

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут

Кафедра конструювання машин

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2023 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

«Конструювання та дизайн машин»

зі спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему Екструдер для формування філаменту з переробленого PET
пластику_____

Виконав (-ла): студент (-ка) _____ II курсу , групи МВ – 21 мп

_____ Новіцький Андрій Вадимович

(прізвище ім'я по батькові)

(підпис)

Науковий керівник _____ Професор, д.т.н. Саленко О.Ф.

(посада, науковий ступінь та вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з розділу _____

(посада, науковий ступінь та вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент:

_____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2024

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра конструювання машин

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Конструювання та дизайн машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2023 р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ

Новіцькому Андрію Вадимовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Екструдер для формування філаменту з переробленого PET пластику

науковий керівник дисертації Саленко Олександр Федорович, професор, доктор технічних наук

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від **“03” листопада 2023 року № 5127-с**

2. Термін подання студентом дисертації 10 січня 2024 року

3. Об'єкт дослідження Екструдер для переробки PET з вакуумною камерою

4. Предмет дослідження (Вихідні дані) Тип екструдера -одночерв'ячний, Тип сировини – пластівці з PET, Метод просушування полімеру -вакуумна дегазація, Кінцевий продукт - філамент.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Провести патентно-інформаційне дослідження, Розробити конфігурацію екструдера з вакуумною камерою, Провести розрахунок для визначення геометричних розмірів

черв'яка, перевірити на міцність основні вузли екструдера, розробити 3-Д моделі деталей екструдера, та виконати розрахунки в середовищі Autodesk Inventor.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 1. Загальний вигляд збірки екструдера, 2. Особливості конструкції черв'яка, 3. Рознесена схема збірки, 4. Черв'як, 5. Фланець, 6. Фланець філь'єри, 7. Корпус, 8. Вакуумна камера, 9. Перехідна пластина, 10. Корпус екструдера (складальне), 11. Екструдер (складальне).

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання отримав

9. Дата видачі завдання 05.10.23р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Ознайомлення із завданням	06.10.23	Виконано
2	Патентно-інформаційний пошук, аналіз існуючих рішень	19.10.23	Виконано
3	Розробка конфігурації екструдера	08.11.23	Виконано
4	Проведення розрахунків	13.12.23	Виконано
5	Розробка 3-Д моделей, та збірки екструдера	30.12.23	Виконано
6	Проведення досліджень в середовищі Autodesk Inventor	05.01.24	Виконано
7	Представлення роботи на попередній захист	10.01.24	Виконано
8	Виправлення зауважень отриманих під час передзахисту	15.01.24	Виконано
9	Представлення готової роботи	22.01.24	

Студент

Андрій НОВІЦЬКИЙ

Науковий керівник дисертації

Олександр САЛЕНКО

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему «Екструдер для формування філаменту з переробленого PET пластику», містить 95 сторінок пояснювальної записки, рисунків 56, таблиць 4, використаних джерел 42, ілюстрації, що включають 18 слайдів презентації графічної частини.

Актуальність теми полягає в необхідності розробки інноваційних рішень у зв'язку з постійним зростанням обсягів світового виробництва поліетилентерефталату. Зокрема вдосконалення технології переробки з метою підвищення ефективності, доцільності цього процесу та зниження енерговитрат.

Мета дослідження: Розробка екструдера з вакуумною камерою для преробки PET пластівців в філамент.

Задачі дослідження:

- 1) Аналіз існуючих процесів переробки PET та пошук шляхів оптимізації.
- 2) Патентно-інформаційний пошук. Огляд представлених на ринку аналогів.
- 3) Розробка геометрії робочого органу, та конструкції екструдера.
- 4) Виконання перевірочних розрахунків окремих вузлів екструдера.
- 5) Перевірка працеспроможності екструдера

Методи дослідження: Аналіз наявних конструкцій, відбір кращих рішень, аналіз процесів які відбуваються при екструдюванні полімерів, моделювання компонентів.

Практичне зачення отриманих результатів: було розроблено модель екструдера з вакуумною камерою, яка дозволяє перероблювати PET пластівці за один етап.

Ключові слова: PET, екструдер, переробка, філамент, полімер, філь'єра, матриця, вакуумна камера, дегазація.

ABSTRACT

The master's thesis on the topic "Extruder for the formation of filament from recycled PET plastic" contains 95 pages of explanatory note, figures 56, tables 4, references 42, illustrations including 18 slides of the presentation of the graphic part.

The relevance of the topic lies in the need to develop innovative solutions due to an increase in the global production of polyethylene terephthalate. In particular, the improvement of processing technology to increase the efficiency of this process and reduce energy costs.

Research objective: Development of an extruder with a vacuum chamber for processing PET flakes into filament.

Objectives of the study:

Analysis of the PET recycling process and search for ways to optimize.

Patent information search. Overview of analogues on the market.

Development of the geometry of the working body, and the design of the extruder.

Performing verification calculations of individual extruder units.

Research methods: Analysis of existing structures, selection of the best solutions, analysis of processes that occur during polymer extrusion, modeling of components.

Practical application of the results obtained: a model of an extruder with a vacuum chamber was developed, which allows processing PET flakes in one stage.

Key words: PET, extruder, processing, filament, polymer, die, matrix, vacuum chamber, degassing.

Зміст

Вступ.....	8
1 Поліетилентерефталат , загальні відомості, важливість та особливості переробки	9
1.1 Загальні відомості про поліетилентерефталат	9
1.2 Важливість переробки PET пластику.....	10
1.3 Особливості переробки PET пластику	11
2 Обґрунтування використання екструдерів при обробці пластмас	16
2.1 Роль екструдерів у виробництві виробів з полімерів.....	16
2.2 Переваги використання екструдерів для обробки пластмас	17
3 Патентно-інформаційні дослідження	18
3.1 Визначення індексів та рубрик за МПК.....	18
3.2 Результати інформаційного пошуку в міжнародному патентному відомстві	19
3.3 Результати інформаційно-патентного пошуку в Українському патентному відомстві	26
3.4 Висновок до патентного дослідження	27
4 Екструдери для PET пластику: аналіз, особливості та проблематика.....	29
4.1 Будова та види екструдерів.....	29
4.2 Особливість екструдерів для PET пластику з вакуумною камерою.....	33
4.3 Принцип налагодження екструдерів.....	38
4.4 Дефекти екструдованого матеріалу та методи боротьби з ними	39
4.5 Аналіз аналогів представлених на ринку	44
5. Проектування екструдера	48
5.3 Розрахунок модуля плавлення.....	54
5.4 Розрахунок черв'яка на міцність	56

5.5 Розрахунок на стійкість	60
5.6 Розрахунок на жорсткість	61
5.7 Вибір редуктора і двигуна	63
6 Моделювання	67
6.1 Розробка 3-Д моделі черв'яка екструдера	67
6.2 Розробка 3-Д моделі корпусу екструдера	68
6.3 Розробка 3-Д моделі філь'єри	72
6.4 Виконання збірки екструдера	74
6.5 Вигляд збірки з рознесеними елементами	75
6.6 Розрахунок на жорсткість в середовищі Autodesk Inventor	75
6.7 Перевірка на міцність	76
7 Охорона праці	78
7.1 Електробезпека	78
7.2 Шум та його вплив на оператора екструдера	78
7.4 Пожежна безпека	80
Список використаних джерел:	82
Додаток А	87

Вступ

У сучасному світі, де проблеми забруднення довкілля та обмеження ресурсів стають нагальними завданнями, переробка відходів та використання вторинної сировини це ключові напрямки розвитку. Поліетилентерефталат (PET), який широко використовується в упаковці та промисловості, викликає особливої уваги. Розроблений у рамках даної роботи екструдер представляє новий підхід до переробки пластмаси, забезпечуючи ефективне перетворення пластичних відходів, зокрема пластівців з подріблених PET пляшок, у високоякісний філамент за один етап, без необхідності додаткового просушування сировини. Це покращення спрощує виробничий процес, зменшуючи витрати та роблячи його ефективнішим та економічнішим. У роботі буде розглянуто загальні відомості про поліетилентерефталат, важливість та особливості його переробки. Окремий акцент буде зроблено на ролі екструдерів у виробництві пластмасових виробів, перевагах використання екструдерів для обробки пластмас, а також аналізі існуючих екструдерів для PET пластику та їх проблематиці.

Дослідження також включає патентно-інформаційний аналіз для визначення новітніх розробок та технологічних рішень у галузі переробки PET пластику. В подальшому розділі приводиться аналіз будови та особливостей екструдерів для PET пластику, а також пропонується проектування власного екструдера, включаючи розрахунки та моделювання для забезпечення його оптимальної ефективності та безпеки в експлуатації.

У завершальному відділі присутній аналіз аспектів охорони праці, зокрема електробезпека, вплив шуму на оператора та пожежна безпека, що важливо для забезпечення безпеки та стійкості у виробничому середовищі.

Ця дисертація внесе значний вклад у розвиток екологічної та технологічної стійкості у галузі переробки пластмас та використання вторинної сировини.

1 ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ (РЕТ). ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ, ВАЖЛИВІСТЬ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕРОБКИ

1.1 Загальні відомості про поліетилентерефталат (РЕТ)

Використання пластику в сучасному світі є невід'ємною частиною життя людини. Полімери відіграють ключову роль у багатьох галузях промисловості, забезпечуючи легкість, зручність, ефективність упаковки та виробництва. Існує безліч різних видів пластиків, з різними характеристиками та сферами застосування. Серед них поліетилентерефталат (РЕТ) вирізняється своєю унікальністю і широким спектром використання. РЕТ є одним з найпопулярніших видів пластику, який використовується для виготовлення пакувальної тари, у текстильній промисловості, в автомобільному виробництві та електроніці, завдяки своїм відмінним властивостям таким як висока хімічна стійкість, міцність, жорсткість та гарна бар'єрність [13].

Його одержують завдяки реакції поліконденсації між терефталевою кислотою та етиленгліколем. РЕТ досить стійкий до дії більшості кислот, окрім соляної, сірчаної та азотної кислоти. Цей полімер не розчиняється звичайними органічними рідинами. У твердому стані РЕТ зазвичай аморфний і частково кристалічний. До його особливостей відноситься досить висока температура плавлення (255–260 °С) та відносно невисока в'язкість розплаву [1].

Використовуються для виробництва хімічних волокон, відомих під назвою лавсан, тонкі плівки з поліетилентерефталату (РЕТ) використовуються у виробництві конденсаторів у сфері електротехніки, для виготовлення фото- та кіноплівки, магнітних стрічок а також для ізоляції провідників [2]. Але найбільше застосовується у виготовленні пляшок для харчових продуктів.

Однією з найважливіших характеристик РЕТ є можливість його повної переробки. Цей тип пластику можна переробляти за допомогою різних типів процедур, але найпоширенішим методом є механічна переробка. Після обробки з нього утворюється перероблений матеріал під назвою rPET (Recycled PET, перероблений ПЕТ)[17].

1.2 Важливість переробки PET пластику

Властивості, які роблять пластик таким цінним, також ускладнюють його утилізацію, наприклад, його довговічність, легкість і низька вартість. Як правило пластик викидають після одного використання, але через свою стійкість до ультрафіолету, він залишається на дуже довгий час в навколишньому середовищі як сміття. Якщо пластик потрапляє в океан, він утримується на поверхні води протягом усього свого життя, адже його щільність менша ніж у води [14].

З часом пластиковий виріб руйнується під впливом атмосферних впливів, він спочатку розпадається на більш дрібні шматочки мікропластику, які становлять ще більшу загрозу для довкілля, але для розкладання самого полімеру потрібно досить багато часу. Це призводить до того, що величезна кількість використаного пластику накопичується на сміттєзвалищах а також у вигляді сміття в природі, а це призводить як до проблем утилізації відходів, так і до шкоди навколишньому середовищу. Приблизно 6300 мільйонів тон пластикових відходів накопичилось з 1950 по 2015 рік, але тривожно те, що значна частка (79%) опинилася в річках, океанах і на звалищах [17].

Переробка є одним із основних методів зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та виснаження ресурсів. Пластикові пляшки з PET пластику є основними компонентами пластикових відходів, оскільки вони замінили скляні пляшки. [5]

Технологія переробки PET сприяє зменшенню негативного впливу промисловості на оточуюче середовище за допомогою різних заходів. Вона призводить до зменшення використання сировини: близько 35% нових преформ для пляшок можна виготовити із використанням вторинного грануляту, що дозволяє заощадити сиру нафту, яка б використовувалася для виробництва нового грануляту. Крім того, процес переробки пластику вимагає на 88% менше енергії, ніж виробництво пластику з нової сировини. [14]

1.3 Особливості переробки PET пластику

Найпоширеніший процес переробки поліетилентерефталату складається з 9 основних етапів, які поетапно зображено на (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Ілюстрація поетапного процесу переробки PET [18]

ПЕТ-пляшки збираються з вторинних джерел, таких як контейнери для сміття або спеціалізовані пункти збору вторинної сировини. ПЕТ-пляшки відокремлюються від інших видів пластикових відходів і сортуються за кольором. Відсортовані пляшки очищають та миють для видалення будь яких слідів напоїв, бруду та забруднень. Після очищення ПЕТ-пляшки сушать, подрібнюють на дрібні шматки, пластівці (рис. 1.2), з подальшим миттям та видаленням залишків етикеток.

Потім пластівці сушать, подрібнюють в порошок та виготовляють гранули (рис. 1.3) [18].



Рисунок 1.2 – Пластівці з ПЕТ пляшок [18]



Рисунок 1.3 – Перероблені гранули ПЕТ [18]

Такий процес переробки включає в себе багато енергозатратних етапів сушіння. Це викликано негативною властивістю поліетилентерефталату накопичувати вологу, яка в подальшому призводить до виникнення дефектів та суттєво погіршує характеристики цього полімеру. Дефекти які виникають від потрапляння води в пластик зображено на (рис. 1.4). Верхній зразок зазнав найменшого впливу води, а нижній найбільшого.

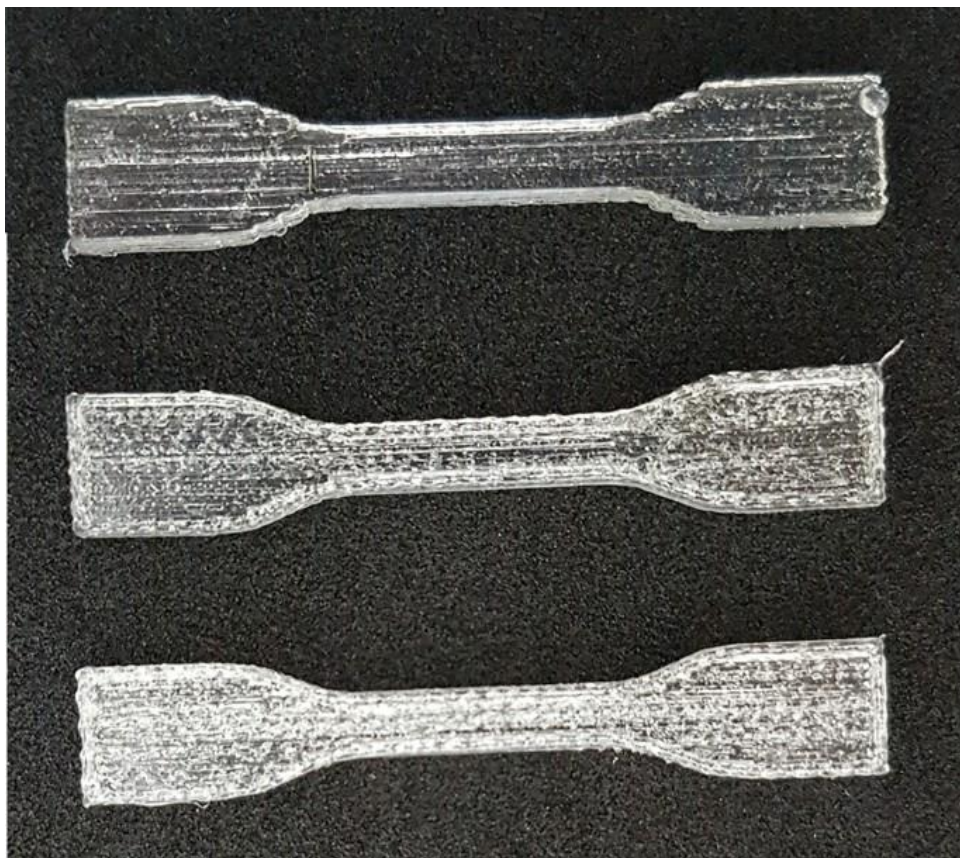


Рисунок 1.4 – Дефекти викликані потраплянням води [19]

Незважаючи на те, що неозброєним оком пластикові вироби здаються суцільними тілами, на мікроскопічному рівні їхній вигляд зовсім інший. Їх можна розглядати як переплутані волокна з полімерних ланцюжків (рис. 1.5). Завдяки комбінаціям, та довжині таких переплечених і зшитих полімерних ланцюгів, пластик отримує свої особливі властивості: жорсткість, пластичність, ударостійкість, гнучкість тощо [11].

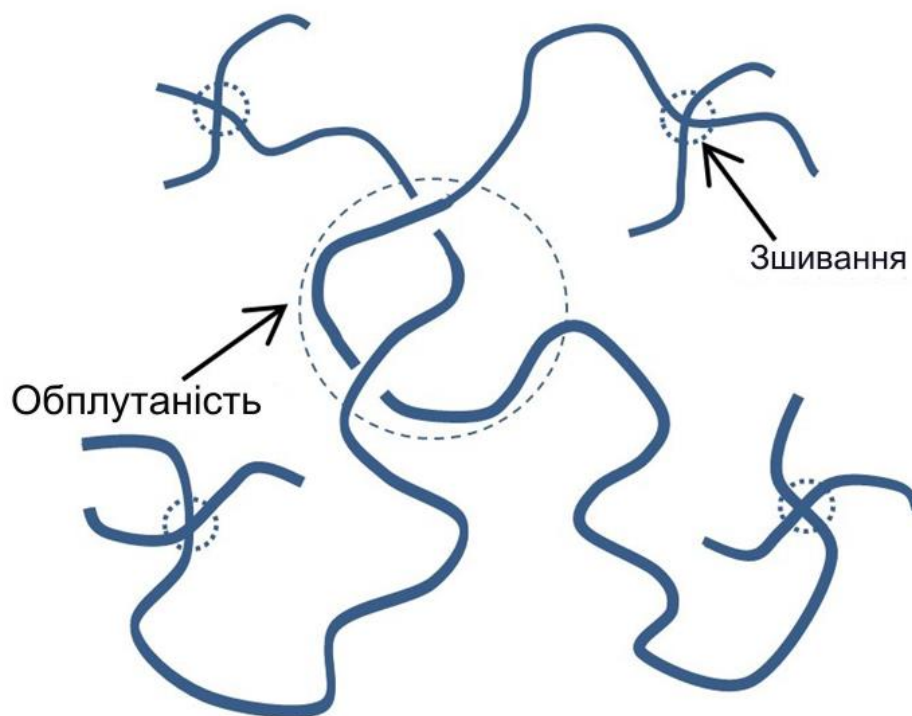


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення явища зшивання полімерів [10]

Гідролізом називається процес, під час якого полімери розщеплюються на мономері через потрапляння молекули води (рис. 1.6). Він по суті розриває довгий полімерний ланцюг на менші ланцюги, таким чином зменшуючи його здатність сплутуватися та зшиватися з іншими полімерними ланцюгами. Таким чином, погіршуючи фізичні властивості пластикового виробу, що робить його більш крихким, менш гнучким або нестійким до ударів [10].

Цей процес може статися з певними термопластами під час процесу екструзії. Поліетилентерефталат, наприклад, вразливий до гідролізу, тому операції екструзії цього полімеру зазвичай вимагають великих систем попереднього сушіння для видалення вологи з гранул перед екструзією [10].

Останнім часом з'являються методи обробки ПЕТ без попереднього сушіння, але вони значно ускладнюють процес розробки та виготовлення екструдера і зазвичай застосовуються на багатошнекових екструдерах, а такі екструдери суттєво

дорожчі за одношнекові та потребують більш складного налаштування та точнішого контролю параметрів екструзії.

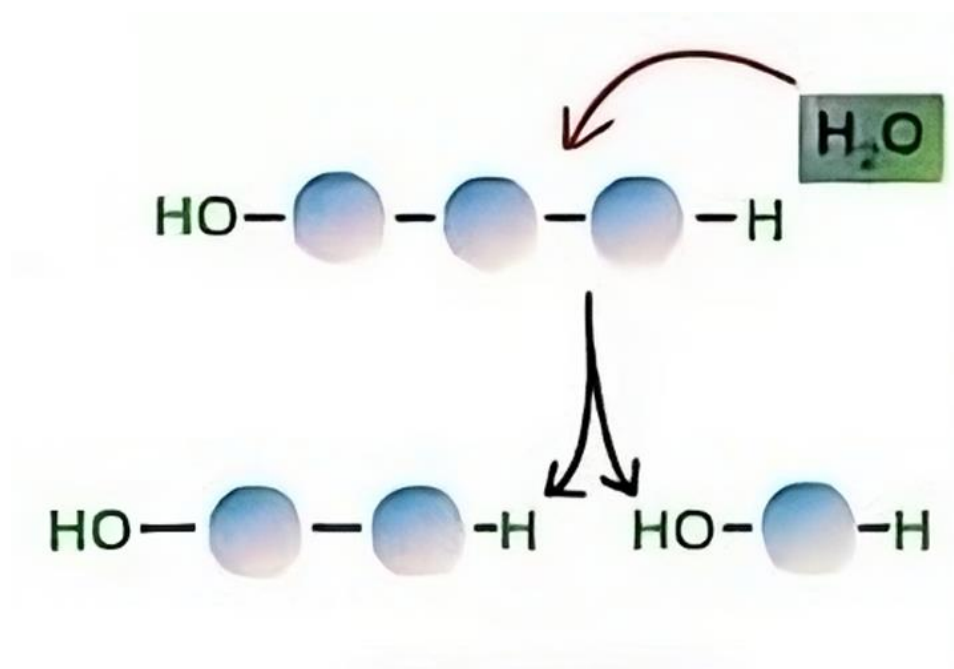


Рисунок 1.6 – Механізм потрапляння води до молекули полімеру [10]

2 ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЕКСТРУДЕРІВ ПРИ ОБРОБЦІ ПЛАСТМАС

2.1 Роль екструдерів у виробництві виробів з полімерів

Екструзія — це спосіб отримання виробів або заготовок шляхом продавлювання (екструдювання) матеріалу під великим тиском крізь формувальний отвір у матриці [1].

Екструдери — це машини, які здійснюють процес екструзії, а саме видавлювання матеріалу через спеціальну філь'єру чи форму, надаючи йому необхідний контур та форму. Вони стали незамінними у виробництві різноманітних виробів з пластику, від філаменту до профілів для будівництва.

Основна причина значної розповсюдженості екструдерів в обробці пластику полягає у їх універсальності та ефективності.

Висока продуктивність. Екструдери здатні працювати безперервно, виготовляючи продукцію довжиною в кілька метрів або навіть кілометрів без зупинки. Це забезпечує високу швидкість виробництва та зниження вартості одиниці продукції.

Відсутність відходів. Оскільки пластик видавлюється безпосередньо у необхідну форму, процес практично не залишає відходів.

Універсальність виробництва. За допомогою екструдерів можна виробляти різноманітні вироби — від тонких плівок до масивних профілів зі складним поперечним перерізом та формою. Змінюючи філь'єри та параметри процесу, можна легко та відносно швидко адаптуватися до виробництва різних типів продукції.

Енергоефективність. У порівнянні з іншими методами обробки пластику, екструдери часто виявляються менш енергоємними, особливо при масовому виробництві.

Можливість переробки. Екструдери дозволяють використовувати вторинний пластик, сприяючи його переробці та зниженню навантаження на довкілля.

2.2 Переваги використання екструдерів для обробки пластмас

Використання екструдерів при переробці пластику дає додаткові переваги, а саме, можливість адаптації до використання різних видів полімерів, їх комбінування, а також отримання виробів з визначеними технічними характеристиками. Також, завдяки екструзії можливе виготовлення композитних матеріалів з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Переробка пластикових відходів стала однією з ключових проблем сучасного світу, адже зростання виробництва пластмас призводить до збільшення обсягів відходів, які часто важко розкладаються в природі. Екструдери можуть вирішити цю проблему, пропонуючи ефективний та сталий спосіб переробки.

Використання екструдерів для переробки пластиків має ряд переваг:

1. Збереження ресурсів: замість видобутку нових ресурсів для виробництва пластику, можна використовувати вже існуючі пластикові відходи, зменшуючи тим самим екологічний слід від діяльності людини.
2. Зменшення шкідливих викидів: переробка пластику екструдерами вимагає менше енергії, ніж первинне виробництво, що зменшує викиди в атмосферу.
3. Економія коштів: вторинний (перероблений) пластик часто є дешевшим матеріалом порівняно з первинним, що дозволяє виробникам знизити витрати.
4. Менша вартість обладнання: екструдери коштують дешевше порівняно з іншим обладнанням для обробки пластику.
5. Надійність: незважаючи на те, що екструдери досить складні у виробництві, вони мають лише один рухомий орган (для одночерв'ячного екструдера), тому вони можуть працювати безперервно тривалий час.

Отже, використання екструдерів для обробки та переробки пластикових відходів не лише сприяє збереженню навколишнього середовища, але й відкриває нові економічні можливості для підприємств, що спрямовані на стале виробництво.

3 ПАТЕНТНО-ІНФОРМАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Визначення індексів та рубрик за МПК

Патентні дослідження відіграють важливу роль у визначенні новизни, корисності та інноваційного потенціалу винаходів. Такі дослідження дозволяють визначити потенційні області для інновацій, а також уникнути порушення існуючих патентних прав. Основою для ефективного проведення патентних досліджень є правильний підхід до класифікації винаходів, а саме - до Міжнародної Патентної Класифікації (МПК). МПК служить уніфікованою системою, що дозволяє систематизувати патенти за їх технічним змістом.

Отже я виділив два МПК (B29C48, B29C45) за якими буду проводити подальше патентне дослідження опис підгруп, специфікацій та розділів виконано за [20].

В – Означає технічний розділ "Обробка матеріалів, виконання операцій; транспортування";

B29 – Вказує на підклас "Обробка пластмас";

B29C – Це група, що вказує на "Виготовлення виробів або напівфабрикатів із пластмас";

B29C48 – Підгрупа, що охоплює "Виготовлення об'єктів, або напівфабрикатів, за допомогою безперервних операцій, наприклад, за допомогою екструзії";

B29C45 – Підгрупа, що відповідає за "Виготовлення виробів або напівфабрикатів за допомогою внутрішньої реакції між молекулами, або реакції між молекулами у стані змішування з пластмасами; виготовлення еластомерних виробів".

Також для кожної підгрупи я виділив потрібні конкретні специфікації. Для підгрупи B29C48, це:

B29C48/40 - з використанням двох або більше паралельних шнеків або принаймні двох паралельних шнеків без зчеплення, наприклад, двошнекові екструдери;

В29С48/50 - деталі екструдерів;
 В29С48/56 - мають канавки або порожнини, крім різьби або каналу;
 В29С48/65 - сусідні потоки або канали мають різні конфігурації, наприклад, один потік є нижчим за сусідній;
 В29С48/68 - бочки або циліндри;
 В29С48/69 - фільтри або сітки для формувального матеріалу;
 В29С48/76 - вентиляційні, осушувальні засоби, дегазаційні засоби;
 В29С48/395 - використання шнеків, оточених взаємодіючим барабаном, наприклад, одношнекові екструдери;
 В29С48/505 – гвинти.

Для підгрупи В29С45, це:

В29С45/17 - складові частини, деталі або аксесуари, допоміжні операції;
 В29С45/63 - засоби вентиляції або дегазації.

3.2 Результати інформаційного пошуку в міжнародному патентному відомстві

1) Назва винаходу (корисної моделі) - БАГАТОШНЕКОВИЙ ЕКСТРУДЕР З ВАКУУМНИМ ВЕНТИЛЯЦІЙНИМ ОТВОРОМ І ШНЕКАМИ, НАЛАШТОВАНИМИ НА УЩІЛЬНЕННЯ АБО ВИЛУЧЕННЯ РІДИНИ З МАТЕРІАЛУ, ОБРОБЛЕНОГО ЕКСТРУДЕРОМ [UA]

MULTIPLE SCREW EXTRUDER IMPLEMENTED WITH VACUUM VENT AND SCREWS CONFIGURED TO DENSIFY, OR EXTRACT FLUID FROM, MATERIAL PROCESSED BY THE EXTRUDER [EN]

Індекс МПК – В29С48/40; В29С48/505; В29С48/68; В29С48/69; В29С48/76;

Номер патенту – US11027476B2

Країна – США

Дата публікації відомостей про видачу патенту – 08.06.2021

Опис - Багатошнековий екструдер (рис. 3.1) (50) поєднує застосування вакууму до вакуумного вентиляційного отвору (62), розташованого між місцями

подачі матеріалу (70, 72) екструдера, і використання спеціально сконфігурованих шнеків екструдера (рис. 3.2) (58) для видалення газів, переважно повітря, з екструдера для ущільнення матеріалів, що вводяться в нього, і для вилучення небажаної рідини з матеріалу, що вводиться для змішування з розплавленим полімерним матеріалом, що протікає через екструдер.

Багатошнековий екструдер є універсальним в експлуатації, оскільки він здатний виконувати процеси ущільнення матеріалу та екстракції рідини окремо або одночасно.

Реалізація технології закритої вакуумної подачі забезпечує збільшення швидкості пропускання екструдату в порівнянні з тією, що досягається впровадженням атмосферної вентиляції (16) в екструдері (10a, 10b) звичайної конфігурації [9].

U.S. Patent Jun. 8, 2021 Sheet 1 of 7 US 11,027,476 B2

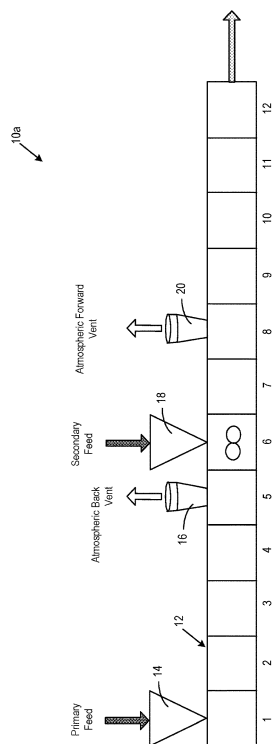


FIG. 1A (Prior Art)

U.S. Patent Jun. 8, 2021 Sheet 2 of 7 US 11,027,476 B2

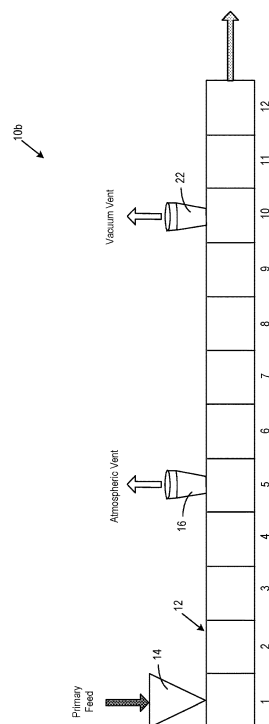


FIG. 1B (Prior Art)

Рисунок 3.1 – Ілюстрація до патенту US11027476B2 (A) [9]

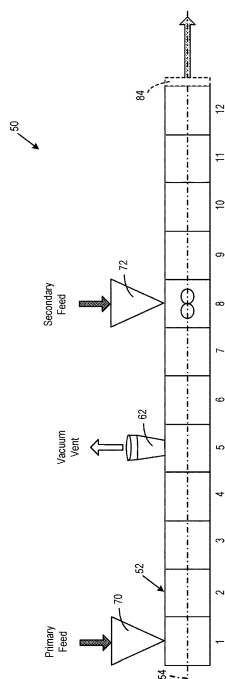


FIG. 2

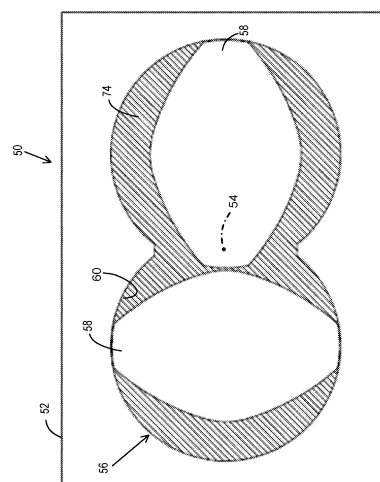


FIG. 3

Рисунок 3.2 – Ілюстрація до патенту US11027476B2 (Б) [9]

2) Назва винаходу (корисної моделі) - Вакуумний шнековий екструдер [UA]
 Vacuum screw extruder [EN]

Індекс МПК – B29C45/17; B29C45/63;

Номер патенту – CN204773423U

Країна – Китай

Дата публікації відомостей про видачу патенту – 18.11.2015

Опис – Корисна модель містить вакуумний гвинтовий екструдер, включаючи корпус екструдера, пристрій подачі, вакуумний апарат і пристрій бічної подачі, пристрій подачі, вакуумний апарат і пристрій бічної подачі, які встановлюються на корпусі екструдера, середня частина корпусу екструдера забезпечена газовим отвором, газовідвідник з вакуумним апаратом з'єднані один з одним. Може усвідомити, що безперервна робота забезпечує процес пластифікації, модифікації,

дегідратації, змішування, а також впливає на продуктивність кінцевого результату змішування, гарантує якість продукту, зменшує споживання енергії [7].

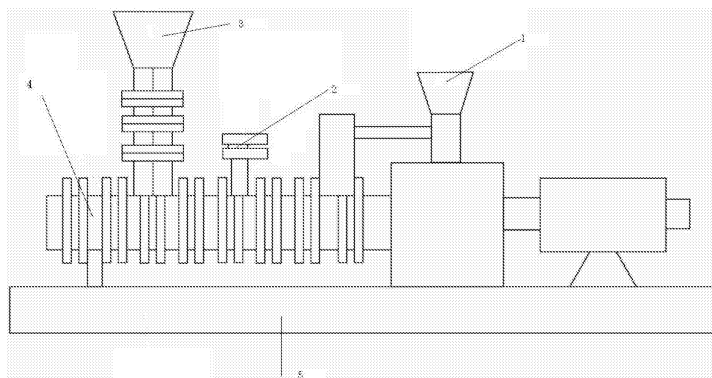


图 1

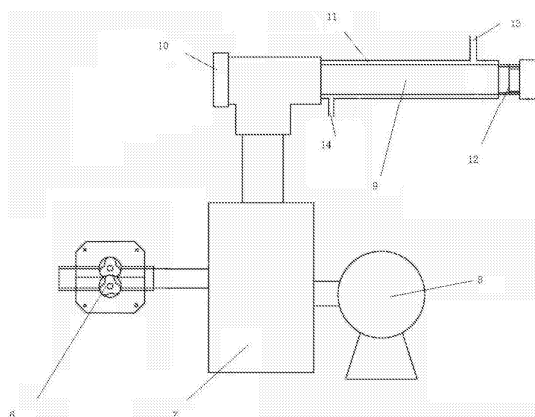


图 2

Рисунок 3.3 – Ілюстрація до патенту CN204773423U [7]

3) Назва винаходу (корисної моделі) - ОДНОШНЕКОВИЙ ЕКСТРУДЕР
[UA] SINGLE-SCREW EXTRUDER [EN]

Індекс МПК – B29C48/395; B29C48/50; B29C48/56; B29C48/65; B29C48/68;

Номер патенту – DE19928870A1

Країна – Німеччина

Дата публікації відомостей про видачу патенту – 04.01.2001

Опис – Винахід (рис.3.4) відноситься до одношнекового екструдера, що містить перегородковий шнек (40) і циліндр (11), в якому перегородковий шнек (40) утримується таким чином, що дозволяє йому обертатися, і містить щонайменше одну поздовжню секцію зони подачі (21, 22) і щонайменше одну поздовжню секцію (23) перехідної зони. Екструдер (10) характеризується тим, що циліндр (11) на його внутрішній стінці (50) у зоні поздовжнього перерізу (23) перехідної зони має щонайменше одну канавку (52), яка проходить у поздовжньому напрямку. . Винахід також відноситься до способу екструдювання пластикового матеріалу з використанням одношнекового екструдера (рис.3.5) (10), що містить загороджувальний шнек (40), який утримується всередині циліндра (11) таким чином, що дозволяє йому обертатися, за допомогою чого екструдер (10)) містить зону (21, 22) живлення та перехідну зону (23), а бар'єрний шнек (40) має щонайменше один канал (49) для твердої речовини та канал (48) плавлення. Спосіб характеризується тим, що твердий пластичний матеріал (тверда речовина) транспортується в області перехідної зони (23) у визначеній кількості та певними порціями з каналу твердої речовини (49) у канал плавлення (48) [8].

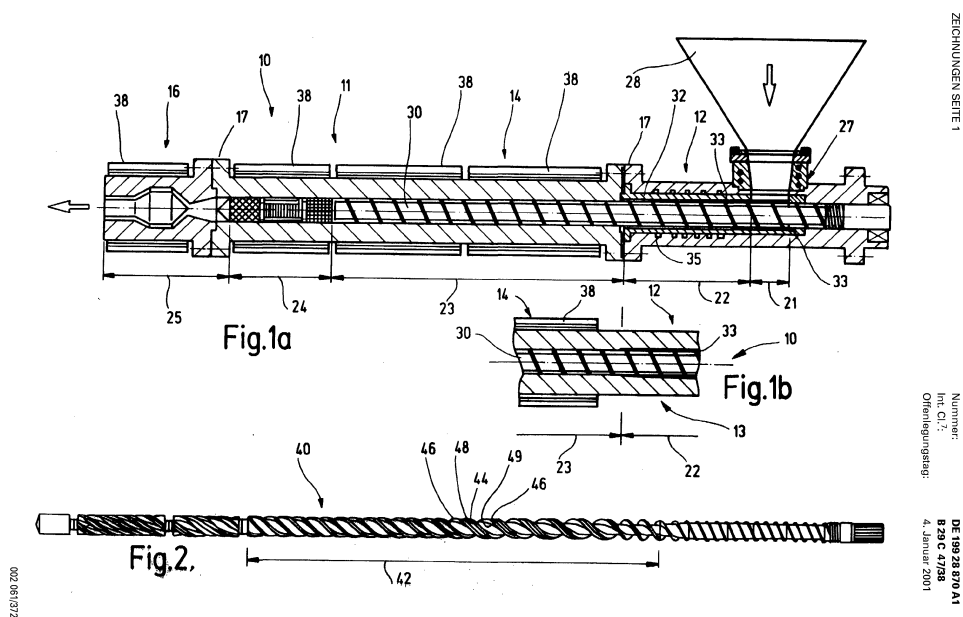


Рисунок 3.4 – Ілюстрація до патенту DE19928870A1, загальний вигляд [8]

ZEICHNUNGEN SEITE 2

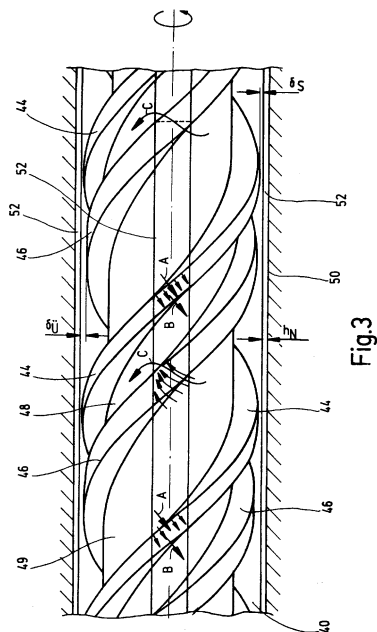
Nummer:
Int. Cl. 7:
Offenlegungstag:DE 199 28 870 A1
B 29 C 47/38
4. Januar 2001

Fig. 3

002 061072

ZEICHNUNGEN SEITE 3

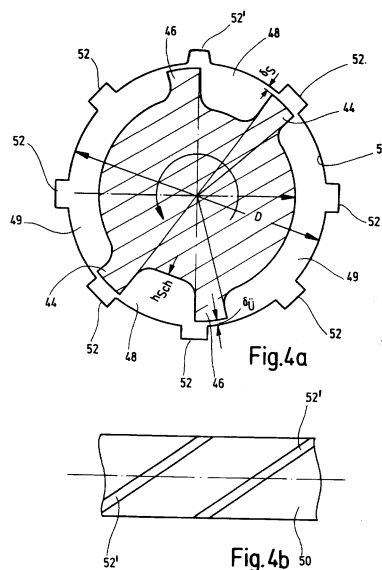
Nummer:
Int. Cl. 7:
Offenlegungstag:DE 199 28 870 A1
B 29 C 47/38
4. Januar 2001

Fig. 4a

Fig. 4b

002 061072

Рисунок 3.5 – Ілюстрація до патенту DE19928870A1, робочий гвинт та його переріз [8]

4) Назва винаходу (корисної моделі) – ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО КОМПОЗИТУ [UA],

PROCESS FOR PRODUCING A THERMOPLASTIC COMPOSITION [EN]

Індекс МПК - B29C48/395; B29C48/50

Номер патенту - CH637321A5

Країна - Швейцарія

Дата публікації відомостей про видачу патенту – 29.07.1983

Опис - Матеріал, що складається з термопластичної смоли і добавок, подається в екструдер через бункер (рис. 3.6) (10). Екструдер має ствол (1), в отворі якого розташований шнек (2). Гвинт (2) звужується в напрямку транспортування в секції (2b). У цій секції (2b) гвинтова стрічка забезпечена проходами (14a), що

проходять в осьовому напрямку. Під час транспортування матеріалу за допомогою шнека (рис. 3.7) частина матеріалу повертається з одного витка спіралі в сусідній виток. Це призводить до особливо інтенсивного змішування окремих компонентів термопластичної композиції. Тепло підводиться до екструдера за допомогою нагрівальних елементів (3) [6].

637 321
4 Blatt Blatt 1

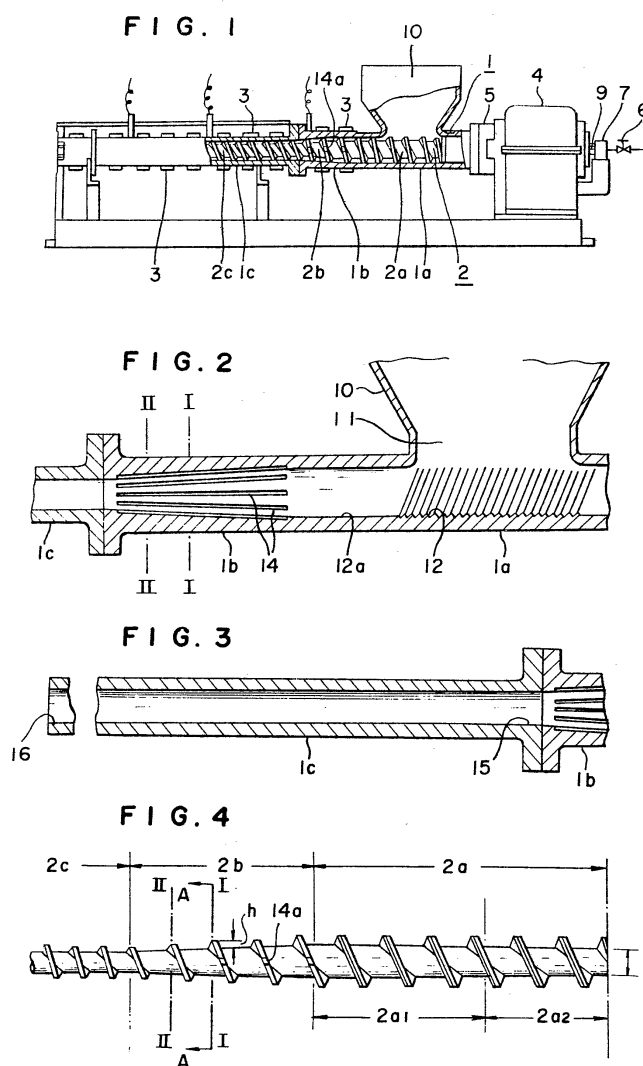


Рисунок 3.6 – Ілюстрація до патенту CH637321A5 [6]

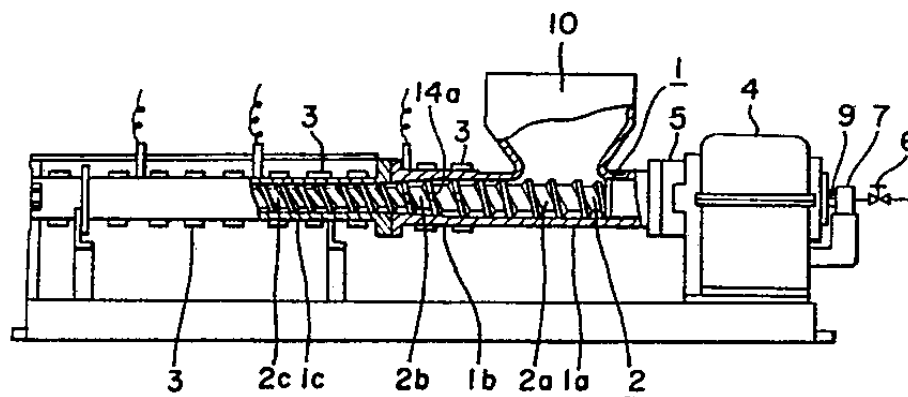


Рисунок 3.7 – Ілюстрація до патенту СН637321А5, схематичне зображення екструдера [6]

3.3 Результати інформаційно-патентного пошуку в українському патентному відомстві

Назва винаходу (корисної моделі) - ЧЕРВ'ЯК ЕКСТРУДЕРА [UA]

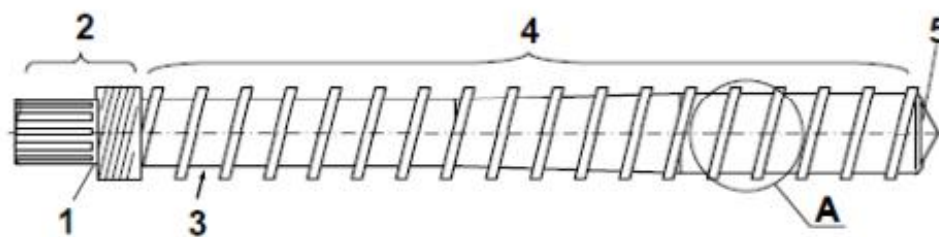
Індекс МПК – B29C48/50

Номер патенту – UA151520U

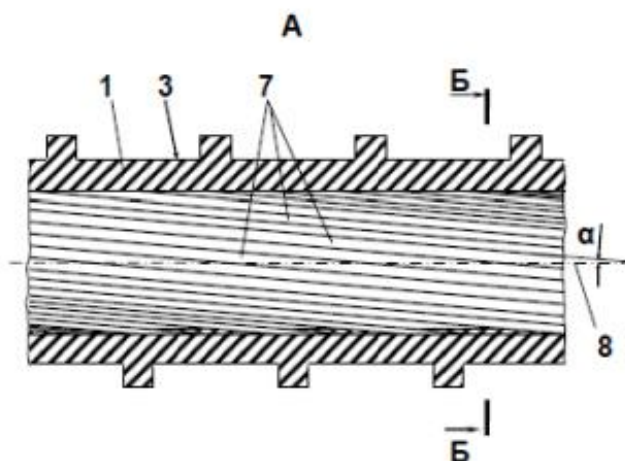
Країна – Україна

Дата публікації відомостей про видачу патенту – 03.08.2022

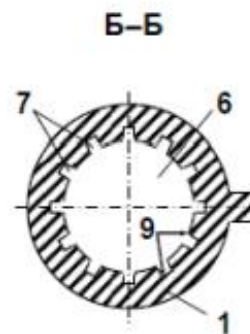
Опис – Черв'як екструдера (рис. 3.8) складається з порожнистої серцевини з послідовно розташованою ручкою, робочої зони з гвинтовою різьбою і знімного наконечника з поздовжніми прорізами в порожнині серцевини. Прорізи розташовані під гострим кутом до поздовжньої осі сердечника. [12].



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Рисунок 3.8 – Ілюстрація до патенту UA151520U [12]

3.4 Висновок до патентного дослідження

У процесі патентного дослідження було вивчено та проаналізовано 5 ключових патентів, які стосуються технології екструдерів. Зокрема, основна увага була приділена одночерв'ячним екструдерам без вакуумної камери та двохчерв'ячним екструдерам зі спеціалізованою вакуумною камерою.

Згідно з аналізом, всі п'ять патентів не містили інформації про одночерв'ячні екструдери з вакуумною камерою. Це свідчить про те, що конструкція такого типу екструдера на поточний момент не запатентована. Це може вказувати на актуальність та потенційний інноваційний потенціал розробки одночерв'ячного екструдера з вакуумною камерою для ринку.

З іншого боку, двохчерв'ячні екструдери зі спеціалізованою вакуумною камерою представлені у декількох патентах, що підтверджує їх популярність та вже існуючі технологічні рішення в даному напрямку.

На підставі проведеного дослідження рекомендується звернути увагу на розробку та патентування одночерв'ячного екструдера без вакуумної камери, оскільки це може стати новаторським рішенням, яке заповнить існуючу технологічну нішу на ринку екструдерів.

4 ЕКСТРУДЕРИ ДЛЯ РЕТ ПЛАСТИКУ: АНАЛІЗ, ОСОБЛИВОСТІ ТА ПРОБЛЕМАТИКА

4.1 Будова та види екструдерів

Екструдер, як складний технічний механізм, виконує ключову роль у виробництві полімерів. Екструдери поділяються за робочими органами на три види: однотипні, комбіновані та рознесені механізми (рис. 4.1). Глибоке розуміння технічних параметрів кожного типу екструдера є важливим для вибору оптимального рішення у виробництві.

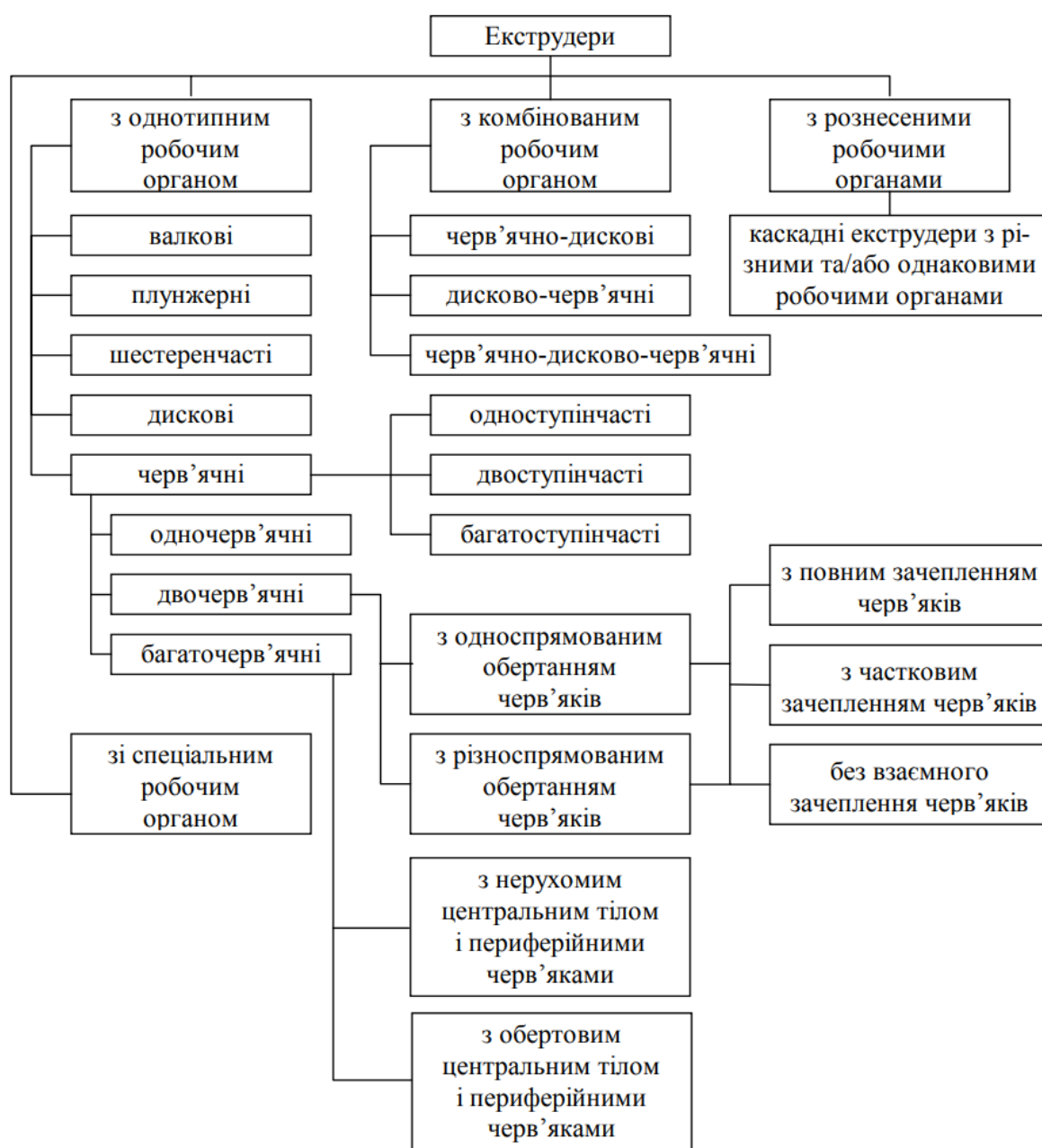


Рисунок 4.1 – Схема класифікації екструдерів за конструктивними ознаками [2]

Його складна конструкція включає гвинтовий механізм (черв'як), що забезпечує подачу, переміщення та перемішування сировини, бар'єрні пластини для регулювання тиску та головку матриці (філь'єру), що формує кінцевий продукт. Глибоке розуміння фізичних і термодинамічних процесів у цьому пристрої є важливим для оптимізації продуктивності та якості виробів.

Наведена нижче схема (рис. 4.2) пропонує детальну класифікацію гвинтових механізмів екструдера, враховуючи параметри, такі як форма черв'яка, об'єм витка, західність нарізки та відносна довжина. Ця візуалізація сприяє систематизації та глибшому розумінню характеристик гвинтових механізмів у контексті їхнього впливу на ефективність екструдера у виробництві полімерних матеріалів.



Рисунок 4.2 – Схема класифікації черв'яків черв'ячних екструдерів [2]

Враховуючи оглянуті аспекти гвинтових механізмів, важливо також розглянути конкретні характеристики кількості черв'яків та їх вплив на функціональність екструдера. В представленій нижче таблиці (табл. 4.1) порівнюються властивості систем з одним та двома черв'яками, включаючи максимальну кількість зон, ефективність перемішування, вартість та споживання енергії. Це надає чіткий огляд оптимальних варіантів з урахуванням конкретних експлуатаційних потреб.

Таблиця 4.1 – Порівняння екструдерів з одним та двома черв'яками[2]

Кількість черв'яків	Один	Два
Максимальна кількість зон	Три зони	Модульний дизайн з безліччю комбінацій
Ефективність перемішування	Слабка	Відмінна
Вартість	Низька	Висока
Споживання енергії	Низьке	Високе

Найпоширенішим типом екструдерів є одночерв'ячні екструдери. До основних робочих органів таких екструдерів відносяться: циліндр, черв'як (шнек), філь'єра. Завдяки обертанню черв'яка полімер транспортується вздовж циліндру, проходячи різні зони нагрівання, охолодження та дегазації, після чого видавлюється через отвір філь'єри.

Розглянувши робочі органи одночерв'ячних екструдерів, важливо оглянути їх конструкцію та функціональність. Нижче наведено короткий опис процесу, який відбувається у внутрішньому просторі екструдера (рис. 4.3). Бункер, в якому знаходяться полімерні гранули чи пластикові пластівці, просуваються до черв'яка (шнека), який переміщує їх вздовж циліндра. Тут відбувається проходження через різні зони нагрівання, охолодження та дегазації, що призводить до плавлення полімеру. Нарешті, отриманий результат видавлюється через отвір філь'єри.

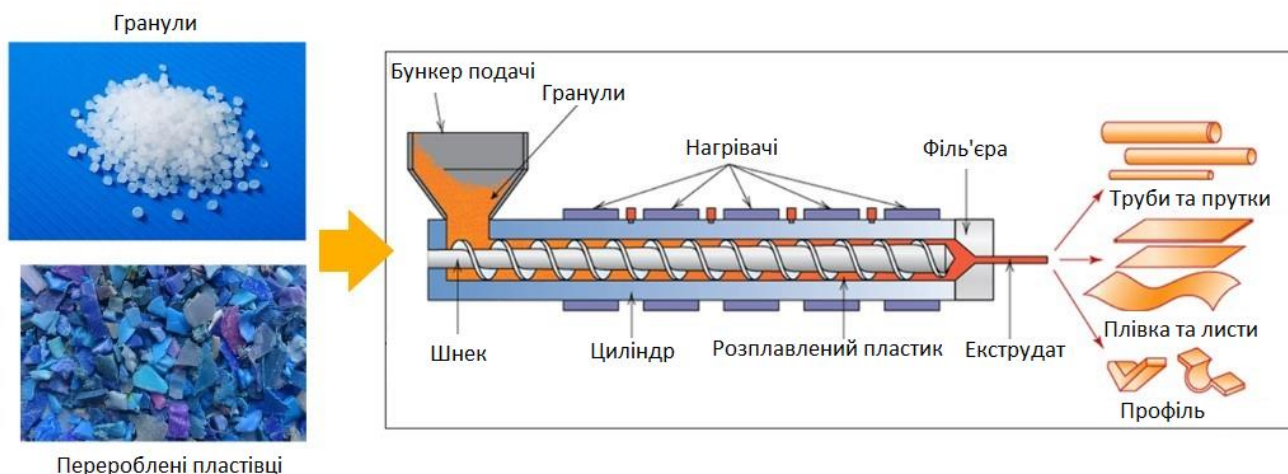


Рисунок 4.3 – Схематичне зображення процесу екструзії переробленого PET [10]

На (рис. 4.4) представлена основна схема черв'ячного екструдера. Полімер у вигляді гранул подається до завантажувальної лійки (2) екструдера і переміщується вздовж циліндра (4) завдяки обертанню черв'яка (3), який приводиться в рух за допомогою приводу (1). За рахунок спеціально спроектованої геометрії черв'яка полімер стискається, плавиться, гомогенізується і під тиском потрапляє в екструзійну головку. Ця головка кріпиться до циліндра за допомогою фланцевого з'єднання (6).

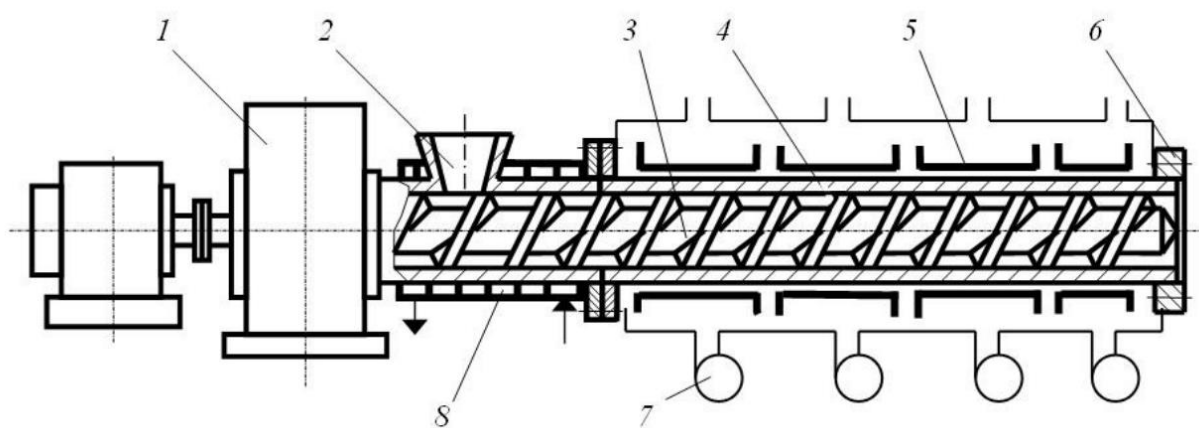


Рисунок 4.4 – Схематичне зображення екструдера для переробленого PET [2]

Необхідна теплота для плавлення переважно генерується приводом, чия механічна енергія від в'язкого тертя утвореного розплаву перетворюється на

теплову енергію. Частково енергія надходить від нагрівників (5), розташованих на поверхні циліндра (4). Важливо відзначити, що у деяких випадках тертя виділяє більше теплоти, ніж необхідно для плавлення, і передбачено вивід зайвої енергії, який забезпечується за допомогою вентиляторів (7). У певних сценаріях використовується також рідинне охолодження, де зона подачі екструдера охолоджується водою, що подається в канали (8) для уникнення передчасного плавлення [2].

Насипна маса полімеру, що надходить до завантажувальної лійки, має меншу густину, ніж розплав, тому в області плавлення об'єм гвинтового каналу поступово зменшується, переважно через зменшення глибини нарізки та рідше через зменшення кроку нарізки (ширини гвинтового каналу). Співвідношення площі перерізу гвинтового каналу в зоні подачі до площі перерізу в зоні гомогенізації називається ступенем стиснення черв'яка.

Важливим параметром є частота обертання черв'яка, яку в більшості екструдерів можна плавно регулювати за допомогою частотних перетворювачів [2].

4.2 Особливість екструдерів для PET пластику з вакуумною камерою

Вакуумна камера екструдерів є важливою для обробки поліетилентерефталату, адже вона відповідає за:

1. Видалення вологи та газів. Основна функція вакуумного дегазування полягає в видаленні випаруваних газів та вологи з екструдованого матеріалу. Під час процесу екструзії, коли сировина плавиться під впливом тепла та тиску всередині екструдера, полімерні ланцюги та хімічний склад змінюються, таким чином виділяються різноманітні гази.

2. Гідроліз може відбутися з певними термопластами під час процесу екструзії. Наприклад, поліетилентерефталат схильний до гідролізу, і саме тому операції екструзії PET зазвичай вимагають великих систем передсушування для видалення вологи з гранул смоли перед екструзією. Проте, були розроблені

інноваційні технології де вакуум застосовується в екструдері для видалення вологи без передсушування сировини.

Вакуумна екструзія дозволяє забезпечити більш високу якість продукції PET, видаляючи небажані гази та вологу, які негативно впливають на фізичні властивості кінцевого продукту. Екструдери з вакуумною камерою використовуються для видалення летких сполук з матеріалів під час процесу екструзії. Це досягається завдяки особливій конструкції екструдера, яка включає "зону декомпресії", що знаходиться приблизно на двох третинах шляху від початку гвинта. Коли матеріал проходить через екструдер, він стискається, але після досягнення зони дегазації, канал розширюється, створюючи розріджений тиск в цій зоні, і має ще особливий конструкційний елемент, відвід. Вакуумна система використовується для відкачування надлишкового тиску, сприяючи примусовому видаленню небажаних речовин, таких як волога, повітря, розчинники або реагенти з продукту. Цей процес особливо корисний при роботі з полімерами, оскільки високі температури можуть спричинити розклад деяких полімерних розплавів на леткі органічні сполуки.

Звісно використання камери з вакуумом в зоні екструдера, де пластик знаходиться в розплавленому вигляді може призвести до потрапляння пластику до вакуумних каналів. А таке негативне явище призведе до полімеризації розплаву в вакуумних трубках та пошкодження вакуумних насосів. Для запобігання цьому негативному явищу, для таких екструдерів, розроблено ряд особливих конструктивних рішень:

Особлива конструкція черв'яка (рис 4.5). Після циліндричних та конічних ділянок (1 і 2) робочого черв'яка, передбачено особливий конструктивний елемент (3), в якому значно зменшується поперечний переріз каналу. Завдяки цьому елементу реалізується "розтирання" нерозплавлених частинок у розплаві. На кінці черв'яка виконані гомогенізуючі елементи (4), такі як динамічний змішувач, для досягнення більшої однорідності розплавленого матеріалу.

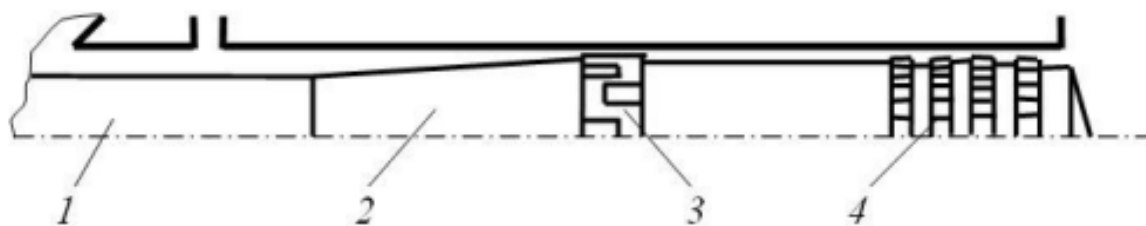


Рисунок 4.5 – Ескіз робочого черв'яка трьохзонного екструдера з вакуумною камерою [2]

Щодо двохчерв'ячних екструдерів, слід відзначити, що такі елементи мають іншу конструкцію, яка відрізняється від їхніх одночерв'ячних аналогів. Наприклад, ущільнення вакуумної камери виглядає по-іншому, що буде розглянуто на наступному зображенні (рис. 4.6)



Рисунок 4.6 – Зображення черв'яків з ущільненнями для вакуумної камери [21]

Використання циліндру (корпусу екструдера) зі спеціальним каналом для підключення вакууму. Такий елемент зображено на (рис. 4.7).

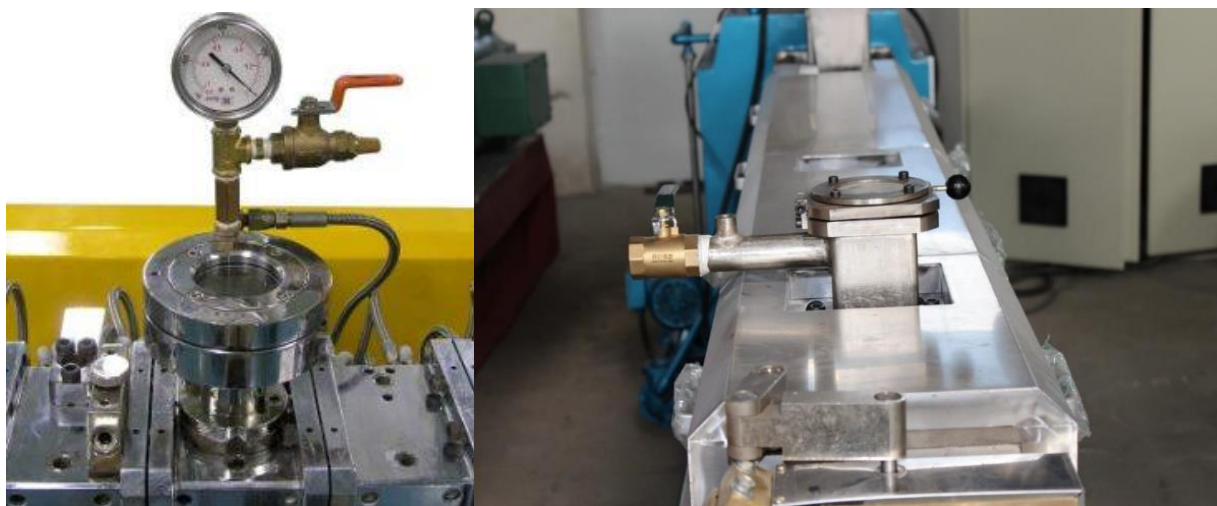


Рисунок 4.7 – Вентиляційні канали вакуумної камери [22]

Такий канал дозволяє створити зону пониженого тиску та зменшити вірогідність потрапляння розплавленого пластику до вакуумних трубок. Адже при зниженні тиску гази які можуть бути розчинені в розплаві, почнуть розширяться що призведе до збільшення об'єму розплаву. Переріз такого конструктивного рішення зображено на (рис. 4.8).

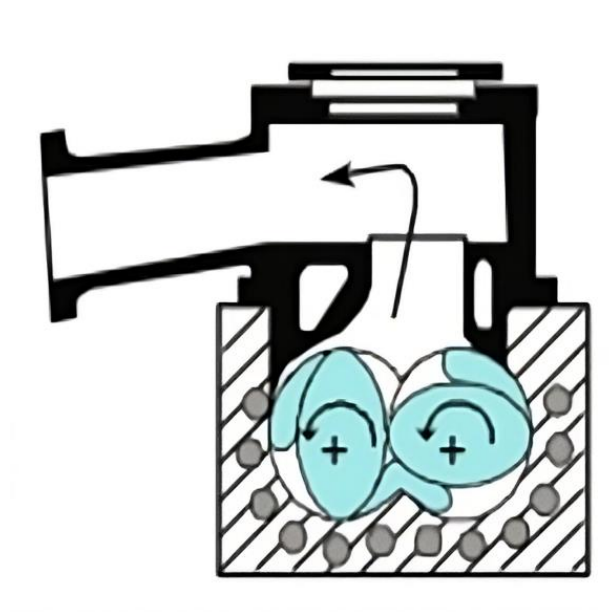


Рисунок 4.8 – Схематичний переріз вентиляційного каналу вакуумної камери [18]

Незважаючи на те, що вентиляційний канал досить ефективно запобігає потраплянню розплаву до вакуумних каналів, існує ймовірність що полімер збільшиться в об'ємі в декілька разів, наприклад при перегріві розплаву, або якщо він закінчиться в бункері. Тому в якості додаткового рівня захисту вакуумної системи, а саме вакуумного насоса, встановлюють буферну ємність (рис. 4.9). Мета такого рішення запобігання потрапляння розплаву до робочої частини вакуумного насоса.

У випадку коли полімер все ж таки потрапив до каналів, він накопичується в буферній ємності, та після охолодження може бути видалений звідти.

Вакуумні магістралі після такого інциденту потрібно буде замінити, адже після охолодження полімеру очистити їх буде практично неможливо. Тому вони підключаються за допомогою швидко знімних з'єднань, для оперативної заміни, адже після зупинки екструдера потрібно проводити складні операції підготовки до запуску.



Рисунок 4.9 – Вакуумна система екструдера з буферною ємністю [23]

4.3 Принцип налагодження екструдерів

Налагодження екструдера є ключовим етапом для досягнення оптимальних результатів екструдування. Основні принципи налагодження екструдерів:

Температурний режим: Один з найважливіших параметрів у процесі екструдування. Необхідно встановити правильну температуру для різних зон екструдера, зокрема для зони завантаження, транспортування та дюзи. Температура повинна бути достатньо високою для плавлення матеріалу, але не настільки високою, щоб уникнути його розкладання чи деградації.

Швидкість витиску: Швидкість, з якою матеріал проходить через екструдер, може впливати на якість кінцевого продукту. Занадто висока швидкість може призвести до нерівномірного нагрівання або витиску матеріалу, тоді як занадто низька швидкість може призвести до зайвого нагрівання і деградації матеріалу.

Тиск: Правильний тиск необхідний для того, щоб матеріал проходив через дюзу з потрібною швидкістю і формою. Надмірний тиск може призвести до деформації продукту, а занадто низький тиск - до недостатнього витиску матеріалу.

Охолодження: Після витиску матеріалу його часто охолоджують, щоб надати йому потрібну форму та міцність. Налагодження системи охолодження, включаючи температуру та об'єм охолоджуючого агента, є важливим етапом для забезпечення якості кінцевого продукту.

Вибір матриці: Філь'єра або матриця визначає форму кінцевого продукту. Від правильного вибору дюзи залежить якість та характеристики екструдованого матеріалу.

Контроль якості: Систематичний контроль якості в процесі екструдування важливий для виявлення і усунення можливих проблем. Це може включати в себе вимірювання розмірів, міцності, колірної гами або будь-яких інших параметрів кінцевого продукту.

Підтримка і чистка, регулярне обслуговування та чистка екструдера є важливими для забезпечення його продуктивності та довговічності. Забруднення або знос можуть негативно впливати на якість екструдування.

4.4 Дефекти екструдованого матеріалу та методи боротьби з ними

Під час процесу екструзії полімерних матеріалів існує безліч параметрів, які істотно впливають на якість отриманих продуктів. Одним із ключових завдань є ретельний контроль цих параметрів та вчасне застосування доцільних заходів для уникнення виникнення потенційних дефектів у екструдованому матеріалі.

До основних дефектів, що можуть виникати під час екструзії відносяться: пухирці повітря, нерівномірна товщина, чорні точки і домішки, деформація крихкістю, дефекти поверхні та нерівномірне забарвлення. Кожен з цих дефектів обумовлений комплексом взаємодіючих факторів, що стосуються різноманітних параметрів екструдуювання.

Поява пухирців повітря в екструдованому матеріалі (рис. 4.10) може бути наслідком надмірного нагрівання, що призводить до розкладання полімеру та виділенню газів. Або недостатнім вакуумом в трьох зонному екструдері.

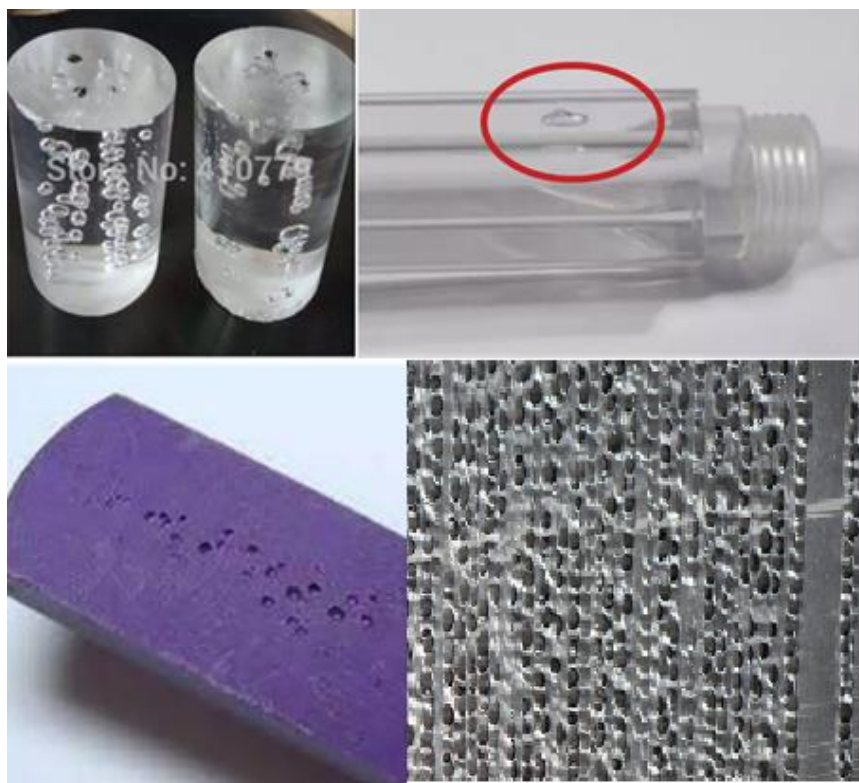


Рисунок 4.10 – Дефекти екструдованого матеріалу, пухирці повітря [24],[25]

Для запобігання цьому ефекту слід знизити температуру циліндру, зокрема в зонах, де матеріал найбільше нагрівається. Забезпечити правильне висушування сировини перед екструдуванням, щоб уникнути випаровування вологи. Перевірити герметичність системи, особливо в місцях подачі матеріалу. Перевірити тиск вакууму який створює вакуумний насос, та перевірити всі магістралі на наявність забруднень.

Нерівномірна товщина (рис. 4.11). Така проблема виникає через нестабільну роботу екструдера, невідповідні параметри дюзи або невірний тиск.

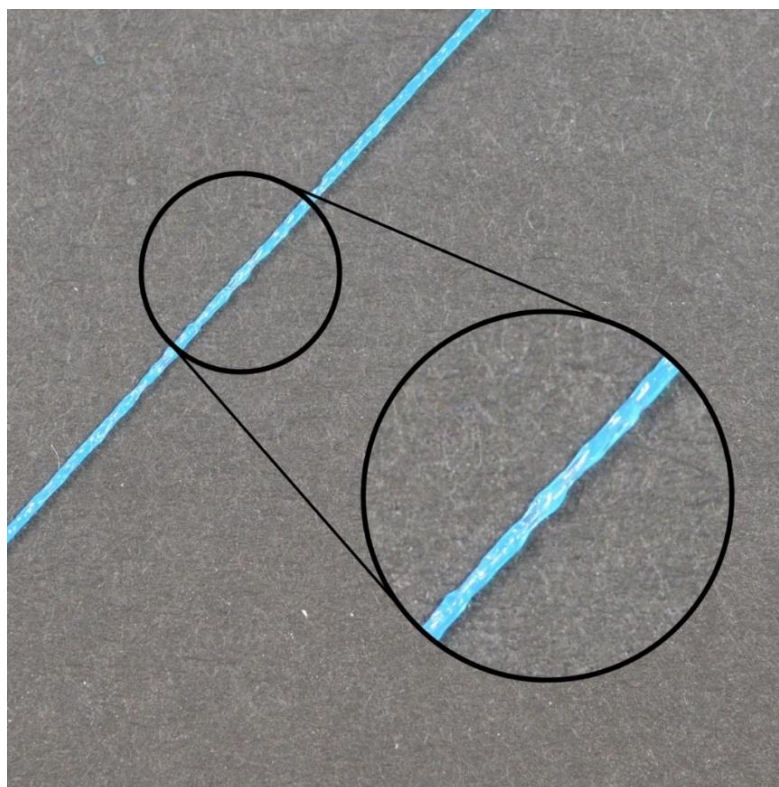


Рисунок 4.11 – Дефекти екструдованого матеріалу, нерівномірна товщина [26]

Для вирішення слід відрегулювати швидкість екструдування, щоб забезпечити рівномірний потік матеріалу. А також перевірити дюзу (філь'єру) на пошкодження чи засмічення і, за потреби, замінити або очистити її. Також доречним буде встановлення засобів моніторингу та корекції тиску в різних зонах екструдера.

Чорні точки або домішки (рис. 4.12). Зазвичай викликані забрудненням сировини, зносом деталей екструдера або залишками попередніх матеріалів.

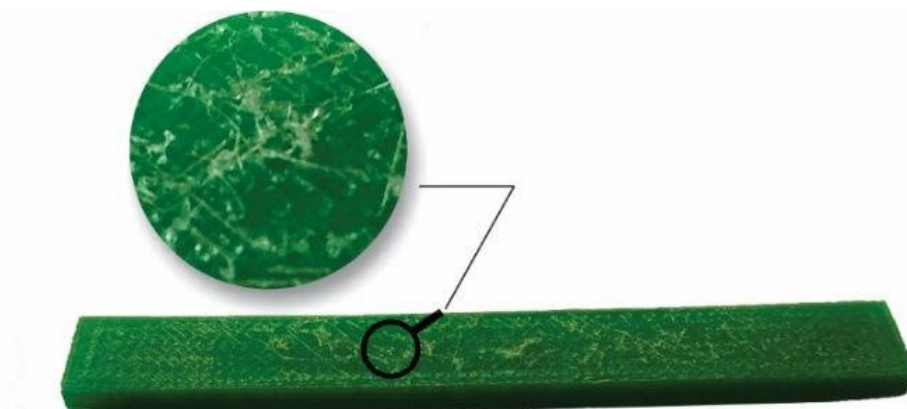


Рисунок 4.12 – Дефекти екструдованого матеріалу, чорні точки або домішки [27]

Методом боротьби є регулярне очищення системи, особливо перед зміною матеріалу. Перевірка екструдера на зношені чи пошкоджені деталі. Також слід перевірити якість сировини на наявність домішок та забруднень.

Деформація (рис. 4.13). Виникає при нерівномірному охолодженні виробу після екструдуювання.



Рисунок 4.12 – Дефекти екструдованого матеріалу, деформація [28]

Рішенням є використання рівномірного охолодження по всій поверхні продукту. Регулювання температури та режимів роботи охолоджувальної системи, щоб забезпечити правильну температуру та швидкість охолодження.

Крихкість (рис. 4.13). Зазвичай викликана через перегрів пластику, потрапляння вологи або поганою якістю сировини.

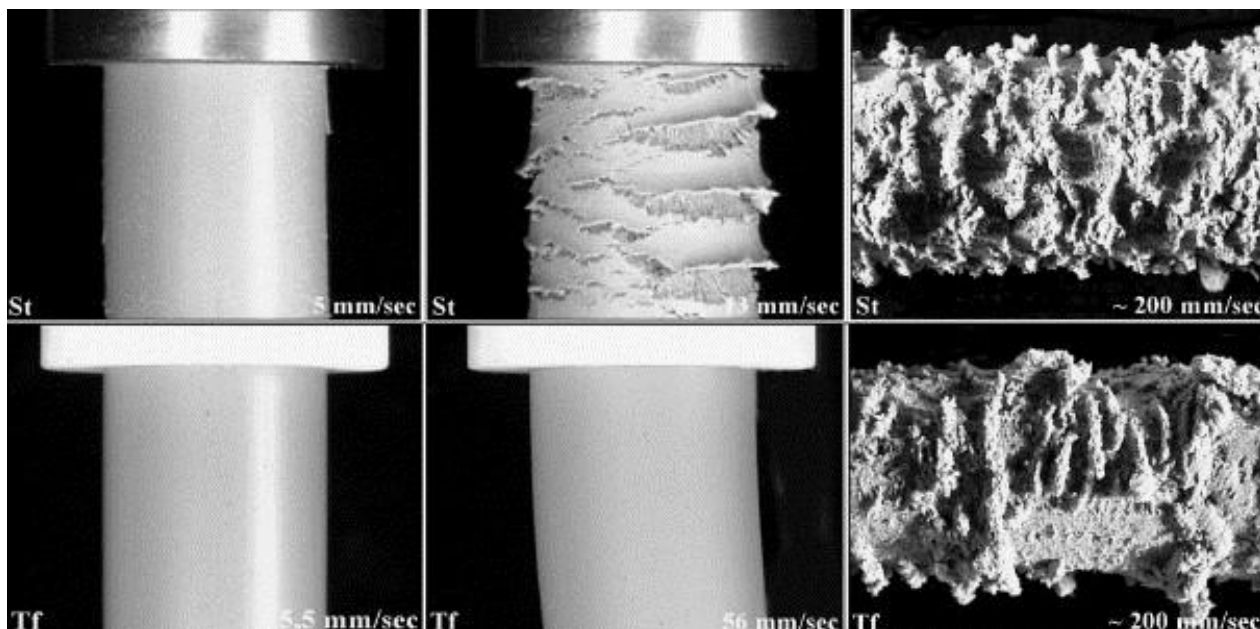


Рисунок 4.13 – Дефекти екструдованого матеріалу, крихкість [5]

Потрібно відкоригувати параметри температури в різних зонах екструдера. Використовувати сировину відповідної якості та перевірити її на наявність дефектів. А також перевірити правильність функціонування вакуумної системи екструдера.

Дефекти поверхні (рис. 4.14). Зазвичай виникають при високій швидкості екструдювання, неправильно підібраній конструкції дюзи або занадто сильному натягу на виході з філь'єри.

Потрібно відрегулювати швидкість екструдювання, знизити її за потреби. Перевірити філь'єру на відповідність до використовуваного пластику та правильну конструкцію, відкоригувати режим роботи намотуючого пристрою, щоб зменшити натяг полімеру.

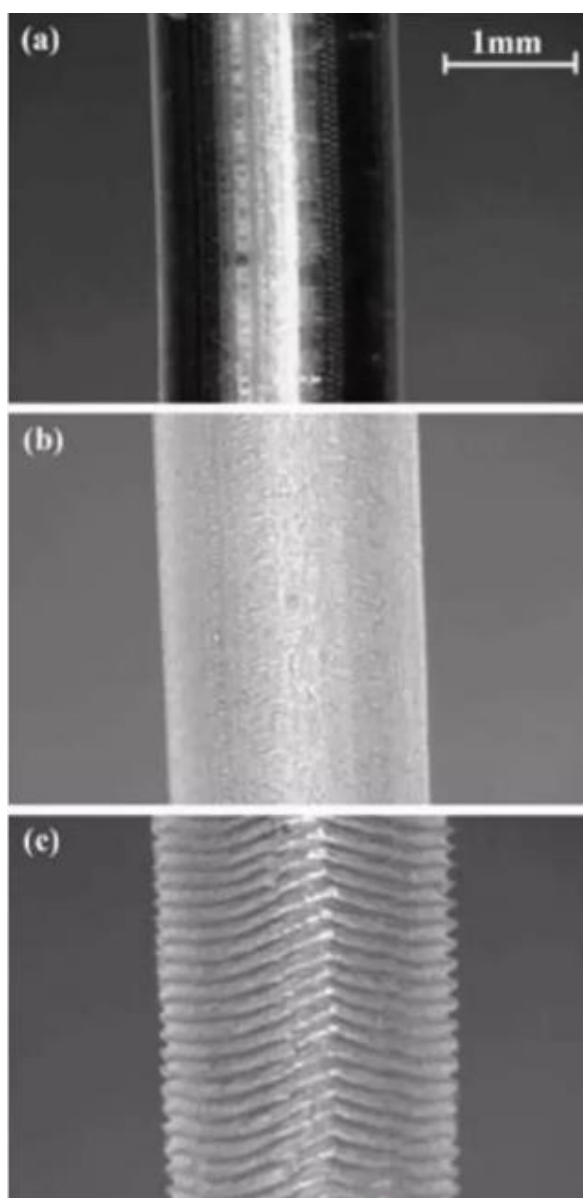


Рисунок 4.14 – Дефекти екструдованого матеріалу, дефекти поверхні [5]

Нерівномірне забарвлення (рис. 4.15). Виникає через нерівномірне змішування пігментів, добавок або потрапляння іншого виду полімеру..

Слід перевірити систему змішування екструдера. А також приділити увагу системі дозування пігментів або добавок у процесі екструдювання, а також проконтролювати відсутність домішок в сировині.

Важливо зазначити що даний дефект актуальний для первинного виробництва пластику, а для переробки він не є суттєвим, через складність контролю складу сировини.



Рисунок 4.15 – Дефекти екструдованого матеріалу, нерівномірне забарвлення [5]

4.5 Аналіз аналогів представлених на ринку

1) Філаментний екструдер Filabot EX6 (рис. 4.16).



Рисунок 4.16 – Загальний вигляд філаментного екструдера Filabot EX6 [29]

У всіх шнеків встановлено співвідношення L/D 24:1, що забезпечує більш високу універсальність та ефективний контроль порівняно з іншими екструдерами, основні технічні характеристики представлені в (табл. 4.2). Екструдер EX6

вдосконалений завдяки системі контролю швидкості екструзії та 4-зонній системі контролю температури. Плата керування швидкістю містить автоматичний модуль управління змінною напругою, розроблений для точного регулювання обертання гвинта. Температурні зони регулюються незалежно, що формує спеціальний тепловий профіль полімеру. Функціонал Filabot Airpath базується на примусовій конвекції, яка використовується для ефективного охолодження нитки під час процесу екструдювання [29].

Таблиця 4.2 – Основні технічні характеристики екструдера Filabot EX6 [29]

Тип екструдера	одночерв'ячний
Кількість зон контролю температури	4
Охолодження екструданту	повітряне
Діаметр філаменту	2,85; 1,75
Додаткові модулі	пристрій для намотування філаменту з контролем сили натягу
Вимоги до матеріалів	тільки підготовлені полімерні гранули

- 2) Багатошнековий екструдер з вакуумною камерою фірми GNEUSS MRSjump (рис. 4.17).

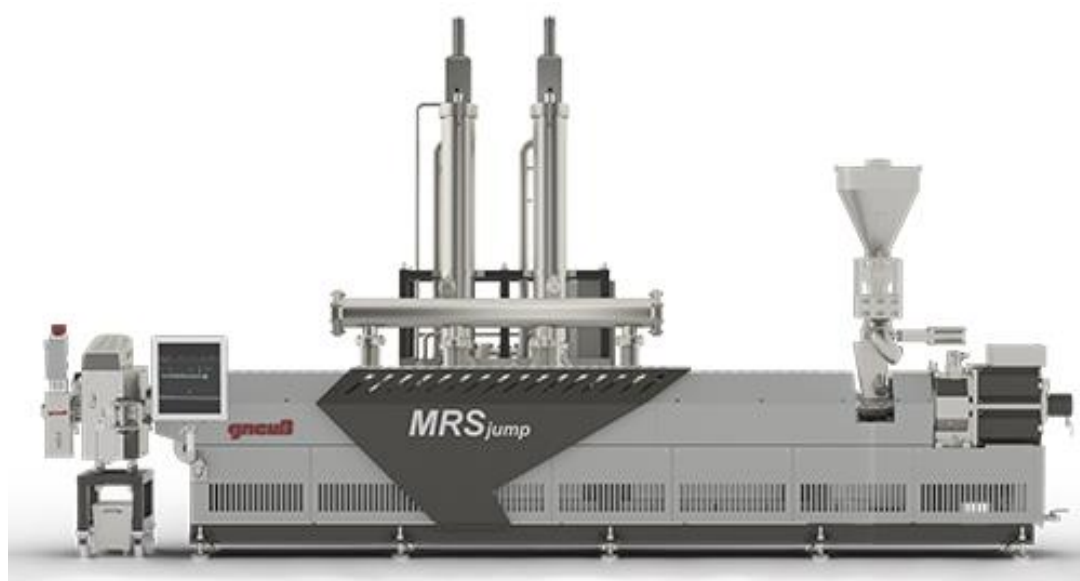


Рисунок 4.16 – Загальний вигляд екструдера GNEUSS MRSjump [30]

Компанія Gneuss розробила інноваційний екструдер MRSjump основні характеристики (табл. 4.3), який поєднує в собі високу ефективність дезактивації дегазаційного екструдера MRS, який добре зарекомендував себе за останні десятиліття, із підвищенням в'язкості.

Таблиця 4.3 – Основні технічні характеристики екструдера GNEUSS MRSjump [30]

Тип екструдера	багаточерв'ячний
Кількість зон контролю температури	4-8
Охолодження екструданту	повітряне, водяне
Додаткові модулі	вакуумні камери, пристрій для підмішування присадок
Вимоги до матеріалів	очищені полімерні гранули та пластівці

Компактний дизайн екструзійної системи MRSjump (рис. 4.17), дозволяє значно зменшити розмір робочої частини зі збереженням продуктивності, і в порівнянні з іншими концепціями, доступними на ринку, її можна легко модернізувати на існуючій листовій лінії з такими ж запасними вимогами, як і існуючий звичайний екструдер [30].

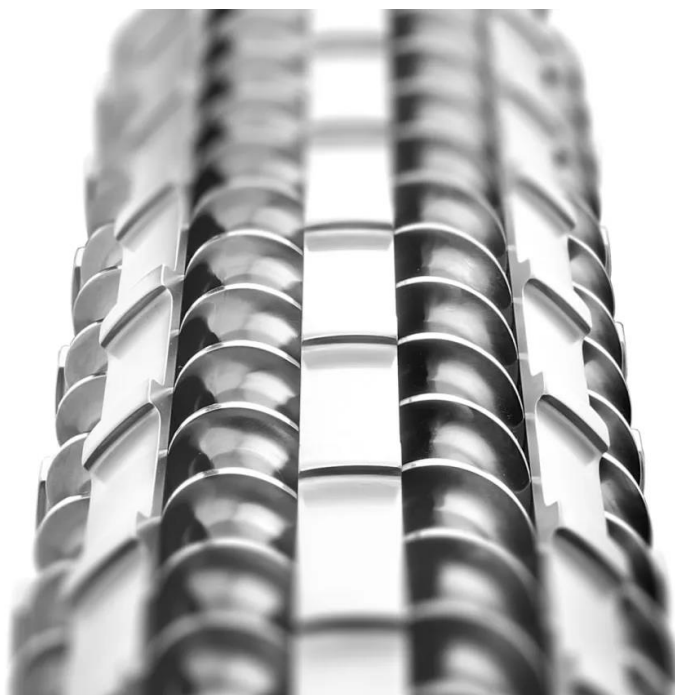


Рисунок 4.17 – Робочі шнеки екструдера GNEUSS MRSjump [30]

Процес екструзії в інноваційному екструдері MRSjump не потребує будь-якої попередньої чи подальшої обробки вхідного матеріалу, такої як кристалізація або попереднє сушіння.

Висока ефективність дегазації екструдера MRSjump дає змогу відповідати обмеженням EFSA та FDA без витрат часу та витрат на обробку матеріалів на початку або після нього [30].

3) Дво-черв'ячний екструдер Bogdaplast 75 (рис. 4.18).



Рисунок 4.18 – Загальний вигляд дво-черв'ячного екструдера Bogdaplast [31]

Це високопродуктивний пристрій для виготовлення листів APET, PET і CPET. Цей екструдер може бути конфігурований як автономний блок або як частина комплексу з двох екструдерів. Особливість цього пристрою полягає в тому, що він вимагає лише кристалізації PET, виключаючи потребу в сушінні. Він вирізняється низьким енергоспоживанням, оптимізованим технологічним процесом, простотою у службовому обслуговуванні та здатністю виробляти вироби з прозорого PET. Дво-черв'ячний екструдер Bogda представляє собою новаторський двогвинтовий екструдер, що забезпечує велику продуктивність при мінімальному споживанні енергії. [31].

5. ПРОЕКТУВАННЯ ЕКСТРУДЕРА

5.1 Вибір конструкції та базових характеристик екструдера

За результатами експерименту описаного в [32], дослідження [33], та методиках проектування екструдерів викладених в [2], [35], [36] було обрано оптимальні параметри яким повинен відповідати одночерв'ячний екструдер для переробки ПЕТ пластику, а саме:

- типорозмір гвинта: 45мм;
- діаметр філаменту: 2.85 мм;
- продуктивність: 25 кг/год;
- кількість отворів філь'єри: 3;
- частота обертання черв'яка: 90 об/хв;
- потужність що споживає черв'як: 15 кВт;
- максимальна температура полімеру: 260 °С;
- матеріал черв'яка: сталь 40ХН2МА;
- матеріал циліндру: 14Х17Н2;
- коефіцієнт тертя полімеру по черв'яку [35]: 0.25;
- коефіцієнт тертя полімеру по корпусу [35]: 0.27.

За основу взято звичайний 3 зонний черв'як, який має зону подачі, плавлення та стискання. Зона стискання буде адаптована для розміщення перед нею зони дегазації. Перед якою буде виконаний спеціальний конструктивний елемент під назвою динамічне ущільнення.

Сам черв'як буде однозаходним з однаковим кроком нарізання гвинта. В зоні подачі він матиме циліндричне осердя, в зоні плавлення – конічне, в вакумній камері перехід з конічного в циліндричне та потім знову в конічне, а в зоні стиснення циліндричне.

5.2 Визначення геометричних параметрів черв'яка

Для звичайного однозаходного черв'яка екструдера існує ряд стандартних параметрів, довжина кожного модуля екструдера попередньо визначається відносно його діаметру [36]. Рекомендовані відношення параметрів до діаметру гвинта, та обрані значення занесені до (табл. 5.1) та позначені на розрахунковій схемі (рис. 5.1).

Таблиця 5.1 – Рекомендовані та обрані параметри черв'яка

Розміри в міліметрах

Назва параметру	Співвідношення до діаметру	Обране значення
Загальна довжина L_3 , м	20-30 D	1.230
Довжина зони подачі L_0 , м	4-8 D	0.225
Довжина зони плавлення L_k , м	9 D	0.405
Довжина зони стискання, м	7-13 D	0.45
Число заходів	-	1
Крок гвинта, м	1 D	0.045
Ширина гребеня витка, м	0.1 D	0.0045
Глибина каналу в зоні подачі H_1 , м	0.15-0.20 D	0.00675
Глибина каналу в зоні плавлення H_2 , м	0.04 (D + 25)	2.8
Зазор між корпусом S, мм	0.003D	0.135

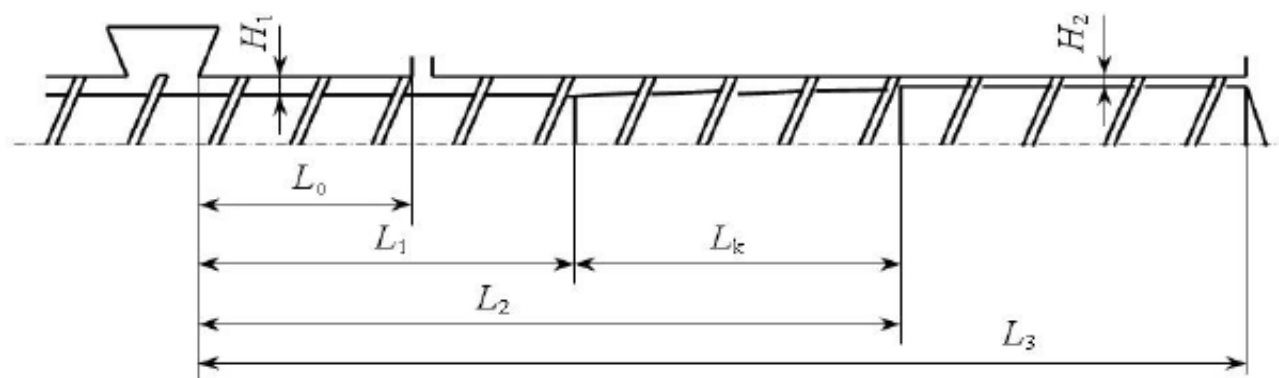


Рисунок 5.1 – Розрахункова схема черв'яка [2]

Подальший розрахунок додаткових параметрів гвинта виконано за методикою описаною в [2].

Питома продуктивність:

$$G_n = \frac{G}{N * 60}, \text{ кг/об} \quad (5.1)$$

де G – продуктивність (кг/год);

N – частота обертання черв'яка (об/хв).

$$G_n = \frac{25}{90 * 60} = 0.0046 \text{ кг/об.}$$

Кут нахилу гвинтової нарізки:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{S}{\pi D}\right) \quad (5.2)$$

де S – крок нарізки гвинта черв'яка, м.

$$\varphi = \arctg\left(\frac{0.045}{\pi * 0.045}\right) = 17.66^\circ$$

Відношення коефіцієнтів тертя:

$$F = \frac{f_{\text{ц}}}{f_{\text{ч}}} \quad (5.3)$$

де $f_{\text{ч}}$ – коефіцієнт тертя полімеру по черв'яку;

$f_{\text{ц}}$ – коефіцієнт тертя полімеру по циліндру.

$$F = \frac{0.27}{0.25} = 1.08$$

5.2 Розрахунок модуля подачі

За алгоритмом розрахунку модуля подачі звичайного черв'яка одночерв'ячного екструдера описаним в [2] та представленим на (рис. 5.2), спочатку проводиться розрахунок для попередньо обраних параметрів, а потім перевіряється виконання умов в блоках 6, 8, 9, 12 та 14. Якщо всі умови виконались, то для обраних

параметрів додається коефіцієнт запасу та остаточно приймаються отримані значення.

Вхідні дані для розрахунку:

- крок нарізки гвинта $S = 0.045\text{ м}$;
- ширина гребеня витка $E = 0.0045\text{ м}$;
- глибина каналу в зоні подачі $H_1 = 0.00675\text{ м}$;
- питома продуктивність $G_n = 0.046\text{ кг/об}$;
- відношення коефіцієнтів тертя $F = 1.08$;
- насипна маса полімеру [37] $\rho_0 = 0.77\text{ кг/м}^3$.

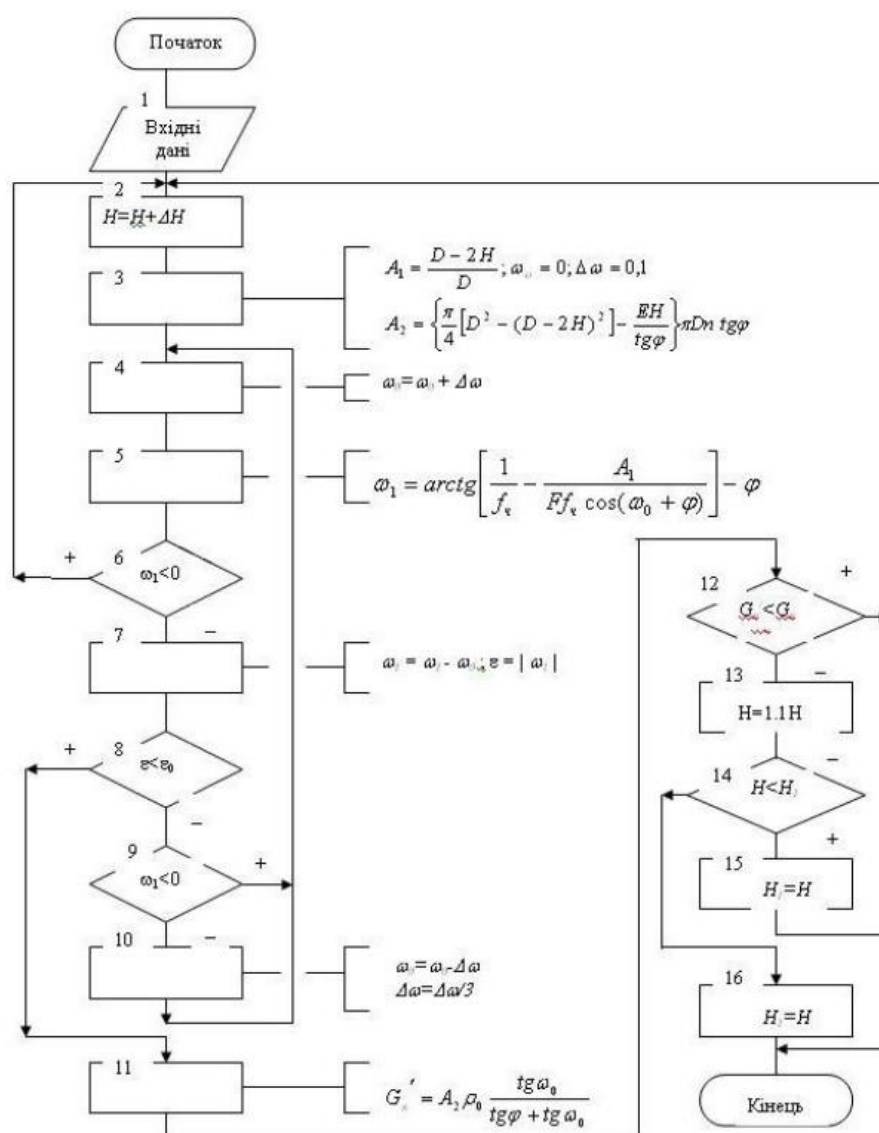


Рисунок 5.2 – Алгоритм розрахунку модуля подачі [2]

Розрахунок виконано за методикою розрахунку зони подачі однозахідного черв'яка описаної в [2].

Визначення коефіцієнту A_1 :

$$A_1 = \frac{D - 2H}{D} \quad (5.4)$$

де D – діаметр гвинта м;

H – глибина каналу в зоні подачі м.

$$A_1 = \frac{0.045 - 2 * 0.00675}{0.045} = 0,7$$

Визначення коефіцієнту A_2 :

$$A_2 = \left\{ \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2H)^2] - \frac{EH}{tg\varphi} \right\} \pi D n \, tg\varphi \quad (5.5)$$

де E – ширина гребеня витка м;

n - частота обертання черв'яка об/хв;

φ - кут нахилу гвинтової нарізки.

$$A_2 = \left\{ \frac{\pi}{4} [0.045^2 - (0.045 - 2 * 0.00675)^2] - \frac{0.0045 * 0.00675}{tg 17.66^\circ} \right\} \pi * 0.045 * 90$$

$$* tg 17.66^\circ = 4,37 * 10^{-2}$$

Уточнюючий розрахунок кута між векторами V і $V_{\text{ц}}$ на початку зони подачі:

$$\omega_1 = \arctg \left[\frac{1}{f_{\text{ч}}} - \frac{A_1}{F * f_{\text{ч}} * \cos(\omega_0 + \varphi)} \right] - \varphi \quad (5.6)$$

де $f_{\text{ч}}$ – коефіцієнт тертя полімеру по черв'яку;

ω_0 – початкове орієнтовне значення кута, визначене методом підстановки та становить 15.5° .

$$\omega_1 = \arctg \left[\frac{1}{0.25} - \frac{0.7}{1.08 * 0.25 * \cos (15.5^\circ + 17.66^\circ)} \right] - 17.66^\circ = 15.58^\circ$$

Умова $\omega_1 < 0$ виконується.

Визначення похибки розрахунку кута ω_1 :

$$\varepsilon = |\omega_1 - \omega_0| \leq 0.1^\circ \quad (5.7)$$

$$\varepsilon = 0,08^\circ$$

Отже похибка розрахунку кута ω_1 , знаходиться в бажаних межах.

Розрахунок питомої продуктивності:

$$G'_n = A_2 \rho_0 \frac{\operatorname{tg} \omega_0}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \omega_0} \quad (5.8)$$

де ρ_0 – насипна маса полімеру.

$$G'_n = 4.37 * 10^{-2} * 0.77 \frac{\operatorname{tg} 15.5^\circ}{\operatorname{tg} 17.66^\circ + \operatorname{tg} 15.5^\circ} = 0.0157 \text{ кг/об.}$$

Отже умова:

$$G'_n > G_n \quad (5.9)$$

виконується.

Глибина каналу в зоні подачі приймається з коефіцієнтом запасу:

$$H_1 = 1.1 * H \quad (5.10)$$

$$H_1 = 0.007425 \text{ м} = 7.425 \text{ мм.}$$

Розрахунок зони подачі чер'яка завершено.

5.3 Розрахунок модуля плавлення

Вхідні данні:

- густина 1,36 г/см;
- вязкість [38]:

$$\mu_{T270} - 210 \text{ Па}\cdot\text{с};$$

$$\mu_{T280} - 170 \text{ Па}\cdot\text{с};$$

$$\mu_{T290} - 120 \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

- величина зазору черв'яком та корпусом $h_i = 1.35 \cdot 10^{-5} \text{ м};$
- коефіцієнт тертя полімеру по черв'яку $f_q = 0.27;$
- діаметр осердя черв'яка в зоні подачі $d_1 = 0.151 \text{ м};$
- діаметр осердя черв'яка в зоні стиснення $d_2 = 0.91 \text{ м};$

Потужність приводу одночерв'ячного екструдера з постійним кроком гвинта визначається за формулою [2]:

$$N = \frac{N_1 + N_2}{\eta} \quad (5.11)$$

де N_1 – витрати потужності на проходження розплаву по гвинтовому каналу черв'яка кВт;

N_2 – витрати потужності на подолання сил в'язкості полімеру кВт;

η – ККД приводу.

$$N_1 = \frac{\pi^3 \cdot (S - E) \cdot L \cdot J \cdot \mu \cdot n}{f_q} + \varphi \cdot P \cdot s \quad (5.12)$$

де L – загальна довжина черв'яка;

J – коефіцієнт;

P – тиск що створює черв'як;

μ – в'язкість ПЕТ;

f_q – коефіцієнт тертя полімеру по черв'яку;

s – зазор між корпусом і черв'яком.

Витрати потужності на подолання сил в'язкості:

$$N_2 = \frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot E \cdot L \cdot J \cdot \mu \cdot n^2}{S \cdot h_i} \quad (5.13)$$

де h_i – величина зазору між черв'яком та корпусом.

Визначення коефіцієнта:

$$J = \frac{\pi^2 \cdot D^2 - 4 \cdot S^2}{\pi^2} + \frac{(D - d_2) \cdot (D + d_1)}{3 \cdot (d_2 - d_1)} + \frac{2.3 \cdot \pi^2 \cdot D^5}{(S + \pi^2 \cdot D^2) \cdot (H_1 - H_2)} \cdot \lg \frac{H_1}{H_2} \quad (5.14)$$

де d_1 - діаметр осердя черв'яка в зоні подачі ;

d_2 - діаметр осердя черв'яка в зоні стиснення ;

H_1 - глибина каналу в зоні подачі;

H_2 - глибина каналу в зоні стиснення.

Потужність яка споживається черв'яком:

$$P = \frac{P_z}{2 \cdot \pi \cdot (H_1^2 - H_2^2)} \quad (5.15)$$

де P_z – осьове зусилля в каналі гвинта.

Осьове зусилля:

$$P_z = \frac{\mu_{T270}}{n \cdot h_n \cdot D \cdot \pi \cdot \operatorname{tg}(\varphi + \omega_1)} \quad (5.16)$$

де ω_1 – кут тертя розплаву,

μ_{T270} – в'язкість ПЕТ при $T=270$ °C.

Числовий розрахунок:

$$P_z = \frac{210}{30 \cdot 0.0028 \cdot 0.045 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg}(17.66^\circ + 15.58^\circ)} = 26982 \text{ Н}$$

$$P = \frac{26982}{2 \cdot \pi \cdot (0.00743^2 - 0.0028^2)} = 90.8 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$J = \frac{\pi^2 \cdot 0.045^2 - 4 \cdot 0.045^2}{\pi^2} + \frac{(0.045 - 0.0197) \cdot (0.045 + 0.0151)}{3 \cdot (0.0197 - 0.0151)} + \frac{2.3 \cdot \pi^2 \cdot 0.045^5}{(0.045 + \pi^2 \cdot 0.045^2) \cdot (0.0074 - 0.0028)} \cdot \lg \frac{0.0074}{0.0028} = 0.1173$$

$$N_1 = \frac{\pi^3 \cdot (0.045 - 0.0045) \cdot 1.23 \cdot 0.1173 \cdot 210 \cdot 30}{0.045} + 17.66^\circ \cdot 90.8 \cdot 10^6 \cdot 1.35 \cdot 10^{-4} = 8343.9 \text{ Вт} = 8.34 \text{ кВт}$$

$$N_2 = \frac{\pi^3 \cdot 0.045^3 \cdot 0.0045 \cdot 1.230 \cdot 0.1173 \cdot 1.36 \cdot 30^2}{0.045 \cdot 1.35 \cdot 10^{-5}} = 3696 \text{ Вт} = 3.7 \text{ кВт}$$

$$N = \frac{8.34 \cdot 10^3 + 3.7 \cdot 10^3}{0.87} = 13.84 \text{ кВт}$$

Отже потужність що споживається черв'яком $N=13.84$ кВт.

5.4 Розрахунок черв'яка на міцність

Вхідні данні:

- Матеріал червяка - 40ХН2МА;
- Густина 7850 кг/м^3 .

Розрахунок виконано за методикою описаною в [2] для черв'яка без внутрішнього каналу, тобто суцільне виконання.

Крутний момент черв'яка:

$$M_{кр} = \frac{30 \cdot N}{\pi \cdot n} \quad (5.17)$$

де N – потужність, що споживається черв'яком Вт;

n – швидкість обертання черв'яка, об/хв.

Осьове зусилля:

$$P_{oc} = \frac{2 \cdot M_{кр}}{D} \cdot tg\varphi \quad (5.18)$$

де D – зовнішній діаметр черв'яка, м;

φ – кут нахилу гвинтової нарізки.

Розподілене навантаження викликане власною вагою черв'яка (Н·м):

$$q = \frac{9.8 \cdot G}{l_p} \quad (5.19)$$

де G – маса черв'яка, кг;

l_p – довжина робочої частини черв'яка.

Маса черв'яка:

$$G = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \rho_{ч} \cdot l_p \quad (5.20)$$

де $\rho_{ч}$ – густина матеріалу черв'яка.

Осьові сили та згинальний момент викликають стискальне напруження в черв'яку. Перша складова напруження рівномірно розподіляється вздовж всього перерізу черв'яка, а друга розтягувальна у верхній частині і стискаюча у нижній.

Отже величина стискального напруження є найбільшою в нижній частині черв'яка та визначається за формулою [2]:

$$\sigma_{ст} = \frac{P_{oc}}{F} + \frac{M_{max}}{W_x} \quad (5.21)$$

де F – площа небезпечного перерізу (на початку зони подачі, площа перерізу витків не враховується), м², визначається за формулою:

$$F = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad (5.22)$$

де d_1 – діаметр черв'яка в зоні подачі, м;

M_{max} – максимальний згинальний момент власної ваги, Н·м, та визначається за:

$$M_{max} = \frac{1}{2} q \cdot l_p^2 \quad (5.23)$$

Осьовий момент опору:

$$W_x = \frac{\pi \cdot d_1^3}{32} \quad (5.24)$$

Дотичні напруження:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p} \quad (5.25)$$

де W_p – полярний момент опору, який можна визначити за:

$$W_p = \frac{\pi \cdot d_1^3}{16} \quad (5.26)$$

Розраховується через III теорію міцності еквівалентне напруження:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_{ст}^2 + 4\tau^2} \quad (5.27)$$

Перевірка коефіцієнту запасу:

$$n = \frac{\sigma_T}{\sigma_{екв}} \leq [n] \quad (5.28)$$

де $[n]$ – допустимий коефіцієнт запасу, обраний 1.7 за [2].

Арифметичний розрахунок:

$$M_{кр} = \frac{30 \cdot 13.84 \cdot 10^3}{\pi \cdot 90} = 1468.5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$P_{ос} = \frac{2 \cdot 1468.5}{0.045} \cdot tg 17.66^\circ = 20779 \text{ Н} = 20.8 \text{ кН};$$

$$G = \frac{\pi \cdot 0.045^2}{4} \cdot 7850 \cdot 1.23 = 15.36 \text{ кг};$$

$$q = \frac{9.8 \cdot 15.36}{1.23} = 122.38 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{max} = \frac{1}{2} \cdot 122.38 \cdot 1.23^2 = 92.57 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$W_p = \frac{\pi \cdot 0.0315^3}{16} = 6.137 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$W_x = \frac{\pi \cdot 0.0315^3}{32} = 3.068 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$\tau = \frac{1468.5}{6.137 \cdot 10^{-6}} = 239.29 \text{ МПа};$$

$$F = \frac{\pi \cdot 0.045^2}{4} = 0.00159 \text{ м}^2;$$

$$\sigma_{ст} = \frac{20.8 \cdot 10^3}{0.00159} + \frac{92.57}{3.068 \cdot 10^{-6}} = 43.25 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{екв} = \sqrt{(43.25 \cdot 10^6)^2 + 4 \cdot (239.29 \cdot 10^6)^2} = 480.5 \text{ МПа};$$

$$n = \frac{655}{480.5} = 1.36$$

Отже попередньо умова виконується, тому міцність черв'яка екструдера цілком забезпечено.

5.5 Розрахунок на стійкість

Власна вага черв'яка викликає згинальний момент, його дія є циклічною, та цикл симетричний, адже черв'як обертається, тому потрібно перевіряти його на витривалість:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{(k_{\sigma})_d \sigma_a}, \quad (5.29)$$

де n_{σ} – коефіцієнт запасу міцності для циклічного навантаження;

σ_{-1} - допустиме напруження циклічного навантаження, визначається за формулою (5.30);

σ_a – амплітуда змінення за формулою (5.31);

σ_{max} – максимальне напруження за формулою (5.32);

$(k_{\sigma})_d$ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень, визначається за формулою (5.33)

$$\sigma_{-1} = 0.4\sigma_b \quad (5.30)$$

$$\sigma_a = 2\sigma_{max} \quad (5.31)$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_x} \quad (5.32)$$

$$(k_{\sigma})_d = \frac{k_{\sigma}}{\beta \cdot \varepsilon} \quad (5.33)$$

де k_{σ} – коефіцієнт концентрації напружень, для одношнекових еструдерів $k_{\sigma} = 1.9 - 2$;

β – коефіцієнт якості поверхні гвинта, $\beta = 1$;

ε – коефіцієнт перерізу черв'яка, $\varepsilon = 0.6$, за [36].

Розрахунок:

$$(k_{\sigma})_d = \frac{1.9}{1 \cdot 0.6} = 3.17$$

$$\sigma_{max} = \frac{92.57}{3.068 \cdot 10^{-6}} = 30.17 \text{ МПа};$$

$$\sigma_a = 2 * 30.17 = 60.35 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{-1} = 0.4 \cdot 880 = 352 \text{ МПа};$$

$$n_\sigma = \frac{352}{3.17 \cdot 60.35} = 1.84$$

Отже умова витривалості $n_\sigma > [n_\sigma] = 1.84 > 1$, виконується.

5.6 Розрахунок на жорсткість

Гвинт перевіряють на жорсткість для визначення його відповідності конструкційного зазору. Адже при виході цього параметру за допустимі межі при роботі екструдера без полімеру черв'як може тертись об корпус, що призведе до пошкоджень поверхонь та подальше погіршення експлуатаційних характеристик екструдера.

Полярний момент інерції суцільного черв'яка, м⁴:

$$I = \frac{\pi d_1^4}{64} \quad (5.34)$$

Радіус інерції, м:

$$i = \sqrt{\frac{I}{F}} \quad (5.35)$$

Ступінь жорсткості:

$$\lambda = \frac{\mu l_p}{i} \quad (5.36)$$

де μ – коефіцієнт замурування, для цього випадку $\mu = 2$.

Для випадку $\lambda > 50$, гвинт вважають не жорстким, та перевіряється на найбільший прогин [2]:

$$\delta_p = \frac{1}{EI} \left[\frac{q}{k^2} \left(\frac{1}{k^2} + \left(\frac{1}{k^2} + \frac{l_p^2}{2} \right) \right) - \frac{1}{k} \left(\frac{q}{k^3} - A l_p \right) \cos(k l_p) - \frac{1}{k^2} \left(\frac{q l_p}{k} - A \right) \sin(k l_p) \right] \quad (5.37)$$

де k - коефіцієнт визначається за формулою (5.38);

A – коефіцієнт який визначають за (5.39);

E – модуль Юнга для сталі, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

$$k = \sqrt{\frac{P_{oc}}{EI}} \quad (5.38)$$

$$A = \frac{q \left(l_p - \frac{1}{k} \sin(k l_p) \right)}{k \cos(k l_p)} \quad (5.39)$$

Для точнішого обчислення силових факторів, які діють на гвинт, потрібно враховувати позацентровий характер осьового зусилля, яке виникає від прогину кінця черв'яка δ_p :

$$\sigma = \frac{P_{oc}}{F} \left(1 + \frac{\delta_p F}{I} d_1 \right) + \frac{M_{max}}{W_x} \quad (5.40)$$

Арифметичний розрахунок:

$$I = \frac{\pi \cdot 0.0315^4}{64} = 4.83 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4;$$

$$i = \sqrt{\frac{4.83 \cdot 10^{-8}}{0.00159}} = 5.51 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 1.23}{5.51 \cdot 10^{-3}} = 446.5$$

$$k = \sqrt{\frac{62.3 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^{11} \cdot 4.83 \cdot 10^{-8}}} = 2.54$$

$$A = \frac{122.38 \left(1.23 - \frac{1}{2.54} \sin (2.54 \cdot 1.23) \right)}{2.54 \cdot \cos (2.54 \cdot 1.23)} = -58.94$$

$$\begin{aligned} \delta_p = \frac{1}{2 \cdot 10^{11} \cdot 4.83 \cdot 10^{-8}} & \left[\frac{122.38}{2.54^2} \left(\frac{1}{2.54^2} + \left(\frac{1}{2.54^2} + \frac{1.23^2}{2} \right) \right) \right. \\ & - \frac{1}{2.54} \left(\frac{122.38}{2.54^3} + 58.94 \cdot 1.23 \right) \cos (2.54 \cdot 1.23) \\ & \left. - \frac{1}{2.54^2} \left(\frac{122.38 \cdot 1.23}{2.54} + 58.94 \right) \sin (2.54 \cdot 1.23) \right] = 0.00538566 \end{aligned}$$

Отже умова $\delta_p = 0.0054 < \delta = 0.1$, тому жорсткість черв'яка забезпечена.

$$\sigma = \frac{20.8 \cdot 10^3}{0.00159} \left(1 + \frac{5.39 \cdot 10^{-3} \cdot 0.00159}{4.83 \cdot 10^{-8}} 0.0315 \right) + \frac{92.57}{3.068 \cdot 10^{-6}} = 116.4 \text{ МПа.}$$

Уточнений розрахунок на міцність:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sqrt{(116.4 \cdot 10^6)^2 + 4 \cdot (717.8 \cdot 10^6)^2} = 492.5 \text{ МПа.}$$

5.7 Вибір редуктора і двигуна

Вхідні данні:

- швидкість обертання черв'яка $n - 90$ об/хв;

- потужність яку потребує черв'як $N-13.84$ кВт;
- осьове зусилля черв'яка $P_{oc}-20.8$ кН.

Редуктори для екструдерів маю особливу будову. Однією з основних характеристик, яка вирізняє цей тип редукторів, є їхній спеціалізований дизайн, розроблений для оптимальної роботи при великих крутних моментах.

Екструдери, які використовуються у виробництві пластмас та інших матеріалів, сприймають суттєві навантаження, що вимагає від редукторів високої міцності та надійності. Основною вимогою до таких редукторів є їхня здатність витримувати значний крутний момент, що виникає під час екструзії матеріалів.

Такі редуктори повинні бути оснащені упорним підшипником, спеціально розробленими для ефективного опору осьовим силам. Це особливо важливо, оскільки черв'як екструдера піддається значним осьовим навантаженням під час подачі матеріалу. Такий підхід до конструкції редукторів для екструдерів гарантує їхню стійкість, продуктивність та тривалу службу в умовах високого технологічного навантаження.

Компанія Bonfiglioli розробила спеціальну лінійку редукторів HDPE (рис. 5.3) для екструдерів. Більшість компонентів та передач вона спільно використовує з важкими редукторами серії HDP.

Ці редуктори мають міцний корпус з литого чавуну. Основною характеристикою є використання міцного упорної роликового підшипника серії 294...E (рис. 5.4), що ексклюзивно постачається провідними брендами. Підшипник встановлено в спеціальному фланці, що має спільний об'єм з редуктором, така конструкція забезпечує спільне змащення обертових частин зубчастої передачі і підшипника для екструдера.

Завдяки такому дизайну корпус екструдера кріпиться до самого редуктора, та не потрібно використовувати масивну раму яка б змогла витримувати значні навантаження.



Рисунок 5.3 – Редуктор HDPE виробник Bonfiglioli [39]



Рисунок 5.4 – Редуктор HDPE упорний підшипник, та загальний вигляд [39]

Індивідуалізовані розміри для монтажу опор екструдера дозволяють легко підібрати їх до кріплень корпусу екструдера.

Отже обрана конфігурація редуктора:

HDPE 70 3 29.6 17E 36FZ LR VP 132 B6, та розшифрована на (рис. 5.4).



Рисунок 5.5 – Розшифровка конфігурації редуктора [39]

6 МОДЕЛЮВАННЯ

6.1 Розробка 3-Д моделі черв'яка екструдера

За результатами розрахунків було розроблено 3-Д модель черв'яка в середовищі Autodesk Inventor (рис. 6.1).

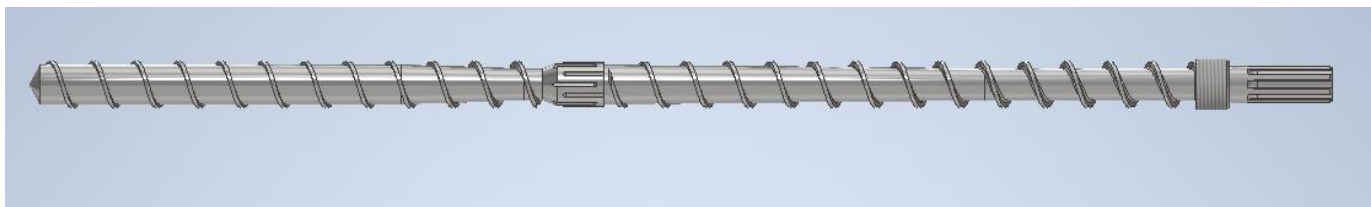


Рисунок 6.1 – Загальний вигляд 3-Д моделі черв'яка.

Цей черв'як виготовлений зі сталі 40ХН2МА та складається з зони подачі, плавлення, ущільнення, зони декомпресії та зони стискання.

Ущільнення виконує три функції, перша це власне функція самого динамічного ущільнення, воно створює зону підвищеного тиску та запобігає самовільному переміщенню розплаву до вакуумної камери, таким чином забезпечуючи можливість її функціонування. Друга функція це додаткове перемішування полімеру для досягнення однорідності розплаву, що значно покращує якість вихідного матеріалу. І відповідно третя функція це фільтрація розплаву від нерозплавлених частинок, які менше ніж 2мм, вони будуть затримуватись даним ущільненням та поступово нагріватись, поки на розплавляться та не пройдуть через зазор.

Також на хвостовику шнека нарізана різьба, яка виконує роль лабіринтного ущільнення, та запобігає потраплянню сировини (пластикових пластівців) до ущільнення упорного підшипника.

Крутний момент на черв'як передається від редуктора за допомогою шліцевого з'єднання яке має розміри 8х32х36, та має довжину 80мм.

Особливі елементи черв'яка представлені на (рис. 6.2).

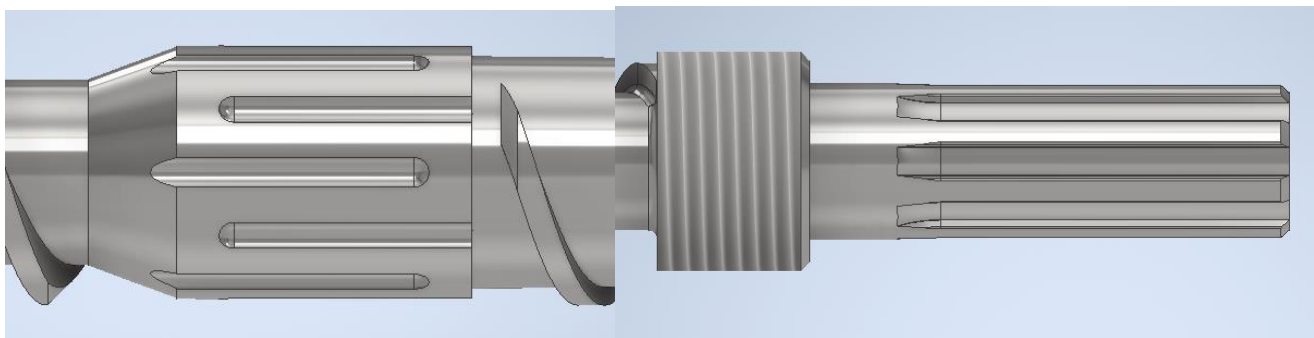


Рисунок 6.2 – Динамічне ущільнення, та шліци.

6.2 Розробка 3-Д моделі корпусу екструдера

Корпус вирішено виконати цільним, тобто без внутрішньої гільзи, така конструкція обрана через наявність вакуумної камери, для якої необхідне виконання спеціального каналу в корпусі. Оскільки в цій камері створюється вакуум то потрібно забезпечити герметичне з'єднання між гільзою та корпусом, а це досить складна задача, адже при таких розмірах корпусу посадку з натягом неможливо реалізувати.

Гільзу вставляють в корпус з вільною посадкою та фіксують за допомогою пазів. В такому випадку кисень зможе проходити в зазорі між корпусом та гільзою а також розплавлений полімер буде контактувати з матеріалом корпусу. Це призведе до утворення корозії та подальшої деформації гільзи.

Тому для такої конфігурації екструдера доцільно використовувати ту частину корпусу яка контактує з розплавом, цільної конструкції (рис.6.3).

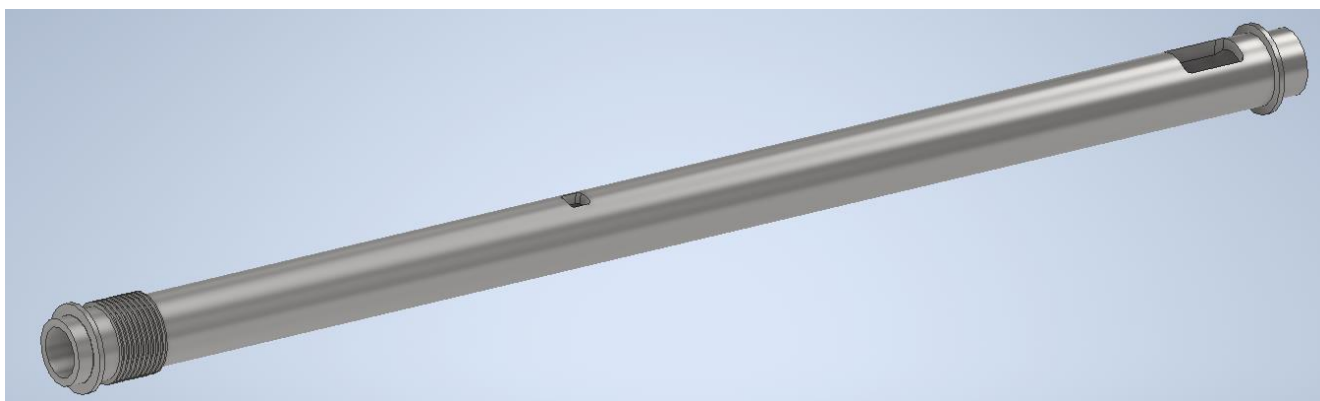


Рисунок 6.3 – Загальний вигляд 3-Д моделі циліндричної частини корпусу.

Цільне виконання доцільне лише для циліндричної частини, інші елементи будуть виконані окремо, та прикріплені до корпусу за допомогою зварного з'єднання. Таке рішення пояснюється доцільним використанням матеріалу та спрощенням процесу виготовлення даного вузла.

Для збільшення зносостійкості внутрішня поверхня корпусу піддається азотуванню на глибину до 0,1 мм до твердості HRA 82–86.

Для з'єднання корпусу з редуктором розроблений фланець (рис. 6.4)

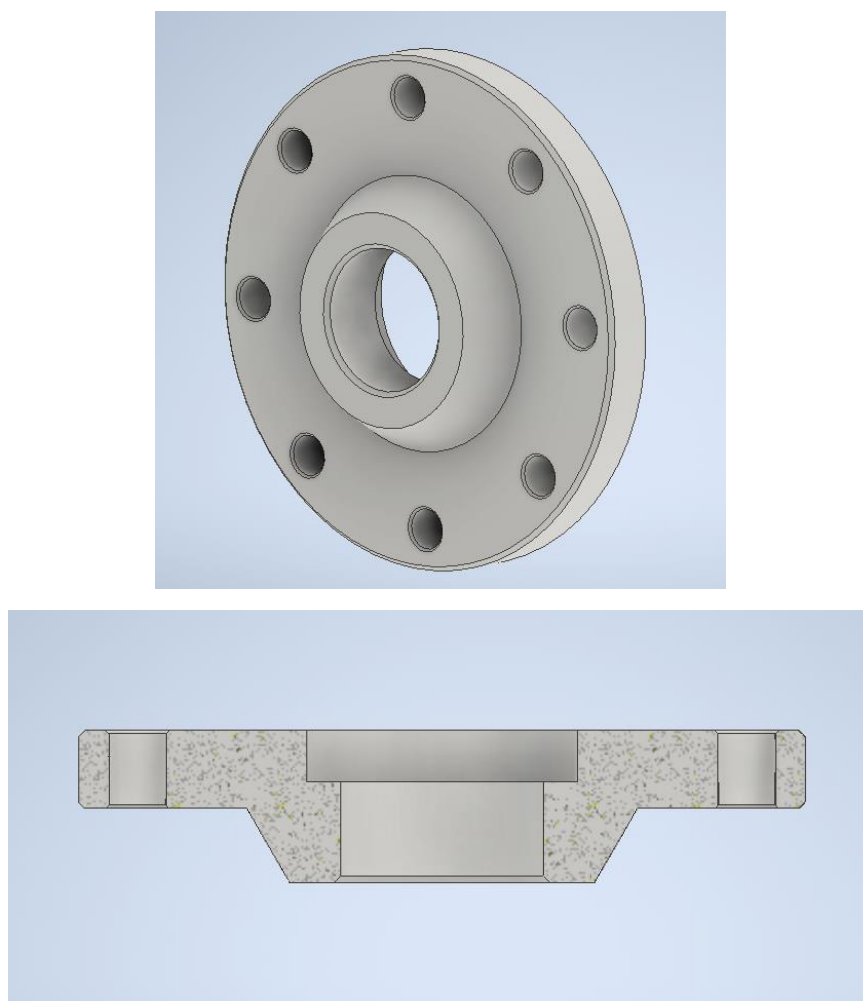


Рисунок 6.4 – Загальний вигляд 3-Д моделі фланця та його переріз.

Цей фланець буде приєднано до циліндру за допомогою зварного з'єднання. Оскільки в якості матеріалу циліндру обрано сталь 14X17H2 то для виконання інших елементів потрібно враховувати особливості зварювання цього матеріалу. Переглянувши різні варіації поєднання цього матеріалу з іншими, було обрано

сталь 8Х13 для зварних деталей. Зварювання буде електродуговим та електроди ОЗЛ-6, за ГОСТ 9466-75.

З іншого торця циліндру для закріплення матриці (філь'єри), розроблено спеціальний фланець (рис. 6.5).

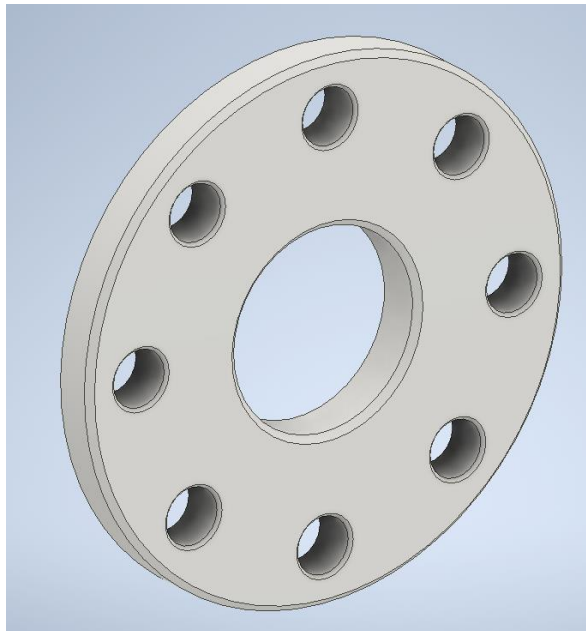


Рисунок 6.5 – Загальний вигляд 3-Д моделі фланця філь'єри.

Цей фланець має менші розміри ніж фланець редуктора, в ньому виконано 8 отворів під болти М16 для кріплення філь'єри.

Для вакуумної камери розроблено вентиляційний канал (рис. 6.6).

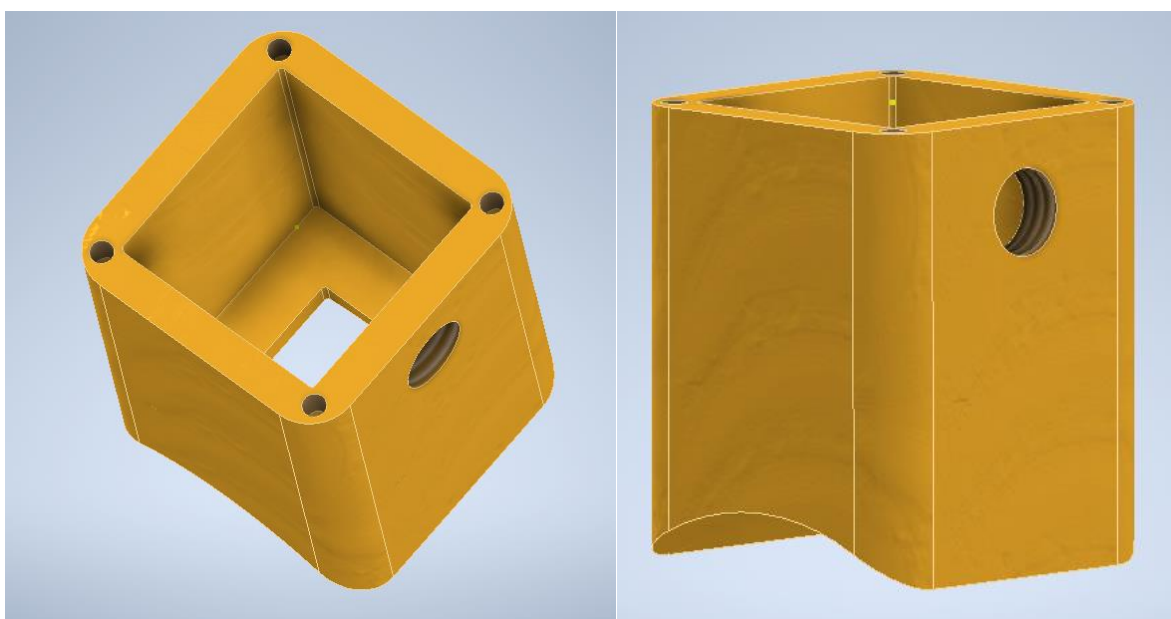


Рисунок 6.6 – Загальний вигляд 3-Д моделі каналу вакуумної камери.

В нижній частині він має циліндричну форму, яка повторює форму корпусу, та виріз в центрі дна, для з'єднання з об'ємом циліндру. На боковій стінці виконано отвір та нарізано різьбу 3/8'', в яку закручується кутовий штуцер для підключення вакуумної трубки. У верхній частині розташовані 4 різьбових отвори для кріплення скляної кришки. Вона необхідна для візуального контролювання процесу дегазації.

Бункер з сировиною буде прикручуватись до перехідної пластини (рис. 6.7), яка в свою чергу буде приварена до циліндру.

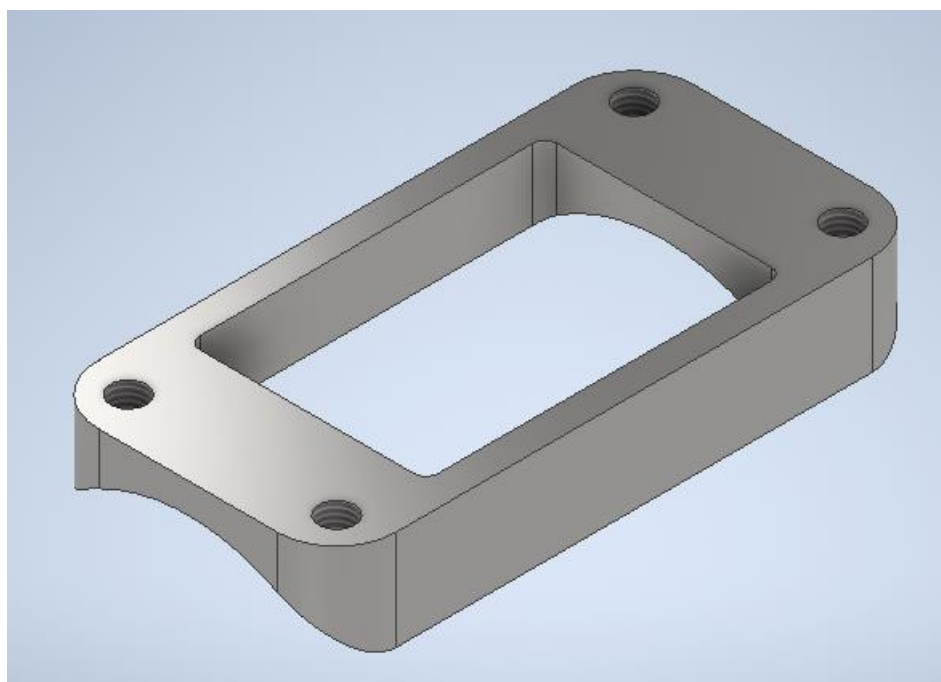


Рисунок 6.7 – Загальний вигляд 3-Д моделі перехідної пластини.

Вона також повторює форму циліндру та приварюється до нього. На верхній поверхні розміщені 4 різьбових отвори під М6х1. Необхідність такої конструкції пояснюється близьким розташуванням бункера та фланця, і для можливості вставити або дістати гвинти щоб прикрутити чи відкрутити фланець від редуктора, бункер повинен бути демонтований. Додатково це дозволяє відносно легко замінити бункер.

Зібраний корпус екструдера зображено на (рис 6.8).

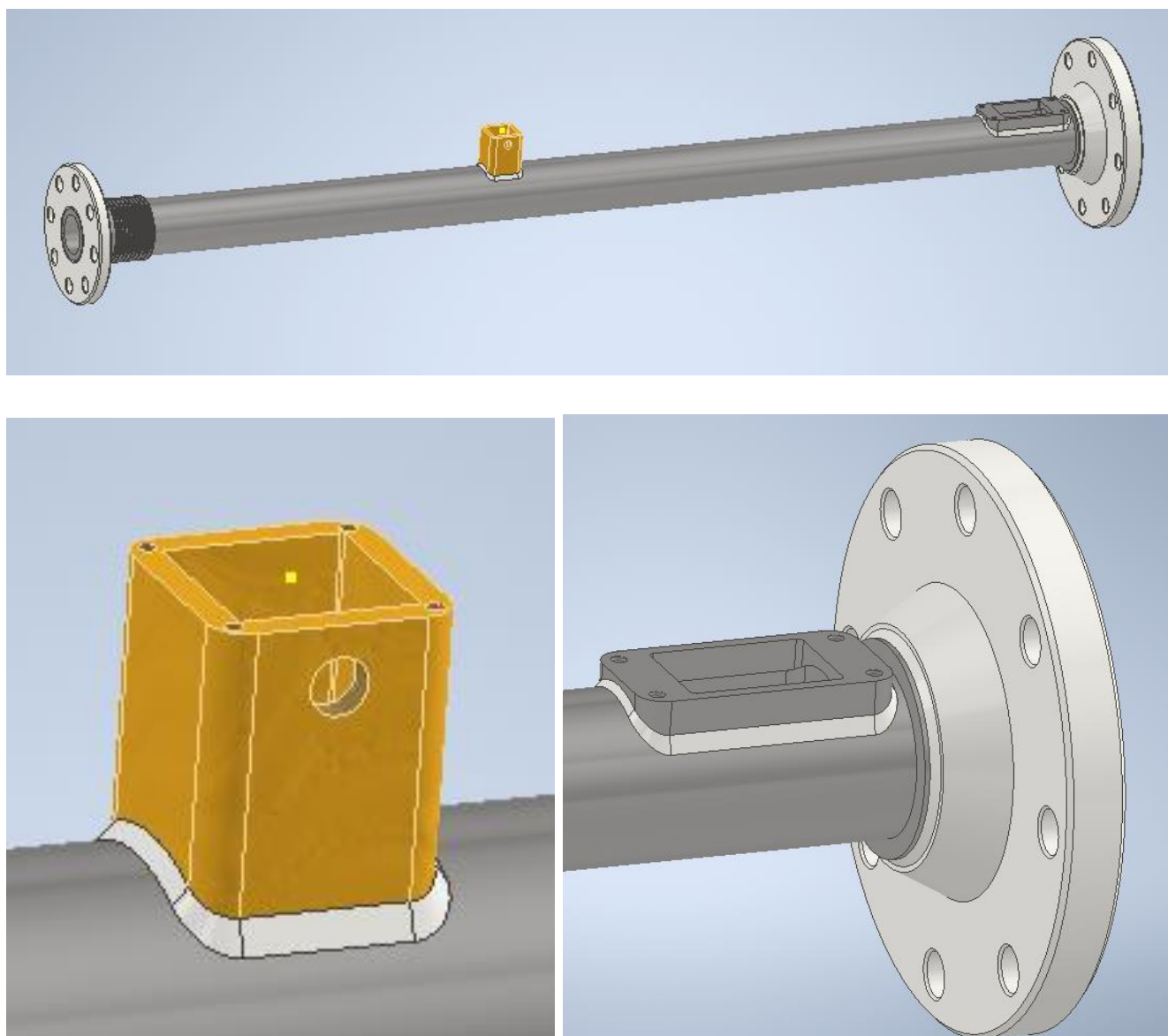


Рисунок 6.8 – Вигляд збірки зварного корпусу екструдера.

6.3 Розробка 3-Д моделі філь'єри

За вихвдними даними розрахунків було розроблено модель матриці (рис. 6.9).

Вона має 3 отвори для проходження полімеру та формування філаменту діаметром 2.85 мм.

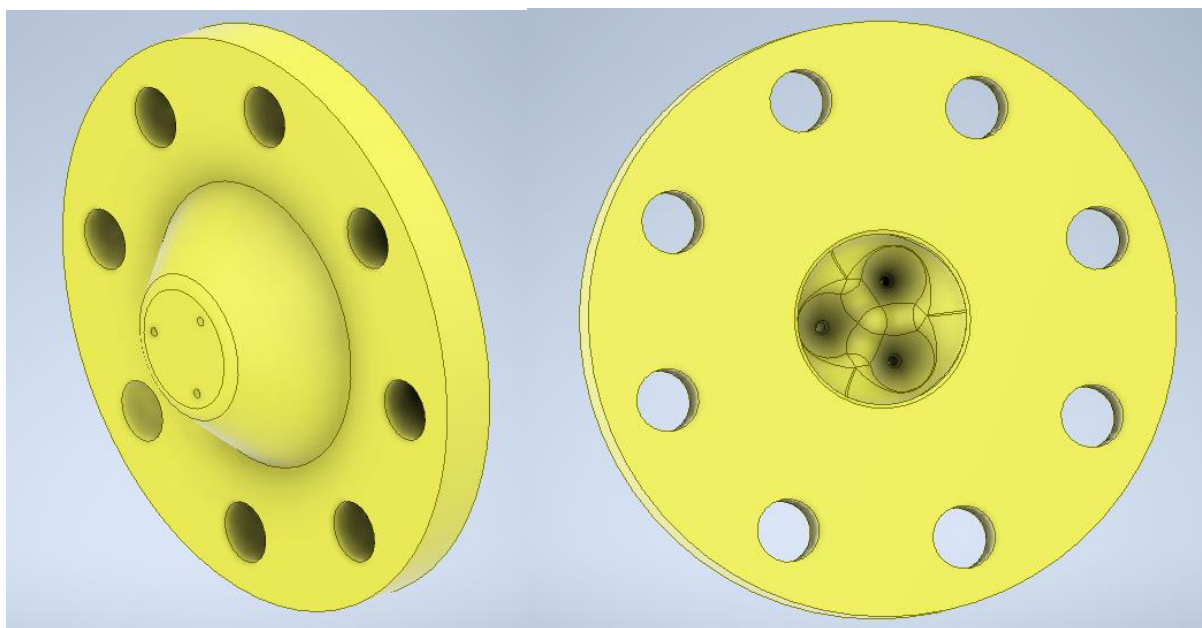


Рисунок 6.9 – Вигляд 3-Д моделі філь'єри.

Для запобігання утворення локальних зон підвищеного тиску полімеру вхідна частина матриці має складну закруглену форму (рис. 6.10). Така форма також позитивно відображається на схожості параметрів формування філаменту для всіх отворів, адже полімер рівномірно розподіляється між всіма трьома соплами.

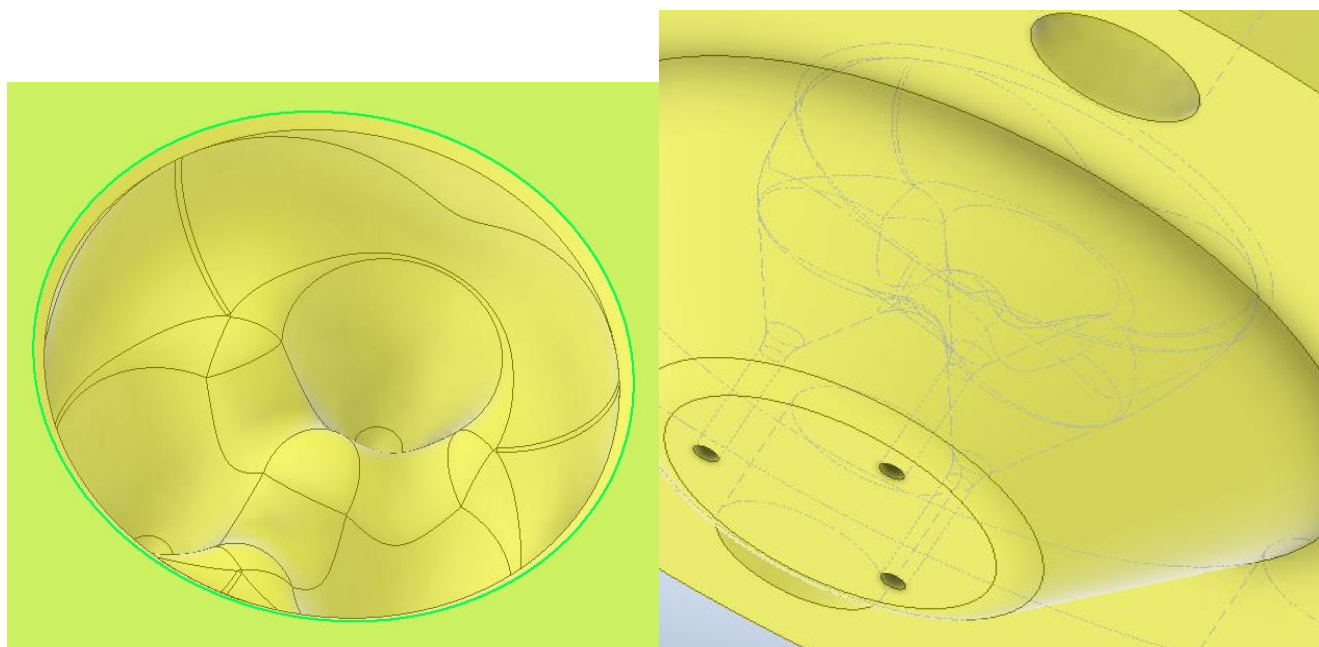


Рисунок 6.10 – Особлива закруглена форма матриці.

6.4 Виконання збірки екструдера

Крім описаних деталей, для можливості виконання збірки було також розроблено моделі покупних одиниць, а саме редуктор, двигун, бункер, ущільнення філь'єри та вакуумної камери. Кінцевий загальний вигляд збірки зображено на (рис. 6.11).

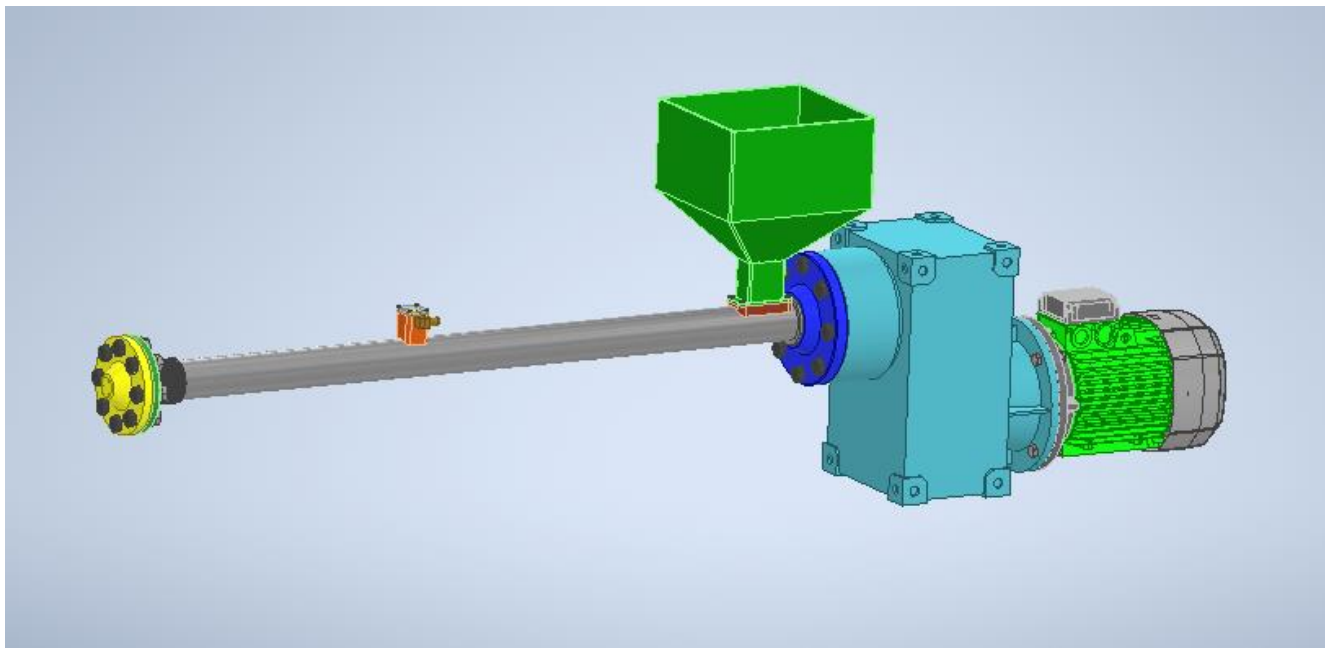


Рисунок 6.11 – Загальний вигляд збірки екструдера.

Філь'єра кріпиться до фланця за допомогою 8 болтів M16x50 ISO 4018, та 6 гайок M16. Фланець корпусу прикручений до редуктора також 8-ма гвинтами M16x50 ISO 4018.

Скляна кришка через ущільнення закріплена на вакуумній камері гвинтами M3x8 AS1420. Бункер 4-ма гвинтами M5x10 AS1110.

Та двигун з редуктором 4-ма болтами M12x48 DIN 609, та гайками M16 DIN 6926, які мають нейлонове кільце для запобігання самовільному відкрученню, адже цей вузол вібронавантажений.

6.5 Вигляд збірки з рознесеними елементами

Рознесена схема збірки екструдера зображена на (рис. 6.12) та надає детальні вказівки та графічні представлення кожного компонента та його точного розташування.

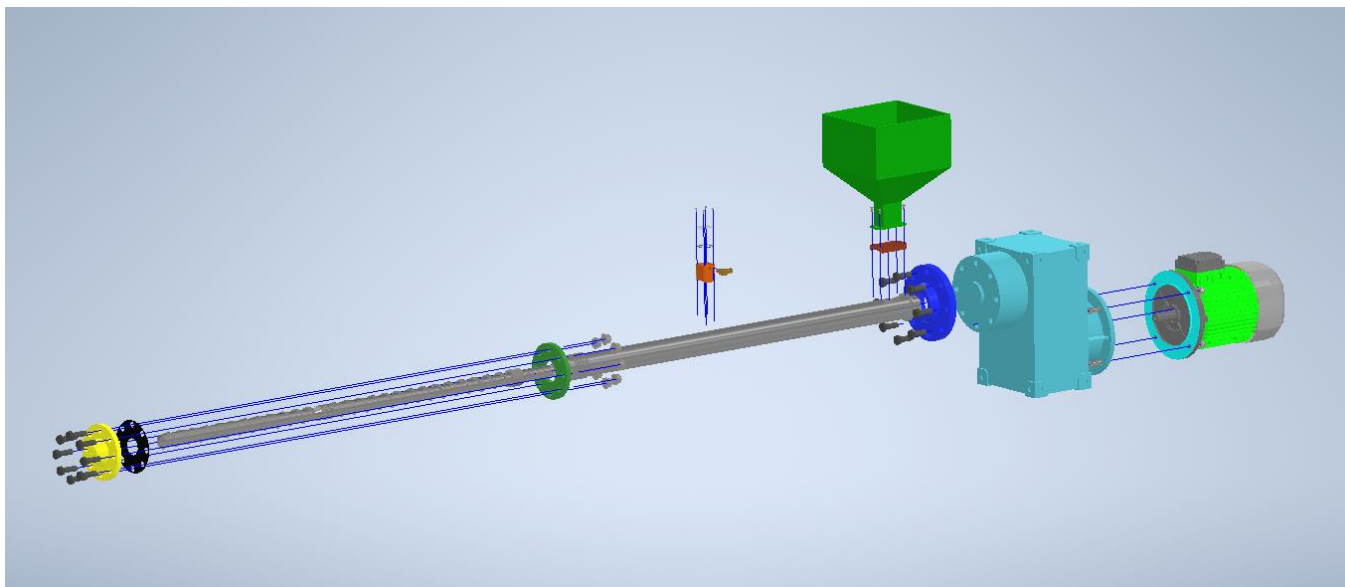


Рисунок 6.12 – Рознесений вигляд збірки екструдера.

6.6 Розрахунок на жорсткість в середовищі Autodesk Inventor

Для виконання статичного розрахунку на жорсткість було створено дослідження, обрано поверхні жорсткого защемлення та прикладено силу тяжіння до центру мас.

Мета проведення такого дослідження це визначення максимального зміщення черв'яка. Максимальне зміщення не повинне перевищувати величину зазору між корпусом та черв'яком, адже при запуску екструдера, коли в ньому ще відсутній полімер шнек не повинен доторкатись до корпусу, бо це призведе до пошкодження поверхонь.

Результати розрахунку зображено на (рис. 6.13).

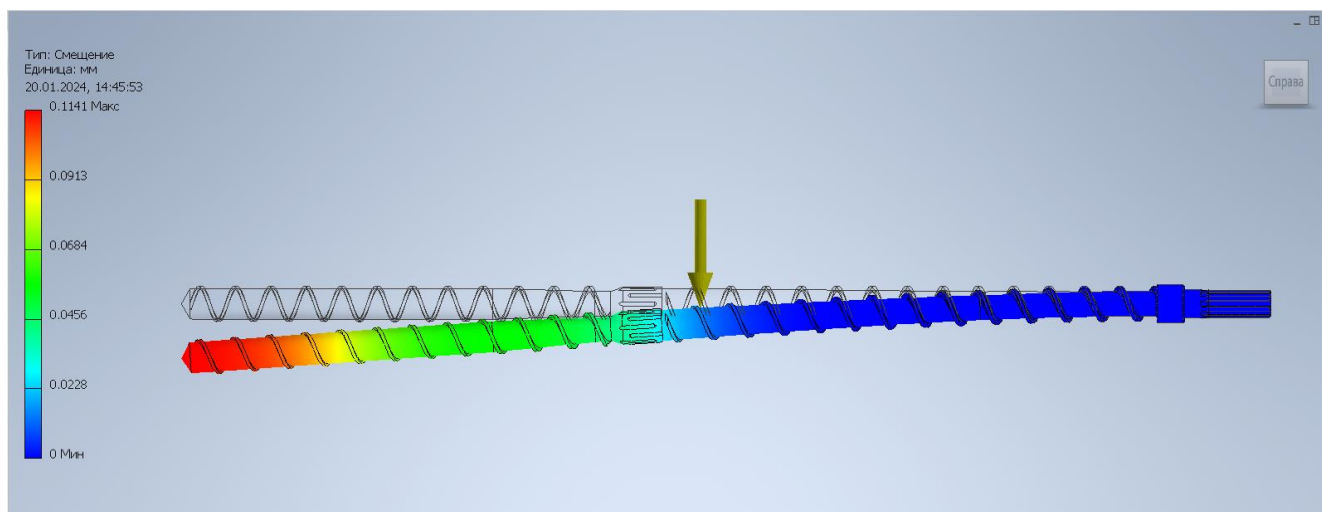


Рисунок 6.13 –Перевірка на зміщення.

6.7 Перевірка на міцність

Для перевірки черв'яка на міцність було прикладено крутні моменти до поверхонь різних зон черв'яка та створено жорстке заземлення в шліцевому з'єднанні що додатково дозволило перевірити як сам шнек так і шліци на міцність. Коефіцієнт запасу міцності зображено на (рис. 6.14).

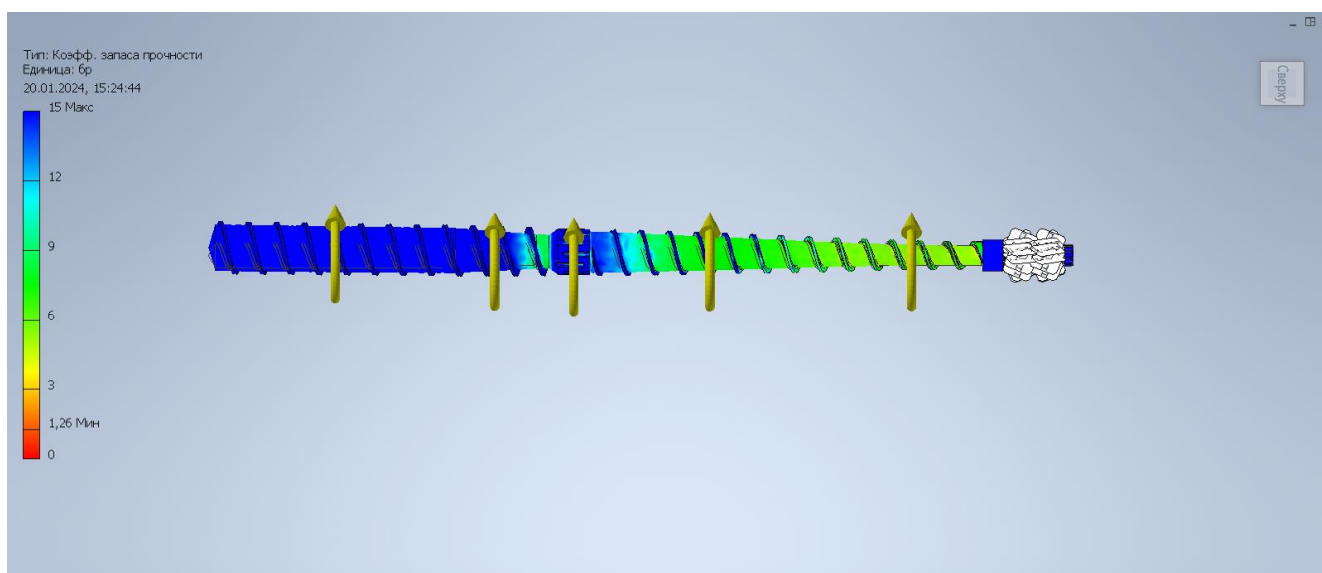


Рисунок 6.14 –Перевірка на кручення.

Для повного розрахунку черв'яка на міцність потрібно врахувати всі сили які він сприймає. За результатами арифметичного розрахунку, було встановлено,

що на гвинтову ділянку шнеку діє осьова сила, яка становить 20,8 кН. Після прикладення всіх сил було проведено остаточне дослідження яке підтверджує працеспроможність цього черв'яка (рис.6.15).

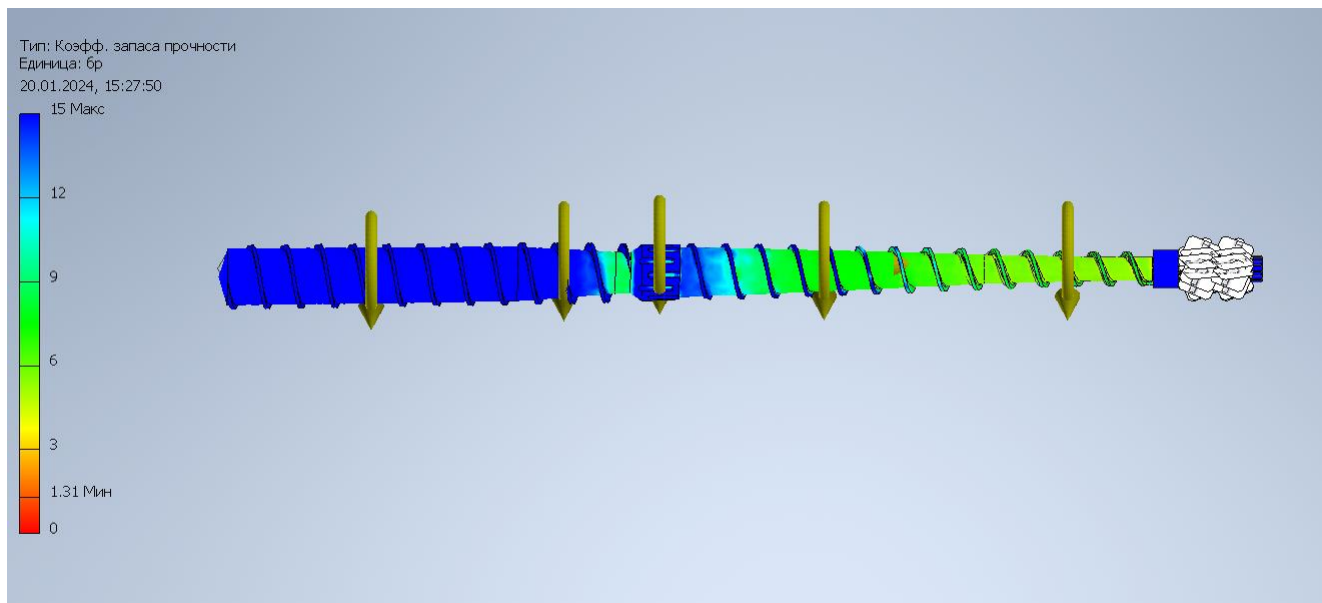


Рисунок 6.15 –Остаточна перевірка коефіцієнту запасу міцності.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ

7.1 Електробезпека

Забезпечення електробезпеки має на меті захист осіб від можливого ураження електричним струмом та електричною дугою. У контексті класифікації приміщень за рівнем небезпеки ураження електричним струмом слід відзначити, що цех, де буде розташований екструдер, віднесений до категорії приміщень із підвищеною небезпекою. Окремою характеристикою цього приміщення є висока вологість повітря (близько 75%).

Для забезпечення безпеки у робочому процесі, де використовується напруга 220/380 В та частота 50 Гц, застосовується трьохфазна трьохпроводова мережа з ізольованою нейтраллю. Важливими заходами забезпечення електробезпеки є:

- Недосяжність струмоведучих частин в робочому режимі (ізоляція, розташування на висоті понад 2,5 метри, наявність огорожі);
- Подвійна ізоляція;
- Належні позначення на електричних частинах (фарбування, надписи, позначення).

У випадку аварійного режиму передбачається застосування захисного заземлення. Впровадження таких заходів забезпечення електробезпеки при проектуванні апаратів для лінії відіграє ключову роль у зменшенні ризику смертності та травматизму серед персоналу у виробничих умовах [42].

7.2 Шум та його вплив на оператора екструдера

Шумове забруднення є серйозною проблемою, яку часто неправильно оцінюють. Навіть якщо ми цього не усвідомлюємо, щоденно ми стикаємося з численними звуками, які можуть впливати на наше здоров'я. Це особливо важливо для операторів екструдера, які в процесі роботи можуть бути піддані впливу промислового шуму. Це може видаватися простою неприємністю, але насправді це загроза безпеці та здоров'ю. Промисловий шум може виникати як постійний,

наприклад, від роботи двигунів чи машин, або у вигляді ударів, що виникають від молотків чи пресів.

Шум в промисловості є найпоширенішим професійним ризиком, а його вплив з'являється поступово, що призводить до того, що його можна сприймати як щось звичайне для професії та процесу старіння працівника.

Сила та інтенсивність шуму вимірюються у децибелах (дБ). Відповідно до інтенсивності його можна класифікувати так:

- Від 0 до 20 дБ - поріг слуху людини.
- Від 20 до 50 дБ - можливість легкої комунікації.
- Від 50 до 80 дБ - можливість комунікації, але з труднощами.
- Між 80 та 110 дБ - ліміт, який можна терпіти протягом робочого дня, але слід приймати заходи для його зменшення.
- Від 110 дБ і вище - комунікація стає неможливою.

Як забезпечити захист операторів екструдера від промислового шуму? Дослідження показують, що високий рівень промислового шуму може спричинити тимчасову втрату слуху, стрес, труднощі у вербальній комунікації, а навіть постійну втрату слуху та інші проблеми з серцем чи диханням. Для запобігання серйозним проблемам здоров'я, викликаним шумом в промисловості, необхідно провести аналізи в екструдерному цеху, щоб ідентифікувати робочі зони з концентрацією шуму та захистити здоров'я операторів, які піддаються високим рівням шуму.

Згідно з планом з охорони від професійних ризиків для кожного цеху, слід приймати заходи для мінімізації шкідливих ефектів промислового шуму на операторів. Деякі загальні рекомендації для досягнення цього можуть включати:

- Зменшення шуму в джерелі. Можна виправити машини, що виділяють найбільше шуму, та встановити необхідний матеріал для уникнення вібрацій чи джерел шуму. Також можна встановити акустичні панелі в приміщенні для досягнення належної звукової ефективності.
- Зміна технологічних процесів для зменшення шуму. Це може бути складнішою задачею для компаній, але коли йдеться про збереження здоров'я операторів екструдера, слід вживати всілякі зусилля.

- Прийняття організаційних заходів для скорочення часу впливу на операторів до джерел шуму.

- Надання захисного обладнання операторам. У випадку, коли робота в шумному середовищі необхідна, завжди потрібно використовувати навушники [40].

7.3 Пожежна безпека

Охорона праці та пожежна безпека є невід'ємною частиною роботи оператора екструдера. Оскільки екструдер використовує високі температури та може викликати пожежу у разі несправності, необхідно вживати заходів для запобігання надзвичайним ситуаціям та забезпечення безпеки працівника.

Перш за все, оператор повинен завжди дотримуватися всіх правил безпеки, встановлених пожежною безпекою. Це включає в себе регулярні перевірки пожежних систем, таких як вогнегасники та пожежні тривоги, щоб переконатися в їхній готовності до використання в будь-який момент. Оператор повинен бути добре ознайомлений з процедурами евакуації та місцем розташування безпечних виходів.

Додатково, важливо використовувати вогнезахисне обладнання та особистий захист, такий як вогнезахисний одяг та шапки, щоб зменшити ризик пошкоджень в разі пожежі. Регулярне навчання персоналу з пожежної безпеки та проведення протипожежних тренінгів може виявитися вельми корисним для забезпечення правильної реакції в екстрених ситуаціях.

Крім того, важливо визначити та виокремити потенційні джерела пожежі в області екструдера та приймати необхідні заходи для їхнього усунення чи зменшення ризику. Оператор також повинен бути усвідомлений щодо використання матеріалів, які можуть бути пожежонебезпечними, та дотримуватися відповідних стандартів безпеки при їх обробці.

В цілому, пожежна безпека є невід'ємною частиною повсякденної роботи оператора екструдера, і ретельне дотримання всіх процедур та заходів може значно зменшити ризик виникнення пожеж та максимізувати безпеку працівника [41].

ВИСНОВОК

В цій магістерській дисертації, було проведено ряд важливих кроків у напрямку розробки та вдосконалення екструдера для обробки поліетилентерефталату. Зокрема, були розроблені 3D-моделі окремих деталей екструдера, що сприяло визначенню їхньої форми та геометричних параметрів.

Механічний розрахунок екструдера включав в себе розрахунки модуля плавлення, міцності, стійкості та жорсткості. Це дозволило забезпечити оптимальні параметри конструкції екструдера для забезпечення надійності та довговічності його роботи.

Черв'як екструдера був розроблений та перевірений в середовищі Autodesk Inventor, що дозволило виявити можливі дефекти та оптимізувати його конструкцію. Також, в рамках розробки екструдера, була створена вакуумна камера для видалення вологи та газів з полімеру, що підвищує якість обробки пластику та унеможливорює появу дефектів.

Здійснено збірку екструдера та розроблено рознесену схему, яка відображає взаємодію та порядок складання всіх його елементів. Ці кроки є ключовими у впровадженні розробленого екструдера в виробництво та забезпеченні його ефективності.

Отже, проведені розробки включають не лише теоретичні аспекти, але й практичні кроки у вигляді 3D-моделювання, механічного розрахунку, впровадження вакуумної камери та збірки екструдера, що в сукупності створює комплексний підхід до розвитку та вдосконалення технологій обробки PET пластику.

Список використаних джерел:

1. Екструзія – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Екструзія>. (дата звернення: 09.10.2023).
2. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів : навч. посіб. / І. О. Мікульонюк, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко . – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – 200 с. : іл. – Бібліогр. : с. 196. – 300 прим. ISBN 978-966-622-000-0.
3. Переробка ПЕТ-пляшок – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Переробка_ПЕТ-пляшок. (дата звернення: 14.10.2023).
4. Технологія екструзії. URL: <https://factorial.ua/uk/article/tehnologiya-ekstruziyi/>. (дата звернення: 14.10.2023).
5. Design and Construction of a PET Extrusion Machine for Production of Insulation Material | Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference. *About the Conference | Sustainable Research & Innovation Conference*. URL: <https://sri.jkuat.ac.ke/jkuatsri/index.php/sri/article/view/257>. (дата звернення: 18.10.2023).
6. Espacenet CH637321A5 ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО КОМПОЗИТУ. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/027509259/publication/CH637321A5?q=CH637321A5>. (дата звернення: 18.10.2023).
7. Espacenet CN204773423U Вакуумний шнековий екструдер. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/054513546/publication/CN204773423U?q=CN204773423U>. (дата звернення: 18.10.2023).
8. Espacenet DE19928870A1 ОДНОШНЕКОВИЙ ЕКСТРУДЕР. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/007912333/publication/DE19928870A1?q=DE19928870A1>. (дата звернення: 18.10.2023).
9. Espacenet US11027476B2 Багатошнековий екструдер із вакуумним вентиляційним отвором і шнеками. URL:

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/068060406/publication/US11027476B2?q=US11027476B2>. (дата звернення: 18.10.2023).

10. LinkedIn Login, Sign in | LinkedIn. *LinkedIn*. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/learning-vacuum-extrusion-degassing-tie-duan> (date of access: 02.01.2024).

11. Extrusion basics: Screw design essentials you learned a long time ago, but maybe forgot. *plasticstoday.com*. URL: <https://www.plasticstoday.com/extrusion-pipe-profile/extrusion-basics-screw-design-essentials-you-learned-long-time-ago-maybe>. (дата звернення: 19.11.2023).

12. Nipo UA151520U ЧЕРВ'ЯК ЕКСТРУДЕРА. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1700717/>. (дата звернення: 19.11.2023).

13. PET Extrusion Machines - USEON. *USEON*. URL: <https://www.useon.com/pet-recycling/>. (дата звернення: 19.11.2023).

14. PET recycling: towards a circular economy - RECYCLING magazine. URL: <https://www.recycling-magazine.com/2020/06/08/pet-recycling-towards-a-circular-economy/>. (дата звернення: 23.12.2023).

15. *Plastics Insights: News, Jobs, Products for the Plastics Industry*. URL: <https://en.kunststoffe.de/a/product/unique-pet-tray-to-tray-recycling-in-a-s-218436>.

16. Single screw extruder. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/single-screw-extrusion-vs-twin-which-choose-billy-lê>. (дата звернення: 25.12.2023).

17. What real benefits does PET plastic recycling have for the economy – RepetCo Innovations. URL: <https://www.repetco.com/what-real-benefits-does-pet-plastic-recycling-have-for-the-economy/>. (дата звернення: 28.12.2023).

18. Plastic processing equipment. URL: <https://efactor3.com/products/plastics-processing-equipment/plastic-extrusion/> (дата звернення: 30.12.2023).

19. Under-extrusion challenges for elastic filaments: the influence of moisture on additive manufacturing / V. M. Bruère et al. *Progress in Additive Manufacturing*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00300-y> (date of access: 20.01.2024).

20. Espacenet patent classification. *Espacenet patent search*. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/cpc->

[browserhttps://worldwide.espacenet.com/patent/cpc-browser](https://worldwide.espacenet.com/patent/cpc-browser) (дата звернення: 30.12.2023).

21. DEVELOPMENT OF A METHOD TO CHARACTERIZE SCREW ELEMENTS FOR A TWIN SCREW EXTRUDER. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/DEVELOPMENT-OF-A-METHOD-TO-CHARACTERIZE-SCREW-FOR-A-Eeckman-Vervaeet/00e2213682668e0bfb3ddd01d9eafa4ea18238fe> (дата звернення: 04.01.2024).

22. Mesin Plastik Twin Screw Extruder Untuk Filler Masterbatch Membuat Persetujuan CE ISO. *Kualitas ekstruder sekrup kembar & ekstruder sekrup tunggal Produsen*. URL: <https://indonesian.screw-extruders.com/sale-10199193-plastic-twin-screw-extruder-machine-for-filler-masterbatch-making-ce-iso-approval.html> (date of access: 04.01.2024). <https://milabtech.us/wp-content/uploads/PDF-of-Twin-Screw-Extruders-from-PPT.pdf>

23. Mesin Plastik Twin Screw Extruder Untuk Filler Masterbatch Membuat Persetujuan CE ISO. *Kualitas ekstruder sekrup kembar & ekstruder sekrup tunggal Produsen*. URL: <https://indonesian.screw-extruders.com/sale-10199193-plastic-twin-screw-extruder-machine-for-filler-masterbatch-making-ce-iso-approval.html> (date of access: 04.01.2024).

24. Why do I have these bubbles in my finished product? - Paper, Film & Foil Converter. *pffc-online.com - Paper, Film & Foil Converter*. URL: <https://pffc-online.com/blog/bezigian/9970-why-do-i-have-these-bubbles-in-my-finished-product> (date of access: 05.01.2024).

25. Sink solution. URL: <https://www.plasticmoulds.net/sink-solution.html> (дата звернення: 05.01.2024).

26. Inconsistent Extrusion | Simplify3D Software. *Home | Simplify3D Software*. URL: <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/inconsistent-extrusion/> (date of access: 09.01.2024).

27. Luzanin, O., Guduric, V., Ristic, I., & Muhic, S. (2017). Investigating impact of five build parameters on the maximum flexural force in FDM specimens—a definitive screening design approach. *Rapid Prototyping Journal*, 23(6), 1088-1098. URL:

<https://www.researchgate.net/publication/326416713> Luzanin O Guduric V Ristic I Muhic S 2017 Investigating impact of five build parameters on the maximum flexural force in FDM specimens-

[a definitive screening design approach Rapid Prototyping Journal](#) (дата звернення: 09.01.2024).

28. Aluminium Bending for Windows - Alubend. *Alubend*. URL: <https://www.alubend.com/2023/04/19/aluminium-bending-for-windows/> (date of access: 20.01.2024).

29. EX6 Extruder Setup. *Filabot*. URL: https://www.filabot.com/products/ex6-bundle?pr_prod_strat=e5_desc&pr_rec_id=1d740a59e&pr_rec_pid=1521751556130&pr_ref_pid=33708638223&pr_seq=uniform (date of access: 10.01.2024).

30. MRSjump Extruder. *Gneuss*. URL: <https://www.gneuss.com/en/polymer-technologies/polyreaction/mrsjump-extruder/> (date of access: 12.01.2024).

31. Parallel twin screw extruder 75. URL: <https://www.bogdaplast.com/plastic-sheet-production-line/75-parallel-twin-screw-extruder-for-pet-transparent-sheet-production-line-plastic-extrusion-line.html> (дата звернення: 12.01.2024).

32. Melt shear viscosity of original and recycled PET in wide range shear rate / A. Bata et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1045. P. 012007. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1045/1/012007> (date of access: 13.01.2024).

33. Extrusion and characterization of recycled polyethylene terephthalate (rPET) filaments compounded with chain extender and impact modifiers for material-extrusion additive manufacturing. URL: <https://www.researchgate.net/publication/374167995> [Extrusion and characterization of recycled polyethylene terephthalate rPET filaments compounded with chain extender and impact modifiers for material-extrusion additive manufacturing](#) (дата звернення: 13.01.2024).

34. DESIGN OF A SINGLE SCREW EXTRUDER MACHINE FOR 3D PRINTING FILAMENT PRODUCTION APPLICATION. URL:

<https://jurnal.umj.ac.id/index.php/sintek/article/download/15953/8979> (дата звернення: 15.01.2024).

35. MatWeb - The Online Materials Information Resource. *Online Materials Information Resource* - MatWeb. URL: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a696bdcdf6f41dd98f8eec3599eaa20&ckck=1> (date of access: 15.01.2024).

36. Rauwendaal C. Polymer Extrusion. München, Germany : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-56990-539-5> (date of access: 17.01.2024).

37. Bulk Material Density Guide. *Best Processing Solutions*. URL: <https://www.bpsvibes.com/bulk-material-density-guide/> (date of access: 18.01.2024).

38. Journal of Physics: Conference Series. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1045/1/012007/pdf> (дата звернення: 18.01.2024).

39. Bonfiglioli HDPE PDF catalogue. URL: https://www.docsbonfiglioli.com/pdf_documents/catalogue/BR_DEP_HDPE_STD_EN_G_R00_0.pdf (дата звернення: 19.01.2024).

40. 3.5. Шум, його вплив на організм працівника та заходи щодо зниження шуму. *Бібліотека економіста*. URL: <https://library.if.ua/book/86/6047.html> (дата звернення: 20.01.2024).

41. Пожежна безпека на підприємстві: правила та організація - Охорона праці і пожежна безпека. *Охорона праці і пожежна безпека*. URL: <https://oppb.com.ua/articles/pozhezhna-bezpeka-na-pidpryyemstvi-pravyla-ta-organizaciya> (дата звернення: 20.01.2024).

42. Порядок навчання електротехнічного та електротехнологічного персоналу на підприємстві - Охорона праці і пожежна безпека. *Охорона праці і пожежна безпека*. URL: <https://oppb.com.ua/articles/poryadok-navchannya-elektrotehnichnogo-ta-elektrotehnologichnogo-personalu-na-pidpryyemstvi> (дата звернення: 20.01.2024).

ДОДАТОК А

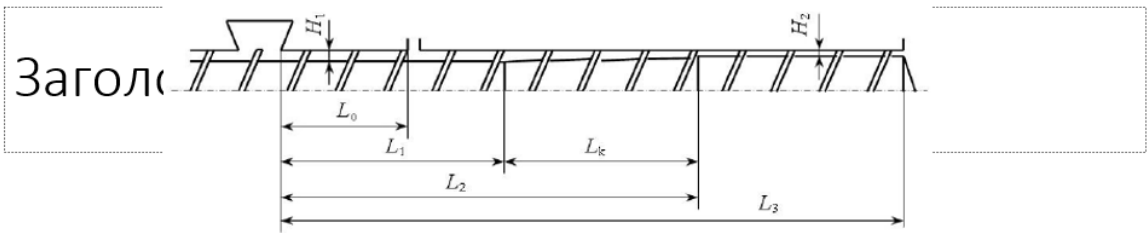
Тема магістерської дисертації:

Екструдер для формування
філаменту з PET преробленого
матеріалу

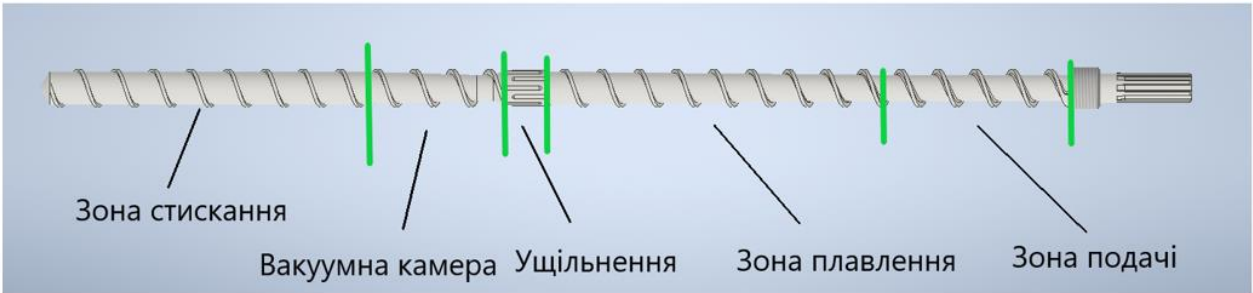
Студент: Новіцький А.В.

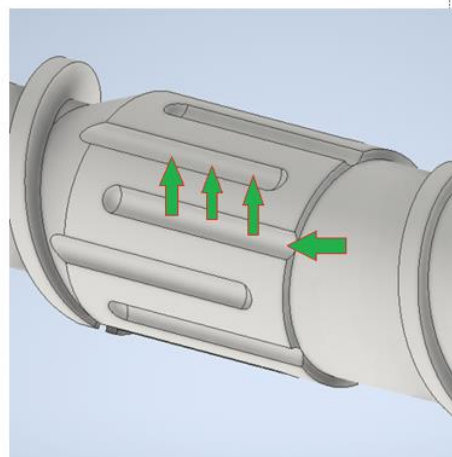
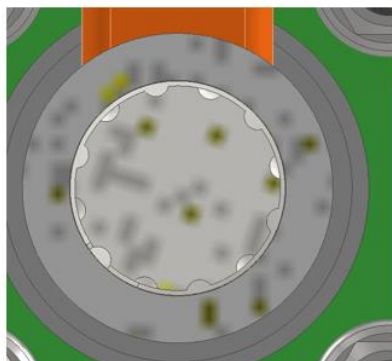
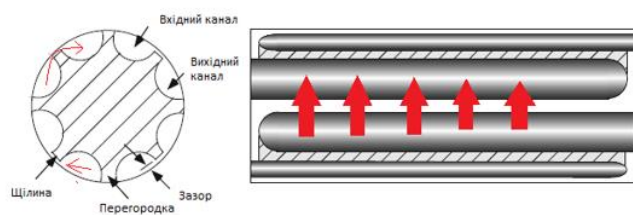
Керівник: Саленко О.Ф.





Діаметр черв'яка D , м	45
Крок гвинтової нарізки S , мм	45
Ширина <u>гребеня</u> витка E , м	4.5
Глибина каналу в зоні подачі $H1$, м	6.75
Питома продуктивність G_0 , кг/об	0.0046
Зазор між корпусом та черв'яком s , мм	0.135
Кут спіралі	17.66°
Довжина зони подачі $L1$, мм	225
Довжина зони плавлення $L2$, мм	405
Довжина вакуумної камери $Lв$, мм	165
Довжина зони стискування $L3$, мм	385
Довжина робочої частини $Lр$, мм	1230
Глибина каналу в зоні плавлення $H2$, мм	2.8
Перепад глибини в вакуумній камері $\Delta Hв$, мм	4.925
Зазор в ущільненні T , мм	1.43





Вибір приводу

Вхідні данні:

Потужність що споживає червяк: 13.84 кВт

Крутний момент червяка: 1468.5 Н*м

Вхідна частота обертання: 90 об/хв

Редуктор:

Bonfiglioli HDPE 60 2 19,4 17E

Mmax: 4250 Н*м

Передатне відношення: 19.4

Частота обертання вихідного валу: 90 об/хв

Двигун:

Bonfiglioli GR 132 17.5 3E EU

Тип: асинхронний

Частота обертання: 1750 об/хв

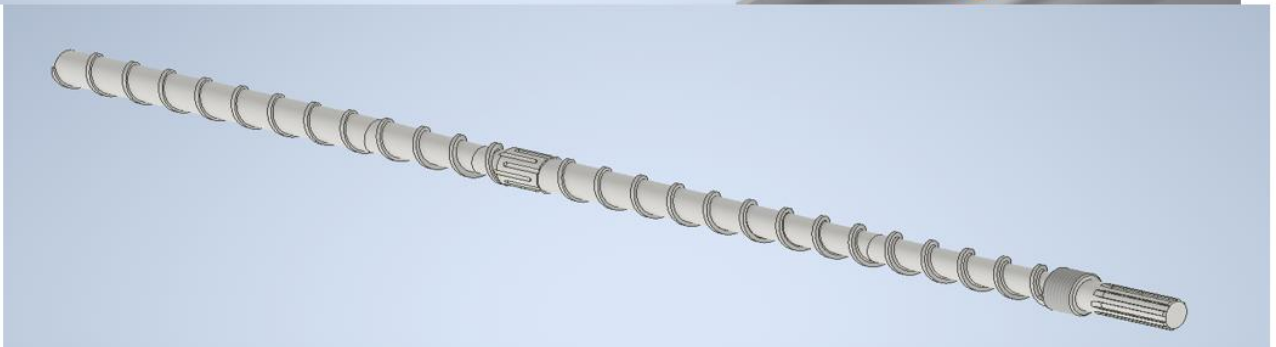
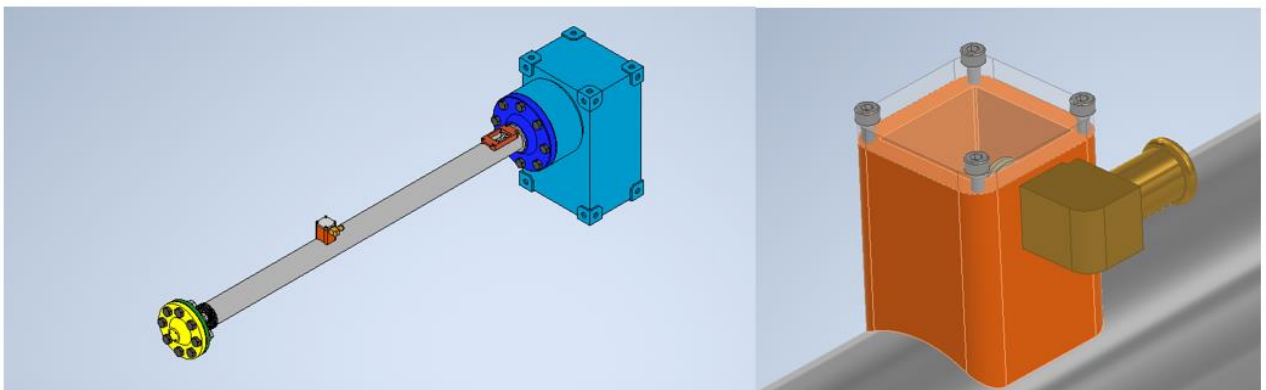
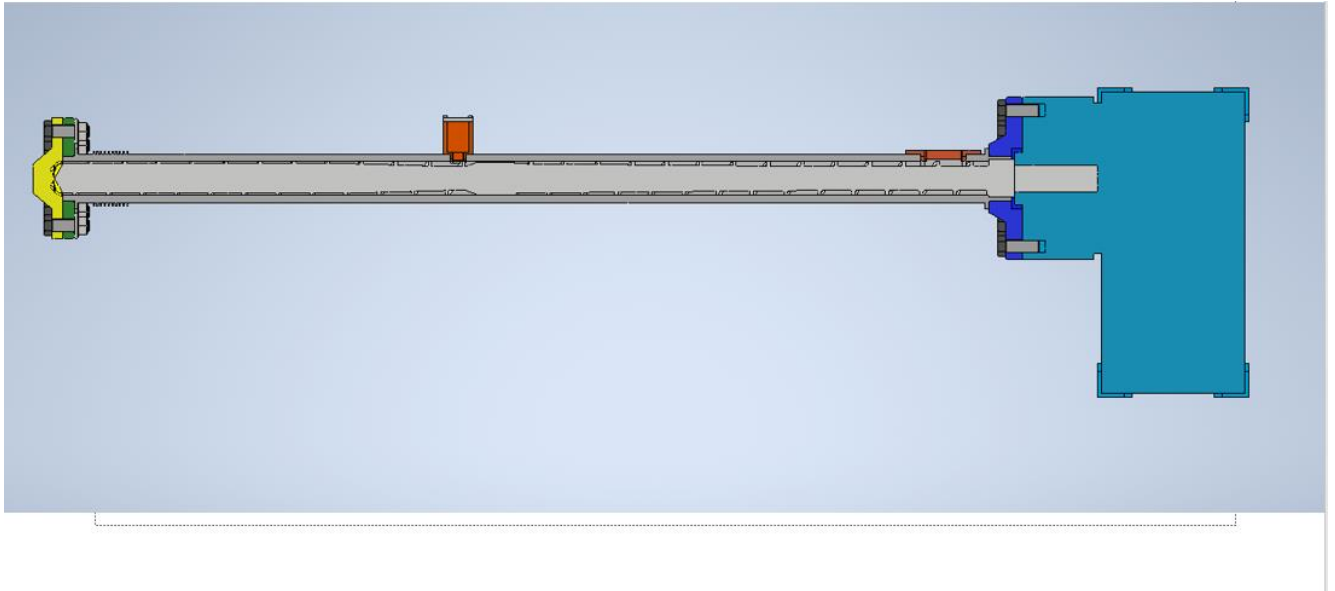
Потужність: 15.4 кВт

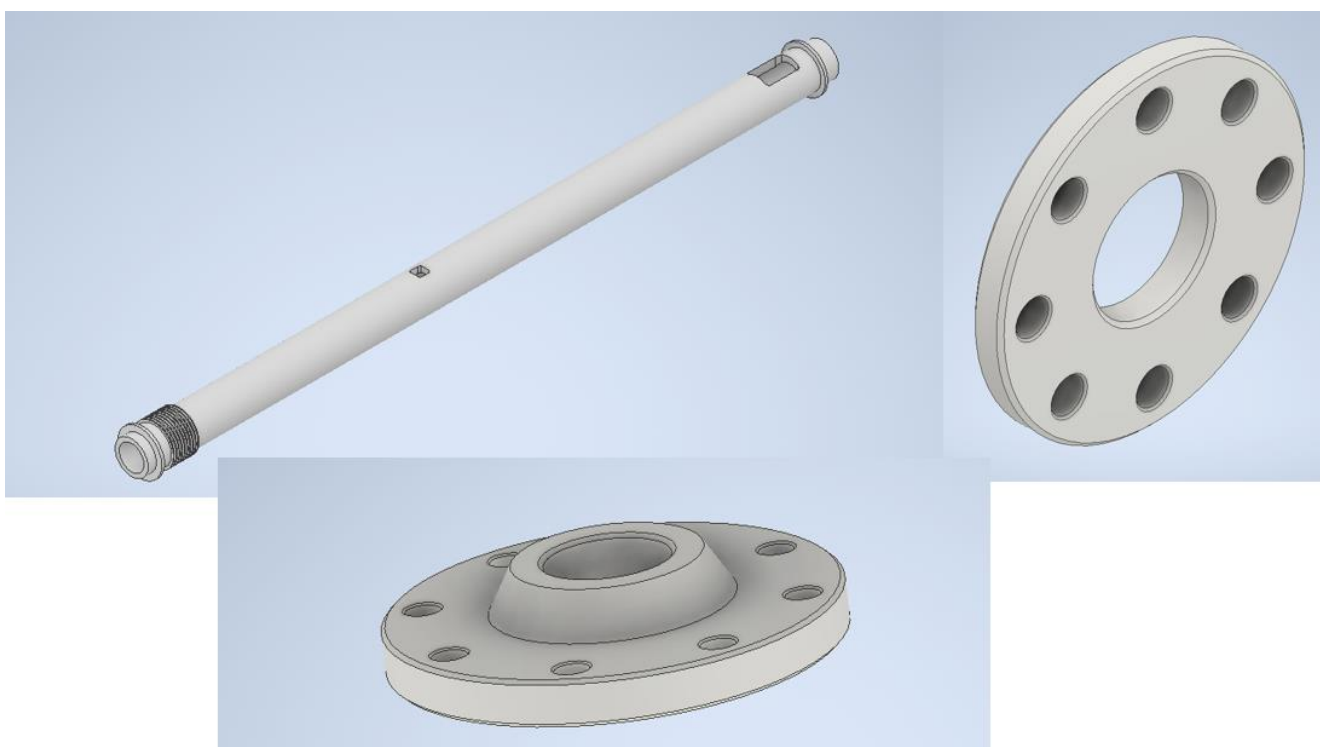
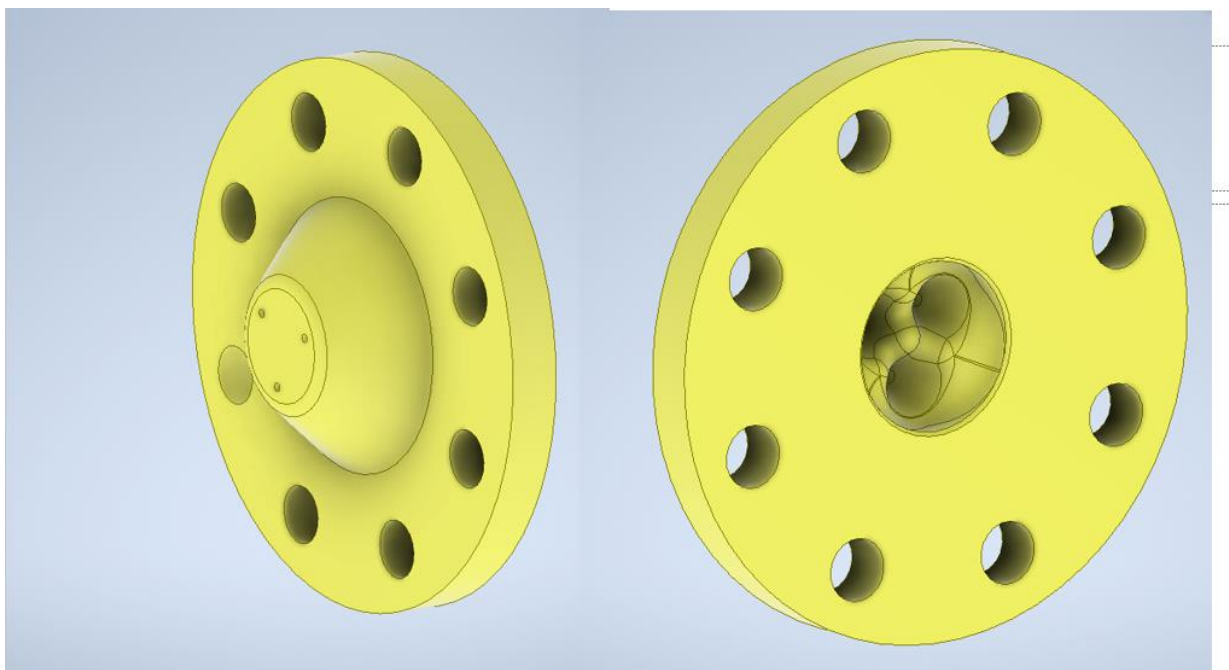
Типорозмір: 132

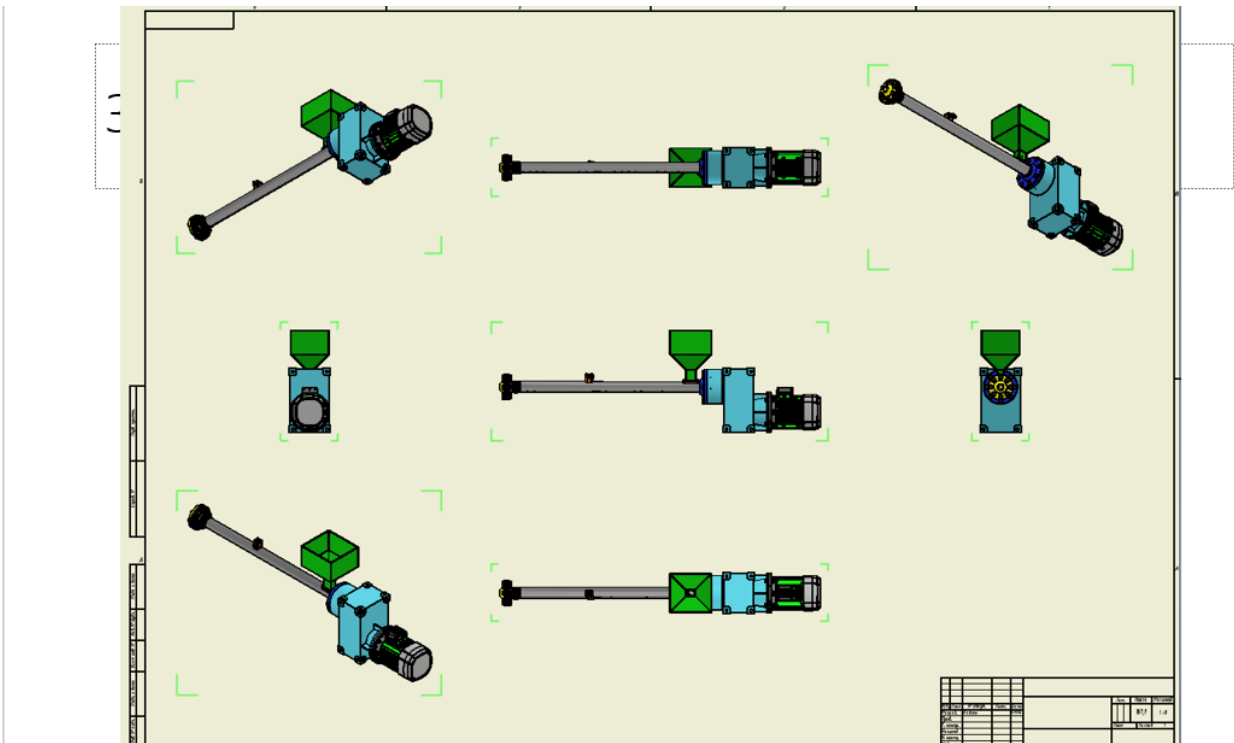
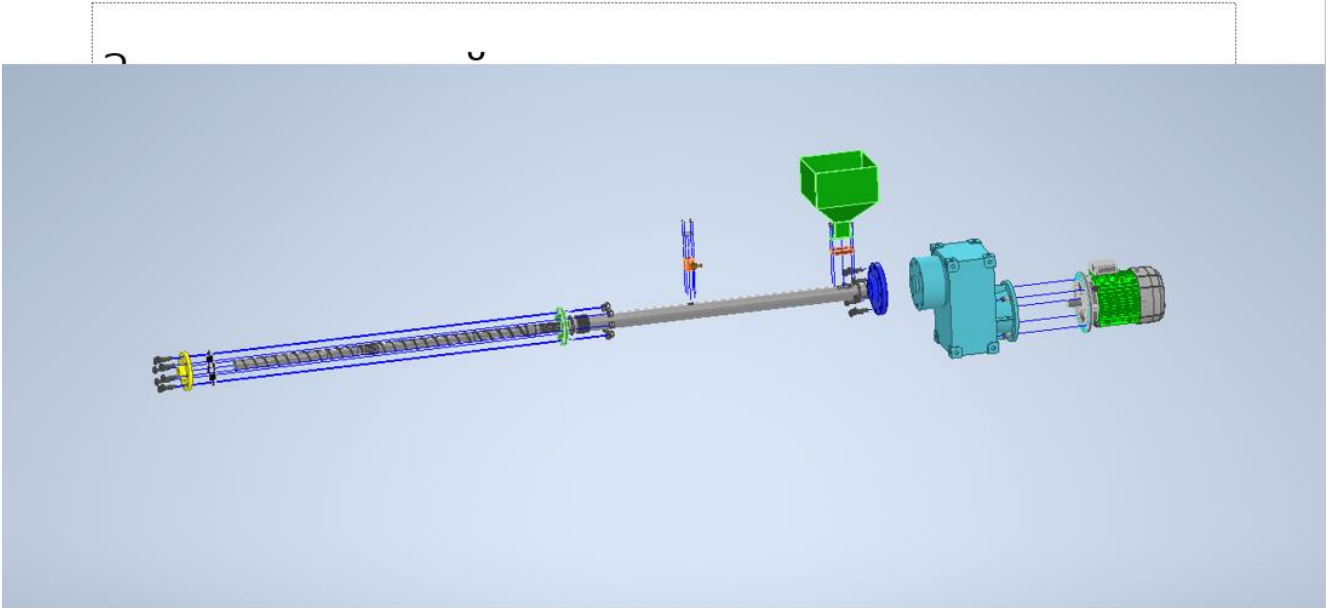
Напруга живлення: 400/230В, 50Гц

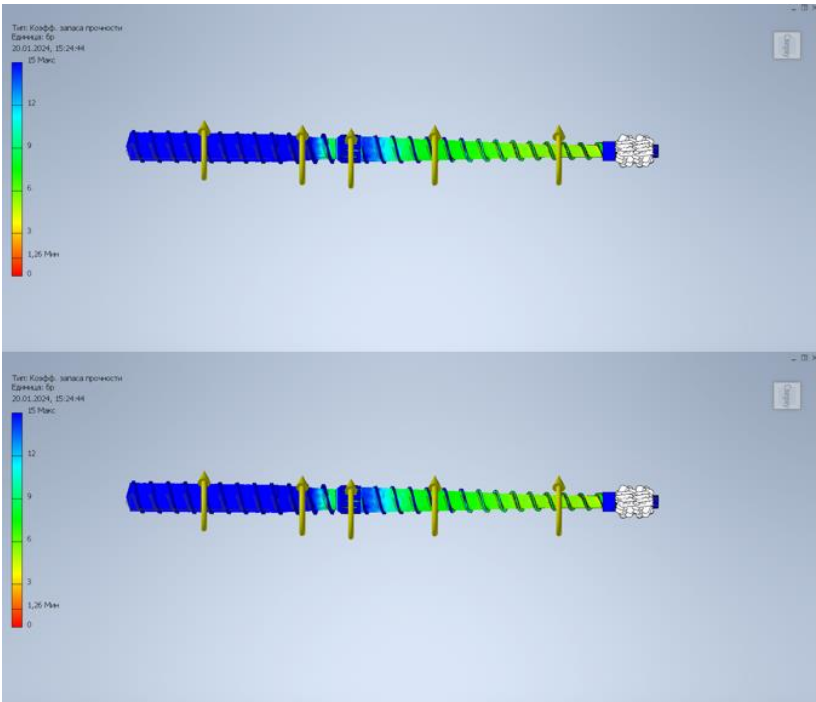
Керування: частотний перетворювач з енкодером











Физические параметры

Материал	Сталь AISI 4142 380, улучшенная закалкой и отпуском
Плотность	0,39 г/см ³
Масса	0,592179 кг
Площадь	197443 мм ²
Объем	1518410 мм ³
Центр масс	x=1,05807 мм y=-6,21599 мм z=580,981 мм

Примечание: физические значения могут отличаться от физических значений, используемых

Настройки сети:

Средний размер элемента (дробное значение от диаметра модели)	0.1
Минимальный размер элемента (дробное значение от среднего размера)	0.2
Коэффициент разнородности	1.5
Макс. угол поворота	60 град
Создать изогнутые элементы сетки	Да

Материал(-ы)

Имя	Сталь AISI 4142 380, улучшенная закалкой и отпуском
Общие	Массовая плотность 0,39 г/см ³ Предел текучести 1378 МПа Окончательный предел прочности растяжения 1412 МПа
Напряжение	Модуль Юнга 210 ГПа Коэффициент Пуассона 0,33 бр
Наименование деталей	Червяк.ipt
Модуль упругости при сдвиге	78,9474 ГПа

Рабочие условия

