

Поліщук Андрій Олегович,
аспірант кафедри машин і апаратів,
електромеханічних та енергетичних
систем, Хмельницький національний
університет

Місяць Володимир Петрович,
доктор технічних наук, професор, професор
кафедри машин і апаратів, електро-
механічних та енергетичних систем,
Хмельницький національний університет

Polishchuk Andrii, Graduate student of the
Department of Machines and Apparatus,
Electromechanical and Energy Systems,
Khmelnitskyi National University
<https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>

Misiats Volodymyr,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Electromechanical and Energy Systems
Khmelnitskyi National University,
<https://orcid.org/0000-0002-9002-238X>

**МОДЕЛЮВАННЯ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА 3D-ПРИНТЕРА, ЩО ВИКОРИСТОВУЄ
ГРАНУЛИ АБО ПОДРІБНЕНІ ВІДХОДИ ПОЛІМЕРУ В ЯКОСТІ ВИХІДНОЇ СИРОВИНИ
MODELING OF A SCREW EXTRUDER 3D PRINTER USING PELLETS OR CRUSHED POLYMER
WASTE AS THE RAW MATERIAL**

Поліщук А. О., Місяць В. П. Моделювання
шнекового екструдера 3D-принтера, що
використовує гранули або подрібнені відходи
полімеру в якості вихідної сировини. *Український
журнал прикладної економіки та техніки*.
2023. Том 8. № 4. С. 329 – 334.

Polishchuk A., Misiats V. Modeling of a
screw extruder 3D printer using pellets or
crushed polymer waste as the raw
material. *Ukrainian Journal of Applied
Economics and Technology*.
2023. Volume 8. № 4, pp. 329 – 334.

У даній статті як об'єкт математичного моделювання вибрано процес переміщення полімерного матеріалу в шнековому екструдері 3D-принтера, що використовує гранули або подрібнені відходи полімеру в якості вихідної сировини. Досліджено, що моделювання шнекових екструдерів є надзвичайно актуальною задачею, оскільки це важливий інструмент для оптимізації процесів виробництва у полімерній промисловості та інших галузях, де вони використовуються. Воно дозволяє детально вивчити і оптимізувати процеси, що відбуваються всередині матеріального циліндра. Зазначено, що моделювання шнекових екструдерів для 3D-принтерів, які використовують гранули або подрібнені відходи пластиків, є ключовим фактором для підтримки інновацій, у підвищенні ефективності виробництва, покращенні якості продуктів та розвитку нових технологічних рішень у різних галузях промисловості. Відмічено, що під час руху матеріалу вздовж каналу шнека екструдера, безперервно змінюється кілька його станів від твердого на вході каналу до в'язкої рідини на виході. У зоні подачі полімер знаходиться у твердій формі та переміщується по матеріальному циліндру завдяки тертю. При моделюванні використано фізичну модель, в якій ущільнені частинки полімеру під час руху через канал не зсуваються відносно одна одної. Це відбувається через те, що сили внутрішнього тертя в полімері значно переважають над тертям полімеру по сталі, і частинки рухаються як єдине еластичне стисливе середовище завдяки балансу сухого тертя між стінкою циліндра і шнеком. Показано геометричні параметри екструдера в зоні живлення. Наведено схему розгорнутого каналу екструдера для розрахунку продуктивності. Для визначення продуктивності зони живлення екструдера складено схему руху матеріалу в ній. Отримано математичну модель продуктивності в залежності від діаметра шнека, частоти обертання, глибини гвинтового каналу, кута підйому гвинтової лінії нарізки шнека. Здійснено розрахунок тиску в каналі екструдера. Наведено схему для розрахунку сил, що діють на матеріал в зоні живлення. Отримано формулу для визначення тиску в зоні завантаження матеріалу з бункера, що зв'язує характеристики полімерного матеріалу та геометричні параметри завантажувального бункера.

Ключові слова: 3D-принтер, шнековий екструдер, моделювання; полімерний матеріал; зона завантаження; бункер; продуктивність; тиск.

In this article, the process of moving polymer material in the screw extruder of a 3D printer, which uses granules or crushed polymer waste as raw materials, is chosen as the object of mathematical modeling. It is noted that the modeling of screw extruders is a highly relevant task, as it is an essential tool for optimizing production processes in the polymer industry and other industries where they are used. It allows you to study and optimize the material cylinder's processes thoroughly. It is noted that the modeling of screw extruders for 3D printers, which use granules or shredded plastic waste, is a critical factor in supporting innovation, increasing production efficiency, improving product quality, and developing new technological solutions in various industries. It was noted that during the movement of the material along the channel of the extruder screw, several of its states continuously changed from a solid at the entrance of the channel to a viscous liquid at the exit. In the feed zone, the polymer is solid and moves along the material cylinder due to friction. A physical model was used in the simulation, in which compacted polymer particles do not move relative to each other during movement through the channel. This is because the internal friction forces in the polymer greatly outweigh the friction of the polymer on the steel, and the particles move as a single elastic compressible medium due to the balance of dry friction between the cylinder wall and the screw. The geometrical parameters of the extruder in the feed zone are shown. A diagram of the expanded extruder channel for calculating productivity is given. A diagram of the movement of material in it was drawn up to determine the productivity of the extruder feed zone. A mathematical model of productivity was obtained depending on the diameter of the screw, the frequency of rotation, the depth of the screw channel, and the angle of elevation of the screw line of the

© Поліщук Андрій Олегович, Місяць Володимир Петрович, 2023

screw cutting. The pressure in the extruder channel was calculated. A scheme for calculating the forces acting on the material in the feeding zone is given. A formula was obtained for determining the pressure in the material loading zone from the hopper, which connects the characteristics of the polymer material and the geometric parameters of the loading hopper.

Keywords: 3D printer, screw extruder, modeling; polymer material; loading area; bunker; productivity; pressure.

Вступ

Моделювання шнекових екструдерів є надзвичайно актуальною задачею, оскільки це важливий інструмент для оптимізації процесів виробництва у полімерній промисловості та інших галузях, де вони використовуються. Воно дозволяє детально вивчити і оптимізувати процеси, що відбуваються всередині матеріального циліндра. Це включає розподіл температури, швидкість потоку, тиск та якість змішування. Оптимізація цих параметрів може значно покращити якість кінцевого продукту та збільшити вихід продукції. Моделювання допомагає уникнути тривалих і витратних експериментальних досліджень. Замість численних фізичних випробувань можна провести серію симуляцій, що значно скорочує час розробки нових продуктів та процесів. Через можливість детального аналізу процесів всередині матеріального циліндра екструдера, моделювання допомагає у виявленні та усуненні потенційних проблем, які можуть вплинути на якість кінцевого продукту. Відкривається шлях для інновацій, дозволяючи експериментувати з новими полімерними матеріалами, конструкціями шнеків та параметрами процесу без реального виробництва прототипів. Оптимізація процесів за допомогою аналітичного дослідження може допомогти зменшити відходи виробництва та енергоспоживання, що є важливим аспектом у рамках глобальних зусиль зі збереження навколишнього середовища.

Моделювання шнекового екструдера 3D-принтера, що використовує гранули чи подрібнені відходи пластиків, також має велику актуальність на сьогодні. Використання подрібнених відходів пластику для 3D-друку відіграє важливу роль у розв'язанні проблеми пластикових відходів. Таким чином воно допомагає зрозуміти, як різні типи переробленого пластику поведуться під час друку, що є ключовим для підвищення якості кінцевих продуктів. Використання гранул чи подрібнених відходів замість традиційних ниток (філаментів) для 3D-друку може бути значно дешевшим. Тому аналітичне дослідження допоможе оптимізувати процеси для ефективного використання цих матеріалів.

Шнекові екструдери дають змогу друкувати більш широким спектром матеріалів, включаючи ті, що мають високу в'язкість або є композитними. Моделювання цих процесів розкриває нові можливості для індивідуалізованих й інноваційних друкованих виробів та дозволяє розробникам та інженерам експериментувати з різними параметрами процесу, що веде до створення нових і більш ефективних технологій 3D-друку.

Враховуючи ці аспекти, моделювання шнекових екструдерів для 3D-принтерів, які використовують гранули або подрібнені відходи пластиків, є ключовим фактором для підтримки інновацій, у підвищенні ефективності виробництва, покращенні якості продуктів та розвитку нових технологічних рішень у різних галузях промисловості.

Об'єкт та методи дослідження. Об'єктом досліджень є процеси, що протікають під час проходження полімеру в шнековому екструдері 3D-принтера, що використовує гранули чи подрібнені відходи пластику в якості вихідної сировини. При вирішенні поставлених задач використано метод системного аналізу. Експериментальні дослідження базуються на основних положеннях наукового методу, включаючи теоретичний аналіз, вивчення властивостей матеріалів, аналіз робочих характеристик, що дозволяє оптимізувати технологічний процес і підвищити ефективність використання 3D-друку.

Формулювання цілей статті

Мета полягає у розробці та аналізі моделі шнекового екструдера для 3D-принтера, який використовує як вихідну сировину гранули або подрібнені відходи полімеру. Основна увага буде зосереджена на визначенні ключових параметрів роботи екструдера, а саме продуктивності шнекового екструдера в зоні завантаження полімеру та тиску, що виникає при цьому. Це дасть змогу краще зрозуміти процес екструзії під час 3D-друку та оцінити вплив різних типів вихідної сировини на ефективність і якість друку.

Виклад основного матеріалу дослідження

Під час руху матеріалу вздовж каналу шнека екструдера безперервно змінюється кілька його станів від твердого на вході каналу до в'язкої рідини на виході [1, 2, 3]. При цьому цей канал традиційно поділяють на три функціональні зони [2, 3]: живлення (I), плавлення (II) і гомогенізації (III) (рис. 1). У зоні подачі полімер знаходиться у твердій формі та переміщується по матеріальному циліндру 1 (рис. 1) завдяки тертю. Зазвичай канал шнека заповнений полімером, де відбувається ущільнення гранул через сухе тертя об стінки циліндра 1 і шнека 2, що призводить до збільшення тиску. Водночас повітря, що залишилося між гранулами,

ISSN 2415-8453. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2023 рік. Том 8. № 4.

вивільняється через завантажувальний отвір 3. У місцях тертя з'являється тепло, що вимагає охолодження (повітрям, водою тощо), щоб запобігти передчасному розплавленню полімеру. При

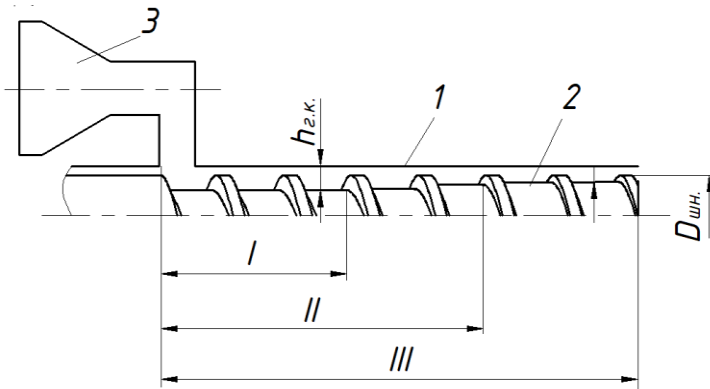


Рис. 1. Схема одношнекового екструдера:
1 – матеріальний циліндр; 2 – шнек; 3 – завантажувальний бункер; I, II, III – функціональні зони шнека; $h_{г.к.}$ – глибина гвинтового каналу (глибина нарізки); $D_{шн.}$ – діаметр шнека

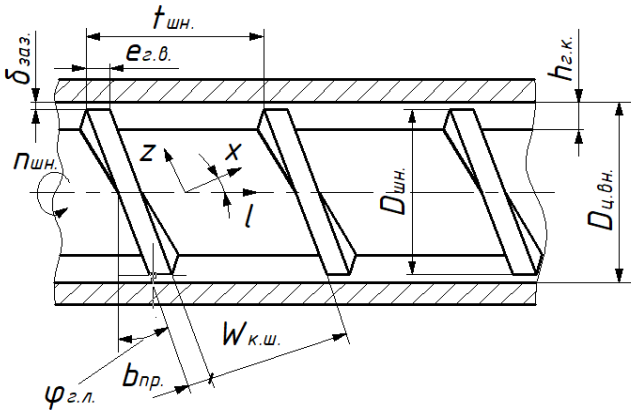


Рис. 2. Геометричні параметри екструдера в зоні живлення: $D_{ц.вн.}$ – внутрішній діаметр матеріального циліндра; $t_{шн.}$ – крок гвинтової нарізки; $e_{г.в.}$ – ширина гребеня витка; $\delta_{заяз.}$ – величина зазору між гребенем шнека та внутрішньою стінкою матеріального циліндра; $\varphi_{г.л.}$ – кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека; $W_{к.ш.}$ – ширина каналу шнека в напрямку нормалі до стінки; $b_{пр.}$ – ширина прольоту

визначаються наступними виразами:

$$V_{cx} = \pi \cdot D_{шн.} \cdot n_{шн.} \cdot \sin(\varphi_{г.л.}); V_{cz} = \pi \cdot D_{шн.} \cdot n_{шн.} \cdot \cos(\varphi_{г.л.}). \quad (2)$$

Зв'язок координати переміщення в напрямку z і в напрямку x (вздовж осі обертання шнека в напрямку l , визначається рівнянням:

$$z = \frac{x}{\sin(\varphi_{г.л.})} = \frac{l}{\sin(\varphi_{г.л.})}. \quad (3)$$

Визначення продуктивності зони живлення екструдера.

Розглянемо рух матеріалу в зоні живлення екструдера за допомогою схеми, що представлена на рис. 4. Канал шнека (рис. 4) рухається із швидкістю V_C . Точка А визначає початкове положення елемента матеріалу. Протягом часу $t_{р.м.}$ канал шнека разом з матеріалом переміститься на відрізок АВ. Рух матеріалу відбувається за рахунок дії сил тертя, що виникають на поверхнях його контакту з гвинтовим каналом. Точка А зміститься відносно поверхні циліндра на відрізок AA', а відносно поверхні каналу шнека – на відрізок BA'. Тоді можна виразити швидкість V_p як відношення шляху переміщення матеріалу і часу цього переміщення:

$$V_p = \frac{BA'}{t_{р.м.}} \quad (4)$$

відсутності або неефективності охолодження полімер починає плавитися і витісняється назад у завантажувальний бункер, порушуючи процес подачі екструдера. Полімер у зоні подачі зберігає тверду форму. Під час руху пластику через робочий канал він ущільнюється, нагрівається, і тиск зростає через тертя між поверхнями шнека і циліндра. Багато теоретичних досліджень процесу екструзії [1–8] базуються на фізичній моделі, в якій ущільнені частинки полімеру під час руху через канал не зсуваються відносно одна одної. Це відбувається через те, що сили внутрішнього тертя в полімері значно переважають тертя полімеру по сталі, і частинки рухаються як єдине еластичне стиснуте середовище завдяки балансу сухого тертя між стінкою циліндра 1 та шнеком 2.

Геометричні параметри екструдера в зоні живлення представлені на рис. 2.

У зоні подачі екструдера глибина каналу шнека значно менша, ніж діаметр отвору в матеріальному циліндрі. Ця особливість дозволяє відтворити гвинтовий канал розгорнутим на площину. Для спрощення візуалізації взаємодії між каналом шнека, матеріальним циліндром та матеріалом уявімо це як зворотний відносний рух: канал шнека залишається статичним (нерухомим), тоді як поверхня циліндра переміщується в напрямку l з певною швидкістю V_C (рис. 3).

При подальших розрахунках зроблено припущення, що зазор $\delta_{заяз.}$ між внутрішньою стінкою матеріального циліндра 1 (рис. 1) та шнеком 2 є незначним і ним в подальших розрахунках можна знехтувати. Тоді:

$$V_C = \pi \cdot D_{шн.} \cdot n_{шн.} \quad (1)$$

де $n_{шн.}$ – частота обертання шнека.

Проекції швидкості V_C на осі x та z

Час переміщення матеріалу можна представити відношенням:

$$t_{p.m.} = \frac{AB}{V_c}, \quad (5)$$

де V_c - швидкість, що визначається за формулою (1).

За тригонометричними співвідношеннями для трикутників CBA' та CAA' , враховуючи (5), перепишемо рівняння (4) у вигляді:

$$V_p = \frac{V_c}{\cos(\varphi_{z.l.}) + \sin(\varphi_{z.l.}) \cdot \text{ctg}(\theta)} \quad (6)$$

Використаємо вираз для синуса від суми двох кутів і тангенса і перепишемо рівняння (6) у вигляді:

$$V_p = V_c \frac{\sin(\theta)}{\sin(\theta + \varphi_{z.l.})}. \quad (7)$$

Виразимо продуктивність в зоні живлення як добуток швидкості V_p і площі поперечного перетину каналу шнека:

$$Q_{ект.} = W_{к.ш.} \cdot h_{г.к.} \cdot V_p, \quad (8)$$

Зі схеми на рис. 2 отримаємо:

$$W_{к.ш.} = \left(\frac{t_{шн.}}{\lambda_{зах.}} - b_{np.} \right) \cdot \cos(\varphi_{z.l.}). \quad (9)$$

де $\lambda_{зах.}$ - число заходів нарізки шнека.

Враховуючи (7) і (9) перепишемо (8) у вигляді:

$$Q_{екс.} = \pi \cdot D_{шн.} \cdot n_{шн.} \cdot h_{г.к.} \cdot \left(\frac{t_{шн.}}{\lambda_{зах.}} - b_{np.} \right) \cdot \frac{\sin(\theta) \cdot \cos(\varphi_{z.l.})}{\sin(\theta + \varphi_{z.l.})}. \quad (10)$$

При сталому русі матеріалу буде виконуватись умова рівноваги діючих сил:

$$F_a = F_b \cdot \cos(\theta + \varphi_{z.l.}). \quad (11)$$

Виконаємо аналіз руху матеріалу в зоні живлення екструдера. Представимо рівняння (11) у вигляді:

$$\cos(\theta + \varphi_{z.l.}) = A_b, \quad (12)$$

$$\text{де } A_b = \frac{F_a}{F_b}.$$

Із рівняння (12) випливає, що при відомій величині A_b можна знайти кут транспортування матеріалу θ та з виразу (10) розрахувати продуктивність екструдера.

Величина A_b може бути тільки менша одиниці, бо косинус будь-якого кута не перевищує одиницю. Рівність $A_b=1$ можлива за умови $F_a = F_b$. При цьому $\theta + \varphi_{z.l.} = 0$, що можливо якщо $\theta = -\varphi_{z.l.}$. Зрозуміло, що при такій умові пробка матеріалу не рухається у напрямку виходу з каналу, а обертається разом з шнеком по колу. Тобто, рух матеріалу можливий за умови:

$$F_a < F_b. \quad (13)$$

Граничний випадок буде за умови $F_a = 0$ і $F_b = 0$, що є можливим якщо $\theta + \varphi_{z.l.} = 90^\circ$. У цьому випадку екструдер працює з максимальною продуктивністю.

Збільшення кута гвинтової лінії шнека призводить до зменшення продуктивності. У більшості випадків для екструдерів приймається умова $t_{шн.} = D_{шн.}$. Тоді отримаємо:

$$\varphi_{z.l.} = \arctg\left(\frac{1}{\pi}\right), \text{ звідки } \varphi_{z.l.} = 17,657^\circ.$$

Розрахунок тиску в каналі екструдера.

Виділимо елемент об'єму матеріалу в каналі шнека екструдера довжиною dz і розглянемо діючі на нього сили. Схема для розрахунку сил, що діють на матеріал в зоні живлення, приведена на рис. 5. Сила F_b - це сила тертя, що діє на матеріал при контакті з поверхнею отвору матеріального циліндру. Ця сила спонукає матеріал рухатись вздовж гвинтового каналу шнека. Сила F_b пропорційна тиску в матеріалі і направлена під кутом θ до площини, що перпендикулярна осі шнека:

$$F_b = f_b \cdot P_y \cdot W_{к.ш.} \cdot dz, \quad (14)$$

де f_b - коефіцієнт тертя полімерного матеріалу по поверхні отвору матеріального циліндру; P_y - тиск в матеріалі за напрямком осі у.

Неізотропність гранул або порошку полімерного матеріалу виразимо за допомогою коефіцієнта:

$$K_y = \frac{P_y}{P_z}, \quad (15)$$

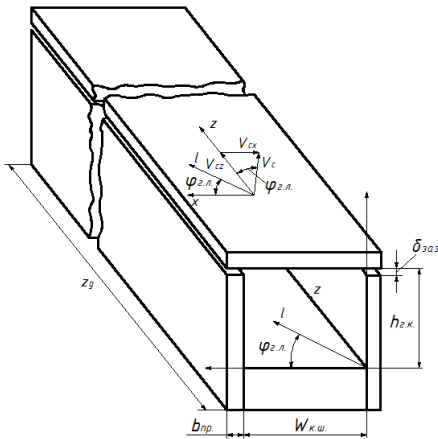


Рис. 3. Схема розгорнутого каналу екструдера для розрахунку продуктивності

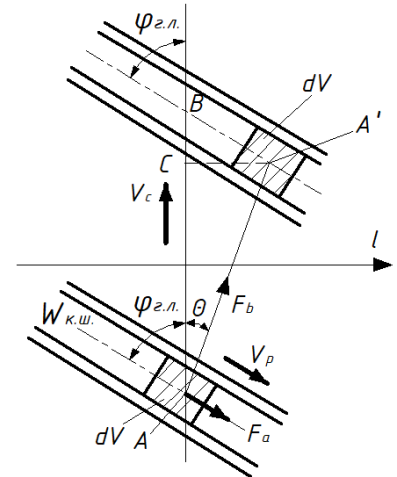


Рис. 4. Схема руху матеріалу в зоні живлення екструдера

де P_z - тиск в матеріалі за напрямком осі z .

Враховуючи (15), перепишемо (14) у вигляді:

$$F_b = f_b \cdot K_y \cdot P_z \cdot W_{к.ш.} \cdot dz, \quad (16)$$

Аналогічно рівняння для сили тертя F_s , що діє між матеріалом і поверхнею осердя шнека:

$$F_b = f_s \cdot K_y \cdot P_z \cdot W_{к.ш.} \cdot dz. \quad (17)$$

Сили F_1 і F_2 є реакціями зі сторін відкинутого матеріалу на виділений елемент dz . Вирази для F_1 і F_2 мають вигляд:

$$F_1 = P_z \cdot h_{г.к.} \cdot W_{к.ш.}; F_2 = (P_z + dP_z) \cdot (h_{г.к.} - A_k \cdot dz) \cdot W_{к.ш.}, \quad (18)$$

де A_k - параметр, що визначає конусність осердя шнека;

$$A_k = \frac{(h_{г.к.1} - h_{г.к.2})}{Z_g} \quad (19)$$

де $h_{г.к.1}$, $h_{г.к.2}$ - глибина каналу шнека на початку і в кінці зони живлення; Z_g - довжина каналу зони живлення шнека в напрямку осі z .

Зі сторін стінок каналу шнека діють нормальні сили F_3 і F_4 :

$$F_3 = K_{xT} \cdot P_z \cdot h_{г.к.} \cdot dz; F_4 = K_{xp} \cdot P_z \cdot h_{г.к.} \cdot dz, \quad (20)$$

де K_{xT} , K_{xp} - коефіцієнти, що характеризують неізотропність поля тиску вздовж осі x по відношенню тиску вздовж осі z .

За аналогією з (15) запишемо:

$$K_{xT} = \frac{P_{xT}}{P_z}; K_{xp} = \frac{P_{xp}}{P_z}, \quad (21)$$

де P_{xT} , P_{xp} - тиск в напрямку осі x біля передньої і задньої стінок каналу шнека.

На елемент матеріалу з передньої і задньої стінок

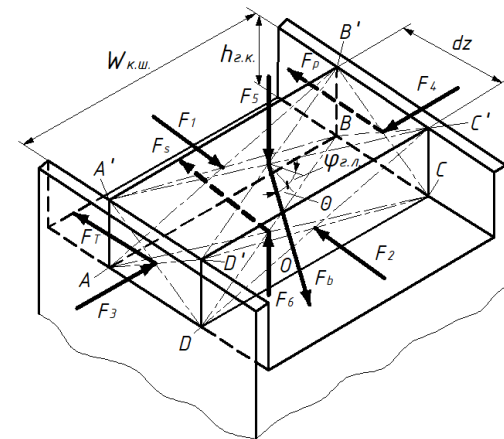


Рис. 5. Схема для розрахунку сил, що діють на матеріал в зоні живлення

каналу шнека діють нормальні сили F_5 і F_6 :

$$F_5 = F_6 = K_y \cdot P_z \cdot W_{к.ш.} \cdot dz. \quad (22)$$

Також на елемент матеріалу з передньої і задньої стінок каналу шнека діють сили тертя F_T і F_p :

$$F_T = K_{xT} \cdot P_z \cdot h_{г.к.} \cdot f_s \cdot dz; F_p = K_{xp} \cdot P_z \cdot h_{г.к.} \cdot f_s \cdot dz, \quad (23)$$

За умови усталеного руху матеріалу векторна сума всіх діючих на нього сил повинна дорівнювати нулю. Отже, сума проєкцій діючих сил на осі координат також дорівнює нулю.

Рівняння для суми проєкцій всіх сил на вісь z має вигляд:

$$F_1 - F_2 - F_T - F_p - F_s + F_b \cdot \cos(\theta + \varphi_{z.l.}) = 0. \quad (24)$$

Зробимо припущення, що $dP_z \cdot h_{г.к.} \cdot W_{к.ш.} \gg dP_z \cdot A_k \cdot W_{к.ш.} \cdot dz$, тоді вираз для визначення сили F_2 прийме вигляд:

$$F_2 = P_z \cdot (h_{г.к.} - A_k \cdot dz) \cdot W_{к.ш.} + dP_z \cdot h_{г.к.} \cdot W_{к.ш.}. \quad (25)$$

Підставимо в рівняння (25) відповідні формули для всіх сил і розділимо всі члени на добуток $h_{г.к.} \cdot W_{к.ш.} \cdot dz$, отримаємо:

$$\frac{dP_z}{dz} - P_z \cdot AF = 0, \quad (26)$$

$$\text{де } AF = \frac{K_y \cdot W_{к.ш.} \cdot [f_b \cdot \cos(\theta + \varphi_{z.l.}) - f_s] - h_{г.к.} \cdot f_s \cdot (K_{xT} + K_{xp}) + A_k \cdot W_{к.ш.}}{h_{г.к.} \cdot W_{к.ш.}}. \quad (27)$$

Розв'язок диференціального рівняння (26) за початкових умов $P_z = P_1$ при $z = 0$ має вигляд:

$$P_z = P_{3.3.} \cdot \exp(AF \cdot z). \quad (28)$$

де $P_{3.3.}$ - тиск в зоні завантаження матеріалу з бункера.

Тиск в зоні завантаження матеріалу з бункера можна визначити за формулою [8]:

$$P_{3.3.} = \left(\frac{h_{6.1}}{h_{6.0}}\right)^{b_\phi} \cdot P_{к.ч.} + \frac{\rho_{н.г.} \cdot g \cdot h_{6.1}}{b_\phi - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{h_{6.1}}{h_{6.0}}\right)^{b_\phi - 1}\right], \quad (29)$$

де $\rho_{н.г.}$ - насипна густина матеріалу; g - прискорення вільного падіння; b_ϕ - коефіцієнт, що враховує форму бункера і властивості матеріалу; $P_{к.ч.}$ - тиск, що утворюється на вході в конусну частину бункера за рахунок наявного матеріалу в циліндричній частині.

Для визначення тиску $P_{к.ч.}$ можна скористатись формулою [8]:

$$P_{к.ч.} = \frac{\rho_{н.г.} \cdot g \cdot D_\delta}{4 \cdot f_\omega \cdot K_\delta} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{4 \cdot f_\omega \cdot K_\delta \cdot h_{6.2}}{D_\delta}\right)\right], \quad (30)$$

де K_δ - коефіцієнт бічного стиснення матеріалу; f_ω - коефіцієнт тертя на стінці бункера.

Величини $h_{6.0}$, $h_{6.1}$, $h_{6.2}$, D_δ - геометричні параметри бункера, які представлені на рис. 6.

Підставивши формулу (30) у (29), отримаємо:

$$P_{3.3.} = \left(\frac{h_{6.1}}{h_{6.0}}\right)^{b_1} \cdot \frac{\rho_{н.з.} \cdot g \cdot D_{\delta}}{4 \cdot f_{\omega} \cdot K_{\delta}} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{4 \cdot f_{\omega} \cdot K_{\delta} \cdot h_{6.2}}{D_{\delta}}\right)\right] + \frac{\rho_{н.з.} \cdot g \cdot h_{6.1}}{b_{\phi} - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{h_{6.1}}{h_{6.0}}\right)^{b_{\phi} - 1}\right]. \quad (31)$$

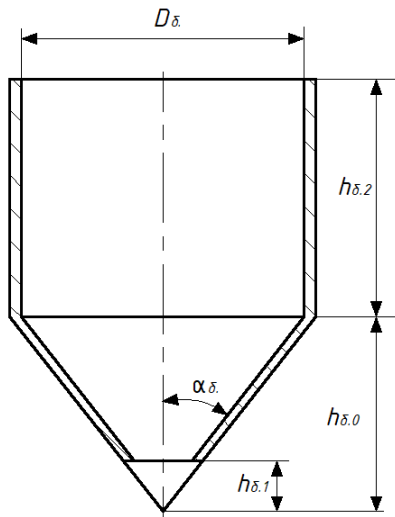


Рис. 6. Геометричні параметри бункера

Потужність, що витрачається в зоні живлення.

Потужність в зоні живлення витрачається на подолання сил тертя між полімером і поверхнею каналу. Вираз для визначення потужності в загальному випадку:

$$N_{3.3.} = \sum_i (\Delta N_{bi} + \Delta N_{si}), \quad (32)$$

де ΔN_{bi} , ΔN_{si} - потужність, що витрачається на довжині Δz на подолання сил тертя відповідно по поверхні циліндра і шнека;

$$\Delta N_{bi} = V_p \cdot P_{zi} \cdot f_{bi} \cdot W_{к.ш.} \cdot \Delta z, \quad (33)$$

$$\Delta N_{si} = V_p \cdot P_{zi} \cdot f_{si} \cdot (W_{к.ш.} + 2 \cdot h_{т.к.}) \cdot \Delta z. \quad (34)$$

Висновки та перспективи подальших розвідок

У статті здійснено розробку та аналіз моделі шнекового екструдера 3D-принтера, який використовує як вихідну сировину гранули або подрібнені відходи полімеру. Проведено визначення ключових параметрів роботи екструдера, зокрема продуктивності та тиску в матеріальному циліндрі на етапі завантаження полімеру. У ході дослідження створено математичну модель, яка описує продуктивність шнекового екструдера в залежності від

основних параметрів: діаметр шнека, частота його обертання, глибина гвинтового каналу та кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека тощо. Формула для визначення тиску в зоні завантаження матеріалу з бункера ефективно пов'язує фізичні та геометричні характеристики полімерного матеріалу з параметрами завантажувального бункера, що є ключовим для оптимізації процесу екструзії. Результати моделювання вказують на можливості оптимізації конструкції шнекового екструдера для збільшення продуктивності пристрою та якості 3D-друку з вторинної сировини. Вони відкривають шлях для подальших досліджень, зокрема визначення потужності електричного двигуна для приводу шнека екструдера та сприятимуть поліпшенню ефективності використання різних типів перероблених матеріалів у шнекових екструдерах для 3D-друку.

Література

1. Витвицький В.М., Мікульонюк І.О. Моделювання процесу живлення черв'ячного екструдера полімерною сировиною: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 136 с.
2. Tadmor Z, Klein I. Engineering Principles of Plasticating Extrusion. New York: Van Nostrand Reinhold, 1970. 479 p.
3. Мікульонюк І.О., Радченко Л.Б. Переробка вторинної сировини екструзією. Київ: НТУУ «КПІ», 2006. 184 с.
4. Мікульонюк І.О. Обладнання і процеси перероблення термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини: монографія. Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2009. 265 с.
5. Радченко Л.Б. Переробка термопластів методом екструзії: науковий посібник. Київ: ІЗМН, 1999. 220 с.
6. Місяць В.П. Математичне моделювання процесу руху матеріалу в екструдерному подрібнювачі з каналом змінного профілю при неізотермічних умовах. Вісник КНУТД. 2006. № 2. С. 42-49.
7. Місяць В.П., Кулік Т.І., Поліщук О.С., Лісевич С.П. Аналітичні дослідження роботи шнекового пристрою для пресування кави. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2018. № 2. С. 64-70.
8. Кузяєв І.М., Свідерський В.А., Петухов А.Д. Моделювання екструзії і екструдерів при переробці полімерів: монографія. Київ: НТУУ «КПІ» «Політехніка», 2016. 412 с.

References

1. Vytvyts'kyj V.M., Mikul'onok I.O. (2021). *Modeliuvannia protsesu zhyvlennia cherv'iachnoho ekstrudera polimernoju syrovynoiu*. [Modeling the process of feeding a worm extruder with polymer raw materials]. KPI im. Ihoria Sikors'koho. Kyiv. Ukraine.
2. Tadmor Z, Klein I. (1970). *Engineering Principles of Plasticating Extrusion*. Van Nostrand Reinhold. New York. USA.
3. Mikul'onok I.O., Radchenko L.B. (2006). *Pererobka vtorynnoi syrovyny ekstruziiei*. [Processing of secondary raw materials by extrusion]. NTUU «KPI». Kyiv. Ukraine.
4. Mikul'onok I.O. (2009). *Obladnannia i protsesy pereroblennia termoplastychnykh materialiv z vykorystanniam vtorynnoi syrovyny*. [Equipment and processing processes of thermoplastic materials using secondary raw materials]. IVTs «Vydavnytstvo «Politekhnik». Kyiv. Ukraine.
5. Radchenko L.B. (1999). *Pererobka termoplastiv metodom ekstruzii*. [Processing of thermoplastics by the extrusion method]. IZMN. Kyiv. Ukraine.
6. Misiats' V.P. (2006). «Mathematical modeling of the process of material movement in an extruder-shredder with a variable profile channel under non-isothermal conditions». *Visnyk KNUVD*. № 2. pp. 42-49.
7. Misiats' V.P., Kulik T.I., Polischuk O.S., Lisevych S.P. (2018). «Analytical studies of the operation of the screw device for pressing coffee». *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. Tekhnichni nauky*. № 2. pp. 64-70.
8. Kuziaiev I.M., Sviders'kyj V.A., Petukhov A.D. (2016). *Modeliuvannia ekstruzii i ekstruderiv pry pererobtsi polimeriv*. [Modeling of extrusion and extruders during polymer processing]. NTUU «KPI» «Politekhnik». Kyiv. Ukraine.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2023 р.