

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ Олександр Сокольський

« _____ » _____ 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів»

зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

на тему: Лінія для виробництва труб з поліпропілену з модернізацією черв'яка

Студент (-ка) IV к, групи ЛП-22
(шифр групи)

Лабуренко Даниїл Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник проєкту:

Асистент, PhD Олексішен
(вчена ступінь, звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультанти з питань

МОДЕРНІЗАЦІЇ:

д.т.н., проф. Щербина В.Ю.

ТЕХ. МАШ.:

ст. викл. Борщик С.О.

ОХОРОНИ ПРАЦІ:

ст. викл. Ковтун А.І.

РЕЦЕНЗЕНТ

асистент, PhD Витвицький В.М.

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ 2026 рік

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

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології

Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – *133 Галузеве машинобудування*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Лабуренко Даниїл Олександрович

1. Тема проєкту « Лінія для виробництва труб з поліпропілену з модернізацією черв'яка », керівник проєкту Олексишен, Віталій, Олександрович, асистент, PhD, затверджені наказом по університету від «19». 05 2026 р. № 1817-с

2. Термін подання студентом проєкту 12.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту

Об'єкт розробки – екструдер, параметри машини: діаметр шнека – 63 мм, відношення довжини до діаметру – 30, перероблюваний матеріал – поліпропілен, маса машини – 1500 кг.

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ. 1. Призначення й технологія виготовлення труб з поліпропілену. 2. Технічна характеристика базової машини. 3. Схема і опис машини. Принцип роботи, загальний вигляд машини. 4. Літературний та патентний огляд та аналіз сучасних конструктивних рішень. 5. Розрахунки. 6. Охорона праці. 7. Технологія машинобудування

5. Перелік графічного матеріалу

1. Лінія для виробництва труб з поліпропілену. 2. Екструдер для виробництва труб з поліпропілену з модернізацією черв'яка. 3. Модернізований черв'як. 4. Підшипниковий вузол. 5. Плакат виконання 3Д моделі модифікованого черв'яка. 6. Плакат з результатами числового розрахунку. 7. Вал черв'яка. 8. Фланець для корпусу. 9. Фланець для гільзи.

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
МОДЕРНІЗАЦІЇ	Щербина В.Ю., професор		
ТЕХ. МАШИНОБУД.	Борщик С.О., ст. викладач		
ОХОРОНИ ПРАЦІ	Ковтун А.І., ст. викладач		

7. Дата видачі завдання 14.04.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Вступ. Призначення й технологія виготовлення труб з поліпропілену	13.04.26–16.04.26	
2	Технічна характеристика базової машини	17.04.2026–18.04.2026	
3	Схема і опис машини. Принцип роботи, загальний вигляд машини	19.04.2026-20.04.2026	
4	Літературний та патентний огляд та аналіз сучасних конструктивних рішень	20.04.2026-24.04.2026	
5	Розрахунки	25.04.2026-03.05.2026	
6	Проектування модернізованої деталі обладнання	04.05.2026-06.05.2026	
7	Числове моделювання модернізованого шнека	07.05.2026-09.05.2026	
8	Охорона праці та технологія машинобудування	10.05.2026-13.05.2026	
9	Оформлення пояснювальної записки та креслень	14.05.2026-17.05.2026	

Студент

Даниїл ЛАБУРЕНКО

Керівник проєкту

Віталій ОЛЕКСИШЕН

РЕФЕРАТ

Дипломний проект бакалавра на тему “Лінія для виробництва труб з поліпропілену, з модернізацією черв’яка”.

Пояснювальна записка містить вступ, 7 розділів, висновки та додатки до неї. Обсяг 58 сторінок.

Метою даного проекту є дослідження та удосконалення конструкції шнека, методом модернізації сегментних частин шнека, заради покращення ефективності та якості вихідного матеріалу.

Проект містить призначення та технологію виготовлення труб з поліпропілену, опис роботи та базової конструкції екструдера. Також містить аналіз можливих модифікацій вузла шнеку.

Модифікований вузол спроектований в програмі Solidworks та протестований у Ansys. Допоміжною програмою для розрахунку на міцність став Microsoft Visual Studio 2022.

Також розглянуті розділи охорона праці та технологія машинобудування.

ЕКСТРУДЕР, ТРУБИ З ПОЛІПРОПІЛЕНУ, МОДИФІКАЦІЯ ШНЕКУ, МОДЕРНІЗАЦІЯ, ANSYS.

ABSTRACT

The bachelor's diploma project titled "Production Line for Polypropylene Pipe Manufacturing with Screw Shaft (Auger) Modernization".

The explanatory note contains an introduction, 7 chapters, conclusions, and appendices. The total volume is 58 pages.

The aim of this project is to research and improve the design of the screw by modernizing its segmented parts in order to enhance the efficiency and quality of the output material.

The project includes the purpose and technology of polypropylene pipe manufacturing, as well as a description of the operation and basic design of the extruder. It also contains an analysis of possible modifications of the screw assembly.

The modified assembly was designed in SolidWorks and tested in ANSYS. Microsoft Visual Studio 2022 was used as an additional tool for strength calculations.

Sections on occupational safety and manufacturing technology are also included.

EXTRUDER, POLYPROPYLENE PIPES, SCREW MODIFICATION,
MODERNIZATION, ANSYS.

ЗМІСТ

Вступ

1 Призначення й технологія виготовлення труб з поліпропілену

2 Технічна характеристика базової машини

3 Схема і опис машини. Принцип роботи, загальний вигляд машини

4 Літературний та патентний огляд та аналіз сучасних конструктивних рішень

4.1 Літературно патентний огляд ситуації

4.2 Обґрунтування вибору модифікації черв'яка для виготовлення труб

5 Розрахунки

5.1 Розрахунок геометрії черв'яка і частоти його обертання

5.2 Розрахунок коефіцієнта геометричної форми головки

5.3 Розрахунок продуктивності екструдера

5.4 Розрахунок перепаду тиску на ділянках у головці

5.5 Потужність привода екструдера

5.5 Розрахунки на міцність.

5.7 Розрахунок на стійкість

5.8 Розрахунок на жорсткість

5.9 Розрахунок шліцевого з'єднання

5.10 Числові розрахунки

ЛП22.091245.006-70 ПЗ

					ЛП22.091245.006-70 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата	Екструдер для виробництва труб з ПП з модернізацією черв'яка	Літ.	Арк.	Акцшів	
Розробив	Лабуренко								
Перевірів	Олексишен						2	58	
						КПІ ім. Ігоря Сікорського			
Н. Контр									
Затверд.	Сокольський								

6 Охорона праці

6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

6.2 Електробезпека

6.3 Пожежна безпека

6.4 Захист від дії рухомих механізмів

6.5 Мікроклімат та вентиляція

6.6 Освітлення робочої зони

6.7 Засоби індивідуального захисту

6.8 Висновок

7 Технологія машинобудування

7.1 Опис і призначення деталі

7.2 Розробка технологічного процесу виготовлення деталі

7.3 Призначення пристосування для обробки деталі

Висновки

Перелік посилань

Додатки

					ЛП22.091245.006-70 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Полімерні матеріали стали невід'ємною частиною сучасного промислового виробництва. Сфера їх використання охоплює майже всі галузі — від побутових виробів до складних елементів машинобудування, медицини та будівництва. Серед багатьох технологічних процесів переробки полімерів особливе місце займає екструзія, адже саме завдяки їй створюються вироби, такі як труби, профілі, плівки чи волокна. Цей процес базується на плавленні полімерного матеріалу та його подальшому продавлюванні через формуютьовуючу матрицю, де маса набуває необхідної форми. У результаті отримуються вироби зі стабільними розмірами, рівною структурою та високими експлуатаційними властивостями [1].

Якість кінцевого продукту значною мірою визначається ефективністю роботи екструдера - основного елемента технологічної лінії [2]. Саме він забезпечує плавлення, перемішування й дозування полімеру під потрібним тиском. Будь-яке відхилення параметрів екструдера може призвести до браку, втрати однорідності матеріалу або перевитрати енергії. Саме тому правильне проєктування, налагодження й експлуатація екструдера є ключовими завданнями для інженерів полімерного виробництва.

Метою дипломної роботи є аналіз та проєктування одночерв'ячного екструдера для виготовлення ПП-труб, із розрахунком його базових та модифікованих частин. У роботі виконано розрахунки обладнання та застосовано сучасні CAD/CAE-системи для 3D-моделювання і аналізу напружено-деформованого стану вузла, що дозволяє оцінити ефективність конструктивних змін ще на етапі проєктування.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ Й ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРУБ З ПОЛІПРОПІЛЕНУ

Поліпропіленові труби є одним із найбільш поширених видів полімерних виробів, які широко застосовуються в системах водопостачання, опалення, каналізації, транспортування технологічних рідин та газів. Висока популярність цих виробів зумовлена їхньою малою масою, корозійною стійкістю, довговічністю, низькою теплопровідністю та простотою монтажу. Асортимент продукції охоплює одношарові та багатшарові труби різного діаметра, армовані, а також спеціалізовані для промислових і комунальних мереж [3].

Основним методом виготовлення поліпропіленових труб є екструзія, яка належить до механічних процесів переробки термопластичних полімерів. Технологічний процес передбачає підготовку полімерної сировини, її плавлення та гомогенізацію в екструдері, формування трубної заготовки у формувальній головці, калібрування, охолодження та подальше різання готового виробу на відрізки заданої довжини. Екструзійна технологія забезпечує безперервність виробництва, високу продуктивність та можливість отримання труб із точними геометричними параметрами.

Для виробництва поліпропіленових труб найчастіше використовують одночерв'ячні екструдери, які забезпечують стабільну подачу гранульованого полімеру, його пластифікацію та транспортування розплаву до формувальної головки [3]. Конструкція екструдера включає зону живлення, зону плавлення та зону дозування, що забезпечують поступове нагрівання матеріалу, рівномірний розподіл температури та однорідність розплаву. Формувальна головка надає виробу необхідну кільцеву форму та забезпечує рівномірний розподіл полімерного розплаву по периметру труби.

Після виходу з головки трубна заготовка надходить до вакуумного калібратора, де здійснюється остаточне формування зовнішнього діаметра та стабілізація геометричних розмірів виробу. Подальше охолодження відбувається у водяних ваннах або охолоджувальних секціях, що забезпечують затвердіння полімеру та збереження форми труби. Завершальними етапами технологічного процесу є контроль якості, маркування та автоматичне різання готової продукції.

2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОЇ МАШИНИ

Найперше, що потрібно при проектуванні та розрахунку еструдера та його основних вузлів, це загальні дані всієї машини. У таблиці 2.1 наведено ці характеристики, які були використані для розрахунку усієї конструкції [4].

Перероблюваний полімер	ПП (поліпропілен)
Діаметр черв'яка D, мм	63
Відношення довжини черв'яка до його діаметра L/D, мм	30
Довжина черв'яка, мм	2135
Частота обертання черв'яка, об/хв	84
Потужність двигуна N, кВт	33,6
Вагова продуктивність машини П, кг/год	25,65
Маса	1500

Таблиця 2.1 Технічні характеристики екструдера

3 СХЕМА І ОПИС ЕКСТРУДЕРА. ПРИНЦИП РОБОТИ, ЗАГАЛЬНИЙ ВИГЛЯД МАШИНИ

Опис роботи екструдера можна подати в такій послідовності. Полімерні гранули надходять у завантажувальний бункер 2, після чого гранулат переміщується в циліндр. У цьому вузлі його захоплює черв'як 3, що обертається з певною швидкістю, та спрямовує розплавлюваний матеріал у напрямку формувальної головки. На початковому етапі руху гранули потрапляють у зону живлення, де полімер поступово нагрівається й переходить у в'язкоплинний стан. Далі, у зоні стискання матеріал ущільнюється, втрачає залишки повітряних включень і переходить у стадію активного плавлення. Після цього, у зоні дозування, розплав набуває однорідності, стабілізується тиск, необхідний для рівномірного надходження до формувальної головки.

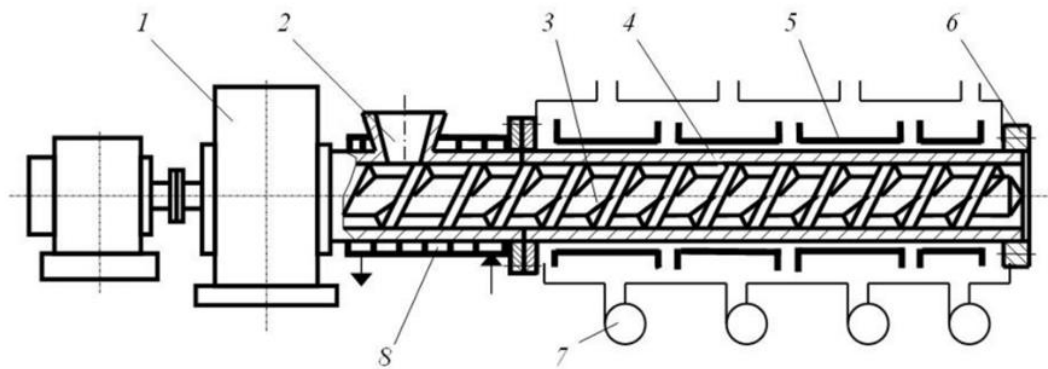


Рис.3.1 Принципова схема одночерв'ячного екструдера [4]

Для підтримання правильних умов переробки полімеру матеріальний циліндр оснащений системою температурних зон, де кожен сегмент працює в окремому тепловому режимі. Нагрівні кільця та теплові кожухи забезпечують точний контроль температури на поверхні циліндра, а встановлені в його стінках термопари передають дані на систему керування, коригуючи потужність нагрівачів. Це створює стабільні умови для руху розплаву, знижує ризик перегріву та покращує якість кінцевого виробу [4].

Конструкція корпусу зазвичай включає внутрішні канали 8 для циркуляції води. Така система відведення тепла дозволяє уникнути локального перегрівання матеріалу

та контролювати температуру металу під час роботи. Подача і відведення води здійснюється через окремий підвідний пристрій, розташований на під корпусом.

Обертання робочому органу надає електромеханічний привід 1, у склад якого входить електродвигун, муфта та редуктор. Редуктор знижує частоту обертання електродвигуна до необхідної та створює достатній крутний момент. Поперечні та осьові навантаження, що виникають у процесі пересування розплаву, сприймаються спеціальним підшипниковим вузлом, який не допускає зміщення черв'яка під дією тиску розплаву. Уся ця система встановлена в масивному корпусі, закріпленому на станині, що забезпечує жорсткість і стійкість конструкції під час роботи [4].

Екструдер включає циліндр 4 з черв'яком 3, привід 1, систему охолодження, електричний блок керування та перехідний фланець 6, що з'єднує екструдер із формувальною головкою. Завдяки такій будові робочий процес має безперервний характер, а стабільність геометрії труби забезпечується узгодженістю роботи всіх секцій обладнання.

Формувальна головка, що встановлюється після екструдера, є ключовим вузлом у формуванні кінцевого профілю труби. Проектування її каналів залежить від реологічних характеристик розплаву та вимог до параметрів готового виробу. Важливо, щоб гідравлічний опір каналів збігався з можливостями екструдера, оскільки надмірний опір призводить до нестабільної подачі матеріалу, а надто малий - до погіршення якості гомогенізації. Тому типорозмір екструдера, геометрія черв'яка, температурний режим та продуктивність повинні відповідати конструкції головки [5].

Для забезпечення рівномірного виходу розплаву на всій окружності кільцевого каналу головка оснащується системою розподілу потоку. Недотримання рівномірності призводить до відхилень товщини стінки, появи овальності, хвилястості або дефектів протягування. Одним із конструктивних елементів, що вирівнюють потік, виступає розсікач, який трансформує потік з осьового у кільцевий та компенсує різницю швидкостей у різних частинах каналу [5].

Мундштук головки складається з матриці, яка формує зовнішній діаметр труби, та дорна, що утворює внутрішній канал. Конструкція мундштука повинна забезпечувати

точний розмір, стабільний тиск та ламінарний рух розплаву. Часто дорн кріпиться на регульованих дорнотримачах, що дозволяють коригувати зазор між матрицею та дорном, змінюючи товщину стінки виробу. Це важливо при переході на інший діаметр труби або при необхідності внесення змін у технологічний режим.

Вихідна частина мундштука має постійну геометрію, яка стабілізує потік та запобігає коливанням розмірів під час формування. Правильно підібрана довжина прямої ділянки та кільцевого зазору дозволяє отримати трубу з точними параметрами ще до надходження в вакуум-калібрувальну систему.

поверхніми і краще вирівнює температуру. У другому випадку канали вбудовані прямо в транспортуючі ділянки, тому потік змінює напрям більш плавно, без різких стрибків тиску. Обидва варіанти дають помітно краще змішування, ніж класичні рішення, але при цьому стають більш складними у виробництві і можуть мати проблему із засміченням або забрудненням внутрішніх порожнин.

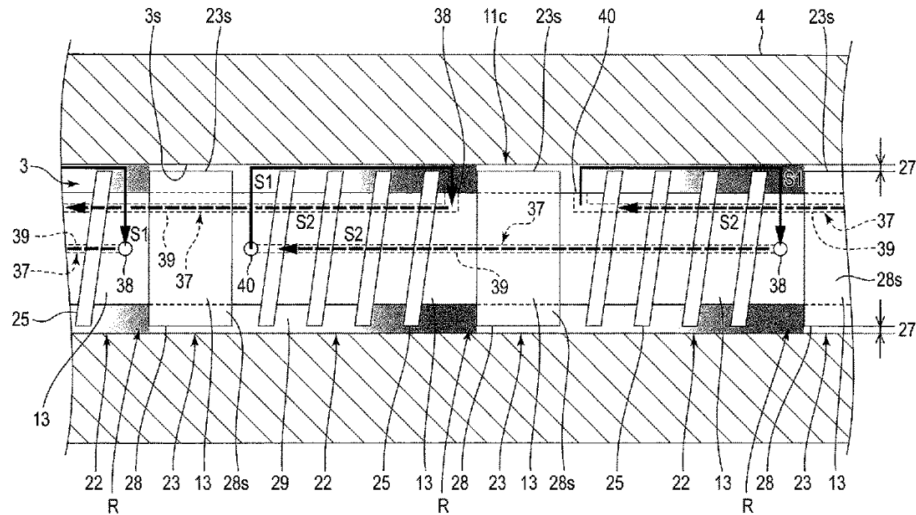


Рис. 4.1.2 – Патент US11813785B2

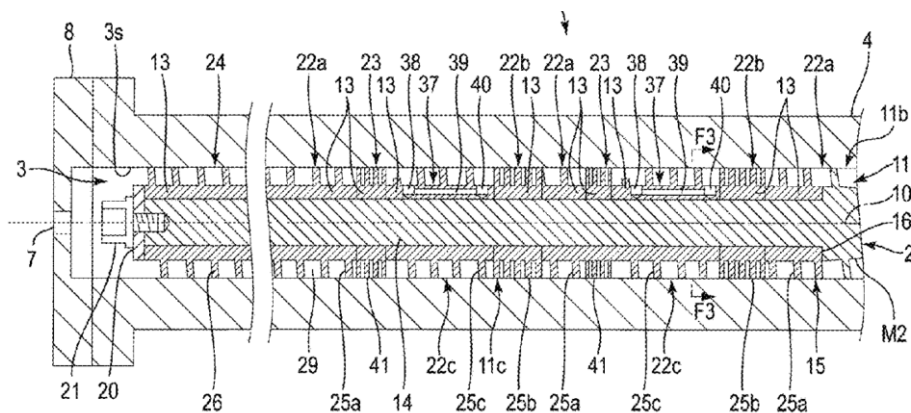


Рис. 4.1.3 – Патент US11230033B2

Патент CN111673938A [9] (рис. 4.4) показує інший підхід - використання багатозахідних шнеків і змінної геометрії каналу. Тут ідея в тому, щоб не змінювати потік різкими вставками, а «розділити» його на кілька потоків і керувати їх поведінкою через форму шнека. Це дозволяє підвищити продуктивність і краще налаштовувати рух матеріалу під різні етапи процесу. Наприклад, можна змінювати крок або глибину каналу і тим самим впливати на тиск і інтенсивність змішування. Але через наявність

кількох потоків система може працювати менш стабільно, а контроль процесу стає складнішим, особливо якщо матеріал чутливий до перегріву або нерівномірного зсуву.

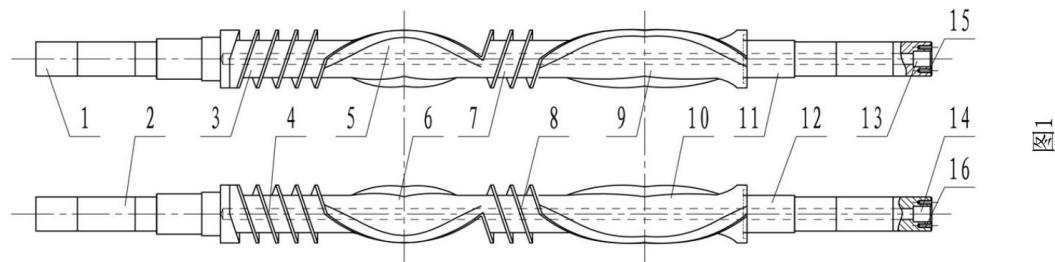


Рис. 4.1.4 – Патент CN111673938A

У патенті WO2018199159A1 [10] (рис. 4.5) описується модульний підхід до конструкції шнека. Ідея в тому, що шнек складається з окремих змінних елементів, які можна комбінувати під конкретний матеріал або задачу. Це робить систему більш універсальною - її можна швидко адаптувати під різні умови без повної заміни обладнання. Наприклад, змінювати ділянки під більш інтенсивне змішування або, навпаки, під більш плавну подачу. Але така гнучкість має і мінус: потрібно правильно підбирати конфігурацію, і без досвіду або точних розрахунків легко зібрати варіант, який працюватиме гірше, ніж простіший класичний шнек.

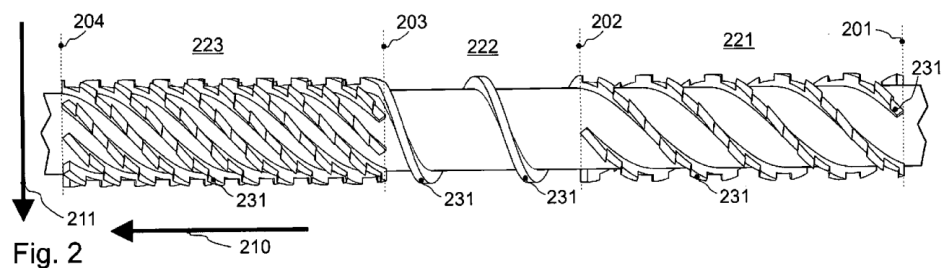


Рис. 4.1.5 – Патент WO2018199159A1

4.2 Обґрунтування вибору модифікації черв'яка для виготовлення труб

Було обрано патент US11813785B2 [7], оскільки запропонована в ньому конструкція шнека дозволяє підвищити ефективність процесу пластикації та змішування полімерного матеріалу без суттєвого ускладнення загальної схеми екструдера. Особливістю даного технічного рішення є наявність внутрішніх каналів, які створюють додатковий рух розплаву всередині шнека. Завдяки цьому матеріал не лише

переміщується вздовж осі шнека, а й здійснює локальні циркуляційні переміщення, що сприяє більш рівномірному розподілу компонентів у розплаві.

Важливою перевагою такої конструкції є покращення однорідності матеріалу. У процесі переробки поліпропілену це дозволяє отримати стабільніші властивості готових виробів та зменшити ймовірність виникнення дефектів, пов'язаних із нерівномірним перемішуванням або локальними температурними перепадами. Крім того, збільшення інтенсивності внутрішнього руху розплаву позитивно впливає на теплообмін між полімером і нагрітими поверхнями циліндра та шнека.

Ще однією причиною вибору даного патенту є можливість підвищення якості пластикації без значного збільшення довжини шнека. Це дає змогу більш раціонально використовувати робочу зону екструдера та підвищувати ефективність роботи обладнання. Для виробництва поліпропіленових труб, де важливими є стабільність геометричних розмірів та однорідність структури матеріалу, така особливість має суттєве значення.

Порівняно з іншими розглянутими рішеннями патент US11813785B2 [7] поєднує достатньо високу інтенсивність змішування та відносно простий принцип роботи. На відміну від конструкцій зі складною змінною геометрією транспортуючих ділянок або багатозахідними каналами, дане рішення забезпечує покращення технологічного процесу за рахунок внутрішньої циркуляції розплаву. Це робить його перспективним для використання при проектуванні шнеків екструдерів, призначених для виготовлення поліпропіленових труб.

5 РОЗРАХУНКИ

5.1 Розрахунок геометрії черв'яка і частоти його обертання

Черв'як є основним вузлом черв'ячної машини і призначений для транспортування полімерного матеріалу від завантажувальної воронки до формуючої головки, а також для пластикації гранул, ретельного перемішування розплаву і набору необхідного тиску для видавлювання з головки [5].

Діаметр черв'яка є одним з основних параметрів, що характеризують продуктивність черв'ячної машини.

Нижче розглянуто розрахунок екструдера з черв'яком діаметром $D = 63$ мм і відношенням довжини робочої частини до його діаметра $L/D = 30$.

Інші параметри черв'яка вибираються в залежності від матеріалу, що переробляється. У даному випадку матеріалом, що переробляється, є ПП і базові параметри черв'яка обчислюються виходячи із залежностей, представлених нижче.

Довжина робочої частини черв'яка

$$l_{\text{роб}} = \frac{L}{D} * D = 30 * 63 = 1890$$

Крок гвинтової лінії черв'яка

$$t = (0.8 \dots 1.2) * D = 1 * 63 = 63 \text{ мм}$$

Довжина зони завантаження

$$l_3 = (14 \dots 16) * D = (14 \dots 16) * 63 = 945 \text{ мм}$$

Довжина зони стискання

$$l_c = (1.5 \dots 3) * D = (1.5 \dots 3) * 63 = 140 \text{ мм}$$

Довжина зони дозування

$$l_{\text{доз}} = l_{\text{роб}} - l_3 - l_c = 1890 - 945 - 140 = 805 \text{ мм}$$

Довжина циліндричної зони між хвостовою частиною і нарізаною

$$L_{\text{ц}} = (1 \dots 2) * D = (1 \dots 2) * 63 = 95 \text{ мм}$$

Товщина гребеня черв'яка

$$e = (0.06 \dots 0.12) * D = (0.06 \dots 0.12) * 63 = 6.3 \text{ мм}$$

Кут підйому гвинтової лінії

$$\varphi = \arctg\left(\frac{t}{\pi * D}\right) = \arctg\left(\frac{63}{\pi * 63}\right) = 17.66^\circ$$

Глибина каналу в зоні завантаження

$$h_1 = (0.12 \dots 0.16) * D = (0.12 \dots 0.16) * 63 = 8.8 \text{ мм}$$

Глибина каналу в зоні дозування

$$h_3 = 0.5 * \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4 * h_1}{i} * (D - h_1)} \right] = 0.5 * \left[63 - \sqrt{63^2 - \frac{4 * 8.8}{3} * (63 - 8.8)} \right]$$

$$= 2,6 \text{ мм}$$

де $i = 3$ – ступінь стиску поліпропілену.

Діаметр сердечника в зоні завантаження

$$d_1 = D - 2h_1 = 63 - 2 * 8.8 = 45,4 \text{ мм}$$

Діаметр сердечника в зоні дозування

$$d_3 = D - 2h_3 = 63 - 2 * 2.6 = 57.8$$

Зазор між черв'яком і гільзою

$$\delta = (0.02 \dots 0.003) * D = (0.002 \dots 0.003) * 63 = 0.19 \text{ мм}$$

Довжина опори приймається

$$l_{\text{опори}} = 150 \text{ мм}$$

Довжина відбійної частини

$$l_{\text{відб}} = (0.1 \dots 0.5) * D = (0.1 \dots 0.5) * 63 = 19 \text{ мм}$$

Загальна довжина черв'яка

$$L = l_{\text{роб}} + l_{\text{опори}} + l_{\text{ц}} = 1890 + 150 + 95 = 2135 \text{ мм}$$

Глибина вала черв'яка на початку зони стиснення

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} (L - L_{\text{ст}}) = 8.8 - \frac{8.8 - 2.6}{2135} * (2135 - 140) = 3 \text{ мм}$$

Критична частота обертання черв'яка в зоні завантаження визначається наступним чином

$$n_{\text{кр}} = \frac{42.2}{60 * \sqrt{D}} = \frac{42.2}{60 * \sqrt{63}} = 2.8 \text{ с}^{-1}$$

Робоча частота обертання черв'яка

$$n_{\text{р}} = (0.2 \dots 0.7) * n_{\text{кр}} = 0.84 \text{ с}^{-1}$$

Черв'як виконується з високоякісної сталі 40Х з межої плинності 785 МПа, який піддають азотуванню до НРА 70-74. Після азотування черв'як шліфують [4].

5.2 Розрахунок коефіцієнта геометричної форми головки

Канал головки розбивається на ряд послідовних ділянок простої геометрії, для кожного з яких визначається коефіцієнт геометричної форми, а потім сумарне значення для всієї головки

$$K_{\text{сум}} = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{1}{K_5}}$$

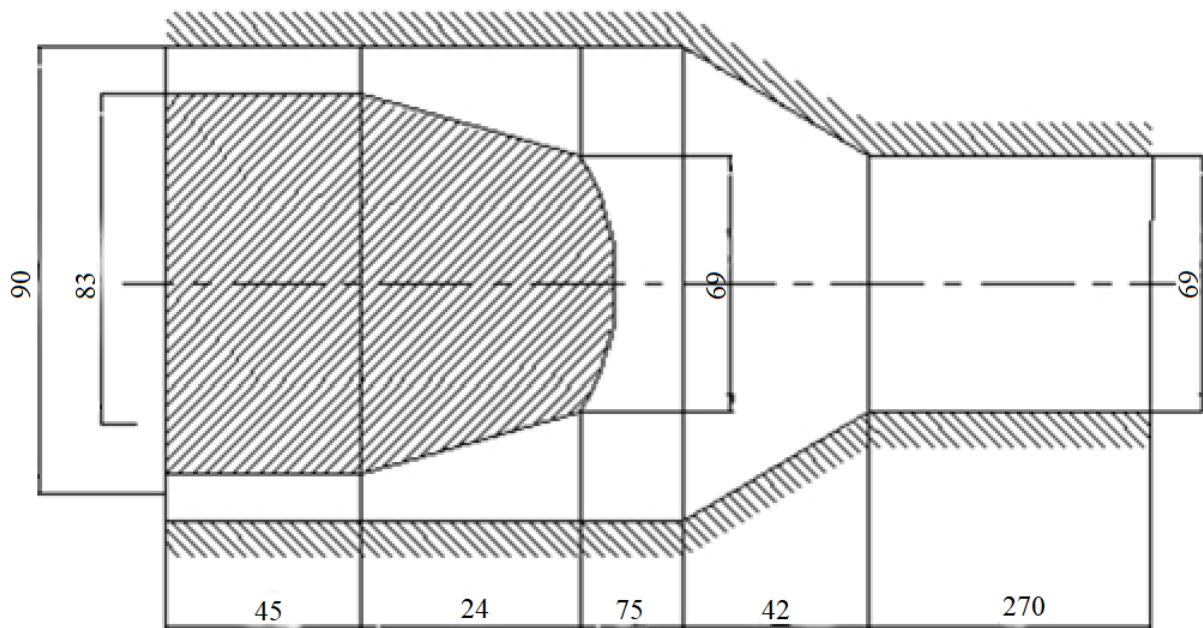


Рис 5.2.1

Розміри головки розрахувати для свого варіанта, використовуючи задані в завданні розміри черв'яка D_q і відношення L_q/D_q за формулами з табл. 5.2.1.

Таблиця 5.2.1 – Перерахунок D_q і L_q/D_q

d_1 , мм	d_2 , мм	D , мм	l_1 , мм	l_2 , мм	l_3 , мм	l_4 , мм	l_5 , мм
$D_q \cdot 1.1$	$d_1 \cdot 1.2$	$d_1 \cdot 1.3$	$L_q/D_q \cdot 9$	$L_q/D_q \cdot 1.4$	$L_q/D_q \cdot 2.5$	$L_q/D_q \cdot 0.8$	$L_q/D_q \cdot 1.5$

Отримані при множенні розміри округлити до найближчого цілого числа.
 Приклад розрахованих розмірів головки для розмірів черв'яка $D_{\text{ч}} = 63$ мм і $L_{\text{ч}}/D_{\text{ч}} = 30$ наведено в табл. 5.2.2

Таблиця 5.2.2 – Розміри головки для $D_{\text{ч}} = 63$ мм і $L_{\text{ч}}/D_{\text{ч}} = 30$

d_1 , мм	d_2 , мм	D , мм	l_1 , мм	l_2 , мм	l_3 , мм	l_4 , мм	l_5 , мм
69	83	90	270	42	75	24	45

Типи каналів наведені в джерелі [5].

1. Розраховуємо ділянку 1 за типом каналу – круглий циліндровий:

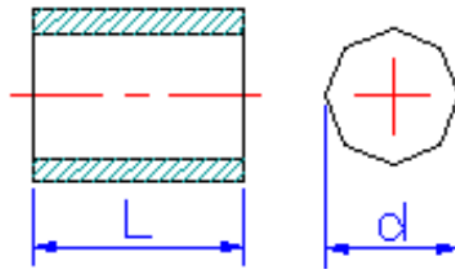


Рис. 5.2.2 – Круглий циліндричний канал

$$K_1 = \frac{\pi * d^4}{128 * L} = \frac{\pi * 69^4}{128 * 270} = 2060 \text{ мм}^3$$

2. Розраховуємо ділянку 2 за типом каналу – круглий конічний з великим діаметром на вході:

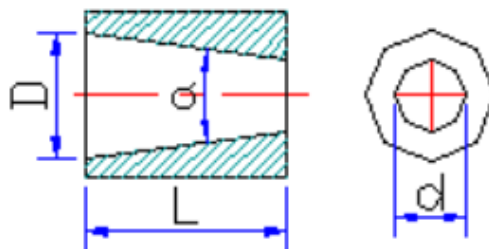


Рис. 5.2.3 – Круглий конічний канал з великим діаметром на вході

$$K_2 = \frac{3\pi * D^3 * d^3}{128 * L * (D^2 + D * d + d^2)} = \frac{3 * \pi * 90^3 * 69^3}{128 * 42 * (90^2 + 90 * 69 + 69^2)} = 22000 \text{ мм}^3$$

3. Розраховуємо ділянку 3 за типом каналу – круглий циліндровий:

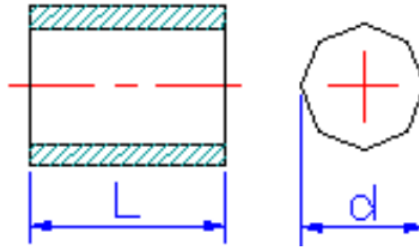


Рис. 5.2.4– Круглий циліндричний канал

$$K_3 = \frac{\pi * d^4}{128 * L} = \frac{\pi * 90^4}{128 * 75} = 21460 \text{ мм}^3$$

4. Розраховуємо ділянку 4 за типом каналу – конічний кільцевий з конічною щілиною:

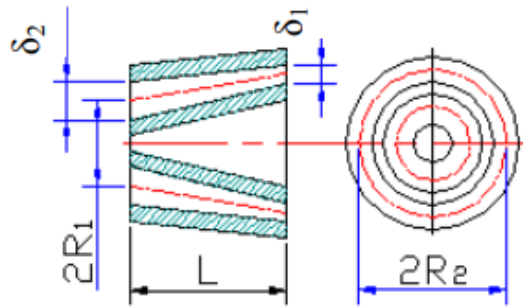


Рис. 5.2.5– Конічний кільцевий канал з конічною щілиною

$$K_4 = \frac{\pi * (R_1 \delta_2 - R_2 \delta_1)}{6 * L * \omega} = \frac{\pi * (39.75 * 3.5 - 43.25 * 10.5)}{6 * 24 * (-0.012)} = 572 \text{ мм}^3$$

$$\delta_1 = \frac{D - d_1}{2} = \frac{90 - 69}{2} = 10.5 \text{ мм}$$

$$\delta_2 = \frac{D - d_2}{2} = \frac{90 - 83}{2} = 3.5 \text{ мм}$$

$$R_1 = \frac{\delta_1}{2} + \frac{d_1}{2} = \frac{10.5}{2} + \frac{69}{2} = 39.75 \text{ мм}$$

$$R_2 = \frac{\delta_2}{2} + \frac{d_2}{2} = \frac{3.5}{2} + \frac{83}{2} = 43.25 \text{ мм}$$

$$\omega = \frac{2.3 * (R_1 - R_2)^2}{(R_1 \delta_1 - R_2 \delta_1)^2} \lg \left(\frac{R_1 \delta_2}{R_2 \delta_1} \right) - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1 \delta_2 - R_2 \delta_1) \delta_1 \delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 \delta_1^2 \delta_2^2} = -0.012$$

5. Розраховуємо ділянку 5 за типом каналу – круглий кільцевий:

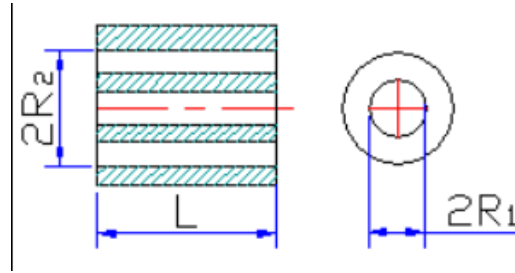


Рис. 5.2.6 – Круглий кільцевий канал

$$K_5 = \frac{\pi * (R_2 + R_1)(R_2 - R_1)^3}{12 * L} = \frac{\pi * (45 + 41.5)(45 - 41.5)^3}{12 * 45} = 21.5 \text{ мм}^3$$

$$R_2 = \frac{D}{2} = \frac{90}{2} = 45 \text{ мм}$$

$$R_1 = \frac{d_2}{2} = \frac{83}{2} = 41.5$$

$$K_{\text{сум}} = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{1}{K_5}} = \frac{1}{\frac{1}{2060} + \frac{1}{22000} + \frac{1}{21460} + \frac{1}{572} + \frac{1}{21.5}} = 20.4 \text{ мм}^3$$

5.3 Розрахунок продуктивності екструдера

Визначальний вплив на продуктивність черв'ячної машини має зона дозування черв'яка. Ефективність зони дозування значною мірою залежить від геометричних параметрів самого черв'яка. Продуктивність черв'ячного екструдера в цілому залежить не тільки від геометричних розмірів шнека і числа його оборотів, а й значною мірою від конструкції формуючої голівки [5].

На основі гідродинамічного підходу до аналізу взаємодії робочих органів з матеріалом, що переробляється, в зоні дозування екструдера прийнято розглядати три складові потоку руху розплаву:

1) Прямий потік, тобто потік розплаву, що рухається міжвитковим простором у напрямку від зони завантаження до зони дозування вздовж осі черв'яка; виникає внаслідок обертання черв'яка відносно циліндра;

2) Зворотній потік, тобто потік розплаву, що рухається у протилежному напрямку, що викликано перепадом тиску P по довжині шнека;

3) Потік витоку, що рухається у зазорі між зовнішньою поверхнею витків черв'яка та внутрішньою поверхнею матеріального циліндра у напрямку від зони дозування.

Подібний поділ на три потоки в каналі шнека слід вважати умовним, так як протитечії практично не існує, а має місце деяке обмеження прямого потоку, що виникає в результаті опору головки.

Об'ємна секундна продуктивність черв'ячної машини для переробки полімерів, в залежності від опору головки і конструкції зони дозування розраховується наступним чином

$$Q = \frac{\alpha * K_{\text{заг}} * n_p}{K_{\text{заг}} + \beta + \gamma} = \frac{9237 * 20.4 * 0.84}{20.4 + 0.038 + 0.0016} = 7745.47 \left(\frac{\text{мм}^3}{\text{с}} \right),$$

де n_p – робоча швидкість обертання черв'яка,

$K_{\text{заг}}$ – загальний коефіцієнт геометричної форми головки,

α – коефіцієнт прямого потоку,

β – коефіцієнт зворотного потоку,

γ – коефіцієнт потоку витоку.

Значення коефіцієнтів прямого потоку α , зворотного потоку β та потоку витоку γ для черв'яка зі змінною глибиною нарізки визначають таким чином:

$$\alpha = \frac{\pi^3(t-\lambda e)c}{a+t^2b} = \frac{3,14^3(63-1*6.3)159,74}{27.32+63^2*0,000765} = 9237.3(\text{мм}^{-3}),$$

$$\beta = \frac{\pi t(t-\lambda e)}{12L_{\text{доз}}(a+t^2b)} = \frac{3,14*63(63-1*6.3)}{12*805(27.32+63^2*0,000765)} = 0,038(\text{мм}^{-3}),$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 D \delta^3 t^2}{10eL_{\text{доз}}\sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}} = \frac{3,14^2*63*0,19^3*63^2}{10*6.3*805\sqrt{3,14^2*63^2+63^2}} = 0,0016(\text{мм}^{-3}),$$

де c , a , b – коефіцієнти, що характеризують шнек зі змінною глибиною нарізки:

$$c = 1 - \frac{6,9D}{2(h_2-h_3)} \lg\left(\frac{h_2}{h_3}\right) + \frac{D^2}{2h_2h_3} = 1 - \frac{6,9*63}{2(3-2,6)} \lg\left(\frac{3}{2}\right) + \frac{63^2}{2*3*2,6} = 159,74,$$

$$a = \frac{\pi^2}{h_2h_3} \left(\frac{D(h_2+h_3)}{2h_2h_3} - 1 \right) = \frac{3,14^2}{3*2,6} \left(\frac{63(3+2,6)}{2*3*2,6} - 1 \right) = 27,32(\text{мм}^{-2}),$$

$$b = \frac{2,3}{(h_2-h_3)D^3} \lg\left(\frac{h_2(D+d_3)}{h_3(D+d_1)}\right) + \frac{2h_2h_3+(h_2+h_3)D}{2D^2h_2^2h_3^2} = \frac{2,3}{(3-2,6)*63^3} * \lg\left(\frac{3*(63+57.8)}{2,6*(63+45.4)}\right) + \\ + \frac{2*3*2,6+(3+2,6)63}{2*63^2*3^2*2,6^2} = 0,000765(\text{мм}^{-4}),$$

де t – 63, крок гвинтової лінії (нарізки) черв'яка,

λ – 1, число заходів гвинтової нарізки,

e – 6,3 мм, товщина гребеня нарізки черв'яка,

$L_{\text{доз}}$ – 805 мм, довжина зони дозування,

D – 63 мм, зовнішній діаметр черв'яка,

δ – 0,19 мм, висота зазору між черв'яком та корпусом,

h_2 – 3 мм, глибина гвинтового каналу на початку зони стиснення,

h_3 – 2,6 мм, глибина каналу в зоні дозування,

d_3 – 57,8 мм, діаметр вала черв'яка в зоні дозування,

d_1 – 45,4 мм, діаметр вала черв'яка під завантажувальною воронкою.

Вагова продуктивність розраховується, знаючи об'ємну продуктивність

$$\Pi = 3600 * Q * \rho * 10^{-9} = 3600 * 7745,47 * 920 * 10^{-9} = 25,65\left(\frac{\text{кг}}{\text{год}}\right),$$

де ρ – густина ПП температури переробки [3].

5.4 Розрахунок перепаду тиску на ділянках у головці

Розрахунок перепаду тиску в екструзійній головці виконується таким чином:

- 1) розраховується швидкість зсуву $\dot{\gamma}_i$ для простих ділянок головки, аналогічно до знаходження коефіцієнтів геометричної форми головки K_i (формули див. табл. до розрахунку коеф. геометричної форми);

Для першої ділянки:

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{32Q}{\pi d^3} = \frac{32 * 7745,47}{3,14 * 69^3} = 0,24$$

Для другої ділянки:

$$\dot{\gamma}_2 = \frac{256Q}{\pi(D^3 + d^3)} = \frac{256 * 7745,47}{3,14 * (90^3 + 69^3)} = 0,59$$

Для третьої ділянки:

$$\dot{\gamma}_3 = \frac{32Q}{\pi d^3} = \frac{32 * 7745,47}{3,14 * 90^3} = 0,108$$

Для четвертої ділянки:

$$\dot{\gamma}_4 = \frac{22,32 \cdot Q}{\pi \cdot (R_1 + R_2)(\delta_2 + \delta_1)^2} = \frac{22,32 \cdot 7745,47}{3,14 \cdot (39,75 + 43,25)(3,5 + 10,5)^2} = 3,38$$

Для п'ятої ділянки:

$$\dot{\gamma}_5 = \frac{5,58 \cdot Q}{\pi \cdot (R_1 + R_2) \cdot (R_2 - R_1)^2} = \frac{5,58 \cdot 7745,47}{3,14 \cdot (41,5 + 45) \cdot (45 - 41,5)^2} = 12,99$$

- 2) визначається ефективна в'язкість μ_i , Па · с, за графіками для матеріалів (додатки), в залежності від швидкості зсуву $\dot{\gamma}_i$ та температури переробки t ;

$$\mu_1 = 10^4 \text{Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_2 = 4 \cdot 10^3 \text{Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_3 = 2 \cdot 10^4 \text{Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_4 = 1 \cdot 10^3 \text{Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_5 = 3 \cdot 10^2 \text{Па} \cdot \text{с}$$

З) за попередньо знайденими продуктивністю і коефіцієнтом геометричної форми розраховують перепад тиску на простих ділянках головки за формулою

$$\Delta P_i = \frac{Q \cdot \mu_i}{K_i}$$

Для першої ділянки:

$$\Delta P_1 = \frac{Q \cdot \mu_1}{K_1} = \frac{7745,47 \cdot 10^4}{2060} = 3,76 \cdot 10^4$$

Для другої ділянки:

$$\Delta P_2 = \frac{Q \cdot \mu_2}{K_2} = \frac{7745,47 \cdot 4 \cdot 10^3}{22000} = 1,4 \cdot 10^3$$

Для третьої ділянки:

$$\Delta P_3 = \frac{Q \cdot \mu_3}{K_3} = \frac{7745,47 \cdot 2 \cdot 10^4}{21460} = 7,2 \cdot 10^3$$

Для четвертої ділянки:

$$\Delta P_4 = \frac{Q \cdot \mu_4}{K_4} = \frac{7745,47 \cdot 1 \cdot 10^3}{572} = 1,35 \cdot 10^4$$

Для п'ятої ділянки:

$$\Delta P_5 = \frac{Q \cdot \mu_5}{K_5} = \frac{7745,47 \cdot 3 \cdot 10^2}{21,5} = 10,8 \cdot 10^4$$

2) сумують отриманні значення ΔP_i для знаходження загального перепаду тиску в головці ΔP

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 = \\ &= 3,76 * 10^4 + 1,4 * 10^3 + 7,2 * 10^3 + 1,35 * 10^4 + 10,8 * 10^4 = 167700 \text{ Па} \\ &= 167,7 \text{ КПа}\end{aligned}$$

5.5 Потужність привода екструдера

Знання споживаної черв'ячною машиною потужності необхідне для розрахунку енергетичних витрат на виробництво виробів. При усталеному режимі екструзії, величина споживаної потужності є показником стабільності процесу. Зазвичай контроль ведуть за потужністю, яка споживається приводом.

Потужність, споживана екструдером (N , Вт) для переробки пластичних мас, йде на переміщення матеріалу в гвинтовому каналі черв'яка (N_1) і на зріз матеріалу в зазорі між гребенем черв'яка і внутрішньою стінкою циліндра або гільзи (N_2)

$$N = N_1 + N_2 = 14236 + 2594 = 16830 \text{ Вт} = 16,8 \text{ кВт}$$

Потужність, що витрачається на переміщення матеріалу в гвинтовому каналі, для черв'яка зі змінною глибиною нарізки

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{\pi^3(t - e)LJ\mu_{\text{еф1}}}{t} n_p^2 + \alpha \cdot \Delta P \cdot n_p \\ &= \frac{3,14^3(0,063 - 0,0063) \cdot 2,135 \cdot 0,097 \cdot 3,5 \cdot 10^3}{0,063} \cdot 0,84^2 + 0,000009237 \\ &\quad \cdot 167000 \cdot 0,84 = 14236 \text{ (Вт)} \end{aligned}$$

де $t - 0,063$ прок гвинтової лінії черв'яка, м,

$e - 0,0063$ товщина гребеня черв'яка, м,

$L - 2,135$ загальна довжина черв'яка, м,

$n_p - 0,84$ робоча швидкість обертання черв'яка, с^{-1} ,

$\alpha - 0,000009237$ коефіцієнт прямого потоку, м^3 ,

$\Delta P - 167000$, загальний перепад тиску в головці, Па,

$J - 0,097$ коефіцієнт, м^2

$$\begin{aligned} J &= \frac{\pi^2 D^2 - 4t^2}{\pi^2} + \frac{(D + d_3)^3 - (D + d_2)^3}{3(d_3 - d_2)} + \frac{2,3\pi^2 D^5 \lg \frac{h_2}{h_3}}{(t^2 + \pi^2 D^2)(h_2 - h_3)} \\ &= \frac{3,14^2 \cdot 63^2 - 4 \cdot 63^2}{3,14^2} + \frac{(63 + 57,8)^3 - (63 + 57)^3}{3(57,8 - 57)} \\ &\quad + \frac{2,3 \cdot 3,14^2 \cdot 63^5 \lg \frac{3}{2,6}}{(63^2 + 3,14^2 \cdot 63^2)(3 - 2,6)} = 0,097 \text{ (м}^2\text{)} \end{aligned}$$

де $D = 0,063$ діаметр черв'яка, м,

$d_3 = 0,0578$ діаметр вала черв'яка в зоні дозування, м,

$d_2 = 0,057$ діаметр вала черв'яка на початку зони стиснення, м,

$h_2 = 0,003$ глибина гвинтового каналу в зоні стиснення, м,

$h_3 = 0,0026$ глибина гвинтового каналу в зоні дозування, м.

Потужність, що витрачається на зріз матеріалу в зазорі між гребенем черв'яка і внутрішньою стінкою циліндра або гільзи, для черв'яка зі змінною глибиною нарізки

$$N_2 = \frac{\pi^3 D^3 e L \mu_{\text{ef}2}}{\delta t} n_p^2 = \frac{3,14^3 * 0,063^3 * 0,0063 * 2,135 * 7 \cdot 10^2}{0,00022 * 0,09} * 0,84^2 = 2594 \text{ (Вт)}$$

У вищенаведених формулах також фігурує ефективна в'язкість $\mu_{\text{ef}1,2}$, Па·с, що визначається за графічними залежностями для матеріалу, що використовується при виготовленні виробів (див. попередній розрахунок), залежно від швидкості зсуву $\dot{\gamma}_{1,2}$, с^{-1} , що визначається таким чином:

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{\pi^2 (D - h_{\text{сер}}) (D - 2h_{\text{сер}}) n}{h_{\text{сер}} \sqrt{\pi^2 (D - 2h_{\text{сер}})^2 + t^2}} = \frac{3,14^2 (63 - 2,8) (63 - 2 * 2,8) * 1,15}{2,8 * \sqrt{3,14^2 (63 - 2 * 2,8)^2 + 63^2}} = 73,3 \text{ (с}^{-1}\text{)}$$

$$\dot{\gamma}_2 = \frac{\pi^2 D^2 n}{\delta \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}} = \frac{3,14^2 * 63^2 * 0,84}{0,19 * \sqrt{3,14^2 * 63^2 + 63^2}} = 833,5 \text{ (с}^{-1}\text{)}$$

$$\mu_{\text{ef}1} = 3,5 \cdot 10^3 \text{ (Па} \cdot \text{с)},$$

$$\mu_{\text{ef}2} = 7 \cdot 10^2 \text{ (Па} \cdot \text{с)},$$

$$\text{де } h_{\text{сер}} = \frac{(h_2 + h_3)}{2} = \frac{(3 + 2,6)}{2} = 2,8 \text{ (мм)}.$$

Загальна споживана потужність $N_{\text{заг}}$ повинна бути вищою за розраховану потужність N , щоб компенсувати не враховані розрахунком втрати енергії:

- на захоплення і транспортування твердого гранульованого матеріалу в зоні завантаження;
- на просування пробки матеріалу, що складається із суміші твердого і частково розплавленого матеріалу в зоні стиснення;
- на подолання сил тертя осьової реакції в опорному підшипнику;
- на механічні втрати в приводі черв'ячного екструдера.

Перелічені втрати можуть бути враховані коефіцієнтом корисної дії черв'ячних машин, який при переробці термопластів складає $\eta = 0,4 \dots 0,6$. Тоді загальна споживана потужність

$$N_{\text{заг}} = \frac{N}{\eta} = \frac{16,8}{0,5} = 33,6 \text{ кВт}.$$

За знайденою загальною потужністю, обирається* двигун потужністю $N_{\text{дв}}$ для приводу екструдера (за довідковими матеріалами). Обрати асинхронний двигун з кількістю обертів близько $n_{\text{дв}} = 1500$ об/хв. Обрано трифазний асинхронний двигун АІР200М4 [11].

5.6 Розрахунок на міцність

Крутний момент ($N \cdot m$) становить

$$M_{кр} = \frac{30N}{\pi n} = \frac{30 * 16800}{3,14 * 50,4} = 3184,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де N – потужність, яка споживається черв'яком, Вт; n – швидкість обертання черв'яка, об/хв.

Осьове зусилля

$$P_{ос} = \frac{2M_{кр}}{D} \operatorname{tg} \varphi = \frac{2 * 3184,7}{0,063} * \operatorname{tg}(17,66^\circ) = 32187 \text{ Н}$$

де D – зовнішній діаметр черв'яка, м;

$\varphi = 17,66^\circ$ – кут підйому нарізки.

Розподілене навантаження від власної ваги черв'яка (Н/м)

$$q = \frac{9,8G}{l_p} = \frac{9,8 * 29,4}{1,89} = 152,4 \text{ Н/м}$$

де G – маса черв'яка, кг, l_p – довжина робочої частини

$$G = \frac{\pi(D - d_0)^2}{4} \rho l_p = \frac{3,14 * (0,063 - 0,0126)^2}{4} * 7820 * 1,89 = 29,4 \text{ кг}$$

d_0 – діаметр каналу для охолодження, м

$$d_0 = (0,15 \dots 0,25)D = 0,2 * 0,063 = 0,0126 \text{ м}$$

$\rho = 7820 \text{ кг/м}^3$ густина сталі 40Х.

Стискальне напруження в тілі черв'яка виникає від осьової сили та згинального моменту, спричиненого його вагою. Перша складова напруження рівномірна по перерізу, а друга змінюється від розтягувальної у верхній частині перерізу до стискальної в нижній. Тому величина стискального напруження має найбільше значення на нижніх волокнах і розраховується за формулою

$$\sigma_{ст} = \frac{p_{ос}}{F} + \frac{M_{max}}{W_x} = \frac{32187}{0,0015} + \frac{272,19}{9,13 * 10^{-6}} = 51,2 \text{ МПа}$$

де F – площа небезпечного перерізу (під завантажувальною лійкою, у місці початку нарізки, де найбільші навантаження та найменша площа, без урахування площі перерізу витків), м^2 :

$$F = \frac{\pi d_1^2}{4} (1 - \alpha^2) = \frac{3,14 * 0,0454^2}{4} * (1 - 0,27^2) = 0,0015 \text{ м}^2$$

$$\alpha = d_0/d_1 = \frac{0,0126}{0,0454} = 0,27$$

d_1 – діаметр осердя в зоні завантаження, м;

M_{max} – максимальний згинальний момент від власної ваги (у місці початку нарізки),

Н·м:

$$M_{max} = \frac{1}{2} q l_p^2 = \frac{1}{2} * 152,4 * 1,89^2 = 272,19 \text{ Н * м}$$

W_x – осьовий момент опору, м³:

$$W_x = \frac{\pi d_1^3 (1 - \alpha^4)}{32} = \frac{3,14 * 0,0454^3 * (1 - 0,27^4)}{32} = 9,13 * 10^{-6} \text{ м}^3$$

Дотичні напруження

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p} = \frac{3184,7}{1,82 * 10^{-5}} = 174 \text{ МПа}$$

де W_p – полярний момент опору, м³

$$W_p = \frac{\pi d_1^3 (1 - \alpha^4)}{16} = \frac{3,14 * 0,0454^3 * (1 - 0,27^4)}{16} = 1,82 * 10^{-5} \text{ м}^3$$

Еквівалентне напруження за III теорією міцності

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_{ст}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{51,2^2 + 4 * 174^2} = 351 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт запасу не повинен перевищувати допустиме значення [7]

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{екв}} = \frac{785}{351} = 2,23 \geq 2$$

де допустимий коефіцієнт запасу [n] зазвичай беруть рівним 1,6...2,0.

Отже коефіцієнт міцності $n=2,23$.

Умова міцності виконується.

5.7 Розрахунок на стійкість

Оскільки черв'як витримує згинальний момент від циклічної дії власної ваги, то доцільна його перевірка на стійкість. Для даного розрахунку ми використовуємо програму, яка написана мовою програмування C++ [12]. Код програми наведено у додатках.

Програма реалізує алгоритм розрахунку коефіцієнта запасу міцності при циклічному навантаженні відповідно до формули нижче

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{(k_{\sigma})_d \sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_c}$$

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

σ_{-1} – допустиме напруження під час циклічного навантаження;

a – амплітуда змінення напружень (у цьому випадку вони змінюються від $+\sigma_{max}$ до $-\sigma_{max}$;

σ_{max} – найбільше напруження від дії згинального моменту;

σ_c – середнє циклове напруження ($\sigma_c=0$, оскільки цикл симетричний);

ψ_{σ} – коефіцієнт, що залежить від матеріалу сталі 40X[7] ($\sigma_B = 980$ МПа $\psi_{\sigma} = 0,45$);

$(k_{\sigma})_d$ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень, який можна визначити за формулою:

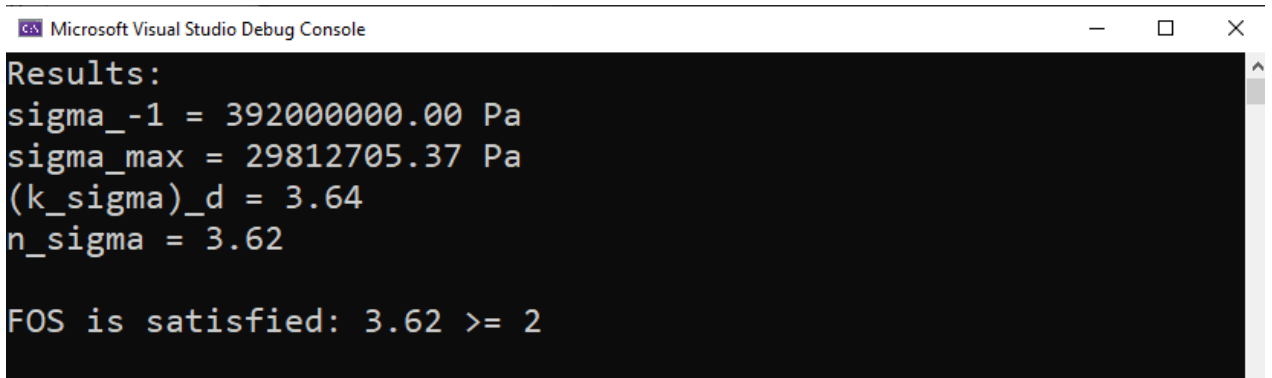
$$(k_{\sigma})_d = \frac{k_{\sigma}}{\beta * \varepsilon}$$

де k_{σ} – коефіцієнт концентрації напружень (для даного випадку $k_{\sigma} = 1,9 - 2,0$);

β – коефіцієнт, який враховує якість поверхні деталі, для полірованої поверхні черв'яка $\beta=1$;

ε – коефіцієнт, який враховує розмір перерізу деталі, для деталей з легованих сталей за наявності концентрації напружень значення ε .

Запускаємо код та виводимо результат в консоль (рис 5.7.1)

A screenshot of the Microsoft Visual Studio Debug Console window. The window has a title bar with the text "Microsoft Visual Studio Debug Console" and standard window controls (minimize, maximize, close). The console area is black with white text. The text displayed is as follows:

```
Results:  
sigma_-1 = 392000000.00 Pa  
sigma_max = 29812705.37 Pa  
(k_sigma)_d = 3.64  
n_sigma = 3.62  
  
FOS is satisfied: 3.62 >= 2
```

Рисунок 5.7.1 – Результат розрахунків

Результат роботи програми показав, що коефіцієнт запасу міцності становить 3.64, що є більше ніж звичайне значення $n = 2$. Отже умова стійкості виконується.

5.8 Розрахунок жорсткості

Разом з розрахунком на міцність, черв'як перевіряється на жорсткість. Метою цього розрахунку є перевірка того, чи перебуває прогин черв'яка в межах конструкційного зазору. Здебільшого це має значення під час холостого ходу, оскільки під час роботи екструдера канали черв'яка й зазори заповнені розплавом під тиском, який запобігає прогину й тертю по корпусу.

Полярний момент інерції перерізу, м⁴

$$I = \frac{\pi d_1^4}{64} (1 - \alpha^4) = \frac{3,14 * 0,0454^4}{64} (1 - 0,27^4) = 2,07 * 10^{-7} \text{ м}^4$$

Радіус інерції, м

$$i = \sqrt{\frac{I}{F}} = \sqrt{\frac{2,07 * 10^{-7}}{0,0015}} = 0,011 \text{ м}$$

Ступінь жорсткості

$$\lambda = \frac{\mu l_p}{i} = \frac{2 * 1,89}{0,011} = 343,6$$

де μ – коефіцієнт замурування (у цьому випадку $\mu=2$).

Якщо $\lambda > 50$, то черв'як вважають не жорстким і перевіряють на найбільший прогин за формулою:

$$\begin{aligned} \delta_p &= \frac{1}{EI} \left[\frac{q}{k^2} \left(\frac{1}{k^2} + \frac{l_p^2}{2} \right) - \frac{1}{k} \left(\frac{q}{k^3} - A l_p \right) \cos(k l_p) - \frac{1}{k^2} \left(\frac{q l_p}{k} - A \right) \sin(k l_p) \right] = \\ &= \frac{1}{2,085 * 10^5 * 2,07 * 10^{-7}} \left[\frac{152,4}{863,57^2} \left(\frac{1}{863,57^2} + \frac{1,89^2}{2} \right) - \frac{1}{863,57} \left(\frac{152,4}{863,57^3} - 3,12 * 1,89 \right) * \right. \\ &\left. \cos(863,57 * 1,89) - \frac{1}{863,57^2} \left(\frac{152,4 * 1,89}{863,57} - 3,12 \right) * \sin(863,57 * 1,89) \right] = 0,022 \text{ м} \end{aligned}$$

$$\text{де } k = \sqrt{\frac{P_{oc}}{EI}} = \sqrt{\frac{32187}{2,085 * 10^5 * 2,07 * 10^{-7}}} = 863,57 \text{ м}^{-1}$$

$$A = \frac{q(l_p - \frac{1}{k} \sin(k l_p))}{k \cos(k l_p)} = \frac{152,4 * (1,89 - \frac{1}{863,57} * \sin(863,57 * 1,89))}{863,57 * \cos(863,57 * 1,89)} = 3,12 \text{ Н * м}$$

На початковій стадії проектного розрахунку черв'як можна вибрати з урахуванням дії крутного моменту та осевого зусилля. Після розрахунку геометричних параметрів проводиться повний розрахунок черв'яка. Для більш точного обчислення

силових факторів, що діють на черв'як, враховується позацентровий характер осьового зусилля, що виникає від прогину кінця черв'яка δ_p .

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_{oc}}{F} \left(1 + \frac{\delta_p F}{I} d_1 \right) + \frac{M_{max}}{W_x} = \\ &= \frac{32187}{0,0015} * \left(1 + \frac{0,022 * 0,0015}{2,07 * 10^{-7}} * 0,0454 \right) + \frac{272,19}{9,13 * 10^{-6}} = \\ &= 2 * 10^8 \text{Па} = 200 \text{МПа}\end{aligned}$$

Отримане значення підставляється в залежність

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_{ст}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{(200)^2 + 4 * (174)^2} = 401 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт запасу не повинен перевищувати допустиме значення

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{екв}} = \frac{980}{401} \geq 2 = 2,44 \geq [2]$$

де допустимий коефіцієнт запасу $[n]$ зазвичай беруть рівним 1,6...2,0.

Отже коефіцієнт міцності $n=2,4$.

Умова міцності виконується.

5.9 Розрахунок шліцьового з'єднання

Черв'як з'єднується з приводом переважно за допомогою шліцьового з'єднання. Здебільшого використовуються шліці евольвентного профілю, оскільки вони мають більшу поверхню контакту, можуть передавати більше навантаження й довше зношуються. Центрування здебільшого здійснюють по боковій поверхні шліців з посадкою 7H/7n. Така конструкція забезпечує найбільшу точність центрування та усуває можливі люфти.

Шліцьові з'єднання перевіряють на зминання за залежністю:

$$\sigma_{зм} = \frac{M_{об}}{R_c F z \psi} \leq [\sigma]_{зм} = \frac{3184.7}{0,016 * 0,00024 * 16 * 0,7} \leq 120 \text{ МПа} = \\ = 74 \text{ МПа} \leq 120 \text{ МПа}$$

$$\text{де } R_c = d_d/2 = mz/2 = \frac{2*16}{2} = 16 \text{ мм} = 0,016 \text{ м};$$

m – модуль, мм;

z - кількість зубів шліцьового з'єднання:

F – площа контакту, м²:

$$F = 0,8lm = \frac{0,8ld_d}{z} = 0,8 * 0,15 * 0,002 = 0,00024 \text{ м}^2;$$

ψ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу навантаження по поверхні шліців, береться ψ=0,7-0,8;

[σ]_{зм} – допустиме напруження на зминання, МПа; приймаємо [σ]_{зм} = 120 МПа.

Модуль і кількість зубів беруть відповідно до довідників, приймаємо m = 2.

Умова міцності виконується.

5.10 Числові розрахунки

Даний розділ розраховуємо у програмному застосунку Ansys [13].

Обираємо необхідні модулі, а саме Steady-State Thermal та Static Structural.

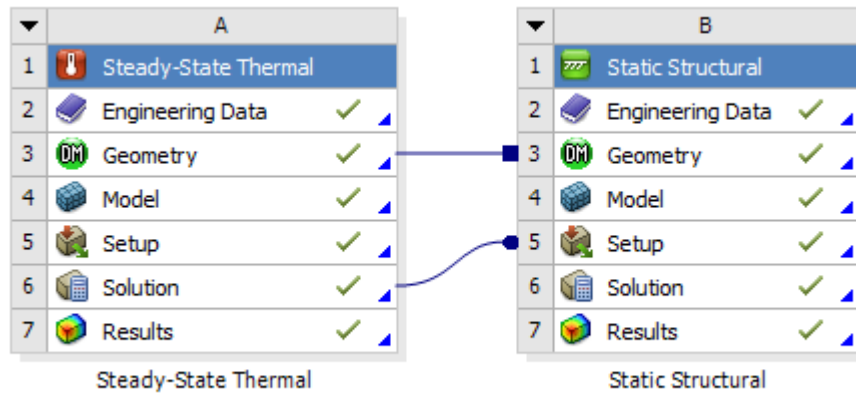


Рис. 5.10.1 – Середовище виконання розрахунків

Далі задаємо дані матеріалу (рис 5.10.2), з якого зроблений шнек, а саме зі сталі 40X. Міняємо значення стандартного матеріалу Structural Steel з бібліотеки General Materials. Далі міняємо значення межі текучості $\sigma_T = 785$ МПа у полях Tensile Yield Strength і Compressive Yield Strength. Ці два поля характеризують межі текучості на розтяг та стиску. Також перезаписуємо межу міцності $\sigma_B = 980$ МПа в Tensile Ultimate Strength та Compressive Ultimate Strength.

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	D
	1	2	3	4
1	Contents of Engineering Data			
2	Material			
3	Steel 40X			
4	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: Steel 40X				
	A	B	C	D
	1	2	3	4
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Isotropic Secant Elasticity			
6	Strain-Life Parameters			
7	S-N Curve	Tabular		
8	Tensile Yield Strength	785	MPa	
9	Compressive Yield Strength	785	MPa	
10	Tensile Ultimate Strength	980	MPa	
11	Compressive Ultimate Strength	980	MPa	

Рис. 5.10.2 – Властивості матеріалу

Переходимо в Steady-State Thermal, блок Geometry. Імпортуємо нашу модель у форматі STEP, попередньо зберігши її у даному форматі.

Далі створюємо температурні зони, за допомогою команди Sketch(рис. 5.10.3), які починаються від 25° до 220°, тобто від температури насипного матеріалу до температури його розплаву за довідником [3]. Самі розміри зон прораховані в попередніх розділах.

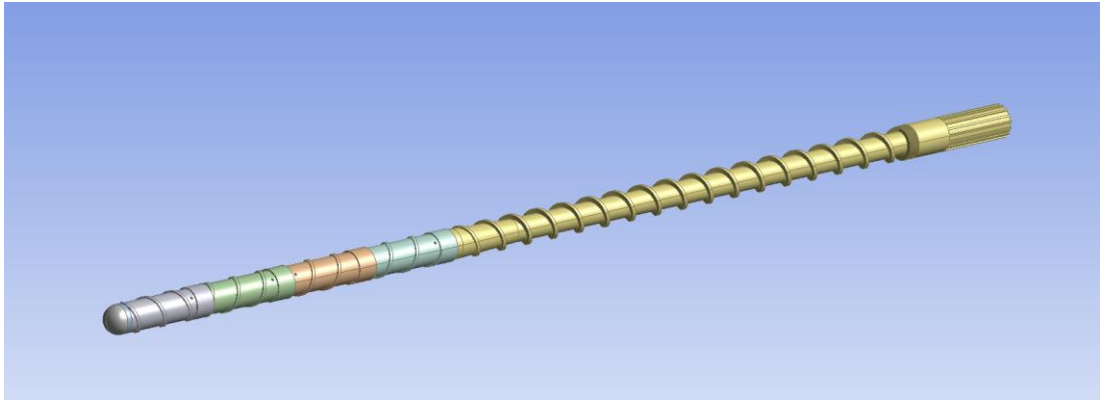


Рис. 5.10.3 Імпортований модифікований черв'як

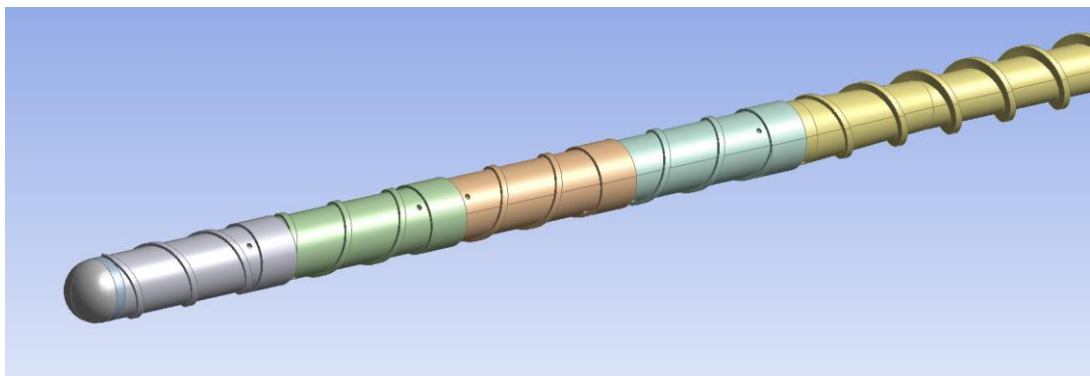


Рис. 5.10.4 Модифікація черв'яка

Результат розподілу температури наведено на рисунку 5.10.5.

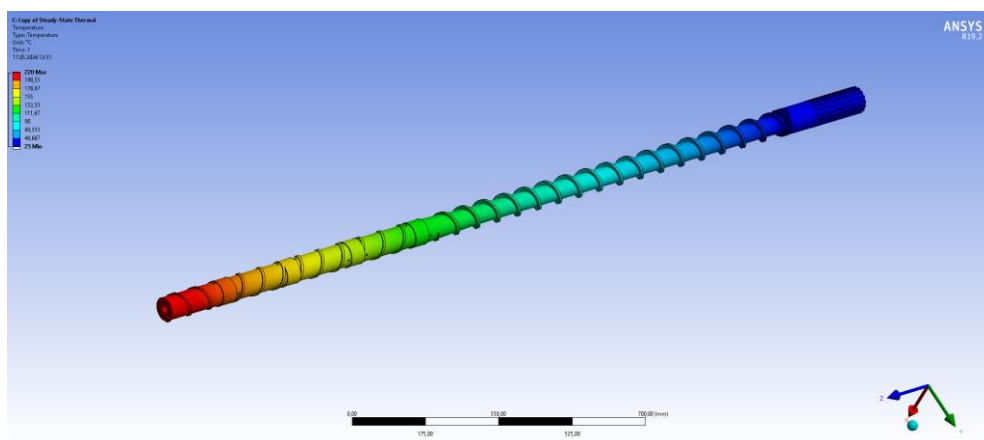


Рис. 5.10.5 Температурний розподіл

Далі підключаємо експортуємо блок Model та Solution як показано на рис.5.10.1, та переходимо у блок Static Structural.

Наступні етапи мають на меті змодельовати напруження, які виникають у вузлі, сили які діють на наш вузол, та закріплення які тримають наш вузол. Усі наступні числа, розраховано попередніх розділах. Їх короткий опис наступний:

1. Сила тяжіння (Standard Earth Gravity або ж Земна гравітація) (рис. 5.10.6). Вона задається в напрямку дії ваги на вузол, і дорівнює значенню прискорення вільного падіння – $9,8 \text{ м/с}^2$.
2. Закріплення (Fixed Support) (рис.5.10.6). Це закріплення імітує закріплення нашого вузла у корпусі екструдера або муфті, яка теж закріплена у агрегаті.
3. Закріплення без тертя (Frictionless Support) (рис.5.10.6). Це закріплення імітує саме положення шнека у корпусі, тобто на полімерній подушці, яка в свою чергу його підтримує.
4. Осьове зусилля (Force) (рис. 5.10.6). Число становить 32187 Н. На накінецьник червяка діє осьова сила, яка діє на супротив, та моделює тиск, який матеріал створює проходячи формуючу головку.
5. Крутний момент (Moment)(рис. 5.10.6). Число становить 3184,7 Н*м. Імітує момент діючий на червяк, коли він приводиться в рух обертовим обладнанням.

Загальна картина закріплення показана на рисунку

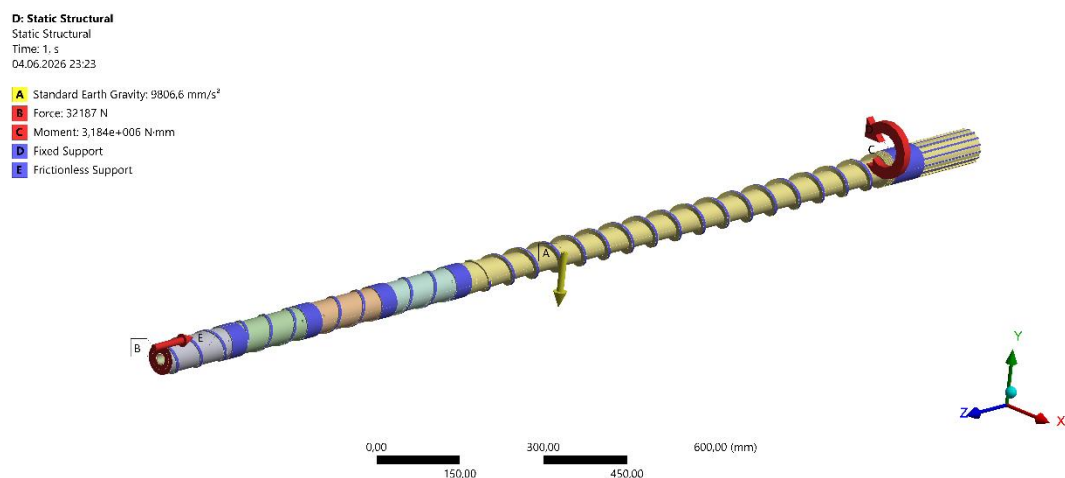


Рис. 5.10.6 Закріплення

Прогин вузла показав, що наш черв'як має відхилення на 0,08мм (рис.5.10.8). Аналізуючи ці дані, можна сказати що прогин в межах норми. Це через те що, сам черв'як знаходиться у корпусі, і спирається на шар розплавленого полімеру, що створює розподілену підтримку. Унаслідок цього ефективна жорсткість системи зростає, а сам прогин є значно меншим порівняно з випадком вільного опирання.

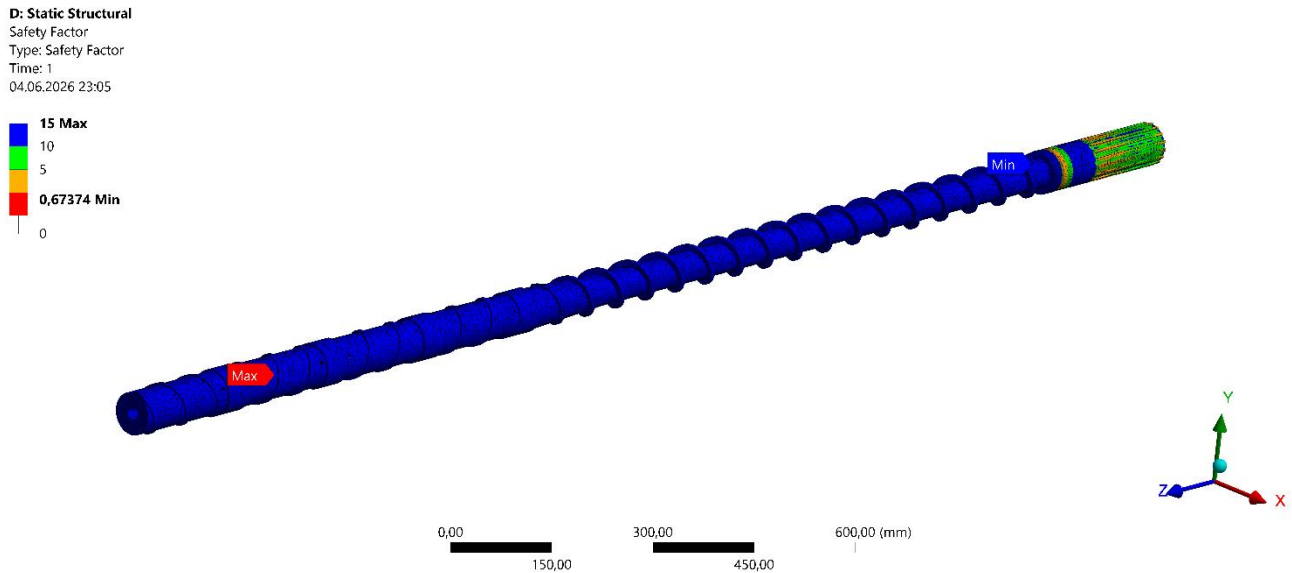


Рис. 5.10.7 Коефіцієнт безпеки

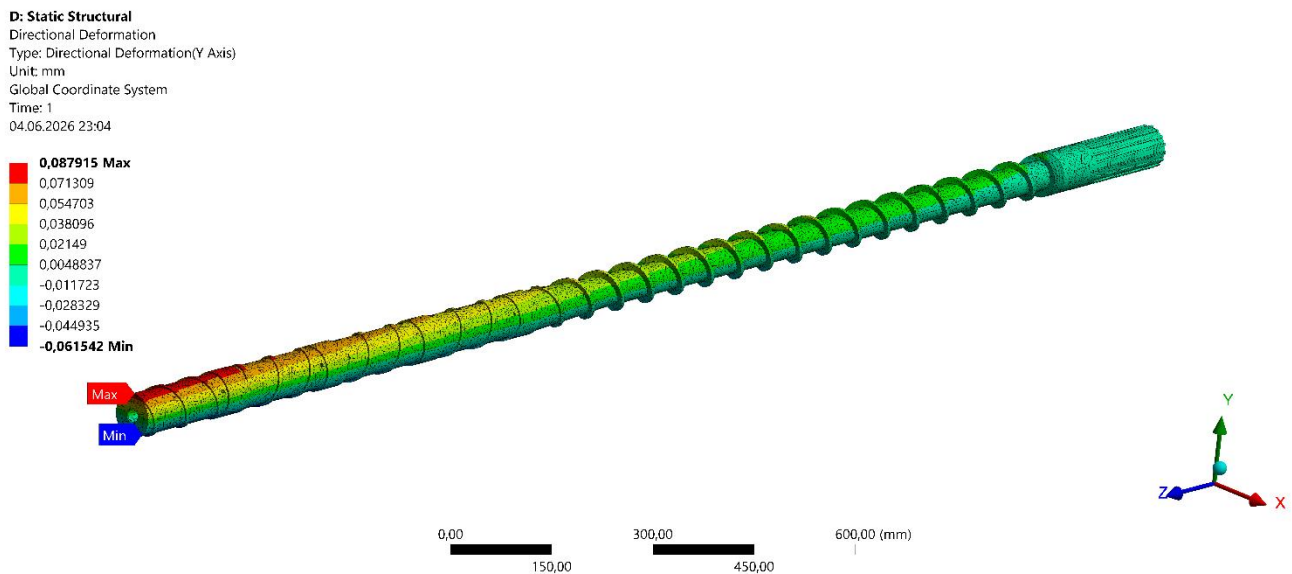


Рис. 5.10.8 Деформація черв'яка

Далі аналізуємо максимальні напруження, які виникають у вузлі. За даними ANSYS спостерігаємо найбільше напруження 369 МПа (рис. 5.10.9), це менше ніж допустимі напруження для матеріалу сталь 40Х.

D: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
04.06.2026 22:57

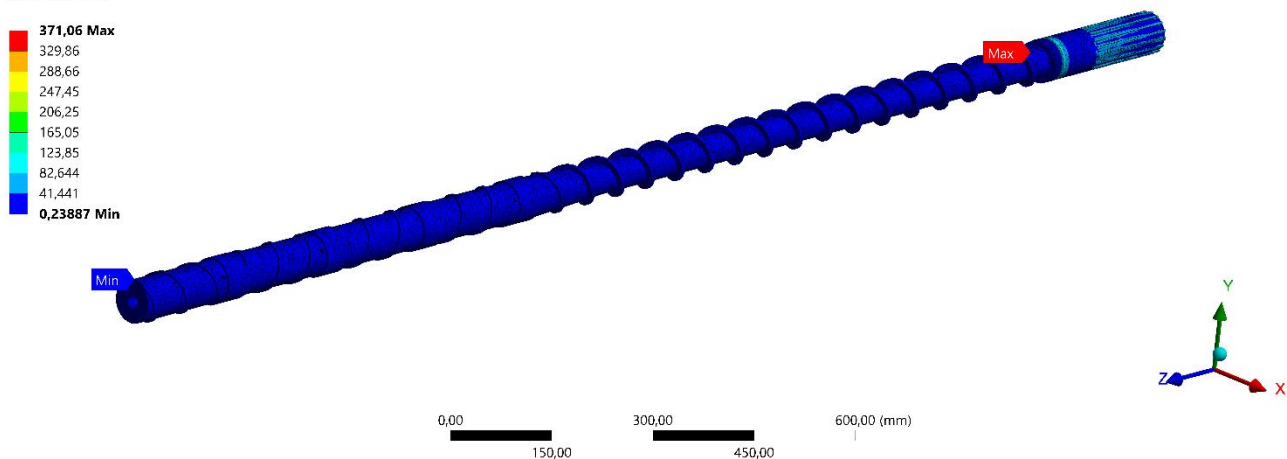


Рис. 5.10.9 Напруження

Виходячи з наявних чисел, можна підсумувати що дана конструкція працездатна.

Аналізуючи модифіковану конструкцію, можна затвердити що стандартній конструкції вона не поступається по міцності, але ще варто підмітити що ця модифікація спрямована не лише на посилення міцності, а й кращому "перемішуванню" полімеру, за допомогою сегментних частин та їх каналів.

6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА

Дипломний проєкт на тему «Лінія для виробництва труб з поліпропілену з модернізацією черв'яка» передбачає розгляд питань забезпечення безпечної експлуатації технологічного обладнання, створення належних умов праці персоналу та дотримання вимог виробничої санітарії і промислової безпеки під час роботи екструзійної лінії.

Під час експлуатації лінії необхідно забезпечити безпечні умови праці відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», Кодексу цивільного захисту України, а також чинних нормативно-правових актів у сфері промислової безпеки та виробничої санітарії. Основними нормативними документами, що регламентують безпечну експлуатацію обладнання, є НПАОП 25.0-1.04-13 «Правила охорони праці на підприємствах з виробництва пластмасових виробів» [14], НПАОП 25.0-1.01-12 «Правила охорони праці на об'єктах з переробки пластичних мас» [15] та ДСТУ EN 1114-3:2020 «Машини для перероблення гуми та пластмаси. Екструдери та екструзійні лінії. Вимоги щодо безпеки» [16].

Основною метою організації охорони праці є попередження виробничого травматизму, професійних захворювань та аварійних ситуацій.

Лінія розташовується у виробничому цеху орієнтовною площею 450–500 м², що забезпечує достатній простір для розміщення технологічного обладнання, проходів для обслуговування, зон складування сировини та готової продукції, а також дотримання вимог пожежної та виробничої безпеки.

Виробнича лінія включає екструдер, систему подачі сировини, формуючу головку, вакуумну ванну калібрування, охолоджувальні секції, тягнучий та різальний механізми. Робота обладнання супроводжується дією підвищених температур, електричного струму, шуму, рухомих механізмів та можливим виділенням шкідливих речовин під час переробки полімерів.

6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Основними небезпечними факторами під час виробництва поліпропіленових труб є:

- підвищена температура поверхонь екструдера та розплаву полімеру;
- небезпека ураження електричним струмом;
- рухомі частини обладнання;
- шум та вібрація від роботи електродвигунів і редукторів;
- виділення парів та продуктів термічного розкладу полімеру;
- пожежна небезпека через використання електрообладнання та полімерної сировини.

Для зменшення впливу небезпечних факторів передбачаються організаційні та технічні заходи безпеки, використання засобів колективного та індивідуального захисту, а також систематичний контроль стану обладнання відповідно до вимог НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці» [17].

6.2 Електробезпека

Екструзійна лінія працює від трифазної електромережі напругою 380 В та частотою 50 Гц. Приміщення виробничої ділянки належить до приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом через наявність вологи та металевих конструкцій. За ступенем небезпеки ураження електричним струмом приміщення відноситься до категорії приміщень з підвищеною небезпекою.

Експлуатація електрообладнання повинна здійснюватися відповідно до вимог НПАОП 0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» [18].

Для забезпечення електробезпеки необхідно:

- виконати захисне заземлення електрообладнання;
- використовувати автоматичні вимикачі та пристрої захисного відключення;

- забезпечити ізоляцію струмоведучих частин;
- проводити періодичну перевірку стану кабелів та електроапаратури;
- встановити попереджувальні знаки безпеки;
- допускати до роботи лише персонал, який пройшов інструктаж та навчання з електробезпеки.

Обслуговування електрообладнання повинно виконуватися тільки при повному відключенні живлення з дотриманням вимог нормативних документів та правил безпечної експлуатації електроустановок.

6.3 Пожежна безпека

Під час переробки поліпропілену існує небезпека виникнення пожежі внаслідок перегріву нагрівальних елементів, короткого замикання або займання полімерної сировини. За вибухопожежною та пожежною небезпекою виробниче приміщення відноситься до категорії В, а за класом пожежонебезпечної зони — до класу П-Па, оскільки в приміщенні знаходяться тверді горючі речовини та полімерні матеріали.

Організація пожежної безпеки на підприємстві повинна відповідати вимогам ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» [19] та Правил пожежної безпеки в Україні, затверджених наказом МВС України №1417 [20].

Виробниче приміщення повинно бути обладнане:

- порошковими та вуглекислотними вогнегасниками;
- системою аварійного відключення живлення;
- вентиляцією для видалення диму та парів;
- пожежною сигналізацією;
- евакуаційними виходами відповідно до норм пожежної безпеки.

Для виробничого цеху площею 500 м² необхідно передбачити не менше 4 порошкових вогнегасників типу ВП-5 та 2 вуглекислотних вогнегасників типу ВВК-5, які розміщуються поблизу електрообладнання, екструдера та евакуаційних виходів.

Забороняється зберігати легкозаймисті матеріали поблизу нагрівальних зон екструдера. Працівники повинні бути ознайомлені з планом евакуації та правилами користування первинними засобами пожежогасіння.

6.4 Захист від дії рухомих механізмів

На виробничій лінії присутні обертові та рухомі елементи: шнек екструдера, тягнучі ролики, приводи, різальний механізм. Контакт працівника з такими елементами може призвести до травмування.

Вимоги безпеки до екструзійних ліній та захисних пристроїв визначаються ДСТУ EN 1114-3:2020 «Машини для перероблення гуми та пластмаси. Екструдери та екструзійні лінії. Вимоги щодо безпеки» [16].

Для підвищення рівня безпеки необхідно:

- встановити захисні кожухи на рухомих вузлах;
- застосовувати блокувальні пристрої;
- не допускати роботи обладнання при знятих огородженнях;
- проводити технічне обслуговування лише після повної зупинки механізмів;
- забезпечити працівників спецодягом без вільних елементів тканини.

Робочі місця повинні бути обладнані кнопками аварійної зупинки, розташованими у легкодоступних місцях.

6.5 Мікроклімат та вентиляція

У процесі плавлення поліпропілену можливе виділення парів та тепла, що негативно впливає на самопочуття працівників. Для підтримання нормативних параметрів мікроклімату необхідно застосовувати загальнообмінну та місцеву вентиляцію.

Параметри мікроклімату повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [21].

Температура, відносна вологість та швидкість руху повітря повинні відповідати санітарним нормам для виробничих приміщень. Особлива увага приділяється відведенню тепла від нагрівальних зон екструдера.

Для зменшення впливу шкідливих речовин рекомендується:

- встановлення витяжних зон над екструдером;
- регулярне провітрювання приміщення;
- контроль концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони.

Рівень шуму на виробництві не повинен перевищувати допустимих значень, встановлених ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [22].

6.6 Освітлення робочої зони

Освітлення виробничої ділянки повинно забезпечувати безпечне виконання технологічних операцій, контроль якості труб та обслуговування обладнання. За характером зорової роботи виробнича ділянка відноситься до IV категорії зорових робіт (роботи середньої точності), що передбачає виконання операцій з контролем геометричних параметрів труб, спостереженням за технологічним процесом та обслуговуванням обладнання при нормованому рівні освітленості.

Організація освітлення повинна відповідати вимогам ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [23].

У приміщенні застосовується комбіноване освітлення:

- природне — через віконні прорізи;
- штучне — за допомогою світлодіодних світильників загального освітлення.

Освітленість робочих поверхонь повинна відповідати встановленим нормам. Недостатній рівень освітлення може спричинити підвищення втоми працівників та ризик травматизму.

6.7 Засоби індивідуального захисту

Працівники виробничої лінії повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту відповідно до характеру виконуваних робіт та вимог чинних нормативних документів.

Працівники повинні використовувати:

- спеціальний одяг;
- захисні рукавиці;
- окуляри або захисні щитки;
- діелектричне взуття;
- засоби захисту органів дихання при необхідності.

Рекомендується використання сучасних засобів індивідуального захисту виробників ЗМ або Dnipro-M, які забезпечують належний рівень безпеки персоналу під час роботи з полімерним обладнанням.

6.8 Висновок

Дотримання вимог охорони праці під час виробництва поліпропіленових труб дозволяє знизити ризик виникнення аварійних ситуацій, забезпечити безпечні умови праці та підвищити надійність роботи технологічної лінії. Комплексне застосування технічних, організаційних та санітарно-гігієнічних заходів сприяє збереженню здоров'я працівників та ефективній роботі підприємства.

7 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

7.1 Опис і призначення деталі

Наконечник (Рис. 7.1) являє собою деталь черв'яка екструдера, який виконаний у вигляді елемента з розширеною робочою частиною та хвостовиком із зовнішньою різьбою. Хвостовик призначений для з'єднання з основним тілом черв'яка за допомогою різьбового з'єднання, що забезпечує надійну фіксацію та можливість демонтажу у разі ремонту або заміни. Робоча частина деталі бере участь у процесі переміщення, ущільнення та переробки матеріалу в зоні екструзії, а також сприяє формуванню стабільного потоку матеріалу на виході.

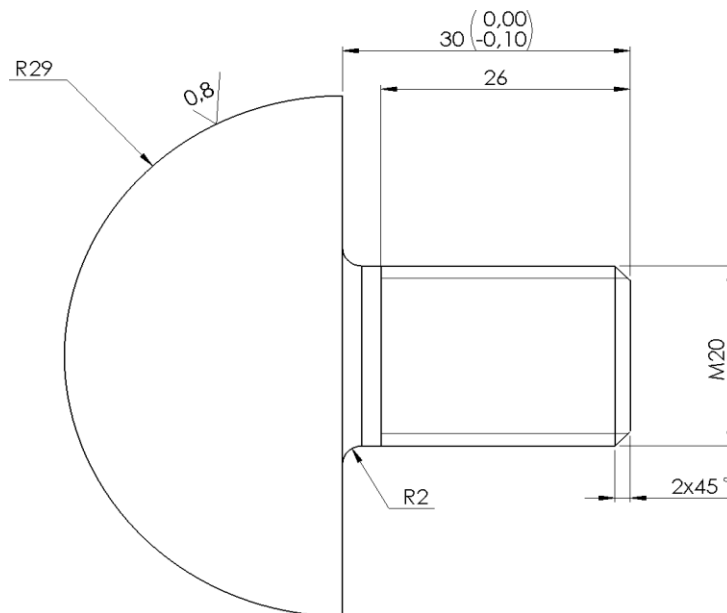


Рис. 7.1 – Ескіз наконечника черв'яка

Матеріал деталі 38Х2МЮА (ГОСТ 4543-71)

Як заготовка для виготовлення даної деталі використовується круглий прокат (Рис. 7.2), що має достатню міцність і зносостійкість в умовах експлуатації. У деяких випадках може застосовуватися поковка, яка забезпечує підвищені механічні властивості виробу. Заготовка виготовляється з технологічними припусками, необхідними для подальшої механічної обробки зовнішніх поверхонь, формування робочої частини та нарізання різьби на хвостовику.

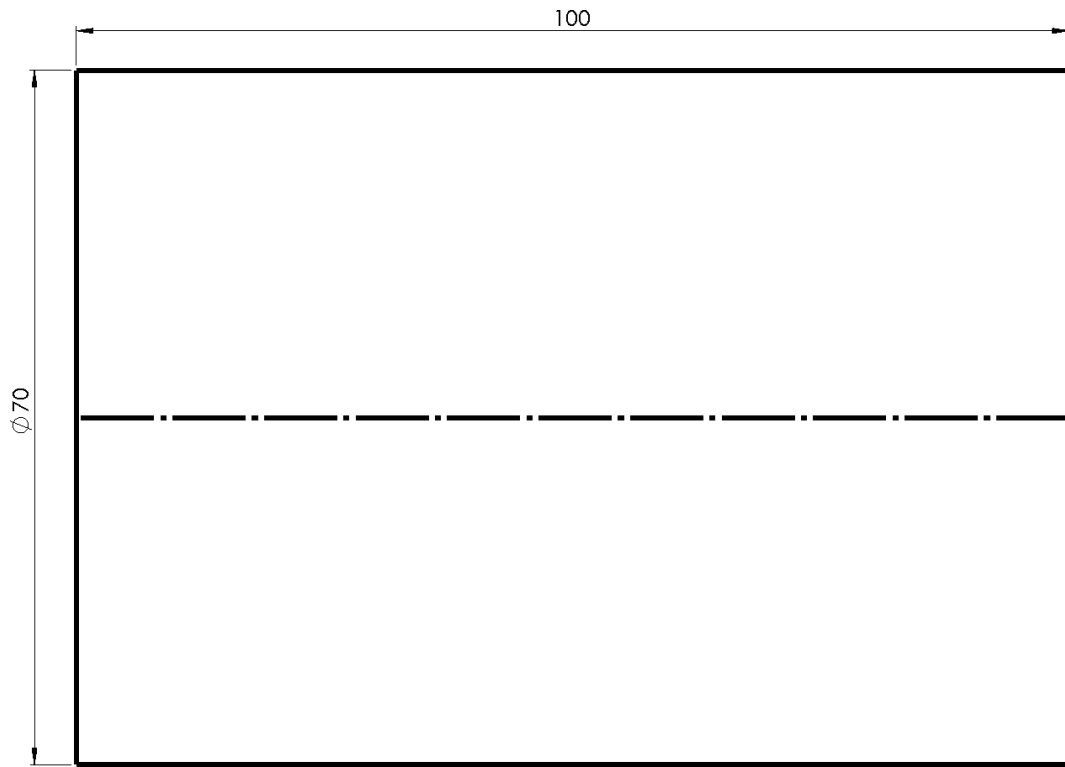


Рис. 7.2 Заготовка наконечника

7.2 Розробка технологічного процесу виготовлення деталі

Розроблений технологічний процес виготовлення деталі складається з токарних, різьбонарізних, підрізних та шліфувальних операцій. Обробка деталі виконується із циліндричної заготовки на токарному верстаті з формуванням сферичної поверхні, шийки та циліндричного хвостовика. Детально технологічний процес описаний у МК, КЕ, ОК.

[illegible]

Дубл.			
Взамін.			
Підпис			

Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата

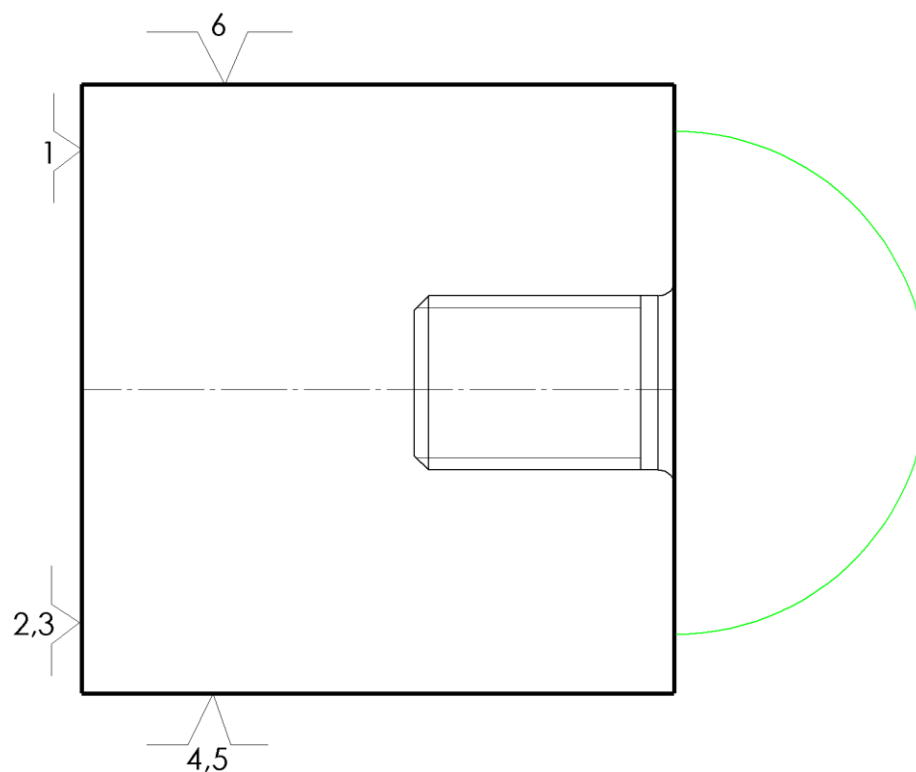
Розробив	Лабуренко Д.О.		
Перевірів	Борщик С.О.		
Н.контр.			

КПІ імені Ігоря
Сікорського

005

Наконечник черв'яка екструдера

Н



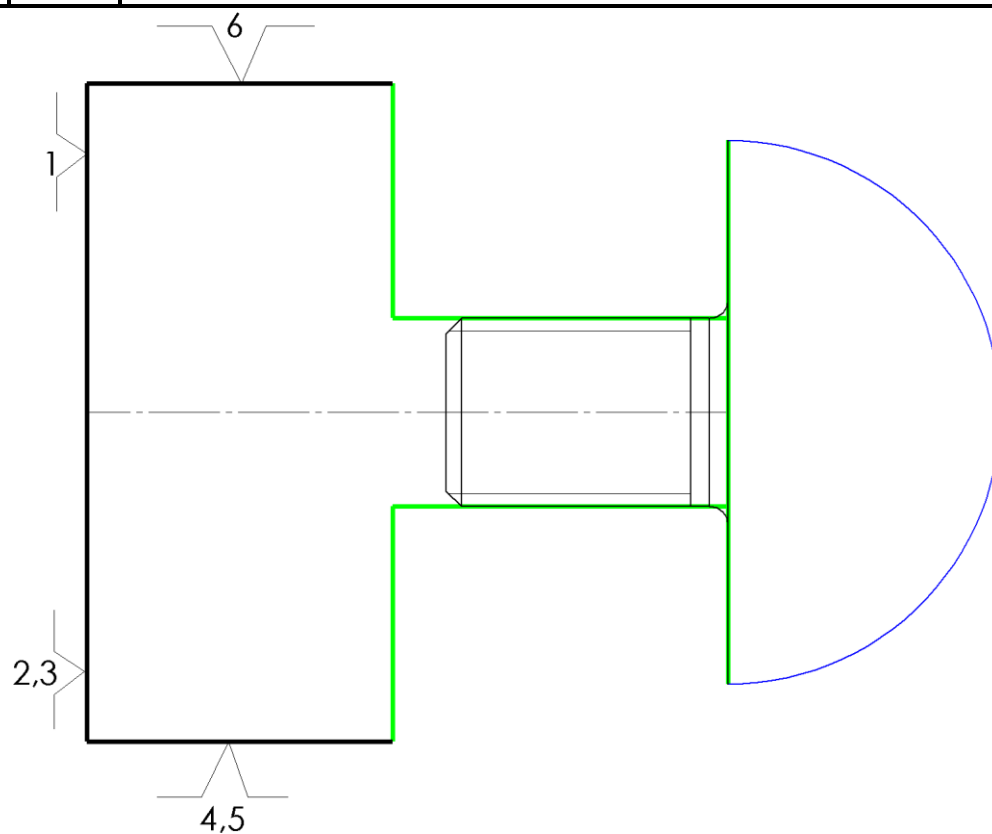
КЕ

Обробка різанням

Дубл.			
Взамін.			
Підпис			

Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата

Розробив	Лабуренко Д.О.			КПІ імені Ігоря Сікорського		010				
Перевірів	Борщик С.О.									
						Наконечник черв'яка екструдера				Н
Н.контр.										



КЕ

Обробка різанням

Дубл.			
Взамін.			
Підпис			

Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата

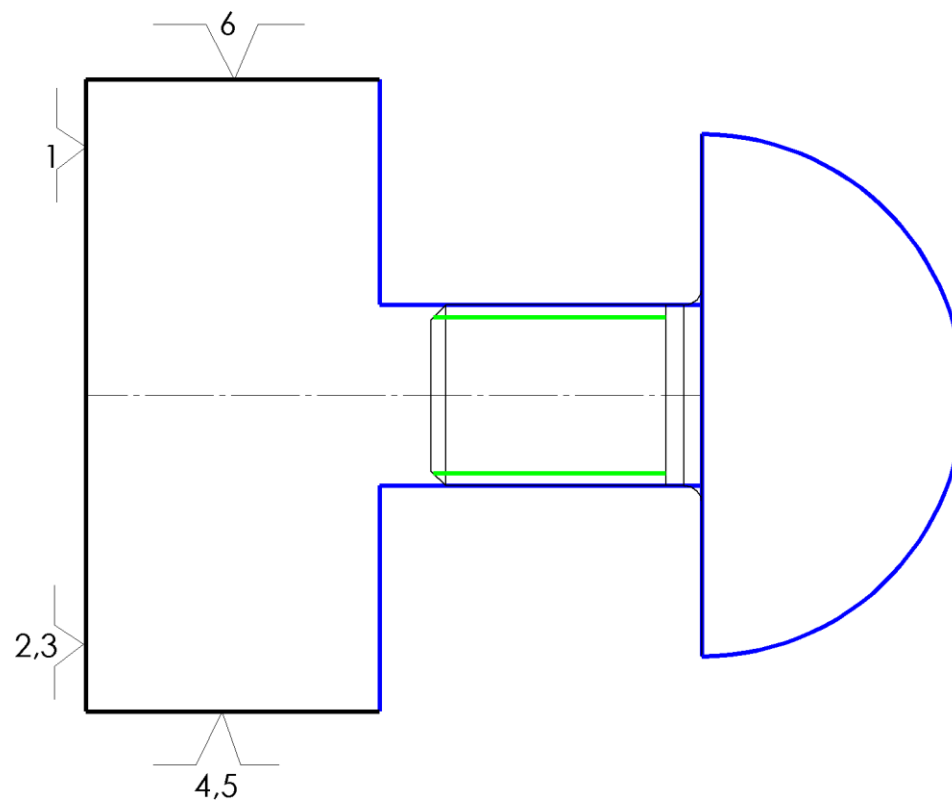
Розробив	Лабуренко Д.О.		
Перевірів	Борщик С.О.		
Н.контр.			

КПІ імені Ігоря
Сікорського

015

Наконечник черв'яка екструдера

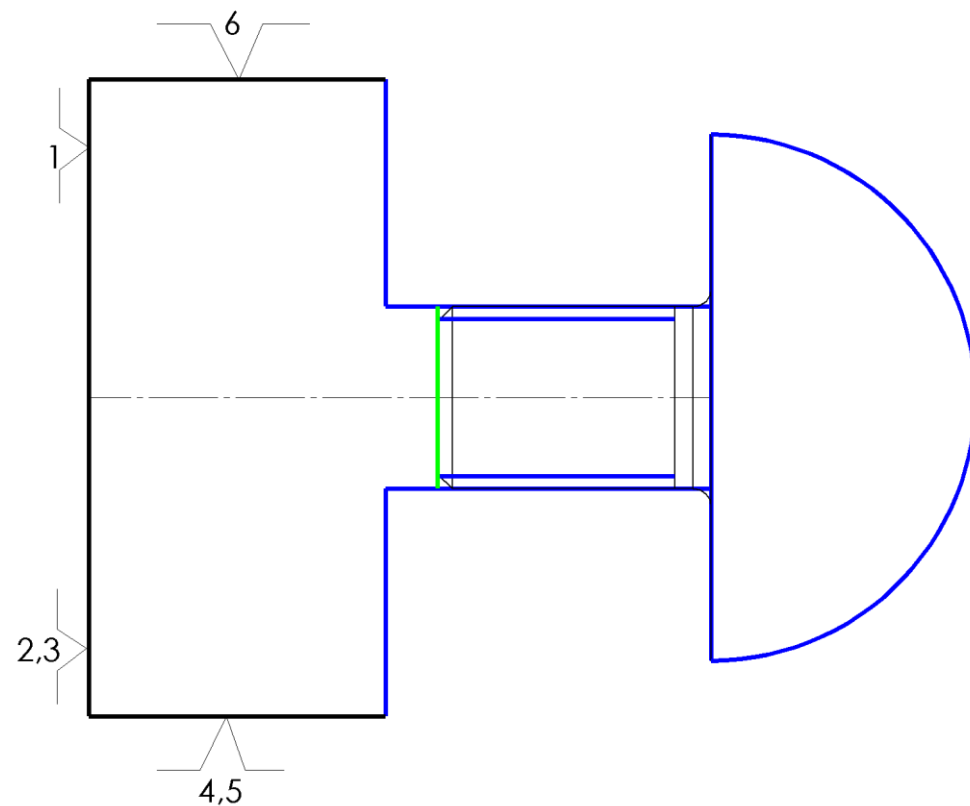
Н



КЕ

Обробка різанням

Дубл.															
Взамін.															
Підпис										Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата	
Розробив	Лабуренко Д.О.			КПІ імені Ігоря Сікорського								020			
Перевірів	Борщик С.О.														
Н.контр.				Наконечник черв'яка екструдера									Н		

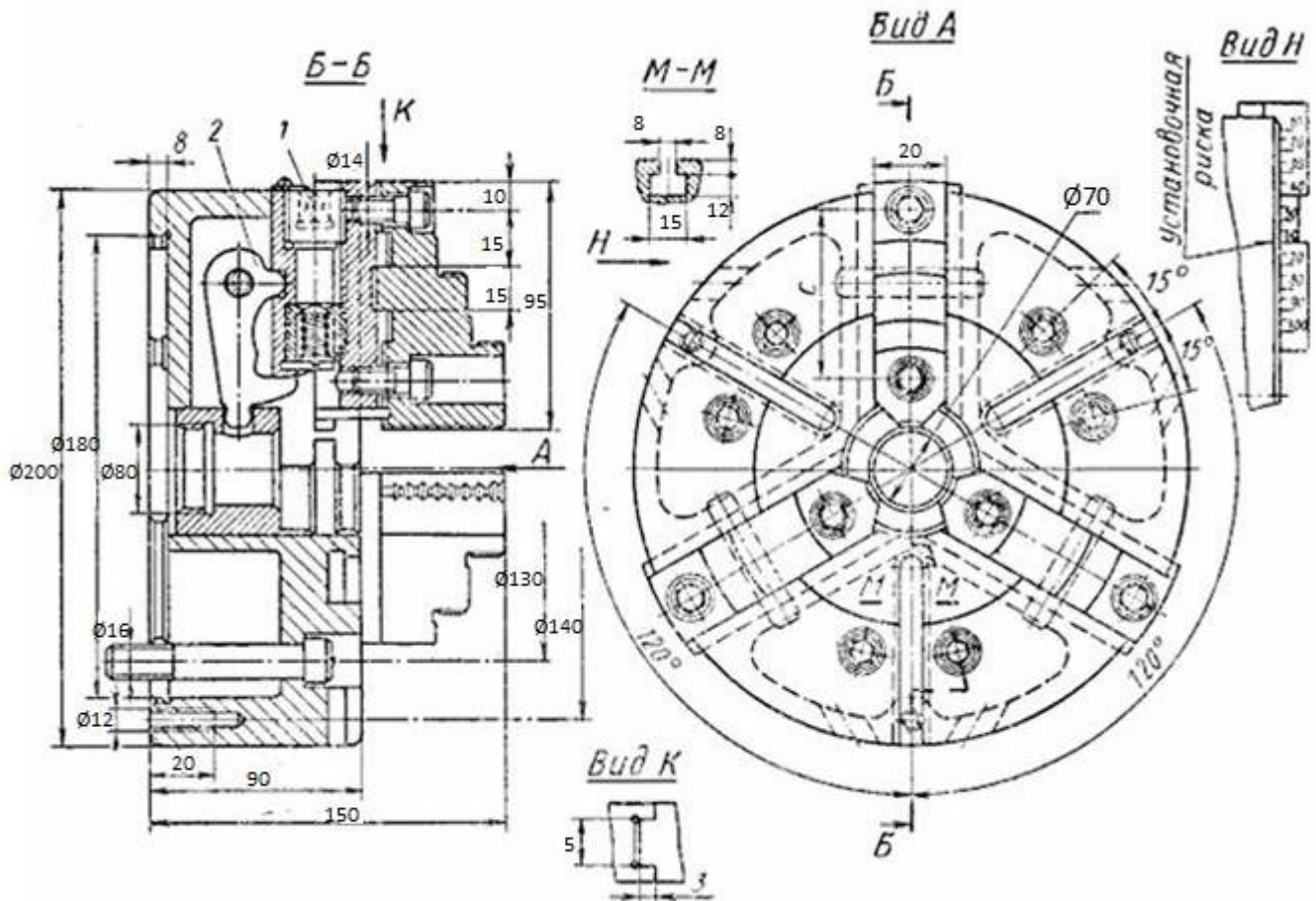


КЕ

Обробка різанням

56

7.3 Призначення пристосування для обробки деталі



Для механічної обробки даної деталі використовується трьохкулачковий токарний патрон. Це універсальне затискне пристосування, яке застосовується на токарних верстатах для надійного закріплення заготовок циліндричної форми. Використання патрона забезпечує точне центрування заготовки відносно осі обертання шпинделя, що є необхідною умовою для якісної токарної обробки.

Конструкція трьохкулачкового патрона складається з корпусу, в якому розміщені три кулачки, що одночасно переміщуються до центру або від центру за допомогою спеціального механізму. Така конструкція дозволяє швидко встановлювати та знімати заготовку, що значно скорочує допоміжний час при виконанні технологічних операцій. Завдяки одночасному переміщенню кулачків забезпечується автоматичне центрування заготовки, що підвищує точність обробки та зменшує можливість виникнення похибок.

Під час виготовлення даної деталі патрон використовується для закріплення круглої заготовки при виконанні токарних операцій. У процесі обробки виконуються підрізання торця, точіння сферичної поверхні, обробка шийки та циліндричного хвостовика. Надійне закріплення заготовки дозволяє уникнути її зміщення або вібрацій під час різання, що позитивно впливає на якість поверхні та точність геометричних розмірів деталі.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті було проаналізовано конструкцію базової машини, розглянуто принцип її роботи та основні технологічні параметри процесу екструзії.

На основі літературного та патентного огляду сучасних конструктивних рішень, було проаналізовано та обґрунтовано вибір для модифікації вузла екструдера, а саме черв'яка. Модифікація дозволяє покращити умови переробки полімерного матеріалу та підвищити ефективність роботи екструдера. Проведено необхідні розрахунки, зокрема розрахунок геометричних параметрів черв'яка, продуктивності екструдера, перепадів тиску у формуючій головці, потужності привода, а також перевірочні розрахунки на міцність, стійкість та жорсткість.

Аналізуючи отримані результати, можна підтвердити що всі розраховані параметри відповідають встановленим вимогам. Коефіцієнти запасу міцності та стійкості знаходяться у межах, вище за допустимі значення, що підтверджує надійність і безпечність роботи модернізованого черв'яка в робочих умовах.

У розділі охорона праці проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі аспекти, розроблено заходи щодо забезпечення електробезпеки, пожежної безпеки, захисту від рухомих механізмів, нормалізації мікроклімату та освітлення робочої зони. Усі запропоновані рішення відповідають чинним нормативним вимогам та документам.

Крім того, було розроблено технологічний процес виготовлення деталі, обрано необхідне обладнання, інструмент та оснащення для її обробки. Запропонований технологічний процес забезпечує отримання деталі необхідної якості та відповідає вимогам сучасного виробництва.

Таким чином, поставлені в дипломному проєкті завдання виконані в повному обсязі, а мета досягнута. Отримані результати підтверджують працездатність запропонованої модернізації та можливість її практичного застосування на підприємствах, що спеціалізуються виробництвом поліпропіленових труб.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Екструзійне обладнання [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, Д. Г. Швачко. – Електрон. текст. дані (1 файл: 4,66 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 144 с. – Назва з екрана. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/73944>
2. Щербина В.Ю., Сівецький В.І., Гондляр О.В. Механічні процеси і обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів. Підготовка сировинних матеріалів і устаткування для змішування та формування [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. – 131с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/4573>
3. Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Полімерні матеріали і вироби з них (одержання, перероблення, властивості) : термінол. слов. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 208 с. URL.: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37632>
4. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів: навч. посіб. / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 200 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25367>
5. Мікульонок І. О., Карвацький А. Я., Іваненко О. І. Екструзійні головки для формування одноканальних гладких полімерних труб (Огляд конструкцій) // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2023. № 4(22). С. 18–31. DOI: 10.20535/2617-9741.4.2023.294324
6. Extruder screw with alternately-arranged conveyance portions and extruders and extrusion methods using the extruder screw : Patent US11229889B2, USA. Publ. date: 01.02.2022. URL: <https://patents.google.com/patent/US11229889B2/en> (дата звернення: ..2025).
7. Extruder screw having paths within the screw, extruder, and extrusion method : Patent US11813785B2, USA. Publ. date: 14.11.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/US11813785B2/en> (дата звернення: ..2025).
8. Extruder screw including conveyance portions and paths within the conveyance portions, extruder, and extrusion method : Patent US11230033B2, USA. Publ. date: 01.02.2022. URL: <https://patents.google.com/patent/US11230033B2/en> (дата звернення: 2025).
9. Incongruous parallel double screw for stone paper continuous banburying granulator : Patent CN111673938A, China. Publ. date: 18.09.2020. URL: <https://patents.google.com/patent/CN111673938A/en> (дата звернення: ..2025).
10. Method for producing liquid-crystal polyester composition, and liquid-crystal polyester composition : Patent WO2018199159A1. Publ. date: 01.11.2018. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2018199159A1/en> (дата звернення: ..2025).

11. Електродвигун 37 кВт 1500 об/хв AIP200M4
URL: https://xn--80aqy.com.ua/uk/katalog_elektrodivyguniv_air/air-200m4-37-kvt-1500-ob-hv/
12. Stroustrup B. The C++ Programming Language. — 4th ed. — Boston : Addison-Wesley, 2013. — 1368 p. — ISBN 978-0-321-56384-2.
13. Розв'язок задач проєктування приладів та систем з використанням ANSYS і MATHCAD : підручник / І. А. Гришанова, Л. П. Згуровська, Ю. В. Киричук. Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. 180 с.
URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50333>
14. НПАОП 25.0-1.04-13. Правила охорони праці на підприємствах з виробництва пластмасових виробів. — Офіційне видання. — Київ : Держпраці України, 2013.
15. НПАОП 25.0-1.01-12. Правила охорони праці на об'єктах з переробки пластичних мас. — Офіційне видання. — Київ : Держпраці України, 2012.
16. ДСТУ EN 1114-3:2020. Машина для перероблення гуми та пластмаси. Екструдери та екструзійні лінії. Вимоги щодо безпеки. — Київ : УкрНДНЦ, 2020.
17. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. — Київ : Держнагляд охорони праці України, 2005.
18. НПАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. — Київ : Держнагляд охорони праці України, 1998.
19. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. — Київ : Мінрегіон України, 2016.
20. Правила пожежної безпеки в Україні : затв. наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417. — Офіційне видання. — Київ, 2014.
21. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. — Київ : МОЗ України, 1999.
22. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. — Київ : МОЗ України, 1999.
23. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. — Київ : Мінрегіон України, 2018.

ДОДАТКИ

Таблиця розглянутих патентів

№	Предмет пошуку	№ свідоцтва, МПК, країна, організація, автор	Суть заявленого технологічного рішення та ціль його створення
1	Конструкція шнека екструдера зі змінною геометрією	US11229889B2 МПК B29B 7/42 США Toshiba Kikai Kabushiki Kaisha Akiyoshi Kobayashi Shigeyuki Fujii	Конструкція шнека передбачає чергування транспортуючих ділянок із різною геометрією витків, що забезпечує формування змінних умов течії полімерного матеріалу. Це дозволяє створювати локальні зміни тиску, швидкості та зсувних напружень, що інтенсифікує процеси плавлення та змішування. Основною метою є підвищення ефективності гомогенізації матеріалу без істотного ускладнення загальної конструкції екструдера
2	Шнек екструдера з внутрішніми каналами	US11813785B2 МПК B29C 48/51 США Shibaura Machine Co., Ltd. Akiyoshi Kobayashi Shigeyuki Fujii	У конструкції реалізовано внутрішні канали, які забезпечують перенаправлення частини полімерного потоку між різними зонами шнека. Це створює рециркуляційні потоки, що сприяють багаторазовому перемішуванню матеріалу та вирівнюванню температурного поля. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність тепло- і масообмінних процесів. Основною метою є отримання високої однорідності полімерного розплаву

3	Комбінований шнек з інтегрованими каналами	US11230033B2 МПК B29B 7/42 США Toshiba Kikai Kabushiki Kaisha Akiyoshi Kobayashi Shigeyuki Fujii	Конструкція передбачає інтеграцію каналів безпосередньо у транспортуючі елементи шнека, що дозволяє забезпечити більш рівномірний і контрольований розподіл матеріалу. Такий підхід сприяє зниженню ймовірності утворення застійних зон і покращує умови змішування. Основною метою є підвищення ефективності екструзійного процесу при збереженні стабільності потоку
4	Шнек екструдера зі змінною геометрією та кількістю заходів	CN111673938A МПК B29B 7/48 Китай Company 41111 Jia Zhongqi Ren Zhedong	Рішення базується на зміні геометричних параметрів шнека, зокрема кроку витків і кількості заходів, що дозволяє формувати багатопотокову структуру руху матеріалу. Це сприяє підвищенню продуктивності екструдера та інтенсифікації процесів транспортування і часткового змішування. Основною метою є збільшення пропускної здатності обладнання
5	Модульний шнек екструдера	WO2021175357A1 МПК B29C 48/605 Німеччина HENNES, Jochen Pleiser Dreieck	Запропоновано використання змінних модульних елементів шнека, що дозволяє адаптувати його конструкцію до різних технологічних умов і типів матеріалів. Це

			забезпечує можливість зміни геометрії та функціональних зон без виготовлення нового шнека. Основною метою є створення універсальної та гнучкої екструзійної системи
--	--	--	---

Перш. викор.	Формат	Зона	Номер	Позначення	Назва	Кільк.	Примітки		
					<u>Документація</u>				
	A1			ЛП22.091245.000-70 СК	Екструдер для виробництва труб з поліпропілену з модернізацією черв'яка				
Довідковий №					<u>Складальні одиниці</u>				
			1	ЛП22.091245.002-70 СК	Черв'як	1			
			2	ЛП22.091245.003-70 СК	Підшипниковий вузол	1			
			3	ЛП22.091245.000.001-70 СК	Кожух завантажувальної зони	1			
			4	ЛП22.091245.000.002-70 СК	Корпус	1			
			5	ЛП22.091245.000.003-70 СК	Бункер	1			
			6	ЛП22.091245.000.004-70 СК	Обшивка	1			
			7	ЛП22.091245.000.005-70 СК	Станина	1			
					<u>Деталі</u>				
			8	ЛП22.091245.000.01-70 СК	Муфта	1			
					<u>Стандартні вироби</u>				
			9		Керамічний кільцевий нагрівач	4			
			10		Редуктор	1			
	Підп. і дата			11		Електродвигун асинхронний	1		
			12		Болт М20х80 ДСТУ ISO 898-1:2015	15			
			13		Болт М20х110 ДСТУ ISO 898-1:2015	8			
			14		Гайка М20 ISO 4032-2014	23			
Інв. № дубл.									
Взам. інв. №									
Підп. і дата									
Інв. № подл.	Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ЛП22.091245.000-70 СП			
	Розроб.	Лабуренко				Екструдер для виробництва труб з поліпропілену з модернізацією черв'яка	Літ.	Аркуш	Аркушів
	Перевір.	Олексишен					0,	1	1
	Н. контр.						КПІ ім. Ігоря Сікорського		
	Затвер.	Сокольський							

Перш. викор.	Формат	Зона	Номер	Позначення	Назва	Кільк.	Примітки		
					<u>Документація</u>				
	A1			ЛП22.091245.003-70 СК	Підшипниковий вузол				
Довідковий №					<u>Деталі</u>				
			1	ЛП22.091245.003.001-70	Муфта				
			2	ЛП22.091245.003.002-70	Корпус підшипникового вузла				
			3	ЛП22.091245.003.003-70	Фланець перехідний				
			4	ЛП22.091245.003.004-70	Фланець кожуха				
			5	ЛП22.091245.003.005-70	Фланець редуктора				
					<u>Стандартні вироби</u>				
			6		Болт М16х2х110				
			7		Гайка М16х2				
Підп. і дата			8		Підшипник радіальний 6218-2Z				
			9		Підшипник упорний роликовий 22218				
Взам. інв. №									
Підп. і дата									
Інв. № подл.	Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ЛП22.091245.003-70 СП			
	Розроб.	Лабуренко				Підшипниковий вузол	Літ. 01		
	Перевір.	Олексишен						Аркуш 1	
									Аркушів 1
Н. контр.					КПІ ім. Ігоря Сікорського				
Затвер.	Сокольський								

[illegible]

КОД ПРОГРАМИ НА C++

```
#include <iostream>
#include <iomanip>

using namespace std;

int main() {
    double sigma_b = 980e6;      // Па
    double psi_sigma = 0.45;
    double k_sigma = 2.0;
    double beta = 1.0;
    double epsilon = 0.55;

    double Mmax = 272.19;        // Н·м
    double Wx = 9.13e-6;         // м^3

    double sigma_minus1 = 0.4 * sigma_b;

    double sigma_max = Mmax / Wx;

    double sigma_a = sigma_max;

    double sigma_c = 0.0;

    double k_sigma_d = k_sigma / (beta * epsilon);

    double n_sigma =
        sigma_minus1 /
        (k_sigma_d * sigma_a + psi_sigma * sigma_c);

    cout << fixed << setprecision(2);

    cout << "Results:\n";
    cout << "sigma_-1 = " << sigma_minus1 << " Па\n";
    cout << "sigma_max = " << sigma_max << " Па\n";
    cout << "(k_sigma)_d = " << k_sigma_d << "\n";
    cout << "n_sigma = " << n_sigma << "\n\n";

    if (n_sigma >= 2.0)
        cout << "FOS is satisfied: "
            << n_sigma << " >= 2\n";
    else
        cout << "FOS is not satisfied: "
            << n_sigma << " < 2\n";

    return 0;
}
```

Модифікована конструкція екструдерного шнека для підвищення ефективності процесу екструзії

Лабуренко Д.О., студ., Олексішен В.О., асист. PhD.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Розглянуто особливості конструкції модифікованого екструдерного шнека, запропонованого у патенті. Досліджено вплив внутрішніх каналів шнека на процес транспортування та перемішування полімерного матеріалу.

Ключові слова: черв'ячний екструдер, черв'як, полімерні матеріали, модернізація, енергоефективність, зворотній потік.

Вступ. Сучасні підходи до переробки полімерних матеріалів вимагають безперервного вдосконалення обладнання з метою забезпечення високої якості готової продукції та мінімізації енергетичних витрат. У контексті екструзійних систем, шнек виступає як ключовий компонент, що здійснює функції транспортування, термічної обробки та гомогенізації сировини [1].

У патенті US11813785 [2] представлено модифіковану конструкцію шнека екструдера, розроблену з метою оптимізації процесів переміщення та переробки матеріалу в робочій камері.

Ключові завдання цієї модифікації полягають у підвищенні загальної ефективності екструзії, оптимізації гомогенізації матеріалу та досягненні рівномірного розподілу температури під час плавлення сировини. Додатковою метою є скорочення питомого енергоспоживання та підтримання стабільнішого температурного профілю в процесі функціонування екструдера. Принципова відмінність від традиційних моделей, де матеріал рухається виключно вздовж гвинтових каналів шнека, полягає у створенні додаткового внутрішнього контуру для циркуляції полімеру в запропонованій конструкції.

Як показано на рис. 1, запропонована конструкція включає транспортну секцію, бар'єрну ділянку та внутрішній канал. Через спеціально передбачений вхідний отвір певна частка сировини направляється у внутрішній канал шнека, переміщуючись у зворотному напрямку відносно основного потоку матеріалу. Такий підхід сприяє утворенню додаткового внутрішнього тиску та підсилення гомогенізації матеріалу. По завершенні проходження цього каналу полімер знову інтегрується в основний потік через відповідний вихідний отвір. На рисунку 2 зображено напрямок потоку при такій модифікації.

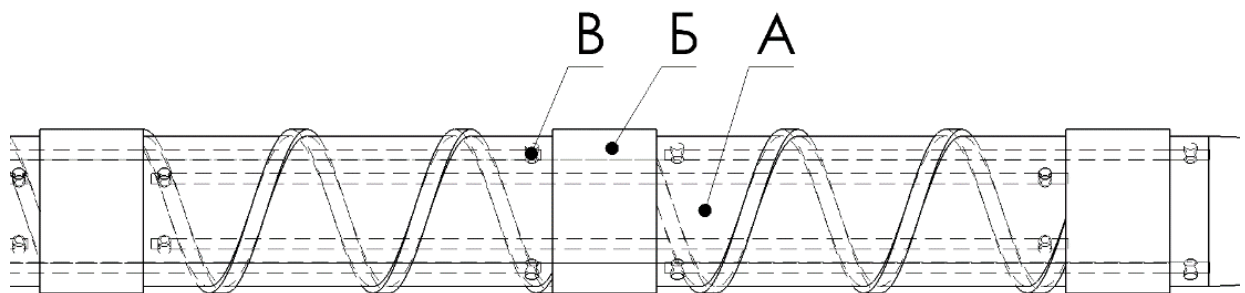


Рисунок 1 - Опис частин конструкції: А – транспортна частина; Б – бар'єрна зона; В – внутрішні

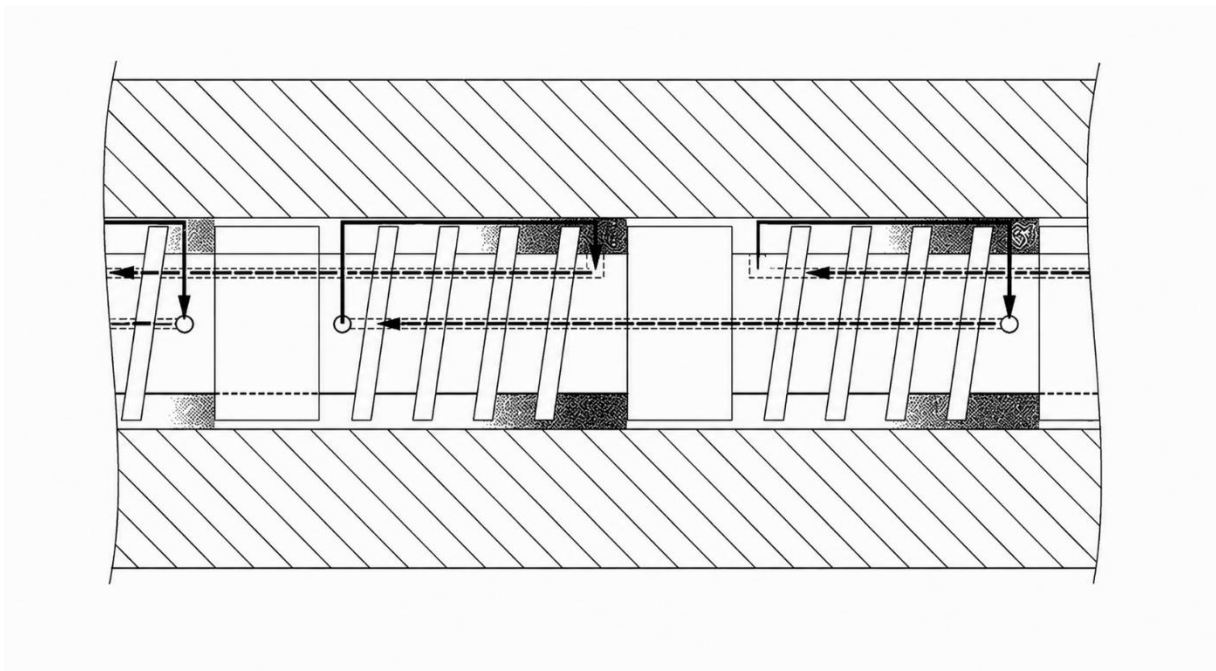


Рисунок 2 – Схематичне зображення потоку в модифікації

Ця модифікована конструкція потенційно демонструє особливу ефективність при переробці рецикльованої сировини та багатокомпонентних полімерних композицій, де традиційні конструкції шнеків не завжди забезпечують необхідний ступінь гомогенізації. Таким чином, запропонована модель характеризується підвищеною ефективністю функціонування, забезпечує стабільніший процес екструзії та сприяє покращенню якісних характеристик кінцевої продукції.

Крім того, слід підкреслити, що впровадження подібної конструкції шнека має потенціал позитивно впливати не лише на якість кінцевої продукції, але й на загальну операційну надійність обладнання. Оскільки досягається більш рівномірний розподіл температури та мінімізуються локальні перевантаження, це призводить до зниження інтенсивності зношування компонентів екструдера, тим самим збільшуючи термін його експлуатації. Поряд із цим, покращена гомогенізація сприяє формуванню матеріалу з більш стабільними фізико-механічними властивостями, що має критичне значення для виготовлення продукції із чітко визначеними експлуатаційними характеристиками.

Висновки. Порівняльний аналіз зі стандартними моделями вказує на підвищену ефективність функціонування та покращені якісні показники кінцевої продукції цієї системи, що підкреслює її актуальність для сучасної полімерної промисловості. Отже, запропонована у патенті конструкція екструдерного шнека є перспективним напрямом у розвитку екструзійного обладнання.

Перелік посилань

1. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів: навч. посіб. / І. О. Мікульонюк, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 200 с.

[URL:https://files.core.ac.uk/download/pdf/323528341.pdf](https://files.core.ac.uk/download/pdf/323528341.pdf)

2. US11813785 Extruder screw having paths within the screw, extruder, and extrusion method : US Patent 11,813,785 B2 / Akiyoshi Kobayashi, Shigeyuki Fujii, Takafumi Sameshima ; Shibaura Machine Co., Ltd. Published Nov. 14, 2023.