

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістрський)
(рівень вищої освіти)

Моделювання процесу роботи шнекового екструдера 3D принтеру
(тема)

Виконав: студент 6 курсу, групи КІТПВм-22-1.
Скрипник К.Є.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. КІТАР Разумов-Фризюк Є.А.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки
Рівень вищої освіти другий (магістрський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 20 ____ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові Скрипнику Костянтину Євгеновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Моделювання процесу роботи шнекового екструдеру 3D
принтеру
затверджена наказом по університету від 03.11 2023 р. № 1287 Ст.
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 08.01. 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: _____
 - 3.1 швидкість друку до 50мм/сек;
 - 3.2 діаметри сопел від 1мм до 5мм;
 - 3.3 Потужність нижнього нагріваючого кільця – 600Вт, інших трьох – 400 Вт.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
 - 4.1 Вступ _____
 - 4.2 Аналіз експлуатаційних особливостей шнекового екструдеру _____
 - 4.3 Розробка конструкційного дизайну шнекового екструдеру _____
 - 4.4 Моделювання та оптимізація дозування пластику у шнековому екструдері _____
 - 4.5 Розробка механізму передачі обертального моменту _____
 - 4.6 Висновок _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Графічний демонстраційний матеріал представлений у форматі А4 презентації PowerPoint (*.ppt) – 16 сторінок

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів	Примітка
1	Аналіз літератури за темою атестаційної роботи	05.11.2023	Виконано
2	Огляд особливостей функціонування різних видів шнекових екструдерів	09.11.2023	Виконано
3	Аналіз аналогічних конструкцій	13.11.2023	Виконано
4	Аналіз вимог технічного завдання	16.11.2023	Виконано
5	Аналіз конструкції шнекового екструдера	18.11.2023	Виконано
6	Вибір шнеку	21.11.2023	Виконано
7	Розрахунок параметрів шнеку	26.11.2023	Виконано
8	Розробка тривимірної моделі	30.11.2023	Виконано
9	Розрахунок продуктивності екструдера	04.12.2023	Виконано
10	Моделювання температурних режимів	09.12.2023	Виконано
11	Оформлення пояснювальної записки	20.12.2023	Виконано
12	Подання кваліфікаційної роботи до ЕК	23.12.2023	

Дата видачі завдання 3 листопада 2023р.

Студент _____ Скрипник К.Є.
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. КІТАР Разумов-Фризюк С. А.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 78 с., 1 табл., 32 рис., 2 додат., 19 джерел.

ШНЕКОВИЙ ЕКСТРУДЕР, 3D-ПРИНТЕР, ЕКСТРУДЕРИ 3D-ПРИНТЕРІВ, АНАЛІЗ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ, ПРОГРАМНЕ КЕРУВАННЯ, КОНСТРУКЦІЯ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРУ

Об'єкт розробки – процес друку на 3D принтері технології FDM.

Предмет розробки – шнековий екструдер.

Мета роботи – розрахунок і моделювання шнекового екструдеру та його роботи, розробка конструкції шнекового екструдеру.

У роботі проводиться аналіз різних видів шнекових екструдерів, сфер їх використання для 3D принтеру.

За результатами аналізу обирається вид екструдеру для розробки. У роботі передбачається розробляти одношнековий екструдер, без зони дегазації, однозахідний, зі змінною глибиною спірального каналу (зі змінною глибиною нарізки).

Для забезпечення виконання поставленого завдання, здійснюються розрахунки геометричних та фізичних параметрів шнеку, проводиться розробка конструкції шнекового екструдера. За результатами розробляється тривимірна модель конструкції шнекового екструдеру.

Проводяться експериментальні дослідження (моделювання температурних режимів роботи), встановлюються оптимальні параметри для збірки шнекового екструдеру.

ABSTRACT

The explanatory note: 78 pages, 1 table applications, 32 drawings, 2 addition, 19 sources.

SCREW EXTRUDER, 3D PRINTER, 3D PRINTER EXTRUDERS, ANALYSIS AND CALCULATION OF PARAMETERS, SOFTWARE CONTROL, SCREW EXTRUDER DESIGN

The object of the design – is the process of making on a 3D printer with FDM technology.

The subject of the development – is a screw extruder.

The purpose of this paper is calculation and modeling of a screw extruder and its operation, development of a screw extruder design.

The paper analyzes different types of screw extruders and their applications for 3D printers.

Based on the results of the analysis, the type of extruder is selected for development. In this work, it is planned to develop a single-screw extruder, without a degassing zone, single-entry, with a variable depth of the spiral channel (with a variable depth of cut).

To ensure the fulfillment of the task, the geometric and physical parameters of the screw are calculated, and the design of the screw extruder is developed. Based on the results, a three-dimensional model of the screw extruder design is developed.

Experimental studies (modeling of temperature operating conditions) are carried out, and the optimal parameters for the screw extruder assembly are established.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз експлуатаційних особливостей шнекового екструдеру	10
1.1 Шнековий екструдер.....	10
1.2 Види шнекових екструдерів.....	14
1.3 Сфери використання шнекових екструдерів.....	19
2 Моделювання дозування пластику у шнековому екструдері	25
2.1 Розрахунок параметрів шнеку.....	25
2.2 Розрахунок продуктивності	28
2.3 Тепловий розрахунок екструдера.....	35
2.4 Розрахунок необхідної потужності.....	38
2.5 Вибір крокового двигуна.....	41
2.6 Висновки до розділу.....	42
3 Розробка моделі шнекового екструдера.....	44
3.1 Розробка 3d моделі шнекового екструдера... ..	44
3.2 Розробка механізму подачі шнекового екструдеру	48
4 Симуляційне моделювання шнекового екструдеру.....	53
4.1 Моделювання температурних режимів роботи шнекового екструдеру.....	53
4.2 Створення заходів безпеки під час розробки шнекового екструдера.....	59
Висновки.....	62
Перелік джерел посилання.....	64
Додаток А Демонстраційний графічний матеріал.....	67
Додаток Б Опробація результатів наукових досліджень.....	69

Я - Скрипник Костянтин Іванович, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую поштану закладу і академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недовілену допомогу під час підготовки планіфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають поштану на відповідне джерело.

19.12.2023



ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- АБС – акрилонітрил бутадієн стирол;
- ГДК – гранична допустима концентрація;
- ГОСТ – державний стандарт;
- ГДР – гранично допустимий рівень;
- ДСТУ – державний стандарт України;
- КІТАР – кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки;
- ХНУРЕ – Харківський національний університет радіоелектроніки;
- ЧПУ – числове програмне управління;
- 3D – 3 dimensions;
- ABS – acrylonitrile butadiene styrene;
- DLP – digital light processing;
- LCD – liquid crystal display;
- FDM – fused deposition modeling;
- FFF – fused filament fabrication;
- HIPS – high-impact polystyrene;
- PLA – polylactic acid;
- SEBS – styrene ethylene butylene styrene;
- TPU – thermoplastic polyurethane;
- TPE – thermoplastic elastomer.

ВСТУП

Шнековий екструдер у 3D-принтері є ключовим компонентом, відповідальним за постачання та формування пластикового матеріалу для друку. На відміну від інших видів екструдерів, шнековий екструдер має певні переваги завдяки технології його конструкції, а саме: використання гранул замість філаменту, що робить виробництво 3D моделей набагато дешевшим, можливість використовувати сопла із більшим діаметром для прискорення швидкості друку, можливість використовувати вторинні матеріали, у якості робочих.

У кваліфікаційній роботі з теми «Моделювання процесу роботи шнекового екструдеру 3D принтеру» буде досліджуватись та розроблятись шнековий екструдер для 3D принтеру домашнього використання.

Для забезпечення виконання кваліфікаційного завдання буде проведено аналіз експлуатаційних особливостей шнекового екструдера. У якому буде проводитись дослідження видів шнекових екструдерів, сфер їх використання.

Наступним кроком буде зроблено моделювання та оптимізація дозування пластику у шнековому екструдері, під час якого будуть проводитись розрахунки параметрів та інших особливостей даного екструдеру, вибір крокового двигуна відповідно до розрахованих результатів необхідної потужності.

Згідно до отриманих результатів розрахунків геометричних параметрів буде проведено розробку 3D моделі шнекового екструдеру та механізму подачі у програмі «Fusion 360».

Останнім кроком у даній роботі буде виконано симуляційне моделювання шнекового екструдеру, у якому будуть встановлені оптимальні, для продуктивної роботи, температурні режими при яких буде працювати екструдер.

Кваліфікаційна робота виконана згідно [1-2]. Викладені матеріали опробовані на конференціях [3] та опубліковані у наукових виданнях [4].

1 АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРУ

1.1 Шнековий екструдер

Шнековий екструдер – це промислове обладнання, яке використовується для обробки і формування різних матеріалів, перетворюючи їх зі стану сирової сировини у бажану форму або продукт. Приклад загальної конструкції шнекового екструдеру зображений на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Шнековий екструдер

Основний компонент шнекового екструдера – це шнек, який представляє собою спеціально створений гвинтовий вал зі спеціально вирізаними каналами або різьбленням (рис. 1.2). Матеріал вводиться у шнековий екструдер, і за допомогою рухомого гвинта цей матеріал плавно пропускається через екструдер, де його обробляють, плавлять або змінюють форму.

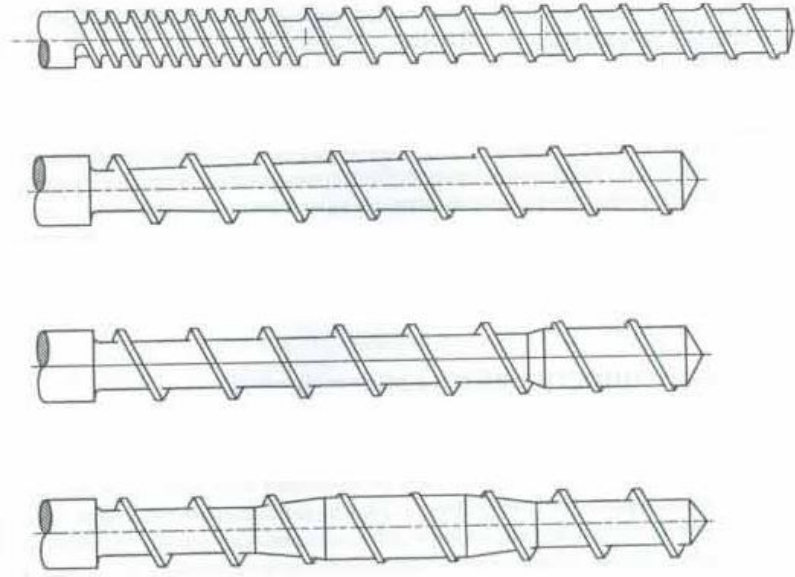


Рисунок 1.2 – Приклади шнеків, які можуть бути обраними для використання в екструдері

Ефективність роботи екструдерів напряду впливає на їх продуктивність і залежить від форми і розмірів шнеків (рис. 1.3). Тому під час вибору обладнання враховуються такі параметри:

- діаметр стрижня – D , довжина стрижня – L , а також співвідношення довжини щодо діаметра – L/D ;
- висота витків на різних ділянках шнека – h_1, h_2 тощо;
- довжина ділянок шнеків з різною висотою витків – L_1, L_2 тощо;
- ширина гребеня гвинта – e ;
- кут гвинтової нарізки – ϕ ;
- відстань межі витків (крок витка) – t .

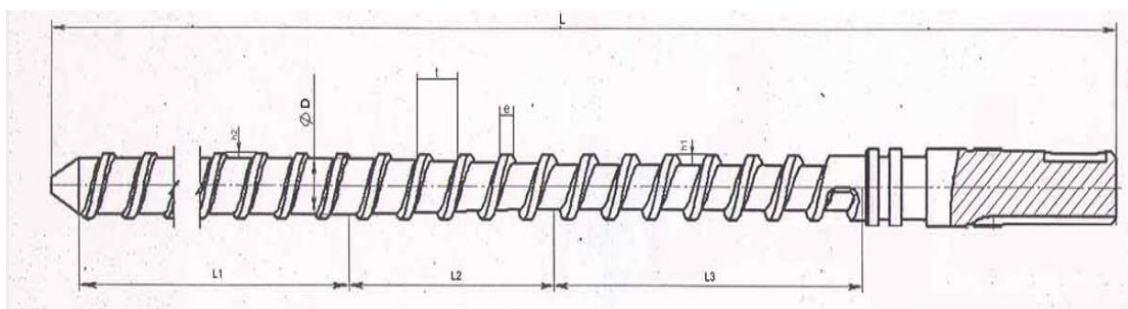


Рисунок 1.3 – Схема шнеку із наведеними геометричними параметрами

Збірка шнекового екструдера включає у себе також інші компоненти, які працюють спільно для ефективної обробки та формування матеріалів, а саме:

- корпус: це оболонка, у якій розташований шнек. У корпусі зазвичай є нагрівальні елементи для підігріву матеріалів під час екструзії;
- направляюча головка: ця частина контролює форму виходу продукту і забезпечує правильну геометрію кінцевого виробу;
- система подачі сировини: включає у себе механізм, який постачає сировину (наприклад, пластмасу, харчові інгредієнти або інші матеріали) у шнековий екструдер;
- нагрівальні елементи: використовуються для підігріву і плавлення матеріалів, які обробляються. Це може бути електричний обігрів, підігрів парою або інші системи обігріву;
- охолодження і система контролю температури: для охолодження і забезпечення стабільної температури в екструдері використовуються вентилятори, системи охолодження або терморегуляції;
- система виштовхування (витискна головка): використовується для витіснення і формування матеріалу через направляючу головку, створюючи кінцевий продукт;
- система управління та контролю: включає в себе панель керування, датчики та інші компоненти для контролю процесу екструзії, включаючи температуру, швидкість та тиск;
- система подачі та витіснення: ця система контролює швидкість руху шнека та подачу матеріалу через нього.

Ці компоненти працюють разом, щоб забезпечити ефективну обробку та формування матеріалів відповідно до потреб і специфікацій конкретного процесу виробництва.

Загальні компоненти, з яких може складатись промисловий шнековий екструдер, зображені на рис. 1.4.

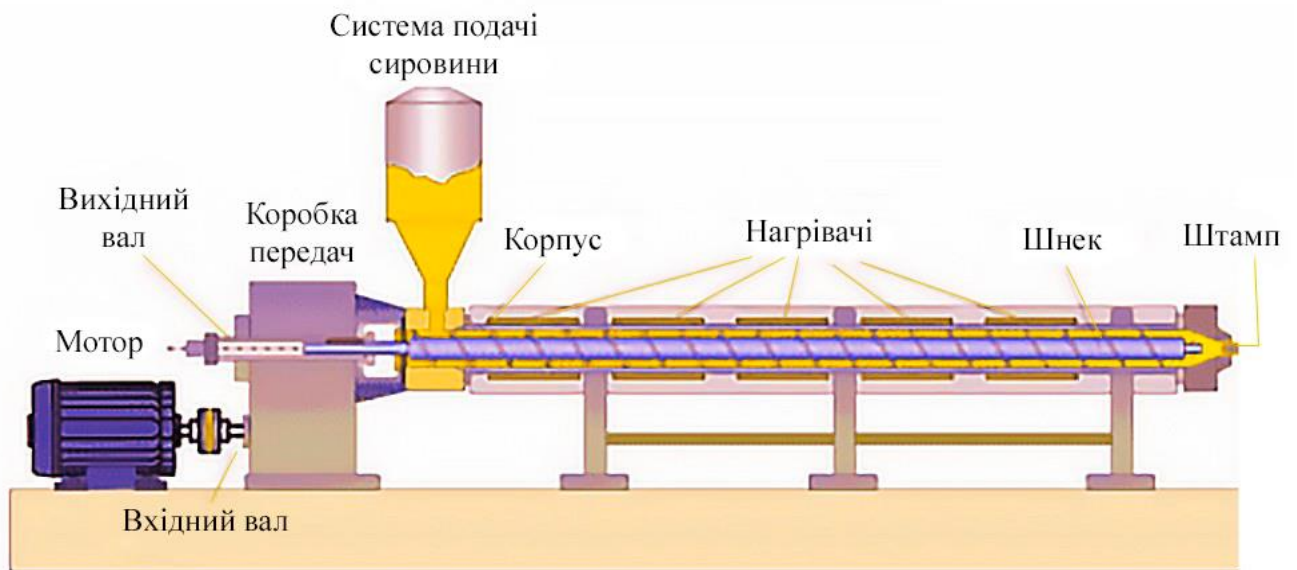


Рисунок 1.4 – Загальні компоненти, з яких може складатись промисловий шнековий екструдер

Загальне призначення шнекових екструдерів полягає в обробці і формуванні різних матеріалів, перетворюючи їх із початкового або полімерного стану у бажану форму, текстуру або структуру [5]. Це обладнання використовується в різних галузях промисловості і має наступні загальні характеристики та призначення:

- термообробка: шнекові екструдери можуть використовуватися для нагрівання і плавлення матеріалів, таких як пластмаси або полімери, для створення плівок, профілів або інших форм;
- зміна форми: вони можуть допомогти змінити форму сировини, перетворюючи її у виріб з бажаною геометрією;
- зміна текстури і структури: шнекові екструдери дозволяють змінювати текстуру і структуру матеріалів, що проходять через них;
- змішування і домішування: вони можуть використовуватися для змішування різних компонентів або для додавання домішок до матеріалу.

Шнекові екструдери мають широкий спектр застосувань і використовуються в різних галузях, де обробка матеріалів і формування грає важливу роль в процесах виробництва.

1.2 Види шнекових екструдерів

Шнекові екструдери можуть відрізнятися між собою в різних аспектах, оскільки їх конструкція та функціональність можуть бути адаптовані для різних видів матеріалів і процесів виробництва. Шнекові екструдери можуть відрізнятися за наступними параметрами:

- тип матеріалу: шнекові екструдери призначені для різних матеріалів, включаючи пластмаси, харчові інгредієнти, фармацевтичні суміші, хімічні сполуки тощо. Кожен тип матеріалу може вимагати специфічних характеристик екструдера;
- розмір та геометрія шнека: шнеки можуть мати різну довжину, діаметр та форму, що впливає на швидкість обробки матеріалу і можливості змішування;
- тип подачі матеріалу: шнекові екструдери можуть мати різні системи подачі матеріалу, такі як горизонтальні, вертикальні або бокові;
- нагрівальна система: деякі екструдери мають спеціальні системи нагріву для плавлення матеріалу, у той час як інші можуть працювати при кімнатній температурі;
- система охолодження: для деяких матеріалів потрібна система охолодження для зафіксування форми та структури;
- швидкість обертання шнека: шнек може рухатися з різною швидкістю, що впливає на швидкість обробки матеріалу;
- діапазон тиску і температури: деякі екструдери можуть працювати під високим тиском або високою температурою, в той час як інші призначені для менших тискових та температурних умов;
- призначення та галузь виробництва: шнекові екструдери спеціалізуються на конкретних видах виробництва, таких як виробництво пластмасових труб, продуктів харчування, фармацевтичних препаратів, будівельних матеріалів тощо.

Вибір конкретного типу шнекового екструдера залежить від конкретних потреб виробництва, властивостей матеріалу і специфікацій процесу. Таким чином, різні види екструдерів можуть бути оптимізовані для різних завдань і галузей

промисловості [6]. Завдяки цьому шнекові екструдери можуть відрізнятися між собою за різними технологіями, конструкцією та специфікаціями в залежності від конкретних завдань і галузей виробництва. Ось деякі різновиди шнекових екструдерів, що відрізняються за технологією та конструкцією:

– шнековий екструдер з одним гвинтом (одношнековий): цей тип екструдера має один шнек, який рухається всередині корпусу (рис. 1.5). Він використовується для багатьох застосувань, включаючи виробництво пластмасових плівок, профілів, труб та інших виробів. Одношнекові екструдери можуть мати різну геометрію шнека і конфігурацію корпусу, що дозволяє їм працювати з різними матеріалами;

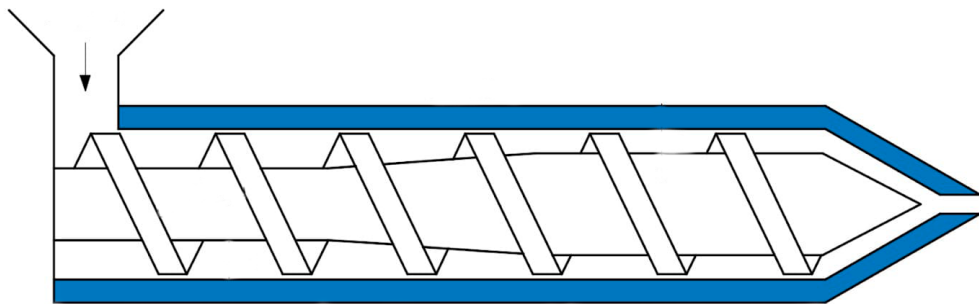


Рисунок 1.5 – Схема одношнекового екструдера

– шнековий екструдер з двома гвинтами (двошнековий): цей тип екструдера має два паралельно рухаючихся шнеки, які можуть обертатися в різні сторони (рис. 1.6). Двошнекові екструдери використовуються для більш складних процесів, таких як змішування різних компонентів або обробка матеріалів з високою в'язкістю;

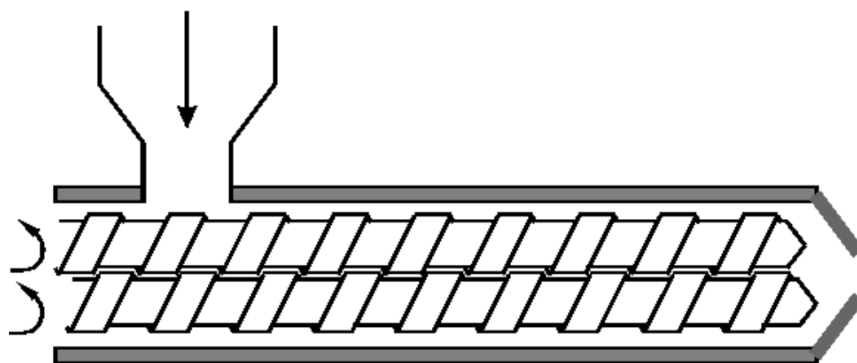


Рисунок 1.6 – Схема двошнекового екструдера

– шнековий екструдер з багатьма гвинтами (багатошнековий): цей тип екструдера має більше двох гвинтів, які можуть мати різну конфігурацію (рис. 1.7). Вони використовуються для обробки важких матеріалів, таких як композити або рецептури з численними компонентами;

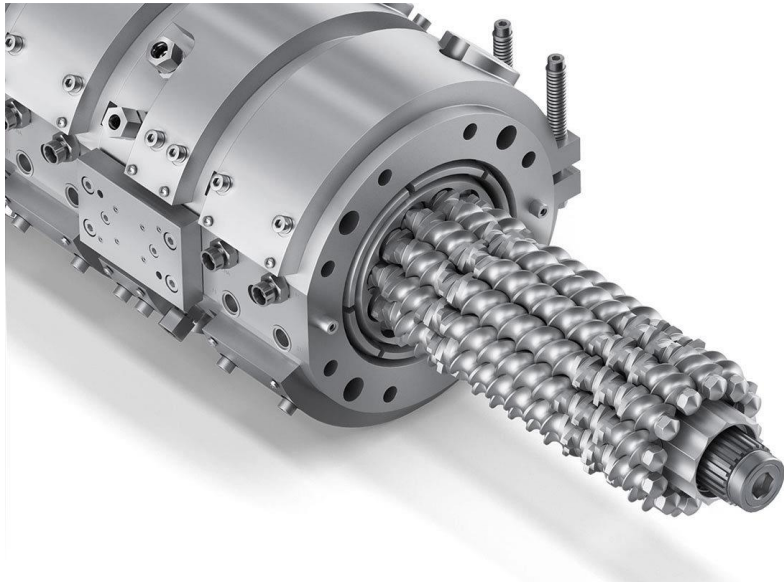


Рисунок 1.7 – Багатошнековий екструдер

– шнековий екструдер з ковзними гвинтами: в цьому типі екструдера гвинти можуть ковзати один відносно одного, що створює додатковий змішувальний ефект (рис. 1.8). Це корисно для обробки важких і в'язких матеріалів;

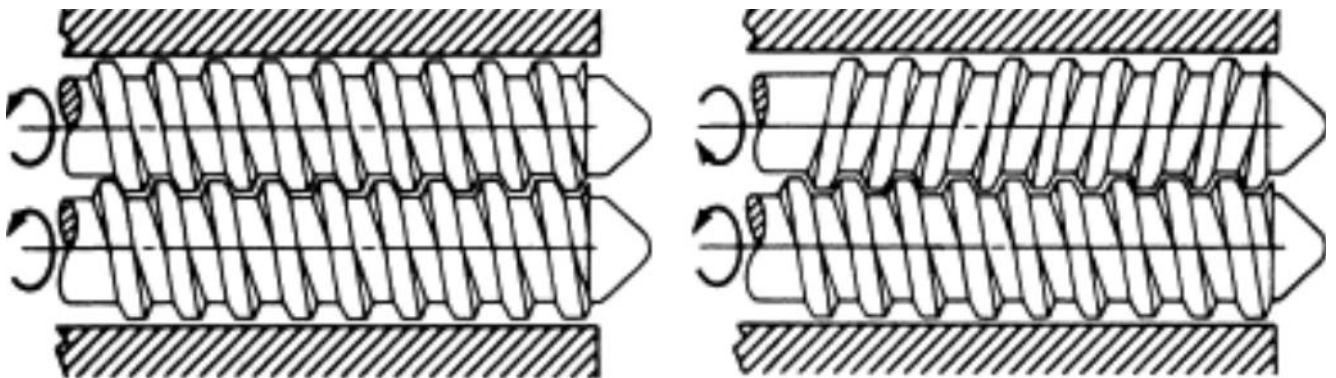


Рисунок 1.8 – Схема шнекового екструдера з ковзними гвинтами

– шнековий екструдер для двоматеріальних виробів: шнекові екструдери спеціально призначені для обробки двох різних матеріалів і створення двокомпонентних або багатоконпонентних виробів (рис. 1.9);

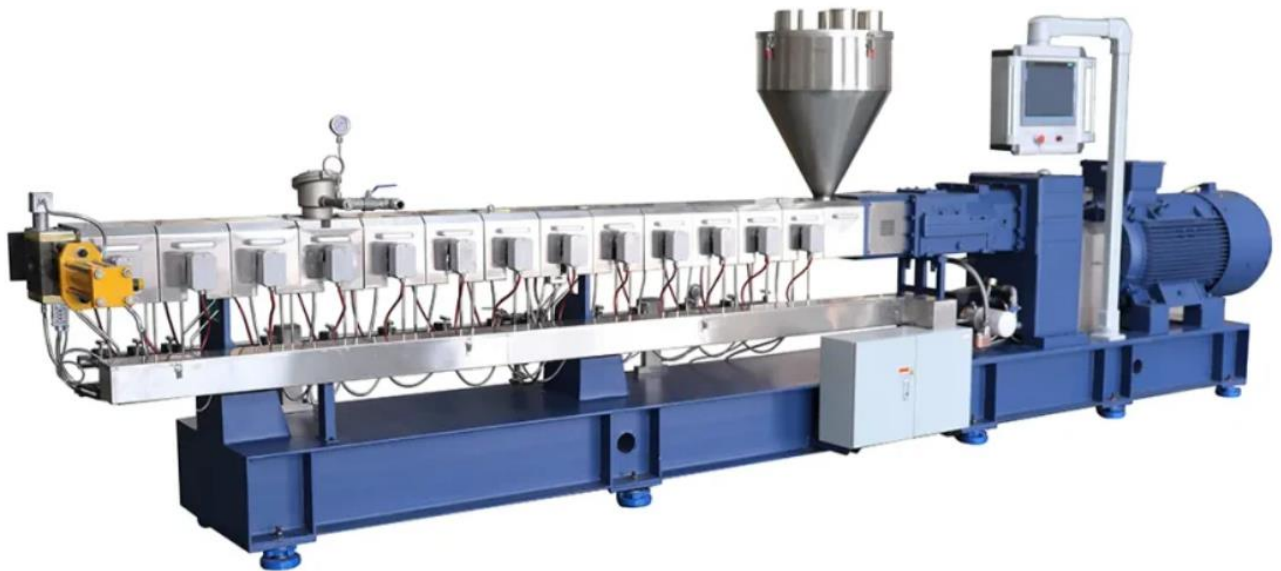


Рисунок 1.9 – Шнековий екструдер для двоматеріальних виробів

– шнековий екструдер з вакуумною системою: деякі моделі мають вакуумну систему для видалення надлишкового повітря та пазирів під час екструзії (рис. 1.10);



Рисунок 1.10 – Шнековий екструдер з вакуумною системою

– шнековий екструдер для харчової промисловості: ці екструдери мають особливі характеристики і матеріали, які відповідають стандартам безпеки та гігієни для виробництва продуктів харчування (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Шнековий екструдер для харчової промисловості

Кожен з цих різновидів шнекових екструдерів має свої унікальні особливості і застосування, що дозволяє виробникам вибирати оптимальну конфігурацію для своїх потреб.

1.3 Сфери використання шнекових екструдерів

Шнекові екструдери використовуються у багатьох різних сферах і промисловостях завдяки їх універсальним можливостям.

Харчова промисловість. Шнекові екструдери у харчовій промисловості використовуються для обробки та виробництва різних продуктів, наприклад:

– виготовлення снєків та чіпсів (екструдери здатні обробляти кукурудзяну крупу та інші зернові продукти, перетворюючи їх у снєки і чіпси. Процес включає змішування сировини з водою та іншими інгредієнтами,

нагрівання і витискання через шнек. Результатом є крохмалеві вироби, які можна подавати у різних смаках і формах);

- виробництво збитню та батончиків (екструдери можуть змішувати і стискувати інгредієнти, такі як гранульована крупа, горіхи, фрукти і мед, для створення здорових снєків);

- виробництво кондитерської продукції (у даному виробництві шнекові екструдери використовуються для об'єднання і змішування інгредієнтів, таких як борошно, цукор, яйця і жири, для створення тіста. Потім тісто може бути виготовлене у різних формах та розмірах);

- виробництво зернових продуктів і каш (екструдери використовуються для виготовлення зернових продуктів, таких як зернові кульки, гранола і каші. Вони можуть обробляти зерно з медом, цукром та іншими інгредієнтами, щоб створити смачні і харчово цінні продукти);

- виробництво харчових добавок (використовуються екструдери для виробництва харчових добавок, вітамінних комплексів та інших харчових продуктів у формі гранул або таблеток).

Пластикова промисловість. Шнекові екструдери використовуються для обробки пластмас та створення різних видів пластикових виробів, а саме:

- формування пластикових плівок (шнекові екструдери використовуються для створення пластикових плівок, які можуть бути використані для упаковки, утеплення та інших цілей. Пластмасовий матеріал розплавляється і витискається через матрицю, що дозволяє отримати плоску, рівномірну плівку);

- виробництво пластикових труб і профілів (завдяки шнековим екструдерам виготовляються пластикові труби та профілі, які застосовуються в будівництві, сільському господарстві, автомобільній промисловості та інших галузях. Вони дозволяють створювати пластикові вироби з різними формами та розмірами);

- виготовлення пластмасових виробів (виробництво різноманітних пластикових виробів, такі як пляшки, контейнери, коробки, пластикові ложки і виделки, інші вироби для дому та промисловості);

- переробка вторинних сировин (шнекові екструдери використовуються для переробки вторинних сировин, таких як використані пластикові вироби, у новий пластиковий матеріал. Це сприяє рециклінгу і зменшенню відходів);
- виробництво композитів (виконується застосування шнекових екструдерів для створення пластикових композитів, додаванням наповнювачів, наприклад, скловолокна, для поліпшення механічних властивостей пластику);
- екструзійних друк (деякі 3D-принтери використовують шнекові екструдери для нанесення пластикового матеріалу шар за шаром для створення 3D-друкованих об'єктів).

Фармацевтична промисловість. Шнекові екструдери використовуються у фармацевтичній промисловості для обробки та виробництва різних фармацевтичних продуктів і лікарських препаратів, таких як:

- таблеткове формоутворення (виготовлення таблеток та капсул. Вони можуть обробляти порошкоподібні сировини, змішувати їх з лікарськими речовинами і створювати таблеткові маси. Екструзія допомагає забезпечити однорідність і дозування препаратів);
- лікарські гранули (виготовлення лікарських гранул, які можуть бути використані для приготування сиропів, капсул і таблеток);
- лікарські пластмаси (вони також використовуються для обробки лікарських пластмас, що використовуються для створення м'яких капсул, сиропів, таблеток, діючих вагітних субстанцій та інших форм лікарських препаратів);
- лікарські наночастинки (шнекові екструдери можуть використовуватися для створення наночастинок лікарських речовин, що підвищує їх розчинність і біодоступність, що робить їх більш ефективними в лікуванні);
- виробництво вітамінних комплексів (створення вітамінних і мінеральних добавок, які можна включити в склад лікарських препаратів);
- контрольована доставка лікарських речовин (екструдери також допомагають створювати системи контрольованої доставки лікарських речовин, такі як мікрогранули, які можуть забезпечити поступове вивільнення препаратів в організмі).

Хімічна промисловість. Шнекові екструдери використовуються для обробки і виробництва різних хімічних продуктів і сполук. Вони володіють широким спектром застосувань у цій галузі, такими як:

- синтез хімічних сполук (екструзія може використовуватися для створення різних хімічних сполук, включаючи полімери, каучуки, смоли, пластмаси, адгезиви і покриття. Процес може включати змішування інгредієнтів і нагрівання їх до необхідних температур для хімічних реакцій);
- формування гранул і пелет (екструдери дозволяють створювати гранули і пелети з різних сировин для подальшого використання, наприклад, у виробництві пластикових виробів або як паливо);
- підготовка імпрегнувальних розчинів (шнекові екструдери можуть використовуватися для розчинення імпрегнувальних речовин у розчинниках для подальшого нанесення на матеріали, такі як текстиль, папір, деревина або метал);
- створення харчових добавок (у хімічній промисловості шнекові екструдери можуть використовуватися для виготовлення харчових добавок, ароматизаторів, підсолоджувачів і інших хімічних продуктів для харчової промисловості);
- обробка полімерних композитів (екструдери можуть бути використані для створення полімерних композитів, додаванням наповнювачів, армуючих матеріалів або змінників, що покращають фізичні властивості матеріалу);
- виробництво хімічних добрив і добривних сумішей (виробництво гранульованих добрив і добривних сумішей, що забезпечують рослини необхідними макро та мікроелементами).

Виробництво будівельних матеріалів. Шнекові екструдери виробляють будівельні матеріали за допомогою екструзійного процесу, який включає змішування сировини, подачу її через шнековий бар'єр і формування кінцевого продукту [7]. Виробництво будівельних матеріалів за допомогою шнекових екструдерів може бути різноманітним і включати наступні застосування:

- виробництво гіпсових плит (виробництво гіпсових плит, які використовуються для стін і стель в будівництві. Гіпсова сировина змішується з

водою та іншими добавками, а потім пресується і висихається, щоб створити гіпсову плиту);

– виготовлення цеглини та керамічних виробів (екструзія використовується для виробництва цеглини, керамічних блоків та інших керамічних виробів. Керамічна сировина прокладається через екструдер, а потім обрізається та випікається);

– виготовлення пластмасових виробів для будівництва (шнекові екструдери дозволяють створювати різні пластикові вироби для будівництва, такі як труби, профілі, сайдинг, плівки, а також ізоляційні матеріали);

– виробництво металопластикових виробів (виробництво металопластикових виробів, де металева арматура або дріт обгортається пластиком для забезпечення міцності та корозійного захисту);

– виробництво ізоляційних матеріалів (екструзія використовується для створення ізоляційних матеріалів, таких як пінополіуретанова піна і пластикова плівка, які використовуються для утеплення будівель);

– створення декоративних профілів та плінтусів (виробництво декоративних профілів і плінтусів для обробки стін і підлоги також використовує шнекові екструдери.).

Енегретика. Шнекові екструдери також мають застосування в енергетичній галузі, а саме у:

– виробництві біопалива (шнекові екструдери використовуються для обробки біомаси, такої як деревина, багасина цукрової тростини, жом, солома і інші рослинні матеріали, щоб створити біопаливо. Процес включає змішування і розмол матеріалу, а потім екструзію для створення біопаливних гранул або брикетів. Це дозволяє використовувати відновлювальні джерела енергії для виробництва палива);

– виготовленні пелет для опалення (виготовлення дерев'яних пелет, які використовуються в опаленні і теплогенерації. Деревна стружка та інші дерев'яні відходи змішуються, стискаються та обрізаються, щоб створити однорідні та паливної якості пелети);

- переробці відходів в енергію (переробка органічних відходів, таких як харчові залишки або органічний сміття, у біогаз або біопаливо, яке може бути використане для виробництва електроенергії або тепла);

- сприянні використанню відновлювальних джерел енергії (використання шнекових екструдерів для виробництва біопалива сприяє переходу до використання відновлювальних джерел енергії, зменшує залежність від складних вугільних і нафтових палив і допомагає зменшити викиди в атмосферу).

Рециклінг. Шнекові екструдери грають важливу роль у процесі рециклінгу різних матеріалів, допомагаючи перетворювати вторинні сировини, включаючи пластик, резину, метал та інші матеріали, у вигляді, придатному для виробництва нових продуктів. Ось як саме вони використовуються у рециклінгу:

- пластиковий рециклінг (шнекові екструдери використовуються для переробки вторинного пластику. Спершу пластикові відходи розмішуються, нагріваються і плавляться у шнековому барабані. Потім отриманий пластичний матеріал може бути витисканий через матрицю для створення пластикових плівок, профілів, гранул, пелет, пластикових дощок і інших виробів);

- рециклінг гуми (використання шнекових екструдерів у рециклінгу гуми дозволяє переробляти використану гуму, таку як шини, у нові продукти, наприклад, гумові плити, килими, або силіконові гранули, які можуть бути використані у виробництві гумових виробів);

- металорециклінг (деякі шнекові екструдери спеціалізуються на переробці металевих відходів. Вони можуть обробляти вторинний метал і стискати його в стандартні блоки або гранули, які можуть бути використані у виробництві нових металевих виробів);

- пластмасовий рециклінг відходів із піддонів (розміщення та переробка цих відходів для створення пластикових гранул або плит, які можуть бути використані у виробництві нових пластикових виробів);

- рециклінг скла (також можна використовувати екструдери для рециклінгу скла, перетворюючи використане скло у нові вироби, такі як скляні вироби, плити або каменеvidні матеріали).

Шнекові екструдери дозволяють виробляти продукцію з різними фізичними і хімічними властивостями, контролювати температуру і тиск, через їх багатогранну технологію вони застосовуються у багатьох різних промислових галузях [8].

2 МОДЕЛЮВАННЯ ДОЗУВАННЯ ПЛАСТИКУ У ШНЕКОВОМУ ЕКСТРУДЕРІ

2.1 Розрахунок параметрів шнеку

2.1.1 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. 2.1.

Таблиця 2.1 – Розміри зон шнеку

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

Згідно з табл. 2.1, можна зробити висновок, що для обраної довжини шнека, яка складає 160мм, зона живлення має розмір – 40мм, зона пластифікації – 56мм, зона дозування – 64мм.

2.1.2 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:

$$t = (0,8...1,2)D \quad (2.1)$$

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

2.1.3 Глибина гвинтового каналу шнека

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

$$h_1 = (0,12 \dots 0,16)D, \quad (2.2)$$

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.

$$h_3 = 0,5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i}(D - h_1)} \right] \quad (2.3)$$

де h_3 – глибина гвинтового каналу у зоні дозування;

i – ступінь стиснення матеріалу.

Ступінь стиснення матеріалу є величиною, що обирається зі стандартного для кожного полімеру діапазону [9]. 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.

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} L_0, \quad (2.4)$$

де h_2 – глибина гвинтового каналу у зоні пластикації, мм;

L – довжина шнеку, мм;

L_0 – довжина шнеку до зони стискання, мм.

$$L_0 = L - L_H, \quad (2.5)$$

L_H – довжина напірної частини шнека, мм.

$$L_H = (0,4 \dots 0,6)L. \quad (2.6)$$

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

2.1.4 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 витоку через зазор між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та зовнішньою поверхнею витка шнека. Рекомендується взяти ширину гребеня витка рівною:

$$e = (0,06 \dots 0,1)D. \quad (2.7)$$

Оскільки вибраний шнек для екструдера має максимально коротку конструкцію, збільшення товщини витка не суттєво збільшить споживану потужність [10]. Але слід бути обережним, оскільки будь-який витік 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.

2.1.5 Розрахунок радіального зазору

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

$$\delta = (0,002 \dots 0,005)D. \quad (2.8)$$

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

2.2 Розрахунок продуктивності

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 на гідродинамічному методі для аналізу взаємодії робочих органів з перероблюваним матеріалом, у зоні дозування екструдера розглядається три компоненти потоку розплавленого матеріалу:

- потік розплавленого матеріалу, що переміщується між витками від зони завантаження до зони дозування вздовж осі шнека, виникає внаслідок обертання шнека відносно циліндра;
- потік розплавленого матеріалу, що рухається в напрямку, протилежному обертанню шнека, виникає через різницю тиску P вздовж довжини шнека;
- потік витoku, 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 [11]. Сопло – це виємний технологічний інструмент, призначений для екструзії пластмаси під час процесу 3D друку.

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

$$Q = \frac{AK}{K+B+C} n; \quad (2.9)$$

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

K – коефіцієнт опору сопла екструдера, см^3 ;

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

A – постійна прямого потоку, см^3 ;

B – постійна зворотного потоку, см^3 ;

C – постійна потоку витоків, см^3 .

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

$$A = \frac{\pi^3(t-\lambda e)\sigma}{a+t^2b}; \quad (2.10)$$

$$B = \frac{\pi t(t-\lambda e)}{12L_H(a+t^2b)}; \quad (2.11)$$

$$C = \frac{\pi D \delta^3 t^2}{10eL_H \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}}; \quad (2.12)$$

де D – зовнішній діаметр шнека, см ;

t – крок нарізки шнека, см ;

e – ширина гребня нарізки, см ;

λ – число заходів;

δ – величина зазору між гребнем шнека та внутрішньою стінкою циліндра, см ;

L_H – довжина зони дозування, см .

σ , a , b – коефіцієнти, що характеризують конструкцію шнека зі змінною глибиною нарізки. Вони визначаються за такими формулами:

$$\sigma = 1 - \frac{6,9D}{2(h_2-h_3)} \lg \frac{h_2}{h_3} + \frac{D^2}{2h_2h_3}; \quad (2.13)$$

$$a = \frac{\pi^2}{h_2h_3} \left[\frac{D(h_2+h_3)}{2h_2h_3} - 1 \right] \quad (2.14)$$

$$b = \frac{2,3}{(h_2-h_3)D^3} \lg \frac{h_2(D+d_3)}{h_3(D+d_1)} + \frac{2h_2h_3+(h_2+h_3)2D}{2D^2h_2^2h_3^2}; \quad (2.15)$$

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

$$d_1 = D - 2h_1 \quad (2.16)$$

d_3 – діаметр сердечника шнека в зоні дозування, см:

$$d_3 = D - 2h_3. \quad (2.17)$$

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:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_i}}, \quad (2.18)$$

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 [12].

Для розрахунку коефіцієнта опору сопла екструдера необхідно розглянути розроблену тривимірну модель сопла (рис. 2.1).

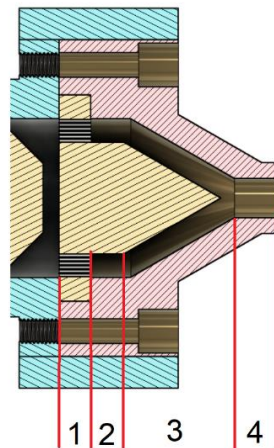


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення сопла шнекового екструдера

Сопло екструдера можна розділити на чотири ділянки для розрахунку 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 [13]. 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. Дана 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, см³:

$$K_{\phi} = \frac{nFd_0^2}{32\delta_{\phi}}, \quad (2.19)$$

де n – число фільтрованих елементів;

F – площа фільтрованого елемента, см²;

δ_ϕ – товщина фільтруючих елементів, см.

Для фільтру обрана середня сітка з діаметром проволочки $d = 0,16$ мм та розміром осередків $d_o = 0,025$ см; число сіток приймаємо $n = 3$; площа фільтрованого елемента $F = 1,608$ см²; 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, см³:

$$K_p = \frac{\pi z d_o^4}{128 \delta_p}, \quad (2.20)$$

де z – кількість отворів у решітці;

d_o – діаметр отворів, см;

δ_p – товщина решітки, см.

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

Друга ділянка сопла являє собою кільцевий циліндричний канал (рис. 2.2). Коефіцієнт опору визначається за формулою:

$$K_2 = \frac{\pi}{8L} \left[R_H^4 - R_B^4 - \frac{(R_H^2 - R_B^2)^2}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \right], \quad (2.21)$$

де L – довжина ділянки, 5 см,

R_H – зовнішній радіус, 1,004 см,

R_B – внутрішній радіус, 0,704 см.

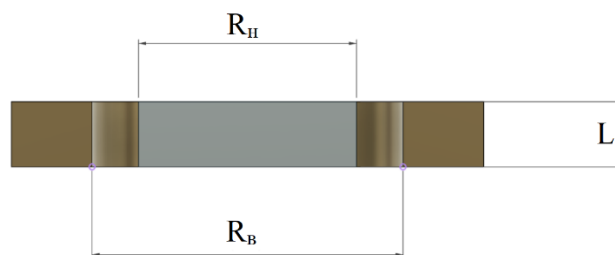


Рисунок 2.2 – Кільцевий циліндричний канал

$$K_2 = 0,0024782$$

Третя ділянка сопла є конічним кільцевим каналом (рис. 2.3). Коефіцієнт опору визначається за формулою:

$$K_3 = \frac{\pi(R_1\delta_1 - R_2\delta_2)}{6Lm}, \quad (2.22)$$

де R_1 – середній радіус конуса на вході, см,

R_2 – середній радіус конуса на виході, см,

δ_1 – зазор конічного кільцевого каналу на вході, см,

δ_2 – зазор конічного кільцевого каналу на виході, см,

L – довжина ділянки, см.

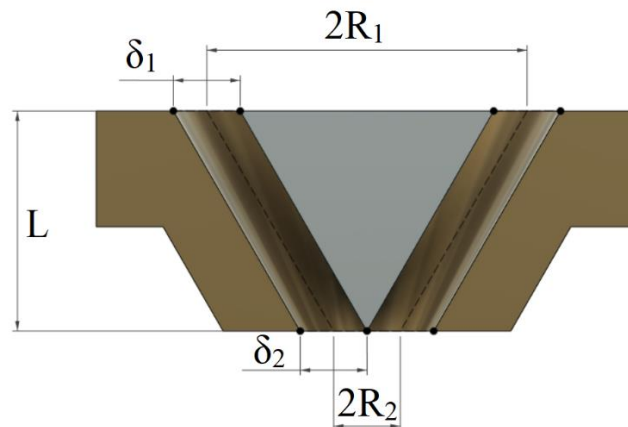


Рисунок 2.3 – Конічний кільцевий канал

Коефіцієнт m визначається за формулою:

$$m = \frac{2.3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \lg \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2}. \quad (2.23)$$

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

Четверта ділянка являє собою круглий циліндричний канал (рис. 2.4). Коефіцієнт опору визначається за формулою:

$$K_4 = \frac{\pi d^4}{128L}, \quad (2.24)$$

де d – діаметр отвору циліндра, см,

L – довжина ділянки, см.

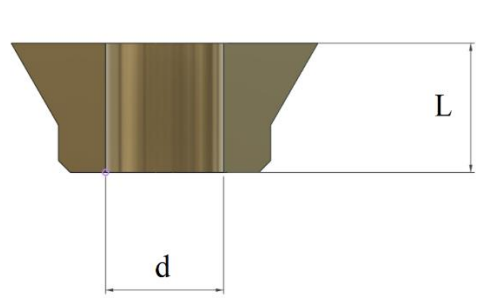


Рисунок 2.4 – Циліндричний круглий канал

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:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_\phi} + \frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4}}. \quad (2.25)$$

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 $n = 480$ хв⁻¹, визначимо максимальну об'ємну продуктивність екструдера. Вибір частоти обертання шнека обумовлений тим, що як привод буде використаний кроковий двигун [14]. Відповідно до вироблених розрахунків об'ємна продуктивність $Q = 181,4418$ см³/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 (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.

2.3 Тепловий розрахунок екструдера

В основі переробки полімерних матеріалів у виробі лежать складні теплові процеси. Правильне уявлення про тепловий баланс процесу переробки процесу переробки, тобто про рівність теплоти, що підводиться і відводиться, дає змогу встановити найбільш оптимальні режими переробки, дає можливість зрозуміти вплив технологічних параметрів на продуктивність обладнання і якість готової продукції, отримати дані для економічних розрахунків.

Для проведення теплового розрахунку необхідне знання теплофізичних властивостей полімерів.

До них відносяться:

- коефіцієнт температуропровідності a , $\text{м}^2/\text{с}$;
- коефіцієнт теплопровідності λ , $\text{кДж/м}\cdot\text{год}\cdot\text{К}$;
- теплоємність C , $\text{кДж/кг}\cdot\text{К}$;
- густина розплаву полімера ρ , кг/м^3 .

Тепловий баланс екструдера визначається рівнянням:

$$E_{\text{н}} + E_{\text{ш}} = E_{\text{м}} + E_{\text{о}} + E_{\text{п}}, \quad (2.26)$$

де $E_{\text{н}}$ – теплота, що надходить від зовнішніх обігрівачів, кВт;

$E_{\text{ш}}$ – теплота, що виділяється під час роботи шнека (так званий дисипативний нагрів - внутрішня теплота тертя), кВт;

$E_{\text{м}}$ – теплота, яка йде з нагрітим матеріалом, кВт;

$E_{\text{о}}$ – теплота, що виноситься системою охолодження (водою, повітрям тощо), кВт;

$E_{\text{п}}$ – втрати тепла у навколишнє середовище, через кожух екструдера, кВт.

З рівняння теплового балансу можна розрахувати кількість теплоти, яку необхідно підвести до екструдера через систему обігріву:

$$E_{\text{н}} = E_{\text{м}} + E_{\text{о}} + E_{\text{п}} - E_{\text{ш}}.$$

Складові рівняння балансу визначаються таким чином:

$$E_{\text{м}} = G_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}), \quad (2.27)$$

де $G_{\text{м}}$ – кількість перероблюваного матеріалу, кг/с;

$c_{\text{м}}$ – питома теплоємність полімеру, кДж/(кг·К);

$t_{\text{к}}, t_{\text{н}}$ – кінцева та початкова температура полімеру, К.

$$G_{\text{м}} = Q/3600, \quad (2.28)$$

де Q – масова продуктивність екструдера, кг/год.

$$E_{\text{о}} = G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} (t_{\text{в2}} - t_{\text{в1}}), \quad (2.29)$$

де $c_{\text{в}}$ – питома теплоємність води, кДж/(кг·К);

$t_{\text{в2}}, t_{\text{в1}}$ – кінцева та початкова температура води, К.

Кількість води $G_{\text{в}}$, що надходить на охолодження шнека, кг/с:

$$G_{\text{в}} = \rho F v,$$

де ρ – щільність води, кг/м³;

F – площа поперечного перерізу, м²;

v – швидкість течії води, м/с.

$$F = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2.30)$$

де d – діаметр трубки у тілі шнека, м.

$$\begin{aligned} E_{\text{п}} &= F_k \alpha (t_{\text{п}} - t_{\text{с}}), \\ F_k &= \pi d_k L_k, \\ \alpha &= (9,74 + 0,07 \Delta t) 10^{-3}, \\ \Delta t &= t_{\text{п}} - t_{\text{с}}, \\ L_k &= L, \end{aligned} \quad (2.31)$$

де F_k – площа зовнішньої поверхні корпусу екструдера;

α – коефіцієнт теплопередачі, кВт/(м²·К);

$t_{\text{п}}$ – температура зовнішньої поверхні ізолюваного корпусу, °С;

$t_{\text{с}}$ – температура навколишньої середовища, °С;

d_k – діаметр корпусу з ізоляцією, м;

L_k – довжина корпусу, м.

$$\dot{G}_{\text{щ}} = \left(\frac{\pi^3 D^3 n_1 L}{h} + \frac{QP}{\cos^2 \varphi} + \frac{\pi^2 D^2 n^2 \eta_2 e L}{\delta \operatorname{tg} \varphi} \right) 9,8 \cdot 10^{-10}, \quad (2.32)$$

де D – діаметр шнеку, см;

n – частота обертання шнека, об/с;

P – тиск у циліндрі, Па;

η_1 – в'язкість розплаву полімеру в спіральному каналі шнека, Па·С;

η_2 – в'язкість розплаву полімеру у зазорі між гребенем шнека і стінкою циліндра, Па·С;

φ – кут підйому гвинтової нарізки шнека, градуси;

e – ширина гребеню витку, см;

δ – величина зазору між гребенем шнека і циліндром, см.

Довжина напірної зони шнека L_n , см:

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

де L – довжина шнека, см;

h_n – глибина нарізки каналу у напірній частині шнека, см.

$$Q_o = \frac{1000 \cdot Q}{3600 \cdot \rho_p}, \quad (2.33)$$

де Q_o – об'ємна продуктивність екструдера, см³/с;

Q – масова продуктивність екструдера, кг/год;

ρ_p – густина розплаву полімеру, г/см³.

2.4 Розрахунок необхідної потужності

2.4.1 Розрахунок витрати потужності в одношнековому екструдері

Знання споживаної екструдером потужності необхідне для розрахунку енергетичних витрат на виробництво виробів [15]. При сталому режимі екструзії величина споживаної потужності є показником стабільності процесу. Зазвичай контроль ведуть за потужністю, споживаною приводом.

Потужність (Вт), споживана екструдером (N), витрачається на пересування маси матеріалу вздовж спірального каналу до голівки і далі (N_1), а також на зріз матеріалу (розплаву) в зазорі між гребенем шнека і внутрішньою стінкою циліндра (N_2):

$$N = N_1 + N_2. \quad (2.34)$$

Для шнека зі змінною глибиною нарізки:

$$N_1 = 9,8 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\pi^3 (t-e) L J \eta}{t} n^2 + A_1 \Delta P n \right], \quad (2.35)$$

де A_1 – постійна прямого потоку, см³;

n – частота обертання шнека, с⁻¹;

J – коефіцієнт, см².

$$J = \frac{\pi^2 D^2 - 4t}{\pi^2} + \frac{(D+d_3)^3 - (D+d_2)^3}{3(d_3-d_2)} + \frac{2,3\pi^2 D^5 \ln \frac{h_2}{h_3}}{(t^2 + \pi^2 + D^2)(h_2 - h_3)}, \quad (2.36)$$

де ΔP – перепад тиску у голівці, Па.

Потужність споживана екструдером на пересування маси матеріалу вздовж спірального каналу до голівки і далі становить $N_1 = 77,8$ Вт.

Величина перепаду тиску у голівці складається з величин тиску на тих ділянках, що й під час розрахунків коефіцієнта опору голівки K .

Діаметр вала шнека на початку напірної зони d_2 , см:

$$d_2 = D - 2h_2.$$

Потужність N_2 розраховується наступним чином:

$$N_2 = 9,8 \cdot 10^{-7} \frac{\pi^3 D^3 e L \eta}{\delta t} n^2, \quad (2.37)$$

де L – довжина шнека, см;

t – крок нарізки, см;

δ – величина зазору між стінкою циліндра та гребенем шнека, см.

У формулах розрахунку потужності фігурує в'язкість розплаву η , яку знаходять за швидкістю зсуву таким чином.

Потужність споживана екструдером на зріз матеріалу (розплаву) в зазорі між гребенем шнека і внутрішньою стінкою циліндра становить $N_2 = 68$ Вт.

Швидкість зсуву (c^{-1}) у спіральному каналі шнека (для N_1):

$$\dot{\gamma}_{ск} = \frac{\pi^2 (D - h_{cp})(D - 2h_{cp})n}{h_{cp} \sqrt{\pi^2 (D - 2h_{cp})^2 + t^2}}, \quad (2.38)$$

де $h_{cp} = (h_2 + h_3)/2$.

Швидкість зсуву в зазорі між гребенем шнека і стінкою циліндра (для N_2):

$$\gamma_6 = \frac{\pi^2 D^2 n}{\delta \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}}. \quad (2.39)$$

Для шнека зі змінним кроком нарізки величина N_1 розраховується:

$$N_1 = 9,8 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\pi^3 (d+h)^3 d^2 \eta}{h} (G - eR)n^2 + A_2 \Delta P n \right], \quad (2.40)$$

де G – коефіцієнт, см^{-1} :

$$G = \frac{2,3}{2\Delta t} \lg \frac{\cos^2 \varphi_3}{\cos^2 \varphi_2} + \frac{\pi(\varphi_2 + \varphi_3)}{360(d+h)}. \quad (2.41)$$

Кут підйому спіральної лінії на початку напірної зони φ_2 розраховується:

$$\varphi_2 = \text{arctg} \frac{t_2}{\pi(D-h)}. \quad (2.42)$$

Крок нарізки на початку напорної зони t_2 , см:

$$t_2 = \frac{t_1 + e(i-e)}{i}. \quad (2.43)$$

Кут підйому спіральної лінії у кінці зони дозування φ_3 розраховується:

$$\varphi_3 = \text{arctg} \frac{t_3}{\pi(D-h)}. \quad (2.44)$$

Коефіцієнт R , см^{-2} розраховується:

$$R = \frac{2,3}{\pi^2(d+h)} \lg \frac{t_2^2 \cos^2 \varphi_2}{t_3^2 \cos^2 \varphi_2} + \frac{\pi(\varphi_2 - \varphi_3)}{180(d+h)\Delta t}. \quad (2.45)$$

Для визначення в'язкості розплаву в каналі шнека необхідно знати швидкість зсуву (с^{-1}):

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi^2(D-h)dn}{30h\sqrt{4\pi^2d^2 + (t_2 + t_3)^2}}. \quad (2.46)$$

Потужність (Вт), споживана шнеком зі змінним кроком на зріз розплаву в зазорі (N_2):

$$N_2 = 4,9 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\pi^3 D^2 (d+h) e [2(t_2 - t_3) + 2,3\Delta t (\lg t_2 - \lg t_3) \eta n^2]}{\delta \Delta t} \right]. \quad (2.47)$$

Для визначення в'язкості розплаву у зазорі між гребенем шнека і стінкою циліндра:

$$\dot{\gamma}_6 = \frac{\pi^2 D^2 n}{\delta \sqrt{4\pi^2 D^2 + (t_2 - t_3)^2}}. \quad (2.48)$$

Потужність двигуна $N_{дв}$ приводу екструдера має бути вищою на величину ККД = 0,4...0,6, щоб компенсувати невраховані втрати: на подолання сил тертя, на механічні втрати в приводі екструдера тощо, тобто:

$$N_{дв} = \frac{N}{0,4...0,6}. \quad (2.49)$$

Розразунок загальної потужності екструдера, згідно формули (2.34) становить 145,8 Вт.

2.5 Вибір крокового двигуна

За отриманим результатом розрахунку необхідної потужності в одношнековому екструдері, що становить – 145,8 Вт, можна обрати кроковий двигун, що задовольняє розрахованим параметрам та буде встановлений до основної конструкції екструдера. Обраний двигун зображений на рис. 2.5.

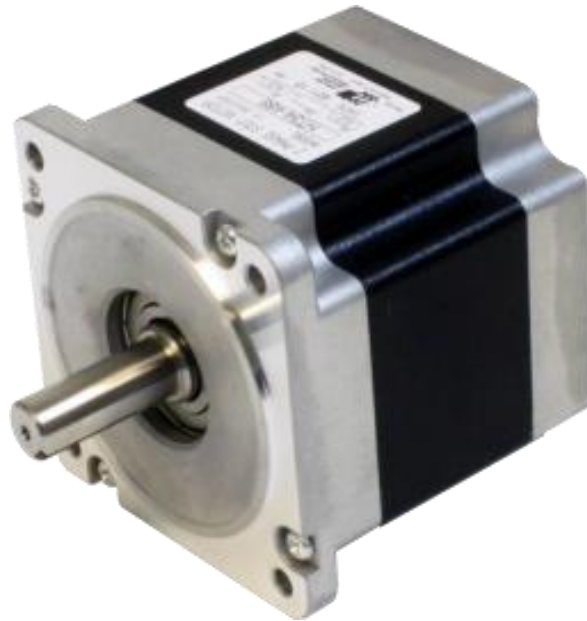


Рисунок 2.5 – Кроковий двигун «NEMA 34», що був обраний відповідно до отриманих результатів розрахунків

Характеристики крокового двигуна «NEMA 34»:

- максимальний струм на фазу – 5.6 А;
- максимальна потужність – 100 Вт;
- максимальний утримуючий момент – 8,898.00 мНм;
- максимальна довжина – 125.50 мм;
- максимальна кількість проводів – 8;
- максимальна робоча температура – 50.00 °С;
- мінімальна робоча температура – -20.00 °С;
- діаметр валу – 12.70 мм;
- розмір рами – NEMA 34;
- кут кроку – 1.8° .

2.6 Висновки до розділу

Кроковий двигун «NEMA 34» – найпотужніший кроковий двигун, що підходить до розробляємої конструкції, але його потужності у розмірі – 100Вт, не

вистачає для продуктивної роботи шнекового екструдеру, яка потребує, за результатами розрахунків, потужність величиною – 145,8 Вт.

Тому було прийнято рішення додати до розроблюваної конструкції планетарний редуктор із числом одиниць «один до трьох», що підвищить наявну потужність мотора у три рази. Обраний планетарний редуктор до крокового двигуна «NEMA 34» зображений на рис. 2.6



Рисунок 2.6 – Обраний планетарний редуктор до крокового двигуна «NEMA 34»

Технічні характеристики планетарного редуктора:

- передаточне число: 1 до 3;
- номінальне число обертів: 4000;
- максимальне число обертів: 8000;
- вага: 1 кг.

3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА

3.1 Розробка 3D моделі шнекового екструдера

Під час створення шнекового екструдера для 3D принтера слід дотриматись певних вимог:

- зменшення розмірів екструдера до максимуму є важливим для підвищення швидкості друку. Це досягається через зменшення маси екструдера та, відповідно, інерції його каретки. Також це призведе до зниження вартості координатної системи 3D принтера, оскільки буде зменшено необхідну жорсткість всієї конструкції;
- забезпечити лінійну продуктивність шнекового екструдера, що перевищує максимальну швидкість друку 3D принтера, є важливим завданням;
- дотримання стандартів при виготовленні шнеків та циліндрів є стратегічно важливим для зменшення вартості виготовлення екструдера. В якості стандарту рекомендується застосовувати норми виготовлення шнеків для термопласт автоматів.

На рис. 3.1 наведено структурну схему шнека з його основними геометричними параметрами.

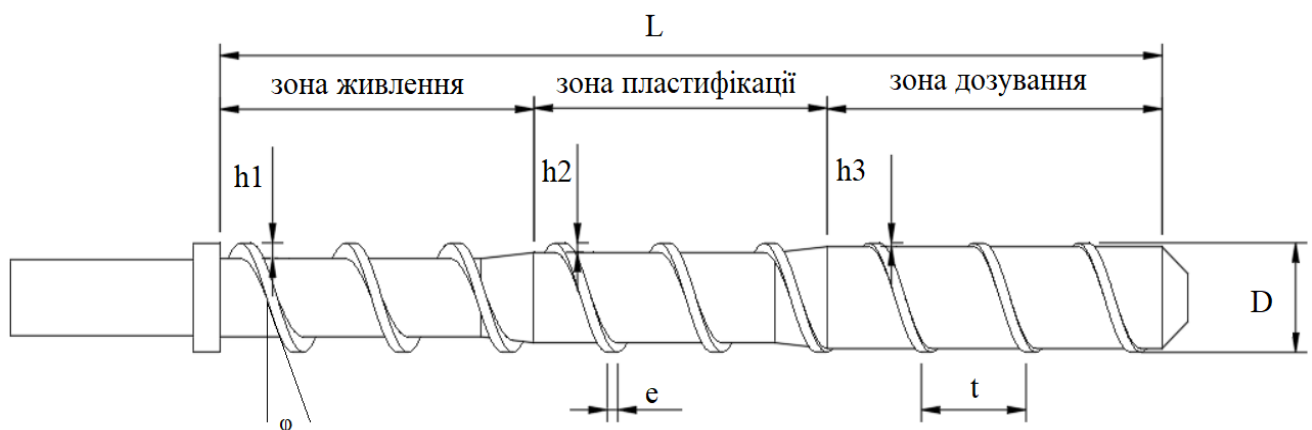


Рисунок 3.1 – Структурна схема шнека з його основними геометричними параметрами

У якості основних геометричних параметрів шнека виступають:

- діаметр (D);
- довжина (L);
- крок гвинтової нарізки (t);
- глибина нарізки (h);
- ширина витка гребеня (e);
- величина зазору між гребенем шнека та внутрішньою стінкою циліндра (δ);
- кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека (φ);
- зонність (три зони);
- число заходів нарізки шнеку λ ($\lambda = 1$).

Для обробки термопластів застосовують циліндричні шнеки з постійним кроком та змінною глибиною гвинтового каналу. Ці шнеки вирізняються своєю простотою виготовлення та високою продуктивністю [17]. Довжина шнеків L виражається співвідношенням до їх діаметра D (L/D), і це співвідношення може змінюватися в інтервалі від 8 до 40. Параметри D та L/D є основними характеристиками одношнекового екструдера та зазначаються у його марці. Для зменшення масогабаритних параметрів екструдера обрано шнек марки ЧП 20x8, який відрізняється найменшими серед стандартних шнеків розмірами та масою. Це суттєво впливає на швидкість переміщення екструдера в режимі друку через меншу інерцію та навантаження на крокові двигуни осей X та Y .

Для перевірки ефективності даного екструдера необхідно розрахувати лінійну продуктивність шнекового екструдера, яка представляє собою довжину пластикового дроту, екструдованого за 1 секунду. Це значення буде залежати від діаметра встановленого сопла (планується використовувати сопла з діаметром від 1 мм до 5 мм). Отримане значення лінійної продуктивності повинно перевищувати максимальну швидкість друку екструдера 3D принтера, яка визначена в технічному завданні [18]. Для розглядуваного екструдера максимальна швидкість друку (переміщення екструдера в робочому режимі) має становити 50 мм/сек.

Для розрахунку лінійної продуктивності шнека можна скористатися формулою:

$$L = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (3.1)$$

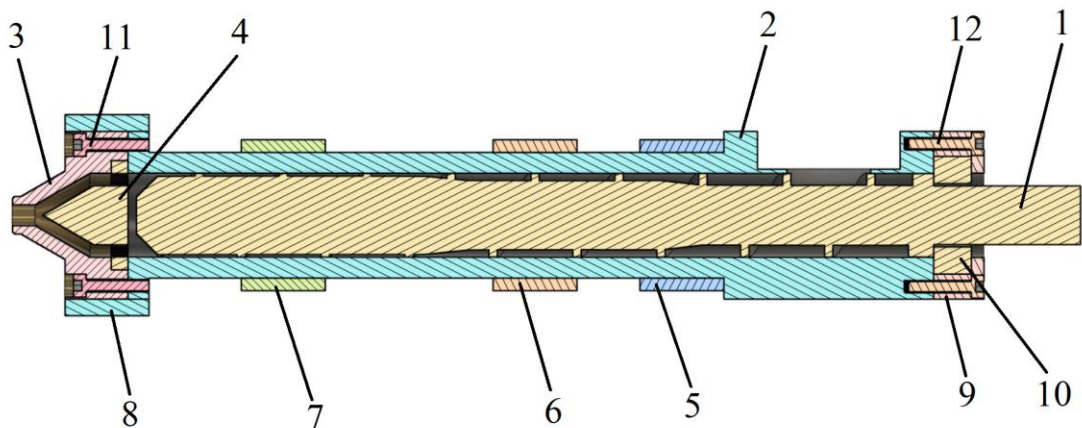
де L – лінійна продуктивність екструдера, см/хв;

Q – об'ємна продуктивність, см³/хв;

d – діаметр використовуваного сопла, см.

Передбачається розробити одношнековий екструдер без зони дегазації, з одним напрямком подачі матеріалу, що має змінну глибину спірального каналу (із змінною глибиною нарізки). Це обумовлено зниженням масогабаритних параметрів та вартості виготовлення екструдера, як визначено у технічному завданні.

Структурна схема розробленого шнекового екструдера зображена на рис. 3.2.



1 – шнек; 2 – циліндр; 3 – сопло; 4 – вузол фільтрації; 5 – кільцевий нагрівальний елемент живлення; 6 – нагрівальний кільцевий елемент пластифікації; 7 – нагрівальний кільцевий елемент дозування; 8 – нагрівальний кільцевий елемент сопла; 9 – кришка екструдера; 10 – упорний підшипник 51102 CX; 11 – гвинти кріплення сопла $\text{din } 912 \text{ M3}$; 12 – гвинти кріплення кришки екструдера $\text{din } 912 \text{ M3}$.

Рисунок 3.2 – Структурна схема шнекового екструдера

Загальний зовнішній вигляд розробленої 3D моделі шнекового екструдера зображений на рис. 3.3 та рис. 3.4.



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд розробленої 3D моделі шнекового екструдера

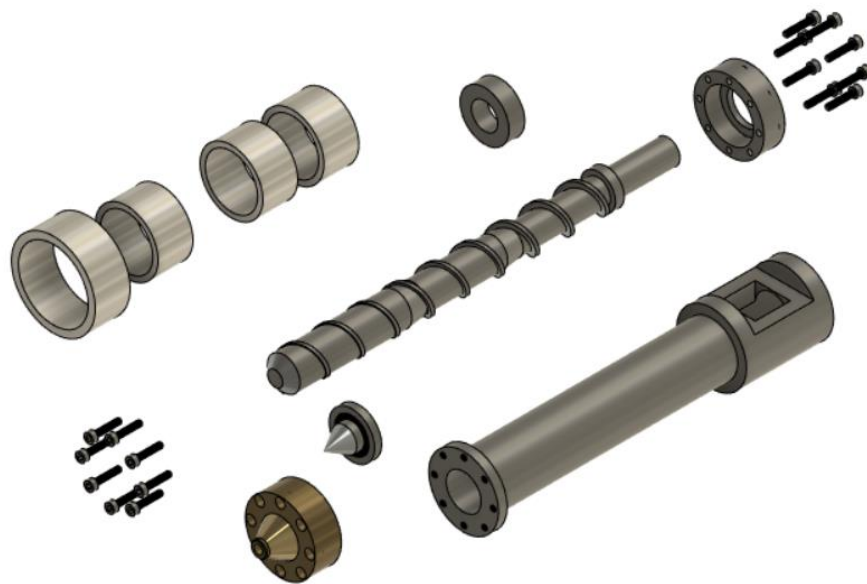


Рисунок 3.4 – Взрив-схема розробленого шнекового екструдера

У якості нагрівачів використовуються кільцеві металеві нагрівачі з ізолятором з слюдопласта (міканіта). Нагрівачі мають наступні характеристики:

- максимальна потужність: 4 Вт/см²;
- температура роботи: 350 ° C;
- мінімальний діаметр (внутрішній): 25 мм;
- максимальний діаметр (внутрішній): 380 мм;

- товщина стінки нагрівача: 3-4 мм;
- мінімальна ширина: 20 мм;
- максимальна ширина: 20 мм;
- напруга: 220В.

3.2 Розробка механізму подачі шнекового екструдера

У програмі «Fusion 360» було розроблено систему кріплення шнекового екструдера до пересувної каретки основної конструкції 3D принтеру та загальне з'єднання мотору зі шнековим екструдером через трансмісію.

У розробленій конструкції, через свою надмірну вагу, мотор та редуктор залишаються у статичному положенні, прикріплені у центрі зверху до загальної конструкції 3D принтера, у той момент як шнековий екструдер буде мати змогу пересуватись по X та Y осям та бути поєднаним до редуктора завдяки трансмісії.

Результат розробленої конструкції можна побачити на рис. 3.5 – 3.8.

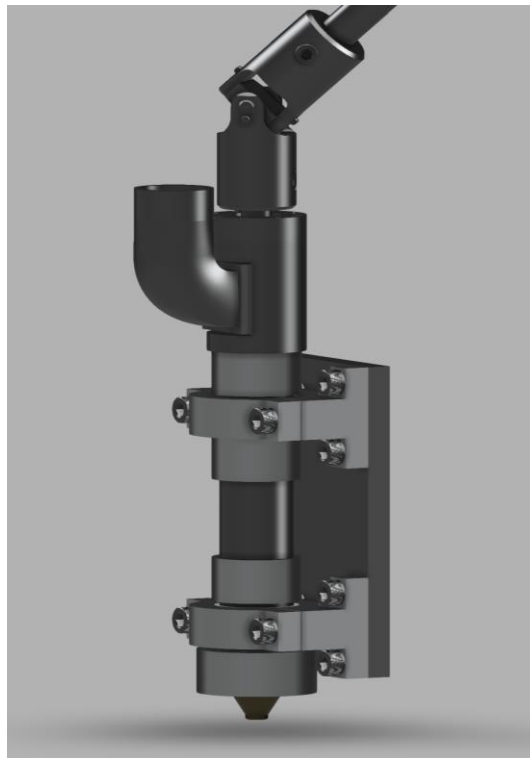


Рисунок 3.5 – Розроблена система з'єднання шнекового екструдера до пересувної каретки 3D принтеру

У розробленій системі кріплення шнекового екструдера до пересувної каретки використовуються дві опори із 4 гвинтами М6х16мм та 8 гвинтами М6х12мм. Для того, щоб тепло від екструдера не передовалось на пересувну каретку, проміж екструдером та опорами будуть встановлені термоізолюючі кільця.

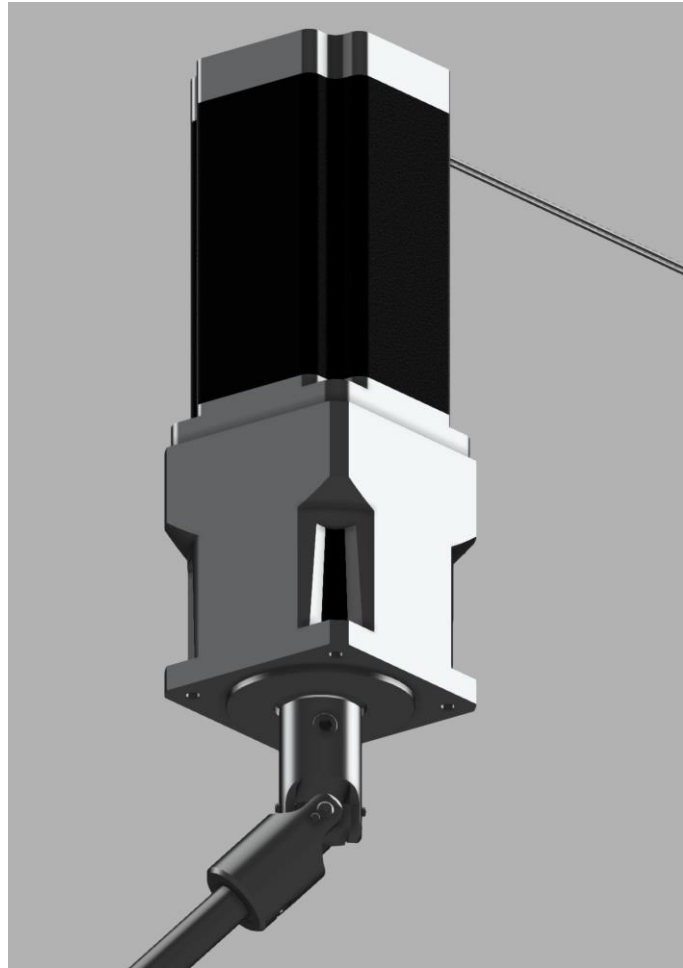


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд крокового двигуна «Nema 34» та редуктору

Як можна побачити на рис. 3.6, кроковий двигун «Nema 34» поєднаний із планетарним редуктором, до якого, у свою чергу, встановлена трансмісія, через яку буде передаватись крутний момент від двигуна до шнека. Завдяки планетарному редуктору із числом одиниць «один до трьох» (співвідношення зубчиків внутрішньої шестерні до зовнішньої) буде підвищуватись крутний момент із меншою швидкістю обертання крокового двигуна.

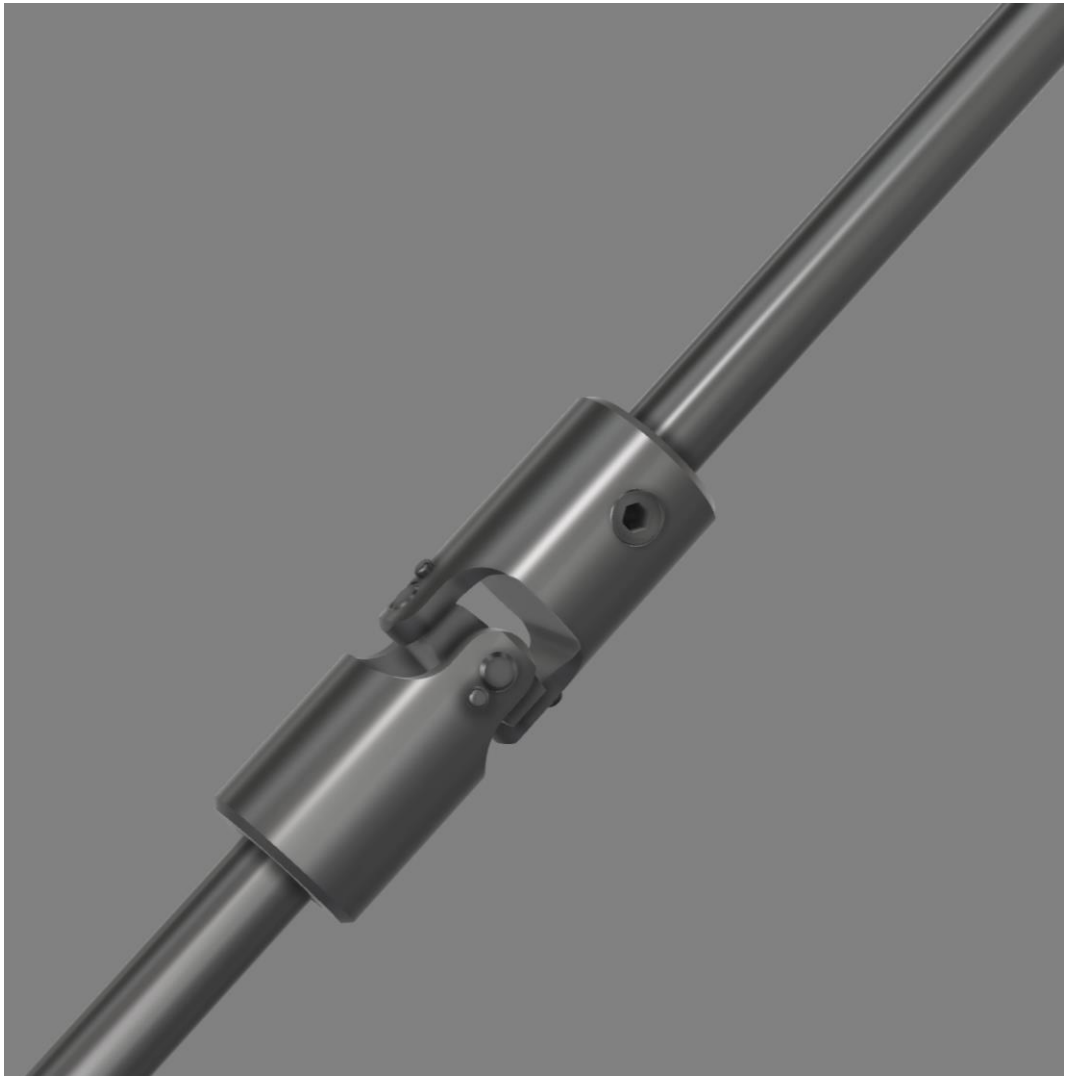


Рисунок 3.7 – Детальний вигляд центрального вузла трансмісії

Дана трансмісія виготовлена із сталі. Завдяки даному матеріалу, тепло, що буде виробляти кроковий двигун, переходитиме на сталеву трансмісію. Але, завдяки довжині даної трансмісії (40-50см), тепло не буде встигати досягати екструдера, бо буде охолоджуватись.



Рисунок 3.8 – Загальний вигляд поєднання шнекового екструдера та крокового двигуна

Також було розроблено систему подачі робочого матеріалу до шнекового екструдера. Дана модель була розроблена таким чином, щоб у неї можна було засипати робочий матеріал (гранули) у процесі 3D друку та кріплення даної моделі здійснюється у хвості екструдера.

Конструкція системи подачі робочого матеріалу до шнеку зображена на рис. 3.9.

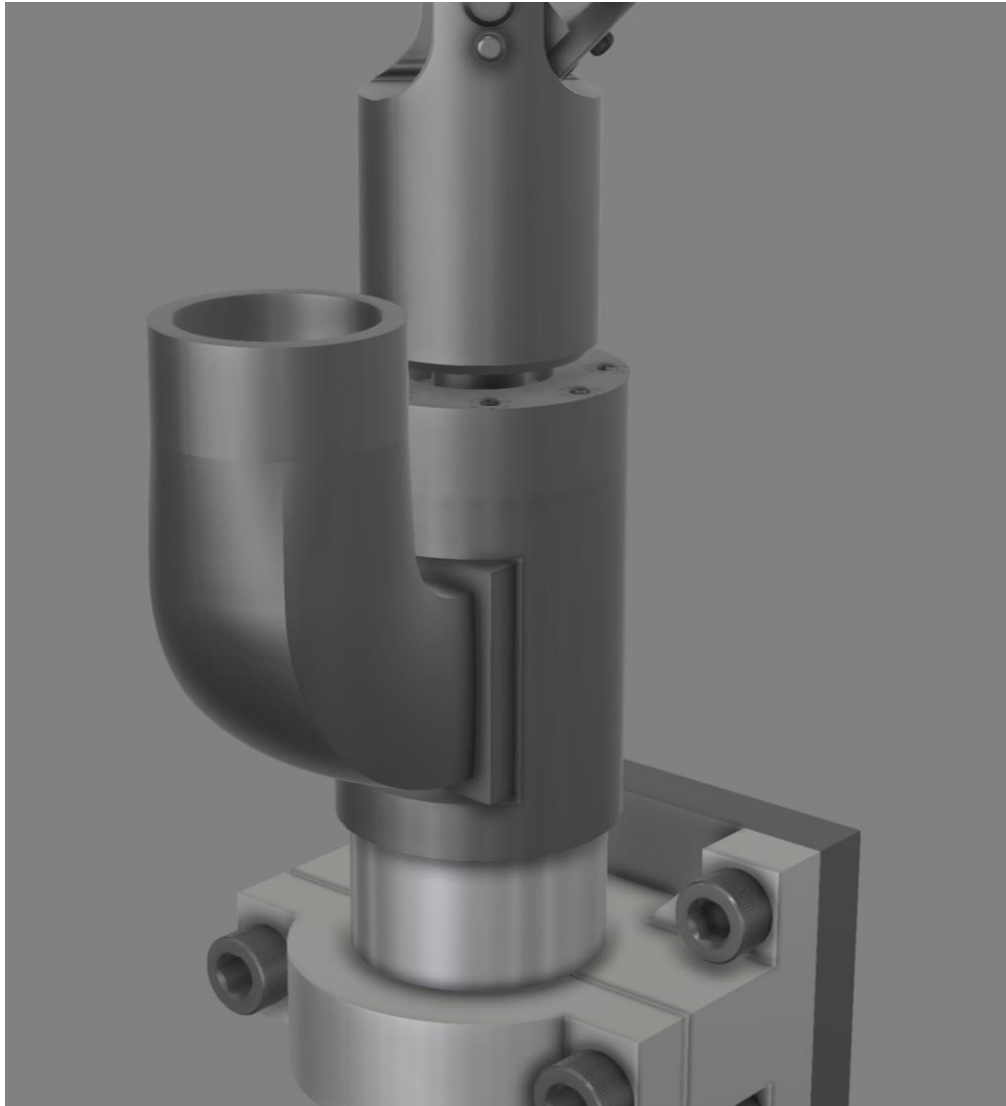


Рисунок 3.9 – Конструкційна модель системи подачі робочого матеріалу до шнекового екструдера

4 СИМУЛЯЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРУ

4.1 Моделювання температурних режимів роботи шнекового екструдера

Для FFF 3D друку використовують термопластичні полімери, які нагріваються до температури, при якій вони стають в'язкотекучими, і потім екструдуються через сопло. Піддавання пластиків нагріванню призводить до зміни їхнього стану через збільшення середньої теплової енергії макромолекул полімерів, що в свою чергу збільшує рухливість макромолекул.

Гнучкість молекули полімеру обумовлена значною її довжиною, яка може перевищувати діаметр у тисячі разів. Додаткова гнучкість виникає внаслідок деформації валентних кутів та збільшення міжчасткових відстаней при нагріванні. Обертання частинок макромолекули навколо простих хімічних зв'язків без їх розриву потребує значно менше енергії. Цей процес називають конформацією. Завдяки тепловому руху окремих ланок макромолекул полімерів та їх великій гнучкості, відносно переміщення молекул пластику відбувається частково.

Існують три стани аморфних полімерів, які визначаються властивістю гнучкості молекул:

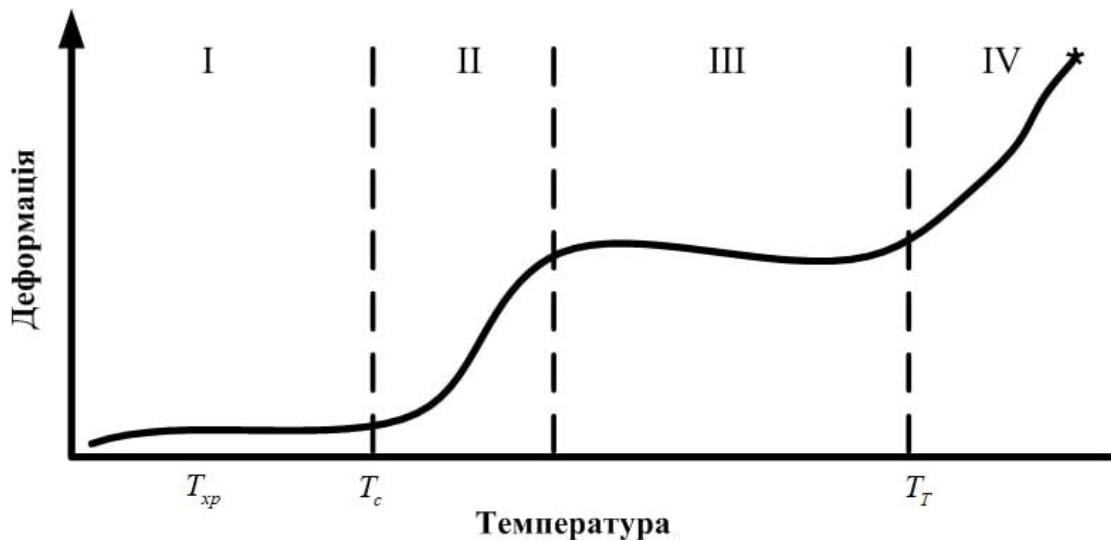
- склоподібний стан, або, коротше кажучи, стан застоювання. При низьких температурах пластик повністю застигає та стає твердим. У цьому стані відсутня будь-яка сегментарна рухливість, оскільки молекулі не мають достатньо теплової енергії. Період перебування у застиглому стані у пластику практично необмежений;

- стан високої еластичності. Сегменти починають зміщуватися, а макромолекули отримують здатність приймати різні конформації, від повністю згорнутої до випрямленої. При деформації у стані високої еластичності молекули полімеру можуть значно подовжуватися, а при застиганні повертаються у початковий стан;

- стан в'язкотечії. Цей фізичний стан полімеру можливий при значному нагріванні. У цьому випадку пластик розплавляється і стає рідким навіть при

слабкому впливі на нього. У цьому стані як сегменти, так і окремі молекули активно рухаються.

Під час поступового підігрівання полімеру спостерігається зміна його фізичного стану у конкретному діапазоні температур, але зазвичай для визначення температури переходу береться середнє значення в цьому інтервалі. Такі переходи можна чітко спостерігати на термомеханічній кривій (рис. 4.1).



I – область склоподібного стану, II – перехідна область, III – область високої еластичності, IV – область в'язкотекучого стану, T_{xp} – температура крихкості,

T_c – температура склування, T_T – температура в'язкості

Рисунок 4.1 - Термомеханічна крива термопластичного полімеру

На першому етапі з низькою температурою графік показує дуже низький рівень деформації. Після переходу від склоподібного до високоеластичного стану настає перехідний стан, коли підвищення температури призводить до певного рівня деформації, який залишається стабільним на всьому інтервалі температур для високоеластичного стану. У в'язкотекучому стані рівень деформації зростає різко. Збільшення деформації триває до досягнення температури моменту, коли полімер починає розкладатися.

У ході процесу 3D друку особливо важливим є інтервал температур між плинністю та розкладанням, оскільки від цього інтервалу залежить ступінь чутливості процесу друку до змін параметрів режиму.

Для забезпечення ефективної роботи шнекового екструдера важливо утримувати температуру вище температури в'язкості у соплі, а також забезпечити, щоб температура у ділянці дозування була вище температури склування, а в області пластифікації – вище температури склування. Також важливо, щоб температура за межами зони подачі була нижчою за температуру склування.

Дані вимоги визначаються тим, що при перегріві елементів кріплення підводячого шланга, який подає гранульований або подрібнений пластик у зону живлення екструдера, може відбутися плавлення матеріалу. Це, у свою чергу, призведе до збільшення навантаження на кроковий двигун екструдера та може спричинити розплавлення пластика у шлангу подачі, що може призвести до виходу його з ладу. Також можливий перегрів крокового двигуна, розташованого за зоною живлення. В області сопла та зоні дозування температура, яка нижча від температури в'язкості, також може призвести до збільшення навантаження на кроковий двигун, створення агрегатної нерівномірності матеріалу, що екструдується, та погіршення адгезії між шарами деталі, яку друкується, через недостатню температуру.

Для кожного виду пластмаси потрібні свої температурні параметри. Крім того, температурні режими будуть змінюватися в залежності від типу використаного наповнювача у пластмасі та, в меншій мірі, від наявності інгібіторів, барвників, змащувальних речовин та інших компонентів.

У даній роботі, у якості робочого матеріалу, буде розглянуто температурні режими екструзії ABS пластику. Обрання даного пластику пояснюється тим, що це один з найпоширеніших матеріалів у сфері 3D друку. Запропонована методика дозволить легко та ефективно моделювати режими екструзії та інших видів обробки цього пластику.

Для обраного ABS пластику зона температур в'язкості знаходиться у діапазоні 215-220 °C, а температури, що належать до зони склування – 110-120 °C.

У досліджувальній конструкції використовується чотири основних кільцевих нагрівачів:

- кільцевий нагрівач зони сопла;
- кільцевий нагрівач зони дозування;
- кільцевий нагрівач зони пластифікації;
- кільцевий нагрівач зони живлення.

Під час проходження першого варіанту моделювання були обрані наступні показники температури: кільцевий нагрівач сопла – 230 °С, кільцевий нагрівач зони дозування – 230 °С, кільцевий нагрівач зони пластифікації – 190 °С; кільцевий нагрівач зони живлення – 120 °С. Результати першого моделювання наведені на рис. 4.2 та 4.3.

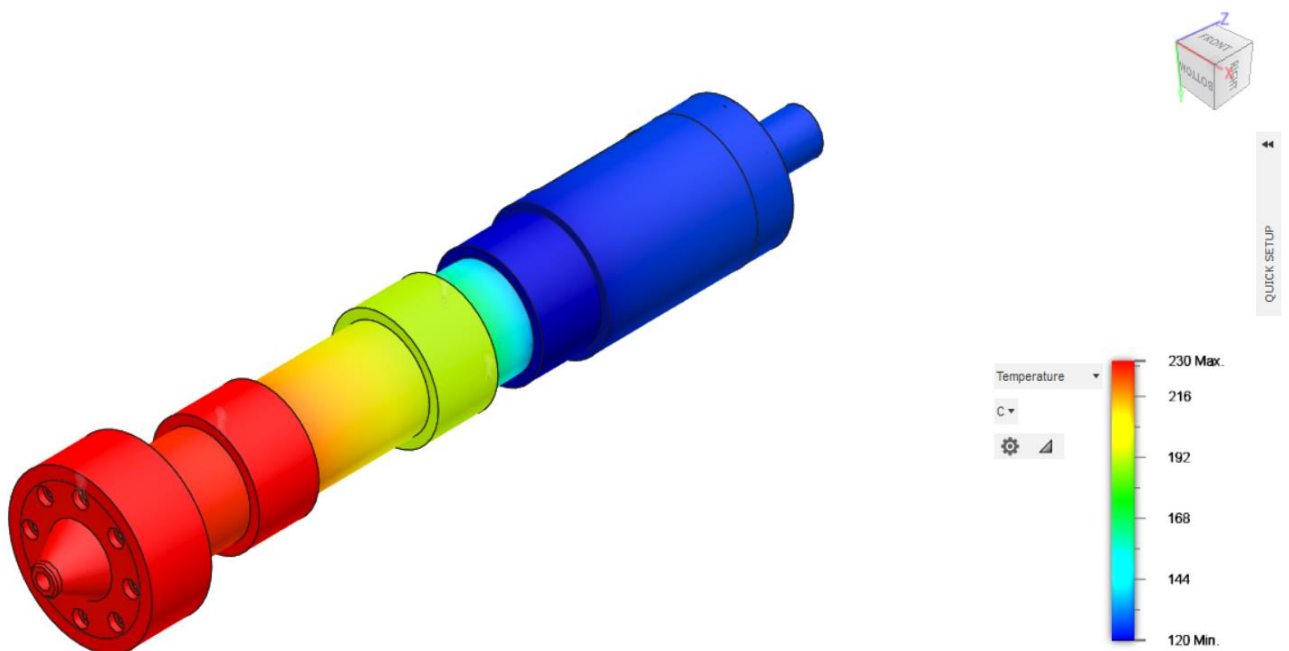


Рисунок 4.2 – Результат першого температурного моделювання

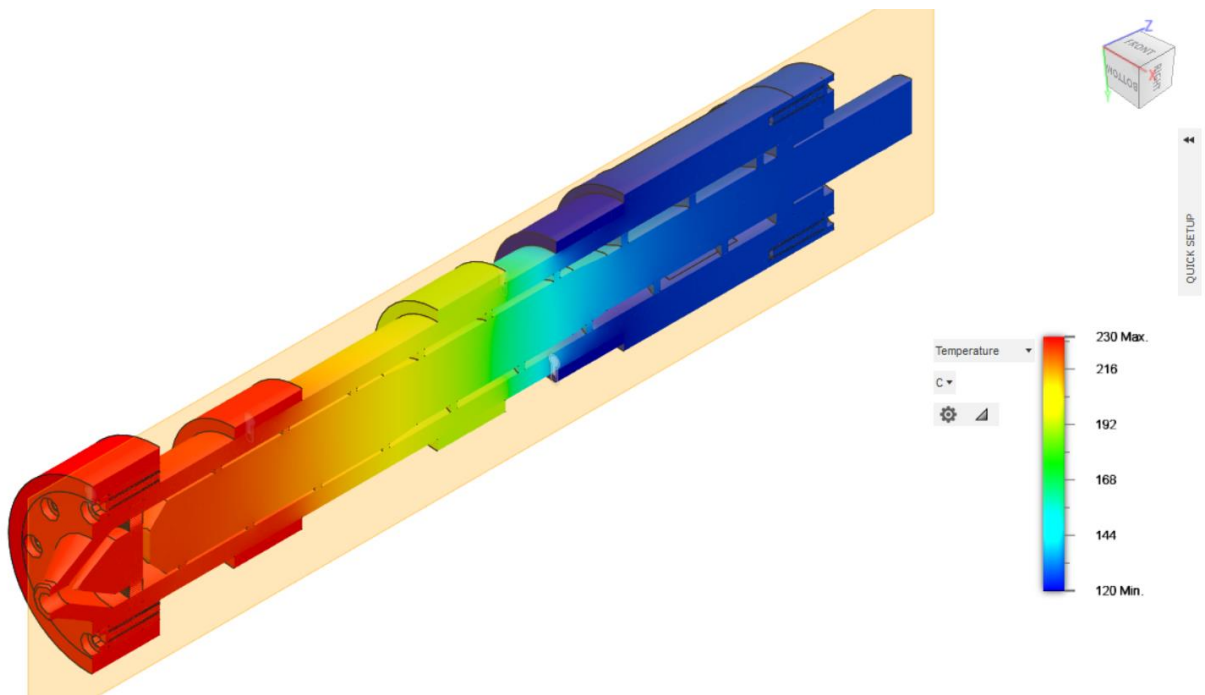


Рисунок 4.3 – Переріз шнекового екструдера за результатом першого температурного моделювання

З отриманих результатів першого моделювання видно, що температурні режими у зоні дозування та пластифікації повністю відповідають запланованим режимам. Однак температура вала-перехідника крокового двигуна та місця кріплення шланга подачі складає $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, що може призвести до виходу з ладу крокового двигуна, максимально допустима температура роботи якого становить $85\text{-}90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Також існує ризик спікання пластику в шлангу подачі, що може призвести до його застрягання.

Таким чином у другому моделюванні буде використовуватись додаткове рідинне охолодження для ділянок шнекового екструдера, які перегріваються.

Друге моделювання буде проводитись при менших температурних режимах зон екструдера, що дозволить значно заощадити електричну енергію, та з додатковим охолодженням рідини верхньої частини екструдера до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для другого моделювання були обрані наступні температури: кільцевий нагрівач сопла – $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, кільцевий нагрівач зони дозування – $220\text{ }^{\circ}\text{C}$, кільцевий нагрівач зони пластифікації – $150\text{ }^{\circ}\text{C}$; кільцевий нагрівач зони живлення – $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,

охолодження верхньої частини екструдера до 20 °С. Результати другого температурного моделювання наведено на рис. 4.4 та 4.5.

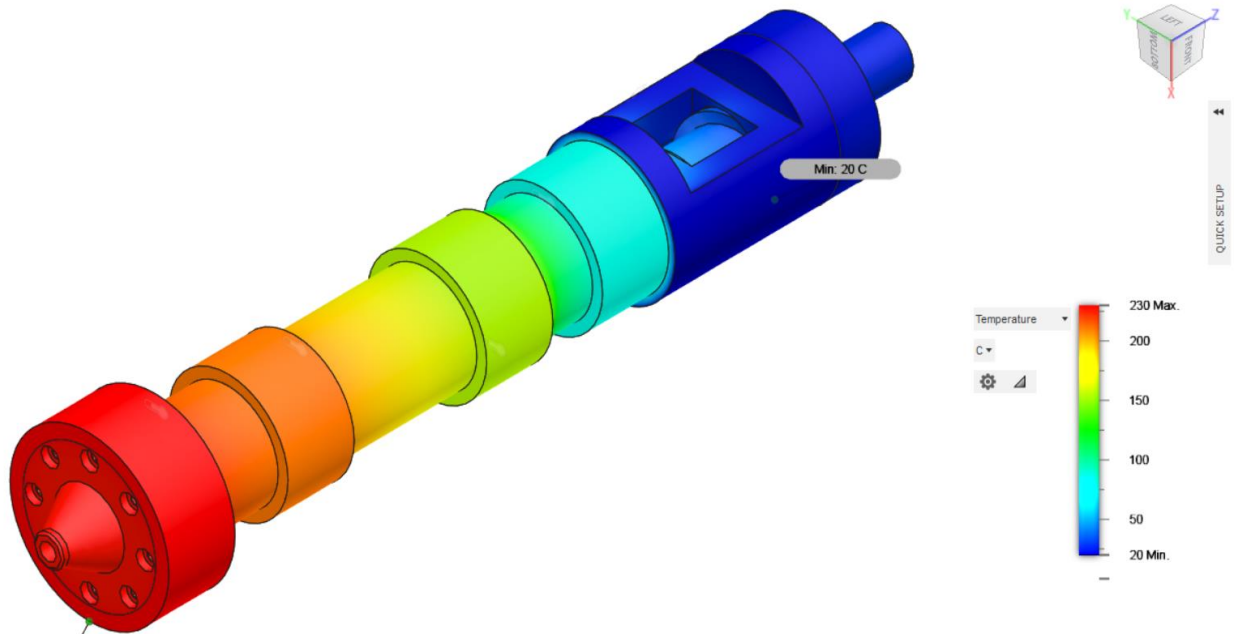


Рисунок 4.4 – Результат другого температурного моделювання

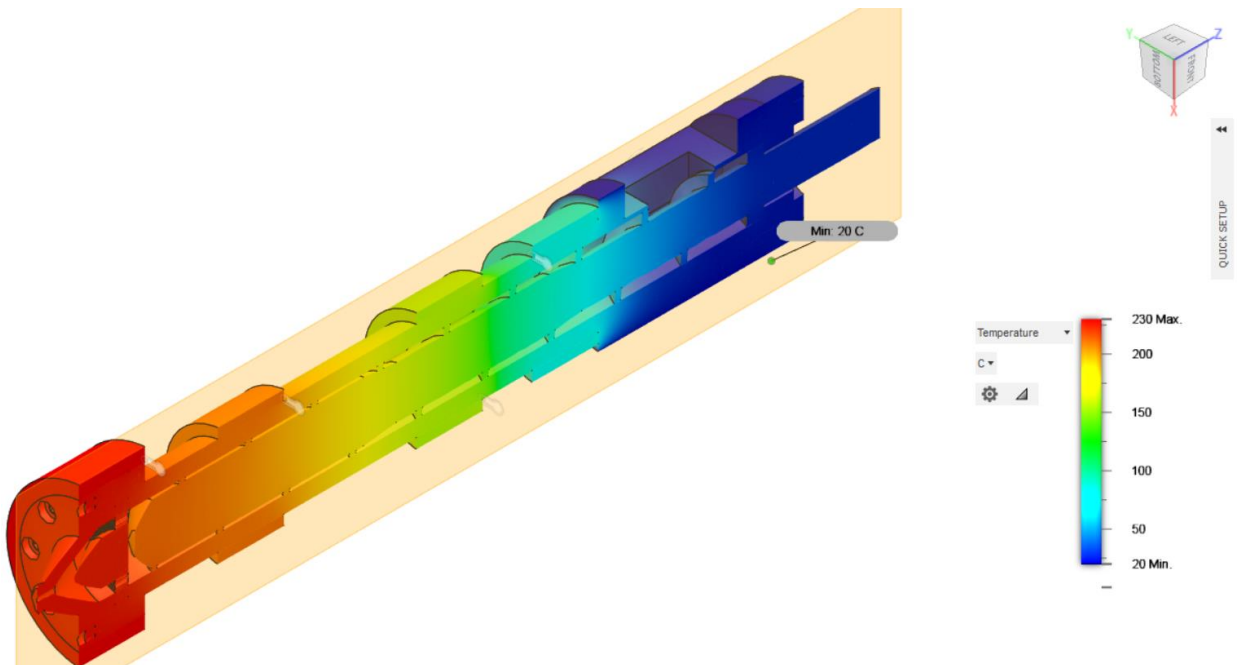


Рисунок 4.5 – Переріз шнекового екструдера за результатом другого температурного моделювання

Результат другого температурного моделювання відповідає запланованим режимам екструзії. Однак, нагрівальні елементи, за винятком нагрівального елемента сопла, працюють при менших температурах. Догрівання до необхідної температури здійснюється за рахунок взаємного прогріву.

Також, як можна побачити на рис. 4.5, зона дозування знаходиться у діапазоні температур до 20 градусів. Отже, можна зробити висновок, що деталь, яка відповідає за завантаження робочого матеріалу до екструдера може бути надрукована із пластику ABS, що зробить вагу конструкції меншою.

4.2 Створення заходів безпеки під час розробки шнекового екструдера

Розрахунок та моделювання шнекового екструдера виконувалися у лабораторії 3D прототипування кафедри Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки.

Лабораторія 3D прототипування була заснована у 2017 році як студентський гурток під керівництвом доцента кафедри КІТАР Євгенія Разумова-Фризьюка. У рамках роботи гуртка реалізовувались дипломні проекти, відбувалась збірка 3D принтерів, лазерних граверів та компактних фрезерних верстатів. Колектив гуртка активно брав участь у різноманітних конференціях та виставках, включаючи TechFest 2018 (м. Дніпро), TechFest 2019 (м. Дніпро), Зброя та безпека 2018 р. (м. Київ), та Зброя та безпека 2019 р. (м. Київ).

У квітні 2020 року адміністрацією ХНУРЕ було ухвалено рішення про створення науково-дослідної лабораторії з 3D прототипування. Лабораторія активно займається проведенням науково-дослідних робіт та розробкою та виготовленням різноманітних пристроїв, таких як 3D принтери, лазерні гравери і малогабаритні фрезерні верстати. Ці технічні засоби використовуються для виконання лабораторних та практичних завдань у рамках курсів "Технології формоутворення", "Системи з числовим програмним забезпеченням" та "Конструкції роботів".

Ключові види діяльності лабораторії 3D прототипування:

- 3D друк конструкційних та декоративних виробів;
- наукові дослідження у напрямі ЧПУ систем;
- проектування, виготовлення та ремонт 3D принтерів (технології FDM/FFF, DLP/LCD, на даний момент результатом є 9 реалізованих конструктивних рішень), лазерних граверів, малогабаритних фрезерних верстатів;
- навчання школярів та студентів 3D моделюванню для сфери адитивного виробництва на базі таких програм як – Tinkercad, SketchUp, Blender та Fusion 360;
- здійснюється проектування та створення 3D принтера, який використовує порошкові матеріали, такі як гіпс, пісок і кераміка, для друку;
- виконуються розробка та виготовлення багатофункціональної координатної системи, яка володіє можливістю 3D друку (за допомогою FDM/FFF шнекового екструдера), лазерної гравіровки (з CO2 лазером) та фрезерування;
- ведуться роботи з проектування та виготовлення надлегкого шнекового екструдера для 3D друку.

Лабораторний простір оснащений входними дверима, вікнами та штучним освітленням, яке забезпечує комфортні умови для роботи [19]. У приміщенні розташовано 9 розеток із напругою 220 В та 2 розетки із напругою 380 В. Дотримані вимоги пожежної безпеки – в приміщенні встановлені вогнегасник, пісок та пожежна ковдра.

Схема лабораторного приміщення 3D прототипування зображена на рис. 4.6.

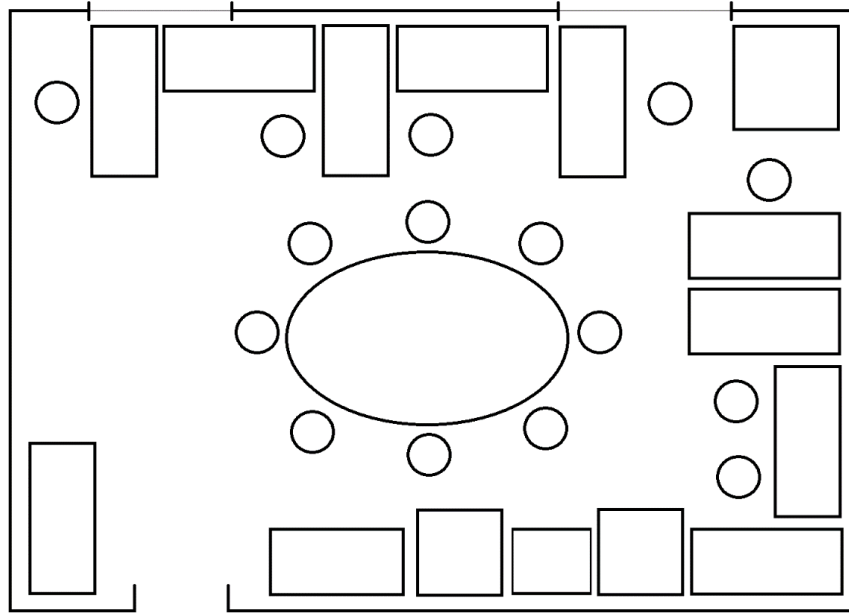


Рисунок 4.6 – Схема лабораторного приміщення 3D прототипування

Виконаємо розрахунок параметрів вентиляції, які є обов'язковими для вказаного приміщення. У механічній майстерні, де проводиться опалення, вентиляція та кондиціонування, необхідна швидкість повітрообміну становить 3-5 м³/ч. Скористаємося формулою для визначення мінімально необхідного повітрообміну для механічної майстерні, враховуючи коефіцієнт – 3, об'єм приміщення 130 м³.

$$L = n \cdot V, \quad (4.1)$$

де L – необхідний обіг повітря у приміщенні;

n – кратність обігу повітря у приміщенні;

V – об'єм приміщення.

У результаті отримуємо розрахунок:

$$L = 130 \cdot 3 = 390 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для людини, яка постійно перебуває у приміщенні достатній норматив – 60 м³/ч. За отриманими результатами розрахунків можна зробити висновок, що у лабораторії на постійній основі можуть перебувати до 6 осіб.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи на тему «Моделювання процесу роботи шнекового екструдера 3D принтеру» було проведено дослідження та розробку шнекового екструдера для 3D принтеру домашнього використання.

У ході дослідження було виконано аналіз видів та сфер використання шнекових екструдерів. Із даного аналізу було встановлено, що шнековий екструдер – це промислове обладнання, яке використовується для обробки і формування різних матеріалів, перетворюючи їх зі стану сировини у бажану форму або продукт. Поділяють шнекові екструдери на три основні види: одношнековий, двошнековий, багатошнековий. Використовують перелічені види екструдерів у таких видах промисловостей, як: харчова, пластикова, фармацевтична, будівнича, хімічна, енергетична, рециклічна.

Наступним кроком у кваліфікаційній роботі було проведено розрахунок фізичних та геометричних параметрів шнекового екструдера. У процесі виконання роботи було розраховано та отримано величини наступних параметрів: зони шнеку, глибина нарізки, крок гвинтової нарізки, ширина гребеня, радіальний зазор, продуктивність екструдера, тепловий розрахунок, розрахунок необхідної потужності.

За результатами виконаних розрахунків було обрано кроковий двигун «Nema 34» – найпотужніший кроковий двигун, що підходить до розробляємої конструкції, але його потужності у розмірі – 100Вт, не вистачає для продуктивної роботи шнекового екструдера. Тому було зроблено висновок, що потужність обраного двигуна потрібно підвищити до необхідного значення, додавши до конструкції додатковий елемент – планетарний редуктор із числом одиниць «один до трьох», що підвищить потужність крокового двигуна у три рази.

Завдяки отриманим результатам геометричних розрахунків, у програмі «Fusion 360» було розроблено 3D модель шнекового екструдера, систему подачі робочого матеріалу до шнеку, кроковий двигун із встановленим на ньому

планетарним редуктором та трансмісію, що об'єднує та передає обертальний момент із крокового двигуна на шнековий екструдер.

Для забезпечення ефективної роботи шнекового екструдера важливо дотримуватись усіх норм температурних режимів на всіх ділянках шнеку. Для визначення оптимальних температурних режимів роботи шнекового екструдера, було проведене моделювання у програмі «Fusion 360», у якості досліджуваного матеріалу було обрано ABS пластик, як найбільш універсальний із усіх видів пластиків. Результатом даного моделювання було встановлено, що конструкція екструдеру та її параметри відповідають запланованим режимам екструзії.

У ході кваліфікаційної роботи було розраховано фізичні та геометричні параметри, побудовано 3D модель та визначено оптимальні режими роботи шнекового екструдеру, що відповідають запланованим режимам та значенням.

ПЕРЕЛІК ДжЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Документація. звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст] – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021. 55 с.
3. Скрипник К.Є. Моделювання та розрахунок дозування пластику у шнековому екструдері // «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023, Випуск 2, с. 374-380: матеріали 2-ої Міжнародної конференції, Харків, 24.11 - 01.12 2023 р.: тези доповідей / [редкол. І.Ш. Невлюдов (відповідальний редактор)].-Харків: [електронний друк], 2023. – 404 с.
4. Скрипник К.Є. Аналіз та перспективи застосування технології екструдерів для гранул // Виробництво & Мехатронні Системи 2021: матеріали V-ої Міжнародної конференції, Харків, 21-22 жовтня 2021 р.: тези доповідей / [редкол. І.Ш. Невлюдов (відповідальний редактор)].-Харків: [електронний друк], 2021. 128-130 с.
5. Удосконалення конструкції вузла екструдера мобільної робототехнічної платформи для 3D-друку великомасштабних структур // «Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля», Випуск 5, с. 28-34 / І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, В.Ю. Грицюк. Харків: ХНУРЕ, 2022. 275 с.
6. Основи наукових до сліджень/Упоряд.: Олександров Ю.М., Андрусевич А.О., Чала О.О. Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2017. – 344 с.

7. Karwe M. V; Godavarti S. (2019), Accurate measurement of extrudate temperature and heat loss on a twin-screw extruder. *Journal of Food Science*, 62(2), 367-372.
8. 3DPlast [Електроний ресурс] Режим доступу: <https://3dplast.biz/a398993-tipy-ekstruderov-dostoinstva.html>
9. Automatic Machine of Plastic Bottles and Aluminum Cans Collection for Recycling // «*Journal of Universal Science Research*», Випуск 11, с. 169-178 / I. Zharikova, I. Nevliudov, S. Maksymova, O. Chala. Харків: ХНУРЕ, 2023.
10. 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
11. Simulation of flexible printed structures design for mobile robot platform // «*Journal of Natural Sciences and Technologies*», Випуск 2, том 2 / Iryna Zharikova, Igor Nevliudov, Sergiy Novoselov, Dmytro Nikitin, Rauf Allakhveranov. Харків: ХНУРЕ, 2023.
12. Campbell, G. A., Spalding, M. A., and Carlson, F., “Prediction of Screw Temperature Rise in Single Screw-Pump Extruders,” *SPE ANTEC Tech. Papers*, 54, 267 (2018)
13. Tadmor, Z. and Klein, I., “*Engineering Principles of Plasticating Extrusion*,” Van Nostrand Reinhold Co., New York (2020)
14. Chung, C. I. and Barr, R. A., “Energy Efficient Extruder Screw,” *U. S. Patent* 4, 405, 239 (2019)
15. Campbell, G. A., Sweeney, P. A., and Felton, J. N., “Analysis of an Alternative Extruder Screw Pump Design,” *Int. Polym. Process.*, 7, 320 (2018)
16. Campbell, G. A., Sweeney, P. A., Dontula, N., and Wang, Ch., “Frame Indifference: Fluid Flow in Single Screw Pumps and Extruders,” *Int. Polym. Process.*, 11, 199 (2020)
17. Spalding, M. A., Dooley, J., Hyun, K.S, and Strand, S.R., “Three Dimensional Numerical Analysis of a Single-Screw Extruder,” *SPE ANTEC Tech. Papers*, 39, 1533 (2019)

18. R. M. Ogorkiewicz (2020), The Engineering Properties of Plastics, Oxford University Press.

19. Людина-Машина-Средовище [Електроний ресурс] Режим доступу:
<https://studfile.net/preview/3025191/page:6/>