

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

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ **Олександр**
Сокольський

«_____» _____ 2026 р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою Інжиніринг обладнання
виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

на тему: Гумопереробна машина типу МЧХ-160 з модернізацією черв'яка

Студент (-ка) IV к, групи ЛП-21	Шевцов Артем Олексійович
(шифр групи)	(прізвище, ім'я, по батькові)
(підпис)	

Керівник проекту:	Асистент , Гур'єва Л.Н.
(вчена ступінь, звання, прізвище, ініціали)	
(підпис)	

Консультанти з питань		
МОДЕРНІЗАЦІЇ:	д.т.н., проф. Щербина В.Ю.	_____
ТЕХ. МАШ.:	ст. викл. Борщик С.О.	_____
ОХОРОНИ ПРАЦІ:	ст. викл. Ковтун А.І.	_____
РЕЦЕНЗЕНТ _____		

Засвідчую, що у цьому
дипломному проекті немає
запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.
Студент (-ка)

Київ 2026 рік

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

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології

Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 133 Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Шевцову Артему Олексійовичу

1. Тема проекту: « Гумопереробна машина типу МЧХ-160 з модернізацією черв'яка », керівник проекту Гур'єва Людмила Наумівна, асистент, затверджені наказом по університету від 20.05.2026 р. № 1653-с
2. Термін подання студентом проекту 16.06.2026 р.
3. Вихідні дані до проекту: Діаметр черв'ячного вала – 160 мм, довжина черв'яка – 2520мм, частота обертання черв'яка – 30 об/хв , робочий тиск у головці машини – 20 температурний режим роботи – 40-120 °С, тип приводу – електродвигун з редуктором, система охолодження – водяна, режим роботи – безперервний, встановлена потужність – 245 кВт, ККД редуктора – 0,85 , загальний ККД – 0,8, продуктивність при в'язкості за Муні до 75 од. – 775 кг/год.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. 1. Призначення та галузь застосування машини МЧХ-160. 2. Технічна характеристика машини МЧХ-160. 3. Опис конструкції базового черв'яка, його основних елементів та принципу роботи. 4. Літературно-патентний огляд конструкцій черв'яків екструзійних машин та обґрунтування наряду модернізації. 5. Розрахунок параметрів модернізованого черв'яка та перевірка його працездатності. 6. Охорона праці та навколишнього середовища. 7. Технологія машинобудування. Загальні висновки. Список

використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу:

- 1) Технологічна схема лінії переробки гумових сумішей.
- 2) Загальний вигляд машини МЧХ-160.
- 3) Креслення вузла з базовим черв'яком.
- 4) Робоче креслення модернізованого черв'яка.
- 5) Плакат виконання 3D-моделі модернізованого черв'яка.
- 6) Плакат виконання числового розрахунку модернізованого черв'яка.

6. Консультанти розділів проекту

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

7. Дата видачі завдання - 20.05.2026

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вступ . Призначення та галузь застосування виробу, який проектується	20.05.2026-23.05.2026	
2	Технічна характеристика базової машини	23.05.2026-26.05.2026	
3	Опис базової конструкції, її основних частин та принципу дії	26.05.2026-30.05.2026	
4	Літературний та патентний огляд	30.05.2026-31.05.2026	
5	Виконання розрахунків	31.05.2026-04.06.2026	
6	Виконання креслення модернізації	04.06.2026-10.06.2026	
8	Виконання розділів ТМ та ОП	10.06.2026-13.06.2026	
9	Загальні висновки	13.06.2026-14.06.2026	

Студент

Керівник проекту

ШЕВЦОВ Артем

ГУР'ЄВА Людмила

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт на тему «Гумопереробна машина типу МЧХ-160 з модернізацією черв'яка» містить 102 сторінок пояснювальної записки, 43 рисунків, 3 таблиць, 5 додатків та 24 джерел інформації.

Основою розробки є гумопереробна машина типу МЧХ-160, яка використовується для переробки гумових сумішей. У роботі розглянуто можливість удосконалення основного робочого органу машини – черв'яка.

Метою роботи є модернізація конструкції черв'яка для підвищення ефективності процесу переробки гумових сумішей та покращення експлуатаційних характеристик обладнання.

У дипломному проєкті проведено аналіз конструкції та принципу роботи машини МЧХ-160, виконано параметричні, теплові та міцнісні розрахунки. Визначено основні робочі характеристики обладнання, зокрема продуктивність, тиск суміші та потужність приводу.

На основі виконаних досліджень запропоновано модернізовану конструкцію черв'яка з удосконаленою робочою ділянкою. Для оцінки ефективності прийнятого рішення створено тривимірні моделі базового та модернізованого черв'яків у середовищі SOLIDWORKS і проведено числове моделювання в програмному комплексі ANSYS.

У розділі охорони праці розглянуто заходи щодо забезпечення безпечної експлуатації гумопереробної машини та зниження впливу небезпечних виробничих факторів.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання запропонованої модернізації для підвищення ефективності роботи гумопереробного обладнання.

Ключові слова: ГУМОПЕРЕРОБНА МАШИНА, МЧХ-160, ЧЕРВ'ЯК, МОДЕРНІЗАЦІЯ ЧЕРВ'ЯКА, ГУМОВА СУМІШ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, ЕКСТРУЗІЯ, ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК, МІЦНІСТЬ, SOLIDWORKS, ANSYS.

ABSTRACT

The diploma project entitled “MCH-160 Rubber Processing Machine with Screw Modernization” contains 102 pages of explanatory notes, 43 figures, 3 tables, 5 appendices and 24 references.

The project is based on the MCH-160 rubber processing machine used for rubber compound processing. Particular attention is paid to the improvement of the machine's main working element – the screw.

The aim of the project is to modernize the screw design in order to improve the efficiency of rubber compound processing and enhance the operational performance of the equipment.

The diploma project includes an analysis of the machine design and operating principle, as well as parametric, thermal and strength calculations. The main operating characteristics of the machine, including productivity, pressure and drive power, were determined.

Based on the obtained results, a modernized screw design with an improved working section was developed. Three-dimensional models of the basic and modernized screws were created in SOLIDWORKS, and numerical simulations were carried out using the ANSYS software package.

The occupational safety section considers measures aimed at ensuring safe operation of the rubber processing machine and reducing the impact of hazardous production factors.

The practical value of the project lies in the possibility of applying the proposed modernization to improve the performance of rubber processing equipment.

Keywords: RUBBER PROCESSING MACHINE, MCH-160, SCREW, SCREW MODERNIZATION, RUBBER COMPOUND, PRODUCTIVITY, EXTRUSION, THERMAL ANALYSIS, STRENGTH ANALYSIS, SOLIDWORKS, ANSYS.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

1. Умовні позначення та символи (Латинська абетка)

D – зовнішній діаметр черв'яка, мм;
 d – внутрішній діаметр черв'яка, мм;
 L – довжина черв'яка, мм;
 $L_{роб}$ – довжина робочої частини циліндра, мм;
 $L_{зав}$ – довжина зони завантаження, мм;
 $L_{стис}$ – довжина зони стиску, мм;
 $L_{доз}$ – довжина зони дозування, мм;
 S – крок витка черв'яка, мм;
 b – товщина витка черв'яка, мм;
 h – глибина гвинтового каналу, мм;
 F – площа поперечного перерізу, m^2 ;
 V – об'єм робочого каналу, m^3 ;
 Q – продуктивність машини, кг/год;
 N – потужність приводу, кВт;
 P – тиск суміші в головці, МПа;
 A – осьове зусилля, Н;
 K – загальне осьове навантаження, Н;
 T – сила тертя, Н;
 r – середній радіус витка черв'яка, м;
 n – частота обертання черв'яка, об/хв;
 i – кількість заходів черв'яка;
 J – момент інерції перерізу, m^4 ;
 F_c – площа поперечного перерізу черв'яка, m^2 .

2. Умовні позначення та символи (Грецька абетка)

α – кут підйому гвинтової лінії черв'яка, град;
 β – коефіцієнт заповнення міжвиткового простору;

γ – питома вага гумової суміші, кг/м³;
 η – коефіцієнт корисної дії приводу;
 λ – гнучкість черв'яка;
 μ – коефіцієнт закріплення;
 ρ – густина матеріалу, кг/м³;
 ρ_t – кут тертя гумової суміші по сталі;
 σ – еквівалентне напруження (за Мізесом), МПа;
 τ – дотичне напруження, МПа.

3. Аббревіатури та скорочення

МЧХ – машина черв'ячна гумопереробна;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
МСЕ – метод скінченних елементів;
НДС – напружено-деформований стан;
ЗІЗ – засоби індивідуального захисту;
ДСТУ – державний стандарт України;
НПАОП – нормативно-правовий акт з охорони праці;
ПУЕ – правила улаштування електроустановок;

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБУ, ЯКИЙ ПРОЕКТУЄТЬСЯ.....	10
2. ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОЇ МАШИНИ.....	11
3. ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ.....	12
3.1. Опис базової конструкції.....	12
3.2 Основні частини конструкції.....	14
3.3 Принцип дії гумопереробної машини.....	14
4. ЛІТЕРАТУРНИЙ ТА ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ.....	16
4.1 Літературно-патентний огляд варіантів модернізації машини МЧХ-160.....	16
4.2 Обґрунтування вибору варіанту модернізації черв'яка в гумопереробній машині.....	20
5. РОЗРАХУНКИ.....	23
5.1 Параметричні розрахунки.....	23
5.2 Визначення продуктивності черв'ячної машини.....	25
5.3 Визначення тиску суміші в головці.....	26
5.4 Визначення потужності приводу черв'ячної машини.....	28
5.5. Розрахунок черв'яка на міцність.....	29
5.5.1. Розрахунок черв'яка на міцність.....	29
5.5.2 Розрахунок черв'ячного вала на стійкість.....	33
5.6. Тепловий розрахунок охолодження черв'яка.....	34
5.6.1 Розрахунок базового черв'яка.....	34
5.6.2 Розрахунок для модернізованого черв'яка.....	38
5.7. Проектування базового черв'яка в SolidWorks.....	40
5.8 Проектування модернізованого черв'яка.....	45
5.9. Числове моделювання базового ексцентрикового валу.....	49
5.9.1 Розрахунок базового черв'яку.....	49
5.9.2 Розрахунок модернізованого черв'яку.....	56
6. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	61
7. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ.....	66
7.1 Опис та призначення деталі.....	66
7.2 Вибір та розрахунок.....	67
7.3 Призначення пристосування для обробки деталі.....	73
ВИСНОВКИ.....	75
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	78
ДОДАТКИ.....	81

ЛП21.167242.000-70ПЗ

					ЛП21.167242.000-70ПЗ								
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата									
Розробив		Шевцов А.О..			Гумопереробна машина типу МЧХ-160 з модернізацією черв'яка					Літ.		Аркуш	Аркушів
Перевірив		Гур'єва Л.Н.										1	1
										КПІ ім. Ігоря Сікорського ⁸			
Н. контр.													
Затвердив		Сокольський О.Л.											

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку промисловості важливе значення має підвищення ефективності технологічних процесів та вдосконалення обладнання, що використовується для виробництва продукції різного призначення. Особливе місце серед таких процесів займає переробка гумових сумішей, оскільки від якості її виконання значною мірою залежать експлуатаційні характеристики готових гумотехнічних виробів.

Для здійснення процесів транспортування, ущільнення та формування гумових сумішей широко застосовуються черв'ячні машини. Вони забезпечують безперервну подачу матеріалу та створюють необхідні умови для його подальшої переробки. Ефективність роботи такого обладнання визначається багатьма факторами, серед яких важливу роль відіграє конструкція черв'яка, що безпосередньо бере участь у переміщенні та перемішуванні матеріалу.

Підвищення продуктивності обладнання та покращення якості готової продукції часто досягається шляхом модернізації окремих вузлів і деталей. Одним із найбільш доцільних напрямів удосконалення черв'ячних машин є зміна конструкції робочого органу, що дозволяє покращити умови проходження матеріалу через машину та забезпечити більш стабільний перебіг технологічного процесу.

Гумопереробна машина типу МЧХ-160 є представником обладнання, яке використовується для переробки гумових сумішей у виробництві гумотехнічних виробів. Незважаючи на достатню ефективність базової конструкції, існують можливості її подальшого вдосконалення за рахунок модернізації черв'яка та оптимізації його робочих параметрів.

У межах дипломного проєкту виконано аналіз конструкції машини МЧХ-160, проведено необхідні інженерні розрахунки та запропоновано модернізовану конструкцію черв'яка. Для підтвердження працездатності запропонованого рішення розроблено тривимірні моделі, а також виконано числове моделювання із використанням сучасних програмних засобів інженерного аналізу.

1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБУ, ЯКИЙ ПРОЕКТУЄТЬСЯ.

Гумопереробна машина типу МЧХ-160 призначена для пластикації, перемішування та підготовки гумових сумішей до подальших технологічних операцій[1]. У процесі роботи обладнання забезпечує одержання однорідної маси з необхідними властивостями, що є важливою умовою виготовлення якісної гумотехнічної продукції.

Функціонування машини базується на безперервному переміщенні матеріалу вздовж робочого циліндра за допомогою черв'яка. Під час проходження через робочу зону гумова суміш ущільнюється, перемішується та зазнає пластикації, у результаті чого досягається рівномірний розподіл компонентів і покращуються її технологічні характеристики.

Обладнання даного типу застосовується на підприємствах гумової промисловості для виробництва автомобільних шин, ущільнювальних елементів, рукавів, транспортерних стрічок, технічних пластин, профілів та інших виробів із гумових композицій. Крім цього, машина може використовуватися на виробничих ділянках, пов'язаних із переробкою вторинної гумової сировини та приготуванням спеціалізованих сумішей різного складу.

До основних переваг гумопереробної машини МЧХ-160 належать безперервність технологічного процесу, стабільність режимів роботи, можливість обробки широкого спектра гумових сумішей та достатньо висока продуктивність. Конструкція обладнання дозволяє інтегрувати його до складу комплексних виробничих ліній, забезпечуючи узгоджену роботу з дозувальними пристроями, транспортними системами та подальшим технологічним обладнанням.

Завдяки поєднанню надійності, простоти експлуатації та ефективності переробки матеріалу машини типу МЧХ-160 залишаються затребуваними на сучасних підприємствах, що спеціалізуються на виготовленні гумотехнічних виробів різного призначення.

2. ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОЇ МАШИНИ

Технічні характеристики є основою для аналізу експлуатаційних можливостей машини, вибору оптимальних режимів її роботи та виконання інженерних розрахунків. Вони дають змогу визначити продуктивність обладнання, навантаження на черв'ячний вал, необхідну потужність приводу, особливості теплового режиму та допустимі умови експлуатації. Крім цього, наведені параметри використовуються для перевірки працездатності машини в заданих умовах і слугують вихідними даними під час виконання параметричних, теплових і міцнісних розрахунків у дипломному проєкті.

Технічна характеристика гумопереробної машини МЧХ-160

Таблиця 2.1

Діаметр черв'ячного вала мм.	160
Довжина черв'яка, мм.	2520
Частота обертання черв'яка, об/хв	30 (50 максимальна частота обертання)
Робочий тиск у головці МПа.	20
Температурний режим роботи °С	40–120
Тип приводу	електродвигун з редуктором
Система охолодження	водяна
Режим роботи	Безперервний
Встановлена потужність кВт.	245
ККД Редуктора	0,85
ККД Загальний	0,8
Продуктивність при в'язкості по Муні ≤ 75 од., кг/год	775

3. ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ

3.1. Опис базової конструкції

Машина МЧХ-160 виконана за одночерв'ячною схемою та має поздовжнє розташування основних вузлів [2]. Така компоновка забезпечує зручність розміщення машини у виробничому приміщенні та спрощує доступ до основних елементів під час технічного обслуговування. Конструкція машини розрахована на тривалу роботу в безперервному режимі з дотриманням стабільних технологічних параметрів.

Описуючи роботу машини МЧХ-160 (рис.3.1) , варто розпочати з її основної функції – перемішування, транспортування та обробки матеріалу за допомогою черв'яка всередині робочої камери. Кожна з деталей виконує важливу роль у забезпеченні безперебійної та ефективної роботи пристрою.

Основним елементом конструкції є корпус робочої камери 22, який формує замкнутий простір для переміщення матеріалу. Всередині нього обертається черв'як 9, що слугує основним робочим органом – він просуває матеріал уперед, забезпечуючи його транспортування. Зверху над корпусом розташований бункер-завантажувач 24, через який у камеру потрапляє матеріал. Цей бункер тісно з'єднаний із системою охолодження. Система охолодження черв'яка 23 відповідає за підтримку оптимальної температури під час роботи, що особливо важливо при переробці матеріалів, чутливих до перегріву. На виході з робочої камери встановлена приймальна воронка 20, через яку оброблений матеріал спрямовується далі – наприклад, у форму або на транспортер. Перед нею встановлено виштовхувач 1, який допомагає виводити матеріал із каналу, запобігаючи його накопиченню. Основу всієї машини формує рама 7, яка забезпечує міцність конструкції та підтримує всі інші вузли. До рами кріпиться бункер 21, що виконує роль резервуара для зберігання сировини до моменту її подачі у робочу зону.

Для герметичності конструкції використовуються різноманітні прокладки 10 і 15 та шайби 12 і 16, які розміщуються у місцях з'єднань деталей і не дають витікати матеріалу або охолоджуючій рідині. Також у з'єднаннях використовуються гвинти 18, шпильки 8 та гайки 6, 13, 14, що забезпечують надійне кріплення вузлів. Одним із важливих функціональних елементів є шарнір 17, що забезпечує певну рухливість або компенсацію при роботі агрегату, особливо якщо мають місце вібрації або теплові розширення. Для стабілізації конструкції застосовано також планки 2 і 4, які служать опорними або з'єднувальними елементами. У точках фіксації окремих деталей знаходиться штифт 3, який запобігає провороту або зміщенню. В результаті взаємодії всіх цих елементів машина МЧХ-160 функціонує як єдиний злагоджений механізм, здатний ефективно транспортувати та обробляти матеріали в умовах виробництва.

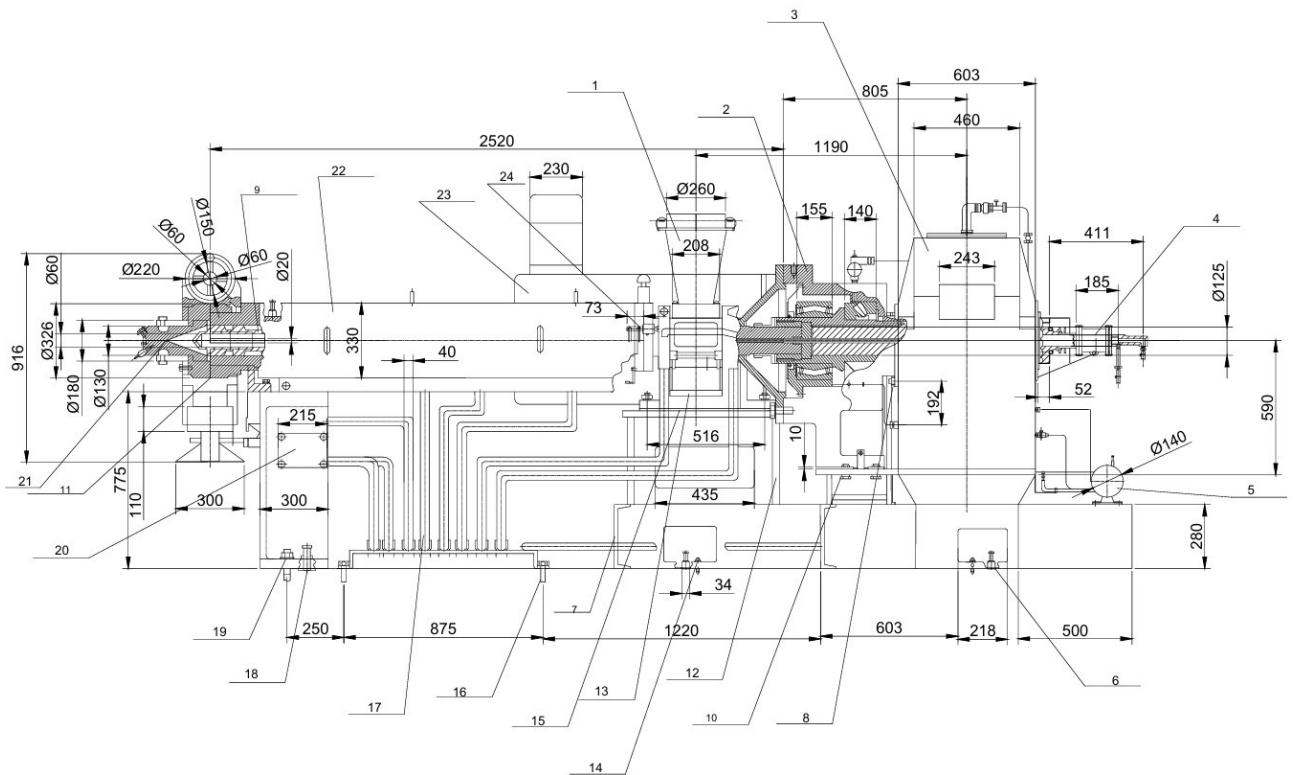


Рис.3.1 – Схема Машины МЧХ-160

3.2 Основні частини конструкції

Основними елементами конструкції є робочий циліндр, черв'як, завантажувальний бункер, привідний механізм, система охолодження, формувальна головка та опорна рама. Взаємодія цих вузлів забезпечує безперервний рух матеріалу, його ущільнення та підготовку до подальших технологічних операцій.

Завантажувальний бункер слугує для подачі сировини до робочої зони. Через нього матеріал надходить усередину циліндра, де захоплюється витками черв'яка та починає переміщуватися вздовж осі машини. Робочий циліндр виконує функцію напямної поверхні та одночасно сприймає механічні й теплові навантаження, що виникають у процесі експлуатації.

Центральним робочим елементом конструкції є черв'як [3], який відповідає за транспортування, ущільнення та перемішування гумової суміші. Його геометрія підібрана таким чином, щоб забезпечити рівномірний рух матеріалу, поступове зростання тиску та стабільний перебіг технологічного процесу без різких змін навантаження.

Обертання черв'яка здійснюється за допомогою електроприводу та редуктора, які передають необхідний крутний момент на вал. Для підтримання допустимого температурного режиму в конструкції передбачена система охолодження, що забезпечує відведення надлишкового тепла від робочих поверхонь і запобігає перегріванню обладнання.

3.3 Принцип дії гумопереробної машини

Принцип дії машини МЧХ-160 [4] ґрунтується на обертанні черв'ячного вала з регульованою частотою 30 об/хв (0,083–0,83 об/с), що забезпечує безперервний рух матеріалу вздовж корпусу машини.

1.Подача матеріалу

Матеріал подається через завантажувальний отвір у зону захоплення черв'яка. За рахунок гвинтової форми витків матеріал потрапляє в робочий канал між черв'яком і корпусом.

2. Транспортування та ущільнення

Під час обертання черв'ячного вала матеріал переміщується вздовж осі машини на довжині 2520мм, що для діаметра черв'яка 160 мм становить 2,56-3,2 м. У процесі руху відбувається поступове ущільнення матеріалу та зростання тиску.

3. Теплові процеси

Унаслідок тертя між матеріалом, черв'яком і корпусом виділяється тепло. Температурний режим підтримується в межах 40–120 °C за допомогою системи охолодження корпусу та черв'яка.

4. Формування та вихід матеріалу

У зоні формуючої головки створюється робочий тиск до 20 МПа, під дією якого матеріал проходить через канали головки та набуває заданої форми. Процес відбувається безперервно, що забезпечує стабільну роботу машини.

4. ЛІТЕРАТУРНИЙ ТА ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ

Метою літературно-патентного огляду є аналіз існуючих технологій, наукових джерел та патентних рішень у сфері переробки гуми для визначення найбільш ефективного та сучасного обладнання. Під час огляду здійснюється порівняння технічних характеристик, продуктивності, конструктивних особливостей і технологічних можливостей різних машин та ліній переробки. На основі проведеного аналізу обирається оптимальний варіант обладнання, який найбільше відповідає вимогам виробництва, забезпечує високу ефективність роботи, якість готової продукції та економічну доцільність використання.

4.1 Літературно-патентний огляд варіантів модернізації машини МЧХ-160

У патенті [5] розглядається конструкція черв'яка екструдера, призначеного для перероблення термопластичних полімерів, пластмас та гумових сумішей. Основною метою розробки є вдосконалення системи терморегулювання черв'яка шляхом забезпечення можливості керування температурою його робочої поверхні по всій довжині. Запропонована конструкція дозволяє покращити тепловий режим переробки матеріалу та розширити технологічні можливості обладнання.

На рисунку (4.1) зображено загальний вигляд черв'яка екструдера, де **1** – гвинтова нарізка, призначена для транспортування та ущільнення матеріалу, **2** – хвостовик зі шліцьовим з'єднанням, який забезпечує передачу крутного моменту від приводу.

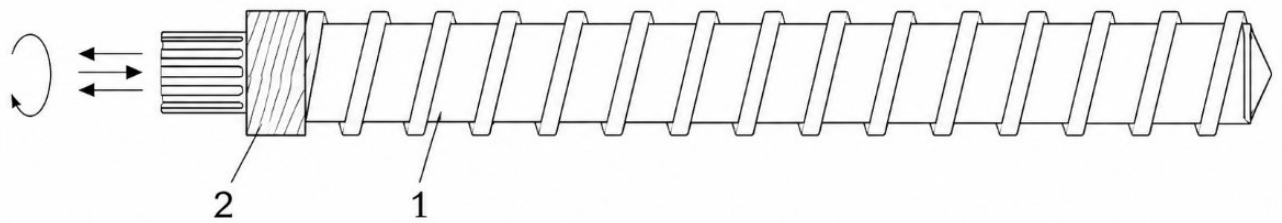


Рис. 4.1 - Черв'як екструдера виконаний у вигляді спорядженого гвинтовою нарізкою вала

Черв'як виконаний у вигляді вала з гвинтовою нарізкою та внутрішньою порожниною, в якій розміщено дві коаксіально-концентричні труби для підведення і відведення холодоагенту. Між зовнішньою трубою та стінкою порожнини встановлені герметичні кільцеві втулки, заповнені пористим матеріалом з легковипаровуваною рідиною різної температури кипіння, що забезпечує регулювання температури робочої поверхні черв'яка на окремих його ділянках.

У патенті [6] запропоновано вдосконалену конструкцію черв'яка екструдера з поперечними пазами на гребенях нарізки. Конструкція дозволяє покращити змішування компонентів полімерної або гумової суміші та зменшити зворотний потік матеріалу.

Черв'як (рис.4.2) екструдера містить вал 1 з послідовно розташованими хвостовиком 2, зонами живлення 3, стискання 4 та дозування 5, а також наконечником 6. На робочій поверхні виконана гвинтова нарізка 7, а на гребенях нарізки розташовані поперечні пази 8, скошені у напрямку хвостовика. Така конструкція забезпечує зменшення витoku матеріалу та підвищення продуктивності екструдера.

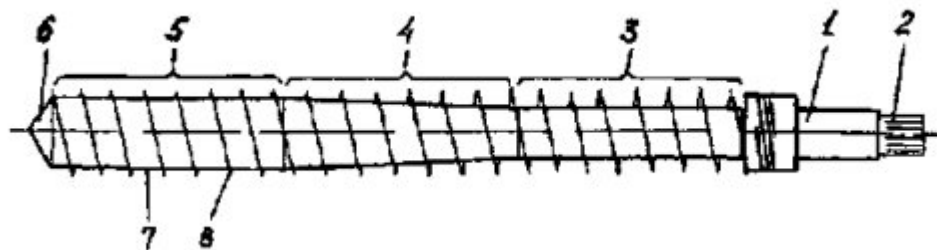


Рис. 4.2 - Черв'як екструдера для перероблення полімерних матеріалів

У даному патенті [7] описується черв'як екструдера з рухомим наконечником та системою компенсації коливань тиску. Конструкція забезпечує стабільний потік розплаву та покращує якість готової продукції.

Черв'як екструдера (рис.4.3) містить вал 1 з хвостовиком 2, робочою зоною 3 з гвинтовою нарізкою та наконечником 4. Наконечник оснащений пружним елементом 5 та встановлений в осьовому отворі 6 з можливістю зворотно-поступального руху. З боку хвостовика наконечник має шток 7 з поршнем 8, а в осьовому отворі встановлена дросельна шайба 9. Простір між поршнем і наконечником заповнений в'язкою рідиною, що забезпечує гасіння коливань тиску.

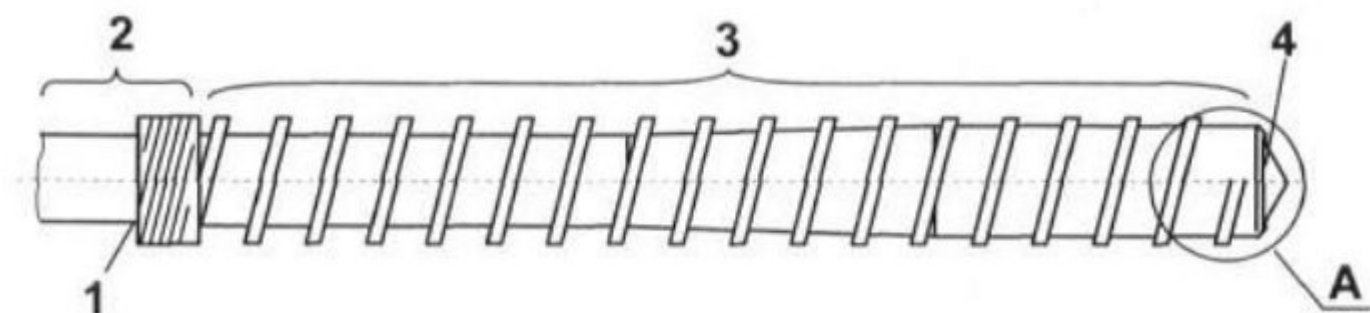


Рис. 4.3 - Черв'як екструдера

Патент [8] присвячений удосконаленню системи охолодження черв'яка екструдера. Основною метою є підвищення ефективності тепловіддачі та зменшення витрат охолоджувальної води.

Черв'як екструдера (рис.4.4) містить порожнисте осердя 1 з послідовно розташованими хвостовиком 2, оснащеною гвинтовою нарізкою робочою зоною 4 та наконечником 5. Робочу зону утворюють циліндрична ділянка з глибокою нарізкою 6, конічна ділянка 7 та циліндрична ділянка з неглибокою нарізкою 8. У внутрішній порожнині осердя 1 виконані поздовжні шліци 10, які забезпечують покращення охолодження черв'яка під час роботи екструдера.

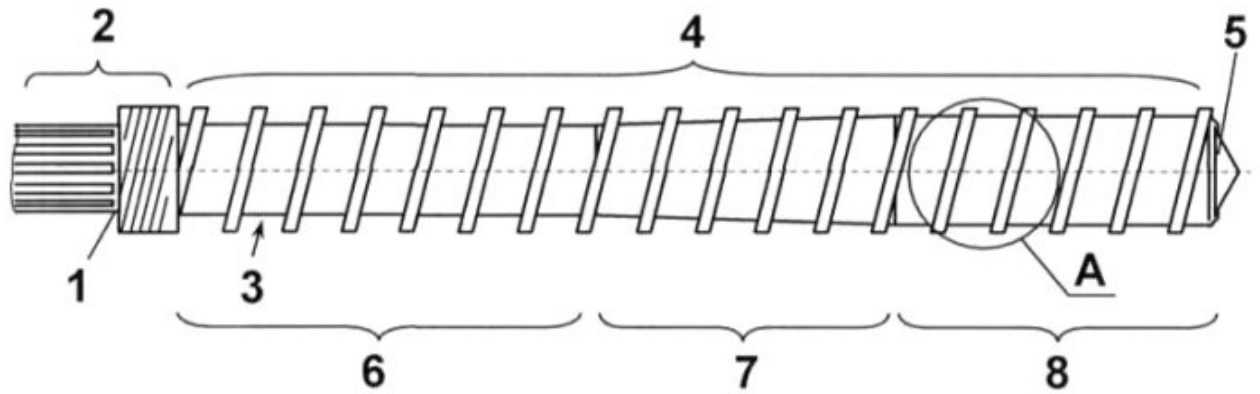


Рис. 4.4 - Черв'як екструдера

У патенті [9] розглядається конструкція черв'яка типу ZAJN, призначеного для використання в нереверсивних черв'ячних передачах механічних приводів. Основною метою винаходу є підвищення контактної міцності та ресурсу роботи передачі шляхом зміни геометрії профілю витків черв'яка. Запропоноване технічне рішення дозволяє знизити контактні напруження в зоні зачеплення та підвищити коефіцієнт корисної дії механізму.

Особливістю конструкції (рис. 4.5) є виконання робочої сторони витка з увігнутим осьовим профілем, тоді як неробоча сторона має опуклу форму. Таке поєднання забезпечує більш сприятливі умови контакту із зубами черв'ячного колеса, зменшує сили тертя та сприяє підвищенню довговічності й ефективності роботи черв'ячної передачі.

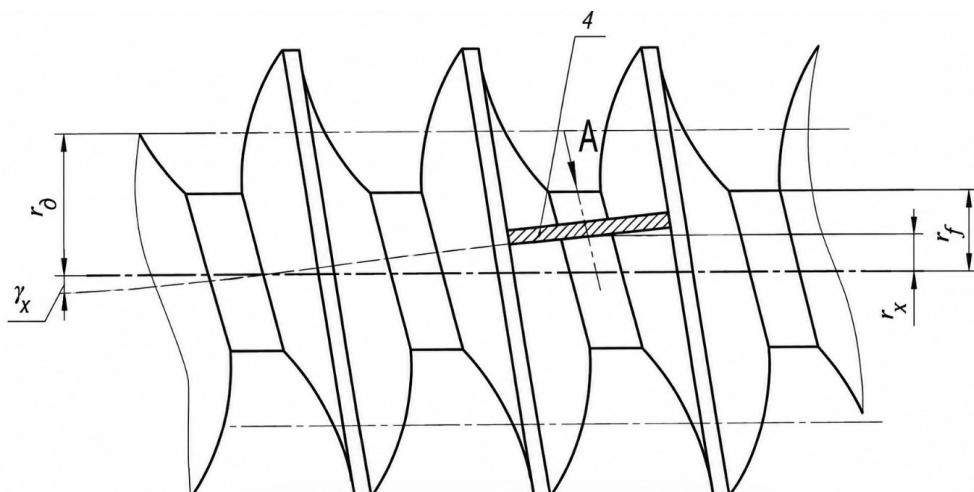


Рис. 4.5 - черв'як ZAJN з ділильним радіусом

4.2 Обґрунтування вибору варіанту модернізації черв'яка в гумопереробній машині

В основу запропонованого технічного рішення покладено задачу вдосконалення черв'ячної машини для перероблення матеріалів з використанням високомолекулярних сполук [10] , у якій нове конструктивне виконання диспергувальної ділянки черв'яка забезпечує ефективне перемішування та подрібнення твердих, жорстких і еластичних матеріалів у різному вигляді за рахунок стискання, зсуву та стирання, що дозволяє отримувати високоякісний тонкодисперсний продукт.

Поставлену технічну задачу вирішують тим, що в черв'ячній машині для перероблення матеріалів з використанням високомолекулярних сполук, яка містить корпус із завантажувальним і розвантажувальним отворами, а також розміщений у ньому з можливістю обертання черв'як, що має щонайменше одну диспергувальну ділянку, основа якої з боку розвантажувального отвору корпусу більша за основу з боку завантажувального отвору, відповідно до запропонованого технічного рішення новим є те, що основу диспергувальної ділянки з боку розвантажувального отвору виконано круглою, а основу з боку завантажувального отвору – опуклою з формою, відмінною від круглої . У переважному варіанті виконання основу диспергувальної ділянки може бути виконано у вигляді овала або правильного багатокутника (пат. № UA70008U).

Конструктивні особливості запропонованого технічного рішення пояснюються кресленнями, на яких наведено схему будови вдосконаленої черв'ячної машини (рис. 4.6).

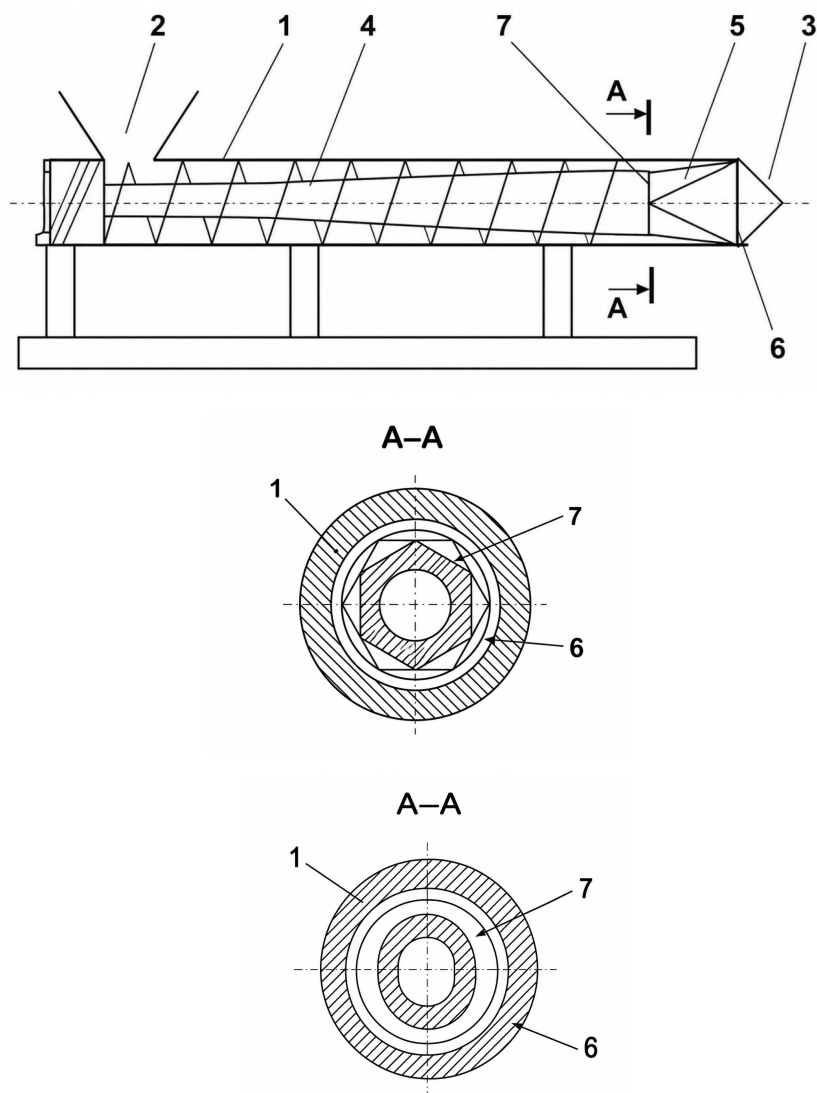


Рис. 4.6 – Конструкція черв'ячної машини для перероблення матеріалів з використанням високомолекулярних сполук

Запропонована черв'ячна машина містить корпус 1 із завантажувальним 2 і розвантажувальним 3 отворами, а також розміщений у ньому з можливістю обертання черв'як 4, що має диспергувальну ділянку 5. Основа 6 диспергувальної ділянки 5 з боку розвантажувального отвору 3 виконана круглою, а основа 7 з боку завантажувального отвору 2 – опуклою з формою, відмінною від круглої. Основа 7 може бути виконана у вигляді правильного багатокутника або овала. Поверхню диспергувальної ділянки 5 черв'яка 4 та/або відповідну поверхню корпусу 1 може бути оснащено подрібнювальними

виступами для підвищення ефективності процесу диспергування та змішування матеріалу.

Завдяки запропонованому конструктивному виконанню черв'ячної машини підвищується ефективність диспергування, змішування та подрібнення матеріалів, зменшується ймовірність забивання робочого каналу, а також забезпечується стабільність технологічного процесу перероблення високомолекулярних сполук.

5. РОЗРАХУНКИ

5.1 Параметричні розрахунки

Під час виконання параметричних розрахунків визначаються основні експлуатаційні показники черв'ячної машини, які характеризують ефективність її роботи та відповідність заданим умовам експлуатації. До основних завдань цього етапу належать:

- визначення продуктивності черв'ячної машини;
- розрахунок тиску гумової суміші у формувальній головці;
- визначення необхідної потужності приводу.

Вихідними даними для проведення розрахунків є геометричні та кінематичні параметри машини МЧХ-160, які прийняті відповідно до її паспортних характеристик і розрахункової схеми екструдера.

Параметричний аналіз дає можливість оцінити вплив конструктивних особливостей і режимів роботи на експлуатаційні характеристики обладнання, а також перевірити його працездатність за заданих умов. На підставі отриманих результатів здійснюється оцінка прийнятих технічних рішень та їх відповідності технологічним вимогам.

Отримані значення використовуються як вихідні дані для подальших інженерних розрахунків, уточнення конструктивних параметрів окремих вузлів і проведення аналізу роботи машини в цілому.

1. зовнішній діаметр черв'яка, мм, $D = 160$;
2. число заходів черв'яка, $i = 2$;
3. Глибина гвинтового каналу в зоні завантаження мм:

$$h_1 = (0,12-0,16) * D = 0,12 * 160 = 19,2\text{мм.}$$

4. Внутрішній діаметр у зоні завантаження, мм:

$$d_1 = D - 2h_1 = 160 - 38,4 = 121,6\text{мм.}$$

5. Глибина гвинтового каналу в зоні дозування складає:

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

$$0,5 * \left[160 - \sqrt{160^2 - \frac{4 * 19,2}{2} * (160 - 19,2)} \right] = 8,95 \text{ мм.}$$

6. Внутрішній діаметр у зоні змішування, мм:

$$d_2 = D - 2h_3 = 160 - 17,9 = 142,1 \text{ мм.}$$

– внутрішній діаметр на початку зони виштовхування, мм, $d_3 = 142,1$;

– внутрішній діаметр у кінці зони виштовхування, мм, $d_4 = 121,6$;

7. Крок витка в зоні видавлювання, мм:

$$S_3 = (0,8 \dots 1,2)D = 1 * 160 = 160 \text{ мм.}$$

8. Крок витка в зоні завантаження, мм:

$$S = (0,8 \dots 1,2)D$$

$$S_1 = 1,1 * D = 1,1 * 160 = 176 \text{ мм.}$$

9. Крок витка в зоні змішування, мм:

$$S_2 = (0,8 \dots 1,2)D = 1,2 * 160 = 192 \text{ мм.}$$

10. Товщина витка, мм:

$$b = (0,08 \div 0,12) \cdot D = 0,08 * 160 = 12 \text{ мм.}$$

11. Довжина нарізки черв'яка, мм:

$$L_{\text{нар}} = (16-20) * D = 16 * 160 = 2520 \text{ мм.}$$

12. Довжина зони дозування приймається мм:

$$L_{\text{доз}} = (3-8) * D = 5 * 160 = 800 \text{ мм.}$$

13. Довжина зони завантаження приймається мм:

$$L_{\text{зав}} = (4-7) * D = 4 * 160 = 640 \text{ мм.}$$

14. Довжина зони стиску приймається мм:

$$L_{\text{стис}} = L - L_{\text{зав}} - L_{\text{дос}} = 1\,080 \text{ мм.}$$

17. Довжина робочої частини циліндру:

$$L_{\text{роб}} = 11 * 160 = 1760 \text{ мм.}$$

16. Крок між витками :

$$t = 1 * 160 = 160 \text{ мм.}$$

17. Загальна довжина черв'яка:

$$L_{\text{заг}} = L_{\text{нар}} + L_{\text{ев}} + L_{\text{цил}} = 2520 + 25 + 320 = 2865 \text{ мм.}$$

Припустимо що довжина евольвентного зачеплення приймаємо $L_{\text{ев}} = 25$ мм.

18. Довжина циліндра:

$$L_{\text{цил}} = (1...2) \cdot D = 2 \cdot 160 = 320 \text{ мм.}$$

5.2 Визначення продуктивності черв'ячної машини

Середній внутрішній діаметр в зоні виштовхування:

$$d_{\text{ср.виш.}} = \frac{d_{\text{вн}}^3 + d_{\text{вн}}^4}{2} = \frac{142,1 + 121,6}{2} = 131,85 \text{ мм.}$$

Середній діаметр в зоні завантаження:

$$d_{\text{сн}} = \frac{D + d_{\text{вн}}^1}{2} = \frac{160 + 121,6}{2} = 140,8 \text{ мм.}$$

Середній діаметр в зоні виштовхування:

$$d_{\text{ск}} = \frac{D + d_{\text{ср.виш.}}}{2} = \frac{160 + 131,85}{2} = 145,93 \text{ мм.}$$

Кут підйому витка в зоні виштовхування:

$$\lambda_{\text{к}} = \arctg\left(\frac{S^3}{\pi d_{\text{ск}}}\right) = \arctg\left(\frac{160}{\pi \cdot 145,93}\right) = \arctg 0,349012 = 19^\circ 14'.$$

Кут підйому витка в зоні завантаження:

$$\lambda_{\text{н}} = \arctg\left(\frac{S^1}{\pi d_{\text{сн}}}\right) = \arctg\left(\frac{176}{\pi \cdot 140,8}\right) = \arctg 0,397887 = 21^\circ 42'.$$

Об'єм впадини черв'яка на довжині одного кроку в зоні виштовхування:

$$V_{\text{к}} = \pi d_{\text{ск}} F_{\text{в}},$$

де $F_{\text{в}}$ – площа зони виштовхування:

$$F_{\text{в}} = \frac{D - d_{\text{ср.виш.}}}{2} \cdot \left(\frac{S^3}{i} - b\right) = \frac{160 - 131,85}{2} \cdot \left(\frac{160}{2} - 12,8\right) = 945,84 \text{ мм}^2;$$

$$V_{\text{к}} = \pi \cdot 145,93 \cdot 945,84 = 0,000433608 \text{ м}$$

Об'єм впадини черв'яка на довжині одного кроку в зоні завантаження:

$$V_{\text{п}} = \pi d_{\text{сн}} F_{\text{з}},$$

де $F_{\text{з}}$ – площа зони завантаження

$$F_{\text{з}} = (D - d_{\text{вн}})/2 \cdot (S_1/i - b) = (160 - 121,6)/2 \cdot (176/2 - 12,8) = 1443,84 \text{ мм}^2;$$

$$V_{\Pi} = \pi \cdot 140,8 \cdot 1443,84 = 0,000638663 \text{ м}^3.$$

Степінь стискання черв'яка (I варіант):

$$K = \frac{D^2 - d^1_{BH^2}}{D^2 - d^4_{BH^2}} = \frac{160^2 - 121,6^2}{160^2 - 121,6^2} = 1.$$

Степінь стискання черв'яка (II варіант):

$$K = V_{\Pi}/V_K = 0,000638663/0,000433608 \approx 1,47.$$

Ефективна продуктивність машини при максимальному числі обертів черв'яка і для добре перероблюваних сумішей:

$$Q = 60Vni\gamma_0\beta,$$

Де : β – коефіцієнт заповнення об'єму між витками гумовою сумішшю, $\beta = 0,15$;

γ_0 – питома вага гумової суміші, $\gamma_0 = 1400 \text{ кг/м}^3$;

i – число заходів черв'яка, $i = 2$;

n – максимальна частота обертання черв'яка, $n = 50 \text{ об/хв}$;

V – об'єм між двома витками черв'яка, $V = 0,000433608 \text{ м}^3$

$$Q = 60 \cdot 0,000433608 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 1400 \cdot 0,15 = 546 \text{ кг/год}$$

5.3 Визначення тиску суміші в головці

За данною формулою визначається тиск в суміші :

$$P_r = \frac{P_{oc}}{F} = \frac{P_{oc}}{\pi R^2},$$

де P_{oc} – осьове зусилля, яке виникає в гвинтовому каналі черв'яка;

R – зовнішній радіус нарізки черв'яка, $R = 0,08 \text{ м}$.

$$P_{oc} = 7162 \cdot 1,36 \cdot N / (n \cdot r_s \cdot \text{tg}(\alpha + \rho)),$$

ρ – кут тертя гумової суміші по сталі, $\rho = \text{arctg } 0,43 = 23^\circ$;

α – кут підйому гвинтової лінії черв'яка, $\alpha = 19^\circ 14'$;

r_s – середній радіус витка в зоні виштовхування, $r_s = 0,07296 \text{ м}$;

n – максимальна частота обертання черв'яка, $n = 50 \text{ об/хв}$;

N – потужність, що передається черв'яком, $N = 200$ кВт.

$$P_{oc} = (7162 \cdot 1,36 \cdot 200) / (50 \cdot 0,07296 \cdot \operatorname{tg}(19^\circ 14' + 23^\circ)) = 582599,2 \text{ Н.}$$

Питомий тиск в головці, яке розвиває черв'як складає:

$$P_r = 5825992 / (\pi \cdot 0,08^2) = 28,97 \text{ МПа.}$$

Приймаємо $P_r = 28,97$ МПа.

Загальне осьове зусилля, яке діє на упорний підшипник, буде дорівнювати сумі сил A і тангенціальної складової тертя матеріалу об поверхню черв'яка

$$K = A + T,$$

де K – загальне осьове зусилля, Н;

A – осьове зусилля, Н.

$$A = F_c \cdot P_r.$$

Площа поперечного перерізу черв'яка:

$$F_c = \pi/4 \cdot D^2 = 0,785 \cdot 0,16^2 = 0,02011 \text{ м}^2.$$

Тоді осьове зусилля становить:

$$A = 0,02011 \cdot 28,97 = 582,599 \text{ кН.}$$

Тангенціальна складова від тертя

$$T = F_p \cdot 2\pi r_s \operatorname{tg} \rho,$$

$$\text{де } F_p = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{1}{2} = P \cdot \frac{1}{6} = 28,97 \cdot \frac{1,055}{6} = 50,950 \text{ кг/м,}$$

l – довжина заповненої гвинтової частини черв'яка (приймається половина довжини гвинтової частини), $l = 1,055$ м.

Середній радіус витка черв'яка

$$r_s = \frac{145,93}{2000} = 0,07296 \text{ м.}$$

Коефіцієнт тертя $\operatorname{tg} \rho = \operatorname{tg} 23^\circ = 0,43$.

Тоді тангенціальна складова становить:

$$T = 50,950 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,07296 \cdot 0,43 = 10,044 \text{ кН.}$$

Загальне осьове зусилля визначається за формулою:

$$K = 582,599 + 10,044 = 592,643 \text{ кН.}$$

Також виконаємо розрахунок через програму Microsoft Visual для перевірки нашого розрахунку. Початкові данні ми беремо також, як і для розрахунку тут.

```

Консоль отладки Microsoft Visual Studio
=== Розрахунок тиску суміші в головці ===
Осьове зусилля в гвинтовому каналі P_ос = 582343.263 Н
Тиск суміші в головці P_r = 28.978 МПа
Площа поперечного перерізу черв'яка F_c = 0.020 м^2
Осьове зусилля A = 582.343 кН
Питома тангенціальна складова тертя F_r = 50.953 кг/м
Тангенціальна складова від тертя T = 10.039 кН
Загальне осьове зусилля K = 592.382 кН
C:\Users\ACER\Desktop\ConsoleApplication1\x64\Debug\ConsoleApplication1.exe (процесс 131712) завершил работу с кодом 0 (0x0)

```

Рис.5.3.1 – Результати розрахунку коду

В результаті ми впевнились , що наші розрахунки вірні і можна продовжувати наші подальші розрахунки . Невеличкі незбіжності виникають при тому, що програма виконую розрахунок без округлень чисел , тому всі результати трохи не збігаються з попередніми розрахунками .

5.4 Визначення потужності приводу черв'ячної машини

Потужність приводу черв'ячної машини визначається з урахуванням тиску суміші, геометричних параметрів робочої частини циліндра та режиму обертання черв'яка.

$$N = P_r D L f t n i K / (3900 \eta) \cdot 10^3,$$

де D – діаметр робочої частини циліндра, $D = 160$ мм;

L – довжина робочої частини циліндра, $L = 1760$ мм;

t – крок між витками черв'яка, $t = 160$ мм;

f – коефіцієнт тертя суміші по циліндру, $f = 0,42$;

i – кількість заходів черв'яка, $i = 2$;

K – коефіцієнт запасу потужності;

n – максимальна частота обертання черв'яка, $n = 50$ об/хв;

η – коефіцієнт корисної дії приводу і підшипників машини, $\eta = 0,8$;

P_r – тиск суміші при видавлюванні, $P_r = 28,976$ МПа.

Після підстановки вихідних даних у наведену залежність розрахункова потужність приводу становить:

$$N = \frac{28,976 \cdot 0,16 \cdot 1,76 \cdot 0,42 \cdot 0,16 \cdot 10 \cdot 50 \cdot 2}{3900 \cdot 0,8} \cdot 10^3 = 176 \text{ кВт.}$$

З урахуванням отриманого значення та необхідного запасу потужності для

надійної роботи обладнання приймаємо електродвигун потужністю $N = 200$ кВт.

За результатами виконаних розрахунків визначено основні експлуатаційні параметри машини, а саме продуктивність, тиск гумової суміші у формувальній головці та необхідну потужність приводу, які в подальшому використовуються для обґрунтування прийнятих конструктивних рішень

- Q – продуктивність машини, $Q = 546$ кг/год;
- P_r – тиск суміші в головці, $P_r = 28,97$ МПа;
- N – потужність приводу машини, $N = 200$ кВт.

5.5. Розрахунок черв'яка на міцність

5.5.1. Розрахунок черв'яка на міцність

Розрахунок черв'яка на міцність проводиться з метою перевірки його здатності надійно працювати під дією експлуатаційних навантажень без руйнування, надмірних деформацій або передчасного зносу. У процесі роботи черв'як зазнає значних крутних моментів, осьових сил, а також термічних і контактних навантажень, що виникають внаслідок тиску та тертя гумової суміші в гвинтовому каналі. Тому міцнісний розрахунок дозволяє обґрунтувати вибір геометричних параметрів, забезпечити необхідний запас міцності та гарантувати довговічність вузла.

Основні дані для розрахунку :

- 1) діаметр виступів черв'яка, м, $D = 0,160$
- 2) кількість обертів черв'яка, об/хв, $n = 50$;
- 3) площа, на яку діє тиск, м², $F = 0,02$;
- 4) матеріал черв'яка – сталь 40Х;
- 5) встановлена потужність, кВт, $N = 200$;

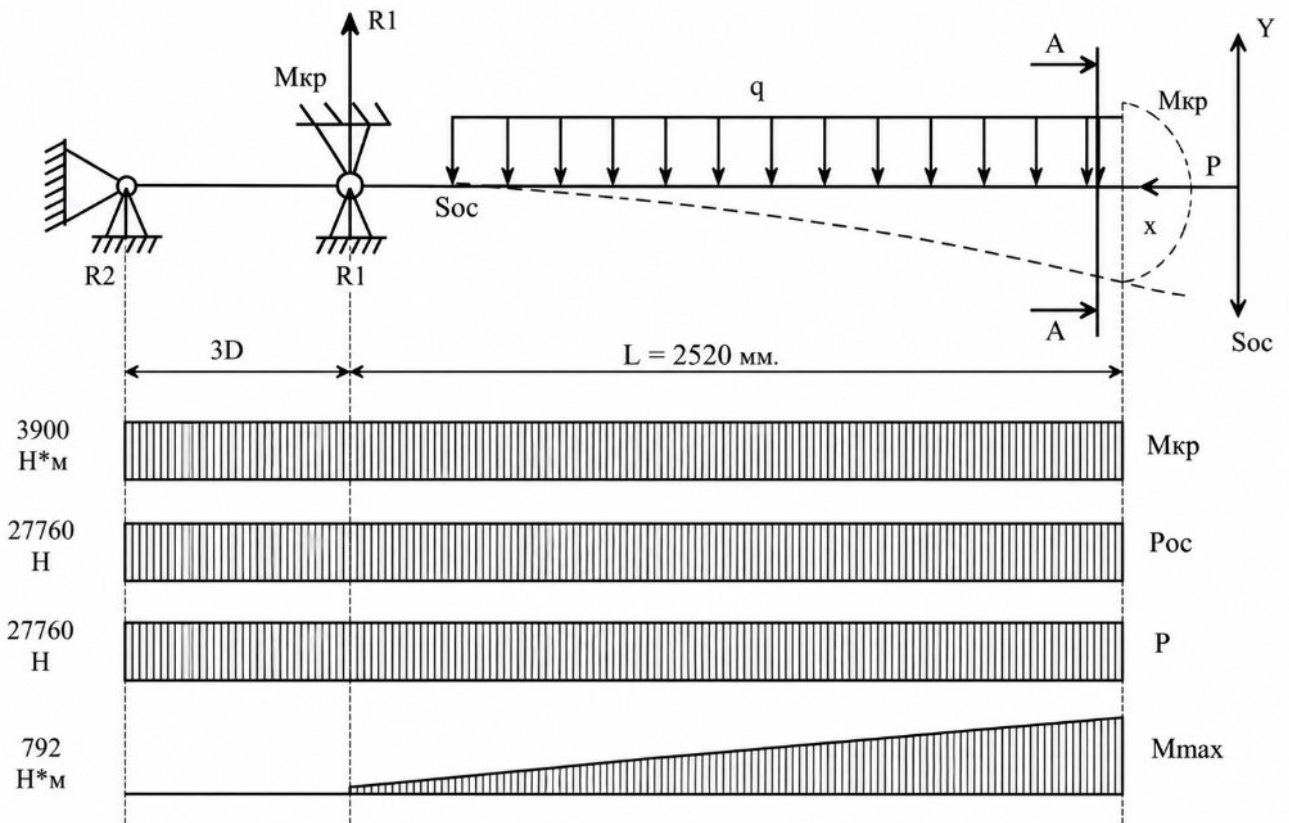


Рис.5.5.1 - розрахунково силова схема черв'яка

На схемі зображено уточнену розрахункову силову схему черв'яка, яка враховує роботу вала на згин, кручення та осьове навантаження. Черв'як подано у вигляді балки, що спирається на дві опори. У лівій частині розташована опора з реакцією R_2 , а в зоні підшипникового вузла показана реакція R_1 , спрямована вгору. Дані реакції врівноважують зовнішні сили, що діють на вал у процесі роботи.

Уздовж робочої довжини черв'яка прикладене рівномірно розподілене навантаження q , яке моделює тиск гумової суміші на гвинтові витки. Під дією цього навантаження виникає прогин вала, позначений на схемі як S_{oc} . Значення прогину є максимальним у зоні дії навантаження та використовується для оцінки жорсткості черв'яка. На правому кінці черв'яка прикладена осьова сила P , що виникає внаслідок опору матеріалу під час його переміщення до формувальної головки. У цій же зоні діє крутний момент $M_{кр}$, який передається від приводу та забезпечує обертання черв'яка. Для аналізу напруженого стану вала на схемі виділено розрахунковий переріз А–А, у якому визначаються згинальні та крутні

моменти, а також відповідні напруження. Напрямки осей координат x та y показують орієнтацію сил і деформацій.

Де буде найбільший максимальний прогин. Максимальний прогин S_{oc} виникає на ділянці дії рівномірно розподіленого навантаження q і, як правило, ближче до правого кінця/перерізу А–А, бо там одночасно діють:

- навантаження q по довжині,
- осьова сила P
- і крутний момент $M_{кр}$ (сам момент прогин напряму не створює, але вузол працює у складному напруженому стані).

1. На першому етапі розрахунку черв'яка приймаються вихідні параметри, потрібні для наступних обчислень. Крутний момент, що передається на черв'як, розраховується за залежністю:

$$M_{кр} = 9740 \cdot N / n$$

$$M_{кр} = 9740 \cdot \frac{200}{50} = 38960 \text{ Н*м}$$

$N = 200$ кВт – потужність, $n = 50$ – частота обертання, об/хв.

2. Визначемо осьове зусилля:

$$P_{oc} = \left(\frac{M_{кр} \cdot 2}{D} \right) \cdot \operatorname{tg} \varphi = \left(\frac{38960 \cdot 2}{0.160} \right) \cdot \operatorname{tg} (22^\circ 24') = 200,6 \text{ кН}$$

$D = 0,160$ м – зовнішній діаметр черв'яка; $\varphi = 22^\circ 24'$ – кут підйому нарізки.

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

$$q = 9,8 \cdot G / L = 9,8 \cdot 381,8 / 2,52 = 1484,9 \text{ Н/м}$$

У цьому випадку невідомою є G – маса черв'яка, кг. L – повна довжина черв'яка

Тоді:

$$G = (\pi \cdot (D^2 - d_0^2) \cdot \rho \cdot L) / 4 = \frac{(3,14 \cdot (0,16^2 - 0,032^2) \cdot 7850 \cdot 2,52)}{4} = 381,8 \text{ кг}$$

d_0 – діаметр каналу для охолодження, м

$$d_0 = (0,15 \dots 0,25) D = 0,2 \cdot 0,16 = 0,032 \text{ м}$$

Для сталі 40Х більш всього підходить густина $\rho \approx 7850 \text{ кг/м}^3$; $L = 2,52$ м.

4. Максимальний згинаючий момент:

$$M_{\max} = 1/2 \cdot q \cdot L^2 = 1/2 \cdot 1484,9 \cdot 2,52^2 = 4714,85 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

5. Площа небезпечного перерізу (В):

Площа небезпечного перерізу – являє собою площу поперечного перерізу черв'яка (вала) у тій зоні, де виникають найбільші напруження (максимальний згинальний момент і/або найбільша осьова сила).

$$F = (\pi \cdot d_1^2 \cdot (1 - \alpha^2)) / 4 = \frac{(3,14 \cdot 0,121^2 \cdot (1 - 0,264^2))}{4} = 0,0107 \text{ м}^2$$

В цьому рівнянні: $a = d_0/d_1 = 0,032/0,121 = 0,264$

d_1 - Внутрішній діаметр у зоні завантаження

6. Дотичні напруження в перерізі В:

$$\tau = \frac{M_{\text{кр}}}{W_p} = \frac{38960}{0,000346} = 112,6 \text{ МПа}$$

$$W_p = (\pi \cdot d_1^3 \cdot (1 - \alpha^4)) / 16 = \frac{(3,14 \cdot 0,121^3 \cdot (1 - 0,264^4))}{16} = 0,000346 \text{ м}^3$$

7. Осьовий момент опору :

$$W_x = (\pi \cdot d_1^3 \cdot (1 - \alpha^4)) / 32 = \frac{(3,14 \cdot 0,121^3 \cdot (1 - 0,264^4))}{32} = 0,000173 \text{ м}^3$$

8. Полярний момент інерції:

$$I = (\pi \cdot d_1^4 \cdot (1 - \alpha^4)) / 64 = \frac{(3,14 \cdot 0,121^4 \cdot (1 - 0,264^4))}{64} = 1,05 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$$

9. Стискання напруження:

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{ос}}}{F} + \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{200600}{0,0107} + \frac{4714,85}{0,000173} = 46,0 \text{ МПа}$$

10. Еквівалентні напруження:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{(\sigma_{\text{ст}}^2 + 4 \cdot \tau^2)} = \sqrt{(47\,985\,245^2 + 4 \cdot 112\,600\,000^2)} = 230 \text{ МПа}$$

11. Розрахований коефіцієнт запасу міцності повинен бути не меншим за допустиме значення. Зазвичай допустиме значення $[n]$ приймають у межах (1,5 ... 2).

$$n = \sigma_t / \sigma_{\text{екв}} \geq [n]$$

Для матеріалу сталь 40Х межа текучості σ_t дорівнює 850 МПа, тому:

$$n = 850 / 230 = 3,69 \geq 1,75$$

Таким чином, умова міцності виконується, оскільки коефіцієнт запасу $n = 3,69$ перевищує допустимий інтервал $[n] = 1,5 \dots 2$. Це підтверджує достатню міцність черв'яка за прийнятими розрахунковими навантаженнями.

5.5.2 Розрахунок черв'ячного вала на стійкість

Для перевірки стійкості черв'яка [11] спочатку визначається його гнучкість. Отримане значення гнучкості дає змогу оцінити, чи можлива втрата стійкості вала під дією осьового навантаження. Якщо гнучкість має невеликі значення, черв'як розглядається як жорсткий елемент, для якого втрата стійкості не є характерною.

1. Розрахунок гнучкості:

$$\lambda = \mu \cdot (L/i) = 2 \cdot \left(\frac{2,52}{0,0313} \right) = 161,1$$

де μ – коефіцієнт закріплення (ти використовував $\mu = 2$),

L – розрахункова (робоча) довжина, 2,52 м.

i – радіус інерції перерізу.

$$i = \sqrt{\frac{J}{F}} = \sqrt{\frac{1,05 \cdot 10^{-5}}{0,0107}} = 0,0313 \text{ м.}$$

2. J - момент інерції поперечного перерізу черв'яка в перерізі А–А;

$$J = \frac{(\pi \cdot d^{14} \cdot (1 - \alpha^4))}{64} = \frac{(3,14 \cdot 0,121^4 \cdot (1 - 0,264^4))}{64} = 1,05 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$$

3. F - площа поперечного перерізу черв'яка в перерізі А–А;В

$$F = \frac{(\pi \cdot d^{12} \cdot (1 - \alpha^2))}{4} = \frac{(3,14 \cdot 0,121^2 \cdot (1 - 0,264^2))}{4} = 0,0107 \text{ м}^2$$

Після виконання розрахунку гнучкості черв'яка отримано значення $\lambda = 161,1$. Оскільки робоча довжина прийнята $L = 2,52$ м, для підтвердження стійкості необхідно враховувати не тільки гнучкість, але й фактичне осьове навантаження. За заданих параметрів критичне зусилля є більшим за робоче осьове зусилля, тому втрата стійкості під дією осьового навантаження не виникає, а робота черв'ячного вала є допустимою.

5.6. Тепловий розрахунок охолодження черв'яка

5.6.1 Розрахунок базового черв'яка

Метою теплового розрахунку охолодження черв'яка є визначення теплового режиму роботи черв'ячної машини та перевірка достатності відведення тепла, що виділяється під час переробки гумової суміші. У процесі роботи черв'яка значна частина енергії витрачається на подолання сил тертя та деформацію матеріалу, що призводить до нагрівання черв'яка і корпусу. Перевищення допустимої температури може негативно впливати на фізико-механічні властивості гумової суміші та викликати інтенсивний знос робочих поверхонь. Тепловий розрахунок дозволяє оцінити ефективність системи охолодження та забезпечити стабільну і надійну роботу машини в заданих експлуатаційних умовах.

Вихідні параметри для виконання розрахунку:

- діаметр каналу в черв'яку, м, $D_2 = 0,032$
- довжина каналу в черв'яку діаметром, м, $l_2 = 0,95$
- довжина каналу в черв'яку, м, $l_1 = 1,4$
- початкова температура суміші, К, $t_{нсм} = 288$
- кінцева температура суміші, К, $t_{ксм} = 413$
- діаметр каналу в черв'яку, м, $D_1 = 0,05$

1. Спочатку визначаємо площу поверхні теплообміну черв'яка:

$$F_v = \pi \cdot D_1 \cdot l_1 + \pi \cdot D_2 \cdot l_2 = 3,14 \cdot 0,05 \cdot 1,4 + 3,14 \cdot 0,032 \cdot 0,95 = 0,315 \text{ м}^2$$

2. Визначаємо кількість теплоти, необхідну для нагрівання гумової суміші:

$$Q_{см} = (G_{см}/3600) \cdot C \cdot (t_{ксм} - t_{нсм}) = (1250/3600) \cdot 1,38 \cdot (413 - 288) = 59,90 \text{ кВт}$$

$G_{см}$ – максимальна продуктивність машини, $G_{см} = 1250$ кг/год;

C – питома теплоємність суміші, $C = 1,38$ кДж/(кг·К)

3. Кількість теплоти, що надходить від приводу за годину роботи, визначаємо з урахуванням корисної частини встановленої потужності:

$$Q_n = N \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot \eta_2 = 160 \cdot 0,8 \cdot 0,6 = 76,80 \text{ кВт (або 66 048 ккал/год),}$$

де N – встановлена потужність, $N = 160 \text{ кВт}$;

η_2 – коефіцієнт використання корисної потужності, $\eta_2 = 0,6$.

$\eta_{\text{пр}}$ – коефіцієнт корисної дії приводу, $\eta_{\text{пр}} = 0,8$;

4. Після цього визначаємо теплове навантаження, яке має бути відведене охолоджувальною водою:

$$Q_{\text{вод}} = Q_n - Q_{\text{см}} = 76,80 - 59,90 = 16,90 \text{ кВт}$$

5. Площа теплообмінної поверхні черв'яка приймається: $F_{\text{ч}} = 0,28 \text{ м}^2$

6. Загальна площа теплообмінної поверхні машини становить: $F_{\text{сум}} = 1,3408 \text{ м}^2$

7. Частина теплоти, яку необхідно відвести саме від черв'яка:

$$Q_{\text{ч}} = Q_{\text{вод}} \cdot F_{\text{ч}} / F_{\text{сум}} = 16,90 \cdot 0,28 / 1,3408 = 3,53 \text{ кВт}$$

8. Далі визначаємо швидкість руху охолоджувальної води в каналі:

$$\omega_{\text{В}} = \frac{G_{\text{В}}}{S_{\text{кан.ср.}} \cdot \gamma \cdot 3600}$$

де $G_{\text{В}}$ – витрата води на охолодження черв'яка, $G_{\text{В}} = 2000 \text{ кг/год}$;

$S_{\text{кан.ср}}$ – площа перерізу каналу черв'яка.

γ – питома вага води при $t_{\text{в}} = 353 \text{ К}$, $\gamma = 972 \text{ кг/м}^3$;

$$S_{\text{кан.ср}} = \frac{S_{\text{кан1}} + S_{\text{кан2}}}{2} = S_{\text{кан.ср}} = (0,00158 + 0,0004239) / 2 = 0,001 \text{ м}^2$$

$$S_{\text{кан1}} = \left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot (D_1^2 - d^2) = (3,14/4) \cdot (0,05^2 - 0,022^2) = 0,00158 \text{ м}^2$$

$$S_{\text{кан2}} = \left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot (D_2^2 - d^2) = (3,14/4) \cdot (0,032^2 - 0,022^2) = 0,0004239 \text{ м}^2$$

9. Швидкість потоку води розраховується за такою залежністю:

10. Після визначення швидкості потоку знаходимо критерій Рейнольдса:

$$Re = \omega_{\text{В}} \cdot \frac{d_{\text{екв}}}{\nu} = 0,57 * \frac{d_{\text{екв}}}{\nu}$$

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості води при $t_{\text{в}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$,

$$\nu = 0,360 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$d_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр каналу

11. Еквівалентний діаметр каналу визначаємо за середнім значенням:

$$d_{\text{екв1}} = D_1 - d = 0,05 - 0,022 = 0,028 \text{ м.}$$

$$d_{\text{екв2}} = D_2 - d = 0,032 - 0,022 = 0,01 \text{ м.}$$

12. За знайденими параметрами критерій Рейнольдса становить:

Під час теплового розрахунку було визначено критерій Рейнольдса, який дає змогу оцінити режим руху охолоджувальної рідини. Отримане значення $Re = 30083,33$ перевищує граничне значення $Re = 10000$, тому рух води в каналі належить до турбулентного режиму.

Турбулентний потік забезпечує активне перемішування рідини, завдяки чому підвищується інтенсивність тепловіддачі від стінки до охолоджувального середовища. Це сприяє ефективнішому відведенню теплоти від робочого органу і знижує ризик його перегрівання під час роботи.

13. Для турбулентного режиму течії використовуємо залежність:

Де

Pr_v – критерій Прандтля при середній температурі теплоносія:

$$t_T = 358 \text{ К, } Pr_T = 2,21;$$

Pr_s – критерій Прандтля при середній температурі стінки зі сторони теплоносія:

$$t_m = 364 \text{ К, } Pr_m = 2,08.$$

$$Nu_v = 0,021 \cdot 30083,33^{0,8} \cdot 2,21_v^{0,43} \cdot \left(\frac{2,21}{2,08}\right)^{0,25} = 115$$

14. Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до води визначаємо за формулою:

λ – коефіцієнт теплопровідності води при $t_v = 353 \text{ К}$,
 $\lambda = 0,58 \text{ Вт/(м·К)}$.

15. Далі розраховуємо загальний коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha^1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha^2}} = \frac{1}{\frac{1}{650} + \frac{0,020}{40} + \frac{1}{3510,52}} = 430,4 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від маси до стінки,

$$\alpha_1 = 650 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)};$$

$\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки,

$$\lambda_{ст} = 40 \text{ Вт/(м·К)}$$

$\delta_{ст}$ – товщина стінки, через яку проходить теплопередача,

$$\delta_{ст} = 0,020 \text{ м};$$

16. Визначаємо потрібну площу теплообмінної поверхні зони черв'яка:

$$F_{ч.роз} = Q_{ч}/(K \cdot \Delta t_{cp})$$

де $Q_{ч}$ – теплота, яку необхідно відвести від черв'яка, $Q_{ч} = 3,53 \text{ кВт}$;

Δt_{cp} – середня різниця температур між гумовою сумішшю та охолоджувальною водою.

Температурні рівні для суміші та води приймаємо такими:

$$353 \text{ К} \rightarrow 355 \text{ К} - \text{вода}$$

$$288 \text{ К} \rightarrow 413 \text{ К} - \text{суміш}$$

Різниці температур між теплоносіями:

$$\Delta t_1 = 353 - 288 = 65 \text{ К}; \quad \Delta t_1/\Delta t_2 = 65/58 = 1,12 < 2$$

$$\Delta t_2 = 413 - 355 = 58 \text{ К}$$

17. Середню різницю температур приймаємо як середньоарифметичну:

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_1 + \Delta t_2)/2 = (65 + 58)/2 = 61,5 \text{ К}$$

18. Тоді необхідна площа теплообміну зони черв'яка дорівнює:

$$F_{ч.роз} = 3,53/(0,430 \cdot 61,5) = 0,133 \text{ м}^2$$

За результатами теплового розрахунку встановлено площу теплообміну, необхідну для відведення теплоти, що виникає під час роботи черв'яка. Розрахункове значення становить $F_{розр} = 0,133 \text{ м}^2$.

Фактична площа теплообмінної поверхні черв'яка дорівнює $F_{факт} = 0,28 \text{ м}^2$, тобто вона перевищує потрібне розрахункове значення. Отже, умова $F_{факт} > F_{розр}$ виконується.

Це показує, що система охолодження черв'яка має достатній запас тепловідвідної здатності та може підтримувати стабільний температурний режим. Одержані результати підтверджують прийнятність вибраних конструктивних параметрів теплообмінної зони.

5.6.2 Розрахунок для модернізованого черв'яка:

У модернізованому варіанті товщина стінки, через яку передається теплота, зменшується приблизно вдвічі. Це знижує термічний опір стінки та сприяє збільшенню коефіцієнта теплопередачі.

Товщину стінки модернізованого черв'яка приймаємо такою:

$$\delta_{\text{ст.мод}} = \delta_{\text{ст}} / 2 = 0,020 / 2 = 0,010 \text{ м.}$$

Коефіцієнт теплопередачі для модернізованого варіанта визначаємо за залежністю:

$$K = 1 / (1/\alpha_1 + \delta_{\text{ст.мод}}/\lambda_{\text{ст}} + 1/\alpha_2).$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від маси до стінки, $\alpha_1 = 650 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$\delta_{\text{ст.мод}}$ – товщина стінки модернізованого черв'яка, $\delta_{\text{ст.мод}} = 0,010 \text{ м}$;

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до води, $\alpha_2 = 3510,52 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

$\delta_{\text{ст.мод}}$ – товщина стінки модернізованого черв'яка, $\delta_{\text{ст.мод}} = 0,010 \text{ м}$;

$$K = 1/(1/650 + 0,010/40 + 1/3510,52) = 482,09 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = 0,482 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Визначаємо розрахункову площу теплообмінної зони черв'яка, достатню для відведення заданої кількості теплоти.

$$F_{\text{ч.роз}} = Q_{\text{ч}} / (K \cdot \Delta f).$$

де $Q_{\text{ч}}$ – теплота, яку необхідно відвести від черв'яка;

$$Q_{\text{ч}} = 3,53 \text{ кВт.}$$

$$353 \text{ К} \rightarrow 355 \text{ К} - \text{вода}$$

$$288 \text{ К} \rightarrow 413 \text{ К} - \text{суміш}$$

$$\Delta t_1 = 353 - 288 = 65 \text{ К}; \quad \Delta t_2 = 413 - 355 = 58 \text{ К.}$$

$$\Delta t_1 / \Delta t_2 = 65 / 58 = 1,12 < 2,$$

тому середньоарифметичну різницю температур визначаємо так:

$$F_{\text{ч.роз}} = 3,53 / (0,482 \cdot 61,5) = 0,119 \text{ м}^2.$$

$$\Delta f = (\Delta t_1 + \Delta t_2) / 2 = (65 + 58) / 2 = 61,5 \text{ К.}$$

Дійсна площа теплообмінної поверхні черв'яка за прийнятими даними становить:

$$F_{ch.дiйс} = 0,28 \text{ м}^2.$$

$$F_{ch.дiйс} > F_{ch.роз}.$$

Отже, фактична площа теплообміну модернізованого черв'яка є більшою за необхідну розрахункову. Це підтверджує, що система охолодження має достатній запас тепловідвідної здатності та забезпечує підтримання стабільного температурного режиму.

Порівняно з базовим варіантом зменшення товщини стінки збільшує коефіцієнт теплопередачі та знижує потрібну розрахункову площу теплообміну. Це вказує на підвищення запасу тепловідвідної здатності системи охолодження і створює передумови для стабільнішого температурного режиму або можливого зменшення витрати води після додаткового уточнювального розрахунку.

5.7. Проектування базового черв'яка в SolidWorks

Починаємо моделювання нашого черв'яка в програмі SolidWorks .
Перше , що ми маємо зробити це контур деталі , для того що потім зробити 3д модель (рис.5.7.1) .

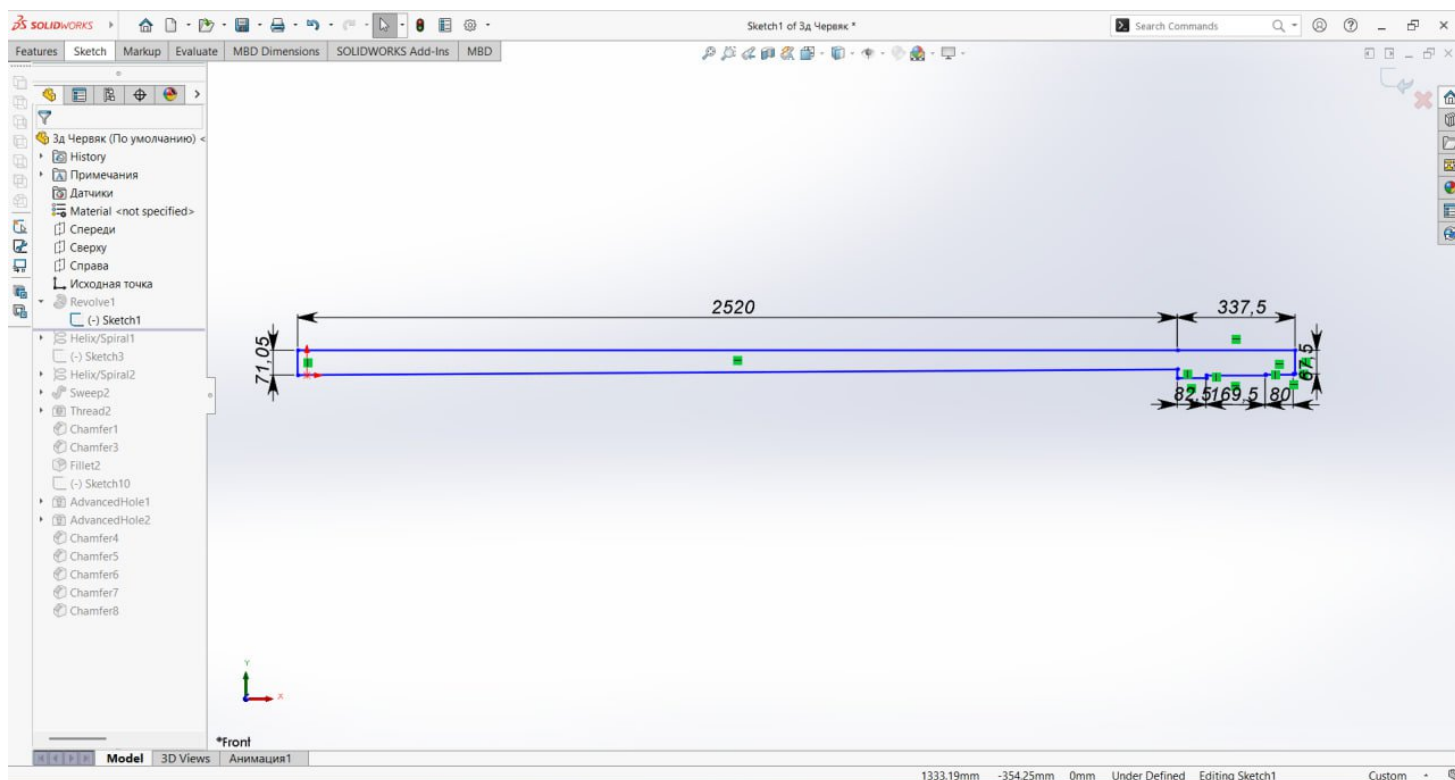


Рис.5.7.1 – Контур деталі черв'яка

Розміри черв'яка ми брали за нашими початковими даними . Далі за допомогою команди Revolve ми обертаємо наш контур , створюючи 3д модель (рис.5.7.2)

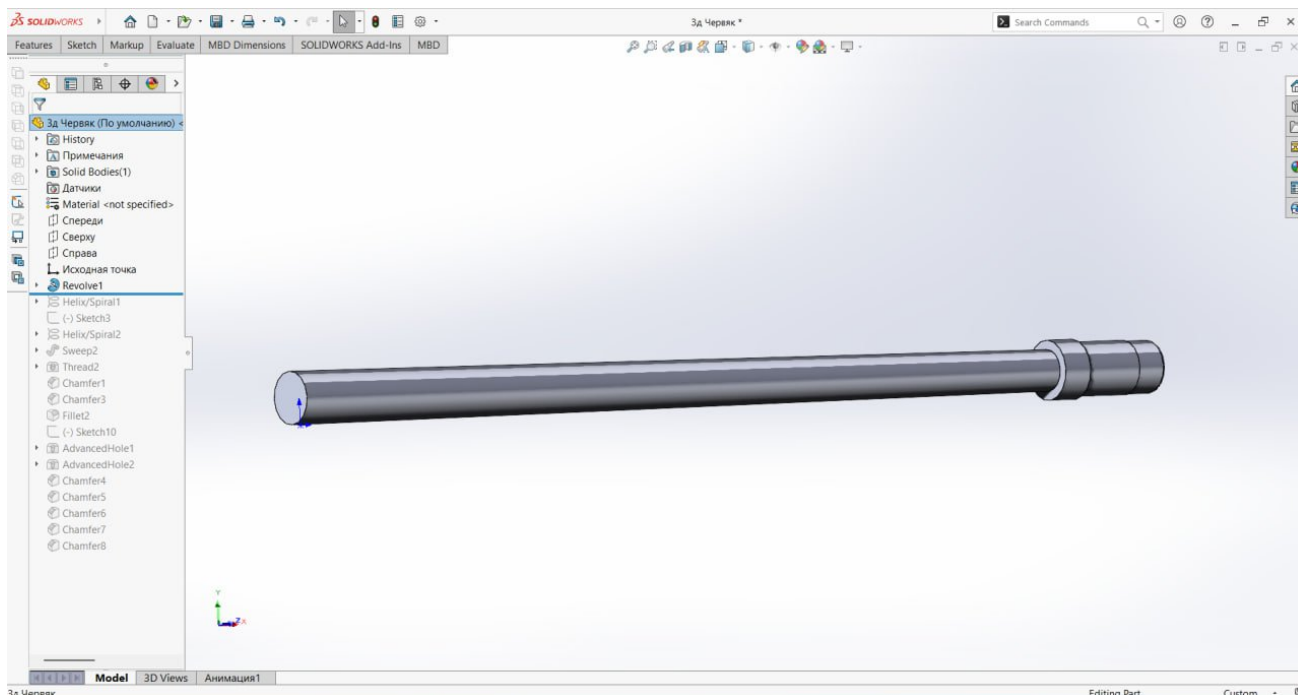


Рис.5.7.2 – 3д модель черв'яка

Щоб зробити витки для черв'яка використовуємо команду Helix , Для початку ми робимо на кінці нашого валу ескіз кола діаметром 160мм , який далі розтягуємо по всій довжині робочої частини нашого черв'яку отримуючи спіраль . Після чого на торці нашого валу формуємо прямокутник з відповідними розмірами , який ми і будемо пізніше витягувати вздовж нашого черв'яку . (рис.5.7.3) та (рис.5.7.4)

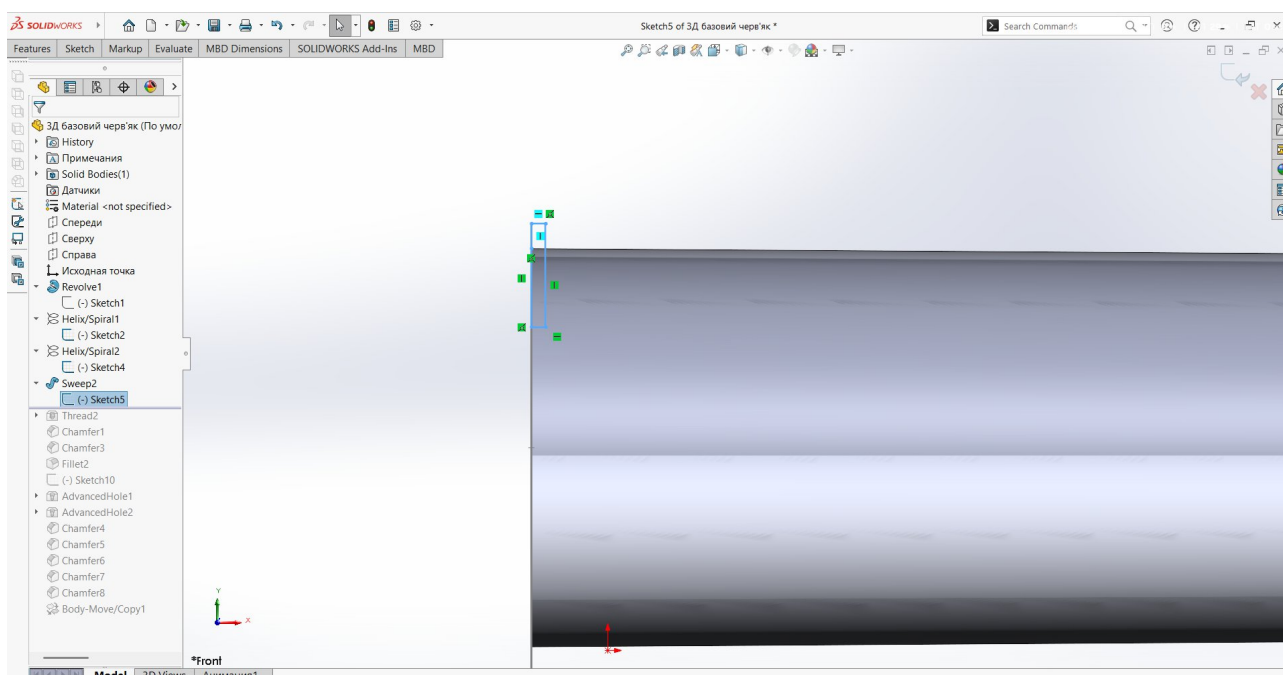


Рис.5.7.3 – формуємо ескіз витку

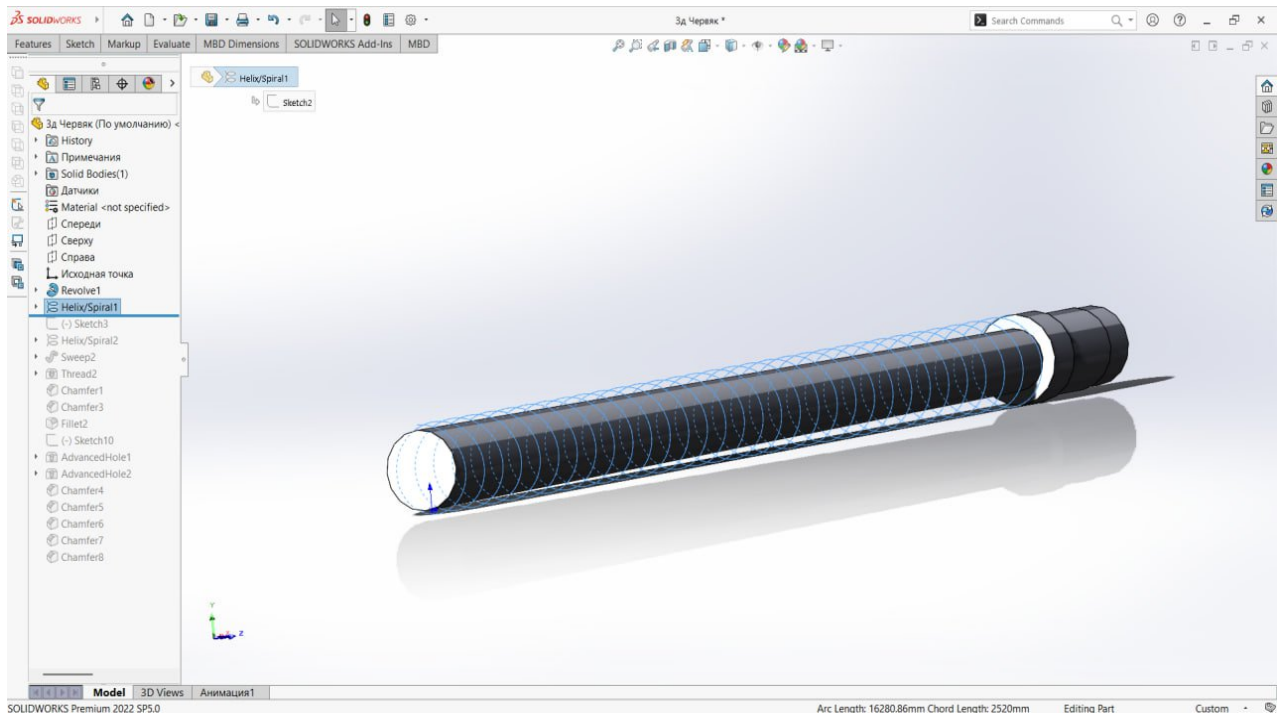


Рис.5.7.4 – Витки на черв'яку

Далі за допомогою команди Sweep прямокутний профіль витка протягується вздовж побудованої спіралі. Такий спосіб дозволяє сформувати гвинтову нарізку по всій робочій частині черв'яка без розривів та зміщень профілю. При цьому зовнішній діаметр робочої частини приймається $\varnothing 160$ мм, а довжина нарізаної ділянки відповідає основним розмірам креслення черв'яка довжиною 2520 мм (рис. 5.7.5).

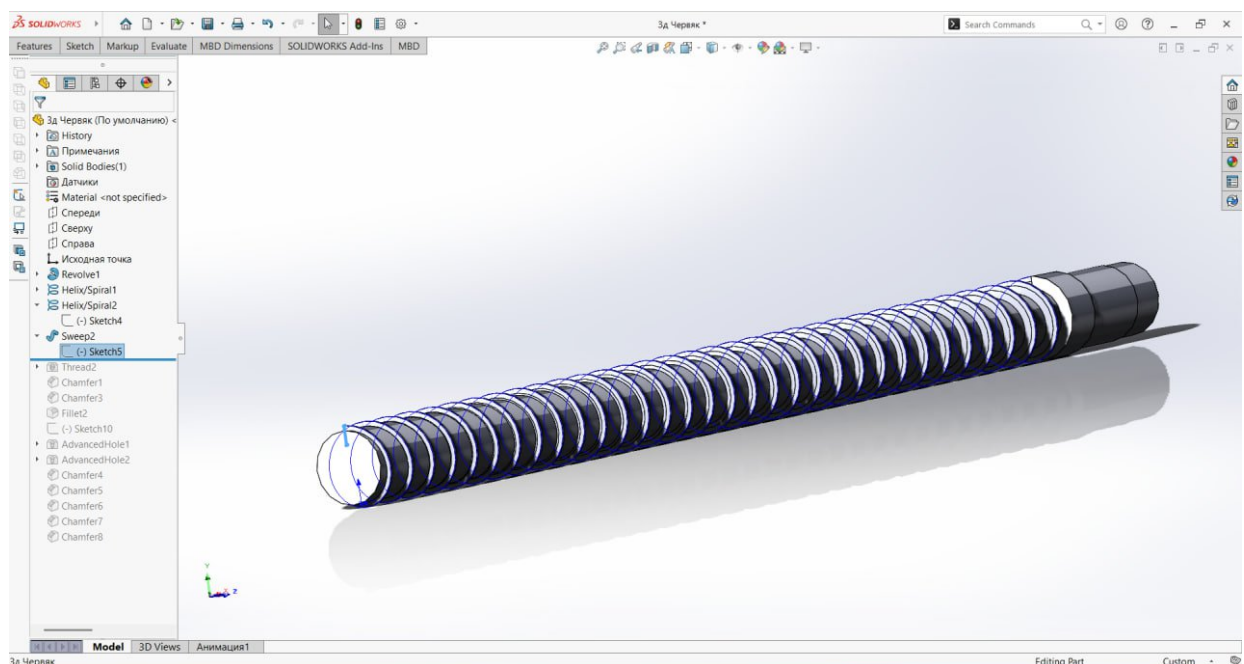


Рис.5.7.5 – Робимо витки на черв'яку

Після формування основних витків на валу виконується різьбова частина.

Вона потрібна для відтворення конструктивних елементів хвостової та приєднувальної зон черв'яка. На кресленні також показані посадочні та приєднувальні розміри, зокрема ділянки довжиною 200 мм і 255 мм на правому кінці деталі, тому під час побудови різьбу розміщуємо саме у відповідній зоні моделі (рис. 5.7.6).

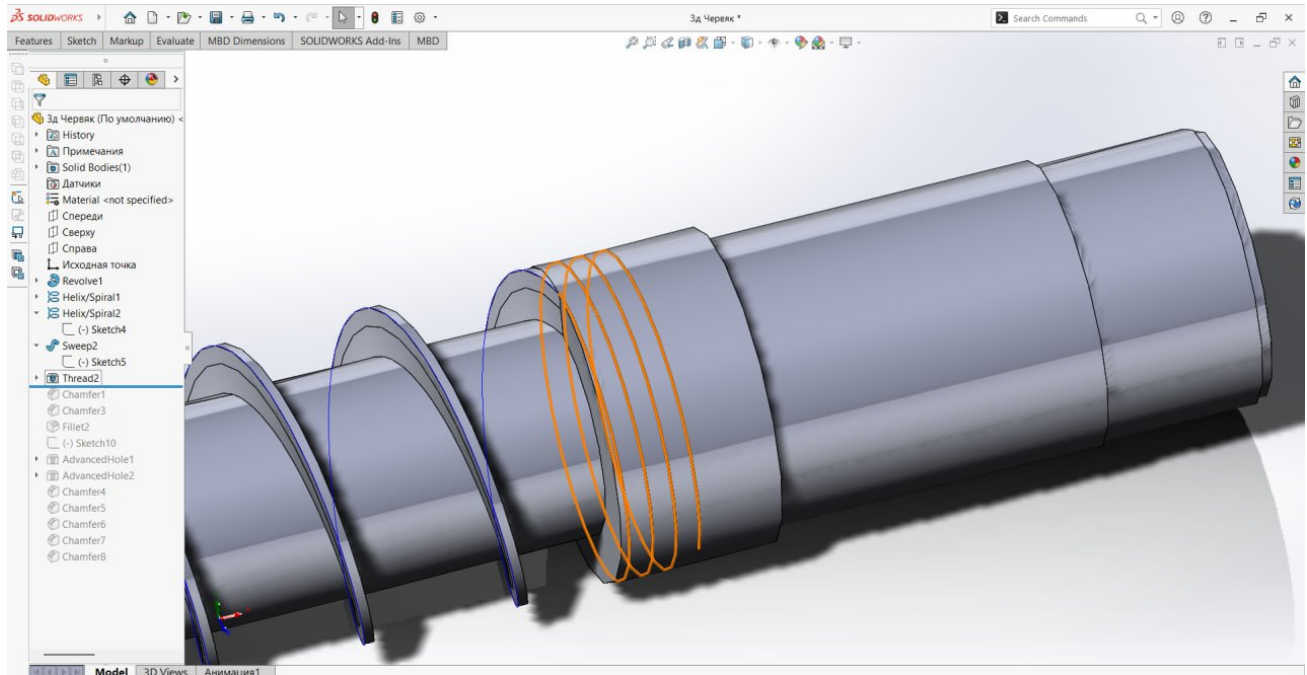


Рис. 5.7.6 – Виконання різьби на черв'яку

Після цього на валу виконуються фаски та скруглення. Вони потрібні для наближення 3D-моделі до реальної деталі та для усунення занадто різких переходів між циліндричними поверхнями. На кресленні для окремих кромок задані фаски типу $2,5 \times 45^\circ$ та радіуси, тому ці елементи додаються на відповідних торцях і переходах моделі (рис.5.7.7).

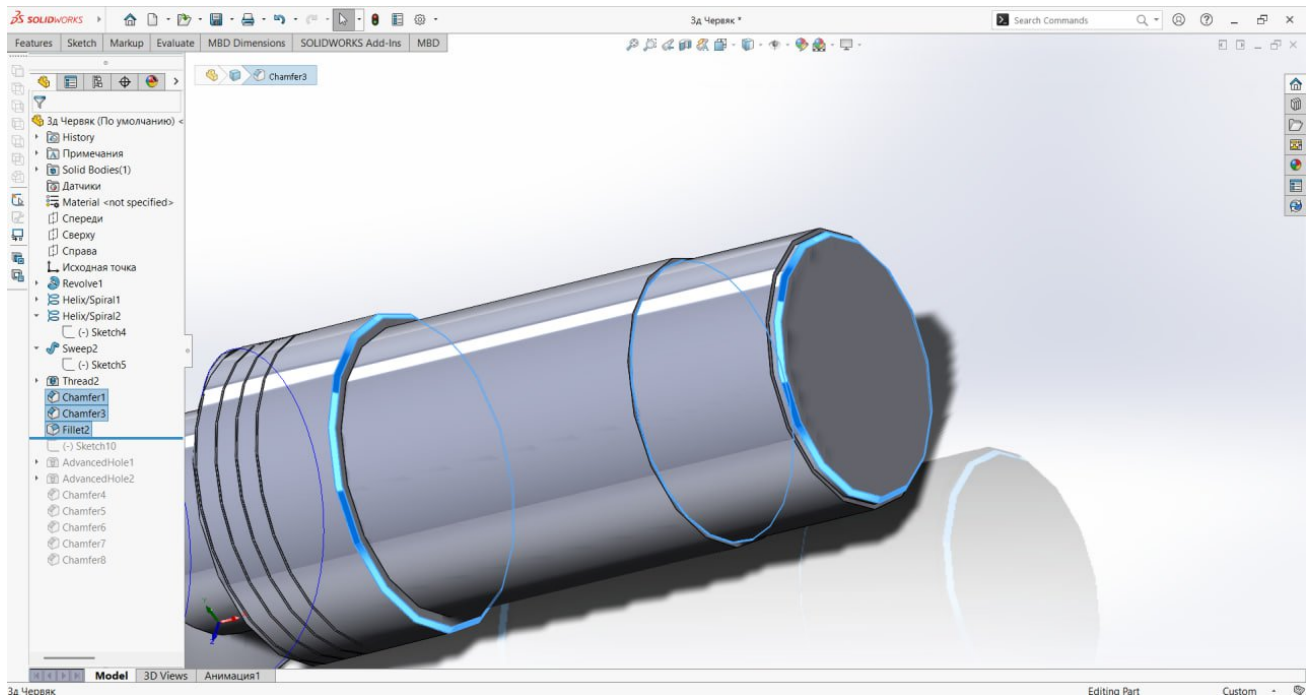


Рис. 5.7.7 – Виконання фасок та скруглень

На завершальному етапі проектування створюються внутрішні отвори та канали черв'яка. Їх будують відповідно до розрізу деталі: у внутрішній частині показані канали $\varnothing 50$ мм, $\varnothing 32$ мм та $\varnothing 40$ мм, а також різьбова ділянка M56 $\times$ 2-7H. Наявність цих отворів важлива, оскільки вони впливають на масу деталі, її жорсткість та можливість організації охолодження черв'яка під час роботи (рис. 5.7.8).

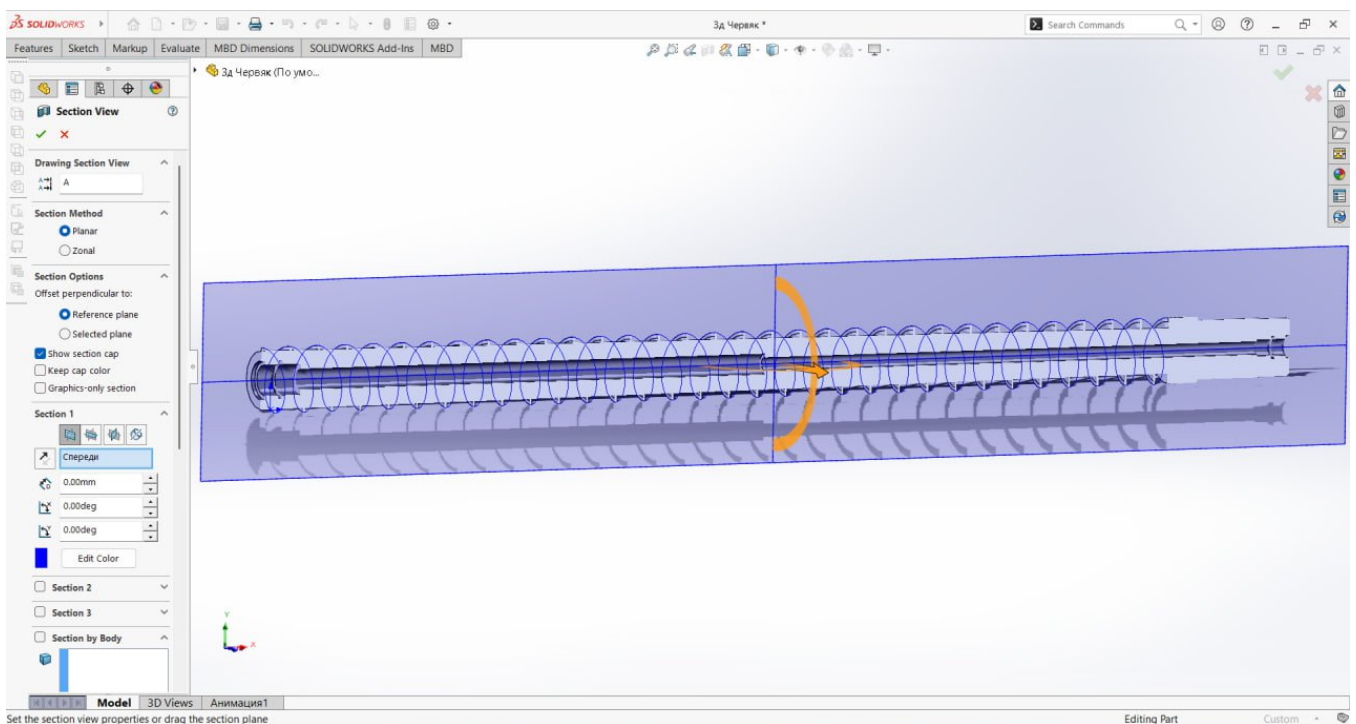


Рис.5.7.8 – Вигляд отворів в розрізі

Отвори в деталі будуються за допомогою інструментів створення отворів та команди Thread. Спочатку задається вісь отвору вздовж тіла черв'яка, після чого вказуються діаметри та глибини згідно з кресленням. Для різьбової частини використовується позначення M56×2-7H, а для гладких каналів враховуються розміри Ø40 мм, Ø32 мм і Ø50 мм. Це дозволяє отримати модель, яка відповідає не тільки зовнішній формі, але й внутрішній будові деталі (рис. 5.7.9).

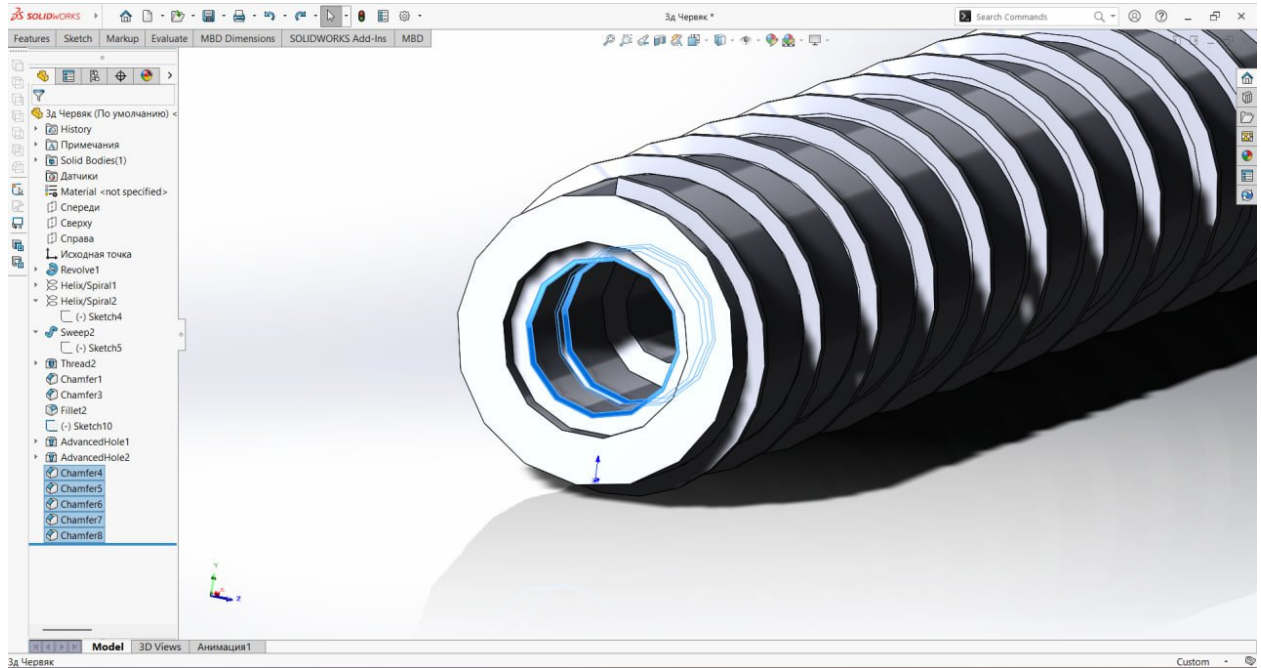


Рис. 5.7.9 – Виконання отворів

5.8 Проектування модернізованого черв'яка

Для проектування модернізованого черв'яка знову створюється його 3D-модель. Базовий контур залишається таким самим, оскільки основні приєднувальні розміри та загальна геометрія вала не змінюються. Модернізована ділянка виконується не по всій довжині черв'яка, а на початковій частині довжиною 500 мм від зони завантаження. Саме на цій ділянці задається новий профіль, який надалі формує змінену робочу поверхню (рис. 5.8.1).

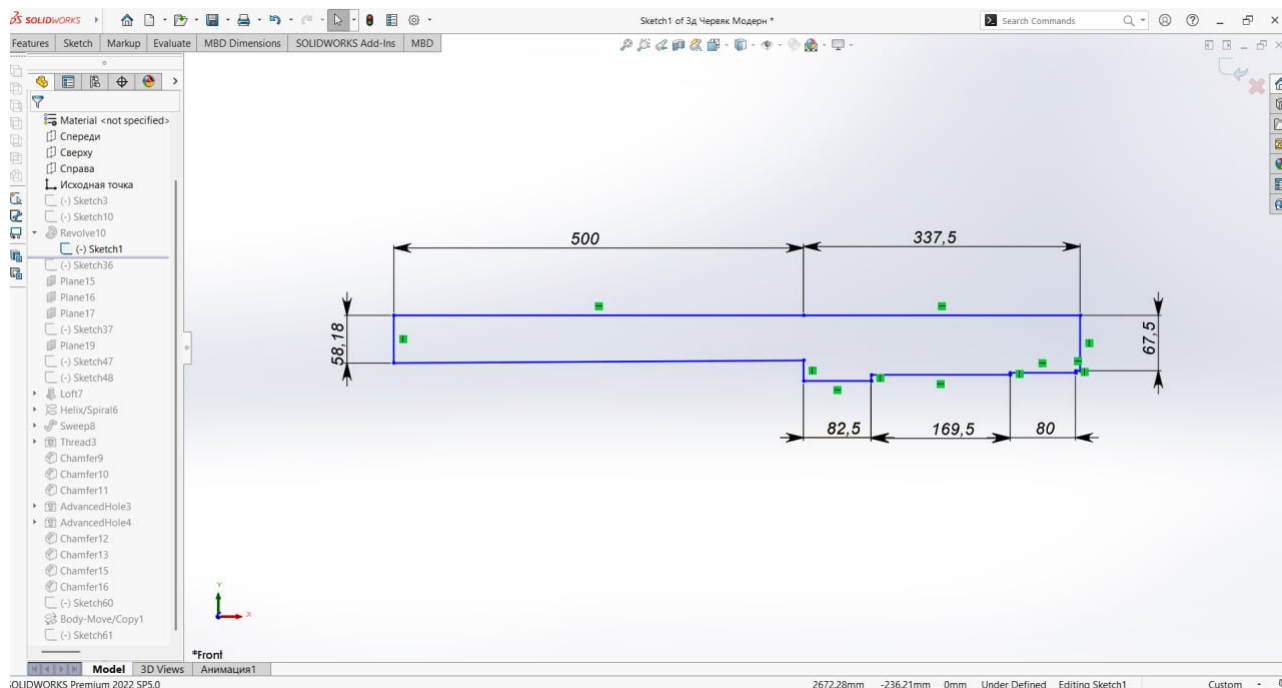


Рис.5.8.1 – Ескіз модернізованого черв'яка

Після цього за допомогою тієї ж команди Revolve ескіз перетворюється у твердотільну заготовку модернізованої частини. Далі вздовж осі шнека створюються три допоміжні площини, на яких будуть розміщені поперечні профілі майбутньої овальної ділянки. За ескізом видно, що після ділянки 500 мм задається наступний відрізок 337,5 мм, а окремі переходи мають розміри 82,5 мм, 169,5 мм та 80 мм. Таке розбиття необхідне для плавного переходу від круглого профілю до овального і назад (рис. 5.8.2).

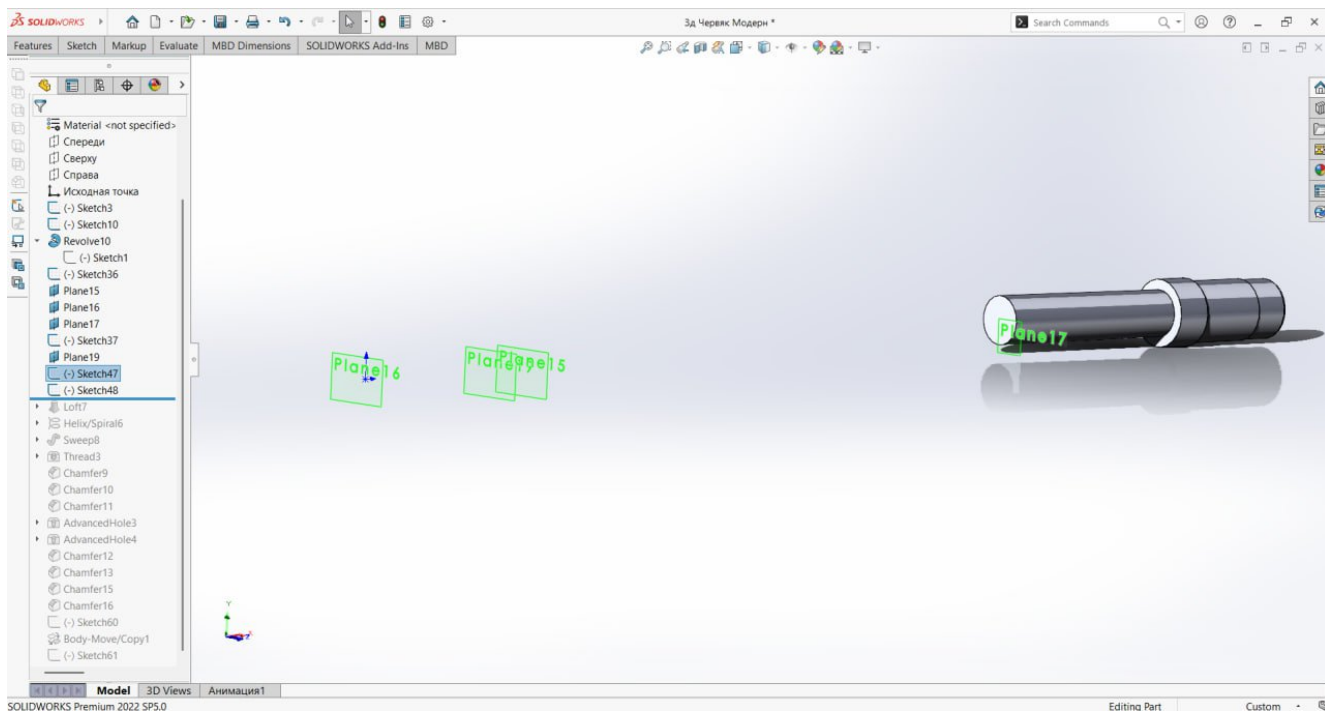


Рис.5.8.2 – Побудова площин та контурів на них

На створених площинах послідовно будуються контури: спочатку круглий профіль, потім овальний контур із заданими розмірами, після чого знову формується круглий переріз. Для овальної частини за ескізом приймаються характерні розміри 62 мм і 54 мм, що задають співвідношення великої та малої осей профілю. Таке рішення дозволяє змінити характер руху матеріалу в робочій зоні, не порушуючи загальну посадочну геометрію черв'яка (рис. 3.2.3).

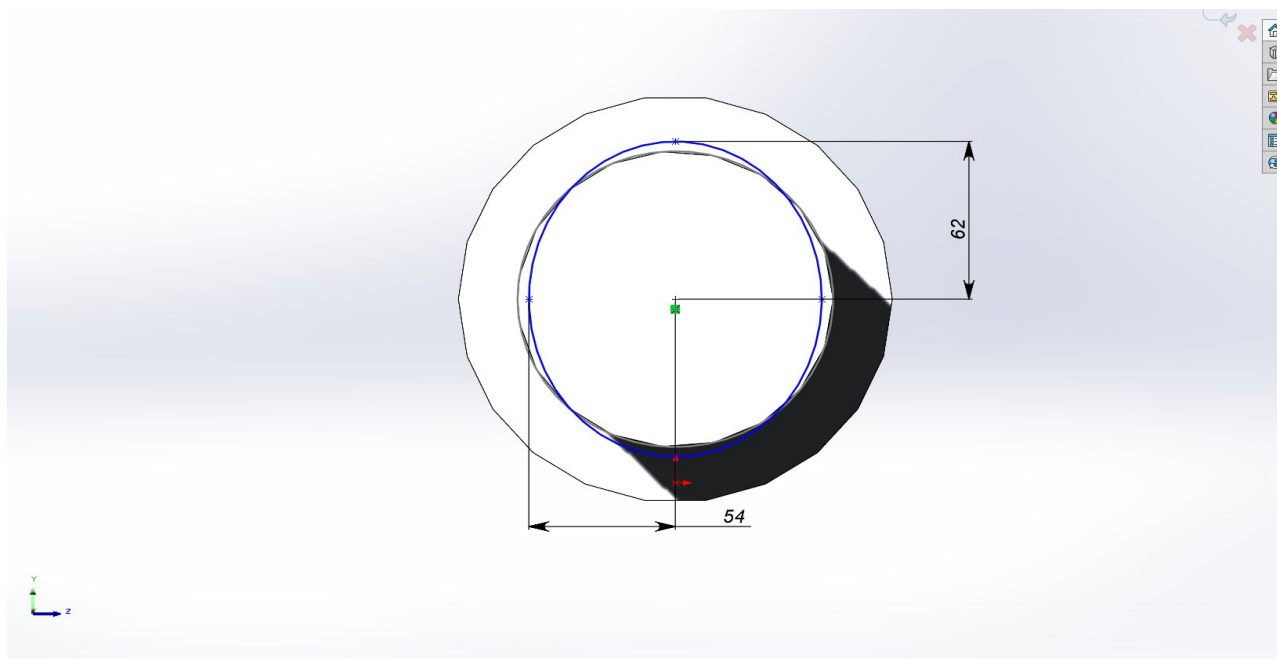


Рис. 5.8.3 – Контур овалу при побудові

За допомогою команди Loft виконується плавне протягування тіла через усі створені профілі. На відміну від звичайного обертання, цей інструмент дає змогу сформувати перехідну поверхню між круглим і овальним перерізом без різких уступів. У результаті отримуємо модернізовану частину шнека, у якій геометрія змінюється поступово по довжині, а овальний профіль вбудовується в основне тіло деталі (рис. 3.2.4).

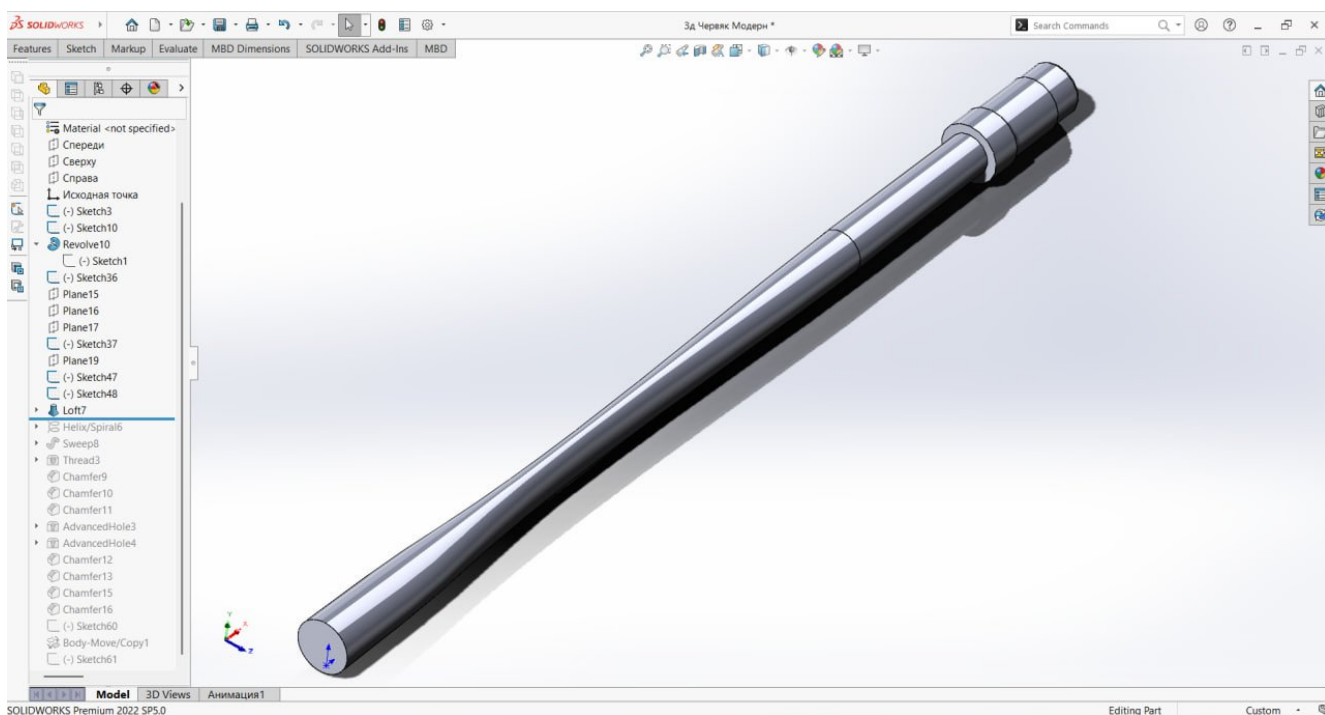


Рис.5.8.4 – Модернізований черв'як в 3д

Після побудови модернізованої частини виконуються ті самі операції, що і для базової моделі: створення гвинтових витків, внутрішніх отворів, різьбових ділянок, фасок та скруглень. При цьому основні зовнішні розміри черв'яка зберігаються, зокрема діаметр робочої частини $\varnothing 160$ мм та довжина базової нарізаної ділянки. Внутрішні канали також залишаються узгодженими з кресленням, що дозволяє порівнювати базову і модернізовану моделі між собою за однаковими габаритними умовами (рис. 3.2.5).

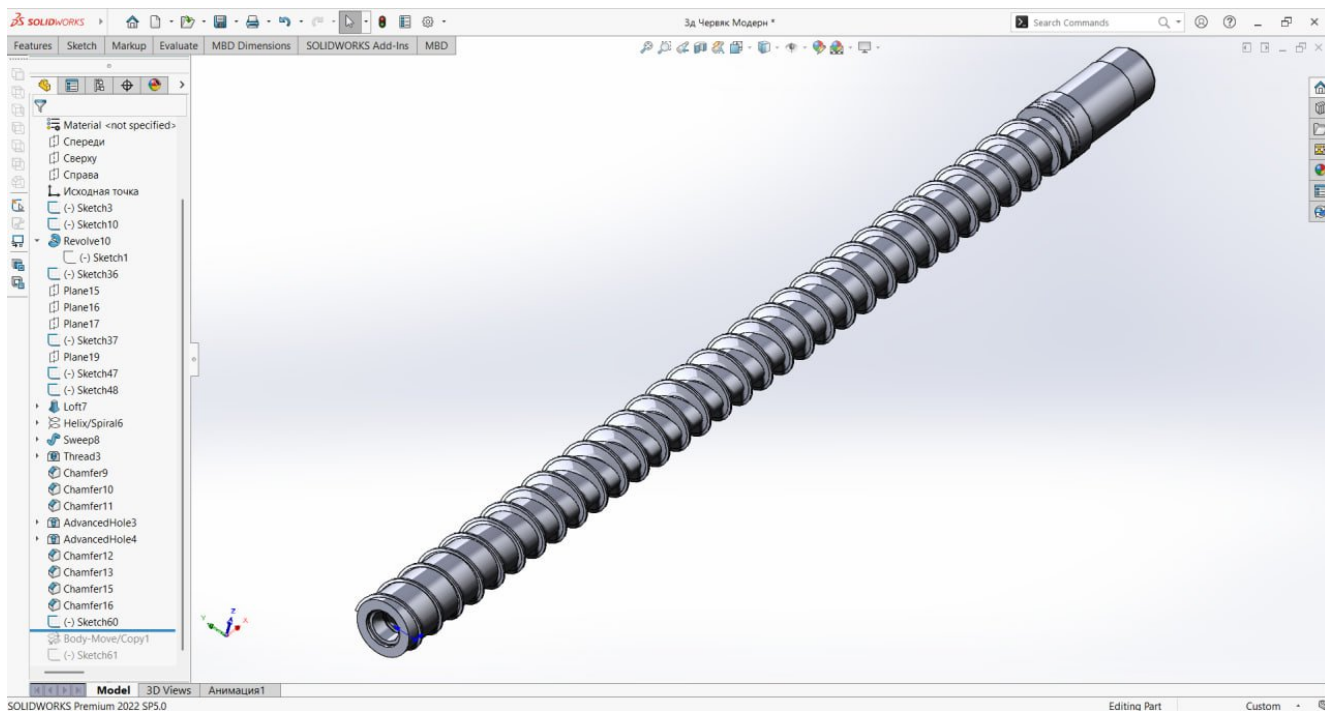


Рис.5.8.5 – Готовий модернізований черв'як

У результаті було отримано 3D-модель модернізованого черв'яка з овальною ділянкою шнека, яка відповідає прийнятому варіанту модернізації. Побудована модель зберігає базові приєднувальні розміри, але має змінену геометрію робочої зони, що надалі дозволяє порівнювати її з базовим черв'яком під час числового аналізу.

5.9. Числове моделювання базового ексцентрикового валу

5.9.1 Розрахунок базового черв'яку

Спочатку в середовищі ANSYS Workbench створюємо розрахункову схему Static Structural, у якій надалі задаються матеріал, сітка, закріплення, навантаження та результати для базового черв'яка (рис 5.9.1)

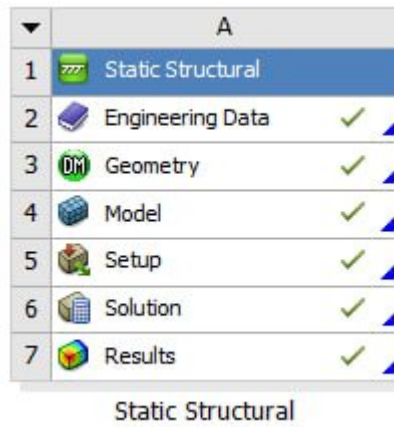


Рис. 5.9.1 – Дерево розрахункової схеми Static Structural для базового черв'яка

Після цього імпортуємо 3D-модель базового черв'яка з SolidWorks в ANSYS. Для зручності аналізу робочу частину моделі розділяємо на окремі ділянки за допомогою операції Extrude, що дозволяє коректніше задати області контролю та оцінити розподіл деформацій уздовж довжини деталі (рис. 5.9.2).

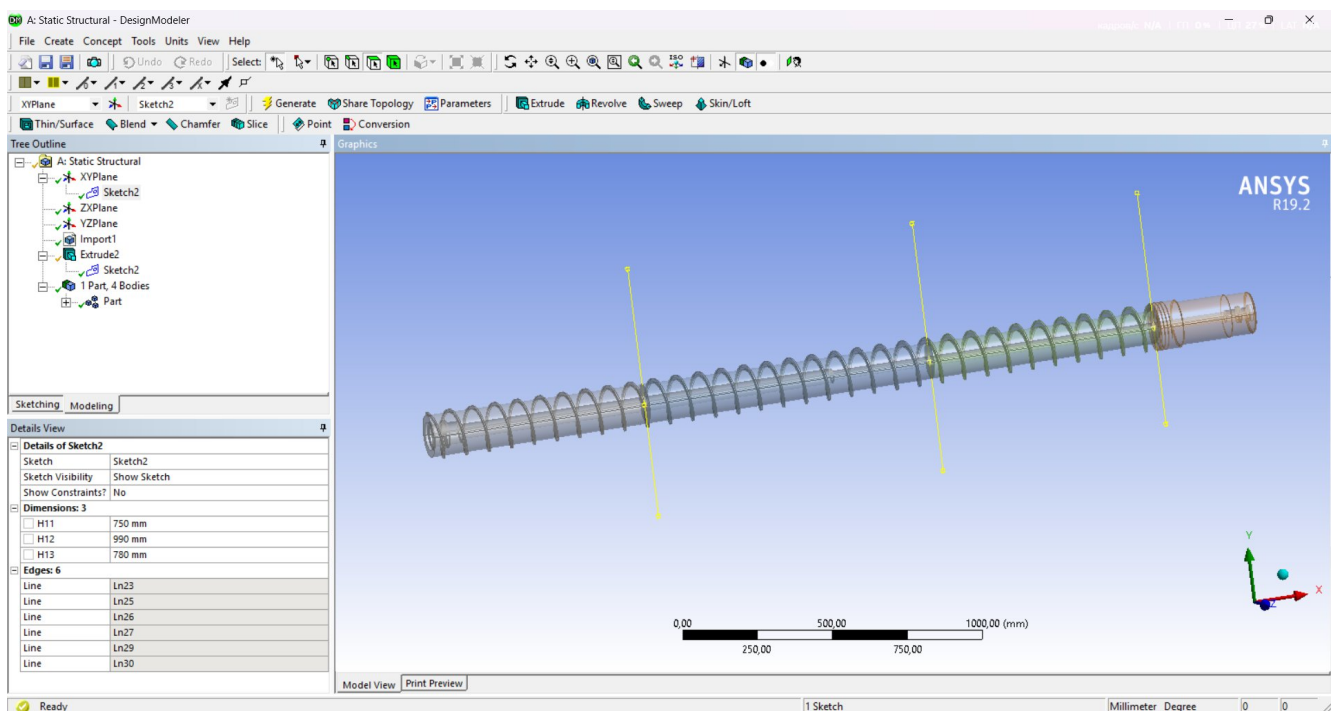


Рис. 5.9.2 – Поділ геометрії базового черв'яка на розрахункові ділянки

Шнек поділено за такими розмірами, починаючи з розвантажувальної сторони:

H1 – 750 мм

H2 – 990 мм

H3 – 780 мм

H4 – 840 мм

Далі для базового черв'яка задаємо механічні характеристики матеріалу, які будуть використовуватися під час розрахунку напружень, деформацій та коефіцієнта запасу міцності (рис. 5.9.3).

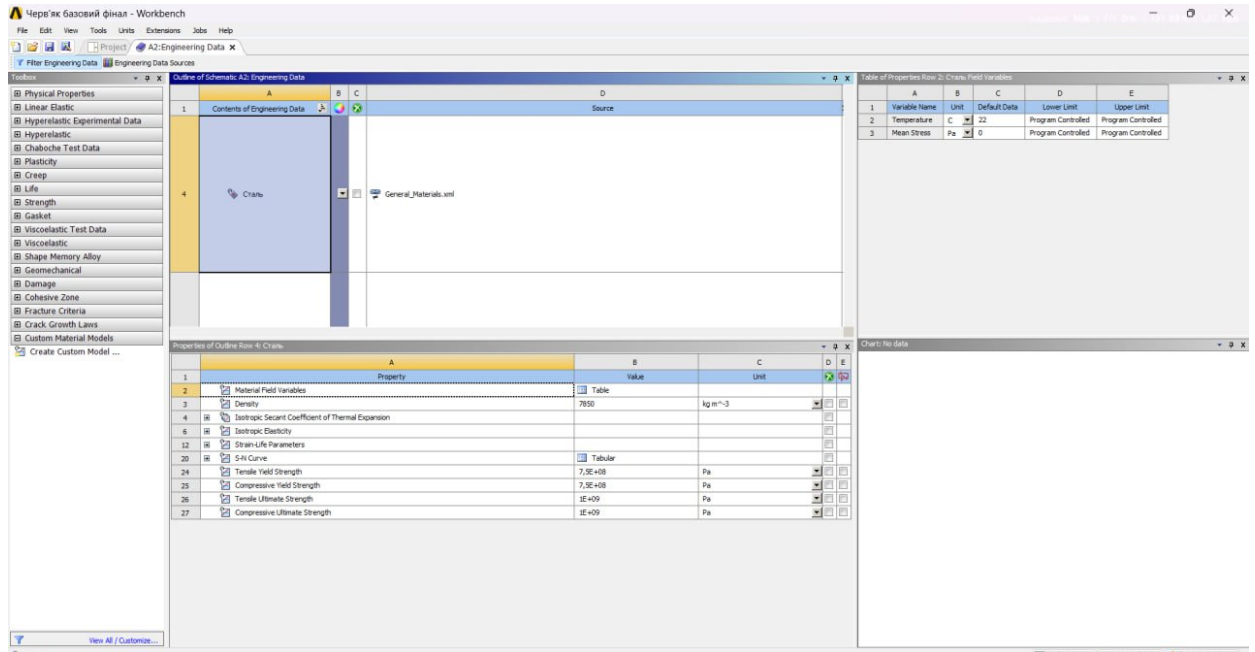


Рис. 5.9.3 – Механічні характеристики матеріалу базового черв'яка

Для розрахунку базового черв'яка задаємо граничні умови та навантаження: Fixed Support на хвостовій частині, Cylindrical Support як додаткову опору, крутний момент $3,8 \cdot 10^5$ Н·мм та тиск суміші 29 МПа. Така схема дозволяє врахувати дію крутного моменту від приводу та тиску матеріалу на робочу частину черв'яка (рис. 5.9.4).

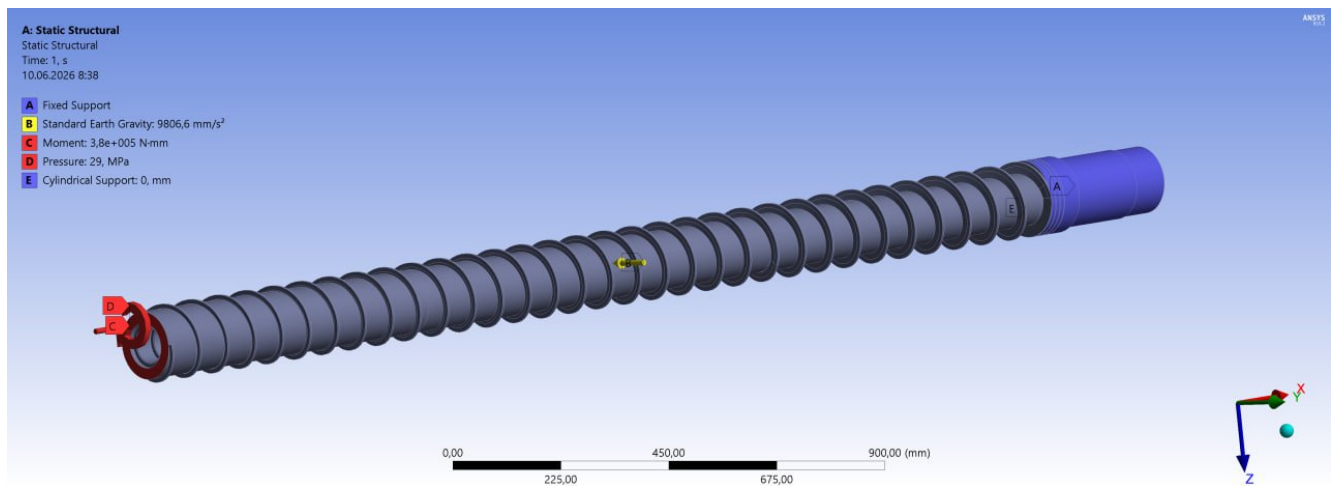


Рис. 5.9.4 – Закріплення та навантаження базового черв'яка в ANSYS

Після задання навантажень створюємо сітку скінченних елементів із розміром елемента 10 мм. Така сітка забезпечує достатню деталізацію витків і перехідних зон базового черв'яка для подальшого аналізу (рис. 5.9.5).

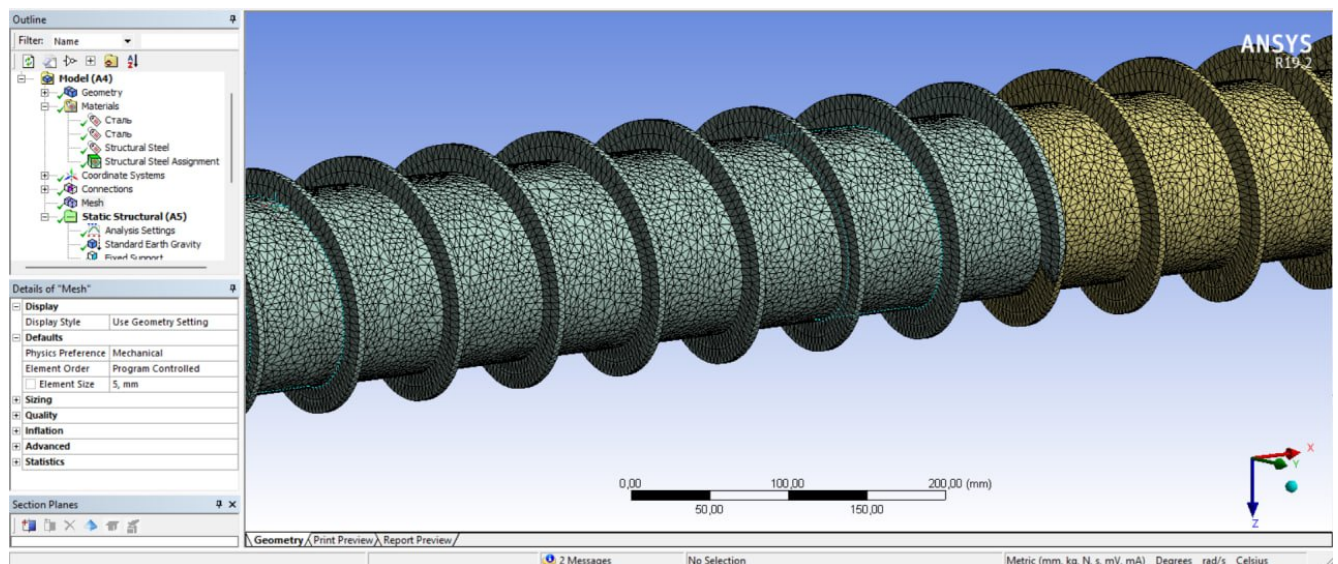


Рис. 5.9.5 – Сітка скінченних елементів базового черв'яка

Перед виконанням механічного розрахунку також задається тепловий розрахунок у модулі Steady-State Thermal. Це потрібно для врахування температурного стану деталі під час роботи та подальшої оцінки її поведінки під навантаженням (рис. 5.9.6, рис. 5.9.7).

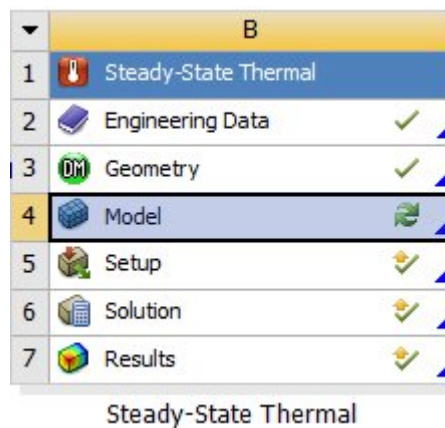


Рис. 5.9.6 – Дерево теплового розрахунку Steady-State Thermal для базового черв'яка

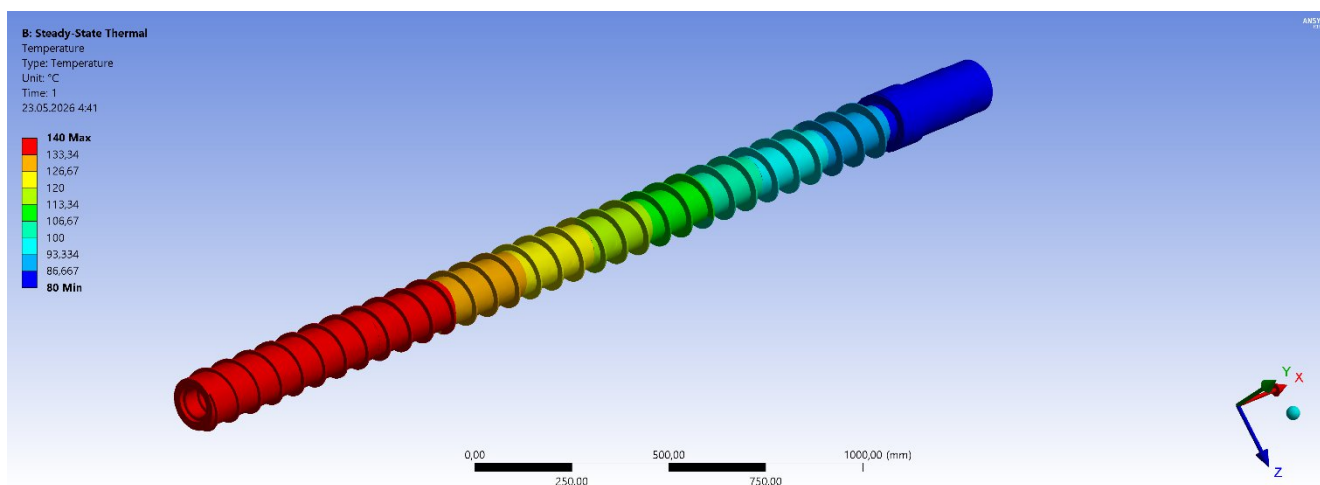


Рис. 5.9.7 – Розподіл температури базового черв'яка

Після задання закріплень, навантажень, сітки та температурних умов виконуємо основні результати статичного розрахунку базового черв'яка.

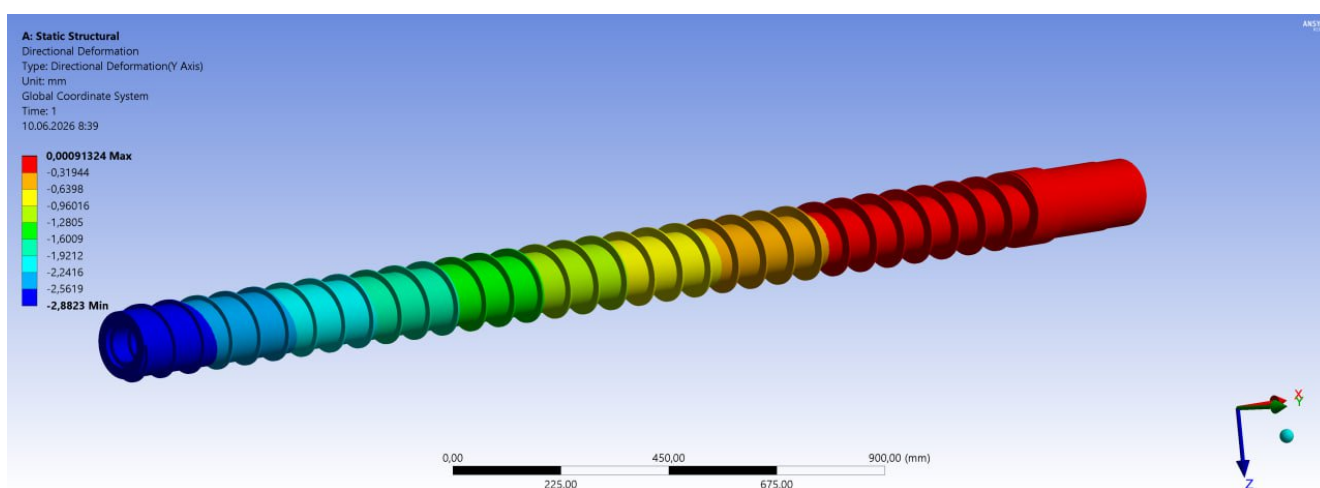


Рис. 5.9.8 – Напрявлене переміщення базового черв'яка по осі Y

За результатом Directional Deformation (рис. 5.9.8) найбільше за модулем переміщення базового черв'яка по осі Y становить 2,8823 мм, при цьому мінімальне значення дорівнює $-2,8823$ мм, а максимальне додатне переміщення становить 0,00091324 мм. Найбільше відхилення спостерігається на лівій частині деталі, тоді як у напрямку до правої закріпленої ділянки переміщення поступово зменшується майже до нуля. Такий розподіл є характерним для видовженого вала, який працює під дією крутного моменту та тиску: найбільш вільна частина має найбільше переміщення, а зона закріплення залишається найжорсткішою.

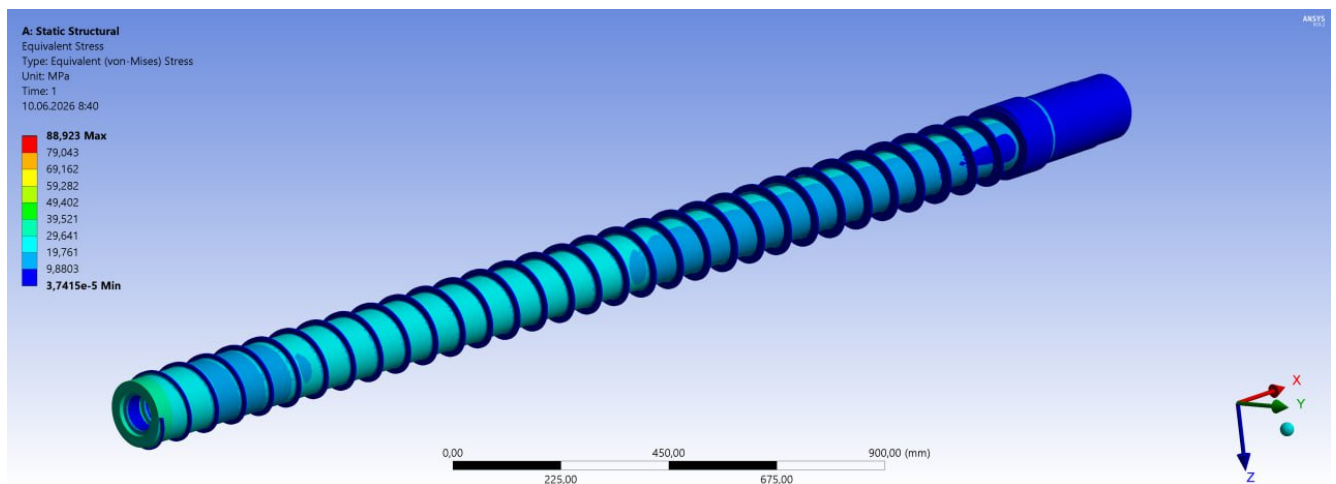


Рис. 5.9.9 – Еквівалентні напруження за Мізесом у базовому черв'яку

За результатом Equivalent Stress (рис. 5.9.9) максимальні еквівалентні напруження за Мізесом у базовому черв'яку становлять 88,923 МПа. Основна частина поверхні деталі знаходиться в синій та блакитній зонах, тобто напруження на більшій довжині черв'яка залишаються відносно невисокими. Локальне підвищення напружень виникає в приєднувальній та перехідній частині, де діють закріплення, момент і тиск. Отримане значення не свідчить про критичне перевантаження, але показує найбільш небезпечні місця, на які потрібно звертати увагу при порівнянні з модернізованим варіантом.

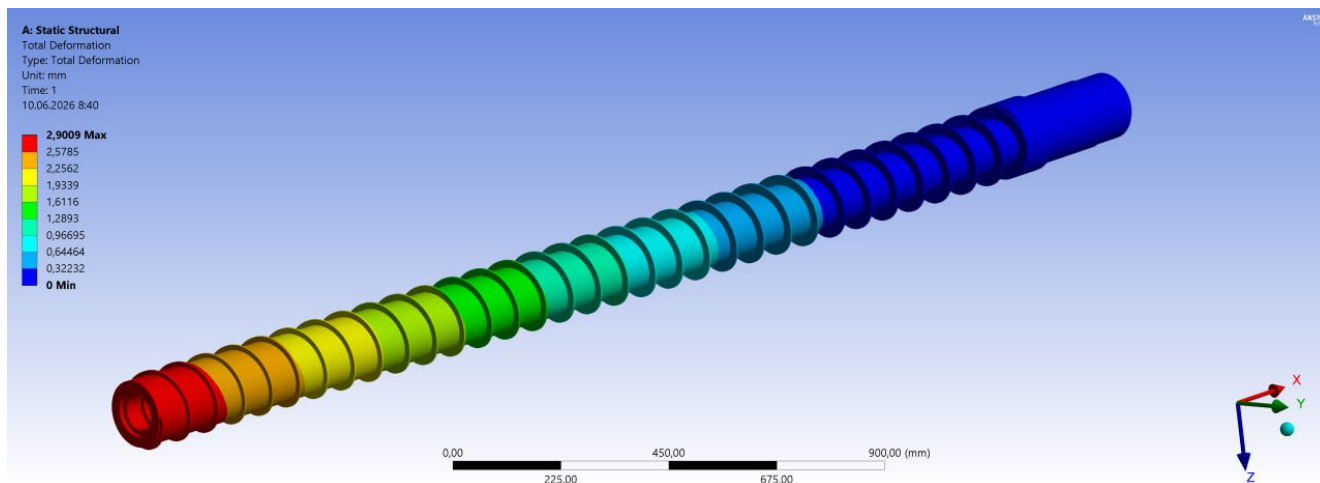


Рис. 5.9.10 – Сумарна деформація базового черв'яка

За результатом Total Deformation (рис. 5.9.10) максимальна сумарна деформація базового черв'яка становить 2,9009 мм, а мінімальне значення дорівнює 0 мм у зоні закріплення. Найбільші переміщення виникають на лівій частині моделі, після чого деформація плавно зменшується вздовж осі черв'яка у напрямку до хвостової частини. Плавний характер зміни кольорів показує, що конструкція сприймає навантаження без різких локальних перегинів. Для базового варіанту така деформація є допустимою, однак саме вона може бути використана як початкове значення для подальшого порівняння з модернізованим черв'яком.

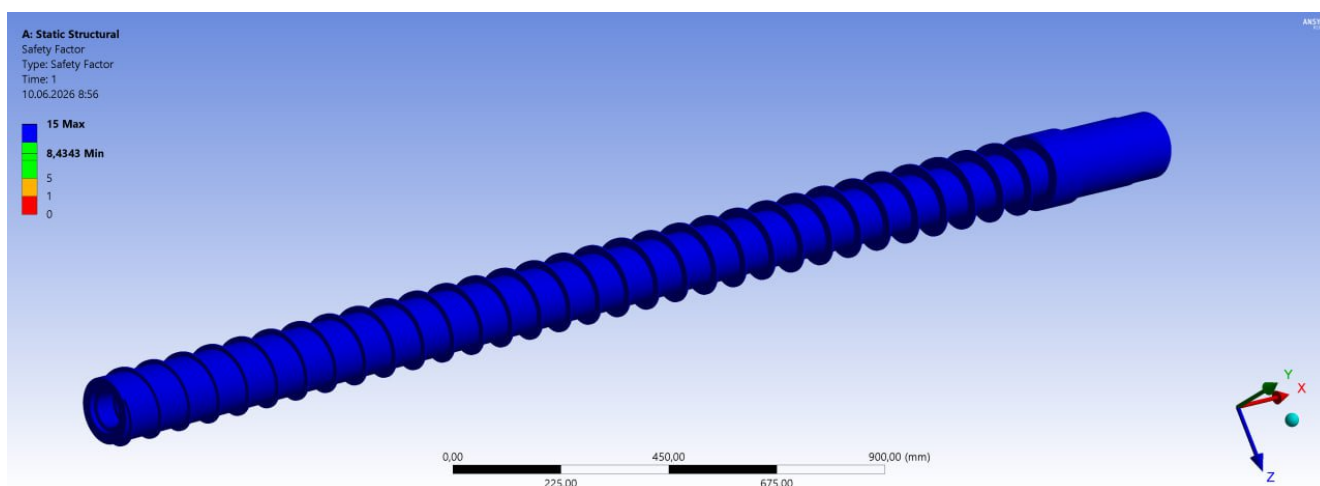


Рис. 5.9.11 – Коефіцієнт запасу міцності базового черв'яка

За результатом Safety Factor (рис. 5.9.11) мінімальний коефіцієнт запасу міцності базового черв'яка становить 8,4343, а максимальне відображене

значення дорівнює 15. Оскільки мінімальний коефіцієнт значно перевищує одиницю, базовий черв'як має достатній запас міцності при заданих навантаженнях. Найменше значення коефіцієнта відповідає зонам із найбільшими еквівалентними напруженнями, але навіть у цих місцях небезпечного стану за результатами розрахунку не спостерігається.

5.9.2 Розрахунок модернізованого черв'яку

Для розрахунку модернізованого черв'яка використовуємо ті самі основні умови, що і для базового варіанту: матеріал, тип сітки, схему закріплення, крутний момент та тиск суміші. Це потрібно для того, щоб результати можна було коректно порівняти між собою, а вплив на напруження і деформації оцінювався саме від зміни геометрії черв'яка.

Геометрію модернізованого черв'яка, як і базову модель, поділяємо на окремі розрахункові ділянки. Такий поділ допомагає зручніше контролювати розподіл навантажень і переміщень уздовж робочої частини деталі.

Розміри ділянок прийнято такими:

H1 – 750 мм

H2 – 990 мм

H3 – 780 мм

H4 – 840 мм

Після підготовки геометрії задаємо навантаження та опори для модернізованого черв'яка. На модель прикладено крутний момент $3,8 \cdot 10^5$ Н·мм, тиск суміші 29 МПа, дію сили тяжіння, Fixed Support та Cylindrical Support. Така постановка відповідає умовам, використаним для базового черв'яка, тому результати можна порівнювати без зміни розрахункової схеми. (рис 5.9.12)

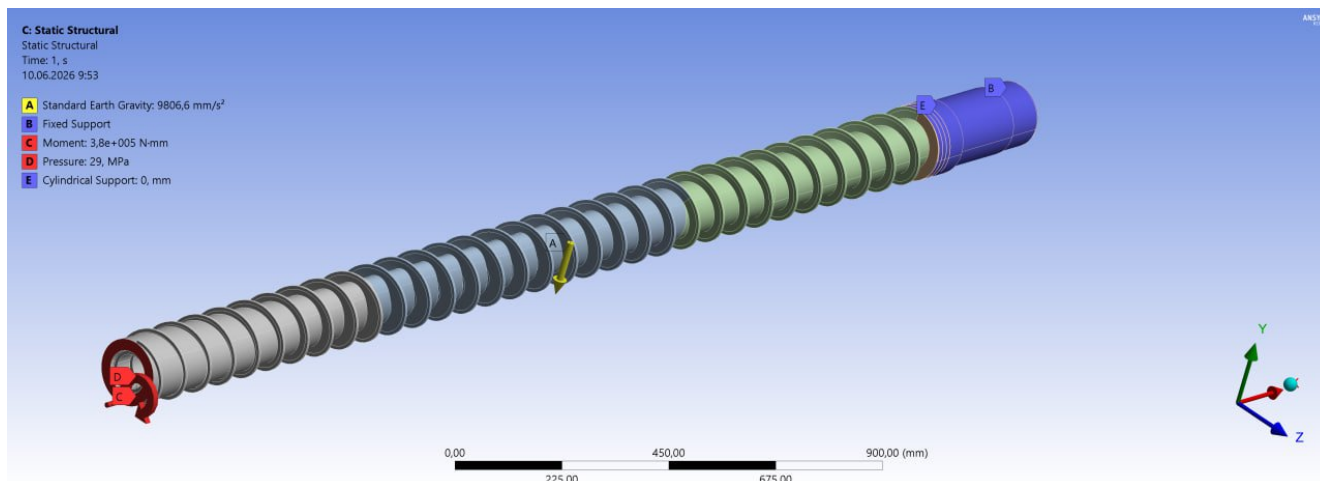


Рис. 5.9.12 – Закріплення та навантаження модернізованого черв'яка

Після задання закріплень виконуємо ті самі типи розрахунків, що і для базового черв'яка: температурний стан, напрямлене переміщення, еквівалентні напруження та сумарну деформацію.

За результатом теплового розрахунку температура модернізованого черв'яка змінюється від 80 °С до 140 °С. Найвища температура спостерігається на початковій робочій ділянці, а в напрямку до хвостової частини вона поступово зменшується. Такий розподіл відповідає умовам роботи черв'яка, оскільки найбільше теплове навантаження припадає на зону активної взаємодії з матеріалом. (рис.5.9.13)

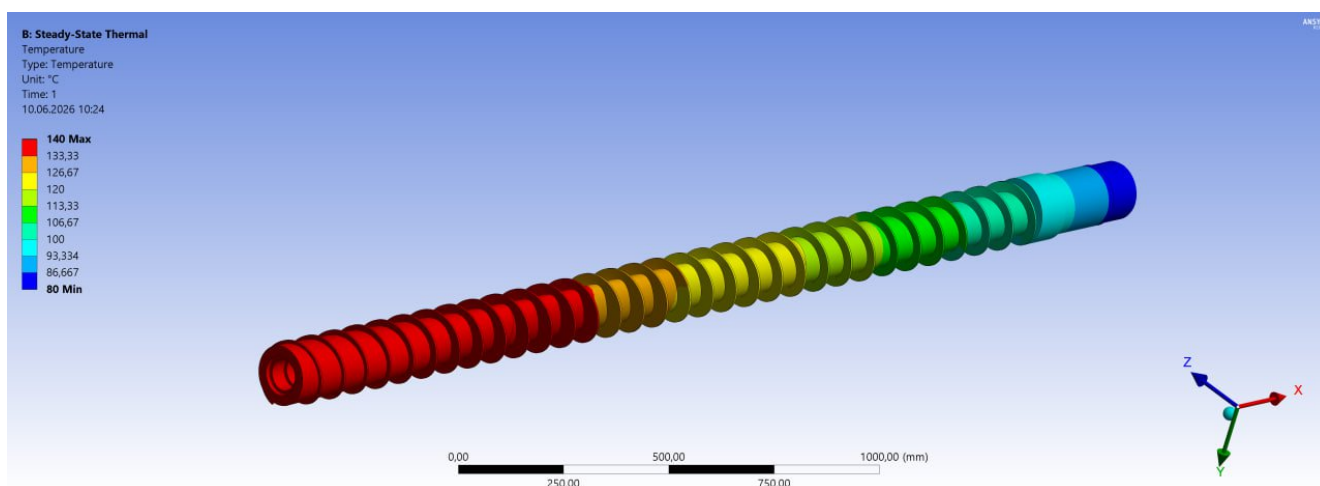


Рис. 5.9.13 – Розподіл температури модернізованого черв'яка

Далі проводимо основні механічні розрахунки модернізованого черв'яка.

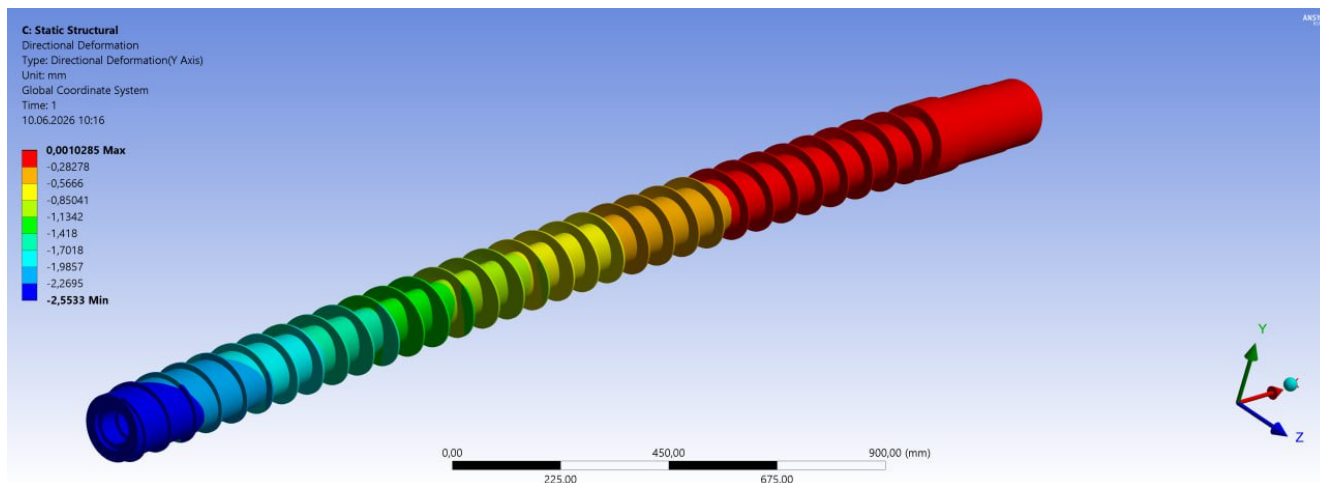


Рис. 5.9.14 – Напрявлене переміщення модернізованого черв'яка по осі Y

За результатом Directional Deformation (рис. 5.9.14) найбільше за модулем переміщення модернізованого черв'яка по осі Y становить 2,5533 мм, при цьому мінімальне значення дорівнює $-2,5533$ мм, а максимальне додатне переміщення становить $0,0010285$ мм. Найбільше відхилення, як і в базовому варіанті, спостерігається на лівій частині деталі, після чого переміщення плавно зменшується у напрямку до закріплення. Для базового черв'яка найбільше переміщення становило $2,8823$ мм, тому модернізована конструкція зменшує напрямлену деформацію приблизно на $11,4\%$. Це свідчить про підвищення жорсткості черв'яка та кращу здатність зберігати положення осі під навантаженням.

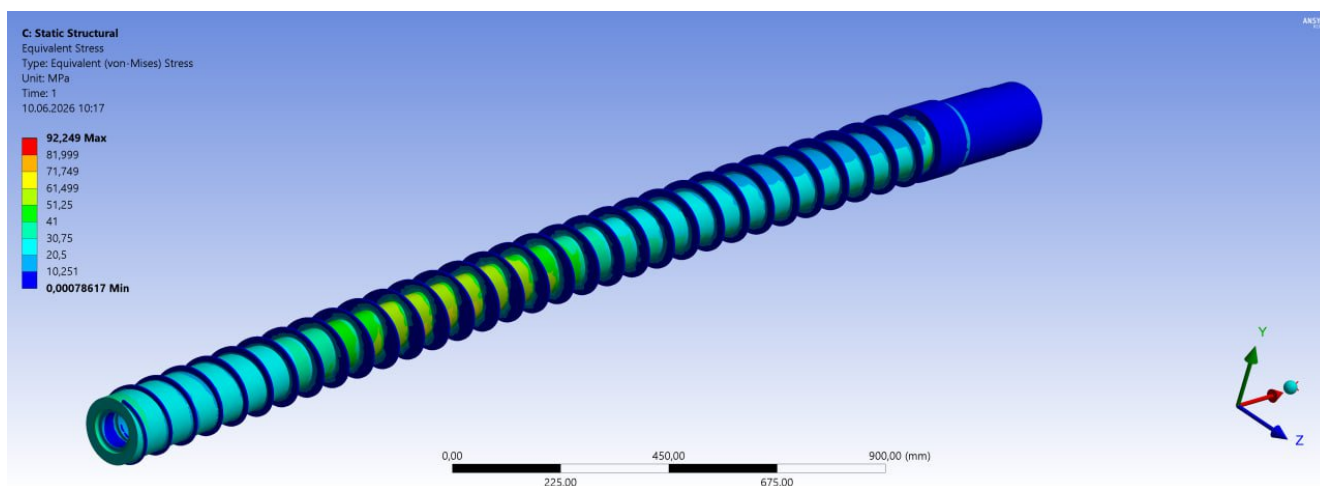


Рис. 5.9.15 – Еквівалентні напруження за Мізесом у модернізованому черв'яку

За результатом Equivalent Stress (рис. 5.9.15) максимальні еквівалентні напруження за Мізесом у модернізованому черв'яку становлять 92,249 МПа. Основна частина поверхні залишається в синій та блакитній зонах, а підвищені напруження мають локальний характер і проявляються переважно в зоні витків та переходів геометрії. У базового черв'яка максимальні напруження становили 88,923 МПа, тобто після модернізації вони збільшилися приблизно на 3,7 %. Таке зростання можна пояснити зміною форми робочої ділянки, через що навантаження частково концентрується на окремих переходах. При цьому напруження не виглядають критичними, а їх локальний характер потрібно враховувати при загальній оцінці міцності.

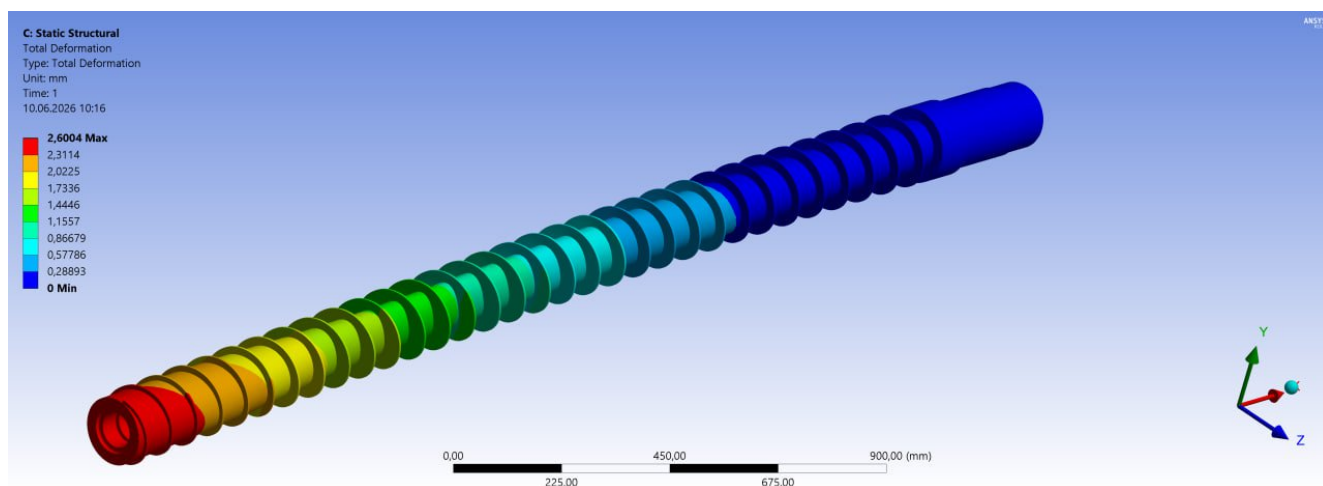


Рис. 5.9.16 – Сумарна деформація модернізованого черв'яка

За результатом Total Deformation (рис. 5.9.16) максимальна сумарна деформація модернізованого черв'яка становить 2,6004 мм, а мінімальне значення дорівнює 0 мм у зоні закріплення. Найбільші переміщення розташовані на лівій частині моделі, після чого деформація поступово зменшується вздовж осі черв'яка. Для базового черв'яка максимальна сумарна деформація становила 2,9009 мм, тому модернізований варіант зменшує загальне переміщення приблизно на 10,4 %. Це підтверджує, що зміна конструкції позитивно вплинула на жорсткість деталі, хоча за напруженнями необхідно контролювати локально навантажені ділянки.

Висновок: за результатами ANSYS-розрахунку модернізованого черв'яка: при однакових навантаженнях і закріпленнях модернізована конструкція показала менші переміщення порівняно з базовим черв'яком, що свідчить про підвищення жорсткості. Максимальні еквівалентні напруження стали трохи більшими, однак їх збільшення є невеликим і має локальний характер. Отже, модернізація в цілому покращує деформаційну поведінку черв'яка, а найбільш навантажені зони потрібно враховувати при подальшій оцінці міцності та довговічності деталі.

6. ОХОРОНА ПРАЦІ

Тема дипломного проєкту: «Гумопереробна машина типу МЧХ-160 з модернізацією черв'яка».

Мета розділу полягає у визначенні вимог охорони праці під час експлуатації гумопереробної машини МЧХ-160, забезпеченні безпечних умов праці обслуговуючого персоналу та зниженні впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів на працівників. Машина призначена для переробки гумових сумішей шляхом їх транспортування, ущільнення та подачі до формувальної головки. Під час роботи обладнання виникає ряд факторів, які можуть негативно впливати на здоров'я персоналу та безпечність виробничого процесу.

Відповідно до наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості України №890 від 02.12.2013 року «Про затвердження Правил охорони праці на підприємствах з виробництва шин та гумових виробів»[12], роботодавець зобов'язаний забезпечити належні та безпечні умови праці, здійснювати контроль виробничих факторів, організовувати навчання працівників з питань охорони праці та вживати заходів щодо попередження виробничого травматизму і професійних захворювань.

У процесі експлуатації гумопереробної машини МЧХ-160 працівники можуть зазнавати впливу наступних небезпечних та шкідливих виробничих чинників:

- підвищений рівень шуму;
- підвищений рівень вібрації;
- нагріті поверхні обладнання;
- випари компонентів гумових сумішей;
- небезпека ураження електричним струмом;
- ризик виникнення пожежі;

Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори при експлуатації машини МЧХ-160

Виробничий фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Заходи захисту
Рухомі частини машини	Черв'як, привід, редуктор	Механічні травми	Захисні кожухи та блокування
Підвищена температура поверхонь	Корпус та головка машини	Термічні опіки	Теплоізоляція та спецодяг
Виробничий шум	Електродвигун, редуктор	Погіршення слуху	Шумопоглинальні засоби та навушники
Вібрація	Обертові вузли машини	Підвищена втомлюваність	Вібропоглинальні опори
Пари гумових сумішей	Технологічний процес	Подразнення органів дихання	Припливно-витяжна вентиляція
Електричний струм	Електрообладнання	Електротравми	Заземлення та автоматичний захист
Пожежна небезпека	Електромережа, нагріті поверхні	Загоряння	Вогнегасники та пожежна сигналізація

Аналіз наведених факторів свідчить про необхідність впровадження комплексу організаційних та технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці. Особлива увага повинна приділятися справності захисних пристроїв, контролю параметрів виробничого середовища та своєчасному проведенню інструктажів з охорони праці.

Виробничий шум та вібрація

Під час роботи гумопереробної машини джерелами шуму є електродвигун, редуктор та черв'ячний механізм. Тривалий вплив підвищеного шуму негативно впливає на працездатність працівників, знижує концентрацію уваги та може призводити до професійних захворювань органів слуху. Вимоги до допустимих рівнів шуму регламентуються ДСН 3.3.6.037-99 «Державні санітарні норми

виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку»[13]. Згідно з нормативними вимогами рівень шуму на робочих місцях не повинен перевищувати встановлених гранично допустимих значень.

Для зниження рівня шуму передбачаються такі заходи:

- використання звукоізоляційних кожухів;
- регулярне технічне обслуговування редуктора;
- контроль стану підшипникових вузлів;
- балансування рухомих деталей;
- використання засобів індивідуального захисту органів слуху.

Рівень виробничої вібрації повинен відповідати вимогам ДСН 3.3.6.039-99[14]. Для зменшення вібрації обладнання встановлюється на вібропоглинальні опори, а технічний стан обертових вузлів підлягає регулярному контролю.

Електробезпека

Гумопереробна машина МЧХ-160 оснащена електроприводом значної потужності, тому особлива увага приділяється захисту працівників від ураження електричним струмом. Експлуатація електрообладнання повинна здійснюватися відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98 та Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів [15].

Основними заходами електробезпеки є:

- захисне заземлення металевих частин обладнання;
- використання автоматичних вимикачів захисту;
- захист від короткого замикання та перевантаження;
- контроль справності ізоляції кабелів;
- встановлення кнопок аварійної зупинки.

Пожежна безпека

Вимоги пожежної безпеки регламентуються Правилами пожежної безпеки в Україні та ДБН В.1.1-7:2016. Для попередження пожеж передбачаються встановлення порошкових вогнегасників, обладнання приміщення пожежною сигналізацією, контроль технічного стану електромережі та проведення регулярних протипожежних інструктажів.

Виробниче освітлення

Нормативні вимоги до освітлення виробничих приміщень встановлені ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення». Робоче місце оператора повинно бути забезпечене достатнім рівнем освітленості для візуального контролю роботи обладнання та своєчасного виявлення можливих несправностей.

Повітря робочої зони

Під час переробки гумових сумішей можливе виділення парів технологічних компонентів. Вимоги до параметрів повітряного середовища встановлені ДСН 3.3.6.042-99[16].

Для підтримання нормативних параметрів передбачаються місцева витяжна вентиляція, припливно-витяжна система та контроль концентрації шкідливих речовин у повітрі.

Безпечна експлуатація машини МЧХ-160

Перед початком роботи оператор повинен перевірити справність захисних огорожень, стан системи охолодження та роботу контрольно-вимірювальних приладів. Під час експлуатації забороняється очищення рухомих вузлів, зняття захисних кожухів та виконання ремонтних робіт без відключення обладнання від мережі.

Заходи надання долікарської допомоги

У разі травмування працівника рухомими частинами обладнання необхідно негайно зупинити машину та викликати медичну допомогу. При отриманні опіків уражену ділянку охолоджують чистою водою та накладають стерильну пов'язку. У разі ураження електричним струмом потерпілого необхідно звільнити від дії струму та за необхідності провести серцево-легеневу реанімацію до прибуття медичних працівників.

Висновок

Отже, під час експлуатації гумопереробної машини МЧХ-160 необхідно забезпечити виконання комплексу організаційних і технічних заходів з охорони праці. Запропоновані рішення щодо захисту від шуму, вібрації, ураження

електричним струмом, впливу шкідливих речовин та пожежної небезпеки відповідають вимогам чинних нормативних документів. Реалізація зазначених заходів дозволить забезпечити безпечні умови праці персоналу, знизити ризик виробничого травматизму та підвищити надійність експлуатації машини МЧХ

7.ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

7.1 Опис та призначення деталі

Фланець (рис. 8.1) є конструктивним елементом машини МЧХ-160, який використовується для з'єднання та фіксації окремих вузлів механізму. Деталь забезпечує точне взаємне розташування складових частин конструкції та сприймає навантаження, що виникають під час роботи обладнання.

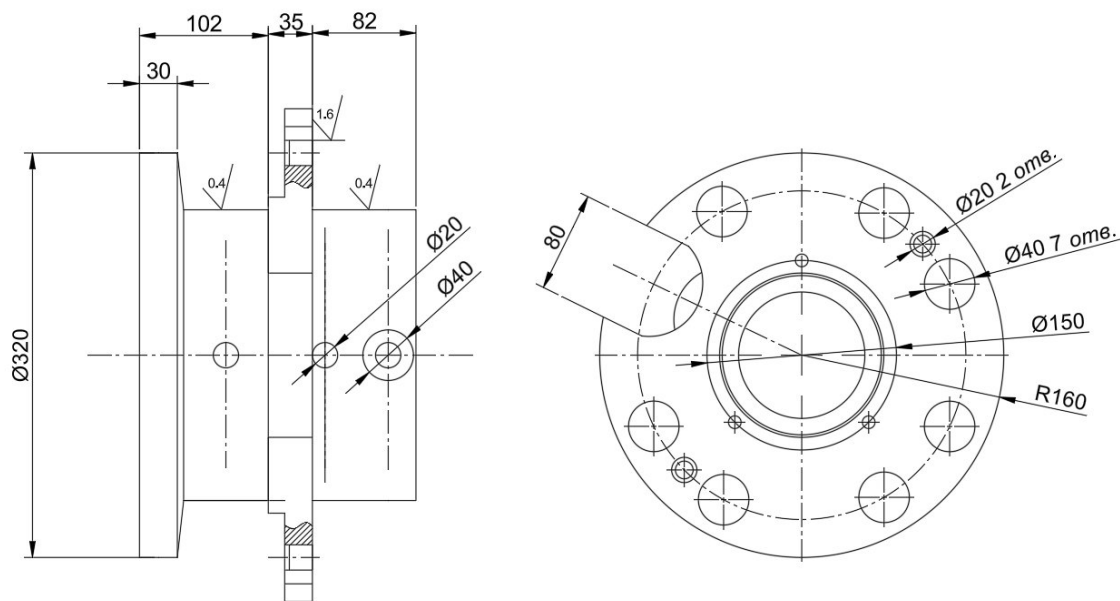


Рис.7.1 – Деталь фланець

За своєю конструкцією деталь належить до класу фланцевих деталей і являє собою тіло обертання зі ступінчастими зовнішніми поверхнями і діаметром фланця $\varnothing 320$. У центральній частині розташований посадковий отвір $\varnothing 150$, який використовується для встановлення деталі на відповідний вузол. На зовнішньому контурі передбачено сім отворів $\varnothing 40$ та два отвори $\varnothing 20$ для кріплення і монтажних потреб. Крім того, конструкцією передбачений технологічний виріз шириною 80 мм.

Основними базовими поверхнями під час обробки є торці заготовки, зовнішні циліндричні поверхні та центральний отвір. Від точності виконання цих поверхонь залежить правильність встановлення та надійність роботи деталі у складі машини.

Для виготовлення фланця прийнято сталь 40Х згідно з ГОСТ 4543-71. Вибір цього матеріалу обумовлений його високими механічними характеристиками, хорошою оброблюваністю різанням та достатньою стійкістю до зношування

Для отримання деталі використовується кругла заготовка із сталевого прокату. Такий спосіб отримання заготовки є технологічно доцільним, оскільки форма виробу близька до форми круглого прокату та не потребує значних витрат матеріалу.

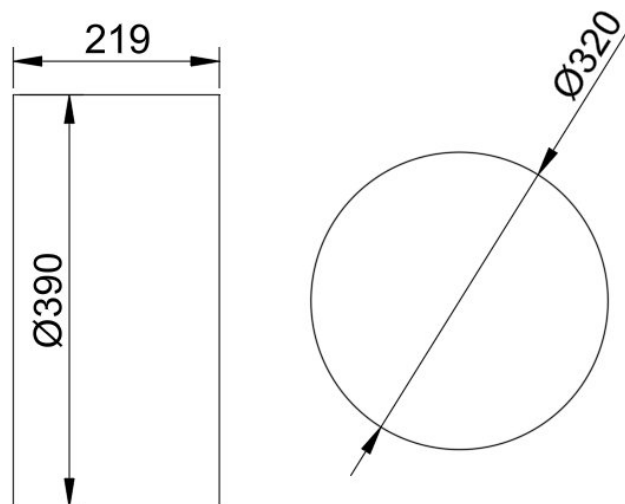


Рис.7.2 – Ескіз деталі

7.2 Вибір та розрахунок

Технологічний процес виготовлення фланця складається з токарних та свердлильно-фрезерних операцій. Послідовність обробки обрана з урахуванням конструкції деталі та вимог креслення. На першій операції виконується підготовка заготовки та обробка зовнішніх поверхонь для створення технологічних баз. Друга операція передбачає остаточне точіння основних поверхонь, обробку центрального отвору та формування уступів і фасок.

Завершальна операція включає свердління отворів Ø40 і Ø20, фрезерування вирізу шириною 80 мм, а також контроль основних розмірів деталі. Запропонований технологічний процес забезпечує отримання фланця

необхідної точності та якості поверхонь відповідно до вимог конструкторської документації.

Детальний опис технологічного процесу виготовлення фланця наведено в маршрутній карті (МК) та операційних картах (ОК)

Дубл.																			
Зам.																			
Підп.																			
Розроб.	Шевцов А.О.																		
Перевір.	Борищук С.О.																		
Н.контр.																			
					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФАПІЄ														
					Фланець										Н		015		
					Назва операції					Матеріал									
					Свердильно-фрезерна					Сталь 40Х ГОСТ 4543-71									
					Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри			МЗ	Коод							
						кГ						1							
					Обладнання . Пристрій ЧПК					Позначення програми									
					Вертикально-фрезерний верстат 6Р11														
То		Тд		Тп. з.		Тшт.		МОР											
								Емульсія											
Р		ПН		D або B		L		t		i		s		n		v			
P01	1. Установити, закріпити, зняти																		
T02	2. Розмітити центри отворів																		
O03	3. Свердлити 7 отворів Ø40																		
O04	4. Свердлити 2 отвори Ø20																		
T05	5. Фрезерувати виріз шириною 80 мм																		
T06	6. Зняти задирки																		
P07	7. Контроль розмірів																		
OK	Обробка різанням																		

7.3 Призначення пристосування для обробки деталі

Під час виконання токарних операцій фланець необхідно надійно закріпити та забезпечити його співвісність з віссю обертання шпинделя верстата. Для цього використовується трикулачковий самоцентрувальний патрон, який є одним із найбільш поширених затискних пристроїв у токарному виробництві.

Особливістю такого патрона є одночасне переміщення всіх кулачків. Це дозволяє швидко встановлювати заготовки круглої форми без додаткового вивірювання положення деталі. Для виготовлення фланця даний спосіб закріплення є доцільним, оскільки заготовка має форму тіла обертання та потребує точного центрування під час обробки.

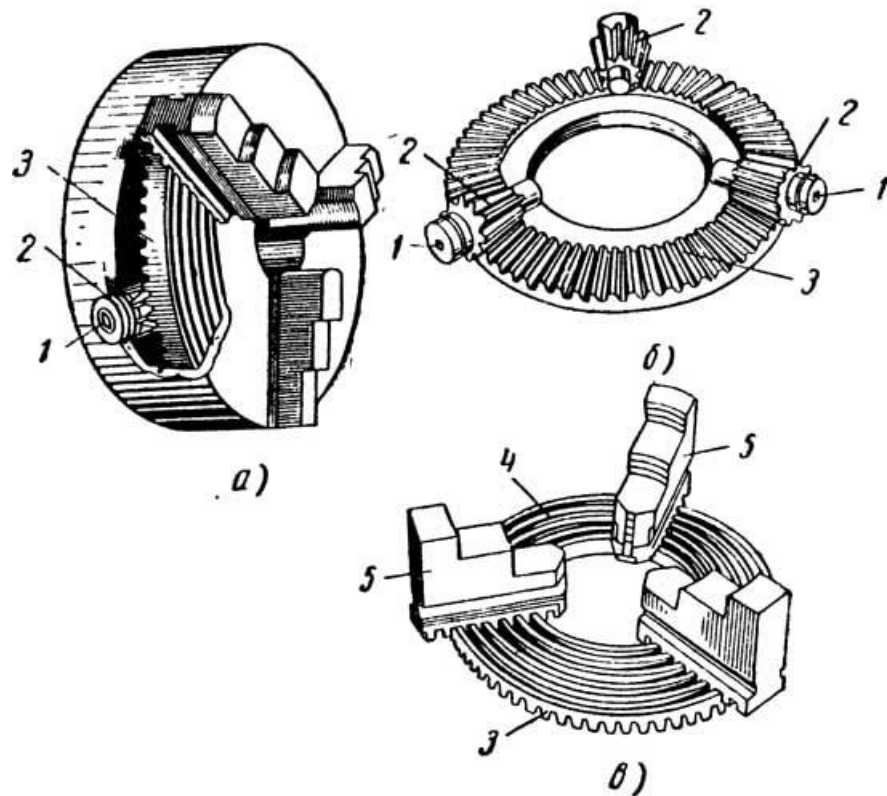


Рис. 7.3 - будова трикулачкового самоцентрувального патрона.

Основними його елементами є:

- 1 – конічна шестерня;
- 2 – корпус патрона;
- 3 – спіральний диск;

4 – спіральна напрямна канавка;

5 – затискний кулачок.

Передача руху від ключа здійснюється через конічну шестерню 1 на спіральний диск 3. На поверхні диска виконано спеціальну канавку 4, яка взаємодіє з кулачками 5. Під час обертання диска кулачки синхронно переміщуються по напрямних пазах корпусу 2 до центра патрона або від нього. У результаті заготовка автоматично встановлюється по осі обертання та надійно утримується під час роботи верстата.

При обробці фланця патрон використовується для базування заготовки по зовнішній циліндричній поверхні. Такий спосіб закріплення забезпечує стійке положення деталі під час чорнового та чистового точіння, а також сприяє отриманню необхідної точності розмірів і якості поверхонь. Застосування трикулачкового самоцентрувального патрона дозволяє зменшити час на встановлення заготовки, підвищити продуктивність обробки та забезпечити стабільність технологічного процесу виготовлення фланця

Висновок

У даному розділі було розроблено технологічний процес виготовлення фланця для профільної головки екструдера МЧХ-160. Виконано вибір заготовки, визначено послідовність механічної обробки деталі та обґрунтовано вибір обладнання для виконання технологічних операцій. Для виготовлення фланця передбачено виконання токарних і свердлильно-фрезерних операцій, що дозволяють отримати необхідні геометричні параметри та якість оброблених поверхонь відповідно до вимог креслення. Також розглянуто пристосування для закріплення заготовки та складено комплект технологічної документації у вигляді маршрутної та операційних карт.

Запропонований технологічний процес забезпечує раціональне виготовлення деталі, необхідну точність обробки та може бути використаний у виробничих умовах при виготовленні фланця профільної головки екструдера МЧХ-160.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті було розглянуто гумопереробну машину типу МЧХ-160, яка призначена для пластикації, перемішування, ущільнення та подачі гумових сумішей до подальших технологічних операцій. У роботі проаналізовано призначення машини, її технічні характеристики, базову конструкцію, основні вузли та принцип дії. Особливу увагу приділено черв'яку як головному робочому органу, від якого значною мірою залежать продуктивність, якість перемішування, стабільність подачі матеріалу та надійність роботи обладнання.

На основі літературно-патентного огляду були розглянуті існуючі технічні рішення щодо вдосконалення черв'яків екструдерів і гумопереробних машин. За результатами аналізу для модернізації було обрано зміну геометрії робочої ділянки черв'яка, що спрямована на покращення процесів диспергування, змішування та подрібнення гумової суміші. Обране рішення дозволяє зберегти основні приєднувальні розміри базової конструкції, але змінити характер взаємодії матеріалу з робочою поверхнею черв'яка.

У розрахунковій частині визначено основні геометричні та експлуатаційні параметри машини МЧХ-160. Для черв'яка прийнято зовнішній діаметр $D = 160$ мм, довжину нарізаної частини $L = 2520$ мм та крок витків у робочих зонах 160–192 мм. За результатами параметричних розрахунків встановлено продуктивність машини $Q = 546$ кг/год, тиск гумової суміші в головці $P_r = 28,97$ МПа та потужність приводу $N = 200$ кВт. Також визначено загальне осьове зусилля $K = 592,643$ кН, що діє на упорний підшипник.

Міцнісний розрахунок показав, що конструкція черв'яка має достатню несучу здатність. Для матеріалу сталь 40Х еквівалентні напруження становлять 230 МПа, а коефіцієнт запасу міцності $n = 3,69$, що перевищує допустиме значення 1,5–2. Це підтверджує можливість роботи черв'яка під дією прийнятих експлуатаційних навантажень без руйнування та з достатнім запасом міцності.

У тепловому розрахунку перевірено ефективність системи охолодження черв'яка. Для базового варіанта необхідна площа теплообміну становить $0,133 \text{ м}^2$, а для модернізованого – $0,119 \text{ м}^2$. Фактична площа теплообмінної поверхні прийнята $0,28 \text{ м}^2$, тобто вона перевищує необхідні розрахункові значення. Зменшення товщини стінки модернізованого черв'яка до $0,010 \text{ м}$ збільшує коефіцієнт теплопередачі до $0,482 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, що підтверджує достатній запас тепловідвідної здатності та можливість підтримання стабільного температурного режиму.

У середовищі SolidWorks було побудовано 3D-моделі базового та модернізованого черв'яка. На основі цих моделей виконано числове моделювання в ANSYS за однакових умов навантаження: тиск суміші 29 МПа , крутний момент $3,8 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{мм}$, Fixed Support та Cylindrical Support. Для базового черв'яка максимальне напрямлене переміщення по осі Y становило $2,8823 \text{ мм}$, сумарна деформація – $2,9009 \text{ мм}$, максимальні еквівалентні напруження – $88,923 \text{ МПа}$, а мінімальний коефіцієнт запасу міцності – $8,4343$.

Для модернізованого черв'яка максимальне напрямлене переміщення зменшилося до $2,5533 \text{ мм}$, а сумарна деформація – до $2,6004 \text{ мм}$. Отже, модернізована конструкція показала зменшення напрямлених переміщень приблизно на $11,4 \%$, а сумарної деформації приблизно на $10,4 \%$. Це свідчить про підвищення жорсткості конструкції та кращу здатність зберігати геометричну стабільність під дією навантаження. Водночас максимальні еквівалентні напруження збільшилися до $92,249 \text{ МПа}$, тобто приблизно на $3,7 \%$ порівняно з базовим варіантом. Таке збільшення пояснюється зміною геометрії та локальним зменшенням товщини стінки, однак напруження залишаються допустимими.

У роботі також розглянуто питання охорони праці під час експлуатації машини МЧХ-160. Визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, зокрема шум, вібрацію, нагріті поверхні, випари компонентів гумових сумішей, електричну та пожежну безпеку. Запропоновані заходи з безпечної експлуатації обладнання, вентиляції, електробезпеки та пожежного захисту

дозволяють знизити ризик виробничого травматизму. Також було розроблено технологічний процес виготовлення фланця для профільної головки екструдера МЧХ-160 із вибором заготовки, обладнання та пристосування для обробки.

Таким чином, у дипломному проєкті виконано комплексний аналіз гумопереробної машини МЧХ-160, проведено необхідні параметричні, міцнісні, теплові та числові розрахунки, а також виконано порівняння базового і модернізованого черв'яка. Отримані результати показали, що запропонована модернізація дозволяє зменшити деформації черв'яка та покращити його деформаційну поведінку. Незначне локальне збільшення напружень не є критичним, тому обране технічне рішення можна вважати доцільним для підвищення ефективності роботи машини МЧХ-160.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мікульонок І.О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. 3-тє вид., перероб. та допов. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 296 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/68766>.

2. Мікульонок І.О. Технологія перероблення полімерів : підруч. 5-тє вид., перероб. та допов. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 314 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74268>.

3. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 200 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25367>.

4. Принцип роботи та конструкція гумопереробної одночерв'ячної машини / В. Е. Плетньов, 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/d057ec57-d865-4cdc-b84b-dbc505d423be>.

5. Патент №146329 „ЧЕРВ'ЯК ЕКСТРУДЕРА„ (Номер заявки u202006311)

6. Патент №1737 „ЧЕРВ'ЯК ЕКСТРУДЕРА ДЛЯ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ„ (Номер заявки 2002075454)

7. Патент №102908 „ЧЕРВ'ЯК ЕКСТРУДЕРА „ (Номер заявки u201504969)

8. Патент №137428 „ЧЕРВ'ЯК ЕКСТРУДЕРА „ (Номер заявки u201902287)

9. Патент №105351 „ЧЕРВ'ЯК„ (Номер заявки a201311297)

10. Патент №70008 „ЧЕРВ'ЯЧНА МАШИНА ДЛЯ ПЕРЕРОБЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНИХ СПОЛУК„ (Номер заявки u201112853)

11. Стійкість і надійність машин і обладнання : матеріали міжнародної конференції, 2020.

https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/materiali_konf.pnmo2020_1.pdf. URL:

11. Щербина В.Ю., Сівецький В.І., Гондляр О.В. Механічні процеси і обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів. Підготовка сировинних матеріалів і устаткування для змішування та формування [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. – 131с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/4573>.

12. Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України № 890 від 02.12.2013. Правила охорони праці на підприємствах з виробництва шин та гумових виробів.
13. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
14. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.
15. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
16. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
17. Сталь і конструкційні матеріали для машинобудування. Навчальний модуль. URL: <https://elib.kpi.ua/handle/123456789/150100>.
18. Vlachopoulos J., Vlachopoulos N.D. Understanding rheology and technology of polymer extrusion. Dundas, ON, Canada: Polydynamics Inc., 2019. 337 p. URL: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf.
19. Rauwendaal C. Polymer extrusion. 5th ed. Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. 950 p. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>.
20. Mikulionok I.O. Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51, № 1–2. P. 14–19. DOI: 10.1007/s10556-015-9990-6.
21. 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>.
22. Мікульонок І., Механічні та гідромеханічні процеси, апарати і машини хімічної технології : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 175 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41037>.

23. Механічні процеси і обладнання виробництва : навч. посіб. для галузевого машинобудування. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45734/1/NP_RZF.pdf.

24. Мікульонок І.О., Радченко Л.Б. Полімерні композитні матеріали й вироби з них. Одержання, перероблення та властивості : термінол. словник. Київ : ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2005. 179 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 – Патентний огляд варіантів модернізації черв'яка

№	Предмет пошуку	№ свідоцтва, країна, автор	Зміст запропонованого вдосконалення
1.	Черв'як екструдера з внутрішньою системою терморегулювання	UA 146329 U Україна Автори: Мікульонік Ігор Олегович Лукінюк Михайло Васильович	Запропонована конструкція черв'яка з внутрішньою порожниною та коаксіально-концентричними трубами для підведення і відведення холодоагенту. Рішення спрямоване на покращення керування температурою робочої поверхні по довжині черв'яка.
2.	Черв'як екструдера з поперечними пазами на гребенях нарізки	UA 1737 U Україна Автори: Мікульонік Ігор Олегович	Удосконалення полягає у виконанні поперечних пазів на гребенях гвинтової нарізки. Таке рішення покращує змішування полімерної або гумової суміші та зменшує зворотний потік матеріалу в робочому каналі.
3.	Черв'як екструдера з рухомим наконечником	UA 102908 U Україна Автори: Сокольський Олександр Леонідович	Конструкція містить рухомий наконечник із пружним елементом і системою компенсації коливань тиску. Це забезпечує стабілізацію потоку матеріалу та покращення якості готової продукції під час переробки.
4.	Черв'як екструдера з удосконаленою системою охолодження	UA 137428 U Україна Автори: Мікульонік Ігор Олегович Карвацький Антон Янович Терлецький Олександр Ігорович	Запропоновано порожнисте осердя з внутрішніми поздовжніми шліцами, які підвищують ефективність охолодження робочої зони черв'яка. Рішення сприяє покращенню тепловіддачі та стабілізації температурного режиму.
5.	Черв'як типу ZAJN зі зміненою геометрією профілю витків	UA 105351 C2 Україна Автори: Шевченко Святослав Володимирович Мазнев Євген Олександрович Муховатий Олександр Анатолійович	Робоча сторона витка виконана з увігнутим осьовим профілем, а неробоча сторона має опуклу форму. Така геометрія зменшує контактні напруження, сили тертя та підвищує довговічність черв'ячної передачі.
6.	Черв'ячна машина з диспергувальною ділянкою черв'яка	UA 70008 U Україна Автори: Бондаренко Володимир Миколайович Мікульонік Ігор Олегович Пристаїлов Сергій Олегович Сівецький Володимир Іванович Сокольський Олександр Леонідович Цертій Андрій Станіславович	Обраний варіант модернізації. Диспергувальна ділянка черв'яка має основу з боку розвантажувального отвору круглої форми, а з боку завантажувального отвору – опуклу форму, відмінну від круглої, наприклад овальну. Рішення покращує диспергування, змішування та подрібнення матеріалу.

Додаток Б

[illegible]

[illegible]

[illegible]

ДОДАТОК В

```

#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <cmath>
#include <windows.h>
#include <io.h>
#include <fcntl.h>

using namespace std;

int main()
{
    SetConsoleOutputCP(CP_UTF8);
    SetConsoleCP(CP_UTF8);
    _setmode(_fileno(stdout), _O_U16TEXT);

    const double pi = 3.14;

    // Вихідні дані
    const double coef = 7162.0;
    const double mu = 1.36;
    const double N = 200.0;      // кВт
    const double n = 50.0;      // об/хв
    const double rs = 0.07296;  // м
    const double tgAlphaRho = 0.917; // tg(19°14' + 23°), прийнято для отримання
    значення

    const double R = 0.08;      // м
    const double D = 0.16;      // м
    const double l = 1.055;     // м
    const double tgRho = 0.43;  // tg 23°

    // 1. Осьове зусилля в гвинтовому каналі
    double Pos = (coef * mu * N) / (n * rs * tgAlphaRho);

    // 2. Тиск суміші в головці
    double Pr = Pos / (pi * R * R) / 1000000.0; // МПа

    // 3. Площа поперечного перерізу черв'яка
    double Fc = (pi / 4.0) * D * D;

    // 4. Осьове зусилля
    double A = Fc * Pr * 1000.0; // кН

    // 5. Питома тангенціальна складова тертя

```

```

double Fp = Pr * l / 6.0 * 10.0;

// 6. Тангенціальна складова від тертя
double T = Fp * 2.0 * pi * rs * tgRho;

// 7. Загальне осьове зусилля
double K = A + T;

wcout << fixed << setprecision(3);

wcout << L"=== Розрахунок тиску суміші в головці ===\n\n";

wcout << L"Осьове зусилля в гвинтовому каналі Poc = "
    << Pos << L" Н\n";

wcout << L"Тиск суміші в головці Pr = "
    << Pr << L" МПа\n";

wcout << L"Площа поперечного перерізу черв'яка Fc = "
    << Fc << L" м^2\n";

wcout << L"Осьове зусилля A = "
    << A << L" кН\n";

wcout << L"Питома тангенціальна складова тертя Fp = "
    << Fp << L" кг/м\n";

wcout << L"Тангенціальна складова від тертя T = "
    << T << L" кН\n";

wcout << L"Загальне осьове зусилля K = "
    << K << L" кН\n";

return 0;
}

```

ДОДАТОК Г

Черв'ячна машина для перероблення матеріалів з використанням високомолекулярних сполук

Шевцов А.О. студ., Луцевят І.О. студ., Гур'єва Л.Н. ас.

Національний технічний університет України

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

Запропоновано конструкцію черв'ячної машини для перероблення матеріалів з використанням високомолекулярних сполук, яка містить корпус із завантажувальним і розвантажувальним отворами, а також розміщений у ньому з можливістю обертання черв'як. Черв'як має щонайменше одну диспергувальну ділянку, основа якої з боку розвантажувального отвору корпусу більша за основу з боку завантажувального отвору. При цьому основу диспергувальної ділянки з боку розвантажувального отвору виконано круглою, а основу з боку завантажувального отвору – опуклою з формою, відмінною від круглої, зокрема у вигляді овала або правильного багатокутника. Таке виконання забезпечує інтенсивне диспергування, перемішування та подрібнення матеріалу за рахунок стискання, зсуву і стирання, що підвищує ефективність перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей та дозволяє отримувати високоякісний тонкодисперсний порошок.

Ключові слова: черв'ячна машина, високомолекулярні сполуки, диспергувальна ділянка, перероблення полімерів, екструдер, подрібнення матеріалів, диспергування, гумові суміші.

Вступ. Запропоноване технічне рішення стосується обладнання для перероблення високомолекулярних сполук і матеріалів на їх основі, зокрема черв'ячних екструдерів, та може використовуватися як для виготовлення різноманітної продукції, так і для утилізації відходів полімерних і гумових матеріалів [1-7].

Найбільш близькою за технічною сутністю до запропонованого рішення є черв'ячна машина для перероблення матеріалів з використанням високомолекулярних сполук, що містить корпус із завантажувальним і розвантажувальним отворами, а також розміщений у ньому з можливістю обертання черв'як із диспергувальною ділянкою циліндричної форми. Проте така конструкція не забезпечує достатньо інтенсивного диспергувально-змішувального ефекту та є схильною до забивання під час перероблення відходів.

Виклад основного матеріалу. В основу запропонованого технічного рішення покладено задачу вдосконалення черв'ячної машини для перероблення матеріалів з використанням високомолекулярних сполук, у якій нове конструктивне виконання диспергувальної ділянки черв'яка забезпечує ефективне перемішування та подрібнення твердих, жорстких і еластичних матеріалів у різному вигляді за рахунок стискання, зсуву та стирання, що дозволяє отримувати високоякісний тонкодисперсний продукт.

Поставлену технічну задачу вирішують тим, що в черв'ячній машині для перероблення матеріалів з використанням високомолекулярних сполук, яка містить корпус із завантажувальним і розвантажувальним отворами, а також розміщений у ньому з можливістю обертання черв'як, що має щонайменше одну диспергувальну ділянку, основа якої з боку розвантажувального отвору корпусу більша за основу з боку завантажувального отвору, відповідно до запропонованого технічного рішення новим є те, що основу диспергувальної ділянки з боку розвантажувального отвору виконано круглою, а основу з боку завантажувального отвору – опуклою з формою, відмінною від круглої [8-10]. У переважному варіанті виконання основу диспергувальної ділянки може бути виконано у вигляді овала або правильного багатокутника (пат. № UA70008U).

Конструктивні особливості запропонованого технічного рішення пояснюються кресленнями, на яких наведено схему будови вдосконаленої черв'ячної машини (рис. 1).

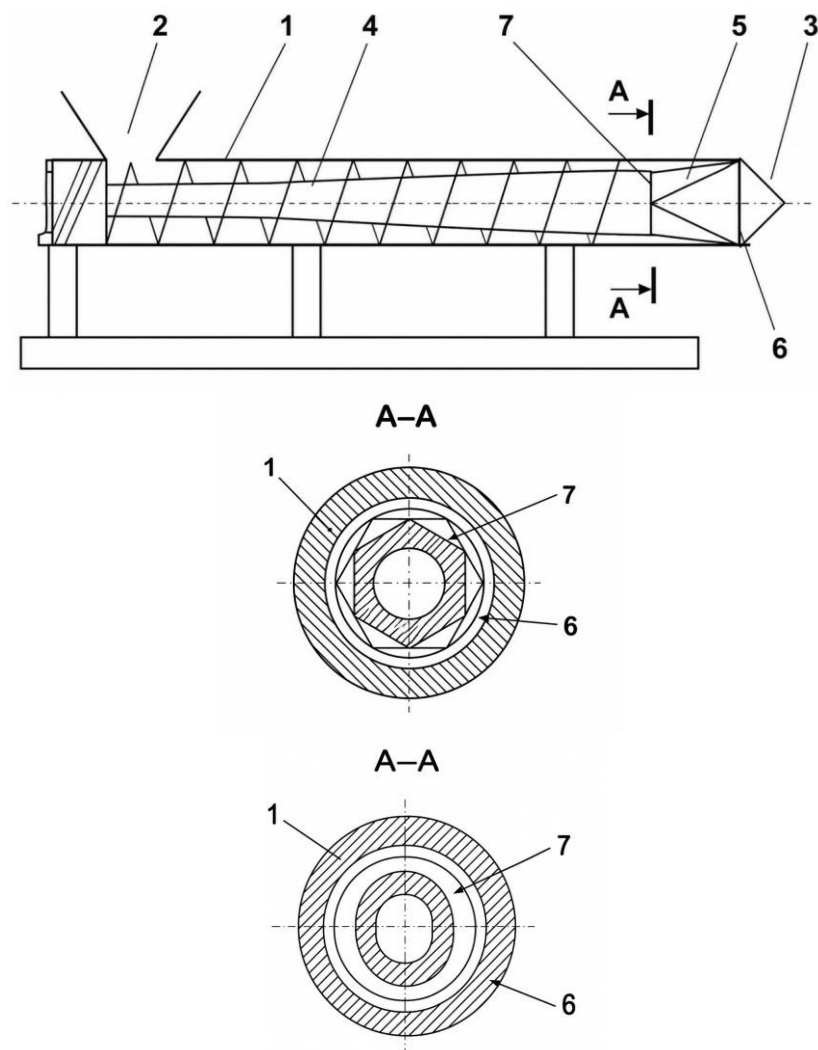


Рисунок 1 – Конструкція черв'ячної машини для перероблення матеріалів з використанням високомолекулярних сполук

Запропонована черв'ячна машина містить корпус 1 із завантажувальним 2 і розвантажувальним 3 отворами, а також розміщений у ньому з можливістю обертання черв'як 4, що має диспергувальну ділянку 5. Основа 6 диспергувальної ділянки 5 з боку розвантажувального отвору 3 виконана круглою, а основа 7 з боку завантажувального отвору 2 –опуклою з формою, відмінною від круглої. Основа 7 може бути виконана у вигляді правильного багатокутника або овала. Поверхню диспергувальної ділянки 5 черв'яка 4 та/або відповідну поверхню корпусу 1 може бути оснащено подрібнювальними виступами для підвищення ефективності процесу диспергування та змішування матеріалу.

Черв'ячна машина працює так.

Матеріал, що підлягає переробленню, надходить через завантажувальний отвір 2 корпусу 1, де захоплюється нарізкою черв'яка 4 та транспортується у напрямку до розвантажувального отвору 3. У процесі переміщення матеріалу вздовж черв'яка відбуваються його ущільнення, подрібнення, перемішування та гомогенізація. На диспергувальній ділянці 5 відбувається інтенсивне диспергування та змішування матеріалу за рахунок стискання, зсуву і стирання. Це досягається завдяки спеціальній формі основи 7 диспергувальної ділянки, яка виконана опуклою та відмінною від круглої. Під час обертання черв'яка форма робочого каналу безперервно змінюється в коловому напрямку, що створює додаткові зони деформації та підвищує ефективність процесу перероблення матеріалу.

У випадку виконання основи 7 у вигляді правильного багатокутника або овала утворюються проміжки змінної геометрії, у яких забезпечується додаткове інтенсивне подрібнення та перемішування матеріалу. Поверхня диспергувальної ділянки 5 черв'яка 4 та/або внутрішня поверхня корпусу 1 можуть бути оснащені подрібнювальними виступами, що додатково підвищує ефективність процесу диспергування.

Запропонована конструкція черв'ячної машини забезпечує ефективне перероблення полімерів, пластмас, еластомерів і гумових сумішей широкої номенклатури, а також дозволяє здійснювати утилізацію відходів. Використання диспергувальної ділянки змінної геометрії сприяє підвищенню інтенсивності перемішування та подрібнення матеріалу й забезпечує отримання високоякісного тонкодисперсного продукту.

Висновок. Завдяки запропонованому конструктивному виконанню черв'ячної машини підвищується ефективність диспергування, змішування та подрібнення матеріалів, зменшується ймовірність забивання робочого каналу, а також забезпечується стабільність технологічного процесу перероблення високомолекулярних сполук.

Перелік посилань

1. Polymer Processing: Principles and Modeling. 2nd ed. / J.-F. Agassant, P. Avenas, P. J. Carreau et al. Munich : Carl Hanser Verlag, 2017. 841 p.
2. Mikulionok I.O. Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51, № 1–2. P. 14–19. DOI: 10.1007/s10556–015–9990–6.
3. Мікульонок І.О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 312 с.
5. Мікульонок І.О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. 3–тє вид., перероб. та допов. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 296 с. –<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/68766>.
4. Мікульонок І.О. Технологія перероблення полімерів : підруч. 5–тє вид., перероб. та допов. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 314 с. – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74268>.
5. Mikulionok I.O. Classification of Screw Cooling Devices of Single-Screw Extruders for Polymer Materials Processing (Survey of Designs) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 58, № 1–2. P. 68–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556–022–01057–5>.
6. Rauwendaal C. Polymer extrusion. 5th ed. Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. 950 p. – <https://doi.org/10.3139/9781569905395>.
7. Мікульонок І.О., Сокольський О.Л. Полімерні матеріали і вироби з них (одержання, перероблення, властивості) : термінол. слов. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 208 с. –<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37632>.
8. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 200 с. –<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25367>.
9. Мікульонок І.О., Радченко Л.Б. Полімерні композитні матеріали й вироби з них. Одержання, перероблення та властивості : термінол. словник. Київ : ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2005. 179 с.
10. Vlachopoulos J., Vlachopoulos N.D. Understanding rheology and technology of polymer extrusion. Dundas, ON, Canada: Polydynamics Inc., 2019. 337 p. –http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf.

ДОДАТОК Д
Перевірка на плагіат