sumy: Sumy State University, 2021. – 275 p.
34. The influence of the geometrical features of the screw channel on the process of processing oil raw materials [Electronic resource] - Access to the resource: <http://surl.li/mpdzz>.
35. Screws [Electronic resource] – Mode of access to the resource: <https://msd.com.ua/teoriya-i-praktika-ekstruzii-polimerov/shneki/>
36. Polymers [Electronic resource] - Resource access mode: <http://surl.li/mzdfd>.
37. Levitskyi V.E. Technological features of obtaining extruded products from polylactide / V.E. Levitskyi, A.S. Masyuk, D.S. Katruk // Chemistry, Technology and Application of Substances. Vol. 4. – No. 2 – 2021. – p. 179–187.
38. Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies [Electronic resource]. Mode of access to the resource: <http://surl.li/lejzw>.
39. Analysis Of ABS Plastic Injection Molding Process [Electronic resource] – Resource access mode: <http://surl.li/lekav>.
40. Fundamentals of designing single-worm extruders: teaching. manual / I.O. Mikulonok, O.L. Sokolskyi, V.I. Sivetskyi, L.B. Radchenko. - K.: NTUU "KPI", 2015. - 200 p.
41. N. Domingues, A. Gaspar-Cunha, J.A. Covas. Global Mixing Indices for Single Screw Extrusion. International Journal of Material Forming. 2008, doi: 10.1007/s12289-008-0317-4.
42. Kuzyaev I. M. Modeling of extrusion and extruders during processing of polymers: monograph. In 2 h / I. M. Kuzyaev, V. A. Sviderskyi, A. D. Petukhov. // K.: NTUU "KPI" Publishing House "Polytechnic". - 2016. - p. 412.
43. Sivetsky V. I., Kurylenko V. M., Ivitsky I. I. Technological equipment for the production of construction and polymer products - 1. Equipment for construction materials and products. Laboratory practicum on educational discipline [Electronic resource]: training. manual - K.: KPI named after Igor Sikorskyi, 2018. – 45 p.
44. Masyuk A., Kysil H., Skorohoda V., Katruk D., Levitskyi V. Thermophysical properties of modified polylactide materials. Collection of scientific works based on the materials of the III (distance) International Scientific Conference "Advanced Polymer Materials and Technologies", Kyiv, KNUVD, April 14-15, 2020 - p.28-33.
45. Andrés Sacristán, Arturo. Design a small extrusion head for 3D printer using plastic granules. Vives University, Kortrijk. Valladolid, Agosto, 2016. -81 years.
46. Sokolskyi O.L., Ivitskyi I.I., Oleksyshen V.O. Modeling the flow of polymer melts in the presence of a low-viscosity wall layer. Bulletin of NTUU "KPI named after Ihor Sikorsky". Series: Chemical engineering, ecology and resource conservation. 2019. No. 1. P.35-40, doi: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171033>.
47. J. A. Avila Alfaro, E. Grünschloß, S. Eppe, C. Bonten. Analysis of a Single Screw Extruder with a Grooved Plasticating Barrel – Part I: The Melting Model. International Polymer Processing. 2015. Vol. 30, Issue 2. P. 284–296, doi: 10.3139/217.3021.
48. Step motor-reducers JK60. [Electronic resource] – Mode of access to the resource: <http://surl.li/mpquc>.