

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ Олександр Сокольський

«_____» _____ 2026р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньою програмою «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів»

на тему: Одночерв'ячний екструдер для виробництва рукавної плівки с модернізацією черв'яка

Студент групи IV к. ЛПІ-22
(шифр групи)

Підмурняк Дмито Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник проекту: Доктор технічних наук, доцент Сокольський О.Л.

(вчена ступінь, звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультанти з питань

МОДЕРНІЗАЦІЇ

д.т.н., проф. Щербина В.Ю.

ТЕХ. МАШ.

ст. викл. Борщик С.О.

ОХОРОНА ПРАЦІ

ст. викл. Ковтун А.І.

РЕЦЕНЗЕНТ _____

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

Студент _____

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 проект студенту

Підмурняку Дмитру Олександровичу

1. Тема проекту «Одночерв'ячний екструдер для виробництва рукавної плівки с модернізацією черв'яка», керівник проекту Сокольський О.Л., Доцент, доктор технічних наук, затверджено наказом по університету від 19. 05 2026р. № 1817-С

2. Термін подання студентом проекту 15.06.2026р.

3. Вихідні дані до проекту

Черв'яний екструдер , діаметр черв'яка $D=63$ мм, відношення довжини робочої частини до його діаметра $L/D=22$, загальна довжина черв'яка 1600 мм,

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ. 1. Призначення і галузь застосування екструдера. 2. Опис базової конструкції, її основних частин та принципу дії. 3. Літературний та патентний огляд стану питання, обґрунтування запропонованої модернізації черв'яка. 4. Розрахунки, 5. Розрахунки модернізації у програмі ANSYS. 6. Охорона праці. 7. Технологія машинобудування. Висновки. Література. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Лінія для виробництва рукавної плівки (A1);
2. Одночерв'ячний екструдер для виробництва рукавної плівки з модернізацією черв'яка (A1);
3. Черв'як модернізований (A1);
4. Деталювання (A1);
5. 3D моделювання черв'яка (A1);
6. Числове моделювання черв'яка (A1).

6. Консультанти розділів проекту

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

7. Дата видачі завдання 17.05.2026.....

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вступ. Призначення та галузь застосування каландру.	17.05.2026-21.05.26	
2	Технічні характеристики та опис базової конструкції.	22.05.2026-24.05.26	
3	Креслення загального виду машини та лінії її використання	24.05.2026-28.05.26	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	28.05.2026-29.05.26	
5	Узгодження деталі по розділу «Технологія машинобудування»	29.05.2026-02.06.26	
6	Розробка МК, КЕ та ОК по розділу «Технологія машинобудування»	03.06.2026-05.06.26	
7	Розрахунки параметричні, теплові та на міцність	06.06.2026-10.06.26	
8	Висновки. Література. Оформлення додатків	10.06.2026-12.06.26	
9	Здача дипломного проекту на перевірку	15.06.2026-20.06.26	

Студент

Керівник проекту

Д.О. Підмурняк

О.Л. Сокольський

РЕФЕРАТ

Дипломний проект бакалавра на тему: «Одночерв'ячний екструдер для виробництва рукавної плівки з модернізацією черв'яка». Виконавець – студ. групи ЛП-11 Підмурняк Д.О., керівник Доцент, кандидат технічних наук Сокольський О.Л.

В проекті розглянуто черв'ячний екструдер та технологічна лінія виробництва плівки, в якій він застосовується. Проведено літературний і патентний пошук, що дозволив визначити напрямок модернізації та здійснити конструкторську розробку модернізованого черв'яка екструдера. Ця модернізація буде забезпечувати згладжувальні пульсації потоку розплаву на виході з екструдера та більш стабільну роботу екструзійної системи, підвищуючи її ефективність. Виконано параметричні розрахунки базової конструкції одночерв'ячного екструдера, розрахунки на міцність деталей екструдера, а також тепловий розрахунок машини.

Проведено еквівалентні, міцнісні та деформаційні розрахунки модернізованої конструкції черв'яка екструдера в системі моделювання ANSYS. З отриманих результатів видно, що черв'як екструдера після модернізації покращує свої показники відносно старого й підтверджує свою працездатність.

Розроблено заходи з охорони праці для забезпечення безпечних умов роботи на черв'ячному екструдері. Також виконано розділ з технології машинобудування, в якому розроблено технологію виготовлення деталі, вибір та розрахунок пристосування для обробки деталі.

Було зроблено одну доповідь на всеукраїнській конференції і надруковані тези.

Ключові слова: ЧЕРВ'ЯК, ЕКСТРУДЕР, РОЗРАХУНКИ, АГРЕГАТ, ПЛІВКА, МОДЕРНІЗАЦІЯ.

ABSTRACT

Bachelor's Thesis Project on the topic: "Unit for Film Production with Screw Modernization." Author: Student of Group LP-11 Pidmurnyak D.O., head Associate Professor, Candidate of Technical Sciences Sokolsky O.L.

The project examines the single-screw extruder and the technological line for film production where it is applied. A literature and patent search was conducted, allowing the identification of the modernization direction and the development of the new extruder screw design. Parametric calculations of the basic single-screw extruder design, strength calculations of the extruder parts, and thermal calculations of the machine were performed. Equivalent, strength, and deformation calculations of the modernized extruder screw design were conducted using the ANSYS modeling system. The results show that the extruder screw, after modernization, improves its performance compared to the old design and confirms its operational capability.

Measures for occupational safety have been developed to ensure safe working conditions on the single-screw extruder. Additionally, a section on manufacturing technology was completed, in which the technology for manufacturing the part, as well as the selection and calculation of the fixture for part processing, were developed.

One presentation was made at a national conference, and theses were published.

Keywords: SCREW, EXTRUDER, CALCULATIONS, UNIT, FILM, MODERNIZATION.

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ

D – діаметр черв'яка, м.;

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

σ_B – межа короткочасної міцності, МПа;

n – запас міцності ;

σ_t – межа пропорційності;

δ – товщина каналу для коефіцієнту геометричної форми , мм ;

γ – швидкість зсуву , с⁻¹ ;

P - тиск , Па ;

μ – в'язкість , Па*с ;

I – полярний момент інерції , м⁴ ;

F – площа контакту, м²;

i – радіус інерції , м ;

W – осьовий момент опору , м³ ;

P_{oc} – Осьова сила , Кн ;

– напруга , МПа ;

Q – масова продуктивність екструдера, кг/год.;

ω – коефіцієнт геометричної форми, мм³;

τ – дотичні напруження , Н/м² .

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ВИРОБНИЦТВА ПЛІВКИ	5
2 ПРИЗНАЧЕННЯ, ОПИС КОНСТРУКЦІЇ І ПРИНЦИП ДІЇ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЕКСТРУДЕРА.....	8
3 ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД З ВИБОРУ ВАРІАНТА МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕКСТРУДЕРА.....	11
3.1 Літературно-патентний огляд варіантів модернізації черв'яка екструдера.....	11
3.2 Обґрунтування запропонованої модернізації	16
4 РОЗРАХУНКИ.....	18
4.1 Параметричні розрахунки.....	18
4.1.1 Розрахунок геометрії черв'яка і частоти його обертання	22
4.1.2 Розрахунок коефіцієнта геометричної форми екструзійної ГОЛОВКИ.....	26
4.1.3 Розрахунок продуктивності черв'ячної машини	26
4.1.4 Розрахунок перепаду тиску в екструзійній головці	28
4.1.5 Потужність привода екструдера	30
4.2 Розрахунок черв'яка на міцність.....	33
4.2.1 Розрахунок на міцність	35
4.2.2 Розрахунок на стійкість.....	37

					ЛП22.17.7246.002-70				
Зм..	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата	Одночерв'ячний екструдер для виробництва рукавної плівки с модернізацією черв'яка	Літ..	Аркуш	Аркушів	
Розроб..		Підмурняк Д.О.							
Перев.		Сокольський О.Л.							
						ФАПШЕ, КПШ «ім. І. Сікорського»			
Н. Контр.									
Затверд..		Сокольський О.Л.							

4.2.3 Розрахунок на жорсткість	40
4.2.4 Розрахунок шліцевого з'єднання	43
4.3 Тепловий розрахунок екструдера.....	46
5 РОЗРАХУНОК МОДЕРНІЗАЦІЇ.....	51
5.1 3D-модельовання модернізованого черв'яка та його подальший розрахунок в системі ANSYS	51
6 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	54
6.1 Електробезпека	55
6.2 Повітря робочої зони.....	56
6.3 Виробничий шум	57
6.4 Пожежна небезпека	58
7 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ	59
7.1 Технологія виготовлення деталі.....	59
7.2 Опис пристосування	61
7.3 Опис конструкції й дія роботи присрою	63
7.4 Маршрут технологічного процесу обробки деталі	65
7.5 Розрахунки	67
7.6 Висновки до розділу.....	69
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	68.
ЛІТЕРАТУРА.....	69
ДОДАТКИ	72

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасних реаліях стрімкого науково-технічного прогресу сектор хімічного та полімерного машинобудування перебуває в стані безперервної еволюції. Головними векторами цього розвитку є розробка високоефективного обладнання, оптимізація існуючих технологічних процесів та впровадження інноваційних методів переробки сировини. Особливе місце у зазначеній галузі посідають черв'ячні екструзійні машини. Вони є базовим та незамінним інструментом для випуску широкого спектра конкурентоспроможних виробів із пластмас, що володіють наперед заданими експлуатаційними та фізико-механічними характеристиками.

Діапазон практичного використання екструдерів у сфері переробки термопластів є надзвичайно масивним. Вони інтегруються у виробничі цикли виготовлення пакувальних матеріалів, різноманітних плівок, захисних покриттів, а також складних погонажних профілів для будівельної індустрії та деталей автомобільного сектору. Така затребуваність шнекових пресів зумовлена їхньою унікальною здатністю підтримувати високу стабільність якісних показників готової продукції при одночасному забезпеченні інтенсивного випуску.

Сучасні екструзійні установки мають високий рівень універсальності, що дозволяє їм ефективно переробляти велику номенклатуру полімерних сполук. До найзатребуваніших типів термопластичної сировини, з якими працює дане обладнання, належать:

- полівінілхлорид (ПВХ);
- поліпропілен (ПП);
- поліетилен низького тиску (ПЕНГ / HDPE);
- поліетилен високого тиску (ПЕВГ / LDPE).

Усі ці матеріали в процесі екструзії трансформуються у вироби, які задовольняють жорсткі вимоги ринку та чинні нормативні стандарти.

Серед згаданих пластмас особливу увагу привертає поліетилен низького тиску (високої густини). Популярність цього матеріалу обумовлена його вигідною собівартістю та прекрасним комплексом технічних властивостей. ПЕНГ відрізняється чудовою гідроізоляційною здатністю, хімічною інертністю до впливу агресивних середовищ (зокрема, лугів та кислот), а також здатністю зберігати міцність за умов

низьких температур. Завдяки вираженій термопластичності, при нагріванні цей матеріал легко переходить у стан розплаву, що суттєво спрощує його подальше якісне формування.

Масштабне впровадження шнекових машин у полімерну індустрію пояснюється їхньою спроможністю функціонувати у безперервному режимі. Таке обладнання бездоганно поєднується з автоматизованими промисловими лініями, що гарантує високий ступінь механізації та автоматизації всього виробництва. Як наслідок, мінімізуються витрати ручної праці, оптимізуються витрати енергоресурсів, а загальна продуктивність технологічного комплексу виходить на максимальні показники.

1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ВИРОБНИЦТВА ПЛІВКИ

На рисунку 1.1 схематично зображено структуру та взаємозв'язок компонентів промислового комплексу, що використовується для випуску полімерної рукавної плівки на основі поліетилену високої щільності (HDPE). Вибір цієї сировини обумовлений її високими експлуатаційними характеристиками, серед яких ключовими є еластичність, діелектричні властивості, стійкість до дії хімічно агресивних речовин і вологи, висока міцність на розрив, а також повна придатність до подальшої рециклізації.

До базового комплекту обладнання досліджуваної ділянки належать такі вузли:

- Дозуючий бункер (1);
- Екструдер черв'ячного типу (2);
- Інструмент формоутворення / головка (3);
- Система охолодження (4);
- Механізм витягування (5);
- Пристрій для намотування готового матеріалу (6);
- Фільтраційний блок (7).

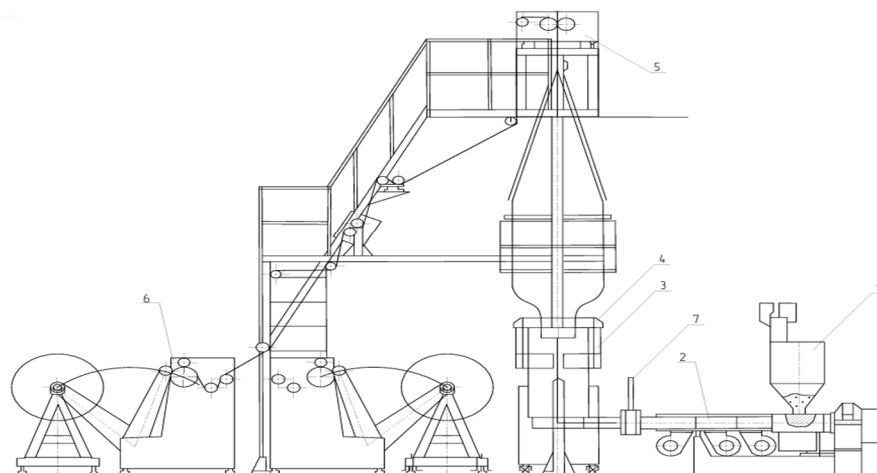


Рисунок 1.1 – Технологічна лінія для рукавної плівки:

1-бункер-дозатор; 2 – черв'ячний екструдер; 3 – головка; 4 – охолоджуючий пристрій; 5 – тянучий пристрій; 6 – намотувальний пристрій; 7 – фільтр

Принцип дії лінії

Виробничий цикл бере початок із транспортування вихідного грануляту поліетилену до завантажувальної зони бункера-дозатора (1). Як правило, для переміщення сировини зі складських приміщень чи накопичувальних силосів застосовують системи автоматизованого пневмотранспорту. За умови необхідності випуску забарвленої продукції, у бункер додатково вводиться гранульований суперконцентрат пігменту (СКП). Інтегрована система дозування забезпечує суворе дотримання пропорцій між основним полімером та барвником згідно із затвердженою рецептурою.

З підготовчої ємності суміш спрямовується до матеріального циліндра черв'ячного екструдера (2), де відбувається її безпосередня пластикація та переведення у стан розплаву. Обертальний рух шнека змушує тверді гранули рухатися вздовж каналів циліндра, де вони піддаються інтенсивному тепловому впливу. Стабільна температура плавлення (яка для даного матеріалу лежить у межах **160–200°C**) підтримується завдяки роботі зонних електричних нагрівачів. Паралельно із транспортуванням здійснюється механічний зсув, ретельне перемішування та термічна гомогенізація розплаву по всьому об'єму.

Перед безпосереднім формуванням профілю рідка полімерна маса продавлюється крізь фільтраційний блок (7), виконаний у вигляді шибєрного пристрою зі змінними металевими сітками. Цей етап дозволяє затримати сторонні вclusions та нерозплавлені конгломерати, що є критично важливим для забезпечення безперервності процесу та виключення появи дефектів на полотні.

Очищений гомогенний розплав надходить до формувальної головки (3), оснащеної кільцевим зазором (щілиною). Проходячи крізь неї, матеріал набуває вигляду тонкостінного трубчастого рукава. Одночасно з цим через внутрішній канал дорна подається стиснене повітря, яке роздуває заготовку до заданих геометричних розмірів. Керуючи об'ємом повітря, що подається, швидкістю витяжки та температурним режимом, інженер отримує можливість точно регулювати товщину стінки та фінальну ширину рукава.

Охолодження, витягування та намотування

Сформована трубчаста заготовка безперервно піднімається вгору та піддається інтенсивному обдуву повітряним потоком із блоку охолодження (4). Це необхідно для швидкого зниження температури полімеру до значень, при яких матеріал фіксує свою структуру, набуває механічної стабільності та може деформуватися без ризику руйнування чи злипання.

Наступною стадією є складання та стабілізація рукава за допомогою гумованих притискних валків приймально-витяжного механізму (5). У цьому вузлі об'ємний рукав трансформується у пласке двошарове полотно. Синхронізація лінійної швидкості обертання валків із продуктивністю шнекової пари дозволяє підтримувати постійну товщину плівки.

На завершальному етапі сформована стрічка спрямовується до намотувального пристрою (6), де здійснюється її акуратне укладання в рулони заданого діаметра. Сучасна конфігурація цього вузла передбачає наявність автоматики для контролю щільності намотування, натягу полотна, вимірювання метражу та швидкої зміни шпуль без зупинки лінії.

Переваги технологічної лінії

Організація даного виробництва має низку технологічних переваг:

1. Безперервний цикл: Усі стадії — від завантаження до приймання рулону — об'єднані в єдиний потоковий процес.
2. Варіативність налаштувань: Можливість швидкої перебудови параметрів під різні типорозміри та товщини плівок.
3. Високі техніко-економічні показники: Продуктивність лінії, залежно від геометрії робочих органів, становить від 30 до 150 кг/год.
4. Стабільна якість: Завдяки багатоступеневій фільтрації та точному контролю температурного поля мінімізується вихід бракованої продукції.

Стабільність роботи лінії підтримується за допомогою автоматизованої системи керування на базі програмованих логічних контролерів (PLC). Вони здійснюють безперервний моніторинг теплового стану матеріального циліндра, тиску в головці, швидкості витягування рукава, параметрів намотування та інтенсивності подачі повітря для роздуву. Оператор здійснює наладку через

сенсорну графічну панель інтерфейсу. Система також оснащена алгоритмами протиаварійного захисту, що автоматично вимикають приводи у разі виходу параметрів за критичні межі.

Автоматизація та керування технологічним процесом

Важливим компонентом сучасної екструзійної лінії є система керування, яка дозволяє забезпечити стабільність технологічних параметрів і безперервність процесу виробництва. Більшість таких ліній обладнані контролерами PLC (*Programmable Logic Controller*), що здійснюють моніторинг та регулювання:

- температурних зон екструдера;
- тиску полімерного розплаву;
- швидкості витягування рукава;
- швидкості обертання намотувального пристрою;
- подачі повітря для роздування плівки.

Для зручності обслуговування, оператор має доступ до панелі керування з сенсорним інтерфейсом, на якій виводяться всі ключові показники у реальному часі. Це значно знижує вплив людського фактору та мінімізує ймовірність помилок при налаштуванні процесу.

Крім того, система автоматичного контролю дозволяє встановлювати алгоритми аварійного зупинення у разі відхилення від критичних параметрів, що підвищує безпеку експлуатації обладнання та захищає продукцію від браку.

Вимоги до якості та технічні допуски

Готова рукавна плівка повинна відповідати стандартам якості, які регламентують:

- товщину плівки (допуски $\pm 5\text{--}10\%$);
- однорідність структури без включень та пухирців;
- відсутність механічних пошкоджень, складок, нерівностей по краях;
- стійкість до розриву, розтягування і стиску, відповідно до нормативної документації (наприклад, ДСТУ або ISO).

Контроль якості здійснюється як візуально, так і шляхом лабораторних випробувань на зразках — на розрив, міцність при зварюванні, термічну стійкість

тощо. У разі виявлення відхилень, лінія може бути оперативно зупинена для коригування параметрів.

Екологічні аспекти

Однією з переваг сучасної екструзійної технології є її відносна екологічна безпечність. Поліетилен високої густини (HDPE), який використовується як основна сировина:

- не виділяє токсичних речовин у звичайних умовах експлуатації;
- може бути повністю перероблений;
- має тривалий термін експлуатації без втрати властивостей;
- придатний для виготовлення екологічно безпечного пакування, яке відповідає санітарним нормам.

Устаткування екструзійної лінії також відповідає сучасним вимогам щодо енергоефективності, адже електронагрівачі оснащені терморегуляторами, які мінімізують споживання енергії, а двигуни витягувальних і намотувальних вузлів мають змінні приводи з частотним регулюванням.

Можливості модернізації

Технологічна лінія є модульною і може бути модифікована під конкретні виробничі задачі. До основних напрямів модернізації належать:

- встановлення додаткових головок для багатошарової плівки (*co-extrusion*);
- інтеграція з системами лазерного перфоратора;
- автоматичне обрізання країв плівки;
- вбудовані системи онлайн-контролю товщини;
- модулі для флексодруку безпосередньо на плівці.

2 ПРИЗНАЧЕННЯ, ОПИС КОНСТРУКЦІЇ І ПРИНЦИП ДІЇ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЕКСТРУДЕРА

Метод екструзії є одним із ключових способів безперервного формування виробів із термопластичних мас, який базується на примусовому продавлюванні розплавленого полімеру крізь формуючий робочий інструмент — матрицю (головку). Геометрія вихідного каналу цього інструменту безпосередньо задає поперечний профіль готового виробу. Ця технологія дозволяє випускати як прості пакувальні плівки, так і складні погонажні конструкції з високим рівнем повторюваності геометричних параметрів.

Головним апаратом для реалізації даного процесу є шнековий (черв'ячний) прес, або екструдер. Він виконує роль багатофункціонального агрегату, який здійснює транспортування вихідної сировини, її плавлення, гомогенізацію за об'ємом і подачу розплаву під стабільним тиском до формуючої зони. Конструктивно апарат поєднує в собі функції пластикатора та високотискового нагнітального насоса.

За архітектурою головного робочого органу (черв'яка) екструзійні машини поділяють на:

- одно- та двошнекові (багатошнекові) системи;
- поршневі (безшнекові) апарати дискретної або безперервної дії;
- комбіновані або диско-гвинтові установки.

У межах даної роботи досліджується одночерв'ячний екструдер (схему кінематики наведено на рис. 2.1, загальний вигляд — на рис. 2.2). Базова конструкція включає матеріальний циліндр, оснащений блоками зовнішніх нагрівачів, шнек, що обертається всередині циліндра, та закріплену на вихідному фланці матрицю. У даній модифікації використано шнек без внутрішньої циркуляції холодоагенту, що суттєво спрощує його виготовлення, але вимагає прецизійного зовнішнього контролю температурних полів.

Робоча довжина черв'яка умовно розділена на три функціональні ділянки:

1. Зона живлення (завантаження): здійснює прийом гранул із воронки та їх транспортування вперед.

2. Зона стиснення (плавлення): забезпечує ущільнення матеріалу, його перехід у рідку фазу під дією тепла й зсувних деформацій.

3. Зона витискання (дозування): стабілізує тиск і витрату гомогенізованого розплаву перед формуванням.

Ефективність переміщення матеріалу та якість його змішування безпосередньо залежать від профілю гвинтового каналу, кроку нарізки, глибини витків та кута підйому спіралі. Черв'яки розраховуються під фізико-хімічні властивості конкретного полімеру, тому шнек для ПВХ не забезпечить оптимальних режимів при переробці поліпропілену чи поліетилену. Для досліджуваної конструкції кут нахилу гвинтової лінії прийнято рівним $17,7^\circ$, а крок спіралі відповідає зовнішньому діаметру шнека, що гарантує раціональний баланс між продуктивністю та тиском нагнітання.

Кінематична схема черв'ячної машини наведена на рисунку 2.1 і демонструє взаємозв'язок між приводним двигуном, редуктором, черв'яком і формуючою головкою. Така конфігурація дозволяє досягти високої стабільності процесу при тривалій експлуатації без зупинок.

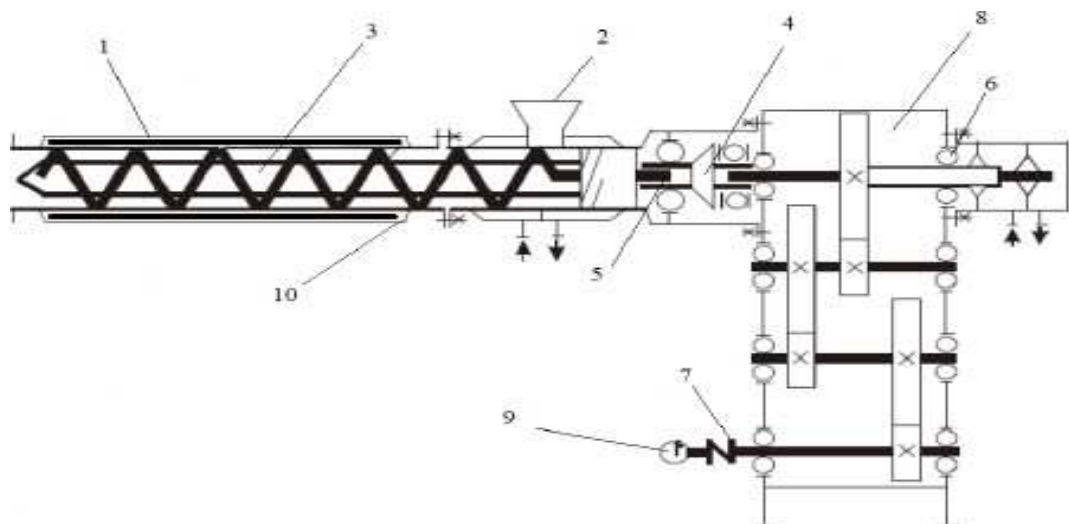


Рисунок 2.1 – Кінематична схема екструдера

1 – циліндр; 2 – корпус завантажувальної лійки; 3 – черв'як; 4 – вузол упорного підшипника; 5 – шліцьове з'єднання; 6 – радіальний підшипник; 7 – пружна муфта; 8 – редуктор; 9 – електродвигун; 10 – кожух

В вищенаведеній кінематичній схемі наявний вузол упорного підшипника, який є незамінною і дуже відповідальною складовою будь-якого екструдера. Він сприймає на себе досить значні осьові зусилля, якими навантажується черв'як під час роботи, і передає їх на циліндричний корпус екструдера. Корпус вузла упорного підшипника є з'єднуючою частиною між корпусами черв'ячного пресу і редуктора, забезпечуючи співвісність черв'яка та валу редуктора.

Загальний вигляд одночерв'ячного екструдера наведено на рис.2.2:

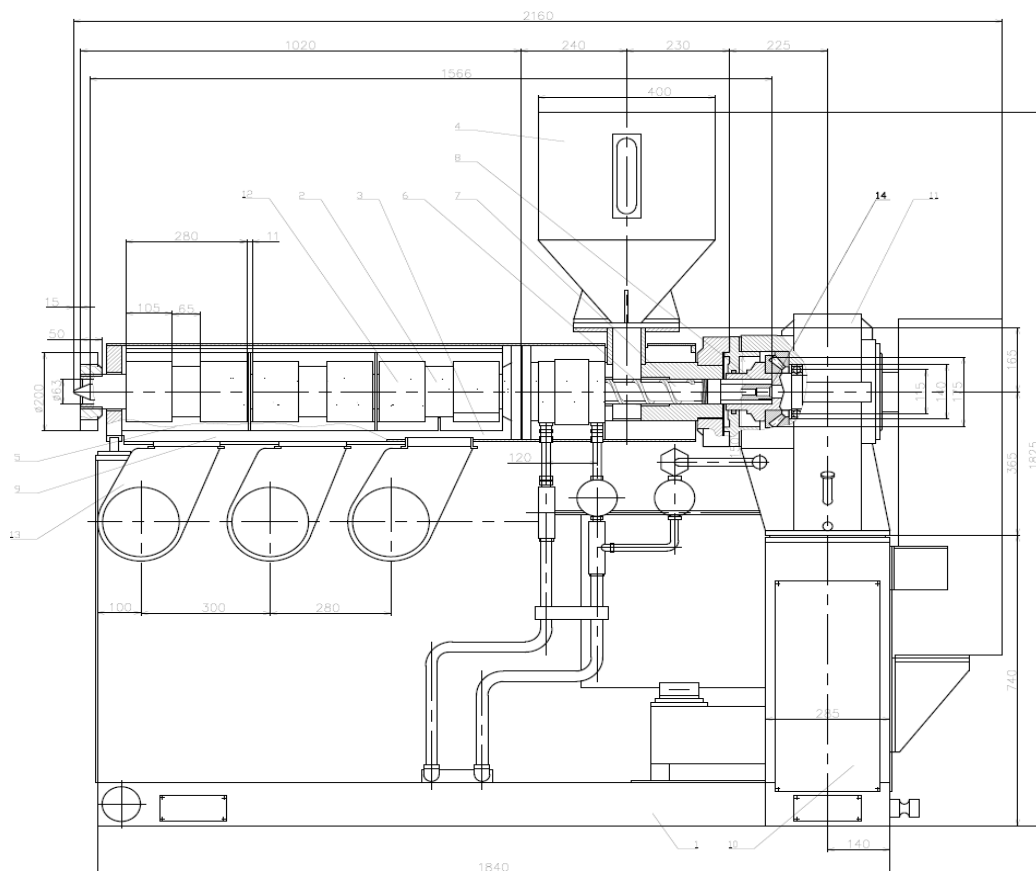


Рисунок 2.2 - Одночерв'ячний екструдер

1 – станина; 2 – циліндр; 3 - черв'як; 4 – корпус завантажувальної воронки; 5 – вузол упорного підшипника; 6 – нагрівник; 7 – вентилятор; 8 – кожух; 9 – фланець; 10 – редуктор; 11 – система охолодження черв'яка

Опис роботи машини: полімерний матеріал зі складу перекачується в бункер 4, після чого матеріал потрапляє у воронку 6, його захоплює обертовий черв'як 7 та переміщує до формуючої голівки. Для забезпечення необхідного теплового режиму та оптимальних умов транспортування, на матеріальному циліндрі встановлені нагрівачі 12 та вентилятори 13 для охолодження корпусу. Охолодження черв'яка

відбувається за допомогою отвору для охолодження 14. Корпус 5 знаходиться в кожучі корпусу 2 та тримається на плиті несучій 3 та плиті опорній 9 які тримаються на рамі 1. Керування екструдора відбувається за допомогою блока керування 10, та за допомогою редуктора 11 передається крутний момент за черв'як 7.

3 ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД З ВИБОРОМ ВАРІАНТА МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕКСТРУДЕРА

3.1 Літературно-патентний огляд варіантів модернізації черв'яка екструдера

Основною метою проведення літературно-патентного дослідження є аналіз можливих варіантів удосконалення конструкції черв'яка екструдера з подальшим обґрунтованим вибором найефективнішого з них. У межах цієї роботи було опрацьовано технічну документацію та патентні джерела, що стосуються модернізації черв'ячного робочого органу, після чого було відібрано п'ять перспективних технічних рішень. У подальшому ці патенти розглядаються більш детально з акцентом на особливості конструкцій і переваги їх реалізації в промислових умовах.

У першому проаналізованому джерелі [1] запропоновано змінену конфігурацію накінецьника черв'яка. У цій розробці наконечник містить штокову частину, на якій закріплено поршень, як показано на рисунку 2.1. Між поршнем і штоком знаходиться простір, заповнений в'язкою рідиною, що виконує роль амортизуючого середовища. У середині осьового каналу розміщується нерухома дросельна шайба, яка виконує функцію регулятора тиску та стабілізатора потоку.

У різних модифікаціях цієї конструкції може бути застосовано пружинний елемент. В одному варіанті пружина встановлюється між дном осьового отвору і поршнем, а в іншому — між наконечником і дросельною шайбою. Такі технічні рішення дають змогу зменшити гідродинамічні коливання в потоці полімерного розплаву, що позитивно впливає на рівномірність подачі матеріалу та стабільність параметрів процесу.

Порівняно з традиційними конструкціями, це вдосконалення дозволяє покращити якість змішування, знизити пульсації тиску та забезпечити більш рівномірну гомогенізацію полімерів різного типу, що особливо актуально при роботі з багатокомпонентними сумішами або матеріалами з високою в'язкістю.

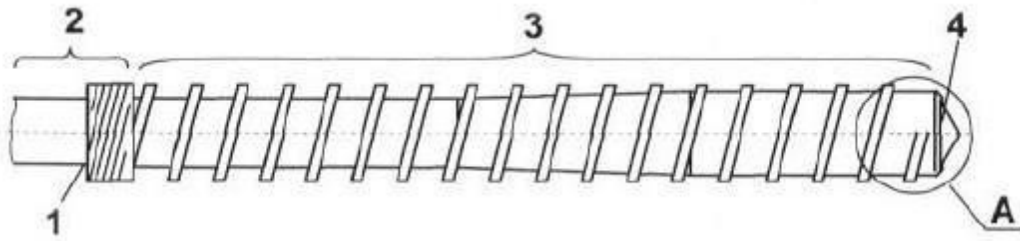


Рисунок 2.1 – Черв'як, у якого наконечник з боку хвостовика вала споряджено штоком з розташованим на його кінці поршнем

Завдяки такому технічному рішення, наконечник отримує можливість виконувати зворотно-поступальні рухи, які виникають у відповідь на коливання тиску полімерного розплаву в робочій зоні. Під час такого переміщення відбувається контрольоване перетікання в'язкої рідини через дросельну шайбу, що забезпечує ефект амортизації.

Подібна динаміка дозволяє реалізувати поведінку матеріалу відповідно до реологічних моделей в'язкопружного середовища, зокрема моделі Максвелла або моделі Кельвіна-Фойхта. Такий підхід ефективно компенсує як різкі імпульсні зміни тиску, так і повільні коливання, що можуть виникати при нестабільній подачі матеріалу або при зміні фізичних властивостей сировини. Внаслідок цього досягається плавність потоку полімерного розплаву, що, у свою чергу, позитивно впливає на стабільність геометрії екструдату та якість кінцевого виробу.

У другому дослідженому патенті [2] описується альтернативне рішення щодо вдосконалення конструкції черв'яка, яке спрямоване на покращення процесу змішування полімерної маси. Згідно з цією розробкою, у тілі черв'яка передбачено змішувальний елемент, виконаний у формі двох гвинтових гребенів з поперечними прорізами (див. рис. 2.2). Ці гребені мають відмінний крок гвинтової лінії, що створює періодичне чергування зон зближення та розходження вздовж осі черв'яка.

Така геометрія сприяє інтенсивному механічному впливу на розплав і дозволяє досягти високого ступеня гомогенізації, особливо в багатокомпонентних системах. У деяких модифікаціях конструкції зазначено, що змішувальний елемент може бути розміщений у просторах між витками основної гвинтової нарізки, що

створює додаткові зони турбулентного змішування та підвищує ефективність процесу без зменшення пропускної здатності.

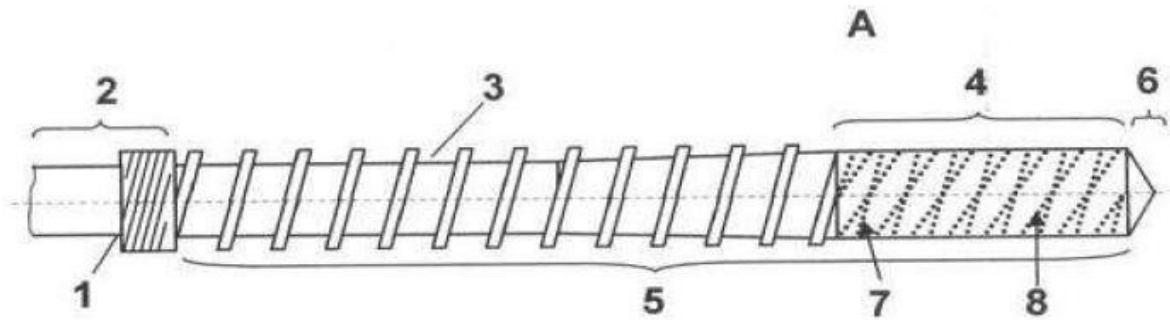


Рисунок 2.2 – Черв'як екструдера, у якому змішувальний елемент споряджений гребенями з поперечними прорізами

Така конфігурація забезпечує якісний перерозподіл та перемішування компонентів при проходженні через зазори між гребенями та також щоб поділ потоку розплаву на мікропотоки не зупинявся. У деяких варіантах конструкції змішувальний елемент може розміщуватися в проміжках між витками основної гвинтової нарізки черв'яка, що додатково сприяє ефективності змішування (Рис. 2.3).

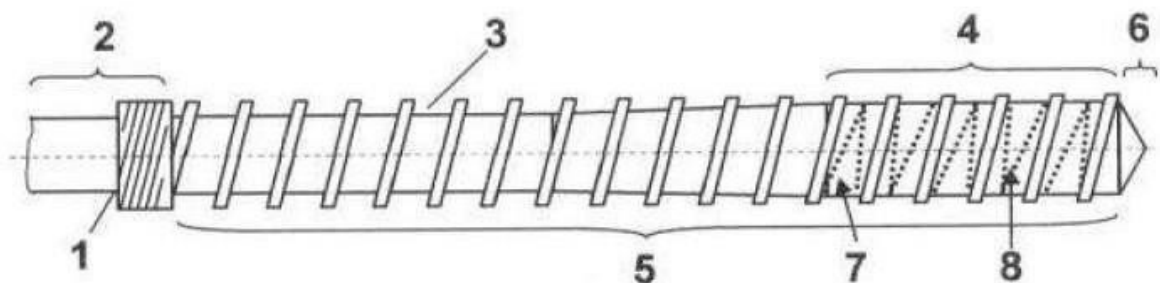


Рисунок 2.3 – Черв'як екструдера, де змішувальний елемент розташовано між гребенями гвинтової нарізки

Джерело [3] передбачає, що в порожнистому осерді черв'яка на ділянці біля наконечника виконуються повздовжні канавки або шліци (Рис. 2.4). В одному з варіантів конструкції, шліцьована ділянка осердя виконана як знімна циліндрична вставка з неглибокою гвинтовою нарізкою.

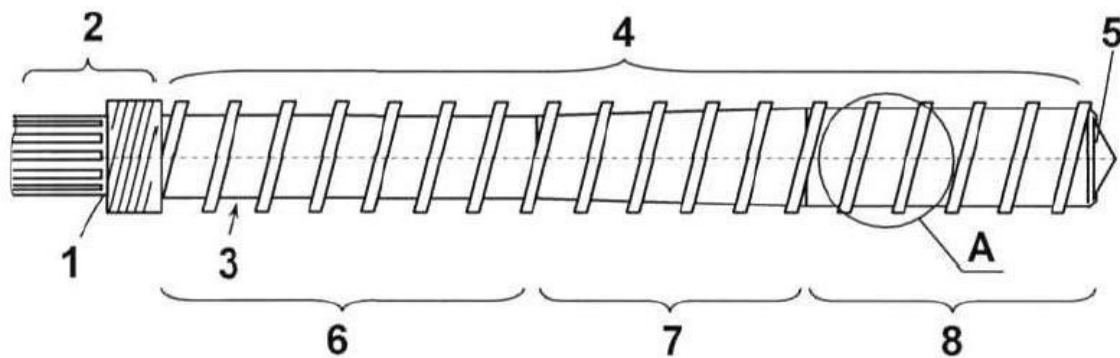


Рисунок 2.4 – Черв'як, у якому порожнину осердя з боку наконечника виконано з повздовжніми шліцами

Вони утворюють додаткову розвинену поверхню для більш ефективної тепловіддачі до охолоджувальної рідини. Така вдосконалена будова черв'яка дозволяє інтенсифікувати процес охолодження в зоні найбільшого тепловиділення біля наконечника. Це сприяє економії витрат охолоджувальної рідини при збереженні належного температурного режиму. Додатковими перевагами є підвищення міцності та технологічності виготовлення черв'яка, можливість ремонту шляхом заміни змінної шліцьованої секції.

Джерело [4] передбачає, що в порожнині черв'яка між зовнішньою охолоджувальною трубою та стінкою валу, встановлюються герметичні кільцеві вставки. Ці вставки заповнені пористим матеріалом, просоченим різними легколеткими рідинами, які відрізняються температурами кипіння (Рис. 2.5). У деяких варіантах конструкції передбачається теплоізоляція між сусідніми кільцевими вставками для кращого температурного розділення ділянок.

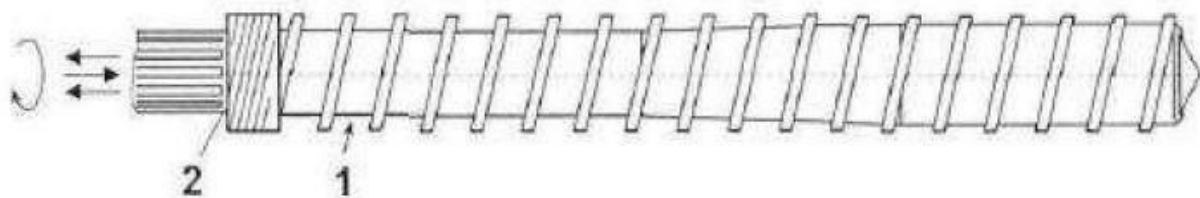


Рисунок 2.5 – Черв'як, у якому герметичні кільцеві втулки заповнені легкокипаруючою рідиною з різною температурою кипіння

Кількість і послідовність розташування кільцевих вставок з рідинами різних температур кипіння дозволяє створювати та регулювати потрібний розподіл температур по довжині робочої поверхні черв'яка екструдера.

Регульована зміна температури робочої поверхні забезпечується завдяки циклам випаровування і конденсації рідин у кільцевих вставках з подальшою тепловіддачею до охолоджувального контуру.

Така конструкція черв'яка дозволяє ефективно контролювати температурний режим на різних ділянках при екструзії різноманітних полімерних матеріалів, розширюючи його технологічні можливості.

Джерело [5] описує виконання зони стиснення черв'яка, яка розділена на кілька секцій вздовж її довжини (Рис. 2.6). Зона стиснення являє собою циліндричну ділянку черв'яка, що складається принаймні з двох сегментів, переважно з n сегментів. Співвідношення довжин окремих сегментів до загальної довжини зони стиснення знаходиться в діапазоні 0,1 - 0,5. При цьому висота бар'єрного зазору в першому сегменті перевищує висоту зазорів у наступних сегментах в 1,1 рази або більше між сусідніми витками черв'яка.

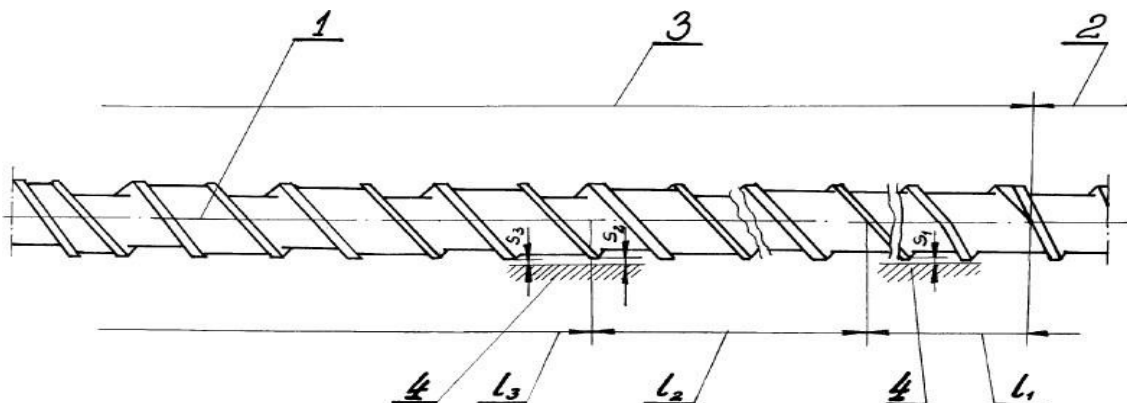


Рисунок 2.6 – Черв'як з зоною стиснення, поділеною на кілька секцій вздовж її довжини

Така конфігурація зони стиснення забезпечує поступове відокремлення розплаву полімеру від нерозплавлених часток матеріалу при його просуванні по секціях. Регульоване зменшення висоти бар'єрних зазорів від першого до останнього сегмента дозволяє контролювати розподіл теплових потоків і напружень зсуву в матеріалі, запобігаючи локальному перегріву та деградації полімеру. Завдяки цьому досягається підвищення формованості розплаву до 15% при збереженні низького ступеня деградації полімеру та якості кінцевого виробу.

Джерело [6] описує конструкцію черв'яка екструдера з бар'єрною секцією, в якій передбачено спеціальний бар'єрний виток, що поділяє канал на зону з

розплавом і зону з твердими частками. Особливістю цієї конструкції є поступове зменшення висоти зазору між бар'єрним витком і стінкою циліндра вздовж довжини зони плавлення.

Це дозволяє підтримувати постійне зсувне навантаження на полімер, що сприяє більш ефективному і рівномірному плавленню твердих частинок. Крім того, така конфігурація сприяє зменшенню пульсацій тиску в каналі екструдера та забезпечує стабільне відділення розплаву від ще не розплавленого матеріалу.

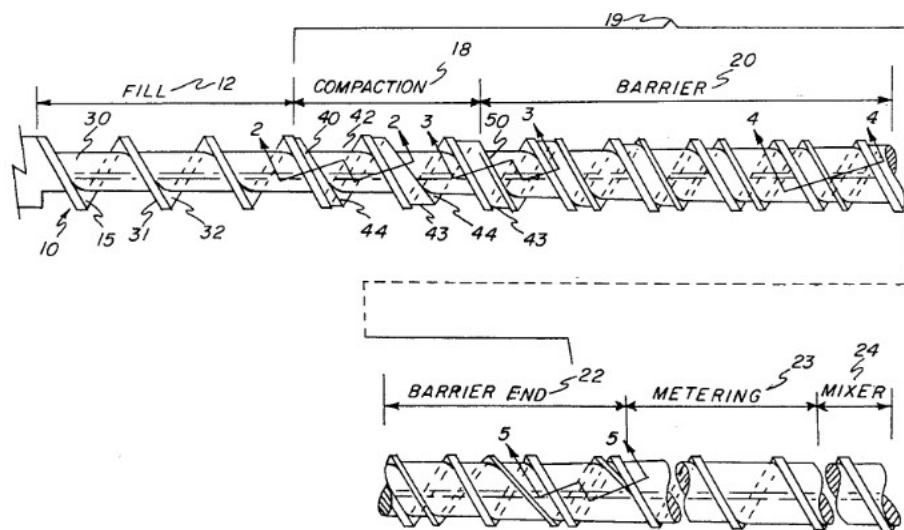


Рисунок 2.7 – Конструкція черв'яка екструдера з бар'єрною зоною

Завдяки цьому досягається покращення якості змішування компонентів, зниження теплового навантаження на полімер і, як наслідок, зменшення ступеня його деградації, що позитивно впливає на властивості кінцевого продукту

3.2 Обґрунтування вибору модернізації черв'яка екструдера

У процесі аналізу різних рішень щодо вдосконалення черв'ячних екструдерів було обрано технічне рішення, описане в патенті [6], яке передбачає інтеграцію кількох функціональних зон безпосередньо в конструкцію черв'яка. Йдеться про модифіковану модель, в якій реалізовано зону ущільнення, бар'єрний сегмент, дозувальну та змішувальну ділянки в одному безперервному робочому органі.

Головним аргументом на користь цього варіанту є його здатність забезпечувати стабільний процес розплавлення полімеру з одночасною високою

продуктивністю та мінімальним ризиком термодеструкції матеріалу, що є критично важливим при роботі з термочутливими полімерними системами.

Ключовою особливістю обраного рішення є бар'ерна зона, яка включає спеціальні бар'ерні витки, що дозволяють розділити потік полімерної маси на дві частини — твердофазну і розплавлену. Такий підхід сприяє поетапному та контрольованому плавленню гранул без утворення зон з надмірним тиском. У результаті зменшується навантаження на черв'як та знижується тиск у зоні ущільнення, що дозволяє уникнути локального перегріву та розкладу полімеру, характерних для традиційних однотипних черв'яків із сталою геометрією.

Особливу увагу також заслуговує технічне рішення із плавним зменшенням висоти зазору в бар'ерній зоні, що дає змогу точно керувати зсувними напруженнями та тепловими режимами вздовж каналу. Це забезпечує однорідність температурного поля та покращує гомогенізацію розплаву, що є вирішальним для отримання якісного кінцевого продукту.

Крім того, змішувальна зона, яка розташовується після етапу дозування, виконує додаткову функцію — інтенсивне перемішування розплаву без істотного зростання тиску. Це дозволяє зберігати стабільність потоку, не створюючи гідравлічного навантаження, що позитивно впливає на механічні властивості та структуру готового виробу.

Таким чином, конструкція черв'яка, описана у патенті [10], демонструє високу інженерну ефективність і відповідає актуальним вимогам до енергоощадного, надійного та якісного екструзійного обладнання. Основні переваги обраного рішення включають:

- зниження енергоспоживання установки;
- стабільну роботу за змінних технологічних умов;
- покращену гомогенність та якість розплаву;
- зменшення втрат сировини через перегрів або нестабільність процесу;
- приріст показника формованості на 15% без шкоди для якості.

Усі зазначені аспекти підтверджують доцільність впровадження даної модернізації як у технічному, так і в економічному контексті, особливо в умовах виробництва продукції з полімерів нового покоління.

4 РОЗРАХУНКИ

4.1 Параметричні розрахунки

4.1.1 Розрахунок геометрії черв'яка і частоти його обертання

Черв'як є центральним елементом конструкції екструдера, який виконує функції транспортування, нагрівання, перемішування та подачі полімерної сировини від завантажувального отвору до формуючої головки (рис. 4.1). Він забезпечує необхідну пластикацію гранул і створення тиску, достатнього для видавлювання полімерного розплаву.

Одним із ключових параметрів, що впливають на продуктивність установки, є зовнішній діаметр черв'яка D , який у даному випадку становить 63 мм. Виходячи з обраного співвідношення довжини до діаметра $L/D = 22$, розраховується довжина робочої частини:

$$L_{\text{роб}} = 22 \cdot D = 22 \cdot 63 = 1386 \text{ мм.}$$

Решта геометричних параметрів обираються з урахуванням властивостей полімеру, що переробляється — полівінілхлориду (ПВХ).

Геометрія гвинтової лінії та робочих зон

Крок гвинтової нарізки визначається як:

$$t = (0,8 \dots 1,2) \cdot D = 1 \cdot 65 = 65 \text{ мм}$$

Кут підйому спіралі:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{t}{\pi \cdot D}\right) = \arctg\left(\frac{65}{3,14 \cdot 65}\right) = 17,67^\circ.$$

Товщина гребеня черв'яка

$$e = (0,06 \dots 0,12) \cdot D = 0,11 \cdot 65 = 7 \text{ мм.}$$

при цьому менші значення приймаються для діаметрів черв'яка більше 126 мм, більші – для діаметрів менше 126 мм.

Зазор між черв'яком і гільзою:

$$\delta = (0,002 \dots 0,003) \cdot D = 0,0024 \cdot 63 = 0,15 \text{ мм},$$

при цьому менші значення приймаються для більших величин діаметрів черв'яків.

Глибина гвинтового каналу в зоні завантаження

$$h_1 = (0,12 \dots 0,16) \cdot D = 0,126 \cdot 63 = 8 \text{ мм}.$$

Глибина гвинтового каналу в зоні дозування складає

$$h_3 = 0,5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4 \cdot h_1}{i} \cdot (D - h_1)} \right] =$$
$$= 0,5 \left[63 - \sqrt{63^2 - \frac{4 \cdot 8}{3,7} \cdot (63 - 8)} \right] = 1,95 \text{ мм}$$

де $i = 3,7$ – ступінь стиску поліетилену низької густини (обрати за табл. 4.1).

Приймаємо $h_3 = 2 \text{ мм}$.

Діаметр вала черв'яка під завантажувальною воронкою

$$d_1 = D - 2h_1 = 63 - 2 \cdot 8 = 47 \text{ мм}$$

Діаметр вала черв'яка в зоні дозування

$$d_3 = D - 2h_3 = 63 - 2 \cdot 2 = 59 \text{ мм}$$

Довжина робочої частини черв'яка розраховується, виходячи із заданого співвідношення L/D

Довжина зони завантаження $L_{\text{зав}}$ становить $(4 \dots 6) \cdot D$ або $(0,26 \dots 0,35) \cdot L_{\text{роб}}$

$$L_{\text{зав}} = 0,26 \cdot 1386 = 346,5 \text{ мм}.$$

Приймаємо $L_{\text{зав}} = 345 \text{ мм}$.

Довжина зони стиснення $L_{\text{ст}}$ для більшості полімерів становить

$$\frac{(7 \dots 13) \cdot D \text{ або } (0,2 \dots 0,35) \cdot L_{\text{роб}}}{L_{\text{ст}}} = 0,2 \cdot 1386 = 277,2 \text{ мм}.$$

Приймаємо $L_{\text{ст}} = 280 \text{ мм}$.

Довжина зони дозування $L_{\text{доз}}$ значною мірою визначає якість підготування розплаву і відношення L/D зростає переважно за її рахунок та за рахунок довжини додаткових зон і елементів. Зазвичай цю величину обирають у межах $(0,4 \dots 0,6) \cdot L_{\text{роб}}$. Також допустимим є розрахунок таким чином

$$L_{\text{доз}} = L_{\text{роб}} - L_{\text{зав}} - L_{\text{ст}}$$

Довжина зони дозування

$$L_{\text{доз}} = 1386 - 345 - 280 = 761 \text{ мм.}$$

Довжина опори і евольвентного зачеплення приймаємо $L_{\text{ев}} = 150 \text{ мм.}$

Довжина відбійної частини

$$L_{\text{відб}} = (0,1 \dots 0,5) \cdot D = 0,476 \cdot 63 = 30 \text{ мм.}$$

Загальна довжина черв'яка

$$L = L_{\text{роб}} + L_{\text{ев}} + L_{\text{відб}} = 1386 + 150 + 30 = 1566 \text{ мм.}$$

Глибина гвинтового каналу на початку зони стиснення

$$h_1 - h_3 \quad 8 - 2$$

$$h_2 = h_1 - \frac{L - L_{\text{ст}}}{L} (L - L_{\text{ст}}) = 8 - \frac{1566 - 280}{1566} \cdot (1566 - 280) = 3,07 \text{ мм.}$$

Діаметр вала черв'яка на початку зони стиснення

$$d_2 = D - 2h_2 = 63 - 2 \cdot 3,07 = 56,86 \text{ мм.}$$

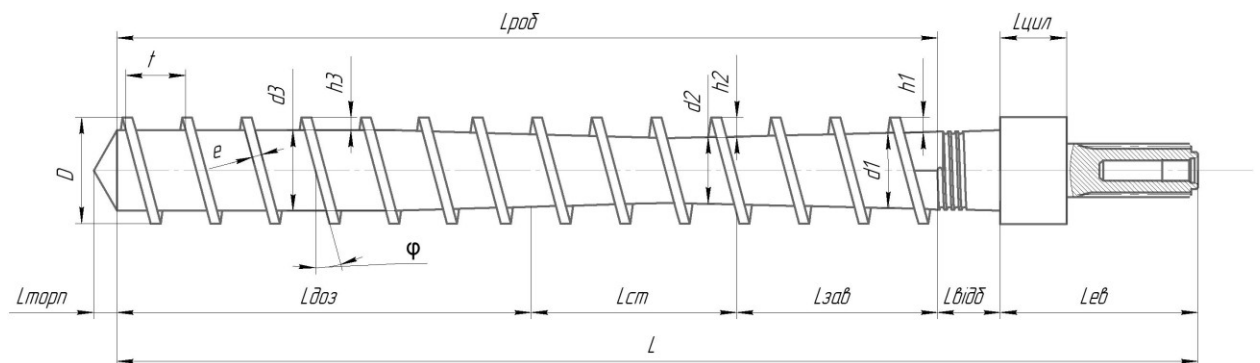


Рисунок 4.1 – Схема черв'яка

Критична частота обертання черв'яка в зоні завантаження може бути визначена по такому співвідношенню (с^{-1})

$$n_{\text{кр}} = \frac{42,2}{60\sqrt{D}} = \frac{42,2}{60\sqrt{0,063}} = 2,8 \text{ с}^{-1},$$

де D – діаметр черв'яка, м.

У зонах стиснення та дозування допустиму частоту обертання черв'яків значно зменшують, для дотримання граничної температури нагріву матеріалів.

Робоча частота обертання черв'яка:

$$n_p = (0,2 \dots 0,7) \cdot n_{кр} = 0,35 \cdot 2,8 = 0,98 \text{ с}^{-1},$$

при цьому нижчі значення коефіцієнтів приймають для малих діаметрів черв'яків, вищі – для великих.

У цьому пункті ми знайшли розміри черв'яка, та частоти обертання. Також з цього розділу ми зробили розрахунки в програмі с++ (Додаток 1)

4.1.2 Розрахунок коефіцієнта геометричної форми екструзійної головки

Канал головки (рис. 4.2) розбивається на ряд послідовних ділянок простої геометрії, для кожного з яких визначається коефіцієнт геометричної форми K , м³ або мм³, а потім сумарне значення для всієї головки

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

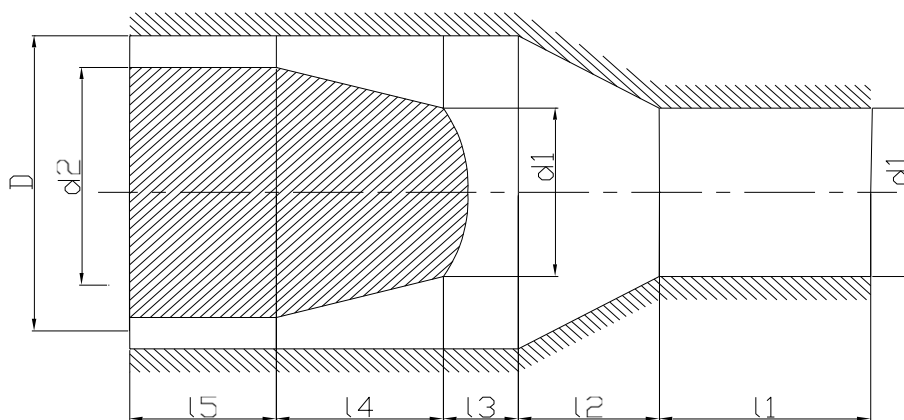


Рисунок 4.2 – Схема головки

Таблиця 5.1 – Розміри головки для $D_{\text{ч}} = 63 \text{ мм}$ і $L_{\text{ч}}/D_{\text{ч}} = 22$

$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$D, \text{мм}$	$l_1, \text{мм}$	$l_2, \text{мм}$	$l_3, \text{мм}$	$l_4, \text{мм}$	$l_5, \text{мм}$
70	84	90	198	30	56	18	34

Розраховуємо коефіцієнти геометричної форми.

Розрахунок першої ділянки(рис 4.3)

$$K_1 = \frac{\pi d_1^4}{128 L_1} = \frac{\pi \cdot 70^4}{128 \cdot 198} = 2976,23 \text{ мм}^3$$

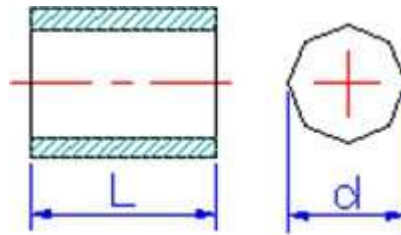


Рисунок 4.3 - Круглий циліндровий канал

Розрахунок другої ділянки (рис 4.4)

$$K_2 = \frac{3\pi D^3 d_1^3}{128 L_2 (D^2 + D d_1 + d_1^2)} = \frac{3\pi \cdot 90^3 \cdot 70^3}{128 \cdot 30 (90^2 + 90 \cdot 70 + 70^2)} = 31798,32 \text{ мм}^3$$

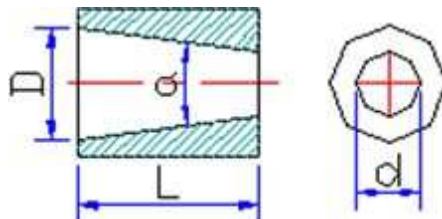


Рисунок 4.4 - Круглий конічний канал з великим діаметром на вході

Розрахунок третьої ділянки(рис 4.5)

$$K_3 = \frac{\pi D^4}{128 L_3} = \frac{\pi \cdot 90^4}{128 \cdot 56} = 28755,57 \text{ мм}^3$$

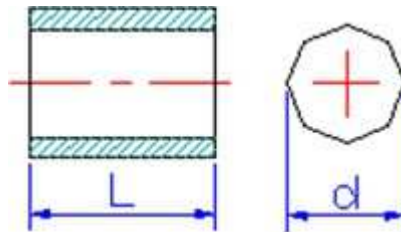


Рисунок 4.5 - Круглий циліндровий канал

Розрахунок четвертої ділянки(рис 4.6)

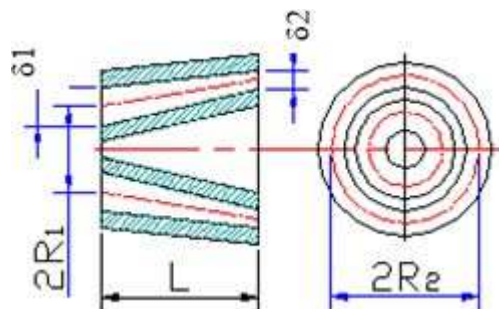


Рисунок 4.6 - Конічний кільцевий з конічною щілиною

$$K_4 = \frac{\pi(R_{1c}\delta_2 - R_{2c}\delta_1)}{6L_4\omega_4} = \frac{\pi(40 \cdot 3 - 43,5 \cdot 10)}{6 \cdot 18 \cdot (-0,053)} = 172,88 \text{ мм}^3$$

де R_1, R_2, R – радіуси екструзійної головки,

$$R_1 = \frac{d_1}{2} = \frac{70}{2} = 35 \text{ мм}$$

$$R_2 = \frac{d_2}{2} = \frac{84}{2} = 42 \text{ мм}$$

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

R_{1c}, R_{2c} – середні радіуси екструзійної головки,

$$R_{1c} = \frac{R + R_1}{2} = \frac{45 + 35}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$R_{2c} = \frac{R + R_2}{2} = \frac{45 + 42}{2} = 43,5 \text{ мм}$$

δ_1, δ_2 – товщини каналу 4 частини головки,

$$\delta_1 = R - R_1 = 45 - 35 = 10 \text{ мм}$$

$$\delta_2 = R - R_2 = 45 - 42 = 3 \text{ мм}$$

ω – коефіцієнт геометричної форми

$$\omega_4 = \frac{2,3(R_{1c} - R_{2c})^2}{(R_{1c}\delta_2 - R_{2c}\delta_1)^2} \lg \frac{R_{1c}\delta_2}{R_{2c}\delta_1} - \frac{(R_{1c} - R_{2c})(\delta_1 - \delta_2)}{(R_{1c}\delta_2 - R_{2c}\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2} =$$

1 2

$$\begin{aligned} & \frac{2,3(40 - 43,5)^2}{(40 \cdot 3 - 43,5 \cdot 10)^2} \lg \frac{40 \cdot 3}{43,5 \cdot 10} - \frac{(40 - 43,5)(10 - 3)}{(40 \cdot 3 - 43,5 \cdot 10)10 \cdot 3} - \frac{10^2 - 3^2}{2 \cdot 10^2 \cdot 3^2} = \\ & = -0,053 \text{ мм}^{-2} \end{aligned}$$

Розрахунок п'ятої ділянки(рис 4.7)

$$K_5 = \frac{\pi(R + R_2)(R - R_2)^3}{12L_5} = \frac{\pi(45 + 42)(45 - 42)^3}{12 \cdot 34} = 18,08 \text{ мм}^3$$

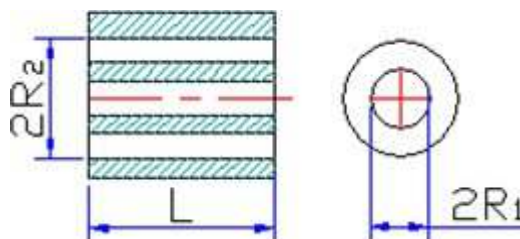


Рисунок 4.7 – Кільцевий канал

Загальний коефіцієнт всієї головки

$$K_{\text{сум}} = \frac{\frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1}}{\frac{1}{2976,23} + \frac{1}{31798,32} + \frac{1}{28755,57} + \frac{1}{172,88} + \frac{1}{18,08}} =$$

$$K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 = 2976,23 + 31798,32 + 28755,57 + 172,88 + 18,08$$

$$= 16,26 \text{ мм}^3$$

У цьому пункті ми розрахували загальний коефіцієнт геометричної форми всієї головки.

4.1.3 Розрахунок продуктивності черв'ячної машини

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.

Розрахунок коефіцієнтів c , a , b - що характеризують шнек зі змінною глибиною нарізки

$$c = 1 - \frac{6,9D}{2(h_2 - h_3)} \lg \left(\frac{h_2}{h_3} \right) + \frac{D^2}{2h_2h_3} = 1 - \frac{6,9 \cdot 63}{2(3,07 - 2)} \lg \left(\frac{3,07}{2} \right) + \frac{63^2}{2 \cdot 3,07 \cdot 2} =$$

$$286,4 ,$$

$$a = \frac{\pi^2}{h_2h_3} \left(\frac{D(h_2 + h_3)}{2h_2h_3} - 1 \right) = \frac{\pi^2}{3,07 \cdot 2} \left(\frac{63(3,07 + 2)}{2 \cdot 3,07 \cdot 2} - 1 \right) = 40,2 \frac{1}{\text{мм}^2},$$

$$b = \frac{2,3}{(h_2 - h_3)D^3} \lg \left(\frac{h_2(D + d_3)}{h_3(D + d_1)} \right) + \frac{2h_2h_3 + (h_2 + h_3)D}{2D^2h_2^2h_3^2} = \frac{2,3}{(3,07 - 2)63^3} \lg \left(\frac{3,07(63 + 59)}{2(63 + 47)} \right) +$$

$$+ \frac{2 \cdot 3,07 \cdot 2 + (3,07 + 2)63}{2 \cdot 63^2 \cdot 3,07^2 \cdot 2^2} = 0,001109 \frac{1}{\text{мм}^4},$$

Коефіцієнти прямого потоку α , зворотного потоку β та потоку витоку γ
для черв'яка зі змінною глибиною нарізки, мм³

$$\alpha = \frac{\pi^3(t-\lambda e)c}{a+t^2b} = \frac{\pi^3(63-1\cdot7)286,4}{40,2+63^2\cdot0,001109} = 11149 \text{ мм}^3,$$

$$\beta = \frac{\pi t(t-\lambda e)}{12L_{\text{доз}}(a+t^2b)} = \frac{\pi 63(63-1\cdot7)}{12\cdot761(40,2+63^2\cdot0,001109)} = 0,0272 \text{ мм}^3,$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 D \delta^3 t^2}{10eL_{\text{доз}}\sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}} = \frac{\pi^2 63 \cdot 0,15^3 63^2}{10 \cdot 7 \cdot 761 \sqrt{\pi^2 63^2 + 63^2}} = 0,000753 \text{ мм}^3$$

Об'ємна секундна продуктивність черв'ячної машини для переробки
полімерів, мм³/с

$$Q = \frac{\alpha \cdot K_{\text{заг}} \cdot n_p}{K_{\text{заг}} + \beta + \gamma} = \frac{11149 \cdot 16,26 \cdot 0,98}{16,26 + 0,0272 + 0,000753} = 10907 \frac{\text{мм}^3}{\text{с}}$$

Густина розплаву полімеру при температурі 145 °С,

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{140} + \frac{t_{145} - t_{140}}{t_{160} - t_{140}} \cdot \frac{\rho_{160} - \rho_{145}}{1} = 827,6 + \frac{145 - 140}{160 - 140} \cdot \frac{818,4 - 827,6}{1} = \\ &= 826,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \end{aligned}$$

де ρ_{160} – густина розплаву полімеру при температурі 160 °С,

ρ_{140} – густина розплаву полімеру при температурі 140 °С,

Вагова продуктивність, кг/год

$$\Pi = \frac{Q \cdot 3600}{10^9} \cdot \rho = \frac{10907 \cdot 3600}{10^9} \cdot 826,3 = 32,4 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

В цьому пункті ми знайшли об'ємну секундну продуктивність та вагову продуктивність

4.1.4 Розрахунок перепаду тиску в екструзійній головці

Розрахунок перепаду тиску в екструзійній головці виконується таким чином:

- 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);

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

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

$$\Delta P_i = \frac{Q \cdot \eta_i}{K}$$

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

Розрахунок швидкості зсуву для ділянок головки для ділянок головки, с^{-1}

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{32Q}{\pi d_1^3} = \frac{32 \cdot 10907}{\pi 47^3} = 1,07 \text{ с}^{-1}$$

$$\dot{\gamma}_2 = \frac{266Q}{\pi(D^3 + d_1^3)} = \frac{266 \cdot 10907}{\pi(63^3 + 47^3)} = 2,51 \text{ с}^{-1}$$

$$\dot{\gamma}_3 = \frac{32Q}{\pi D^3} = \frac{32 \cdot 10907}{\pi 63^3} = 0,444 \text{ c}^{-1}$$

$$\dot{\gamma}_4 = \frac{22.32 \cdot Q}{\pi \cdot (R_{1c} + R_{2c})(\delta_2 + \delta_1)^2} = \frac{22.32 \cdot 10907}{\pi \cdot (40 + 43,5)(3 + 10)^2} = 5,49 \text{ c}^{-1}$$

$$\dot{\gamma}_5 = \frac{5,58 \cdot Q}{\pi \cdot (R_1 + R_2) \cdot (R_2 - R_1)^2} = \frac{5,58 \cdot 10907}{\pi \cdot (45 + 42) \cdot (45 - 42)^2} = 24,74 \text{ c}^{-1}$$

Значення ефективної в'язкості з залежності $\mu = f(\gamma)$

$$\mu_1 = 9,2 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_2 = 8,8 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_3 = 9,5 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_4 = 6,5 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

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

Перепад тиску на простих ділянках головки, Па

$$\Delta P_1 = \frac{Q \cdot \mu_1}{K_1} = \frac{10907 \cdot 9,2 \cdot 10^3}{2976,23} = 33715 \text{ Па}$$

$$\Delta P_2 = \frac{Q \cdot \mu_2}{K_2} = \frac{10907 \cdot 8,8 \cdot 10^3}{31798,32} = 3018 \text{ Па}$$

$$\Delta P_3 = \frac{Q \cdot \mu_3}{K_3} = \frac{10907 \cdot 9,5 \cdot 10^3}{28755,57} = 3603 \text{ Па}$$

$$\Delta P_4 = \frac{Q \cdot \mu_4}{K_4} = \frac{10907 \cdot 6,5 \cdot 10^3}{172,88} = 410086 \text{ Па}$$

$$\Delta P_5 = \frac{Q \cdot \mu_5}{K_5} = \frac{10907 \cdot 3 \cdot 10^3}{18,08} = 1809790 \text{ Па}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{сум}} &= \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 = \\ &= 33715 + 3018 + 3603 + 410086 + 1809790 = 2260212 \text{ Па} \end{aligned}$$

В цьому пункті ми знайшли загальний перепад тиску.

4.1.5 Потужність привода екструдера

Коефіцієнт для розрахунку потужності черв'яка, м²

$$\begin{aligned} J &= \frac{\pi^2 D^2 - 4t^2}{\pi^2} + \frac{(D+d_3)^3 - (D+d_2)^3}{3(d_3-d_2)} + \frac{2,3\pi^2 D^5 \lg \frac{h_2}{h_3}}{(t^2 + \pi^2 D^2)(h_2-h_3)} = \\ &= \frac{\pi^2 63^2 - 4 \cdot 63^2}{\pi^2} + \frac{(63+59)^3 - (63+56,86)^3}{3(59-56,86)} + \frac{2,3\pi^2 63^5 \lg \frac{3,07}{2}}{(63^2 + \pi^2 63^2)(3,07-2)} = 0,1078 \text{ м}^2, \end{aligned}$$

Розрахунок швидкості зсуву, с⁻¹

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{\pi^2(D-h_{\text{сер}})(D-2h_{\text{сер}})n}{h_{\text{сер}} \sqrt{\pi^2(D-2h_{\text{сер}})^2 + t^2}} = \frac{\pi^2(63-2,535)(63-2 \cdot 2,535)0,98}{2,535 \sqrt{\pi^2(63-2 \cdot 2,535)^2 + 63^2}} = 69,39 \text{ с}$$

$$\dot{\gamma}_2 = \frac{\pi^2 D^2 n}{\delta \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}} = \frac{\pi^2 63^2 \cdot 0,98}{0,15 \sqrt{\pi^2 63^2 + 63^2}} = 1232 \text{ c}^{-1}$$

Значення ефективної в'язкості з залежності $\mu = f(\gamma)$,

$$\mu_{\text{ef1}} = 6 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{\text{ef2}} = 2,3 \cdot 10^2 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

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

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{\pi^3 (t - e) L J \mu_{\text{ef1}}}{t} n_p^2 + \alpha \cdot \Delta P \cdot n_p = \\ &= \frac{\pi^3 (0,063 - 0,007) \cdot 1,566 \cdot 0,1078 \cdot 6 \cdot 10^3}{0,12} 0,98^2 + 1,11 \cdot \\ &\cdot 10^{-5} \cdot 2260212 \cdot 0,98 = 14100 \text{ Вт}, \end{aligned}$$

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, Вт

$$N_2 = \frac{\pi^3 D^3 e L \mu_{\text{ef2}}}{\delta t} n_p^2 = \frac{\pi^3 0,063^3 \cdot 0,007 \cdot 1,566 \cdot 2,3 \cdot 10^2}{0,00015 \cdot 0,063} 0,98^2 = 1987 \text{ Вт}$$

Потужність, споживана екструдером, Вт

$$N = N_1 + N_2 = 14100 + 1987 = 16087 \text{ Вт}$$

Загальна споживана потужність з урахуванням коефіцієнту запасу, Вт

$$N_{\text{заг}} = \frac{N}{\eta} = \frac{16087}{0,6} = 26812 \text{ Вт}$$

Електродвигун Аир180М4 30 кВт 1500 об/хв ІМ1001 [14].

4.2 Розрахунок черв'яка на міцність

4.2.1 Розрахунок на міцність

Метою розрахунку черв'яка є визначення його працездатності.

Крутний момент (Н·м) становить

$$M_{кр} = \frac{30N}{\pi n} = \frac{30 \cdot 16087}{\pi \cdot 58,8} = 2613,9 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

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

Осьове зусилля, Н

$$P_{oc} = \frac{2M_{кр}}{D} \tan \varphi = \frac{2 \cdot 2613,9}{0,063} \tan 17,67^\circ = 26434,7 \text{ Н}$$

де D – зовнішній діаметр черв'яка, м; φ – кут підйому нарізки

Маса черв'яка (кг)

$$G = \frac{\pi(D - d_0)}{4} \rho L_{роб} = \frac{\pi(0,063 - 0,01575)^2}{4} 7850 \cdot 1,386 = 19 \text{ кг}$$

де $d_0 = (0,15 \dots 0,26) \cdot D = 0,26 \cdot 0,063 = 0,01575$, мм; $L_{роб}$ – довжина робочої частини, м; ρ – густина сталі 40ХН2МА, $7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

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

$$q = \frac{9,8G}{L_{\text{роб}}} = \frac{9,8 \cdot 19}{1,386} = 134 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

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

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{ос}}}{F} + \frac{M_{\text{max}}}{W_x} = \frac{26434,7}{0,00155} + \frac{128,7}{1,007 \cdot 10^{-5}} = 2,98 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

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

$$F = \frac{\pi d_1^2}{4} (1 - \alpha^2) = \frac{\pi \cdot 0,047^2}{4} (1 - 0,33^2) = 0,00155 \text{ м}^2$$

$\alpha = d_0/d_1 = 15,75/47 = 0,33$, де d_1 – діаметр осердя в зоні завантаження, м ;

M_{max} – максимальний згинальний момент від власної ваги (у місці початку нарізки), $\text{Н} \cdot \text{м}$,

$$M_{\text{max}} = \frac{1}{2} q L_{\text{роб}}^2 = \frac{1}{2} \cdot 134 \cdot 1,386^2 = 128,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

W_x – осьовий момент опору, м^3

$$W_x = \frac{\pi d_1^3 (1 - \alpha^4)}{32} = \frac{\pi \cdot 0,047^3 (1 - 0,33^4)}{32} = 1,007 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

Дотичні напруження

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p} = \frac{2613,9}{1,510 \cdot 10^{-4}} = 1,73 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

де W_p – полярний момент опору, м³

$$W_p = \frac{\pi d_1^3 (1 - \alpha^4)}{16} = \frac{\pi \cdot 0,092^3 (1 - 0,33^4)}{16} = 1,5108 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

Еквівалентне напруження за III теорією міцності

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_{ст}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{(4,12 \cdot 10^7)^2 + 4 \cdot (1,73 \cdot 10^7)^2} = 5,38 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

Коефіцієнт запасу не повинен перевищувати допустиме значення

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{екв}} = \frac{930 \cdot 10^6}{4,34 \cdot 10^8} = 2,14 > 1,6$$

де σ_t – межа пропорційності; допустимий коефіцієнт запасу n зазвичай беруть рівним 1,6...2,0.

За цими результатами була виконана епюра напружень й перевірена умова міцності (Рис. 4.8)

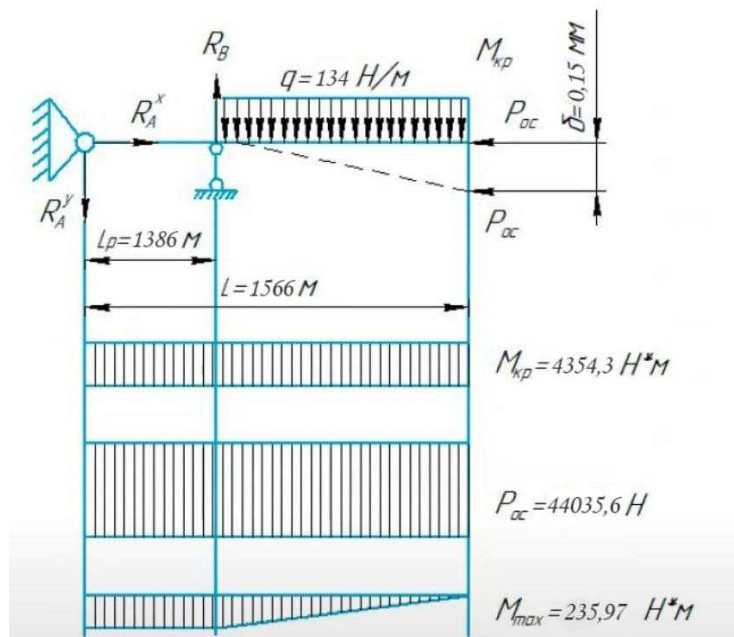


Рисунок 4.8 – епюра напружень

Черв'як виконує перевірку на міцність

4.2.2 Розрахунок на стійкість

Метою розрахунку черв'яка є визначення його працездатності.

Ефективний коефіцієнт концентрації напружень

$$k_{\sigma} = 1,9$$

$$(k_{\sigma})_d = \frac{k_{\sigma}}{\beta \varepsilon} = \frac{1,9}{1 \cdot 0,55} = 3,45$$

де, k_{σ} – коефіцієнт концентрації напружень, $k_{\sigma} = 1,9 - 2$; β – коефіцієнт, який враховує якість поверхні деталі, для полірованої поверхні черв'яка, $\beta = 1$; ε – коефіцієнт, який враховує розмір перерізу деталі, для деталей з легированих сталей за наявності концентрації напружень.

Допустиме напруження під час циклічного навантаження

$$\sigma_{-1} = 0,4\sigma_B = 0,4 \cdot 1080 \cdot 10^6 = 432 \text{ МПа}$$

де σ_B — межа короткочасної міцності, МПа

Амплітуда змінення напружень

$$\sigma_a = \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{128,7}{1,007 \cdot 10^{-5}} = 12,8 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт запасу міцності під час циклічного навантаження

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{(k_\sigma)_d \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_c} = \frac{432 \cdot 10^6}{3,45 \cdot 12,8 \cdot 10^6 + 0,26 \cdot 0} = 9,78$$

де, ψ_σ — коефіцієнт, що залежить від матеріалу, $\psi_\sigma = 0,26$; σ_c — середнє циклове напруження ($\sigma_c = 0$, оскільки цикл симетричний);

Черв'як працездатний, коефіцієнт запасу міцності більше мінімального.

4.2.3 Розрахунок на жорсткість

Метою розрахунку черв'яка є визначення його працездатності.

Полярний момент інерції перерізу, м⁴

$$I = \frac{\pi d^4}{64} (1 - \alpha^4) = \frac{\pi 0,047^4}{64} (1 - 0,33^4) = 2,37 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Радіус інерції, м

$$i = \sqrt{\frac{I}{F}} = \sqrt{\frac{2,37 \cdot 10^{-7}}{0,00155}} = 0,012 \text{ м}$$

Ступінь жорсткості

$$\lambda = \frac{\mu L_p}{i} = \frac{2 \cdot 1,386}{0,012} = 231 > 50$$

Коефіцієнти для перевірки прогину

$$k = \sqrt{\frac{P_{oc}}{EI}} = \sqrt{\frac{44035,6}{2,09 \cdot 10^5 \cdot 2,37 \cdot 10^{-7}}} = 942 \text{ м}^{-1}$$

$$A = \frac{q(L_p - \frac{1}{k} \sin(kL_p))}{k \cos(kL_p)} = \frac{134(1,386 - \frac{1}{942} \sin(942 \cdot 1,386))}{942 \cos(942 \cdot 1,386)} = -0,28 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

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

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

$$= \frac{1}{2,09 \cdot 10^5 \cdot 2,37 \cdot 10^{-7}} \left[\frac{134}{942} \left(\frac{1}{942} + \left(\frac{1}{942} + \frac{1,386}{2} \right) \right) \right]$$

$$- \frac{1}{942} \left(\frac{134}{942^3} - (-0,28) \cdot 1,386 \right) \cos(942 \cdot 1,386) - \frac{1}{942^2} \left(\frac{134 \cdot 1,386}{942} - (-0,28) \right) \sin(942 \cdot 1,386)] = 0,008 \text{ м}$$

Напруження черв'яка що виникає в прогині, МПа

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_{oc}}{F} \left(1 + \frac{\delta_p F}{I} d_1\right) + \frac{M_{\max}}{W_x} = \\ &= \frac{44035,6}{0,00155} \left(1 + \frac{0,008 \cdot 0,00155}{2,37 \cdot 10^{-7}} 0,047\right) + \frac{128,7}{1,007 \cdot 10^{-5}} = \\ &= 1,11 \cdot 10^8\end{aligned}$$

Еквівалентне напруження за III теорією міцності

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\sigma_t^2 + 4\tau^2} = \sqrt{(1,11 \cdot 10^8)^2 + 4 \cdot (2,02 \cdot 10^8)^2} = 4,19 \cdot 10^8 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт запасу не повинен перевищувати допустиме значення

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\text{екв}}} = \frac{930 \cdot 10^6}{4,19 \cdot 10^8} = 2,22$$

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

Умова жорсткості виконується.

4.2.4 Розрахунок шліцьового з'єднання

Визначення кількості зубів шліцьового з'єднання

Кількість зубів шліцьового з'єднання

$$z = \frac{d_m}{m} = \frac{56}{2} = 28$$

де m – модуль, мм. Приймаємо $m = 2$; d_m – діаметр шліцьового з'єднання, мм

Радіус шліцьового з'єднання

$$R_c = \frac{mz}{2} = \frac{2 \cdot 28}{2} = 28 \text{ мм}$$

Площина контакту, м²

$$F = 0,8L_{\text{ев}}m = 0,8 \cdot 0,15 \cdot 0,002 = 0,00024 \text{ м}^2$$

Перевірка з'єднання на зминання

$$\sigma_{\text{зм}} = \frac{M_{\text{об}}}{R_c F z \psi} = \frac{4354,3}{0,028 \cdot 0,00024 \cdot 28 \cdot 0,7} = 3,3 \cdot 10^7 \leq 130 \text{ МПа}$$

Шліцьове з'єднання пройшло перевірку на зминання

4.3 Тепловий розрахунок екструдера

Визначення теплового балансу черв'яка

Площа поперечного перерізу, м²

$$F = \frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{\pi 0,01575^2}{4} = 0,000195 \text{ м}^2$$

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

$$G_B = \rho F v = 1000 \cdot 0,000195 \cdot 1 = 0,195 \text{ кг/с}$$

де ρ – густина води, $\text{кг}/\text{м}^3$; v – швидкість води, $v = 1 \text{ м/с}$

Теплота, що забирається системою охолодження, Вт

$$E_0 = G_B \cdot c_B (t_{B2} - t_{B1}) = 0,195 \cdot 4200 \cdot (26 - 20) = 4095 \text{ Вт}$$

де c_B – питома теплоємність, $c_B = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$; t_{B2}, t_{B1} – кінцева та початкова температури води, $t_{B2} = 26 ^\circ\text{C}$, $t_{B1} = 20 ^\circ\text{C}$

Кількість переробляемого матеріалу, $\text{кг}/\text{с}$

$$G_M = \frac{P}{3600} = \frac{32,4}{3600} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$$

Теплота, що йде з нагрітим матеріалом, Вт

$$E_M = G_M \cdot c_M (t_K - t_H) = 9 \cdot 10^{-3} \cdot 2499 (145 - 20) = 2811 \text{ Вт}$$

Теплота, що виділяється під час роботи шнека

$$E_{\text{ш}} = \left(\frac{\pi^3 D^3 \mu_1 L}{h_3} + \frac{P}{\cos^2 \varphi} + \frac{\pi^2 D^2 n^2 \mu_2 e L}{\delta \tan \varphi} \right) 9,8 \cdot 10^{-10} =$$
$$= \left(\frac{\pi^3 0,063^3 \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 1,566}{1,95 \cdot 10^{-3}} + \frac{32,4 \cdot 50 \cdot 10^6}{\cos^2 17,67} + \right)$$

$$+ \frac{\pi 20,063^2 \cdot 0,98^2 \cdot 2,3 \cdot 10^2 \cdot 7 \cdot 1,566) 9,8 \cdot 10^{-10}}{0,15 \cdot 10^{-3} \tan 17,67} = 10,92 \text{ Вт}$$

де P – тиск у циліндрі, $P = 50 \text{ Мпа}$;

Втрати тепла в навколишнє середовище, через кожух екструдера, Вт

$$E_{\pi} = F_k \alpha (t_{\pi} - t_c) = 0,58 \cdot 0,00988 \cdot (22 - 20) = 1,146 \cdot 10^{-2}$$

де t_{π} – температура поверхні, $t_{\pi} = 22^{\circ}\text{C}$; t_c – температура середовища, $t_{\pi} = 20^{\circ}\text{C}$; α – коефіцієнт теплопередачі, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{K}}$;

$$\alpha = (9,74 + 0,07 \cdot (t_{\pi} - t_c)) \cdot 10^{-3} = (9,74 + 0,07 \cdot (22 - 20)) \cdot 10^{-3} \\ = 0,00988$$

площа зовнішньої поверхні корпусу екструдера, м^2

$$F_k = \pi d_k L_k = \pi \cdot 0,130 \cdot 1,410 = 0,58 \text{ м}^2$$

де d_k – діаметр корпусу із ізоляцією, м; L_k – довжина корпусу, м

Тепловий баланс екструдера, Вт

$$E_{\text{н}} = E_{\text{м}} + E_{\pi} + E_o - E_{\text{ш}} = 2811 + 4095 + 1,146 \cdot 10^{-2} - 10,92 = 6895 \text{ Вт}$$

У цьому пункті ми розраховали тепловий баланс екструдера.

5 РОЗРАХУНОК МОДЕРНІЗАЦІЇ

5.1 Розрахунок в ANSYS

1. Обираємо алгоритм Static Structural, переходимо у вікно Geometry та імпортуємо модель шнека через Import External Geometry File (рис. 4.1 - 4.2).

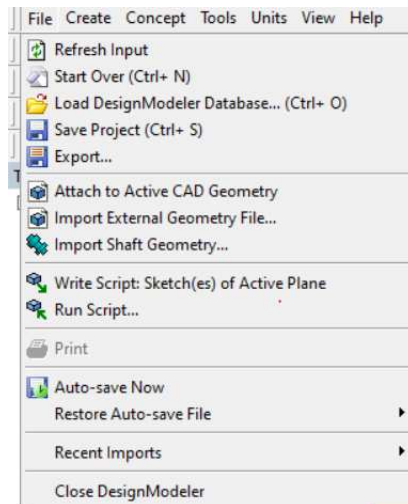


Рисунок 4.1 – Вікно імпортування

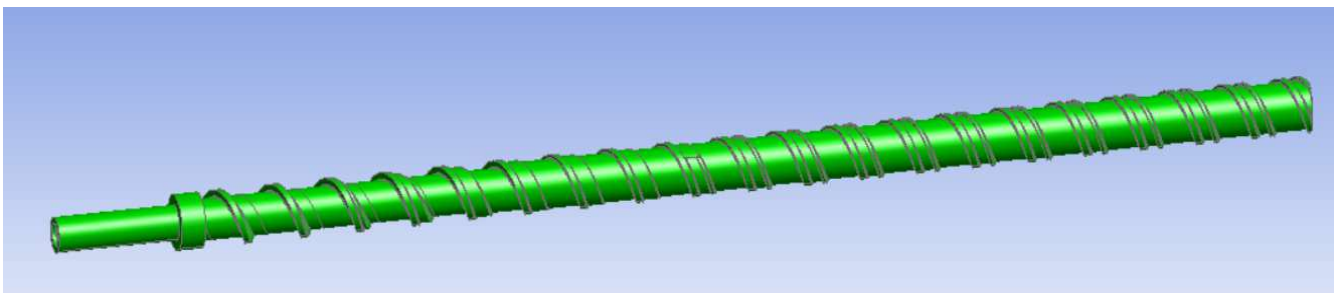


Рисунок 4.2 – Імпортований шнек

Матеріал конструкції – сталь маркою 45Х. Задаємо її характеристики за ДСТУ 7809:2015. (рис. 4.3).

24	Tensile Yield Strength	850	MPa	
25	Compressive Yield Strength	500	MPa	
26	Tensile Ultimate Strength	850	MPa	
27	Compressive Ultimate Strength	500	MPa	

Рисунок 4.3 – Межі міцності матеріалу

Створюємо сітку розміром 5мм (рис. 4.4).

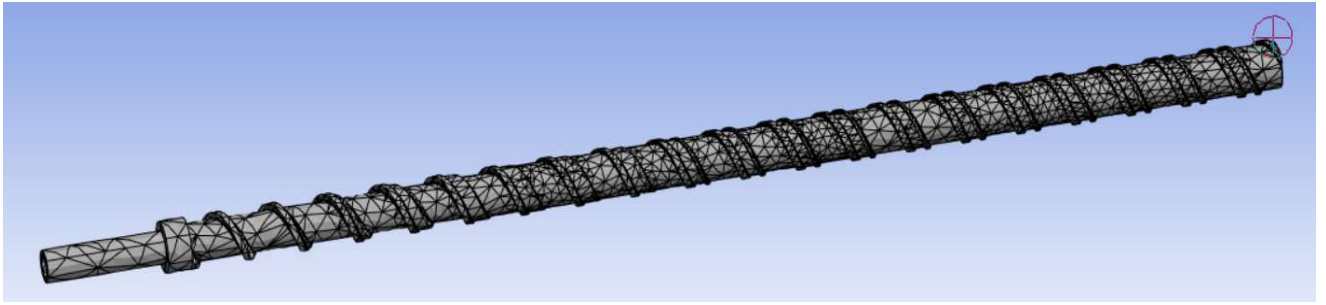


Рисунок 4.4 – Сітка скінченних елементів

Проставляємо закріплення Cylindrical Support (рис. 4.5).

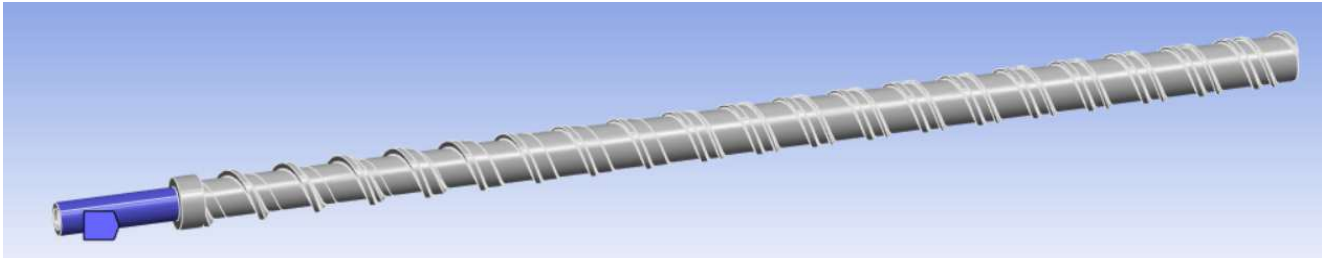


Рисунок 4.5 – Закріплення шнека

Задамо обертовий момент та навантаження на шнек силою 5МПа. (рис. 4.6).

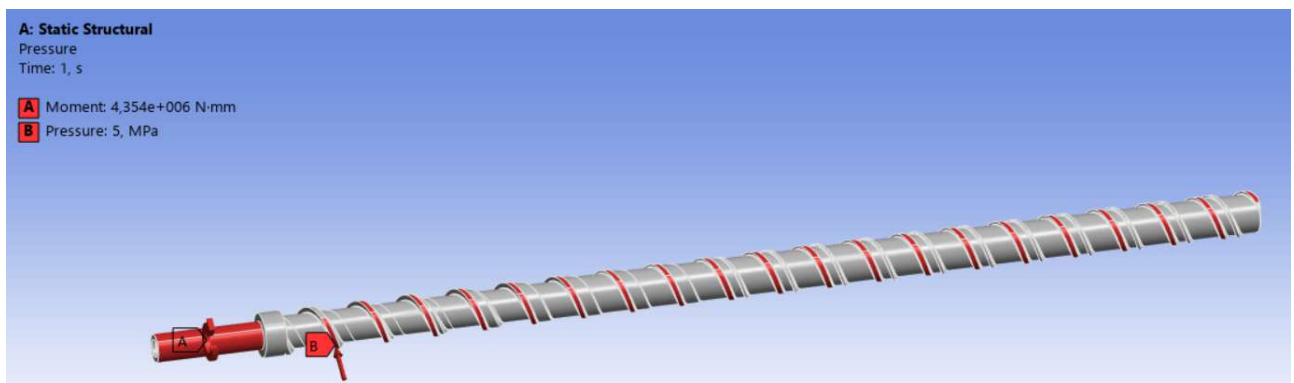


Рисунок 4.6 – Розподілене навантаження

Проведемо розрахунок конструкції по параметрах: Equivalent Stress, Total Deformation та Stress Tool. (рис. 4.7 - 4.9).

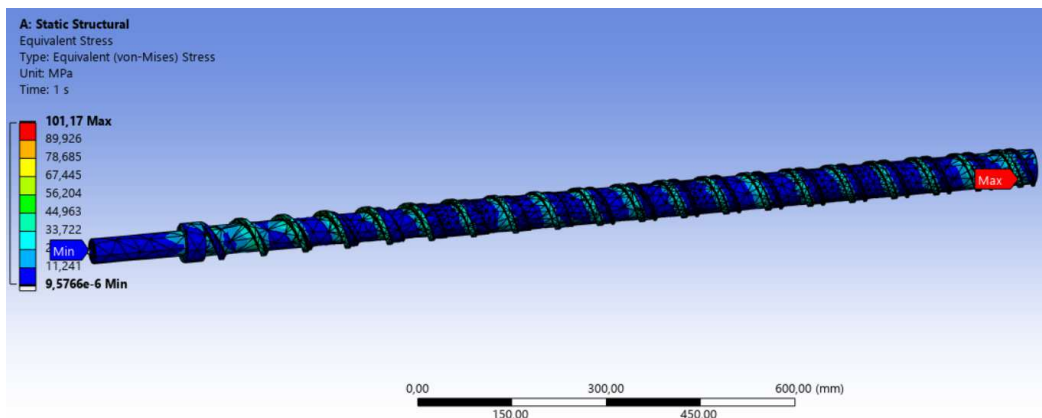


Рисунок 4.7 – Equivalent Stress

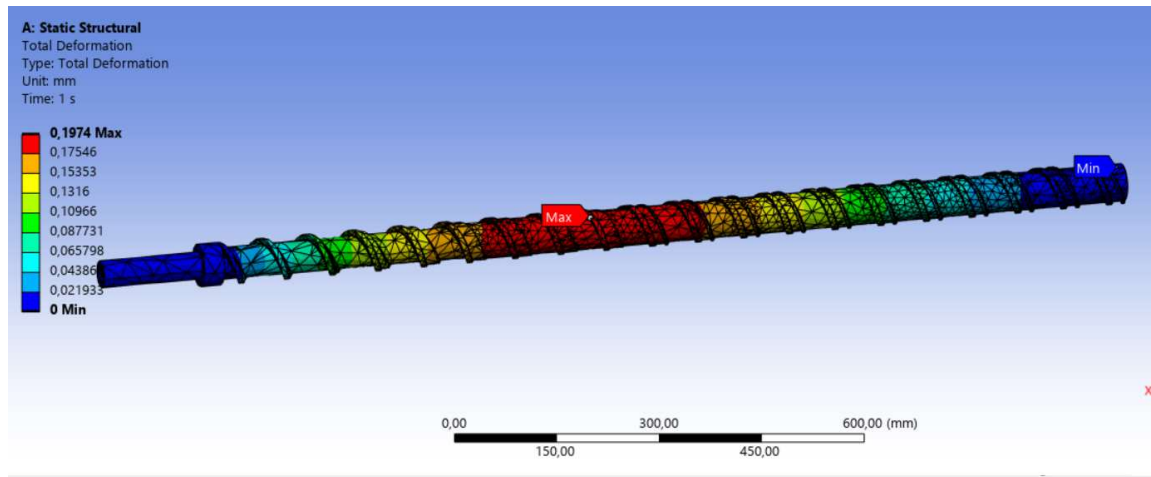


Рисунок 4.8 – Total Deformation

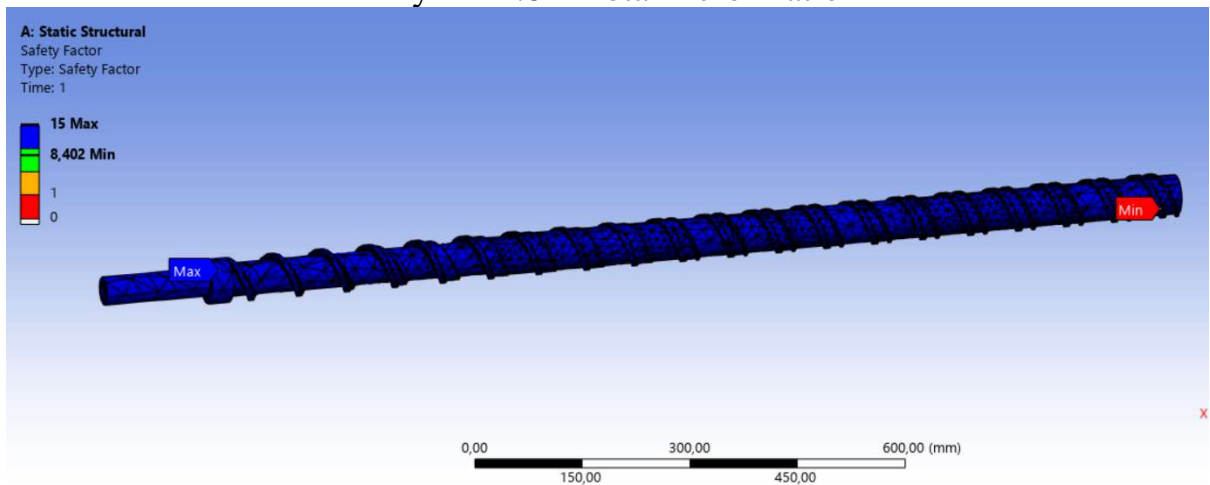


Рисунок 4.9 – Stress Tool

У підсумку отримали значення:

- максимальних еквівалентних напружень по Мізесу – 101 МПа;
- максимальний прогин шнека – 0,2 мм;
- запас міцності: $n = 850/101 = 8,4 > [1,5...3]$

Умови міцності шнека виконуються.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Вступ до охорона праці

Система охорони праці на будь-якому виробництві має на меті насамперед запобігання нещасним випадкам, виникненню пожеж, вибухонебезпечним ситуаціям, а також професійним захворюванням та отруєнням персоналу. Пріоритетним завданням є формування максимально безпечного робочого середовища шляхом розробки та впровадження комплексу заходів, здатних повністю нівелювати наявні виробничі ризики.

Базовим нормативно-правовим актом у цій сфері виступає Закон України «Про охорону праці» від 14 жовтня 1992 року. Цей документ закріплює непорушне право кожного співробітника на збереження здоров'я під час трудової діяльності, регламентує принципи партнерства між роботодавцем і державою, а також задає фундаментальні вимоги до безпеки. Суворе дотримання його норм є ключовою умовою для мінімізації рівня виробничого травматизму.

У рамках виконання дипломного проєкту на тему «Агрегат для виробництва плівки з модернізацією черв'яка», що впроваджується на базі хімічного підприємства, було спроектовано робочі зони, які повністю задовольняють чинні санітарно-гігієнічні, галузеві та державні стандарти.

Шкідливі та небезпечні чинники виробничого середовища:

- промислове освітлення;
- підвищений рівень шуму;
- забруднення повітря робочої зони;
- ризик виникнення пожеж;
- небезпека ураження електричним струмом;
- наявність рухомих і обертових частин обладнання.

Далі розглянемо особливості цих факторів та способи їхньої нейтралізації.

Організація виробничого освітлення

Грамотне проектування освітлювальних систем є критично важливою умовою для забезпечення продуктивної роботи в галузі машинобудування. Якість світла має безпосередній вплив на фізіологію людини: вона визначає стан нервової системи, гостроту зору та слуху, впливає на швидкість настання втоми й загальний тонус організму працівників.

Надзвичайно важливою складовою є природне світло, адже воно стимулює імунітет та допомагає зберігати здоров'я. Його надходження зазвичай організовують через бічні отвори (вікна) або, у окремих випадках, через zenітні світлові ліхтарі на даху будівлі.

Згідно з класифікацією робіт у ДБН В.2.5-28:2018, обслуговування технологічного обладнання належить до робіт VI розряду підрозряду «а», для яких норма освітлення становить 150 лк (Е_{нор}).

Оскільки виробничий процес здійснюється у три зміни, розрахунок освітлення проводиться для темного часу доби. Загальне освітлення забезпечується світлодіодними світильниками Horoz Electric 400-002-130 (20 Вт, 2100 лм), які створюють освітленість $E_f = 100$ лк.

Для більш точного розрахунку за методом коефіцієнта використання світлового потоку було застосовано світильники LED VIOLUX потужністю 100 Вт ($F = 9000$ лм). Встановлено 36 світильників, що забезпечує рівень освітленості 170 лк — відповідно до норм.

Локальне освітлення на робочих місцях виконується за допомогою ламп типу НВ, які дають освітлення до 200 лк, що також відповідає вимогам державних стандартів.

6.2 Виробничий шум

Функціонування агрегату неодмінно супроводжується генеруванням постійного шумового фону. Основними джерелами звукового випромінювання виступають рухомі вузли устаткування: вентиляційні системи, електродвигуни,

черв'ячні передачі, вали та інші деталі механізмів. За певних режимів експлуатації акустичне навантаження здатне досягати позначки у 90 дБА.

З метою мінімізації негативного акустичного впливу на виробництві реалізуються заходи колективного звукозахисту. Одним із найбільш дієвих методів є оздоблення внутрішніх конструкцій цеху спеціальними звукопоглинальними матеріалами, що мають перфороване покриття. Максимальна ефективність шумопоглинання забезпечується за умови, що подібними матеріалами оброблено щонайменше 60% загальної площі приміщення.

Вимоги до будівельних конструкцій (стін та перекриттів виробничих зон) передбачають використання матеріалів, здатних забезпечити індекс звукоізоляції від 50 дБА та коефіцієнт звукопоглинання, що дорівнює або перевищує 0,7.

Зниження рівня механічного шуму, зумовленого обертанням та тертям деталей, досягається шляхом реалізації наступних технічних заходів:

- регулярного моніторингу кількості змащувальних матеріалів у підшипникових вузлах;
- застосування механізмів примусового подавання мастила до поверхонь тертя;
- точного балансування деталей та вузлів, що обертаються;
- встановлення спеціальних демпферних (амортизуючих) елементів між конструктивними блоками;
- проведення планово-попереджувальних оглядів та оперативного виправлення виявлених дефектів обладнання.

Окрім колективних заходів, обов'язковим є використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) органів слуху персоналу. Відповідно до вимог стандарту ДСН 3.3.6.037-99, співробітники забезпечуються протишумовими навушниками. Наприклад, використання моделі ПШН-Б дозволяє знизити акустичний вплив на 22–28 дБА, тоді як застосування сучасних навушників Dnipro-M Profi забезпечує зменшення звукового тиску орієнтовно на 32 дБА.

Мікроклімат та параметри повітряного середовища робочої зони

Робочий процес операторів устаткування на даному підприємстві характеризується підвищеним фізичним напруженням. Це пояснюється комплексним впливом кількох несприятливих факторів: інтенсивним шумовим фоном, наявністю токсичних випарів у повітрі та високими температурними показниками безпосередньо в зоні обслуговування агрегату.

Базуючись на чинній класифікації видів трудової діяльності, такі умови праці ідентифікуються як роботи середнього ступеня важкості. При цьому розрахункові витрати енергії працівника варіюються в діапазоні від 150 до 200 ккал/год.

Нормативні мікрокліматичні показники для робочої зони, зокрема оптимальні межі швидкості руху повітряних мас, відносної вологості та температури, зведені у табл. 6.1.

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °C	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/с
Холодний період року	Середньої важкості Іа	19-21	60-40	0,2
Теплий період року		21-23	60-40	0,3

Характеристики повітряного середовища безпосередньо у виробничих приміщеннях формуються під впливом низки мікрокліматичних умов (зокрема, температурного режиму та показників відносної вологості), а також залежать від ступеня забруднення простору небезпечними сполуками, що вивільняються в ході технологічних операцій.

Так, процес термічної обробки та плавлення поліетилену супроводжується інтенсивною емісією токсичних газів у повітря. До переліку таких виділень належать ненасичені вуглеводні, органічні кислоти, альдегіди, оксид вуглецю та інші шкідливі домішки. Акумуляція цих речовин у зоні дихання несе пряму загрозу для фізіологічного стану та здоров'я обслуговуючого персоналу.

Для унеможливлення негативного впливу на працівників, гранично допустимі концентрації хімічних елементів разом із базовими параметрами мікроклімату

жорстко регламентуються Державними санітарними нормами, а саме — ДСН 3.3.6.042-99. Суворе та беззаперечне дотримання вимог цього стандарту є фундаментальною базою для організації безпечного, нешкідливого та комфортного робочого процесу..

6.3 Пожежна безпека

Відповідно до вимог національного стандарту ДСТУ Б В.1.1-36:2016, виробничий цех, у якому змонтовано технологічну лінію, належить до об'єктів підвищеної пожежної небезпеки. Його класифіковано за категорією «В», а безпосередній робочий простір визначено як пожежонебезпечну зону класу П-І.

Висока ймовірність займання на цій ділянці зумовлена специфікою робочого процесу: експлуатацією горючих мастильних матеріалів та термічною обробкою поліетиленової сировини (нагріванням до позначки близько 170 °С). До головних чинників, здатних спровокувати пожежу на виробництві, належать:

- короткі замикання та струмові перевантаження в лініях електроживлення;
- відхилення від затверджених технологічних параметрів роботи агрегату;
- загоряння ізоляційного покриття кабелів;
- застосування джерел відкритого полум'я в межах небезпечної зони;
- раптові поломки електричних установок чи елементів електромережі.

З метою зниження ймовірності виникнення пожежонебезпечних ситуацій на підприємстві реалізується комплекс превентивних заходів, а саме:

- монтаж і підтримання в робочому стані систем автоматичної пожежної сигналізації;
- категорична заборона на будь-які дії з відкритим вогнем біля устаткування;
- систематичне проведення протипожежних інструктажів для обслуговуючого персоналу;
- безумовне виконання вимог експлуатаційних та технологічних інструкцій;
- організація безперебійного каналу зв'язку з підрозділами пожежної

охорони;

- комплектування робочих місць первинними засобами ліквідації вогню (вогнегасниками) у зоні швидкого доступу.

У разі виникнення осередку займання алгоритм гасіння залежить від стану електроживлення. Для ліквідації вогню на попередньо знеструмленому устаткуванні найдоцільніше застосовувати вогнегасники вуглекислотного типу. Якщо ж відключити обладнання неможливо і елементи залишаються під напругою, найбезпечнішим та найефективнішим рішенням є використання виключно порошкових вогнегасників.

6.4 Електробезпека

Головним завданням комплексу заходів з електробезпеки є забезпечення персоналу від ураження струмом, впливу електромагнітного випромінювання, накопичення статичних зарядів та виникнення електричної дуги. Згідно з діючими нормативними вимогами [18], цех, у якому експлуатується технологічна лінія, належить до категорії приміщень із підвищеною небезпекою електротравматизму.

Живлення агрегату здійснюється від промислової трифазної електромережі (робоча напруга 220/380 В, частота 50 Гц), яка має ізольовану нейтраль. Застосування саме такої конфігурації мережі значно знижує небезпеку для здоров'я людини у разі ненавмисного однофазного дотику.

До основних факторів, що найчастіше призводять до ураження працівників електричним струмом, варто віднести:

- прямий контакт із неізольованими струмопровідними вузлами;
- старіння, механічне пошкодження або деградацію кабельної продукції під впливом зовнішнього середовища;
- торкання до металевих елементів конструкції, на які раптово перейшла напруга внаслідок пробою ізоляції;
- помилкове чи самовільне подавання напруги на агрегат;
- загальні технічні дефекти або несправності устаткування.

Безпечне функціонування електроустановок досягається за рахунок реалізації

низки організаційно-технічних рішень. До базових заходів належать:

- періодичний інструментальний контроль стану ізоляції кабельних ліній;
- обов'язкове використання персоналом діелектричних засобів індивідуального захисту;
- застосування посиленої або подвійної ізоляції;
- гальванічне (електричне) розділення мереж відповідно до їхнього функціоналу;
- живлення допоміжних та вторинних ланцюгів від джерел зниженої напруги.

Додаткові технічні рішення з підвищення електробезпеки:

- монтаж електропроводки виключно всередині захисних металевих труб чи гільз;
- надійне захисне заземлення всіх металевих корпусів машин, де існує ризик появи небезпечного потенціалу;
- оснащення панелей керування світловою індикацією (сигнальними лампами) для візуального моніторингу подачі напруги;
- розміщення комутаційної апаратури (вимикачів) у спеціальних герметичних захисних оболонках;
- інтеграцію систем екстреного знеструмлення електроприводів, які спрацьовують у разі потрапляння людини під дію струму.

7 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

7.1 Технологія виготовлення деталі

Цей розділ присвячений визначенню технологічного процесу виготовлення деталі, що використовується як елемент черв'яка екструдера [3], а також вибору оптимального обладнання для виконання окремої технологічної операції. У ході проєктування технології виготовлення накінецьника черв'яка, що експлуатується в умовах високотемпературного середовища, аналізуються методи формування заготовки, етапи підготовки до обробки, а також підбираються відповідні інструменти та верстатне оснащення [16].

З огляду на те, що до деталі не висуваються жорсткі вимоги щодо точності та чистоти обробки поверхні, її виготовлення передбачено здійснювати на токарному верстаті загального призначення. Як вихідний матеріал використовується сталь марки **40ХН2МА**, яка характеризується доброю оброблюваністю різанням. Для виготовлення обрана заготовка діаметром **43 мм**, що відповідає параметрам деталі та умовам її подальшої механічної обробки.

7.2 Вибір пристосування

Виробничий процес виготовлення накінецьника черв'яка передбачає виконання ряду технологічних операцій, серед яких ключову роль відіграє **токарна обробка**, що забезпечує необхідну точність геометричних параметрів деталі.

У якості заготовки використовується конічний відрізок діаметром **Ø43 мм**, виготовлений із сталі 40ХН2МА. Для надійного кріплення заготовки в процесі механічної обробки застосовується **трикулачковий токарний патрон**, який забезпечує швидке центроване встановлення й фіксацію деталі. Такий тип пристрою дозволяє досягти стабільності обробки та дотримання заданих розмірів відповідно до креслення.

7.3 Опис конструкції й дія роботи пристрою

Токарний патрон є важливою складовою частиною верстата, призначеною для надійного закріплення заготовки на шпинделі під час обробки. Його конструкція забезпечує швидке встановлення деталі та утримання з високою точністю.

Основні елементи патрона:

1. корпус;
2. кулачки;
3. механізм синхронного руху кулачків;
4. спіральний диск;
5. рейковий механізм кулачка;
6. кріпильні болти кулачків.

Усі структурні елементи зображені на рисунку 7.1.

Принцип дії токарного патрона полягає в наступному: за допомогою спеціального ключа активується механізм зведення кулачків (позиція 3), який обертає спіральний диск (позиція 4). Обертальний рух передається рейковому механізму (позиція 5), що, в свою чергу, переміщує кулачки (позиція 2) в напрямку до центру, здійснюючи затиск заготовки в робочому положенні.

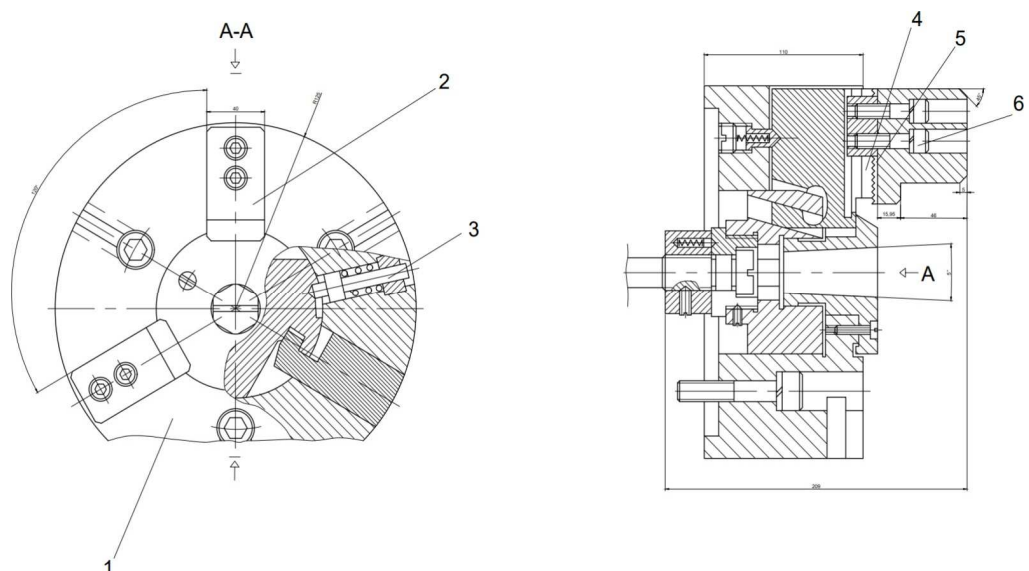


Рис. 7.1 -Патрон 3-ох кулачковий

7.4 Маршрут технологічного процесу обробки деталі

Виходячи з обраного типу заготовки та геометрії деталі, виконується вибір **технологічних баз**, що слугують основою для визначення послідовності обробки. При цьому важливо звести до мінімуму кількість операцій, переналагоджень та установів, що підвищує ефективність і точність виготовлення.

На даному етапі заготовка фіксується в трикулачковому патроні токарного верстата по зовнішньому діаметру $\varnothing 43$ мм. Торцева поверхня заготовки виконує роль **опорної бази**, тоді як зовнішній діаметр функціонує як **подвійна напрямна база**, утворюючи **чотири опорні точки**, що забезпечують стабільність положення деталі під час обробки (див. рис. 7.2).

1. Точити торець $\varnothing 43$ до потрібної форми на довжину 52 мм
2. Підрівняти оброблений торець

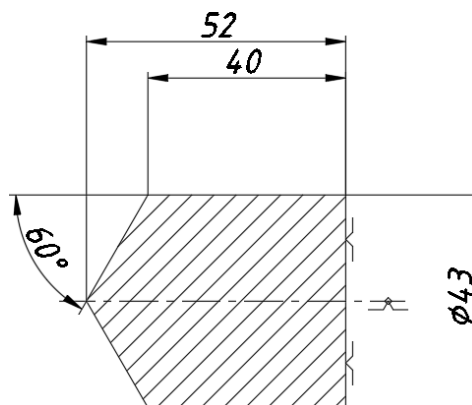


Рис 7.1 - Схема базування при Операції 010.

1. Токарна Операція 010.2.

Токарна Деталь встановлюються на поверхню діаметром 43мм та поверхня забезпечує чотири опорні точки (Рис 7.2).

1. Свердлення двох отворів $\varnothing 6$ свердлом
2. Розточування просвердленого отвору до довжини 26 мм

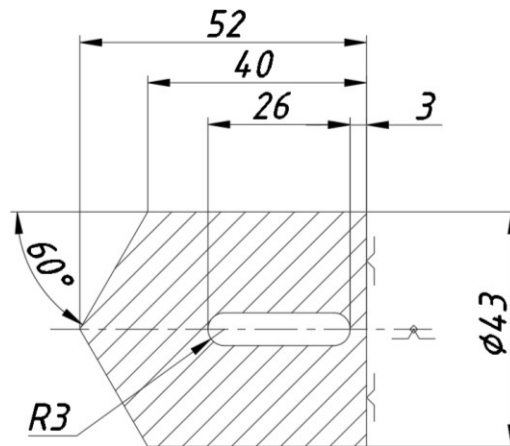


Рис 7.2 Схема базування при Операції 010.2. Токарна

Операція 015. Контрольна

Виконати перевірку обробки на найбільш відповідальних поверхнях деталі ,виконується на контрольному столі .

Готова деталь (Рис 7.3)

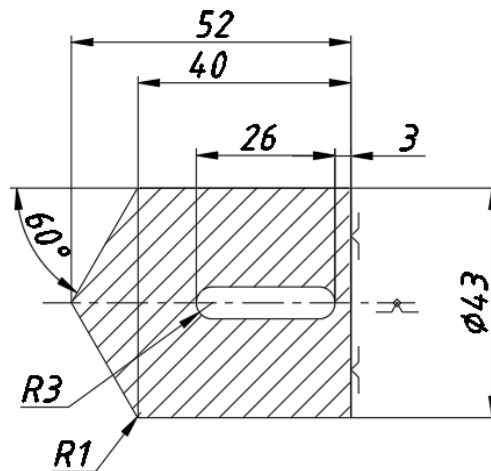


Рис 7.3 Готовий накінечник черв'яка Операція 005, 010. Токарна .

Для виконання операцій точіння використовується **токарно-гвинторізний верстат моделі 16К20**, який є універсальним металорізальним обладнанням. Його технічні параметри відповідають вимогам до обробки деталі типу «накінечник черв'яка».

Основні технічні характеристики верстата 16К20:

- максимальний діаметр обробки над станиною — **400 мм**;

- відстань між центрами — **710 / 1000 / 1400 / 2000 мм** (залежно від модифікації);
- максимально допустимий діаметр оброблюваної заготовки над супортом — **55 мм**;
- оброблюваний діаметр деталі — **до 43 мм**.

Верстат оснащений **24-ступеневою системою регулювання частоти обертання шпинделя** в межах **12,5...1600 об/хв**. Кінець шпинделя відповідає стандарту **1–6К** згідно з **ГОСТ 12695–72**. Розміри різця, що встановлюється в супорт — **26×26 мм**.

Подачі:

- **поздовжня подача:** 22 ступені, діапазон **0,05...2,8 мм/об**;
- **поперечна подача:** 24 ступені, діапазон **0,026...1,4 мм/об**.

Потужність приводу головного руху становить **10 кВт**, що забезпечує достатній запас енергії для обробки сталі типу 40ХН2МА.

7.5 Розрахунки

Розрахунок зусилля затиску. Під час обробки заготовки на неї впливає система сил (Рис 7.4). З одного боку, діють сили різання, а з іншого - сила затиску, яка протидіє цим силам. Враховуючи умову рівноваги моментів цих сил та коефіцієнт запасу, розраховуються необхідні затискне і вихідне зусилля.

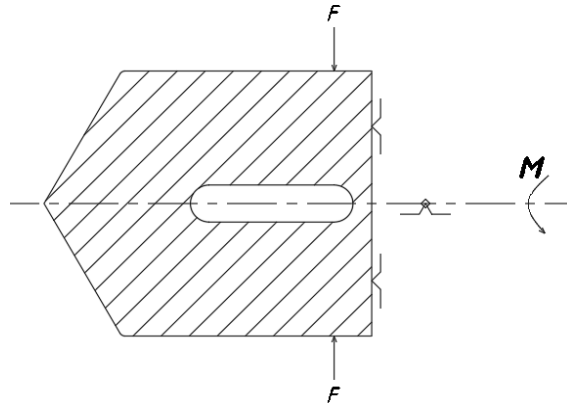


Рис 7.4 -Схема навантажень

Сумарний крутний момент від дотичної складової сили різання, яка прагне повернути заготовку в кулачках дорівнює :

$$M_{p'} = \frac{P_{z'} \cdot d_1}{2}$$

Повороту заготовки перешкоджає момент сили затиску, який визначається наступним чином:

$$M_{з'} = \frac{W' \cdot f \cdot d_2}{2}$$

З рівності $M_{p'}$ і $M_{з'}$ визначаємо необхідне зусилля затиску, що перешкоджає повороту заготовки в кулачках , де:

$$W' = \frac{4 \cdot K \cdot P_{z'} \cdot d_1}{f \cdot d_2}$$

$d_1 = 43\text{мм}$, $d_2 = 43\text{мм}$, $P_z = 1091.6\text{Н}$, $f = 0,4$ - Для розрахунку W'

$K = 1,8$

$$W' = \frac{4 * 1,8 * 1091,6 * 43}{0,4 * 43} = 19648 \text{ Н}$$

- Для розрахунку W'' $K = 2,52$ Сила P прагне вивернути заготовку з кулачків. Даному моменту перешкоджає момент від сили затиску ----

$$W'' = \frac{1,5 * 850 * 2,52 * 52}{0,4 * 43} = 9714 \text{ Н}$$

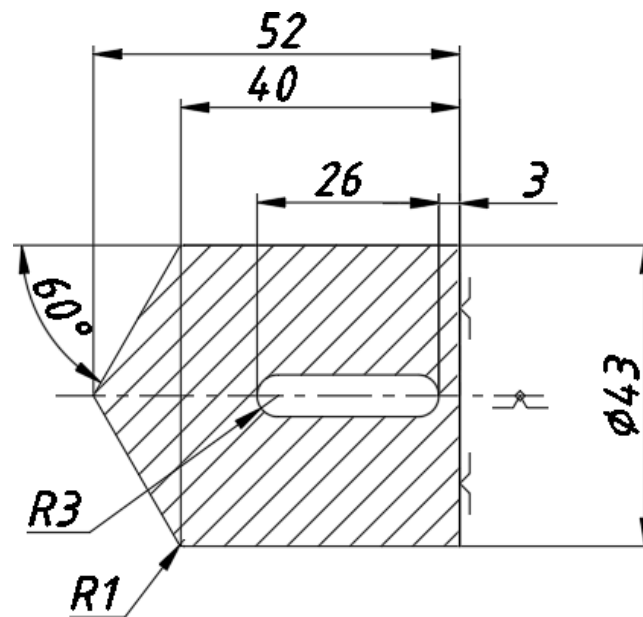
Необхідна сила затиску дорівнює:, де : $d_2 = 43\text{мм}$, $P_y = 850\text{Н}$, $f = 0,4$, $l = 52\text{мм}$, $K = 2,52$

7.6 Висновки до розділу

У процесі розробки технологічного процесу виготовлення накінецьника черв'яка було виконано наступне:

- Проаналізовано призначення накінецьника черв'яка та її конструктивні особливості.
- Обґрунтовано технологічність накінецьника та заготовки.
- Вибрано метод виготовлення заготовки.
- Розроблено маршрут виготовлення накінецьника.
- Підібрано моделі металорізальних верстатів, пристрої та інструменти.
- Виконано графічне зображення технологічного процесу виготовлення деталі.
- Заповнено маршрутну карту (МК), операційну карту (ОК) та карту ескізів (КЕ).

Дубл.										
Взамін.										
Підпис							Зм	Ар	Нодок.	Підпис
Розробив	Підмурняк			КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІХФ					015	
Перевірів	Борщук									
Н. контр.				Накінечник					Н	



KE

Обробка різанням

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даному дипломному проекті проведено всебічне дослідження черв'яка та технологічної лінії для виробництва плівки, в якій цей черв'як застосовується. Було виконано параметричні, кінематичні та міцнісні розрахунки для підтвердження працездатності та надійності конструкції машини. Результати аналізу та розрахунків в програмі *ANSYS* показали, що модернізований черв'як екструдера відповідає вимогам щодо експлуатаційної надійності та ефективності.

Проведений літературно-патентний огляд дозволив обґрунтувати вибір патенту на вдосконалення накінецьника черв'яка, що забезпечує осьовий рух та можливість регулювання пружного елемента. Це вдосконалення забезпечує згладжувальні пульсації потоку розплаву на виході з екструдера та більш стабільну роботу екструзійної системи, підвищуючи її ефективність.

Окрім технічних аспектів, у проекті також розглянуто питання охорони праці, що є критично важливими для безпечної експлуатації обладнання. Запропоновані заходи щодо покращення умов праці та зниження ризиків травматизму сприятимуть підвищенню загальної безпеки виробництва.

Був виконаний розділ машинобудування в якому було обрано всі пристосування й етапи виготовлення деталі.

Створений алгоритм розрахунків й програма в C++, яка показує точність розрахунків

За результатами роботи також було зроблено доповідь на всеукраїнській конференції та надруковано тези.

Загалом, дипломний проект демонструє високий рівень технічної підготовки, здатність до аналізу та вирішення складних інженерних задач, а також вміння враховувати екологічні та безпекові аспекти виробництва. Результати проекту можуть бути успішно впроваджені в промисловість для підвищення ефективності та якості виробництва полімерних матеріалів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сокольський О. Л., Мікульонок І. О. Моделювання обладнання і процесів перероблення полімерних матеріалів методом екструзії: монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 262 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37481>
2. Проектування формуючих пристроїв обладнання для переробки пластмас : навч. посіб. / О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 148 с.
3. Патент UA93385 Ukraine, №U201404917, МПК В29С 17/00. Черв'як екструдера, Мікульонок І.О; заяв. 08.05.2014, опубл. 26.09.2014
4. Патент UA21056 Ukraine, № U201003726, МПК В29С 48/40. Черв'як екструдера, Возна. А.С., Мікульоно І.О., Швед Д.М.; заяв. 27.03.2010, опубл. 11.10.2010
5. Патент UA47082 Ukraine, № U200610309, МПК В29С 47/60 В30В 11/ 22. Черв'як екструдера, Винографов Є.Ю, Мікульонок І.О; заяв. 27.09.2006, опубл. 15.02.2007
6. Патент UA3799 Ukraine, № U2004031959, МПК В29С 47/00. Черв'як екструдера, Мікульонок І.О.; заяв. 16.03.2004, опубл. 15.12.2004
7. Патент UA53479 Ukraine, № U201003726, МПК В29В 7/00. Черв'як екструдера, Мікульонок І.О., Швед Д.М., Швед М.П; заяв. 31.03.2010, опубл. 11.10.2010
8. Витвицький В. М., Мікульонок І. О. Моделювання процесу живлення черв'ячного екструдера полімерною сировиною. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 136 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41177>
9. Патент UA90401 Ukraine, № U 2013 14930, МПК В29В 7/60. Черв'як екструдера, Мікульонок І.О., Сівецький В.І., Сокольський О.Л., Кушнір М.С.; заяв. 19.12.2013, опубл. 26.05.2014
10. 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/123456789/26367>

11. Сокольський О. Л., Мікульонок І. О. Моделювання обладнання і процесів перероблення полімерних матеріалів методом екструзії: монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 262 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37481>

12. Мікульонок І.О. Виготовлення обладнання хімічних виробництв : підруч. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 236 с. URL:: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50358>

13. Mikulionok I. O. Classification of Extruder Filters for Processing Polymeric Materials and Rubber Mixtures (Survey of Designs) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 58, N 3–4. P. 248–255. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01082-4>

14. Мікульонок І. О. Моделювання обладнання технологічних ліній для перероблення пластмас і гумових сумішей на базі валкових машин : монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 243 с. URL:: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37520>

15. Охорона навколишнього середовища на підприємстві – один з факторів безпечних умов праці. Доступ з екрану: https://bmr.gov.ua/index.php?id=800000126&tx_news_pi1%5Bnews%5D=8539&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=982392b12f4386f94eb5fc4ac9245eea

16. Електродвигун Аир180М4 30 кВт 1500 об/мин ІМ1001. Доступ з екрану: <https://khvent.com.ua/ua/p1262356801-elektrodivigatel-air180m4-kvt.html>

17. Мікульонок І. О. Основні методи використання гумовмісних відходів // Хімічна промисловість України. 2001. № 5. С. 53–58.

18. Мікульонок І.О. Інтелектуальна власність та патентознавство : підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. 248 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31664>

19. Сівецький В.І., Щербина В.Ю., Гондляр О.В. Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання. Лінії для виготовлення листових і профільних полімерних виробів [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. – 113 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45732>

ДОДАТКИ

Додаток 1 текст програми

(програма складена на мові програмування C++)

```
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <sstream>
#include <iomanip>
#include <cmath>

using namespace std;

int main()
{
    ofstream out_data;
    stringstream data;
    stringstream data2;
    out_data.open("out_data.txt");
    double const pi = 3.14;
    double const i = 3.7;
    double const Lax = 150;
    double n;
    cout << "D = "; cin >> n;
    double D = n;
    cout << "L/D = "; cin >> n;
    double LD = n;
    cout << "t = (0,8...1,2) * D" << endl; cin >> n;
    double t = n * D;
    cout << "t = " << t << " mm" << endl;
    cout << "t = "; cin >> t;
    data << "t = " << t << " mm" << endl;
    double fi = atan(t / (3.14 * D));
    cout << "fi = " << fi << endl;
    cout << "fi = "; cin >> fi;
    data << "fi = " << fi << endl;

    cout << "e = (0,06...0,12) * D" << endl; cin >> n;
```

```

double e = n * D;
cout << "e = " << e << " mm" << endl;
cout << "e = "; cin >> e;
data << "e = " << e << " mm" << endl;
cout << "delta = (0,002...0,003) * D" << endl; cin >> n;
double delta = n * D;
cout << "delta = " << delta << " mm" << endl;
cout << "delta = "; cin >> delta;
data << "delta = " << delta << " mm" << endl;
cout << "h1 = (0,12...0,16) * D" << endl; cin >> n;
double h1 = n * D;
cout << "h1 = " << h1 << " mm" << endl;
cout << "h1 = "; cin >> h1;
data << "h1 = " << h1 << " mm" << endl;
double h3 = 0.5 * (D - sqrt(pow(D, 2) - ((4 * h1) / i) * (D - h1)));
cout << "h3 = " << h3 << " mm" << endl;
cout << "h3 = "; cin >> h3;
data << "h3 = " << h3 << " mm" << endl;
double d1 = D - 2 * h1;
double d3 = D - 2 * h3;
cout << "d1 = " << d1 << " mm" << endl;
data << "d1 = " << d1 << " mm" << endl;
cout << "d3 = " << d3 << " mm" << endl;
data << "d3 = " << d3 << " mm" << endl;
double Lrob = 22 * D;
cout << "Lrob = " << Lrob << " mm" << endl;
data << "Lrob = " << Lrob << " mm" << endl;
cout << "Lzav = (0,26...0,35) * Lrob" << endl; cin >> n;
double Lzav = n * Lrob;
cout << "Lzav = " << Lzav << " mm" << endl;
cout << "Lzav = "; cin >> Lzav;
data << "Lzav = " << Lzav << " mm" << endl;

cout << "Lat = (0,2...0,35) * Lrob" << endl; cin >> n;

```

```

double Lst = n * Lroh;
cout << "Lst = " << Lst << " mm" << endl;
cin >> Lst;
data << "Lst = " << Lst << " mm" << endl;
double Ldoz = Lroh - Lzav - Lst;
cout << "Ldoz = " << Ldoz << " mm" << endl;
data << "Ldoz = " << Ldoz << " mm" << endl;
cout << "Lvidb = (0,1...0,5) * D" << endl; cin >> n;
double Lvidb = n * D;
cout << "Lvidb = " << Lvidb << " mm" << endl;
cin >> Lvidb;
data << "Lvidb = " << Lvidb << " mm" << endl;
double L = Lroh + Lev + Lvidb;
cout << "L = " << L << " mm" << endl;
data << "L = " << L << " mm" << endl;
double h2 = h1 - ((h1 - h3) / L) * (L - Lst);
cout << "h2 = " << h2 << " mm" << endl;
data << "h2 = " << h2 << " mm" << endl;
double d2 = D - 2 * h2;
cout << "d2 = " << d2 << " mm" << endl;
data << "d2 = " << d2 << " mm" << endl;
double nkr = 42.2 / (60 * sqrt(D / 1000));
cout << "nkr = " << nkr << " c^-1" << endl;
data << "nkr = " << nkr << " c^-1" << endl;
cout << "nr = (0,2...0,7) * nkr" << endl; cin >> n;
double nr = n * nkr;
cout << "nr = " << nr << " c^-1" << endl;
data << "nr = " << nr << " c^-1" << endl;
cout << endl << data.str();
out_data << data.str();
out_data.close();

```

}

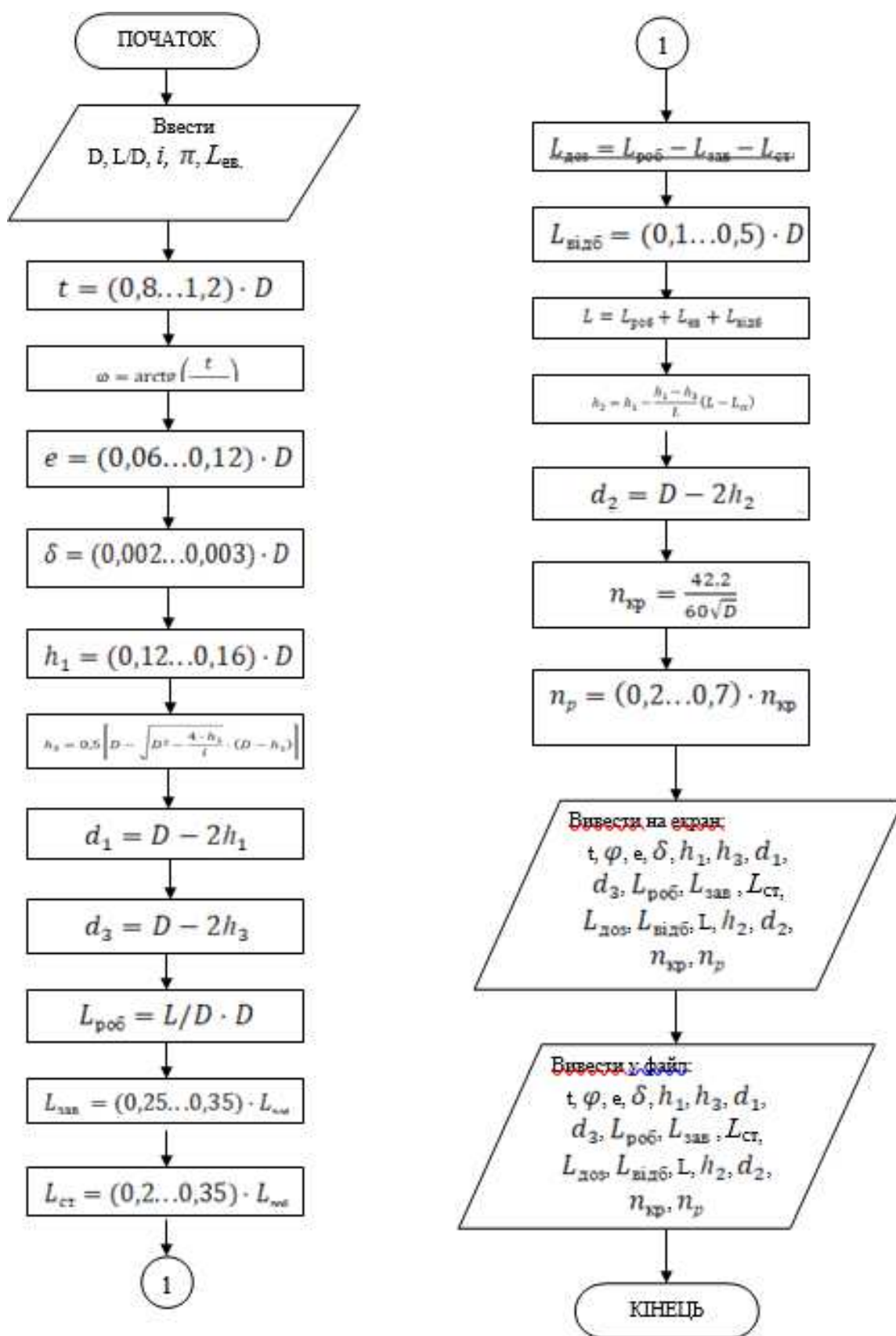


out_data.txt – Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

```
t = 63 mm  
fi = 0.31  
e = 7 mm  
delta = 0.15 mm  
h1 = 8 mm  
h3 = 2 mm  
d1 = 47 mm  
d3 = 59 mm  
Lrob = 1386 mm  
Lzav = 345 mm  
Lst = 280 mm  
Ldoz = 761 mm  
Lvidb = 30 mm  
L = 1566 mm  
h2 = 3.0728 mm  
d2 = 56.8544 mm  
nkr = 2.80215 c-1  
nr = 0.980751 c-1
```

Додаток 3 - Схема алгоритму програми



Додаток 4 Таблиця ідентифікаторів

Позначення за текстом	Позначення у програмі	Значення	Розмірність
D	D	63	мм
L/D	LD	22	мм
t	t	Розраховується	мм
φ	fi	Розраховується	-
e	e	Розраховується	мм
δ	delta	Розраховується	мм
h_1	h1	Розраховується	мм
h_3	h3	Розраховується	мм
i	i	3.7	-
d1	d1	Розраховується	мм
d3	d3	Розраховується	мм
$L_{\text{роб}}$	Lrob	Розраховується	мм
$L_{\text{зав}}$	Lzav	Розраховується	мм
$L_{\text{ст}}$	Lst	Розраховується	мм
$L_{\text{доз}}$	Ldoz	Розраховується	мм
$L_{\text{ев}}$	Lev	150	мм
$L_{\text{відб}}$	Lvidb	Розраховується	мм
L	L	Розраховується	мм
h_2	h2	Розраховується	мм
d2	d2	Розраховується	мм
$n_{\text{кр}}$	nkr	Розраховується	с ⁻¹
$n_{\text{р}}$	nr	Розраховується	с ⁻¹
π	pi	3.14	-

Визначення достовірності результатів виконання дипломних проєктів

Васильченко Г.М., к.т.н., доц., Підмуняк Д.О., студ., Буканов М.Е., студ.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Запропоноване дослідження було зосереджено на визначенні критичних характеристик установки, які необхідно зберегти: енергоспоживання, масогабаритні показники, термін служби та функціональна універсальність. Це дало змогу уникнути ситуації, коли зміни в одному вузлі негативно вплинуть на загальну роботу системи.

Ключові слова: модернізація, екструдер, продуктивність, енергоефективність.

У процесі виконання дипломного проєкту на кафедрі хімічної технології та спеціальних матеріалів було обрано тему, присвячену модернізації одного з вузлів існуючої технологічної установки – екструдера [1]. Мета роботи полягала у вдосконаленні конструкції з метою підвищення її ефективності без порушення ключових експлуатаційних параметрів. Для досягнення цілі було проведено глибокий патентний пошук, аналіз існуючих аналогів та вибір оптимального напрямку модернізації.

На початковому етапі дослідження увагу було зосереджено на визначенні критичних характеристик установки, які необхідно зберегти: енергоспоживання, масогабаритні показники, термін служби та функціональна універсальність. Це дало змогу уникнути ситуації, коли зміни в одному вузлі негативно вплинуть на загальну роботу системи. Наприклад, при розробці нового профілю шнека екструдера особливу увагу приділено балансу між продуктивністю та енергоефективністю. Розрахунки показали, що запропоновані зміни дозволяють зменшити питоме енергоспоживання на 8–10% без збільшення маси конструкції або скорочення терміну експлуатації.

У процесі роботи було виконано порівняльний аналіз кількох варіантів модернізації, у тому числі з використанням нових матеріалів і геометричних рішень. Важливим етапом став економічний обґрунтування: розрахунок окупності та вартість реалізації кожної з пропозицій. Це дозволило відібрати рішення, які не лише технічно реалізовані, а й економічно доцільні для промислового застосування.

Особливу увагу приділено узгодженню нововведень з існуючими стандартами та умовами експлуатації. Наприклад, запропонована конструкція шнека забезпечує сумісність з різноманітними типами полімерних матеріалів, що розширює функціональні можливості установки без змін у загальній схемі. Також було створено прототип для лабораторного тестування, який підтвердив розрахункові показники стійкості та надійності [2].

У висновку слід зазначити, що робота демонструє системний підхід до модернізації технологічного обладнання. Завдяки комплексному аналізу та увазі до ключових показників вдалося запропонувати рішення, яке поєднує інноваційність, економічну ефективність та технічну реалізацію. Цей підхід може бути рекомендований для впровадження в подібних проєктах, де важливо зберігати гармонію між прогресом і стабільністю.

Висновки. Робота демонструє системний підхід до модернізації технологічного обладнання.

Перелік посилань

1. Основи проєктування одночерв'ячних екструдерів. Навч. посіб. / І.О. Микульонюк та ін. – Київ: НТУУ «КПІ» 2015 – 200с.
2. Надійність технологічних систем. Посібник-практикум / Н.І. Болтянська. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. 162 с.

[illegible]

[illegible]