

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 – другий (магістерський)

Спеціальність – 133 Галузеве машинобудування

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студентці
Асмолової Дарини Ігорівни

1. Тема проекту «Лінія для виробництва рукавної плівки з модернізацією корпусу екструдера», науковий керівник дисертації асистент, доктор філософії Витвицький Віктор Миронович, затверджені наказом по університету від «03.11» 2025 р. №4744-С
2. Термін подання студентом проекту 21.12.2025 р.
3. Об'єкт дослідження: Лінія для виробництва рукавної плівки.
4. Вихідні дані: Діаметр черв'яка – 45мм, відношення довжини черв'яка до його діаметра – 20 мм, матеріал пластифікований ПП, частота обертання черв'яка – 1500 об/хв, загальна потужність – 2,8 кВт, продуктивність – 13,6 кг/год, маса – 7,1 кг.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Зміст, вступ, технологічна лінія з використанням машини, принцип роботи та загальний вигляд машини, розрахунки машини, літературно патентний огляд стану питання, опис та обґрунтування запропонованої модернізації, розділ «Охорона праці», розділ «Монтаж і експлуатація», розділ «Стартап-проект». Розділ «Розрахунки» має містити розрахунки основних геометричних розмірів та які підтверджують працездатність: міцність, кінематичні та параметричні характеристики.

6. Перелік графічного матеріалу: Лінія для виробництва рукавної плівки з модернізацією корпусу екструдера (формат А1), черв'ячний екструдер (формат А1), черв'як екструдера в зборі (формат А1), головка екструдера (формат А1), корпус екструдера (формат А2), модернізований корпус екструдера (формат А2), модернізований корпус екструдера (формат А1), деталювання (формат А2, 2хА3), плакати ілюстрацій результатів виконання розрахунків (формат 2хА1).

7. Орієнтовний перелік публікацій: 2 тези доповідей

8. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Монтаж і експлуатація	ст. викл. Борщик С.О.	14.12	15.12
Модернізація	проф. Щербина В.Ю.	08.09	
Стартап-проект	к.е.н., доц. Юдіна Н.В.	06.12	12.12

9. Дата видачі завдання 27.10.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Отримання завдання на магістерську дисертацію.	27.10.2025	
2.	Патентно-літературний пошук для здійснення модернізації вузла. Обґрунтування модернізації.	28.10.2025-03.11.2025	
3.	Виконання кінематичних та параметричних розрахунків.	04.11.2025-09.11.2025	
4.	Підготовка розділу «Пояснювальна записка»	10.11.2025-15.11.2025	
5.	Підготовка розділу «Розрахунки»	16.11.2025-21.11.2025	
6.	Підготовка розділу «Монтаж і експлуатація»	22.11.2025-27.11.2025	
7.	Підготовка розділу «Автоматизація»	28.11.2025-03.12.2025	
8.	Підготовка розділу «Стартап-проект»	04.12.2025-09.12.2025	
9.	Підготовка розділу «Охорона праці»	10.12.2025-15.12.2025	
10.	Виконання порівняльних розрахунків базової конструкції і модернізованої	16.12.2025-21.12.2025	

Студент

Асмолова Д.І.

Керівник проекту

Витвицький В.М.

РЕФЕРАТ

Темою магістерської дисертації є «Лінія для виробництва рукавної плівки з модернізацією корпусу екструдера». Виконавець – студент групи ЛП-41мп Асмолова Д.І., науковий керівник – асистент, доктор філософії Витвицький В.М.

Магістерська дисертація складається з текстової та графічної частин. Текстова частина включає 7 розділів та додатки. Загальний обсяг роботи становить 111 сторінок, у тому числі 40 ілюстрацій, 27 таблиць та 16 джерел літератури. Графічна частина містить 9 креслень формату А1.

Об'єктом дослідження є технологічна лінія для виробництва рукавної полімерної плівки з модернізованим корпусом екструдера. Метою роботи є обґрунтування та вибір оптимального конструктивного рішення модернізації корпусу екструдера з метою підвищення стабільності процесу екструзії та якості готової продукції. Для досягнення поставленої мети проведено літературно-патентний аналіз та виконано комплекс інженерних розрахунків.

За результатами патентно-літературного огляду обрано конструктивне рішення модернізації корпусу екструдера, сутність якого полягає у виконанні спеціальних проточок та отворів для підведення до поверхні екструзійного каналу одного або декількох допоміжних компонентів, зокрема змащувального агента, що сприяє зниженню гідродинамічного опору потоку розплаву та підвищенню рівномірності формування рукавної плівки.

У процесі виконання магістерської дисертації проведено розрахунки на міцність, параметричні, теплові розрахунки, а також розрахунки перепадів тиску в екструзійному каналі. На основі отриманих результатів розроблено креслення основних вузлів, корпусу екструдера та технологічної лінії для виробництва рукавної плівки в програмному середовищі SolidWorks.

Для оцінки ефективності запропонованої модернізації виконано порівняльний аналіз напружено-деформованого стану базової та модернізованої конструкцій у середовищі Ansys, що підтвердило працездатність і доцільність впровадження запропонованих конструктивних змін.

За результатами виконаної роботи підготовлено дві доповіді на всеукраїнських всеукраїнській конференції і надруковано тези.

Ключові слова: МОДЕЛЮВАННЯ, ЕКСТРУДЕР, КОРПУС, РОЗРАХУНКИ, МОДЕРНІЗАЦІЯ.

ABSTRACT

The topic of the master's thesis is "A Production Line for Blown Film Manufacturing with Modernization of the Extruder Housing." The author is a student of group LP-41mp, Asmolova D.I.; the scientific supervisor is Assistant Professor, Doctor of Philosophy Vytvytskyi V.M.

The master's thesis consists of textual and graphical parts. The textual part includes seven chapters and appendices. The total volume of the thesis is 111 pages, including 40 figures, 27 tables, and 16 references. The graphical part contains nine A1-format drawings.

The object of the research is a technological line for the production of polymer blown film with a modernized extruder housing. The aim of the work is to substantiate and select an optimal structural solution for modernizing the extruder housing in order to increase the stability of the extrusion process and improve the quality of the finished product. To achieve this goal, a literature and patent review was conducted, and a set of engineering calculations was performed.

Based on the results of the literature and patent analysis, a design solution for the modernization of the extruder housing was selected. The essence of this solution lies in the implementation of special grooves and openings for supplying one or more auxiliary components, in particular a lubricating agent, to the surface of the extrusion channel. This contributes to a reduction in the hydrodynamic resistance of the melt flow and improves the uniformity of blown film formation.

During the preparation of the master's thesis, strength, parametric, thermal, and pressure drop calculations in the extrusion channel were carried out. Based on the obtained results, drawings of the main units, the extruder housing, and the technological line for blown film production were developed using the SolidWorks software.

To assess the effectiveness of the proposed modernization, a comparative analysis of the stress-strain state of the base and modernized designs was performed using ANSYS, which confirmed the operability and feasibility of implementing the proposed structural modifications.

As a result of the completed work, two reports were presented at national scientific conferences, and the corresponding abstracts were published.

Keywords: STRENGTH, EXTRUDER, BARREL, EXTRUSION, MODERNIZATION.

Перелік позначень

D – діаметр черв'яка, мм

e – ширина витка, мм

E – модуль пружності, МПа

n – частота обертання черв'яка

N – потужність, кВт

P – тиск розплаву, МПа

Q – продуктивність, кг/год

t – крок нарізки витків, мм

h_1 – глибина нарізки в зоні завантаження, мм

h_2 – глибина нарізки в зоні дозування, мм

l_p – загальна (робоча) довжина черв'яка, мм

l_3 – довжина зони завантаження черв'яка, мм

l_d – довжина зони дозування черв'яка, мм

l_n – довжина зони пластикації черв'яка, мм

σ_T – границя текучості, МПа

α – Коефіцієнт прямого потоку, мм³

β – Коефіцієнт зворотного потоку, мм³

γ – Коефіцієнт потоку утічок, мм³

δ – зазор між гребнем черв'яка і корпусом, мм

ρ – густина, кг/мм³

μ – Коефіцієнт замурування

η – ККД розплаву

ν – Коефіцієнт Пуассона

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ПРИЗНАЧЕННЯ І ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ.....	10
1.1 Призначення й галузь застосування виробу, що виробляється.....	10
1.2 Застосування екструдера для виготовлення труб.....	11
2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЛІНІЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МАШИНИ.....	13
3. ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ЗАГАЛЬНИЙ ВИГЛЯД МАШИНИ.....	14
4. ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД, ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ.....	18
4.1. Патентно літературний огляд.....	18
4.2. Вибір та обґрунтування запропонованої модернізації.....	21
5. РОЗРАХУНКИ, ЯКІ ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ.....	24
5.1 Параметричні розрахунки.....	24
5.1.1 Розрахунок геометрії черв'яка і частоти його обертання...24	
5.1.2 Розрахунок коефіцієнта геометричної форми екструзійної головки.....27	
5.1.3 Розрахунок продуктивності екструдера.....30	
5.1.4 Розрахунок перепаду тиску на ділянках у головці.....33	
5.1.5 Розрахунок потужності приводу екструдера.....35	
5.2 Розрахунки черв'яка на міцність.....39	
5.2.1 Розрахунок на міцність.....39	
5.2.2 Розрахунок на стійкість.....41	
5.2.3 Розрахунок на жорсткість.....42	
5.2.4 Розрахунок шліцьового з'єднання.....44	
5.3 Тепловий розрахунок.....45	

					<i>ЛП-4 1мп.017346.00-70ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Асмолова				Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.					7	111	
Керівник	Витвицький				НТУУ 'КПІ', ФАПІБ		
Н. Контр.							
Затверд.	Сокольський						

Лінія для виробництва рукавної плівки з модернізацією корпусу екструдера

6. СПЕЦІАЛЬНІ РОЗДІЛИ.....	48
6.1.Монтаж і експлуатація.....	48
6.2. Стартап-проект.....	59
6.2.1. Опис ідеї стартап-проекту.....	59
6.2.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	62
6.2.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	63
6.2.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	79
6.2.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	83
6.3.Охорона праці.....	88
6.3.1. Виробничий шум.....	88
6.3.2. Повітря робочої зони.....	89
6.3.3. Пожежна безпека.....	91
6.3.4. Електробезпека.....	92
7. Розрахунок модернізації.....	94
7.1.Розрахунок базової конструкції.....	95
7.2.Розрахунок модернізованої конструкції.....	100
7.3.Порівняння результатів розрахунків.....	106
ВИСНОВКИ.....	108
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	110
ДОДАТКИ.....	112
Додаток А. ТАБЛИЦЯ ПАТЕНТНОГО ПОШУКУ	
Додаток Б. ЛІСТИНГ ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ НА ЕОМ	
Додаток В. СПЕЦИФІКАЦІЇ	
Додаток Г. НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ДОСЯГНЕННЯ	

ВСТУП

У сфері хімічного машинобудування полімерні матеріали займають провідні позиції, формуючи сучасні тренди та визначаючи рівень розвитку галузі. Одним із основних агрегатів, що застосовується у процесах переробки полімерів, є одночерв'ячний екструдер. Це обладнання відіграє ключову роль у формуванні та подальшій обробці полімерних мас, що безпосередньо впливає на властивості та якість готової продукції.

Метою даної магістерської дисертації є всебічне дослідження полімерного напрямку хімічного машинобудування з акцентом на принципах роботи, значенні та функціональних можливостях одночерв'ячного екструдера. У межах роботи розглядаються його конструктивні особливості, технічні параметри та сфери застосування.

Стрімкий розвиток індустрії полімерів, зокрема термопластичних матеріалів, підсилює інтерес до дослідження теоретичних засад та практичних методів їх переробки. На сьогодні темпи виробництва технічних полімерів значно перевищують обсяги виготовлення аналогічних продуктів із природної сировини. Залежно від характеристик полімеру чи композиційного матеріалу, вимог до кінцевого виробу, умов його експлуатації та багатьох інших чинників, існує широкий спектр технологій переробки полімерів, і в кожному конкретному випадку обирається найбільш доцільний метод.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ І ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСТРУДЕРА

1.1 Призначення й галузь застосування виробу, що виробляється

Полівінілхлоридна (ПВХ) рукавна плівка є сучасним полімерним матеріалом, який широко використовується в різних галузях промисловості завдяки поєднанню високих фізико-механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей. Матеріал характеризується достатньою еластичністю, міцністю та стійкістю до механічних пошкоджень, що дозволяє виготовляти вироби складної геометричної форми методом екструзії. ПВХ-плівка є безпечною для людини за умови дотримання технологічних вимог, що дає змогу застосовувати її для пакування харчових продуктів і товарів побутового призначення.

Рукавна плівка з полівінілхлориду отримується переважно методом екструзії з подальшим формуванням у вигляді безперервного рукава. Така технологія забезпечує рівномірність товщини, високу якість поверхні та стабільні експлуатаційні характеристики готового виробу. ПВХ-плівка відзначається високою хімічною стійкістю до дії кислот, лугів, солей та більшості агресивних середовищ, що розширює сферу її застосування в промисловості.

Основними перевагами рукавної ПВХ-плівки порівняно з аналогами з інших полімерів є висока прозорість, стійкість до ультрафіолетового випромінювання, знижена горючість та здатність до самозагасання. Завдяки цим властивостям плівка може експлуатуватися як у приміщеннях, так і на відкритому повітрі без втрати експлуатаційних характеристик. Гладка поверхня матеріалу сприяє легкому формуванню, зварюванню та подальшій переробці плівки у пакувальні вироби.

Рукавна ПВХ-плівка широко застосовується в пакувальній промисловості для виготовлення пакетів, термозбіжної упаковки, захисних оболонок та ізоляційних матеріалів. У сільському господарстві вона використовується для пакування продукції, укриття теплиць і захисних конструкцій. У харчовій,

фармацевтичній та хімічній промисловості ПВХ-плівка застосовується для пакування продукції, що потребує захисту від вологи, пилу та зовнішніх впливів. Крім того, завдяки своїм діелектричним і вогнестійким властивостям, матеріал використовується в електротехнічній галузі для ізоляції та захисту виробів.

Таким чином, різноманітність типів, товщин і фізико-механічних характеристик рукавної ПВХ-плівки обумовлює необхідність вибору оптимальних параметрів екструзійного обладнання залежно від вимог до готового виробу та умов його експлуатації. [1, 2]

1.2 Застосування екструдера для виготовлення рукавної плівки

Технологічна лінія для виготовлення рукавної полімерної плівки складається з послідовності взаємопов'язаних етапів, кожен з яких відіграє важливу роль у формуванні якісних характеристик готового виробу. (рис. 1.1) На початковому етапі гранульована полімерна сировина завантажується у бункер подачі. За необхідності полімер попередньо змішується з функціональними добавками, такими як стабілізатори, пластифікатори, барвники, антиоксиданти та інші модифікуючі компоненти, які забезпечують плівці задані фізико-механічні та експлуатаційні властивості. [3]

Підготовлена сировина надходить до екструдера, де під дією підвищеної температури та тиску відбувається її плавлення. Обертання шнека забезпечує інтенсивне перемішування, гомогенізацію та транспортування полімерного розплаву до формувальної головки. У головці розплав формується у вигляді безперервної трубчастої заготовки, яка надалі перетворюється на рукавну плівку.

Наступним етапом є формування та стабілізація плівкового рукава. Залежно від типу технології, плівка може проходити через систему повітряного охолодження або калібрування, де здійснюється стабілізація геометричних параметрів, таких як товщина та ширина рукава. Процес охолодження є критично важливим для запобігання утворенню дефектів, внутрішніх напружень і нерівномірності товщини плівки.

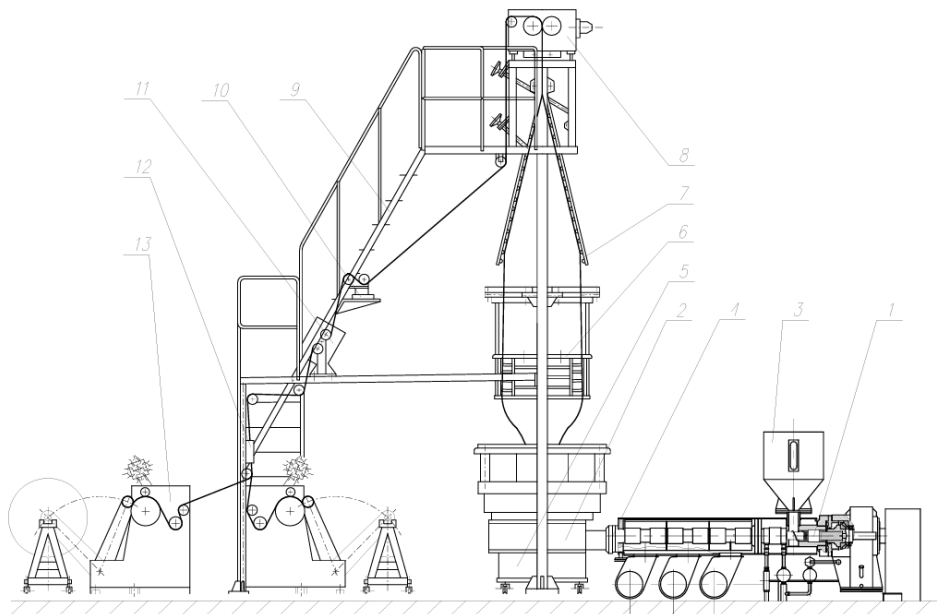


Рисунок 1.1 - Лінія виробництва:

1-прес черв'ячний, 2-головка, 3-бункер, 4-фільтр, 5-установка електровентилляторів системи охолодження, 6-пристрій стабілізуючий, 7-пристрій складаючий, 8-пристрій тягнучий, 9-естакада, 10-пристрій центруючий, 11-пристрій активуючий, 12-пристрій ріжучий, 13-станок-маніпулятор намотуючий

Після стабілізації рукавна плівка подається на тягувальний пристрій, який забезпечує її рівномірне переміщення вздовж технологічної лінії зі сталою швидкістю. Це дозволяє підтримувати стабільні розміри плівки та якісну поверхню матеріалу. Далі плівка може проходити через систему намотування або різання, де вона формується у ролони заданої ширини та довжини або розрізається відповідно до вимог виробництва.

Завершальним етапом є контроль якості та пакування готової продукції. Рукавна плівка перевіряється на відповідність товщини, міцності, однорідності структури та відсутність поверхневих дефектів. Після контролю якості готова продукція упаковується для захисту під час транспортування та зберігання та направляється на склад або безпосередньо замовнику.

Крім того, на всіх стадіях технологічного процесу застосовуються автоматизовані системи контролю та керування, зокрема оптичні та механічні вимірювальні прилади, що дозволяють оперативно відстежувати параметри екструзії та забезпечувати стабільну якість рукавної плівки.

2 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Подані технічні дані відображають ключові технологічні та спеціальні параметри обладнання. На їх основі можна здійснити подальший аналіз і зіставлення цього апарата з іншими подібними моделями, що дає змогу обґрунтувати вибір найбільш оптимального варіанта. Узагальнені показники наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики

№	Параметр	Одиниці виміру	Значення
1	Діаметр черв'яка	мм	45
2	Відношення робочої довжини черв'яка до діаметра		20
3	Частота обертання черв'яка	об/хв	1500
4	Встановлена потужність	кВт	5,8
5	Загальна потужність	кВт	2,8
6	Продуктивність	кг/год	13,6
7	Довжина	мм	1071
8	Маса	кг	7,1

3 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ТА ПРИНЦИП ДІЇ ЕКСТРУДЕРА

Екструдери належать до базового технологічного обладнання сучасної промисловості та мають особливе значення у виробництві полімерних матеріалів. У даному розділі здійснюється системний аналіз конструктивних елементів екструдера та принципів закономірностей його функціонування.

Метою є детальне розкриття архітектури обладнання, характеристика його основних вузлів і механізмів, а також опис механізму трансформації сировини у готову продукцію. Засвоєння цих положень створює підґрунтя для комплексної оцінки ефективності роботи екструдера, визначення напрямів його оптимізації та підвищення техніко-економічних показників. Глибоке розуміння конструктивних і функціональних особливостей екструдера є необхідним для фахівців, які здійснюють його проектування, експлуатацію та модернізацію, оскільки воно забезпечує науково обґрунтоване застосування обладнання у різноманітних виробничих процесах. Відповідно до теми екструдер представлено на рис. 3.1.

Функціонування екструдера для виробництва рукавної плівки відбувається наступним чином: полімерна сировина із завантажувального бункера 3 надходить у матеріальний циліндр 6, де її захоплює обертовий шнек 7 і транспортує у напрямку формуючої головки. Під час проходження через робочі зони шнека матеріал спочатку розм'якшується та ущільнюється в зоні живлення, далі плавиться в зоні стиснення та піддається гомогенізації в зоні дозування, готуючись до подачі у формуючу головку. Для стабілізації теплових умов на циліндрі встановлені охолоджувальні зони 4, а термопари контролюють температурний режим. Конструкція шнека зазвичай обладнана внутрішньою системою водяного охолодження. Привід шнека реалізується електродвигуном (постійного або змінного струму) у поєднанні з редуктором 15 та муфтою. Підшипниковий вузол сприймає осьові навантаження, що виникають у протилежному напрямку до руху розплаву. Усі робочі вузли розташовані в корпусі, встановленому на станині (див. рис. 3.1).

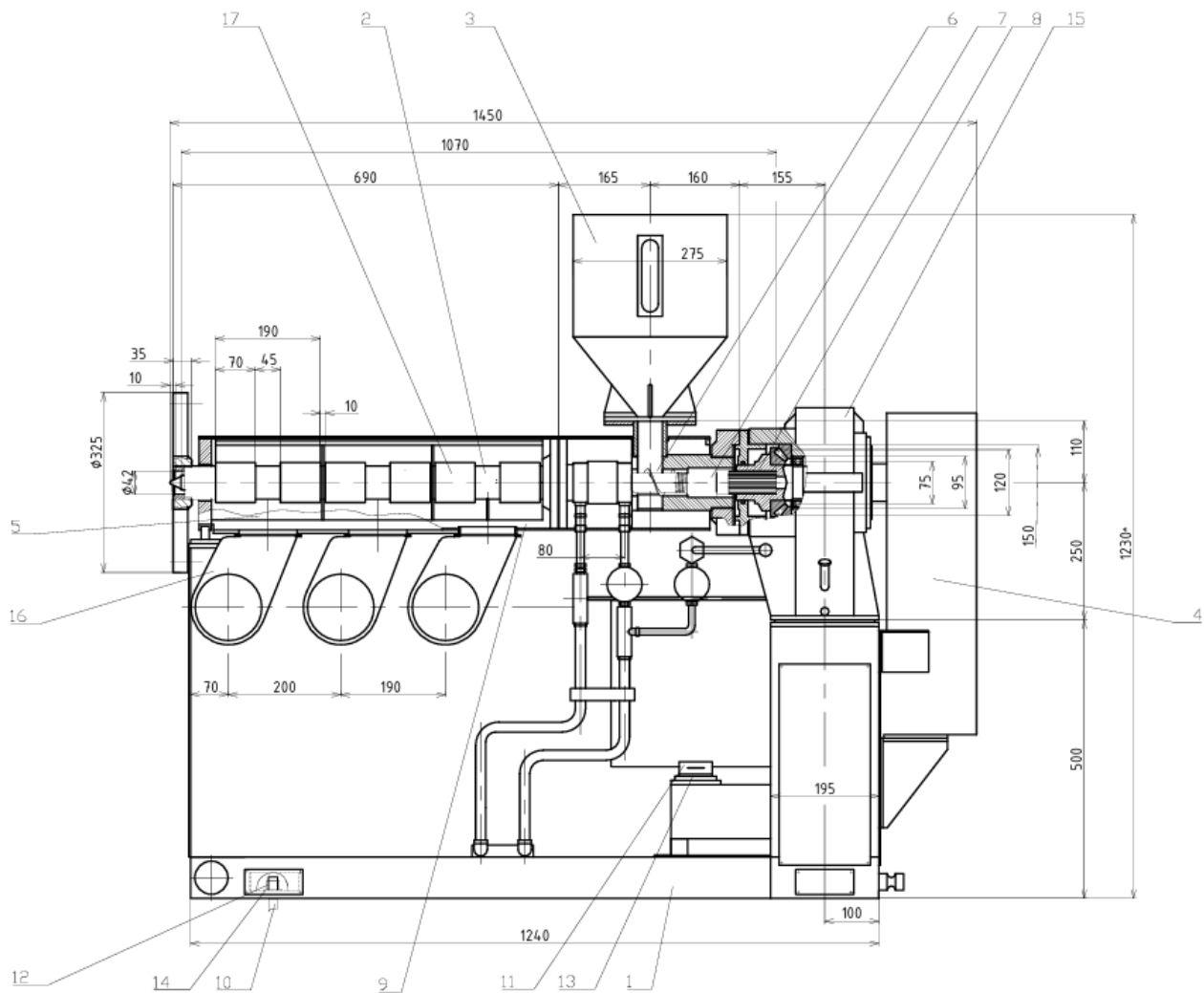


Рисунок 3.1 - Конструкція черв'ячного пресу (пояснення в тексті)

Разом із тим, використання шнекового екструдера для виготовлення рукавної плівки має певні обмеження: відносно невисока продуктивність, значні витрати енергії, складність технічного обслуговування, обмежена гнучкість у зміні режимів виробництва, потреба у спеціалізованих компонентах, а також великі габарити й маса обладнання. [4]

Геометрія каналів формуючої головки та її конструктивні параметри визначаються реологічними характеристиками полімерного розплаву й вимогами до кінцевої рукавної плівки. Оптимальний гідравлічний опір каналів має відповідати робочим характеристикам екструдера, що вимагає узгодження його розмірів, конструкції шнека та режимів переробки з геометрією головки й необхідною продуктивністю (рис. 3.2).

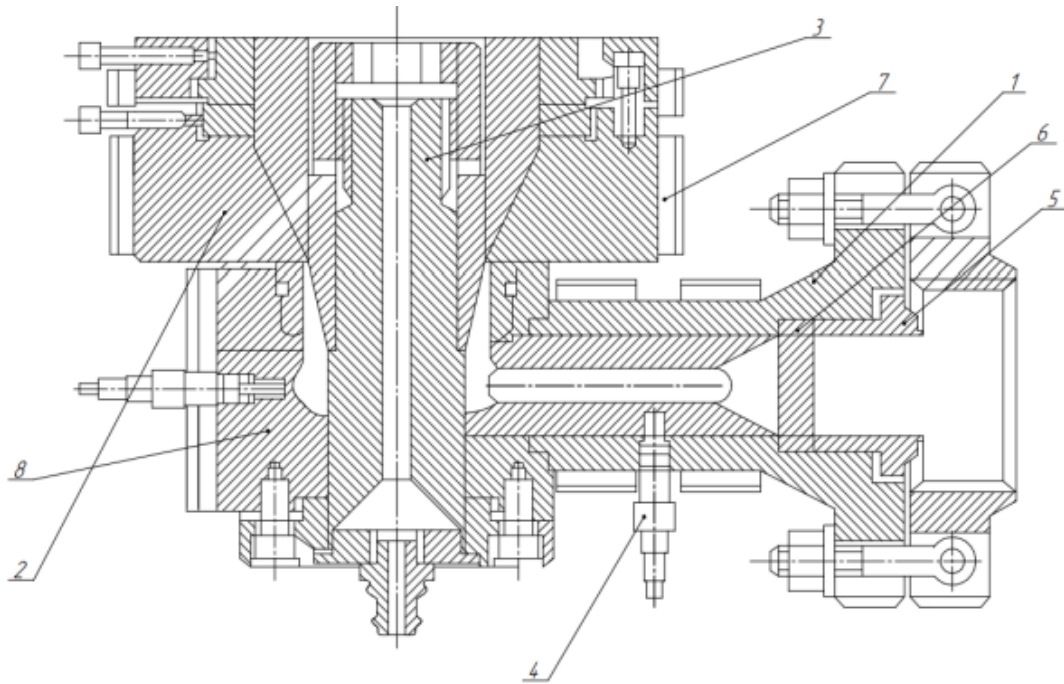


Рисунок 3.2 - Конструкція головки:

1-перехідник, 2-корпус головки, 3-дорн, 4-втулка, 5-фільтруюча платина, 6-утримувач, 7-болт, 8-рим-болт, 9-нагрівачі, 10-термопари

Формуюча головка екструдера для виготовлення рукавної плівки включає кілька основних елементів. Корпус головки виготовляють із міцного матеріалу, стійкого до високих температур і тиску. Вхідний фланець забезпечує подачу розплавленого полімеру з екструдера до головки. Уздовж корпусу розміщені нагрівальні елементи, що підтримують необхідний температурний режим та рівномірність потоку. Основним вузлом є кільцева матриця з дорном, які формують безшовний полімерний рукав. Для стабілізації геометричних параметрів застосовується система охолодження з подачею повітря, яка охолоджує розплав та забезпечує рівномірне роздування плівки. Захисний кожух запобігає пошкодженню робочих елементів та забезпечує безпеку оператора, одночасно зберігаючи тепло всередині вузла. Вихідний отвір головки призначений для відведення сформованого рукава й подальшої його подачі на калібрування, охолодження та намотування.

Принцип роботи головки для рукавної плівки полягає в тому, що гранульований полімер у бункері екструдера під дією шнека переходить у

розплавлений стан. Далі він подається у формувальний вузол головки, проходить крізь кільцеву матрицю з дорном і набуває форми безшовного рукава. Сформована плівка охолоджується та стабілізується завдяки повітряному охолодженню, після чого відводиться до наступних стадій – калібрування та намотування.

Така конструкція забезпечує високу якість плівки, рівномірну товщину та стабільність процесу, що дає можливість виготовляти рукавну плівку з різних полімерів із заданими експлуатаційними властивостями.

4 ЛІТЕРАТУРНО- ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД, ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ

4.1 Патентно літературний огляд

Метою патентно-літературного аналізу є виявлення та добір технічних рішень, здатних підвищити ефективність роботи машини. Пошукова робота проводиться шляхом вивчення патентних джерел і фахової літератури, що описують конструкції та принципи дії машин, подібних до розроблюваного обладнання. У межах огляду було проаналізовано десять патентів [5–9].

У патенті [5] модернізовано конструкцію екструдера (рис. 4.1), а саме — впроваджено середньобарельний регульований клапан-заслінку та розміщену перед ним зону інтенсивного змішування з чергуванням гвинтових ділянок різного напрямку навивки. Така комбінація створює змінний гідравлічний опір потоку матеріалу та підвищує рівень зсувних напружень і механічної енергії у процесі екструзії без збільшення теплових витрат. Корисний ефект полягає у покращеній однорідності суміші, підвищеному ступені клейстеризації крохмалю, стабільнішій текстурі екструдату та гнучкому регулюванні режимів роботи під різні типи продуктів.

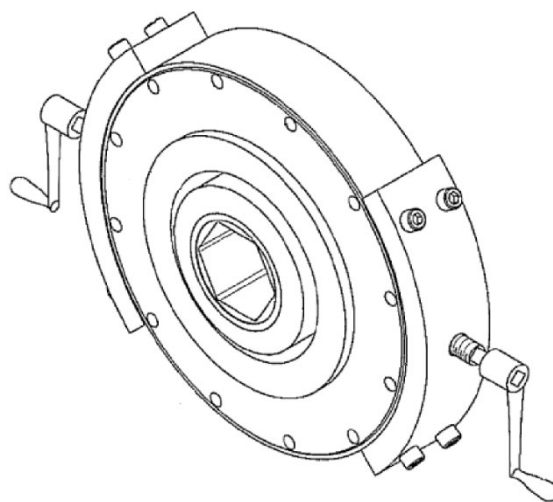


Рисунок 4.1 - Вузол обмежувального клапана потоку середньої частини циліндра

У патенті [6] модернізовано конструкцію шнекового екструдера (рис. 4.2) з внутрішньою системою охолодження. Винахід передбачає використання порожнистого шнека з охолоджувальними каналами, через які циркулює рідина або газ для відведення надлишкового тепла під час екструзії термопластичних матеріалів. Така система дозволяє регулювати температуру обробки уздовж довжини шнека, запобігає перегріванню та деградації полімеру, забезпечує стабільнішу якість продукту та зниження енергоспоживання. Корисний ефект полягає у підвищенні ефективності охолодження, зменшенні термічних навантажень на вузли екструдера і покращеній стабільності процесу переробки.

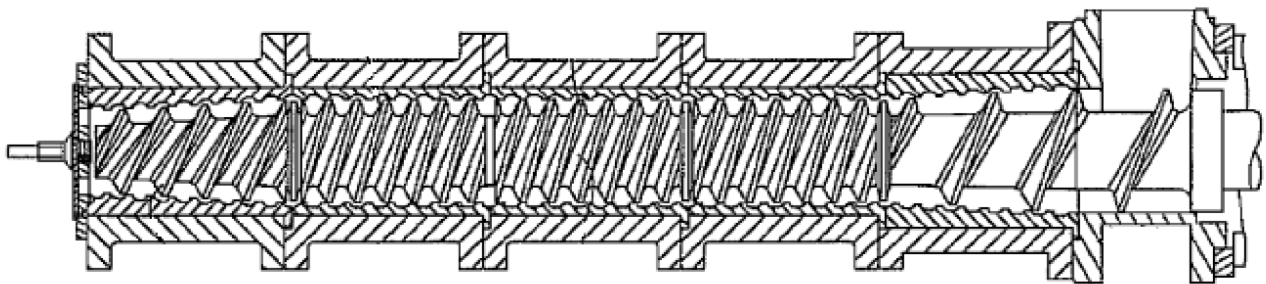


Рисунок 4.2 - Вузел екструдера та матриці

У патенті [7] модернізовано систему охолодження корпусу двошнекового екструдера (рис. 4.3), де впроваджено спірально-обвитий водяний канал, який розташований між корпусом і кожухом екструдера. Через цей канал циркулює холодна вода, яка багаторазово обвиває корпус, забезпечуючи рівномірне охолодження з обох боків. Конструкція містить ущільнювальні елементи, різьбові з'єднання з фіксуючими засобами та пружинний механізм, що запобігає розгерметизації та самовідгвинчуванню труб. Корисний ефект полягає у збільшенні рівномірності охолодження, зниженні собівартості виготовлення та спрощенні технологічного процесу (менше операцій свердління і фрезерування).

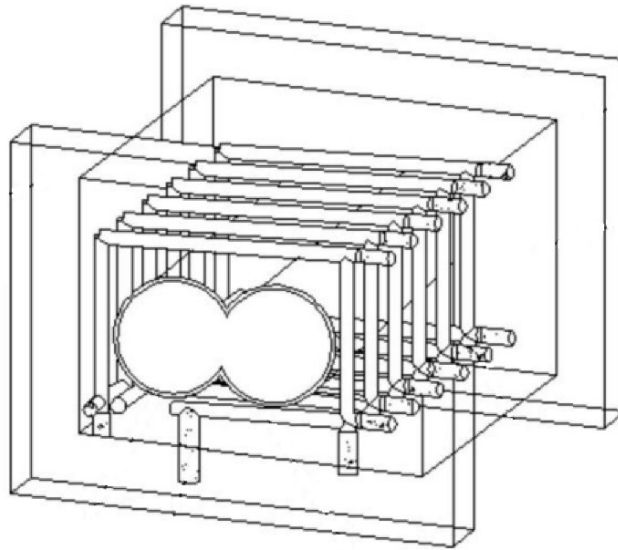


Рисунок 4.3 - Циркуляційна система охолодження водою

У патенті [8] описано модернізовану конструкцію корпусу шнекового екструдера (рис. 4.4), у якому робочу поверхню виконано з знімною зносостійкою гільзою (втулкою). Суть модернізації полягає в тому, що гільза з твердого матеріалу вставляється в корпус екструдера так, щоб між її зовнішньою поверхнею та внутрішньою стінкою корпусу залишався зазор, який потім заповнюють тверднучим матеріалом (металевим сплавом або жаростійким клеєм). Після застигання цей прошарок надійно фіксує гільзу в корпусі. Корисний ефект полягає у підвищенні зносостійкості та ремонтпридатності екструдера: зношену гільзу можна легко витягнути та замінити новою без складної механічної обробки корпусу. Крім того, у проміжному шарі можна передбачити канали для охолодження чи нагріву, що покращує терморегулювання процесу.

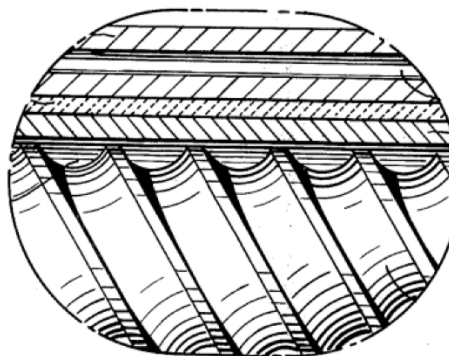


Рисунок 4.4 - Футеровка в корпусі шнекового екструдера

У патенті [9] запропоновано модернізований розподільний клапан для двошнекового екструдера (рис. 4.5), що дозволяє знімати шнеки без демонтажу обладнання. Конструкція містить корпус із основним наскрізним каналом та поворотний болт із другим співвісним каналом, який при обертанні з'єднує або перекриває потік розплаву. У робочому положенні матеріал проходить крізь клапан до гранулятора, а в пусковому — відводиться через бокову канавку для очищення чи скидання. Корисний ефект полягає у спрощенні технічного обслуговування, скороченні простоїв і підвищенні зручності управління потоком розплаву.

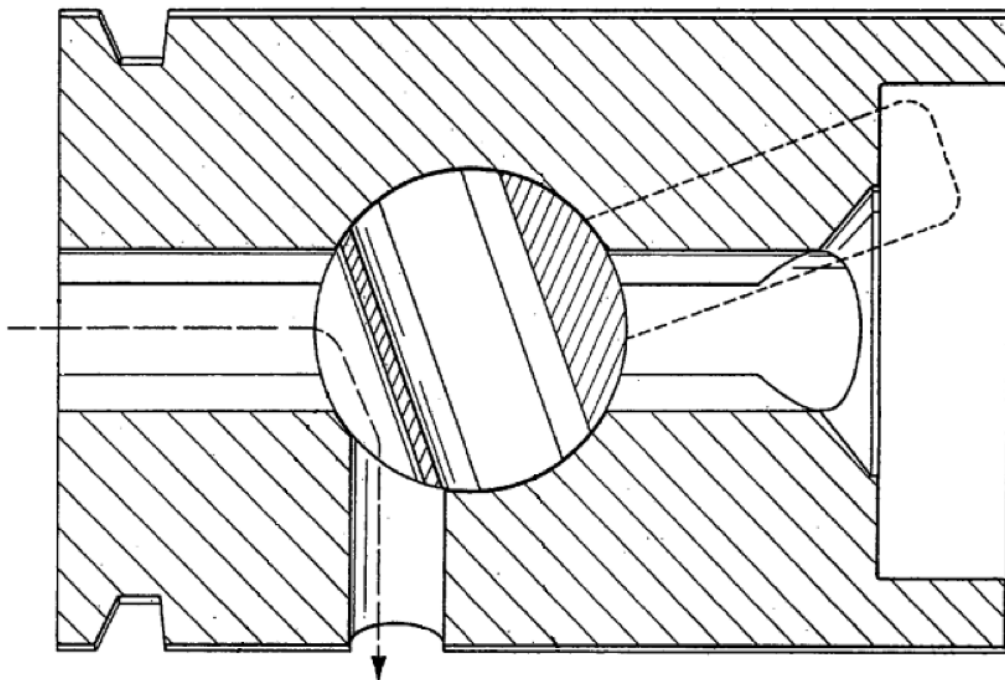


Рисунок 4.5 - Положення клапана

4.2 Вибір та обґрунтування запропонованої модернізації

У розглянутих патентах простежується спільна інженерна ідея — підвищення надійності, ремонтпридатності та ефективності роботи шнекових екструдерів за рахунок конструктивних удосконалень їхніх вузлів. Так, у патенті [8] вдосконалено корпус екструдера із знімною зносостійкою гільзою, що дає

змогу швидко замінювати зношені елементи без складного ремонту. У патенті [9] запропоновано розподільний клапан із поворотним болтом, який забезпечує легке обслуговування та можливість виймання шнеків без демонтажу суміжних частин. Патент [7] спрямований на покращення температурного режиму роботи — завдяки спірально-обвитому водяному каналу в корпусі досягається рівномірне охолодження і стабільна якість екструдату. Усі ці рішення об'єднують прагнення до оптимізації процесу екструзії та підвищення ефективності обладнання.

Водночас зазначені винаходи мають певні техніко-експлуатаційні обмеження, що знижують їхню практичну зручність. У конструкції [8] процес заливання фіксуючого шару між корпусом і гільзою є технологічно складним та може призводити до недостатньої точності центрування і нерівномірності зазору, що впливає на стабільність тиску потоку. Рішення [9] потребує високої точності виготовлення і надійного ущільнення поворотного болта, адже великі навантаження розплаву спричиняють ризик протікання та зношування. У патенті [7] спіральний канал хоча й забезпечує рівномірне охолодження, проте ускладнює обслуговування через численні з'єднання та ущільнення і може збільшувати гідравлічний опір у системі.

Патент [5] обрано тому, що він описує комбіновану систему регулювання тиску та інтенсивного змішування матеріалу в екструдері. У конструкції реалізовано середньобарельний регульований клапан-заслінку в поєднанні із зоною інтенсивного гомогенізування, утвореною чергуванням шнекових ділянок різного напрямку навивки. Таке рішення створює змінний гідравлічний опір потоку, підвищує рівень механічної енергії та ефективність клейстеризації крохмалю без додаткового теплового навантаження. Крім того, система дозволяє гнучко регулювати параметри процесу під різні типи продуктів. Саме тому цей патент є цінним прикладом механічної та енергетичної оптимізації екструзійного процесу.

Патент [6] обрано як приклад геометричного вдосконалення конструкції екструдера, спрямованого на підвищення рівномірності переробки матеріалу та продуктивності обладнання. Винахід передбачає чергування звужувальних і

розширювальних ділянок корпуса екструдера, що створює змінні зони тиску вздовж шнека. Це забезпечує інтенсивніше стискання й зсув матеріалу в зоні звуження та контрольоване розширення потоку в наступних ділянках, що сприяє покращенню однорідності суміші, зменшенню термічних коливань і стабілізації структури екструдату. Така архітектура також дозволяє використовувати більші матриці з більшою кількістю отворів, підвищуючи продуктивність без погіршення якості продукту.

Отже, обрані патенти [5] та [6] комплексно відображають два ключові напрями розвитку сучасних екструдерів — оптимізацію робочого процесу через регулювання тиску і механічну енергію та вдосконалення геометрії потоку для рівномірного змішування й стабільної продукції. Вони є найбільш близькими за технічною суттю до розробленої конструкції та слугують науково-технічною базою для формування власних інженерних рішень у сфері екструзійного обладнання.

5 РОЗРАХУНКИ, ЯКІ ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ

5.1 Параметричні розрахунки

5.1.1 Розрахунок геометрії черв'яка і частоти його обертання

Черв'як є основним робочим елементом екструдера, який забезпечує транспортування полімерного матеріалу від завантажувальної зони до формувальної головки. У процесі руху він виконує пластифікацію гранул, інтенсивне перемішування розплаву та створює тиск, необхідний для продавлювання матеріалу через головку.

Одним із визначальних параметрів роботи черв'ячної машини є діаметр черв'яка, оскільки саме він значною мірою впливає на продуктивність обладнання. Для подальших розрахунків розглядається екструдер із черв'яком діаметром $D = 45$ мм та співвідношенням довжини робочої частини до діаметра $L/D = 20$. Інші конструктивні характеристики підбираються відповідно до властивостей матеріалу, що переробляється. У цьому випадку об'єктом обробки є поліпропілен (ПП), а головні параметри черв'яка визначаються за поданими далі формулами та залежностями.

Крок гвинтової лінії черв'яка

$$t = (0,8...1,2) * D = 1 * 45 = 45 \text{ мм}$$

Кут підйому гвинтової лінії

$$\varphi = \arctg\left(\frac{t}{\pi * D}\right) = \arctg\left(\frac{45}{3,14 * 45}\right) = 17,67^\circ$$

Товщина гребня черв'яка

$$e = (0,06...0,12) * D = 0,1 * 45 = 4,5 \text{ мм}$$

при цьому менші значення приймаються для діаметрів черв'яка більше 125 мм, більші – для діаметрів менше 125 мм.

Зазор між черв'яком і гільзою

$$\delta = (0,002...0,003) * D = 0,0024 * 45 = 0,11 \text{ мм}$$

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

Глибина гвинтового каналу в зоні завантаження

$$h_1 = (0,12...0,16) * D = 0,126 * 45 = 6 \text{ мм}$$

Глибина гвинтового каналу в зоні дозування складає

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

$$= 0,5 * \left[45 - \sqrt{45^2 - \frac{4 * 5,67}{3,5} * (45 - 5,67)} \right] = 1,5 \text{ мм}$$

де $i = 3,5$ – ступінь стиску полівінілхлориду.

Конструктивні параметри черв'яків, рекомендовані для деяких полімерних матеріалів та виробів.

Діаметр вала черв'яка під завантажувальною воронкою

$$d_1 = D - 2h_1 = 45 - 2 * 6 = 33 \text{ мм}$$

Діаметр вала черв'яка в зоні дозування

$$d_3 = D - 2h_3 = 45 - 2 * 1,5 = 42 \text{ мм}$$

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

$$L_{\text{роб}} = 20 * D = 20 * 45 = 900 \text{ мм}$$

Довжина зони завантаження $L_{\text{зав}}$ становить $(4...6)*D$ або $(0,25...0,35)*L_{\text{роб}}$

$$L_{\text{зав}} = 0,25 * 900 = 225 \text{ мм}$$

Приймаємо $L_{\text{зав}} = 230 \text{ мм}$.

Довжина зони стиснення $L_{\text{ст}}$ для більшості полімерів становить $(7...13)*D$ або $(0,2...0,35)*L_{\text{роб}}$

$$L_{ст} = 0,2 * 900 = 180 \text{ мм}$$

Приймаємо $L_{ст} = 180 \text{ мм}$.

Довжина зони дозування $L_{доз}$ значною мірою впливає на якість підготовки розплаву. Співвідношення L/D переважно збільшується за рахунок довжини зони дозування та додаткових зон і елементів. Зазвичай цей параметр вибирають у межах 0,4 до 0,6 від загальної довжини робочої частини $L_{роб}$. Допускається також розрахунок наступним чином:

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

Довжина зони дозування:

$$L_{доз} = 900 - 230 - 180 = 490 \text{ мм}$$

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

Довжина відбійної частини

$$L_{відб} = (0,1...0,5) * D = 0,476 * 45 = 21 \text{ мм}$$

Загальна довжина черв'яка

$$L = L_{роб} + L_{ев} + L_{відб} = 900 + 150 + 21 = 1071 \text{ мм}$$

Глибина вала черв'яка на початку зони стиснення

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} (L - L_{ст}) = 6 - \frac{6 - 1,5}{1071} * (1071 - 180) = 2,26 \text{ мм}$$

Діаметр вала черв'яка на початку зони стиснення

$$d_2 = D - 2h_2 = 45 - 2 * 2,26 = 40,48 \text{ мм}$$

Отриманні розміри нанести на схему, на рис.5.1:

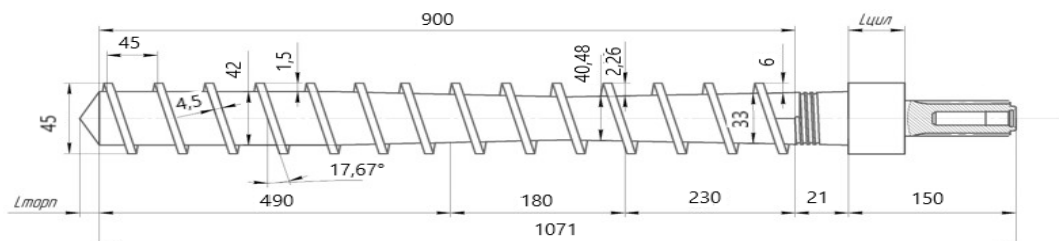


Рисунок 5.1 - Схема черв'яка

Критичну частоту обертання черв'яка в зоні завантаження можна визначити за таким співвідношенням (c^{-1}):

$$n_{кр} = \frac{42,2}{60\sqrt{D}} = \frac{42,2}{60 * \sqrt{0,045}} = 3,3 \text{ с}^{-1}$$

де D - діаметр черв'яка, м.

У зонах стиснення та дозування значно знижують допустиму частоту обертання черв'яків, щоб дотримуватись максимальної допустимої температури нагріву матеріалів.

Робоча частота обертання черв'яка:

$$n_p = (0,2...0,7) * n_{кр} = 0,35 * 3,3 = 1,155 \text{ с}^{-1}$$

У цьому підрозділі виконано розрахунок геометричних параметрів черв'яка та визначено частоту його обертання. У результаті було отримано такі показники: довжина робочої зони черв'яка становить $L_{роб} = 900$ мм, а критична частота його обертання в області завантаження дорівнює $n_{кр} = 3.3$ обертів за секунду.

5.1.2 Розрахунок коефіцієнта геометричної форми екструзійної головки

Канал головки ЛП41мп.017242.004-70СК поділяється на послідовні сегменти простої геометрії, для кожного з яких визначається коефіцієнт геометричної форми K у метрах кубічних або міліметрах кубічних, після чого обчислюється сумарне значення для всієї головки.

1. Розраховуємо ділянку 1 (рис.5.3) за типом каналу – круглий циліндровий:

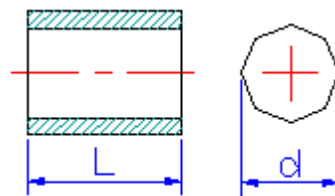


Рисунок 5.3 – Круглий циліндровий канал

$$K_1 = \frac{\pi d^4}{128L} = \frac{3,14 * 50^4}{128 * 180} = 852 \text{ мм}^3$$

2. Розраховуємо ділянку 2 (рис.5.4) за типом каналу – круглий конічний з великим діаметром на вході:

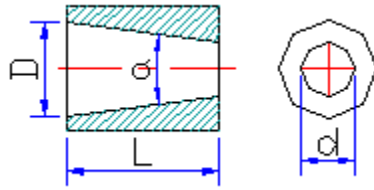


Рисунок 5.4 – Круглий конічний канал з великим діаметром на вході

$$K_2 = \frac{3\pi D^3 d^3}{128L(D^2 + Dd + d^2)} = \frac{3 * 3,14 * 65^3 * 50^3}{128 * 28(65^2 + 65 * 50 + 50^2)} = 9045 \text{ мм}^3$$

3. Розраховуємо ділянку 3 (рис.5.5) за типом каналу – круглий циліндровий:

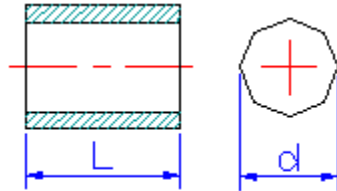


Рисунок 5.5 – Круглий циліндровий канал

$$K_3 = \frac{\pi d^4}{128L} = \frac{3,14 * 65^4}{128 * 50} = 8758 \text{ мм}^3$$

4. Розраховуємо ділянку 4 (рис.5.6) за типом каналу – конічний кільцевий з конічною цілиною:

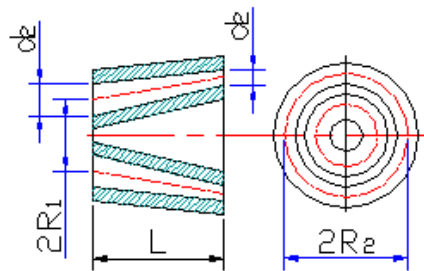


Рисунок 5.6 – Конічний кільцевий канал з конічною цілиною

$$K_4 = \frac{\pi(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6L\omega} = \frac{3,14 * (28,75 * 2,5 - 31,25 * 7,5)}{6 * 16 * (-0,076)} = 70 \text{ мм}^3$$

$$\delta_1 = \frac{D - d_1}{2} = \frac{65 - 50}{2} = 7,5 \text{ мм}$$

$$\delta_2 = \frac{D - d_2}{2} = \frac{65 - 60}{2} = 2,5 \text{ мм}$$

$$R_1 = \frac{\delta_1}{2} + \frac{d_1}{2} = \frac{7,5}{2} + \frac{50}{2} = 28,75 \text{ мм}$$

$$R_2 = \frac{\delta_2}{2} + \frac{d_2}{2} = \frac{2,5}{2} + \frac{60}{2} = 31,25 \text{ мм}$$

$$\omega = \frac{2,3 * (R_1 - R_2)^2}{(R_1 * \delta_2 - R_2 * \delta_1)^2} \lg \frac{R_1 * \delta_2}{R_2 * \delta_1} - \frac{(R_1 - R_2) * (\delta_1 - \delta_2)}{(R_1 * \delta_2 - R_2 * \delta_1) * \delta_1 * \delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 * \delta_1^2 * \delta_2^2}$$

$$\omega = \frac{2,3 * (28,75 - 31,25)^2}{(28,75 * 2,5 - 31,25 * 7,5)^2} \lg \frac{28,75 * 2,5}{31,25 * 7,5} - \frac{(28,75 - 31,25) * (7,5 - 2,5)}{(28,75 * 2,5 - 31,25 * 7,5) * 7,5 * 2,5} - \frac{7,5^2 - 2,5^2}{2 * 7,5^2 * 2,5^2} = -0,076 \frac{1}{\text{мм}^2}$$

5. Розраховуємо ділянку 5 (рис.5.7) за типом каналу –кільцевий:

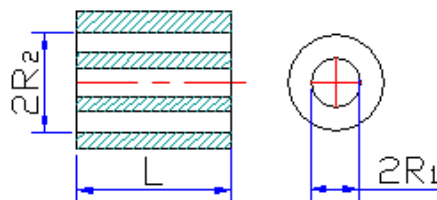


Рисунок 5.7 – Кільцевий канал

$$K_5 = \frac{\pi(R_2 + R_1)(R_2 - R_1)^3}{12L} = \frac{3,14 * (32,5 + 30) * (32,5 - 30)^3}{12 * 30} = 8,5 \text{ мм}^3$$

$$R_2 = \frac{D}{2} = \frac{65}{2} = 32,5 \text{ мм}$$

$$R_1 = \frac{d_2}{2} = \frac{60}{2} = 30 \text{ мм}$$

$$K_{\text{сум}} = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{1}{K_5}} = \frac{1}{\frac{1}{852} + \frac{1}{9045} + \frac{1}{8758} + \frac{1}{70} + \frac{1}{8,5}} = 7,5 \text{ мм}^3$$

У цьому підрозділі виконано розрахунок коефіцієнта геометричної форми екструзійної головки. З цією метою її конструкцію було поділено на кілька послідовних елементів простої форми. Для кожного елемента окремо визначено відповідний коефіцієнт, після чого отримано їх загальне сумарне значення, яке становить 7,5 мм³.

5.1.3 Розрахунок продуктивності екструдера

Вирішальним елементом, що визначає продуктивність черв'ячного екструдера, є зона дозування шнека, оскільки саме вона суттєво впливає на ефективність процесу переробки полімерів. У цьому випадку необхідно враховувати не лише геометрію черв'яка та його швидкість обертання, а й конструктивні особливості формуючої головки. У межах гідродинамічного підходу до опису взаємодії полімерного розплаву з елементами обладнання в зоні дозування виділяють три основні компоненти потоку:

- 1) прямий потік - рух розплаву міжвитковим простором в напрямку від зони завантаження до зони дозування вздовж осі черв'яка;
- 2) зворотній потік - рух розплаву у протилежному напрямку, викликаний перепадом тиску по довжині шнека;
- 3) потік витоку - рух розплаву у зазорі між зовнішньою поверхнею витків черв'яка та внутрішньою поверхнею матеріального циліндра у напрямку від зони дозування.

Хоча цей поділ на три потоки у каналі шнека є умовним, оскільки практично не існує протитечії, він дозволяє розуміти обмеження прямого потоку через опір головки. Об'ємна продуктивність черв'ячної машини для полімерів обчислюється з урахуванням опору головки та конструкції зони дозування.

$$Q = \frac{\alpha * K_{\text{заг}} * n_p}{K_{\text{заг}} + \beta + \gamma'}$$

де $n_p = 1,155$ об/с (робоча швидкість обертання черв'яка),

$K_{\text{заг}} = 8 \text{ мм}^3$ (загальний коефіцієнт геометричної форми головки),

α – коефіцієнт прямого потоку,

β – коефіцієнт зворотного потоку,

γ – коефіцієнт потоку витоку.

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

$$\alpha = \frac{\pi^3 * (t - \lambda * e)}{a + t^2 * b}$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D * \delta^3 * t^2}{10 * e * L_{\text{доз}} * \sqrt{\pi^2 * D^2 + t^2}}$$

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

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

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

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

де $t = 45$ мм (крок гвинтової лінії (нарізки) черв'яка),

$\lambda = 1$ (число заходів гвинтової нарізки),

$e = 4,5$ мм (товщина гребеня нарізки черв'яка),

$L_{\text{доз}} = 490$ мм (довжина зони дозування),

$D = 45$ мм (зовнішній діаметр черв'яка),

$\delta = 0,11$ мм (висота зазору між черв'яком та корпусом),

$h_2 = 2,29$ мм (глибина гвинтового каналу на початку зони стиснення),

$h_3 = 1,5$ мм (глибина каналу в зоні дозування),

$d_3 = 42$ мм (діаметр вала черв'яка в зоні дозування),

$d_1 = 33$ мм (діаметр вала черв'яка під завантажувальною воронкою).

Вагова продуктивність розраховується, знаючи об'ємну продуктивність:

$$\Pi = Q \cdot \rho, \text{ [кг/год]}$$

Густина розплаву полімеру при температурі переробки t (в градусах Цельсія) визначається в залежності від типу матеріалу і конкретного виробу. Для визначення густини використовується метод лінійної інтерполяції, якщо конкретна температура не вказана.

1. Коефіцієнти, що характеризують шнек зі змінною глибиною нарізки:

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

$$= 1 - \frac{6,9 * 45}{2(2,29 - 1,5)} \lg\left(\frac{2,29}{1,5}\right) + \frac{45^2}{2 * 2,29 * 1,5} = 260 \quad \square$$

$$a = \frac{\pi^2}{h_2h_3} \left(\frac{D(h_2+h_3)}{2h_2h_3} - 1\right) = \frac{3,14^2}{2,29 * 1,5} * \left(\frac{45 * (2,29 + 1,5)}{2 * 2,29 * 1,5} - 1\right) = 68 \frac{1}{\text{мм}^2}$$

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

$$= \frac{2,3}{(2,29 - 1,5) * 45^3} \lg\left(\frac{2,29 * (45 + 42)}{1,5 * (45 + 33)}\right) + \frac{2 * 2,29 * 1,5 + (2,29 + 1,5) * 45}{2 * 45^2 * 2,29^2 * 1,5^2}$$

$$= 0,004 \frac{1}{\text{мм}^4}$$

2. Значення коефіцієнту прямого потоку

$$\alpha = \frac{\pi^3(t - \lambda e)c}{a + t^2b} = \frac{3,14^3 * (45 - 1 * 4,5) * 260}{68 + 45^2 * 0,004} = 4284 \text{ мм}^3$$

3. Значення коефіцієнту зворотного потоку

$$\beta = \frac{\pi t(t - \lambda e)}{12L_{\text{шн}}(a + t^2b)} = \frac{3,14 * 45 * (45 - 1 * 4,5)}{12 * 490 * (68 + 45^2 * 0,004)} = 0,013 \text{ мм}^3$$

4. Значення коефіцієнту потоку витоків

$$\gamma = \frac{\pi^2 D \delta^3 t^2}{10eL_{\text{доз}} \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}} = \frac{3,14^2 * 45 * 0,11^3 * 45^2}{10 * 4,5 * 490 * \sqrt{3,14^2 * 45^2 + 45^2}} = 0,00037 \text{ мм}^3$$

5. Об'ємна секундна продуктивність

$$Q = \frac{\alpha * K_{\text{заг}} * n_p}{K_{\text{заг}} + \beta + \gamma} = \frac{4284 * 8 * 1,155}{8 + 0,013 + 0,00037} = 4940 \text{ мм}^3/\text{с}$$

6. Густина розплаву полімеру

$$\rho = 768,0 + \frac{(225 - 220)}{240 - 220} * \frac{(758,6 - 768,0)}{1} = 765,65 \text{ кг/м}^3$$

7. Вагова продуктивність

$$\Pi = 3600 * Q * \rho * 10^{-9} = 3600 * 4940 * 765,65 * 10^{-9} = 13,6 \text{ кг/год}$$

У межах цього розділу виконано розрахунок продуктивності черв'ячного екструдера, за результатами якого встановлено, що його робоча подача становить 13,6 кг на годину.

5.1.4 Розрахунок перепаду тиску на ділянках у головці

Розрахунок перепаду тиску в екструзії включає кілька кроків: спочатку визначається швидкість зсуву γ_i для кожної простої ділянки головки, аналогічно до обчислення коефіцієнтів геометричної форми K_i за відповідними формулами з таблиць. Потім застосовуються графіки для визначення ефективної в'язкості μ_i , в залежності від швидкості зсуву γ_i та температури переробки t . На основі розрахованих значень продуктивності і коефіцієнта геометричної форми обчислюється перепад тиску на кожній простій ділянці головки за відповідною формулою:

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

Сумують отримані значення ΔP_i для знаходження загального перепаду тиску в головці ΔP .

1. Розрахунок швидкості зсуву і $\dot{\gamma}_i$ для простих ділянок головки:

Ділянка 1

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{32Q}{\pi d^3} = \frac{32 * 4940}{3,14 * 50^3} = 0,4 \text{ с}^{-1}$$

Ділянка 2

$$\dot{\gamma}_2 = \frac{256Q}{\pi(D^3 + d^3)} = \frac{256 * 4940}{3,14 * (65^3 + 50^3)} = 1,01 \text{ c}^{-1}$$

Ділянка 3

$$\dot{\gamma}_3 = \frac{32Q}{\pi d^3} = \frac{32 * 4940}{3,14 * 65^3} = 0,18 \text{ c}^{-1}$$

Ділянка 4

$$\dot{\gamma}_4 = \frac{22,32Q}{\pi(R_1 + R_2)(\delta_2 + \delta_1)^2} = \frac{22,32 * 4940}{3,14 * (28,75 + 31,25) * (2,5 + 7,5)^2} = 5,85 \text{ c}^{-1}$$

Ділянка 5

$$\dot{\gamma}_5 = \frac{5,58Q}{\pi(R_1 + R_2)(R_2 - R_1)^2} = \frac{5,58 * 4940}{3,14 * (30 + 32,5) * (32,5 - 30)^2} = 22,47 \text{ c}^{-1}$$

2. Розрахунок ефективної в'язкості μ_i , [Па · с]:

$$\mu_1 = 6,5 * 10^3 \text{ Па} * \text{с}$$

$$\mu_2 = 6 * 10^3 \text{ Па} * \text{с}$$

$$\mu_3 = 7 * 10^3 \text{ Па} * \text{с}$$

$$\mu_4 = 5 * 10^3 \text{ Па} * \text{с}$$

$$\mu_5 = 2,5 * 10^3 \text{ Па} * \text{с}$$

3. Розрахунок перепаду тиску на простих ділянках головки:

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

$$\Delta P_1 = \frac{Q * \mu_1}{K_1} = \frac{4940 * 6,5 * 10^3}{825} = 38921 \text{ Па}$$

$$\Delta P_2 = \frac{Q * \mu_2}{K_2} = \frac{4940 * 6 * 10^3}{9045} = 3277 \text{ Па}$$

$$\Delta P_3 = \frac{Q * \mu_3}{K_3} = \frac{4940 * 7 * 10^3}{8758} = 3948 \text{ Па}$$

$$\Delta P_4 = \frac{Q * \mu_4}{K_4} = \frac{4940 * 5 * 10^3}{70} = 352857 \text{ Па}$$

$$\Delta P_5 = \frac{Q * \mu_5}{K_5} = \frac{4940 * 2,5 * 10^3}{8,5} = 1452941 \text{ Па}$$

4. Знаходження загального перепаду тиску в головці ΔP :

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 \\ &= 38921 + 3277 + 3948 + 352857 + 1452941 = 1851944 \text{ Па}\end{aligned}$$

У цьому розділі виконано розрахунок втрати тиску в формуючій головці екструдера. У підсумку отримано значення перепаду тиску ΔP , яке складає 1851944 Па.

5.1.5 Розрахунок потужності приводу екструдера

Для визначення енергетичних витрат під час виготовлення виробів необхідно враховувати потужність, яку споживає черв'ячна машина. У сталому режимі екструдювання рівень споживаної потужності слугує показником стабільності та надійності процесу. Зазвичай контроль роботи обладнання здійснюють за величиною потужності приводу.

Потужність, яку споживає екструдер (N , Вт) під час обробки пластичних мас, розподіляється на дві основні складові: на переміщення матеріалу в гвинтовому каналі черв'яка (N_1) та на обрізання матеріалу в зазорі між гребенем черв'яка і внутрішньою стінкою циліндра або гільзи (N_2).

$$N = N_1 + N_2.$$

Потужність, яка витрачається на переміщення матеріалу в гвинтовому каналі, для черв'яка зі змінною глибиною нарізки, може бути оцінена шляхом виміру сил, необхідних для подолання опору матеріалу у каналі:

$$N_1 = \frac{\pi^3 * (t - e) * L * J * \mu_{\epsilon\phi 1}}{t} * n^2 + \alpha * \Delta P * n,$$

де t – 0,045 (крок гвинтової лінії черв'яка, м),

e – 0,0045 (товщина гребеня черв'яка, м),

L – 1,071 (загальна довжина черв'яка, м),

n_p – 1,155 (робоча швидкість обертання черв'яка, s^{-1}),

α – 4,284 (коефіцієнт прямого потоку, m^3),

ΔP – 1638635 (загальний перепад тиску в головці, Па),

J – коефіцієнт, м²

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

де D – 0,045 (діаметр черв'яка, м),

d_3 – 0,042 (діаметр вала черв'яка в зоні дозування, м),

d_2 – 0,04048 (діаметр вала черв'яка на початку зони стиснення, м),

h_2 – 0,00229 (глибина гвинтового каналу в зоні стиснення, м),

h_3 – 0,0015 (глибина гвинтового каналу в зоні дозування, м).

Потужність, яка витрачається на зріз матеріалу в зазорі між гребенем черв'яка і внутрішньою стінкою циліндра або гільзи, для черв'яка зі змінною глибиною нарізки, може бути оцінена через вимір сил, які виникають в цьому зазорі під час обертання черв'яка:

$$N_2 = \frac{\pi^3 * D^3 * e * L * \mu_{\text{еф}2}}{\delta * t} * n^2.$$

У вищенаведених формулах також використовується ефективна в'язкість $\mu_{\text{еф}1}, \text{Па} \cdot \text{с}$, яка визначається за допомогою графічних залежностей для конкретного матеріалу, що використовується при виготовленні виробів (див. попередній розрахунок), в залежності від швидкості зсуву $\gamma_{1,2}$, виміряної в секунду:

$$\gamma_1 = \frac{\pi^2 * (D - h_{\text{сер}}) * (D - 2 * h_{\text{сер}}) * n}{h_{\text{сер}} * \sqrt{\pi^2 * (D - 2 * h_{\text{сер}})^2 + t^2}},$$
$$\gamma_2 = \frac{\pi^2 * D^2 * n}{\delta * \sqrt{\pi^2 * D^2 + t^2}},$$

де $h_{\text{сер}} = \frac{(h_2 + h_3)}{2}$.

Загальна споживана потужність $N_{\text{заг}}$ має перевищувати розраховану потужність N черв'ячного екструдера для компенсації не врахованих енергетичних втрат. Ці втрати включають енергію, витрачену на захоплення і транспортування

твердого матеріалу в зоні завантаження, просування матеріалу у зоні стиснення, подолання тертя в підшипниках та механічні втрати в приводі. Коефіцієнт корисної дії черв'ячних машин, зазвичай у межах 0,4–0,6 для термопластів, враховує ці втрати, дозволяючи визначити необхідну загальну споживану потужність.

$$N_{\text{заг}} = \frac{N}{\eta}$$

На основі розрахованої загальної потужності обирається двигун потужністю $N_{\text{дв}}$ для приводу екструдера, користуючись відповідними довідковими матеріалами. Вибір здійснюється на користь асинхронного двигуна з рекомендованою швидкістю обертання навколо $n_{\text{дв}} = 1500$ обертів за хвилину.

1. Коефіцієнт

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

$$= \frac{3,14^2 * 0,045^2 - 4 * 0,045^2}{3,14^2} + \frac{(0,045 + 0,042)^3 - (0,045 + 0,04048)^3}{3 * (0,042 - 0,04048)} +$$

$$+ \frac{2,3 * 3,14^2 * 0,045^5 * \lg \frac{0,00229}{0,0015}}{(0,045^2 + 3,14^2 * 0,045^2) * (0,00229 - 0,0015)} = 0,0529 \text{ м}^2$$

2. Швидкість зсуву:

$$h_{\text{сер}} = \frac{h_2 + h_3}{2} = \frac{0,00229 + 0,0015}{2} = 0,0019 \text{ м}$$

$$\gamma_1 = \frac{\pi^2(D - h_{\text{сер}})(D - 2h_{\text{сер}})n}{h_{\text{сер}}\sqrt{\pi^2(D - 2h_{\text{сер}})^2 + t^2}} =$$

$$= \frac{3,14^2 * (0,045 - 0,0019) * (0,045 - 2 * 0,0019) * 1,155}{0,0019 * \sqrt{3,14^2 * (0,045 - 2 * 0,0019)^2 + 0,045^2}} = 74,06 \text{ с}^{-1}$$

$$\gamma_2 = \frac{\pi^2 D^2 n}{\delta \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}} = \frac{3,14^2 * 0,045^2 * 1,155}{0,11 * 10^{-3} * \sqrt{3,14^2 * 0,045^2 + 0,045^2}} = 1,4 * 10^3 \text{ с}^{-1}$$

$$\mu_1 = 1,1 * 10^3 \text{ Па} * \text{с}$$

$$\mu_2 = 1,5 * 10^2 \text{ Па} * \text{с}$$

3. Потужність, що витрачається на переміщення матеріалу в гвинтовому каналі:

$$N_1 = \frac{\pi^3(t - e)LJ\mu_{\text{еф1}}}{t} n_p^2 + \alpha * \Delta P * n_p =$$

$$= \frac{3,14^3 * (0,045 - 0,0045) * 1,071 * 0,0529 * 1,1 * 10^3}{0,045} * 1,155^2 +$$

$$+ 4,284 * 10^{-6} * 1851944 * 1,155 = 2326 \text{ Вт}$$

4. Потужність, що витрачається на зріз матеріалу в зазорі між гребенем черв'яка і внутрішньою стінкою циліндра або гільзи:

$$N_2 = \frac{\pi^3 D^3 e L \mu_{\text{еф2}}}{\delta t} n_p^2 = \frac{3,14^3 * 0,045^3 * 0,0045 * 1,071 * 1,5 * 10^2}{0,00011 * 0,045} * 1,155^2 =$$

$$= 550 \text{ Вт}$$

5. Потужність, споживана екструдером

$$N = N_1 + N_2 = 2326 + 550 = 2876 \text{ Вт}$$

6. Загальна споживана потужність

$$N_{\text{заг}} = \frac{N}{\eta} = \frac{2876}{0,5} = 5,8 \text{ кВт}$$

На основі розрахованої загальної потужності для екструдера, вибирається відповідний двигун АІР100S4 потужністю $N_{\text{дв}}$ згідно з довідковими матеріалами.

Віддається перевага асинхронному двигуну з рекомендованим числом обертів навколо $n_{\text{дв}} = 1500$ об/хв. В ході розрахунків отримано наступні результати: $N = 2856$ Вт, $N_{\text{заг}} = 5,8$ кВт для споживаної потужності екструдера.

5.2 Розрахунки черв'яка на міцність

5.2.1 Розрахунок на міцність

Розглянуто основну розрахункову схему черв'яка, яка представлена на рисунку 5.8.

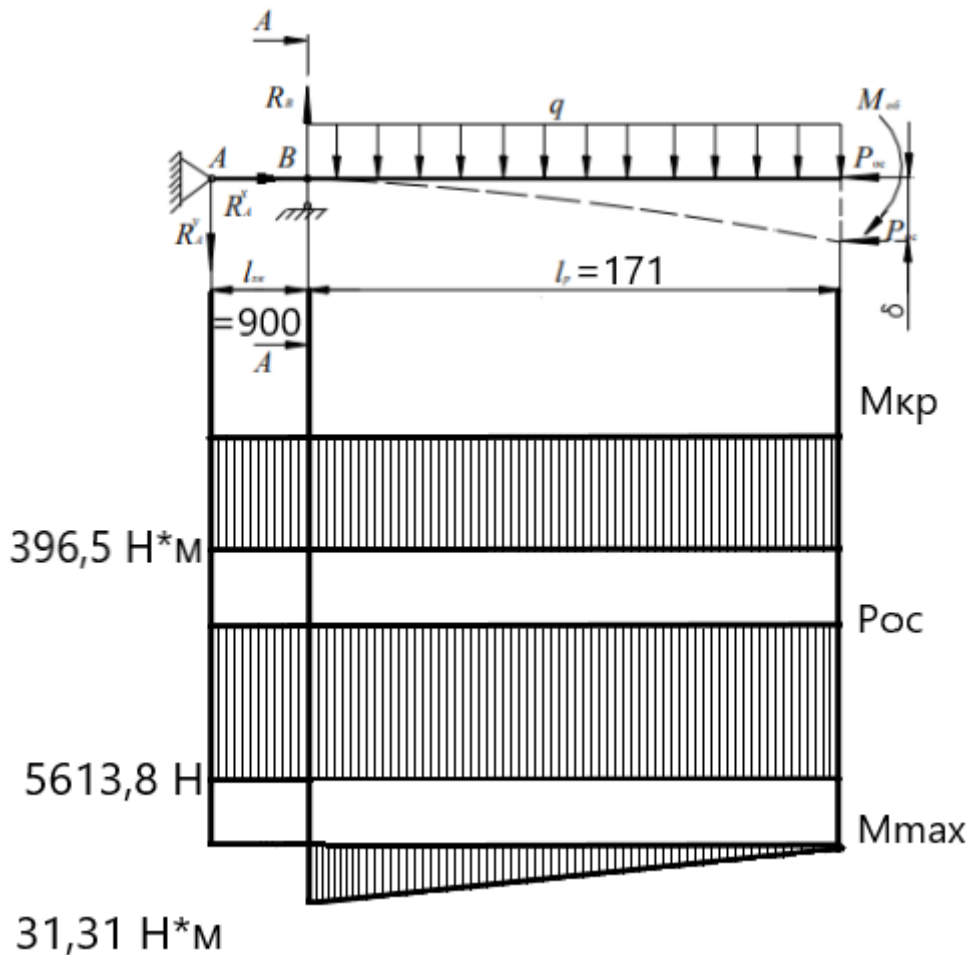


Рисунок 5.8 - Епюра напружень черв'яка

Крутний момент (Н·м) становить

$$M_{кр} = \frac{30N}{\pi n} = \frac{30 * 2876}{3,14 * 69,3} = 396,5 \text{ Н} * \text{м}$$

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

Осьове зусилля

$$P_{oc} = \frac{2M_{кр}}{D} \operatorname{tg}\varphi = \frac{2 * 396,5}{0,045} * \operatorname{tg}(17,67^\circ) = 5613,8 \text{ Н}$$

де D – зовнішній діаметр черв'яка, м;

$\varphi=17,67^\circ$ – кут підйому нарізки:

де t – крок нарізки, м.

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

$$q = \frac{9,8G}{l_p} = \frac{9,8 * 7,1}{0,9} = 77,31 \text{ Н/м}$$

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

$$G = \frac{\pi(D - d_0)^2}{4} \rho l_p = \frac{3,14 * (0,045 - 0,009)^2}{4} * 7850 * 0,9 = 7,1 \text{ кг}$$

d_0 – діаметр каналу для охолодження, м

$$d_0 = (0,15...0,25)D = 0,2 * 0,045 = 0,009 \text{ м}$$

$\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ густина сталі 40ХН2МА.

Стискальне напруження в тілі черв'яка виникає від осьової сили та згинального моменту, що виникає через його вагу. Перше компонент напруження рівномірно розподілене по перерізу, тоді як другий змінюється від розтягувального в верхній частині перерізу до стискального в нижній. Через це стискальне напруження має максимальне значення на нижніх волокнах і розраховується за відповідною формулою.

$$\sigma_{ст} = \frac{P_{oc}}{F} + \frac{M_{max}}{W_x} = \frac{5613,8}{0,0008} + \frac{31,31}{3,5 * 10^{-6}} = 16 \text{ МПа}$$

де F - площа небезпечного перерізу (знаходиться під завантажувальною лійкою, в точці початку нарізки, де відбувається найбільше навантаження і найменша площа, і не враховує площу перерізу витків), вимірюється в квадратних метрах.

$$F = \frac{\pi d_1^2}{4} (1 - \alpha^2) = \frac{3,14 * 0,033^2}{4} * (1 - 0,27^2) = 0,0008 \text{ м}^2$$

$$\alpha = d_0/d_1 = \frac{0,009}{0,033} = 0,27$$

d_1 – діаметр осердя в зоні завантаження, м;

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

$$M_{max} = \frac{1}{2} q l_p^2 = \frac{1}{2} * 77,31 * 0,9^2 = 31,31 \text{ Н} * \text{м}$$

W_x – осьовий момент опору, м³:

$$W_x = \frac{\pi d_1^3 (1 - \alpha^4)}{32} = \frac{3,14 * 0,033^3 * (1 - 0,27^4)}{32} = 3,5 * 10^{-6} \text{ м}^3$$

Дотичні напруження

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p} = \frac{396,5}{7 * 10^{-6}} = 56,6 \text{ МПа}$$

де W_p – полярний момент опору, м³

$$W_p = \frac{\pi d_1^3 (1 - \alpha^4)}{16} = \frac{3,14 * 0,033^3 * (1 - 0,27^4)}{16} = 7 * 10^{-6} \text{ м}^3$$

Еквівалентне напруження за III теорією міцності

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_{ст}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{(16 * 10^6)^2 + 4 * (56,6 * 10^6)^2} = 1,44 * 10^8 \text{ Па} = 144 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт запасу не повинен перевищувати допустиме значення

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{екв}} = \frac{960 * 10^6}{114 * 10^6} \geq 1,6 = 8,4 \geq [n]$$

Звичайно використовують допустимий коефіцієнт запасу в діапазоні від 1,6 до 2,0. Таким чином, отриманий коефіцієнт міцності склав 8,4, що вказує на виконання умови міцності.

5.2.2 Розрахунок на стійкість

Оскільки черв'як піддається згинальному моменту від циклічної дії власної ваги, важливо провести перевірку його тривкості.

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{(k_\sigma)_d \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_c} = \frac{4,32 * 10^8}{3 * 8,9 * 10^6 + 0,25 * 0} = 16,2$$

де n_σ – коефіцієнт запасу міцності під час циклічного навантаження;

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

$$\sigma_{-1} = 0,4\sigma_B = 0,4 * 1080 * 10^6 = 4,32 * 10^8 \text{ Па};$$

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

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

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_x} = \frac{31,31}{3,5 * 10^{-6}} = 8,9 * 10^6 \text{ Па};$$

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

ψ_σ – коефіцієнт, що залежить від матеріалу сталі 40ХН2МА ($\sigma_B = 1080$ МПа $\psi_\sigma = 0,25$);

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

$$(k_\sigma)_d = \frac{k_\sigma}{\beta * \varepsilon} = \frac{2}{1 * 0,65} = 3$$

Коефіцієнт концентрації напружень k_σ в цьому випадку знаходиться в діапазоні від 1,9 до 2,0 і враховує особливості розподілу напружень у деталі. Коефіцієнт β оцінює якість поверхні, при полірованій поверхні черв'яка його значення становить 1. Коефіцієнт ε враховує розмір перерізу деталі та специфіку матеріалу, зокрема для деталей з легуваних сталей, де є концентрація напружень. Умова міцності деталі в цьому випадку виконується, що підтверджується розрахунками та згідно з прийнятими нормами і стандартами.

5.2.3 Розрахунок на жорсткість

Під час оцінювання жорсткості черв'яка визначають, чи не перевищує його прогин допустимого конструктивного зазору. Головним завданням цього аналізу є встановлення, чи не виходить відхилення осі черв'яка за межі передбачених геометричних параметрів. Це особливо актуально в режимі холостого ходу, оскільки під час реальної роботи екструдера канали шнека та зазор між ним і

корпусом заповнені розплавом під високим тиском, який суттєво зменшує прогин і мінімізує контактне тертя.

Полярний момент інерції перерізу, м⁴

$$I = \frac{\pi d_1^4}{64} (1 - \alpha^4) = \frac{3,14 * 0,033^4}{64} (1 - 0,27^4) = 5,8 * 10^{-8} \text{ м}^4$$

Радіус інерції, м

$$i = \sqrt{\frac{I}{F}} = \sqrt{\frac{5,8 * 10^{-8}}{0,0008}} = 0,0085 \text{ м}$$

Ступінь жорсткості

$$\lambda = \frac{\mu l_p}{i} = \frac{2 * 0,9}{0,0085} = 212$$

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

Якщо значення параметра λ перевищує 50, то вважають, що черв'як не є достатньо жорстким, і проводять перевірку на максимальний прогин за допомогою спеціальної формули.

$$\begin{aligned} \delta_p &= \frac{1}{EI} \left[\frac{q}{k^2} \left(\frac{1}{k^2} + \left(\frac{1}{k^2} + \frac{l_p^2}{2} \right) \right) - \frac{1}{k} \left(\frac{q}{k^3} - Al_p \right) \cos(kl_p) - \frac{1}{k^2} \left(\frac{ql_p}{k} - A \right) \sin(kl_p) \right] = \\ &= \frac{1}{2,09 * 10^5 * 5,8 * 10^{-8}} * \left[\frac{77,31}{680,5^2} * \left(\frac{1}{680,5^2} + \left(\frac{1}{680,5^2} + \frac{0,9^2}{2} \right) \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{680,5} * \left(\frac{77,31}{680,5^3} - (-0,1) * 0,9 \right) * \cos(680,5 * 0,9) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{680,5^2} * \left(\frac{77,31 * 0,9}{680,5} - (-0,1) \right) * \sin(680,5 * 0,9) \right] = 0,016 \text{ м} \end{aligned}$$

$$\text{де } k = \sqrt{\frac{P_{oc}}{EI}} = \sqrt{\frac{5613,8}{2,09 * 10^5 * 5,8 * 10^{-8}}} = 680,5 \text{ м}^{-1}$$

$$A = \frac{q(l_p - \frac{1}{k} \sin(kl_p))}{k \cos(kl_p)} = \frac{77,31 * (0,9 - \frac{1}{680,5} * \sin(680,5 * 0,9))}{680,5 * \cos(680,5 * 0,9)} = -0,166 \text{ Н * м}$$

У початковій фазі проектного розрахунку черв'як вибирають, враховуючи крутний момент і осьове зусилля. Після розрахунку геометричних параметрів проводиться детальний аналіз черв'яка. Для більш точного визначення силових

впливів на черв'як урахується нецентральний характер осьового навантаження, що виникає від прогину кінця черв'яка δ_p .

$$\sigma = \frac{P_{oc}}{F} \left(1 + \frac{\delta_p F}{I} d_1 \right) + \frac{M_{max}}{W_x} = \frac{5613,8}{0,0008} * \left(1 + \frac{0,016 * 0,0008}{5,8 * 10^{-8}} * 0,033 \right) = 5,8 * 10^7 \text{ Па} = 58 \text{ МПа}$$

Отримане значення підставляється в залежність

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_{ст}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{(5,8 * 10^7)^2 + 4 * (56,6 * 10^6)^2} = 1,27 * 10^7 \text{ Па} = 127 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт запасу не повинен перевищувати допустиме значення

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{екв}} = \frac{960 * 10^6}{127 * 10^6} \geq 1,6 = 7,6 \geq [n]$$

Зазвичай допустимий коефіцієнт запасу $[n]$ вибирають у діапазоні від 1,6 до 2,0. Таким чином, коефіцієнт міцності n дорівнює 7,6, що свідчить про те, що умова міцності виконується.

5.2.4 Розрахунок шліцьового з'єднання

Шліцьові з'єднання з евольвентним профілем традиційно застосовують для передавання крутного моменту від приводу до черв'яка. Їх використовують завдяки значній площі контакту, високій вантажопідйомності та тривалому ресурсу роботи. Для точного центрування вузла та усунення люфтів зазвичай призначають посадку 7Н/7п по бокових поверхнях шліців. Оцінювання придатності такого з'єднання проводять шляхом перевірки його міцності за відповідною формулою.

$$\sigma_{зм} = \frac{M_{об}}{R_c F z \psi} \leq [\sigma]_{зм} = \frac{396,5}{0,03 * 0,00024 * 30 * 0,7} \leq 1,2 * 10^8 \text{ Па} = 2,6 * 10^6 \text{ Па} \leq 1,2 * 10^8 \text{ Па}$$

де $R_c = d_d/2 = mz/2 = \frac{2 * 30}{2} = 30 \text{ мм}$;

m – модуль, мм;

z - кількість зубів шліцьового з'єднання;

$$z = \frac{d_d}{m} = \frac{60}{2} = 30;$$

F – площа контакту, м²:

$$F = 0,8lm = 0,8ld_d/z = \frac{0,8 \cdot 0,15 \cdot 0,06}{30} = 0,00024 \text{ м}^2;$$

Коефіцієнт ψ , який враховує нерівномірність розподілу навантаження по поверхні шліців, приймає значення від 0,7 до 0,8. Допустиме напруження на зминання $[\sigma]_{\text{зм}}$ приймається рівним 120 МПа. Для розрахунків було обрано модуль і кількість зубів відповідно до відомостей з довідників, з прийняттям значення $m = 2$. Умова міцності виконується.

5.3 Тепловий розрахунок

Тепловий баланс екструдера визначається рівнянням:

$$E_{\text{н}} + E_{\text{ш}} = E_{\text{м}} + E_0 + E_{\text{п}}$$

Де $E_{\text{н}}$ представляє теплову енергію, яка надходить від зовнішніх обігрівачів у кіловаттах; $E_{\text{ш}}$ описує теплову енергію, яка виділяється під час роботи шнека (відома як внутрішня теплота тертя) у кіловаттах; $E_{\text{м}}$ визначає теплову енергію, яка йде з нагрітим матеріалом у кіловаттах; E_0 відображає теплову енергію, що віддається системою охолодження (водою, повітрям і т. д.) у кіловаттах; $E_{\text{п}}$ описує втрати тепла в довкілля через кожух екструдера у кіловаттах.

За допомогою рівняння теплового балансу можна обчислити необхідний обсяг теплоти, який необхідно постачати до екструдера через систему обігріву.

$$E_{\text{н}} = E_{\text{м}} + E_0 + E_{\text{п}} - E_{\text{ш}} = 1,837 + 1,336 + 4,15 - 0,73 = 6,593 \text{ кВт}$$

Складові рівняння балансу визначаються так:

$$E_{\text{м}} = G_{\text{м}} * c_{\text{м}}(t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) = 0,0037 * 2409 * (225 - 20) = 1,827 \text{ кВт}$$

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

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

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

$$G_m = \frac{Q}{3600} = \frac{13,6}{3600} = 0,0037 \text{ кг/год}$$

де Q – масова продуктивність екструдера, кг/год.

$$E_0 = G_B * c_B (t_{B1} - t_{B2}) = 0,0636 * 4200 * (25 - 20) = 1,336 \text{ кВт}$$

де c_B – питома теплоємність води, кДж/(кг. К);

t_{B1} , t_{B2} - кінцева та початкова температури води, До.

Кількість води G_B , що надходить на охолодження шнека, кг/с:

$$G_B = \rho F v = 1000 * 0,0000636 * 1 = 0,0636 \text{ кг/с}$$

де ρ – щільність води, кг/м³

F – площа поперечного перерізу, м²

v – швидкість течії води, м/с.

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 * 0,009^2}{4} = 0,0000636 \text{ м}^2$$

де d – діаметр трубки у тілі шнека, м.

$$E_n = F_k \alpha (t_n - t_c) = 0,21 * 0,00988 * (22 - 20) = 4,15 \text{ кВт}$$

$$F_k = \pi d_k L_k = 3,14 * 0,071 * 0,921 = 0,21 \text{ м}^2$$

$$\alpha = (9,74 + 0,07 * \Delta t) * 10^{-3} = (9,74 + 0,07 * 2) * 10^{-3} = 9,88 \text{ кВт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

$$\Delta t = t_n - t_c = 22 - 20 = 2^\circ\text{C}$$

$$L_k = L$$

Площа зовнішньої поверхні корпусу екструдера позначається як F_k . Коефіцієнт теплопередачі позначається як α і вимірюється в кВт/(м²*К). Температура зовнішньої поверхні ізолюваного корпусу позначається як t_n і вимірюється в градусах Цельсія. Температура довкілля позначається як t_c і також вимірюється в градусах Цельсія. Діаметр корпусу із ізоляцією позначається як d_k і має вимірюватися в метрах, а довжина корпусу позначається як L_k і також вимірюється в метрах.

$$\begin{aligned}
E_{\text{ш}} &= \left(\frac{\pi^3 D^3 \eta_1 L}{h} + \frac{QP}{\cos^2 \varphi} + \frac{\pi^2 D^2 n^2 \eta_2 e L}{\delta \operatorname{tg} \varphi} \right) 9,8 * 10^{-10} = \\
&= \left(\frac{3,14^3 * 0,045^3 * 1,1 * 10^3 * 1,071}{1,5 * 10^{-3}} + \frac{13,6 * 50 * 10^6}{\cos^2 17,67^\circ} \right. \\
&\quad \left. + \frac{3,14^2 * 0,045^2 * 1,155^2 * 1,5 * 10^2 * 4,5 * 10^{-3} * 1,071}{0,11 * 10^{-3} * \tan 17,67^\circ} \right) * 9,8 \\
&\quad * 10^{-10} = 0,73 \text{ кВт}
\end{aligned}$$

Діаметр шнека позначається як D і вимірюється в сантиметрах. Частота обертання шнека позначається як n і має вимірюватися в обертах на секунду. Тиск у циліндрі позначається як P і вимірюється в паскалях. В'язкість розплаву полімеру у спіральному каналі шнека позначається як η_1 і має вимірюватися в паскаль-секундах. В'язкість розплаву полімеру в зазорі між гребенем шнека та стінкою циліндра позначається як η_2 і також вимірюється в паскаль-секундах. Кут підйому гвинтової нарізки шнека позначається як φ і вимірюється в градусах. Ширина гребеня витка позначається як e . Величина зазору між гребенем шнека та циліндром позначається як δ .

Розрахунки даного підрозділу виконано з використанням мови програмування C++. До програми було введено вихідні дані з умови задачі та результати розрахунків, отримані в попередніх розділах. На їх основі реалізовано алгоритм розрахунку даного підрозділу. Результати розрахунків наведено на рис. 5.9, а текст програмного коду подано у Додатку 2.

```

Gm = 0.0037 kg/c
Em = 1.827 kVt

F = 6.3585e-05 m^2
Gb = 0.063585 kg/c
E0 = 1.335 kVt

T = 2 grad C
a = 9.88 Vt/(m^2*K)
Fk = 0.205328 m^2
Ep = 4.05 kVt

Eh = 0.73 kVt

En = 6.482 kVt

```

Рисунок 5.9 – Виведення розрахунків

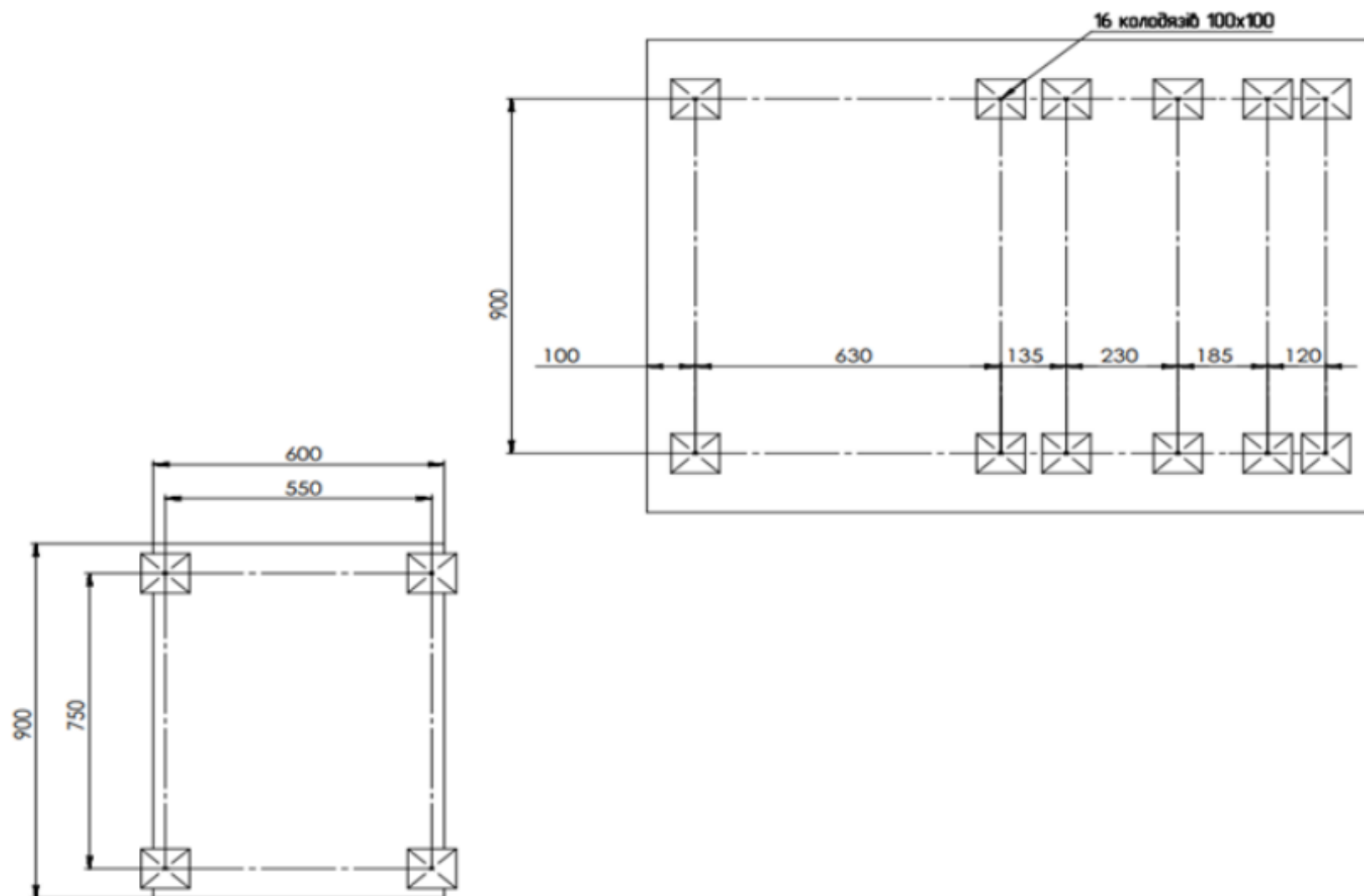
6 СПЕЦІАЛЬНІ РОЗДІЛИ

6.1 Монтаж і експлуатація

У даному розділі розглянуто питання монтажу, експлуатації та технічного обслуговування модернізованого корпусу екструдера. Конструкція корпусу та складальні одиниці представлені на відповідному складальному кресленні (ЛП41мп.017243.001-70СК) та у специфікації (ЛП41мп.017243.001-70), які наведені у графічній частині роботи. Основні конструктивні особливості та принцип роботи екструдера були детально описані у розділі опис конструкції та принцип дії екструдера. [10]

Далі в розділі наведено карти змазування, карти технічного обслуговування та інші експлуатаційні матеріали, необхідні для забезпечення надійної та безперебійної роботи обладнання.

Дубл.									
Взм.									
Підп.									
Розроб.					Карта ескізів	Номер операції			
Перев.									
Принят					План розміщення фундаментних болтів				
Затвердн									
Н. констр.									



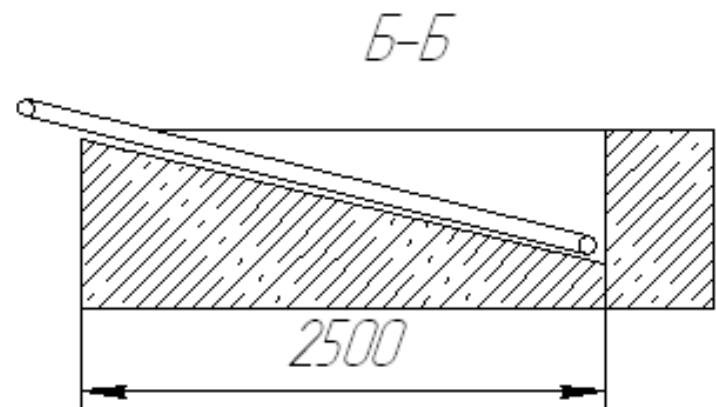
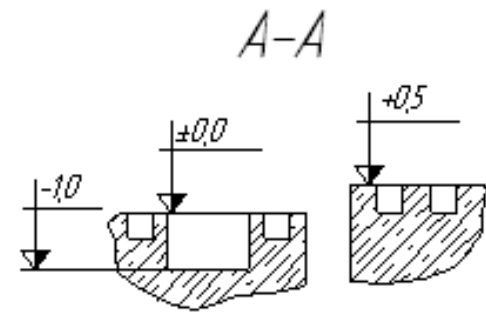
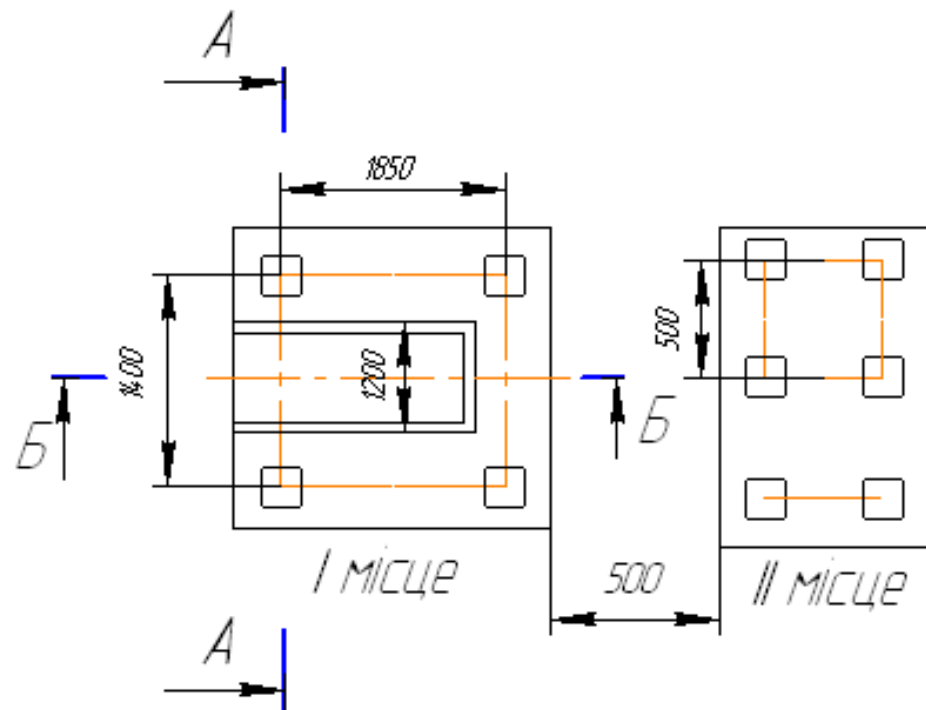
К.Е.

Інв. № об'єкта	Підпис і дата	Взам. № в. №	Інв. № об'єкта	Підпис і дата

Карта ескізів

Номер операції

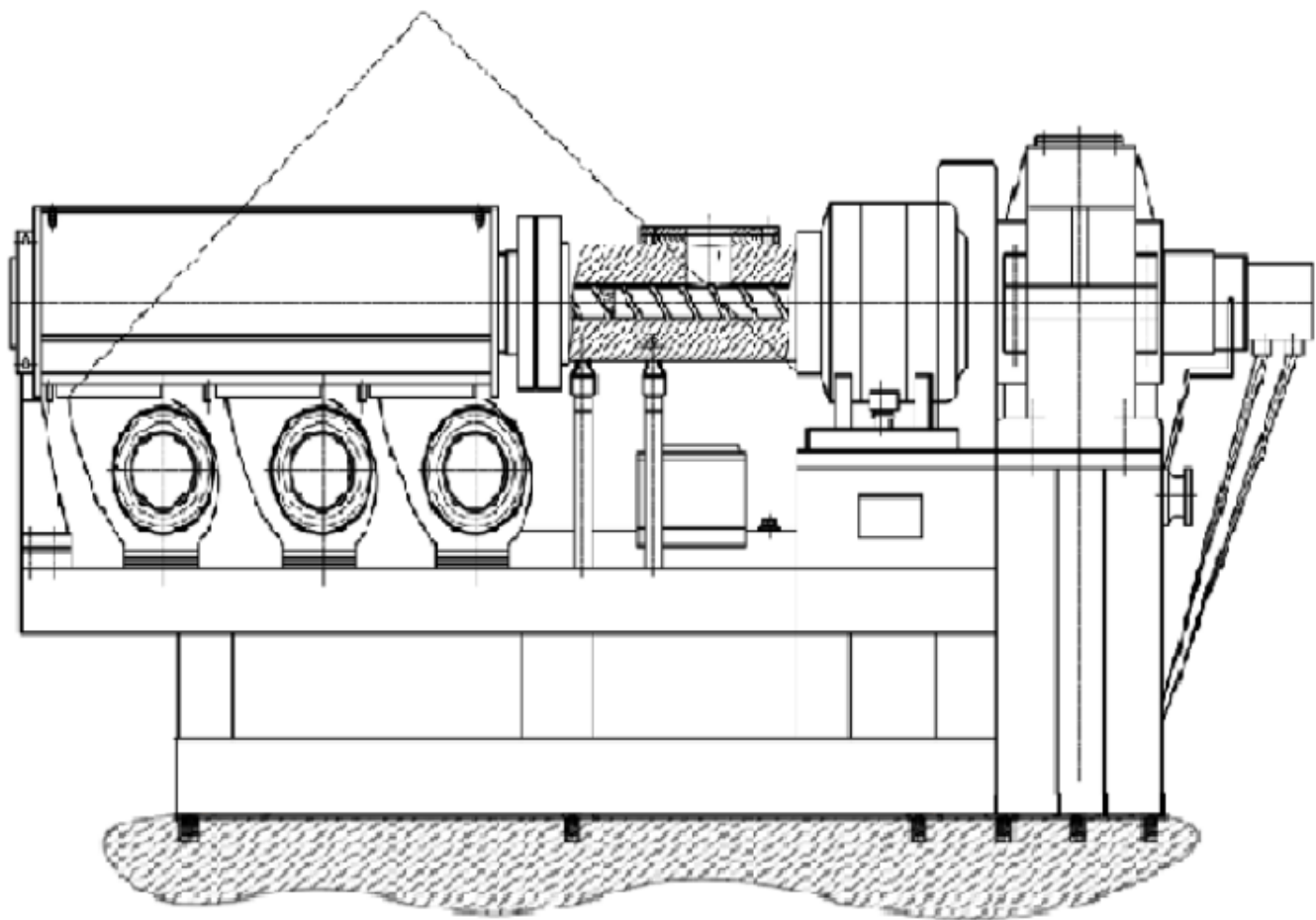
План розміщення фундаментних болтів



										Розроб.				Арх.
														Архив
Зм.	Архив	№ документа	Підпис	Дата	Зм.	Архив	№ документа	Підпис	Дата	Н.Контр				

Дубл.									
Взам.									
Підп.									

Розроб.					Карта ескізів	Номер операції
Перев.						
Проек.						
Затверд.						
Н. констр.				Монтаж черв'яка екструдера		



2

Дубл.																				
Вид.																				
Підт.																				

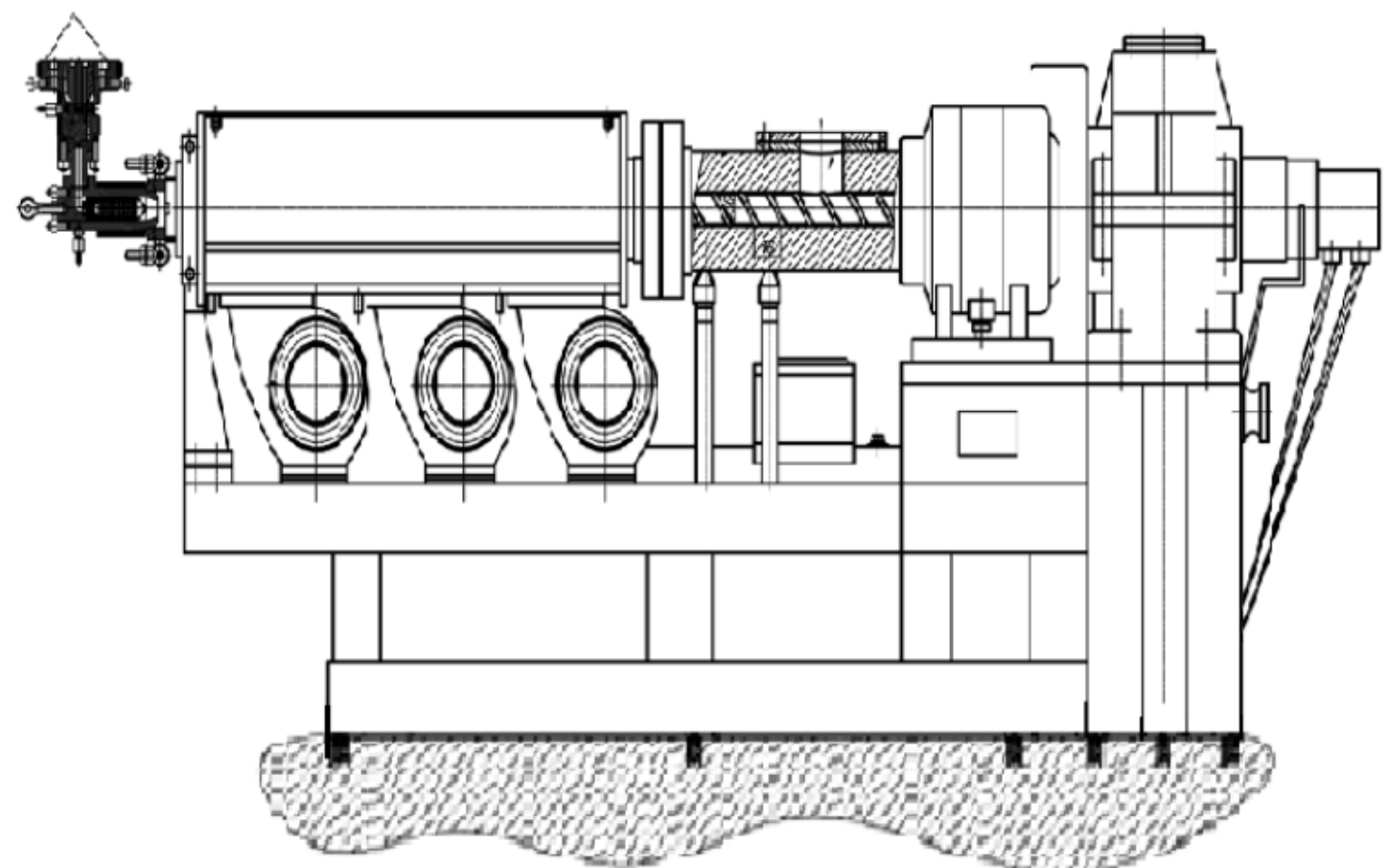
Розроб.																				
Перек.																				
Пробис.																				
Затверд.																				
Н. констр.																				

Карта ескізів

Номер операції

Монтаж головки екструдера

3



Дубл.																				
Вид.																				
Підп.																				

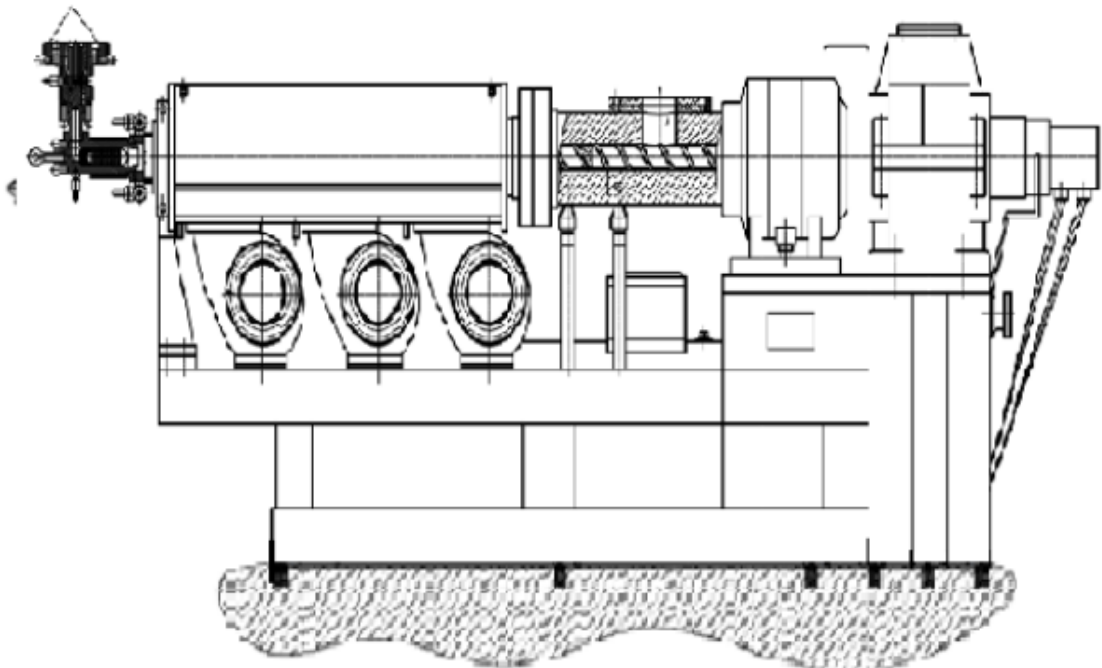
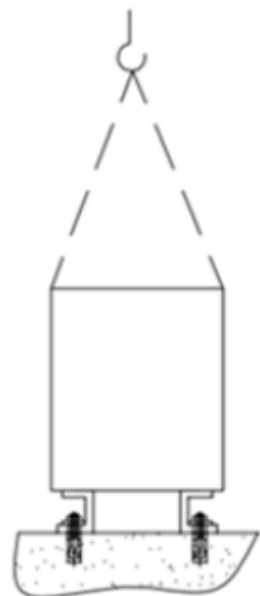
Розроб.																				
Перек.																				
Пройсис																				
Захверди																				
Н.контр.																				

Карта ескізів

Номер операції

Монтаж електричного шкафу

4



<u>Інв. №</u> <u>ПОДД.</u>		Підпис та дата		<u>Взам. інв. №</u>		<u>Інв. № дубл.</u>		Підпис та дата					
НТУУ "КПІ"				<i>Операційна карта слюсарних, Слюсарно-складальних та електромонтажних робіт</i>									
<u>Ном. цеху</u>		<u>Ном. діляк-ки</u>		<u>Ном. операції</u>		<i>Найменування операції</i>				<i>Обладнання (Найменування модель)</i>			
						Монтаж екструдера							
<u>Номер переходу</u>	<i>Зміст переходу</i>					<i>Технологічний режим, к-сть</i>		<i>Пристосування (код, найменування)</i>		<i>Інструмент (код, найменування)</i>		<i>То, хв</i>	
1	Застропити, підняти станину екструдера, встановити фундаментні болти у відповідні отвори станини, надіти шайби Нагвинтити гайки, станину опустити за місцем монтажу.					Фундаментний болт - 6 шт. Шайба - 6 шт. Гайка - 6 шт.		Електроталь Q = 5 т		Гайковий ключ S = 45		45	
2	Застропити, підняти черв'як екструдера, встановити на станину екструдера, Захріпити черв'як в корпусі до редуктора Нагвинтити гайки, опустити за місцем монтажу.					Болт М14 - 6 шт. Шайба - 6 шт. Гайка - 6 шт.		Електроталь Q = 5 т		Гайковий ключ S = 14		50	
										Розробив		Лист	
										Перевірив		1	
										Затвердив		Лист	
	<u>Ізм. м.</u>	<u>Лист</u>	<u>№ докум.</u>	<u>Підпис</u>	<u>Дата</u>	<u>Ізм.</u>	<u>Лист</u>	<u>№ докум.</u>	<u>Підпис</u>	<u>Дата</u>	<u>Н. контр.</u>	3	

Інв. № подл.		Підпис та дата		Взам. інв. №		Інв. № дубл.		Підпис та дата			
НТУУ "КПІ"				Операційна карта слюсарних Слюсарно-складальних та електромонтажних робіт							
Ном. цеху	Ном. лінійки	Ном. операції	Найменування операції					Обладнання (Найменування, модель)			
			Монтаж екструдера								
Номер переходу	Зміст переходу					Технологічний режим, к-сть		Пристосування (код, найменування)	Інструмент (код, найменування)	То, хв	
3	Застропити, підняти формуючу головку екструдера, встановити болти у відповідні отвори, надіти шайби					Болт М14 - 4 шт. Шайба - 4 шт.		Електроталь Q = 1,5 т	Гайковий ключ S = 14	30	
	Нагвинтити гайки, станину опустити за місцем монтажу.					Гайка - 4 шт.					
4	Застропити, підняти шкaf електроуправління, встановити фундаментні болти, надіти шайби, наживити гайки, шкaf встановити за місцем на фундамент					Фундаментний болт - 4 шт. Шайба - 4 шт. Гайка - 4 шт.		Електроталь Q = 1,5 т	Гайковий ключ S = 30	30	
								Розробив			Лист
								Перевірив			2
								Затвердив			Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Н. контр.	3

На рис. 6.1 подано схему змазування модернізованого корпусу екструдера, а в табл. 6.1 наведено перелік точок змазування із зазначенням типів мастильних матеріалів та періодичності їх застосування. [11]

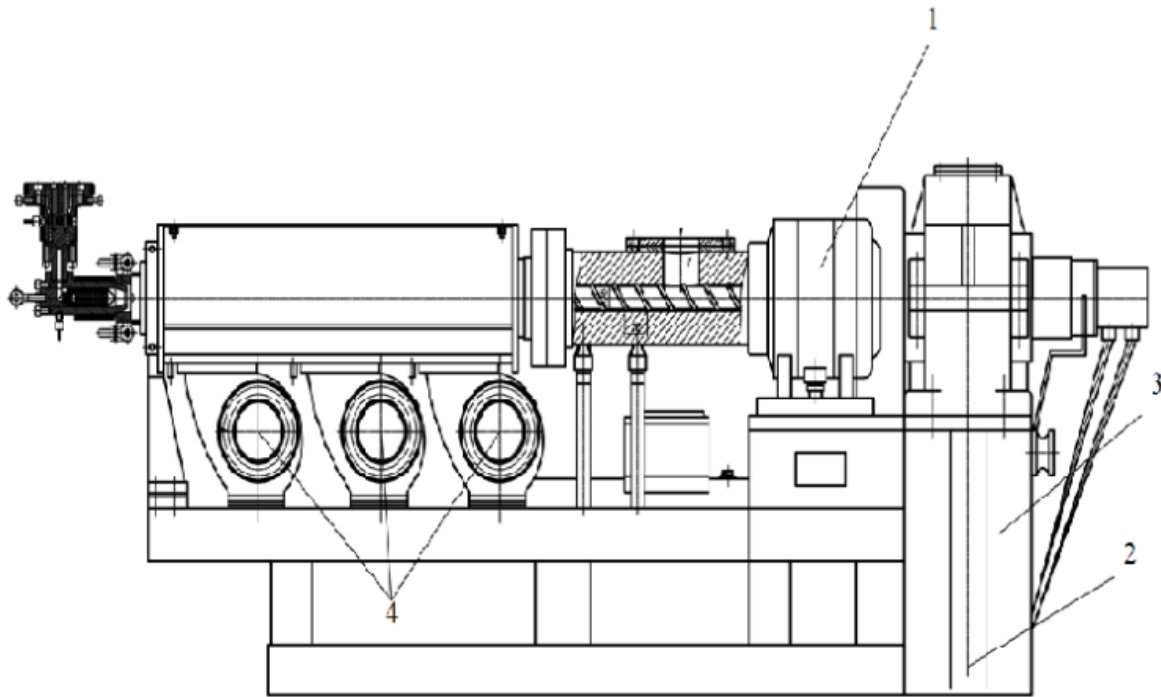


Рисунок 6.2 – Схема змащення:

1-вузол опірною підшипника, 2-підшипник електродвигуна, 3-редуктор, 4- підшипник електродвигуна вентилятора

Таблиця 6.1 – Таблиця змащення

№ позиції	Найменування і позначення змащувального вузла	Найменування змащувального матеріалу	Кількість точок змащування	Спосіб нанесення мастила	Періодичність
1	Вузол опірною підшипника	Мастило ТАП-15 ГОСТ 23652-79	3	До місць змащування мастило потрапляє по системі змащування від насосу	Зміну мастил проводити один раз на 6 місяців.
2	Підшипник електродвигуна	Згідно з інструкції заводу виробника			
3	Редуктор	Солідол М та мастило індустріальне 30 ГОСТ 20799-75	4	З'єднання змащуються за допомогою пресмастилок	Зміну мастил проводити один раз на 6 місяців.
4	Підшипник електродвигуна вентилятора	Згідно з інструкції заводу виробника			

6.2 Стартап-проект

6.2.1 Опис ідеї стартап-проекту

Ідея стартапу «UkrCAD» полягає у створенні українського аналогу спеціалізованого інженерного програмного забезпечення для роботи з 2D і 3D моделями, автоматичним створенням креслень та проведенням базового інженерного аналізу. Стартап спрямований на імпортозаміщення, підвищення технологічної незалежності країни та забезпечення інженерів, конструкторів і виробничих підприємств сучасним доступним САД-ПЗ.

Продукт передбачає: моделювання 2D/3D, створення параметричних моделей, автоматичну генерацію креслень, сумісність з форматами DWG/DXF/STEP/IGES, базовий САЕ-аналіз та можливість інтеграції з українськими стандартами креслення та виробництва. Програмне забезпечення орієнтоване на промисловість, освіту та інженерний сектор України.

Комерціалізація проекту зі створення українського аналогу спеціалізованого інженерного програмного забезпечення для 2D і 3D моделювання та створення креслень буде реалізована через поєднання кількох напрямів. Основним шляхом стане випуск ліцензійного програмного продукту у формі настільної версії та хмарної SaaS-платформи з підпискою, що забезпечить стабільний та прогнозований дохід. Додатково передбачається надання інженерних послуг — створення 3D та 2D моделей, проведення розрахунків, симуляцій і виконання конструкторських робіт для підприємств. Важливим елементом є впровадження навчальних курсів та сертифікацій для інженерів і студентів, що сприятиме поширенню продукту в освітньому середовищі. Проект також передбачає кастомізацію та інтеграцію ПЗ під потреби окремих компаній, а також партнерства з промисловими підприємствами та технічними університетами. Така модель дозволить не лише реалізувати продукт як масове програмне забезпечення, а й сформувати повноцінну інженерну екосистему з довгостроковими джерелами доходу.

Таблиця 6.2 – Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення українського CAD/CAE програмного забезпечення для 2D/3D моделювання та автоматичного створення креслень	Машинобудування; будівництво; освіта; аерокосмічна промисловість; приладобудування; підприємства оборонного комплексу	Доступність; локалізація; відповідність ДСТУ; повна підтримка української мови; відсутність залежності від іноземного ПЗ; нижча ціна; адаптація під місцеві стандарти

Отже, описана ідея стартап-проєкту демонструє значні перспективи у сфері розроблення інженерного програмного забезпечення, що охоплює широкий спектр галузей: машинобудування, авіаційна та оборонна промисловість, будівництво, промислова автоматизація та освітні інженерні програми. Створення українського аналогу спеціалізованого ПЗ для формування 2D та 3D моделей, а також автоматизованого генерування креслень забезпечує користувачам суттєві переваги, серед яких — підвищення точності проектування, оптимізація часу виконання інженерних задач, зниження вартості ліцензій та мінімізація залежності від іноземних розробників.

Додатковою перевагою є збереження високої якості проєктної документації, стійкість роботи програмного середовища та ефективність виконання розрахункових і конструкторських операцій. Логотип запропонованого стартап-проєкту наведено на рисунку 6.2.



Рисунок 6.2 – Логотип стартап-проєкту

Сучасний етап розвитку інженерії та цифрових технологій потребує впровадження інноваційних рішень, тому визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї стартап-проєкту є ключовим етапом для забезпечення його успішної реалізації. Для створення українського аналогу спеціалізованого інженерного програмного забезпечення, призначеного для побудови 2D та 3D моделей і формування креслень, особливо важливо провести комплексний аналіз техніко-економічних показників та рівня конкурентоспроможності.

У таблиці 6.3 наведено узагальнення виявлених сильних, слабких і нейтральних сторін проєкту, а також результати оцінювання його технічних, економічних та ринкових аспектів.

Таблиця 6.3 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проєкту

Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Мій проєкт UkrCAD	Конкурент 1 AutoCAD	Конкурент 2 SolidWorks	Конкурент 3 Fusion 360			
Швидкість рендерингу / генерації креслень	Висока	Висока	Дуже висока	Висока		+	
Точність побудови геометрії	99,8 %	99,5 %	99,7 %	99,4 %			+
Вартість ліцензії / підписки	2000 грн/рік	7000 грн/рік	9000 грн/рік	4500 грн/рік			+

Надійність роботи ПЗ	99,9 %	99,8 %	99,6 %	99,5 %			+
Системні вимоги	Середні	Високі	Дуже високі	Середні	+		

Отже, ідея проєкту має низку сильних сторін, які сприятимуть його успішному розвитку, зокрема — висока точність моделювання та інженерних розрахунків, а також надійність роботи програмного середовища. Ці характеристики забезпечать проєкту конкурентні переваги у вигляді якісніших, доступніших та більш адаптованих до потреб українського ринку інженерних рішень порівняно з іноземними аналогами.

Разом із тим слід врахувати і слабку сторону — значні початкові витрати на розроблення та впровадження програмного забезпечення, що можуть перевищувати витрати конкурентів.

Нейтральною стороною проєкту є швидкість опрацювання складних 2D і 3D моделей: хоча вона відповідає базовим ринковим стандартам, її покращення може стати додатковим фактором підвищення конкурентоспроможності у майбутньому.

6.2.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

Технологічна реалізація проєкту можлива завдяки сучасним мовам програмування, графічним рушіям та САД-ядрам, доступним на умовах open-source або комерційних ліцензій.

Таблиця 6.4 – Технологічні здійсненність ідеї проєкту

Ідея проєкту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність
Розробка українського CAD/CAE ПЗ	C++/Python; Qt; OpenCascade; Vulkan/OpenGL; алгоритми геометричного моделювання; хмарні технології зберігання моделей	Технології існують	Повністю доступні для використання

Обрана технологія: використання CAD-ядра OpenCascade та Qt-інтерфейсу.

6.2.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Дане дослідження охоплює аналіз ринкових перспектив для стартап-проєкту, спрямованого на розробку українського аналогу спеціалізованого інженерного програмного забезпечення, призначеного для побудови 2D-моделей на основі 3D-геометрії та формування креслень. У межах роботи розглядається конкурентне середовище на ринку CAD/CAM-рішень, поточні обсяги та динаміка розвитку сегмента, визначаються потенційні користувачі, їхні потреби та критерії вибору програмного забезпечення. Додатково проводиться глобальний огляд та регіональна оцінка тенденцій, включаючи нормативні аспекти, вимоги до ліцензування та можливості виходу на міжнародні ринки.

Отримані результати аналізу слугують основою для формування стратегії впровадження та ринкового позиціонування програмного продукту. На підставі зібраних даних буде здійснено попередній опис потенційного ринку для стартап-рішення (табл. 6.5).

Таблиця 6.5 – Попередня характеристика потернійного ринку стартап-проєкту

Показник	Характеристика
Кількість головних гравців	7 основних зарубіжних САD-систем
Обсяг ринку України	Орієнтовно 50–80 млн дол./рік
Динаміка ринку	Зростає через імпортозаміщення
Обмеження для входу	Висока вартість розробки, конкуренція міжнародних ПЗ
Необхідні стандарти	ДСТУ, ISO, ГОСТ у кресленні та конструюванні
Рентабельність галузі	60–75 %

Зважаючи на зростаючий попит на доступні та високопродуктивні САD-рішення, ринок для впровадження розробки є перспективним та конкурентоспроможним. Українське інженерне програмне забезпечення, здатне створювати 2D-моделі на основі 3D-геометрії та формувати технічні креслення, відповідає сучасним тенденціям цифровізації виробництва та потребам підприємств різних галузей. Такими факторами, як висока вартість іноземних САD-пакетів, зростання попиту на локальні програмні продукти, можливість адаптації функціоналу під стандарти України та спрощення інтеграції у виробничі процеси, визначається актуальність і привабливість виходу на ринок.

Сприятливі умови розвитку ІТ-сектору, необхідність імпортозаміщення та потенціал масштабування продукту створюють додаткові можливості для становлення молодого бізнесу в даному напрямі. Проведемо аналіз потенційних користувачів інженерного програмного забезпечення та визначимо їх ключові характеристики (табл. 6.6).

Таблиця 6.6 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

Потреби	Цільова аудиторія	Вимоги споживачів
2D/3D моделювання	Інженери, технічні ВНЗ, підприємства	Точність моделей, стабільність роботи
Автоматичні креслення	Конструкторські бюро	Відповідність ДСТУ, параметричність
САЕ-аналіз	Машинобудування, оборонка	Коректність обчислень, швидкість

Отже, цільова аудиторія стартап-проєкту є досить широкою та охоплює різноманітні галузі – машинобудування, приладобудування, будівництво, авіа- та суднобудування, проєктно-конструкторські бюро, навчальні заклади технічного профілю, а також виробничі підприємства, що мають потребу в швидкому створенні креслень та двовимірних моделей на основі тривимірних об'єктів. Формування ринкового запиту підтримується потребою підприємств у доступному, адаптивному та локалізованому програмному забезпеченні, здатному замінити дорогі іноземні САД-системи та оптимізувати інженерні процеси.

З огляду на активний розвиток цифрових технологій, індустрії 4.0 та зростання конкуренції на ринку інженерного ПЗ, важливо врахувати не лише наявні переваги продукту, але й потенційні ризики впровадження. Тому доцільно виділити можливі загрози для проєкту (табл. 6.7) та потенційні можливості розвитку (табл. 6.8), оскільки саме ці фактори можуть істотно вплинути на ефективність виходу продукту на ринок та його подальше масштабування.

Таблиця 6.7 – Фактори загроз

Фактор	Загроза	Реакція
Конкуренція	Поява нових САД	Постійне оновлення функцій
Економічні ризики	Зменшення фінансування	Гнучка модель підписок
Кібератаки	Загроза крадіжки коду	Посилена кібербезпека
Військовий стан	Перебої у роботі бізнесу, мобілізація працівників	Розподілена команда, автоматизація процесів
Енергетична криза	Відключення електроенергії, збої в роботі серверів	Резервні сервери, автономні робочі станції
Безпеківі ризики	Неможливість роботи команди офлайн, релокація	Хмарні сервіси, віддалений доступ
Можливості війни	Підвищений попит на українські технологічні рішення	Фокус на локалізований продукт, підтримка державних програм
Мобілізація	Втрата ключових спеціалістів	Підготовка дублерів, документування процесів

Отже, проведений аналіз дає змогу майбутній компанії-розробнику своєчасно та гнучко реагувати на потенційні ризики, зокрема появу нових конкурентів на ринку інженерного ПЗ, коливання економічної ситуації, швидку зміну технологічних стандартів та можливі кіберзагрози. Це забезпечує можливість постійного вдосконалення програмного продукту, розширення функціонального набору, підтримки користувачів та впровадження альтернативних сценаріїв розвитку, що створює надійне підґрунтя для стабільного просування українського ПЗ на ринку САД-рішень.

Таблиця 6.8 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Технологічний прогрес	Активний розвиток CAD/CAM-технологій, поява нових алгоритмів моделювання	Інвестування у дослідження, оновлення функціоналу, впровадження нових модулів
Зміни у стандартах та вимогах	Необхідність адаптації ПЗ до національних та міжнародних вимог креслення	Оновлення програмного ядра відповідно до стандартів ДСТУ та ISO
Зростання попиту на локальні програмні рішення	Збільшення інтересу до українських продуктів через імпортозаміщення та високу ціну іноземних аналогів	Масштабування продукту, розширення ліцензій, адаптація під різні виробничі задачі
Розвиток промисловості та цифровізації виробництва	Впровадження індустрії 4.0, автоматизація проєктування, швидкий перехід у 3D-виробництво	Інтеграція з PLM/ERP-системами, створення модулів автоматизації креслень
Зростання рівня технічної освіти та кадрів	Підвищення інтересу до інженерних спеціальностей, розвиток університетських лабораторій	Співпраця з закладами освіти, надання студентських ліцензій, навчальних матеріалів
Збільшення інвестицій у IT-розробки	Державні та приватні гранти, міжнародні програми підтримки технологічних рішень	Участь у грантових проєктах, співпраця з технопарками та венчурними фондами

Отже, визначені фактори можливостей для даного стартапу формують широкий потенціал розвитку та зміцнення конкурентних позицій компанії на

ринку інженерного програмного забезпечення. Вони передбачають необхідність постійного вдосконалення продукту, розширення його функціональності, впровадження інноваційних рішень, а також застосування ефективних маркетингових підходів для залучення нових користувачів у період зростання попиту на локальні CAD-системи.

Подальший ступеневий аналіз конкурентного середовища (табл. 6.9) дозволить визначити, яким чином різноманітність пропозицій на ринку може впливати на діяльність компанії, а також визначити ключові стратегії протидії конкурентному тиску та підвищення ринкової стійкості.

Таблиця 6.9 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції — монополістична	Наявність великої кількості іноземних САД-рішень, які конкурують між собою, пропонуючи різний функціонал	Активний маркетинг, формування впізнаваності бренду, просування локалізованих переваг та доступніших умов використання
За рівнем конкурентної боротьби — міжнародний/національний	Українському рішенню необхідно конкурувати як із локальними, так і світовими програмними продуктами (SolidWorks, AutoCAD, Fusion 360 тощо)	Необхідні інвестиції у масштабування функцій, забезпечення стабільності роботи, створення конкурентної цінової моделі, локальної підтримки

За галузевою ознакою — внутрішньогалузева	Конкуренція з іншими САD-системами, орієнтованими на машинобудування, приладобудування, виробництво, конструкторські бюро	Постійне оновлення інструментів моделювання, впровадження нових алгоритмів автоматичного створення креслень
Конкуренція за видами продуктів — функціональна	Ринок розділяється на рішення широкого та вузького призначення — від універсальних до спеціалізованих САD-пакетів	Розвиток модульності, розширення можливостей експорту/імпорту файлів, підвищення швидкості обробки моделей
За характером конкурентних переваг — інноваційна	Успішні рішення залежать від швидкості впровадження нових функцій, автоматизації креслень та точності побудови 2D з 3D	Підтримання високого стандарту точності, інтеграція ШІ-функцій, регулярні оновлення системи та користувацький фідбек
За інтенсивністю — марочна (брендова)	Користувачі часто обирають відомі міжнародні продукти за інерцією, через сформовану довіру до бренду	Формування унікальної ринкової ідентичності, створення спільноти користувачів, впровадження програм навчання та лояльності

Отже, ступеневий аналіз конкурентного середовища на ринку САD-систем дозволяє визначити ключові параметри формування конкуренції: тип ринку, рівень суперництва серед компаній, галузеву специфіку, функціональну відмінність продуктів, характер технологічних переваг та ступінь брендового

домінування. Це підкреслює важливість створення унікального функціоналу програмного забезпечення, активного маркетингового просування, формування партнерських зв'язків з виробничими та освітніми структурами, а також розвитку впізнаваного бренду, що забезпечить стабільну ринкову позицію й конкурентоспроможність українського продукту.

Для поглибленої оцінки впливу середовища конкуренції доцільно провести більш детальний аналіз ринкових умов (табл. 6.10). Аналіз за моделлю М. Портера дозволить комплексно відобразити силу конкурентного тиску, визначити критичні фактори впливу та оцінити перспективи для ефективного розвитку інженерного програмного забезпечення на українському ринку.

Таблиця 6.10 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари замітники
Характеристика	Іноземні САД-системи (AutoCAD, SolidWorks, Fusion 360, Компас 3D) та локальні програмні рішення	Нові стартапи або ІТ-компанії, здатні створити подібне ПЗ	Постачальники серверних ресурсів, хмарних сервісів, інструментів розробки	Підприємства промислової, КБ, проєктні організації, університети, фріланс-інженери	Онлайн-сервіси моделювання, open-source аналоги, ручне креслення
Висновки	Конкурентний тиск високий через	Існує ризик появи нових	Вплив помірний: важливі ціни на хмарні	Вимоги клієнтів визначають потребу у	Замінники можуть обмежити попит, тому

	присутність відомих міжнародних брендів	рішень, але бар'єр входу — складність і висока вартість розробки	технології, ліцензійне ПЗ, технічні інструменти	високій точності, швидкодії та зручності	необхідно забезпечити цінову та функціональну перевагу
--	---	--	---	--	--

Отже, аналіз конкуренції за моделлю М. Портера щодо створення українського спеціалізованого інженерного ПЗ показує, що рівень конкурентної боротьби на ринку є досить високим через наявність потужних міжнародних розробників. Потенційними конкурентами можуть виступати нові ІТ-команди або технічні компанії, здатні швидко адаптуватися до потреб користувачів. Вплив постачальників є помірним і в основному визначається вартістю серверних рішень та інструментів для розробки, натомість клієнти мають значний вплив на кінцевий функціонал продукту, що підвищує вимоги до якості, швидкодії та інтерфейсної зручності. Проєкт передбачає можливість надання широкого спектра послуг: від ліцензійного використання до технічної підтримки, навчання та кастомізації програмного забезпечення.

Спираючись на результати аналізу конкуренції, проведеного в таблиці 6.10, а також з урахуванням концепції проєкту (табл. 6.3), вимог користувачів до програмного продукту (табл. 6.6) та ключових факторів впливу ринкового середовища (табл. 6.7 та 6.8), можемо сформулювати та обґрунтувати перелік основних факторів конкурентоспроможності стартапу (табл. 6.11).

Таблиця 6.11 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Технологічна інноваційність	Клієнти обирають постачальника, який пропонує сучасні алгоритми 3D-моделювання, точні параметричні інструменти та швидку генерацію креслень. Важливими є сумісність з поширеними форматами файлів, можливість інтеграції з САЕ-модулями та наявність АРІ для розширення функціоналу. Чим новіше та продуктивніше технологічне ядро ПЗ, тим більше воно скорочує час розробки і зменшує затрати замовника.
2	Екологічність	Підприємства надають перевагу постачальнику, який дозволяє зменшити залежність від іноземних серверів і підтримує локальне зберігання даних, що скорочує вуглецевий слід та енергоспоживання. Важливо й те, що екологічні цифрові рішення часто використовують оптимізовані алгоритми, які потребують менше ресурсів та зменшують операційні витрати.
3	Цифрова незалежність	Клієнти обирають постачальника, який гарантує стабільний доступ до продукту незалежно від геополітичних або військових ризиків. Важливу роль відіграє відсутність ризику блокування ліцензій, санкцій чи вимушеної прив'язки до закордонних хмарних сервісів. Перевагу отримує ПЗ, яке забезпечує повний контроль над даними та безперервність роботи навіть у критичних умовах.

4	Продуктивність ПЗ	Замовники обирають постачальника, якщо його ПЗ працює швидко, стабільно та здатне ефективно обробляти складні 3D-моделі без зависань. Висока продуктивність скорочує час інженерних робіт, підвищує якість креслень і дозволяє підприємству зменшити витрати на розробку та впровадження продуктів.
5	Енергоефективність	Підприємства обирають постачальника, чий софт працює швидко і не потребує надпотужного обладнання. Енергоефективні рішення зменшують витрати на електроенергію, дозволяють використовувати ПЗ навіть під час енергетичних коливань і подовжують ресурс комп'ютерної техніки. Для бізнесу це зниження операційних витрат та менша залежність від стану енергомережі.
6	Гнучкість у застосуванні	Клієнти обирають ПЗ, яке можна адаптувати під різні сфери: машинобудування, архітектуру, дизайн, виробництво та наукові дослідження. Важливими є можливість налаштування інтерфейсу, робота з різними робочими процесами (workflow), сумісність з іншим ПЗ та підтримка плагінів. Гнучке рішення зменшує потребу в додаткових програмах і дозволяє використовувати продукт у широкому спектрі задач.
7	Локалізація	Клієнти віддають перевагу постачальнику, який забезпечує повну локалізацію українською мовою, адаптує інтерфейс, технічну

		документацію та довідкові матеріали. Це важливо для підприємств, де працюють великі команди інженерів і потрібна уніфікована термінологія. Локалізований продукт також зменшує кількість помилок і прискорює навчання персоналу.
8	Користувацька підтримка	Замовники обирають постачальника, який забезпечує швидку та якісну підтримку: консультації українською мовою, розширену документацію, відеоуроки, регулярні оновлення та можливість зворотного зв'язку. Надійна підтримка зменшує прості та мінімізує ризики помилок у роботі інженерів, що напряму впливає на продуктивність підприємства.
9	Цінова конкурентоспроможність	Підприємства обирають продукт, який має оптимальну вартість ліцензії й підписки, доступні тарифи для малого та середнього бізнесу та прозору цінову політику без прихованих платежів. Для багатьох компаній (особливо у воєнний час) низький поріг входу та справедлива ціна є визначальними факторами при виборі CAD-системи.

Отже, проведений аналіз щодо стартап-проєкту зі створення українського аналога спеціалізованого інженерного програмного забезпечення для побудови 2D-креслень на основі 3D-моделей свідчить про його високий потенціал конкурентоспроможності, що підтверджується факторами, визначеними в таблиці 6.11. Зокрема, особливу роль відіграють такі переваги, як орієнтація на потреби вітчизняного ринку, нижча вартість у порівнянні з іноземними CAD-системами, можливість глибокої локалізації та технічної підтримки українською мовою, а також масштабність і подальша інтеграція з іншими інженерними платформами.

З метою комплексної оцінки ефективності та перспектив розвитку програмного продукту доцільно провести SWOT-аналіз, що дозволить більш детально визначити внутрішні переваги та обмеження проєкту, а також зовнішні можливості та загрози в межах конкурентного середовища. Результати аналізу подані у таблиці 6.12.

Таблиця 6.12 – Порівняльний аналіз сильних та слабих сторін проєкту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Технологічна інноваційність	4		β	α				μ
2	Екологічність	3		α	β				μ
3	Цифрова незалежність	4		β		α			μ
4	Продуктивність ПЗ	4		α	β				μ
5	Енергоефективність	3		β	α				μ
6	Гнучкість у застосуванні	2		α		β			μ
7	Локалізація	3			β				μ
8	Користувацька підтримка	5		α	β				μ
9	Цінова конкурентоспроможність	5		α	β				μ

α – перший конкурент (**AutoCAD / Fusion 360**)

β – другий конкурент (**SolidWorks**)

μ – третій конкурент (**Компас-3D**)

Отже, ключовими сильними сторонами стартап-проєкту зі створення українського аналога спеціалізованого інженерного ПЗ для формування 2D-креслень на основі 3D-моделей порівняно з наявними іноземними продуктами є: локалізованість інтерфейсу та технічної підтримки, глибоке розуміння потреб вітчизняних інженерних підприємств, доступна цінова політика, а також можливість адаптації й масштабування під конкретні виробничі завдання. Це створює базу для формування конкурентної переваги на українському ринку

інженерного софту.

Водночас до слабких сторін проєкту можна віднести необхідність значних інвестицій у розробку та оновлення алгоритмів, тривалий період тестування, а також складність швидкої конкуренції з уже відомими міжнародними CAD-системами.

Завершальним етапом ринкового аналізу є виконання SWOT-аналізу, що дає можливість комплексно оцінити потенціал розвитку програмного продукту та визначити стратегічні напрями просування на ринок (табл. 6.13).

Таблиця 6.13 – SWOT – аналіз

СИЛЬНІ СТОРОНИ	СЛАБКІ СТОРОНИ
<ol style="list-style-type: none">1. Повна локалізація та відповідність ДСТУ.2. Доступніша вартість порівняно з іноземними CAD-продуктами.3. Незалежність від іноземних серверів і політики компаній.4. Висока швидкодія на середніх комп'ютерах (оптимізоване ядро).5. Можливість інтеграції з українськими виробничими та освітніми системами.6. Сильна підтримка користувачів в Україні (оперативні оновлення, сервіс).7. Модульність і гнучкість — можливість масштабування функціоналу.	<ol style="list-style-type: none">1. Низька впізнаваність продукту на ринку на старті.2. Обмежений функціонал порівняно з багаторічними гігантами (SolidWorks, AutoCAD).3. Недостатній обсяг готових бібліотек компонентів (на початкових етапах).4. Потреба у значних інвестиціях у розробку та тестування.

МОЖЛИВОСТІ	ПРОБЛЕМИ
<ol style="list-style-type: none"> 1. Підвищення попиту на українське технологічне ПЗ. 2. Активна цифровізація промисловості та освіти. 3. Можливість державної підтримки та грантів на імпортозаміщення. 4. Вихід на ринки Східної Європи та країн, що шукають дешевших аналогів CAD. 5. Інтеграція з САМ/САЕ системами — формування повного виробничого циклу. 6. Розширення екосистеми за рахунок API та плагінів від сторонніх розробників. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сильна конкуренція з боку міжнародних гігантів (Dassault, Autodesk). 2. Економічні ризики (коливання ринку, зниження інвестицій). 3. Кіберзагрози та атаки на українські IT-структури. 4. Військова загроза і нестабільність бізнес-середовища. 5. Можливі міграційні втрати IT-фахівців. 6. Технологічні зміни, що потребують постійних оновлень та адаптації.

Отже, проведений SWOT-аналіз для проекту зі створення українського аналога спеціалізованого інженерного програмного забезпечення для генерації 2D-креслень з 3D-моделей свідчить про домінування сильних сторін продукту над потенційними недоліками. Отримані результати підтверджують перспективність розробки та її конкурентний потенціал на внутрішньому ринку, зокрема завдяки можливості локалізації, адаптації та нижчій вартості порівняно з іноземними аналогами.

Подальшим кроком реалізації стратегії виходу програмного продукту на ринок є формування можливих сценаріїв його впровадження та просування. З цією метою доцільно розробити альтернативи ринкової реалізації стартап-проекту, що відображено у таблиці 6.14.

Таблиця 6.14 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

Альтернатива	Ймовірність отримання ресурсу	Строки реалізації
Залучення державних та міжнародних грантів на розробку українського інженерного ПЗ	Висока	від 6 до 14 міс.
Створення партнерств з українськими виробничими підприємствами та університетами (спільні розробки, тестування ПЗ)	Середня	від 5 до 12 міс.
Вихід на ринок через модель раннього доступу (Early Access) для збору інвестицій та зворотного зв'язку	Середня	від 4 до 9 міс.
Співпраця з приватними ІТ-компаніями та розробниками для створення плагінів і модулів (розширення екосистеми)	Висока	від 3 до 10 міс.

Отже, оптимальним стратегічним рішенням для реалізації проєкту створення українського аналогу спеціалізованого інженерного програмного забезпечення для формування 2D креслень із 3D моделей є пошук інвестицій та фінансової підтримки. Такий підхід забезпечує можливість масштабування розробки, впровадження сучасних алгоритмів моделювання та швидкого входу на ринок САD-систем. Отримані ресурси дозволять сформувати команду фахівців, прискорити розробку програмного ядра, протестувати продукт у реальних інженерних процесах і підвищити його конкурентоспроможність серед міжнародних аналогів.

6.2.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

Важливим етапом у розробці українського аналогу спеціалізованого інженерного ПЗ для створення 2D-креслень на основі 3D-моделей є аналіз цільової аудиторії потенційних користувачів. Оцінюючи потреби, професійну специфіку та рівень технічної підготовки різних груп користувачів, можна точніше визначити, які функціональні можливості, інтерфейсні рішення та інструменти є ключовими для кожного сегмента. Такий підхід дозволяє зорієнтувати розробку на реальні запити ринку та забезпечити високу практичність і конкурентоспроможність майбутнього програмного продукту.

Таблиця 6.15 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит у межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Проектні та інжинірингові компанії	Висока	Висока	Висока	Середня
Архітектурні бюро та дизайн-студії	Висока	Висока	Висока	Висока
Промислові та виробничі підприємства (машинобудування, металоконструкції)	Висока	Висока	Висока	Середня
Освітні заклади (технічні університети, коледжі)	Середня	Висока	Середня	Висока
Фрілансери-інженери, приватні конструктори	Висока	Середня	Середня	Висока

Державні та муніципальні установи (служби інфраструктури, ЖКГ)	Середня	Середня	Низька	Середня
--	---------	---------	--------	---------

Цільові групи користувачів, такі як машинобудівні та конструкторські бюро, підприємства промислового виробництва, проєктні організації та освітні установи технічного спрямування, демонструють високий рівень зацікавленості у впровадженні спеціалізованого українського програмного забезпечення для створення 2D-креслень на основі 3D-моделей. Попит на інструменти автоматизованого проєктування та локалізовані інженерні рішення у цих сегментах є стабільним та потенційно зростаючим.

Водночас, для ефективного масштабування проєкту доцільно посилити маркетингову стратегію, спрямовану на формування довіри до вітчизняного продукту, активізувати роботу над конкурентними перевагами та розширити канали продажів.

Спираючись на результати таблиці 6.15, сформуємо базові стратегії розвитку та взаємодії з ключовими ринковими сегментами (табл. 6.16).

Таблиця 6.16 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Створення та виведення на ринок українського аналогу CAD-системи для 2D/3D моделювання	Залучення інвестицій та активна маркетингова підтримка для швидкого входу на ринок	Локалізація, сумісність з популярними форматами (DWG, STEP), інноваційні функції, низька кінцева вартість	Стратегія диференціації

Обрана стратегія диференціації уможливило виокремлення стартап-проєкту на ринку за рахунок унікальних функціональних можливостей, глибокої технічної оптимізації та національної розробки програмного забезпечення. Було прийнято рішення активно розширювати функціонал продукту та просувати можливості спільного розвитку через партнерство з інженерними компаніями, освітніми установами та виробниками CAD-середовищ.

Додатковим підтвердженням якості можуть стати міжнародні сертифікації та інтеграція з популярними інструментами 3D-моделювання, що забезпечить конкурентну перевагу і знизить поріг переходу користувачів на українське програмне забезпечення.

Реалізація такого напрямку сприятиме підвищенню довіри до продукту, розширенню частки ринку та формуванню стійкої позиції серед світових CAD-рішень.

Сформуємо стратегію конкурентної поведінки (табл. 6.17).

Таблиця 6.17 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Компанія буде шукати нових користувачів та частково переманювати клієнтів у конкурентів (AutoCAD, SolidWorks, BricsCAD).	Так, частково — сумісність із файлами DWG/STEP, базові інструменти 2D/3D моделювання, підтримка креслень за стандартами.	Стратегія наслідування лідерів CAD-ринку

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки для стартапу, що розробляє український аналог спеціалізованого програмного забезпечення для створення 2D-моделей з 3D-об'єктів, передбачає наступне: проєкт не є першим у даній галузі, однак орієнтується на активне розширення аудиторії за рахунок залучення нових користувачів. Компанія планує адаптувати та вдосконалювати перевірені стратегії основних конкурентів, наслідуючи ринкових лідерів та частково відтворюючи ключовий функціонал популярних САД-платформ — таких як конвертація 3D-моделей у 2D-креслення, параметричне редагування та автоматична генерація технічної документації.

Враховуючи вимоги користувачів до програмного забезпечення (табл. 6.6) та обрані варіанти розвитку і конкурентної поведінки (табл. 6.16, табл. 6.17), можемо визначити стратегію позиціонування на ринку та відобразити її у таблиці 6.18. [12]

Таблиця 6.18 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до продукту цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію проєкту
Надійність роботи ПЗ, точність моделювання, сумісність з популярними форматами, доступна ціна	Стратегії диференціації та наслідування провідним САД-системам	Повна локалізація українською, підтримка DWG/STEP, висока швидкість роботи, зручний інтерфейс	Технологічність Доступність Професійність

Стратегія диференціації дає змогу виділити українське інженерне програмне забезпечення на ринку завдяки поєднанню унікальних функціональних можливостей, локалізації та орієнтації на специфічні потреби вітчизняних

користувачів. Розробка продукту враховує вимоги інженерів, конструкторів та проєктувальників, які потребують доступного, надійного та сумісного з міжнародними форматами інструменту для створення 2D і 3D моделей. Обрана стратегічна асоціація з технологічністю, професійністю та доступністю формує позитивний імідж нового CAD-рішення та зміцнює довіру потенційних споживачів.

Такі дії сприяють вибудові впізнаваного та конкурентоспроможного образу стартапу на ринку інженерних програмних продуктів.

6.2.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Першочергово необхідно сформувати маркетингову концепцію програмного продукту для цільової аудиторії. Для цього слід визначити основні переваги розроблюваного інженерного ПЗ, які забезпечать його привабливість та конкурентоспроможність на ринку. Ключові переваги програмного продукту наведено у табл. 6.19.

Таблиця 6.19 – Визначення ключових переваг товару

Потреба	Вигода, яку пропонує продукт	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Точність моделювання та надійність роботи ПЗ	Стабільне функціонування, мінімум помилок, коректне відтворення 2D/3D геометрії	Оптимізація продуктивності, швидка техпідтримка українською, відповідність стандартам ДСТУ
Зручність та швидкість створення моделей і креслень	Інтуїтивний інтерфейс, доступ до бібліотек стандартних компонентів, прискорення проєктування	Повна локалізація, адаптовані шаблони креслень, можливість кастомізації під потреби користувача

Ці переваги формують основу для конкурентного позиціонування українського інженерного програмного забезпечення на ринку, підвищують його привабливість для професійних користувачів та роблять продукт вирізняльним серед інших CAD-рішень. Завдяки поєднанню функціональності, локалізації та доступності створюється унікальна цінність, що забезпечує проєкту стійку конкурентну перевагу.

Також доречною є розробка трирівневої маркетингової моделі програмного продукту (таблиця 6.20).

Таблиця 6.20 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
<p>I. Товар за задумом</p>	<p>Основна потреба споживача — отримання швидкого та високоточого інженерного інструменту для автоматичної генерації 2D креслень з 3D моделей.</p> <p>Перевага: український софт є аналогом імпортних CAD-рішень із нижчою вартістю та адаптованістю до державних стандартів. До функціональних переваг відносимо: швидкість обробки, сумісність з популярними форматами 3D моделей, відповідність ДСТУ, підтримка користувачів українською мовою. </p>		
<p>II. Товар у реальному виконанні</p>	<p>Властивості/характеристики</p>	<p>М/Нм</p>	<p>Вр/Тх/Тл/Е/Ор</p>
	<p>1. Точність перетворення 3D → 2D</p>	<p>висока (±0.1 мм)</p>	<p>Тл</p>
	<p>2. Швидкість обчислення і генерації креслень</p>	<p>висока</p>	<p>Вр</p>
	<p>3. Підтримка основних CAD-форматів (STEP, STL, DWG, IGES)</p>	<p>>10 форматів</p>	<p>Е</p>
	<p>4. Інтерфейс українською / англійською</p>	<p>2 мови</p>	<p>-</p>
	<p>5. Автоматизація створення розгорток, розмірних ліній та</p>	<p>+</p>	<p>Тх</p>

	технічних позначень		
	6. Інтеграція з САМ / PLM системами	за потребою	Op
	Якість: відповідність державним стандартам креслення (ДСТУ), стрес-тестування, оптимізація ядра розрахунків.		
	Документація: розроблені керівництва користувача, навчальні кейси, бібліотека шаблонів.		
	Марка: назва ПЗ «UkrCAD Render», логотип, унікальний UI-дизайн, інформація про версію та технічні можливості.		
III. Товар із підкріпленням	До запуску продукту: навчальні відео, технічний мануал, консультації щодо інтеграції в робочі процеси підприємств, тестовий період (demo).		
	Після впровадження: технічна підтримка 24/7, оновлення ядра рендерингу, виправлення багів, зворотний зв'язок зі спільнотою, регулярні оновлення модулів.		
Продукт захищений від копіювання та дублювання конкурентами шляхом поєднання реєстрації авторських прав, унікального алгоритму генерації креслень, системи ліцензування, інтеграції з держстандартами та стратегії диференціації.			

Отже, три рівні моделі програмного продукту формують цілісне рішення, яке важко відтворити конкурентам та повністю відповідає очікуванням інженерів і проєктувальників. Поєднання базової функціональності, розширених можливостей та додаткових сервісів створює унікальну цінність і підсилює позицію українського САД-рішення на ринку.

Наступним етапом є визначення цінових меж програмного забезпечення (табл. 6.21). [13]

Таблиця 6.21 – Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники (іноземні CAD-системи)	Рівень цін на товари-аналоги (доступні CAD-рішення)	Рівень доходів цільової групи користувачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на продукт
25 000 – 60 000 грн/рік (AutoCAD, SolidWorks у базових пакетах)	8 000 – 20 000 грн/рік (BricsCAD, NanoCAD, DraftSight)	Середній – високий (інженери, проєктувальники, підприємства)	Верхня: 20 000 грн/рік Нижня: 10 000 грн/рік

Отже, можна стверджувати, що цей етап є ключовим у формуванні стратегії ціноутворення для українського інженерного програмного забезпечення. Він дає змогу забезпечити конкурентну перевагу за рахунок оптимального співвідношення вартості та функціональності продукту, що робить його привабливим для цільових користувачів.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи продажів, на основі якої ухвалюється відповідне управлінське рішення (табл. 6.22).

Таблиця 6.22 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Потреба у доступній та якісній інженерній САПР-системі	Надання демоверсії, техпідтримки, аргументації переваг ПЗ	Нульовий рівень	Власна (онлайн-платформа)

Таблиця 6.22 слугує базою для формування результативної системи продажів, що враховує особливості цільових сегментів та специфіку ринку інженерного ПЗ. На її основі визначаються ключові канали взаємодії з користувачами, моделі монетизації та способи підвищення доступності українського аналогу спеціалізованого програмного забезпечення для створення 2D і 3D моделей та їх креслень. Такий підхід забезпечує оптимальне поєднання цінності продукту й економічної ефективності для стартапу.

Завершальним етапом є формування концепції маркетингової комунікації, яка має спиратися на обрану стратегію позиціонування та враховувати поведінкові особливості професійних користувачів інженерних інструментів. Це дозволяє розробити точні, релевантні та послідовні повідомлення для просування програмного продукту на ринку та визначити їх реалізацію відповідно до структури, наведеної у таблиці 6.23.

Таблиця 6.23 – Концепція маркетингових комунікацій

Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Онлайн-платформи, професійні інженерні спільноти, вебінари, технічні конференції	Інноваційність, точність, доступність, незалежність від іноземних розробників	Показати переваги використання українського інженерного ПЗ та його конкурентоспроможність	Українське високотехнологічне рішення, створене на основі сучасних інженерних підходів

Отже, відомості щодо концепції маркетингової комунікації становлять один із визначальних чинників, що забезпечують успішний розвиток стартапу.

6.3 Охорона праці

Тема дипломного проекту: Лінія для виробництва рукавної плівки з модернізацією корпусу екструдера.

Оператор технологічної лінії здійснює її налаштування та контролює перебіг процесу. Пульт управління встановлений у виробничому приміщенні на відстані близько 3 метрів від завантажувального пристрою. Площа цеху становить 800 м², а його об'єм — 4800 м³.

Щоб гарантувати безпечні умови праці та оптимальне середовище під час виготовлення трубної продукції, необхідно реалізувати комплекс заходів, спрямованих на виявлення й усунення небезпечних та шкідливих впливів. Усе обладнання, що проектується, має відповідати нормам техніки безпеки та вимогам виробничої санітарії. Новий зразок машини допускається до серійного виготовлення лише після підтвердження його відповідності чинним стандартам з охорони праці. [14]

До основних потенційно небезпечних і шкідливих факторів, що можуть виникати під час виробництва труб, належать:

- виробничий шум
- повітря робочої зони
- пожежна безпека
- електробезпека

6.3.1 Виробничий шум

Основними джерелами шуму під час роботи обладнання є система охолодження, редуктор та вентиляційні установки. Рівень звукового тиску, а також шумові характеристики в октавних смугах частот на постійному робочому місці при роботі лінії повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.037-99. Під час вимірювання шуму обладнання було зафіксовано значення $L_{вдж} = 100$ дБА.

Для зниження шумового навантаження необхідно застосовувати засоби звукоізоляції та шумозахисту. У межах проєкту передбачено змащування всіх поверхонь тертя, використання амортизуючих прокладок та встановлення захисних кожухів. Реалізація цих заходів дозволить зменшити шум до рівня приблизно 70 дБА.

Джерелами вібраційних впливів є електродвигун та інші елементи лінії, що обертаються. Вібрація виникає у разі неточного монтажу або недостатньо жорсткого кріплення обертових вузлів до фундаменту. За таких умов формується технологічна вібрація, яка передається через конструктивні елементи установки. Оператор відчуває її мінімально, оскільки його робоче місце розташоване на значній відстані від основної частини агрегату, біля пульта керування. Таким чином, звичайні вібрації не чинять негативного впливу на його організм. Рівень технологічної вібрації у цеху не перевищує 90 дБ за частоти 4 Гц.

6.3.2 Повітря робочої зони

Діяльність оператора на мобільній установці належить до категорії робіт із підвищеним фізичним навантаженням, оскільки виконання завдань відбувається в умовах шуму, запиленості та роботи у дві зміни. За таких умов енергетичні витрати організму можуть досягати 290–350 Дж/с (250–300 ккал/год). Тому для працівників передбачено можливість періодичного відпочинку у спеціально обладнаному приміщенні. Цей тип діяльності класифікується як легка робота категорії Іб.

Оптимальні та фактичні параметри мікроклімату — температура, відносна вологість і швидкість руху повітря у робочій зоні для зазначеної категорії робіт визначаються згідно з таблицею 1 ДСН 3.3.6.042-99.

Таблиця 6.3.1 - Оптимальні та фактичні параметри

Пора року	Категорія робіт					
	Відносна вологість, %		Температура, °С		Швидкість руху повітря, м/с	
	Фактична	Оптимал ьна	Фактична	Оптимал ьна	Фактична	Оптимал ьна
Теплий період року	40-60	Не більше 75	22-25	20-25	0,2	Не більше 0,2
Холодний період року	40-60	Не більше 75	20-23	20-25	0,2	Не більше 0,2

Необхідні параметри мікроклімату в холодний період року забезпечуються за рахунок роботи водяної системи опалення з температурою теплоносія 70–90 °С, а в літній період — за допомогою вентиляційних систем.

У процесі роботи лінії можливе виділення токсичних речовин, зокрема газів та пилу, що потрапляють у повітря через відкриті технологічні ємності або під час витоків із обладнання, зокрема в зоні завантажувального бункера. Для своєчасного та ефективного видалення цих шкідливих домішок організовується локальна витяжна вентиляція, а також загальнообмінна вентиляція цеху відповідно до вимог ДБН В.2.5-67:2013.

Залежно від технологічних потреб при виробництві полімерних труб, окрім полімерної сировини, можуть застосовуватися барвники та інші допоміжні матеріали. Ефективність роботи витяжної системи забезпечується тоді, коли обсяг припливного повітря є меншим за об'єм повітря, що відсмоктується. Для організації вентиляції використовується витяжний зонт.

Приймаємо осьовий вентилятор МЦ-4 з продуктивністю $J_B = 1200 \text{ м}^3/\text{г}$, розвинутим повним тиском $H_B = 65 \text{ Па}$, кількістю обертів колеса $n = 930 \text{ об/хв}$, і ККД $\eta = 0,42$. Підбираємо електродвигун для вентилятора. Необхідна потужність на валу електродвигуна визначається за формулою:

$$N = \frac{1200 \times 65}{3600 \times 102 \times 0,42 \times 0,7} = 0,72 \text{ кВт}$$

Потужність електродвигуна (N_d) розраховується з урахуванням коефіцієнта запасу 1,5. Прийнято електродвигун потужністю 1,1 кВт із кількістю обертів 930 об/хв. Для видалення шкідливих речовин над завантажувальним бункером і екструзійною голівкою встановлюються витяжки. Вони забезпечують простір між джерелом і приймачем, захищений від навколишнього середовища.

6.3.3 Пожежна небезпека

У виробничому цеху, де здійснюється випуск рукавної плівки, можливе виникнення ряду пожежонебезпечних ситуацій: загоряння забруднених мастилом ганчірок, машинної оливи, пошкодженої електропроводки чи електрообладнання. Крім того, сам поліпропілен як сировина може стати джерелом займання, якщо температура перевищує допустимі межі. Зокрема, при нагріванні понад $120 \text{ }^\circ\text{C}$ можуть виділятися та займатися формальдегід, ацетальдегід, ацетон, метанол, кетоніві сполуки, а також оксид і діоксид вуглецю. При підвищенні температури вище $150 \text{ }^\circ\text{C}$ небезпечними стають кислоти, ефіри, альдегіди та різні перекиси.

Враховуючи наведені фактори, приміщення виробничої лінії належить до категорії «В» згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016 та класифікується як зона П-Іа відповідно до ПУЕ. Ступінь вогнестійкості будівлі відповідає ІІІ класу за ДБН В.1.1-7:2016. У технологічному процесі застосовуються рідини з температурою спалаху понад $61 \text{ }^\circ\text{C}$, а також горючий пил та волокнисті матеріали з нижньою межею займання більше 65 мг/м^3 . Використовуються тверді горючі матеріали, здатні займатися лише при взаємодії з повітрям, водою або між собою, але не утворюють вибухонебезпечних сумішей.

Ймовірними джерелами пожежі є короткі замикання, перенавантаження електромережі, надмірні перехідні опори, несправність обладнання, а також іскроутворення під час зварювальних робіт. Система запобігання загорянню базується на використанні негорючих матеріалів та впровадженні організаційних заходів безпеки. Для ліквідації загорянь передбачено застосування порошкових вогнегасників САМ-9 (89 одиниць), а для гасіння електроустановок під напругою — порошкових вогнегасників ОП-10 (14 одиниць). [15]

На кожному балоні обов'язково повинні бути нанесені: товарний знак виробника, серійний номер, дати виготовлення та наступної перевірки, тип термообробки, робочий і пробний тиск, місткість, маса та клеймо ОТК. У разі виникнення пожежі спрацьовує система пожежної сигналізації з тепловими сповіщувачами типу ДТП, що передають сигнал на приймальний пункт. Персонал зобов'язаний негайно евакуюватися. Відповідно до СНиП 2.09.02-85*, у приміщенні передбачено два евакуаційні виходи. Цех знаходиться на першому поверсі, ширина шляхів евакуації становить не менше 1 м, а дверей на них — не менше 0,8 м.

6.3.4 Електробезпека

Лінію для виробництва рукафної плівки планується розташувати в сухому цеху з нормальними показниками температури та вологості. Підлога виконана із залізобетону, тому згідно з ПУЕ таке приміщення відноситься до групи з підвищеною електробезпекою. На пульті керування обладнанням подається напруга 220 В при частоті 50 Гц, тоді як електродвигуни, що працюють у складі лінії, живляться від мережі 380 В з тією ж частотою. Електромережа виконана за схемою з глухо заземленою нейтраллю.

Основні методи захисту від впливу електричного струму передбачають якісну ізоляцію та недосяжність струмоведучих елементів, використання роздільних трансформаторів для ізоляції мережі, захисне занулення, а також встановлення рубильників у спеціалізованих шафах для безпечного керування.

Під час роботи з електрифікованим інструментом працівники мають застосовувати індивідуальні засоби захисту: діелектричні рукавички, спеціальне взуття, гумові килимки або ізоляційні підставки. Категорично не дозволяється працювати на незаземленому обладнанні, виконувати ремонтні роботи без повного відключення живлення, завдавати ударів металевими предметами по обладнанню, курити чи застосовувати відкритий вогонь поруч із лінією. Необхідно постійно контролювати роботу устаткування та не допускати в приміщення осіб, які не пройшли відповідне навчання з охорони праці та техніки безпеки.

7. ПРОГРАМНИЙ РОЗРАХУНОК В СИСТЕМІ ANSYS

Метод скінченних елементів (МСЕ) є ефективним засобом дослідження напружено-деформованого стану конструкцій за різних навантажень і умов закріплення. На сучасному етапі для таких розрахунків широко застосовуються програмні комплекси ANSYS, NASTRAN, ABAQUS та інші. У даній роботі розрахунки виконано для формувальної головки черв'ячної машини з метою оцінки діючих навантажень і перевірки її працездатності. Моделювання проведено в середовищі ANSYS Workbench на основі 3D-моделі, створеної в SOLIDWORKS.

Програма ANSYS - це потужне програмне забезпечення для інженерного аналізу, яке використовується для чисельного моделювання різних фізичних явищ, таких як механіка твердого тіла, теплопередача, гідродинаміка та інші. ANSYS використовується інженерами та науковцями для вирішення складних інженерних задач, проектування та оптимізації продуктів і процесів.

Мета роботи полягає у побудові геометричної моделі корпусу екструдера та проведенні його інженерних розрахунків з метою оцінки міцності, жорсткості й надійності конструкції. У процесі дослідження передбачається аналіз напружено-деформованого стану корпусу під дією робочих навантажень, визначення критичних зон і обґрунтування доцільності конструктивних удосконалень для підвищення експлуатаційних характеристик та довговічності обладнання. Вихідні дані для проведення розрахунків наведено в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 - Вихідні дані

Тиск в середині	$P = 50 \text{ МПа}$
Матеріал	Сталь 45
Температура у зоні нагріву	$T = 180^\circ\text{C}$
Кімнатна температура	$T_k = 22^\circ\text{C}$
Довжина корпусу	$L = 900 \text{ мм}$
Внутрішній радіус	$R_2 = 45,22 \text{ мм}$
Зовнішній радіус	$R_1 = 170 \text{ мм}$

7.1 Розрахунок базової конструкції

У початкових розрахунках була використана модель корпусу базової конструкції, наведена на рисунках 7.1 та 7.2.

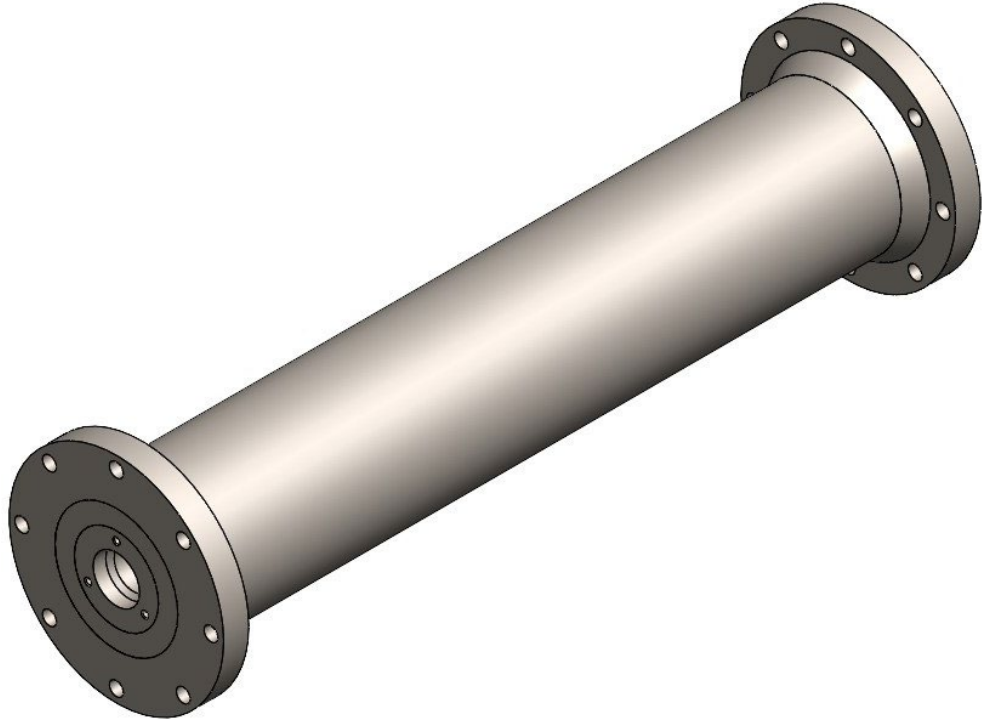


Рисунок 7.1 – Модель базової конструкції корпусу

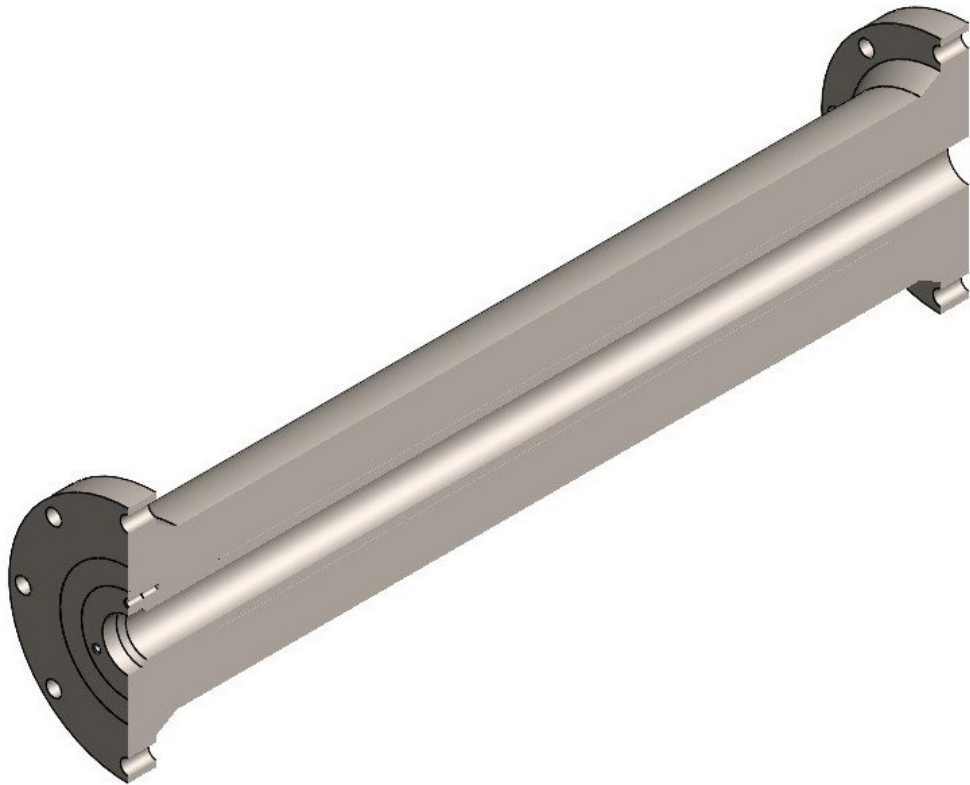


Рисунок 7.2 – Модель базової конструкції корпусу у розрізі

Для моделі базової конструкції корпусу задано жорстке закріплення, що наведено на рисунку 7.3.

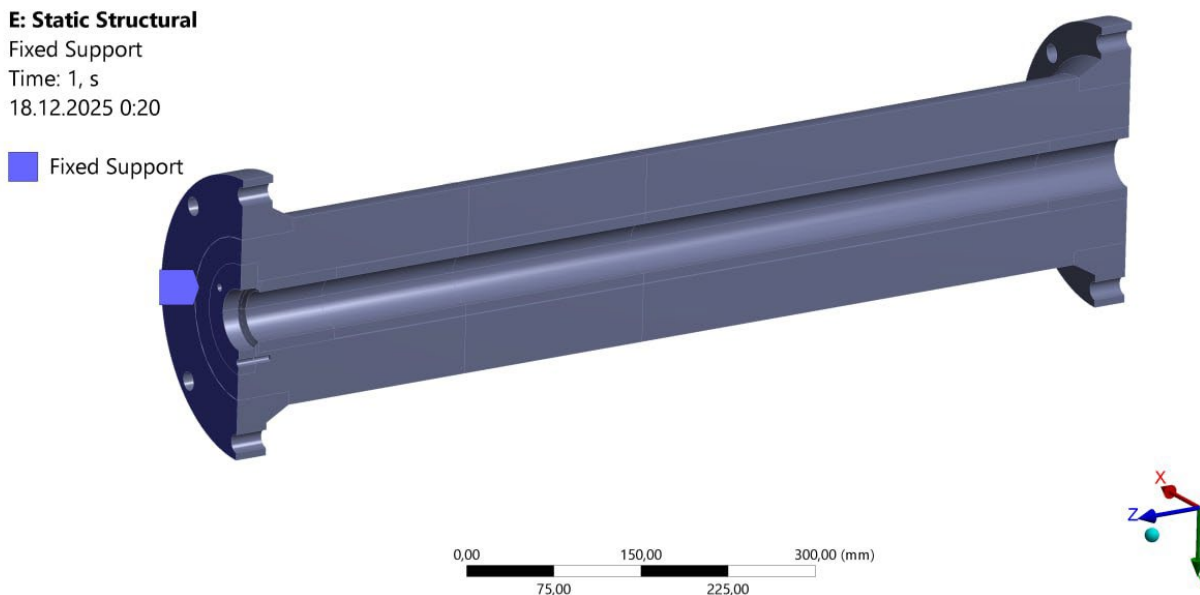


Рисунок 7.3 – Схема закріплень

Для моделі базової конструкції корпусу задано навантаження $P = 50$ МПа, яке імітує тиск полімерного матеріалу на внутрішні поверхні корпусу. Згідно з [16], таке значення тиску є достатнім для більшості експлуатаційних режимів та може бути використане для випробування моделі базової конструкції. Задане навантаження наведено на рисунку 7.4.

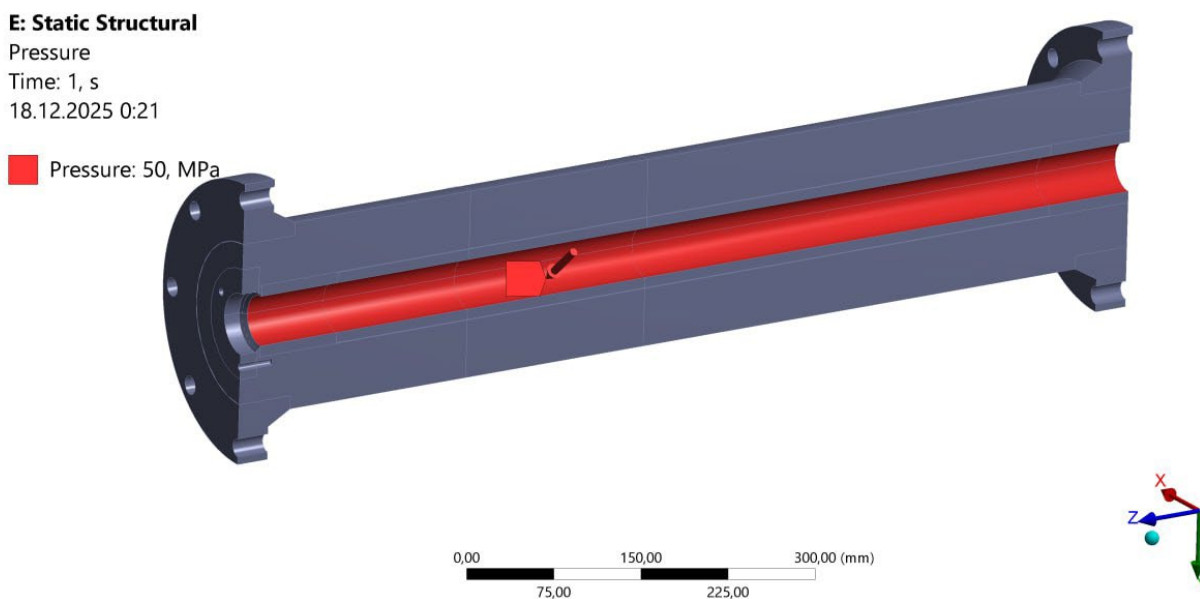


Рисунок 7.4 – Схема розподілення навантаження

Також у розрахунковій моделі задається температура у зоні нагріву екструдера, яка відповідає робочим умовам процесу переробки полімерного матеріалу та враховується при проведенні теплового (рис. 7.5).

A: Steady-State Thermal

Temperature

Time: 1, s

19.12.2025 5:03

- A** Temperature: 180, °C
- B** Temperature 2: 100, °C
- C** Temperature 3: 40, °C

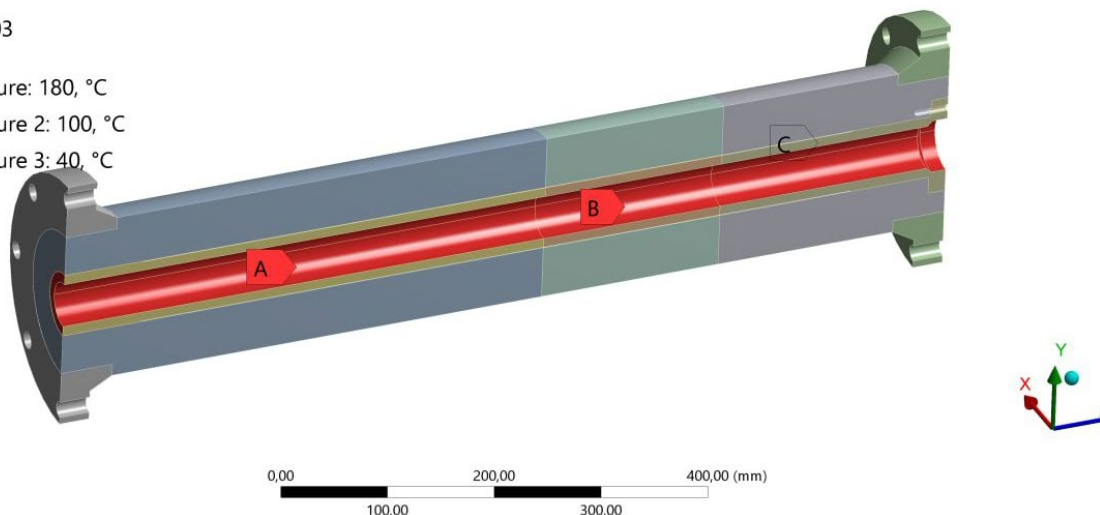


Рисунок 7.5 – Схема розподілення температури всередині

Окрім цього, у моделі враховується температура навколишнього середовища, що дозволяє коректно оцінити теплообмін корпусу екструдера з навколишнім простором та наблизити умови розрахунку до реальних експлуатаційних умов (рис. 7.3).

B: Transient Thermal

Temperature

Time: 1, s

19.12.2025 5:05

- Temperature: 22, °C

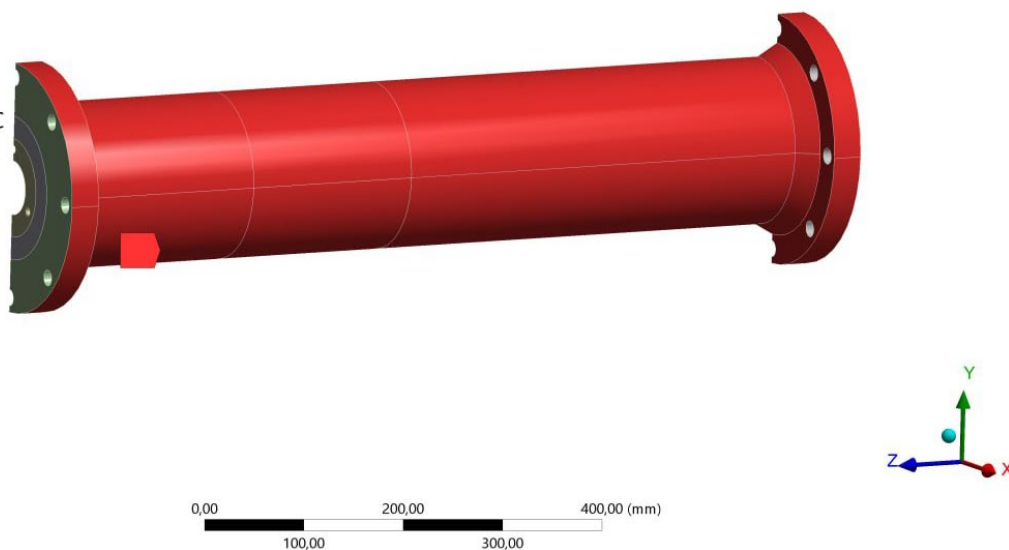


Рисунок 7.6 – Схема розподілення температури навколишнього середовища

Побудуємо сітку скінченних елементів (рис.7.7).

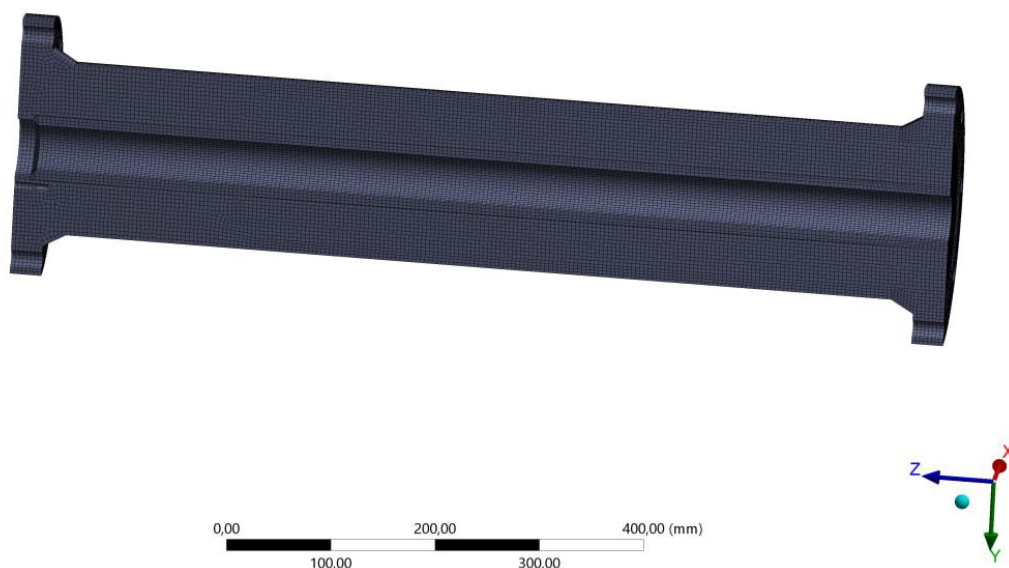


Рисунок 7.7 – Побудова сітки скінченних елементів

Результати розрахунку температурних навантажень (рис. 7.8):

B: Transient Thermal

Temperature

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1

19.12.2025 4:48

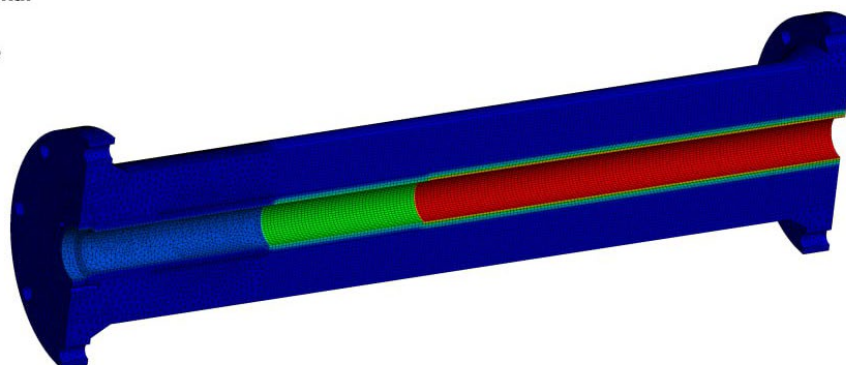
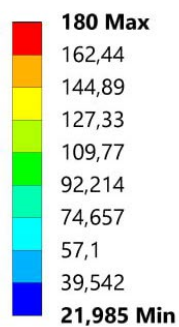


Рисунок 7.8 – Схема розподілу температурних навантажень, °C

Результати розрахунку еквівалентних напружень (рис. 7.9):

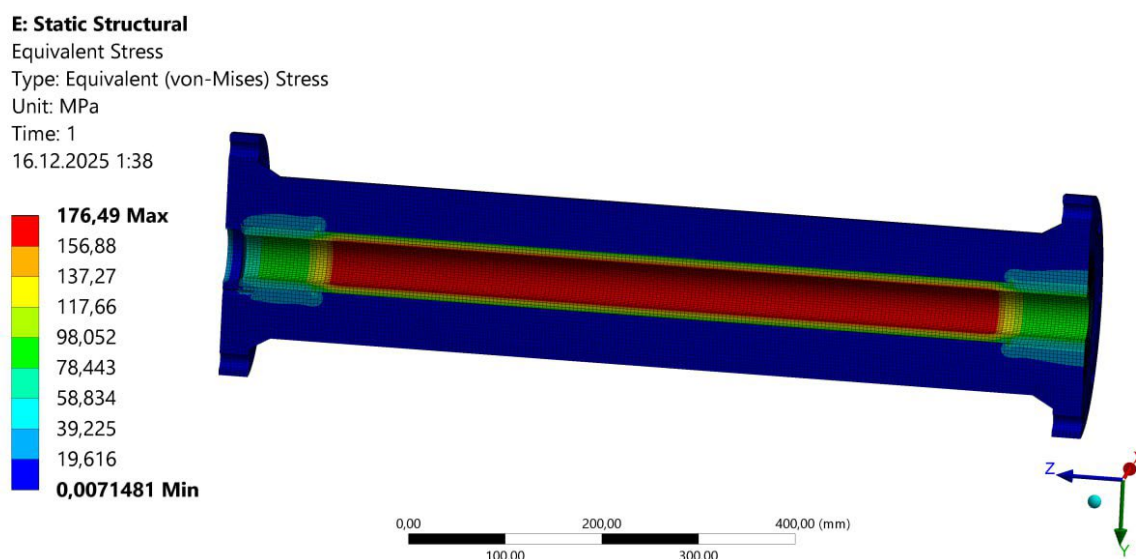


Рисунок 7.9 - Поле еквівалентних напружень, МПа

Результати розрахунку розподілу головного вектору переміщень (рис. 7.10):

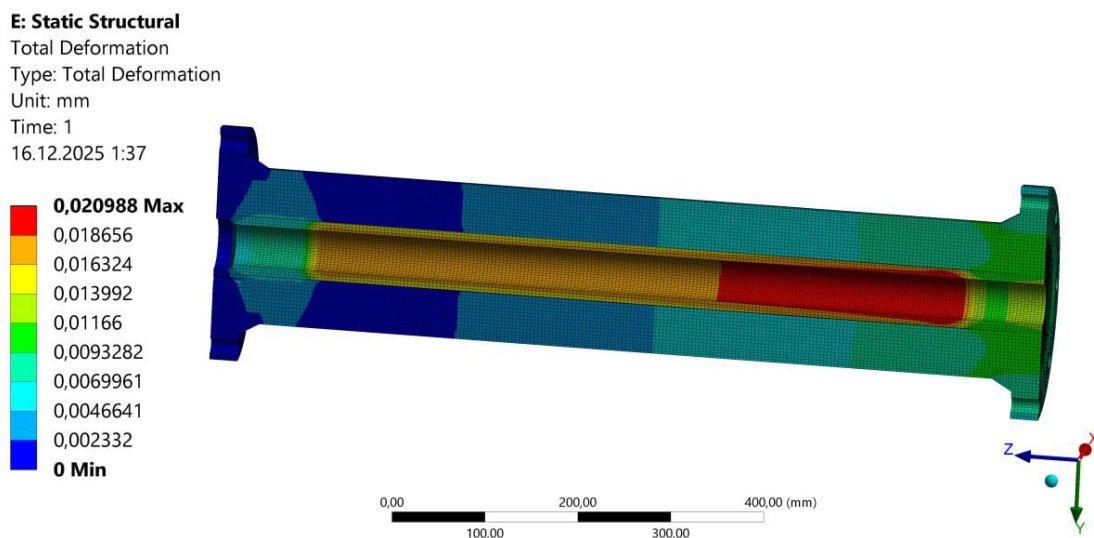


Рисунок 7.10 – Поле розподілу головного вектору переміщення, мм

Результати розрахунку запасу міцності (рис. 7.11):

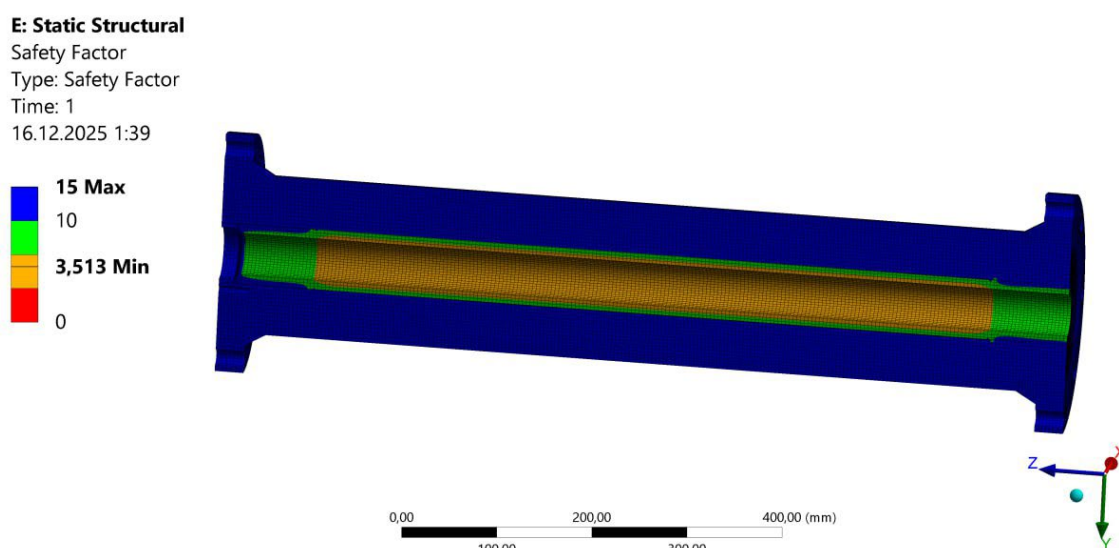


Рисунок 7.11 – Поле запасу міцності

Коефіцієнт запасу міцності не повинен бути нижче допустимого значення:

$$n = \sigma_T / \sigma_{\text{екв}}$$

$$n = 620 / 176,5 = 3,513$$

Отримане значення коефіцієнта запасу міцності корпусу перевищує допустиме значення для легваної сталі, що свідчить про здатність корпусу витримувати задані навантаження без втрати працездатності. Аналіз результатів чисельного моделювання також показав, що температурний перепад у конструктивних елементах корпусу суттєво впливає на його напружено-деформований стан.

7.2 Розрахунок модернізованої конструкції

У подальших розрахунках використано модель головки модернізованої конструкції, зображену на рисунках 7.12 та 7.13.

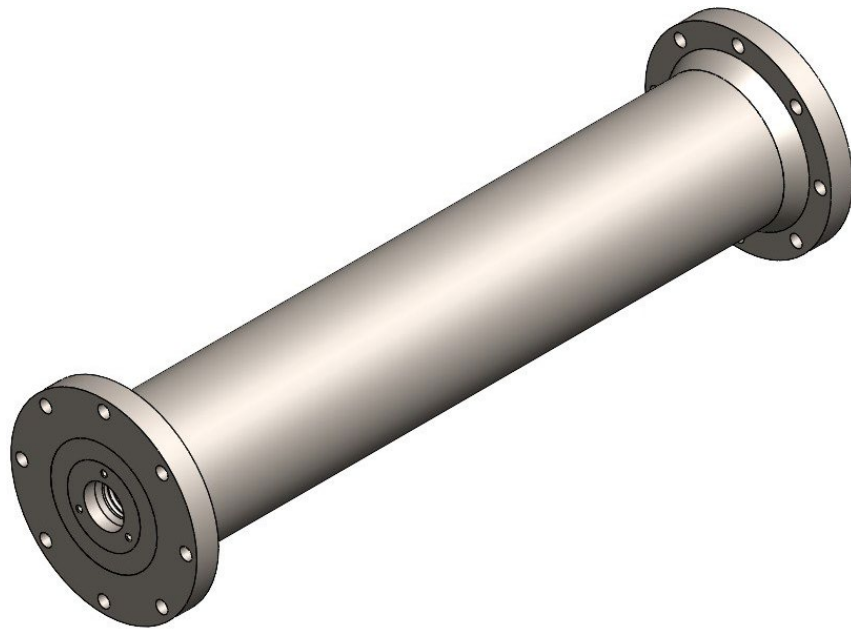


Рисунок 7.12– Модель модернізованої конструкції корпусу

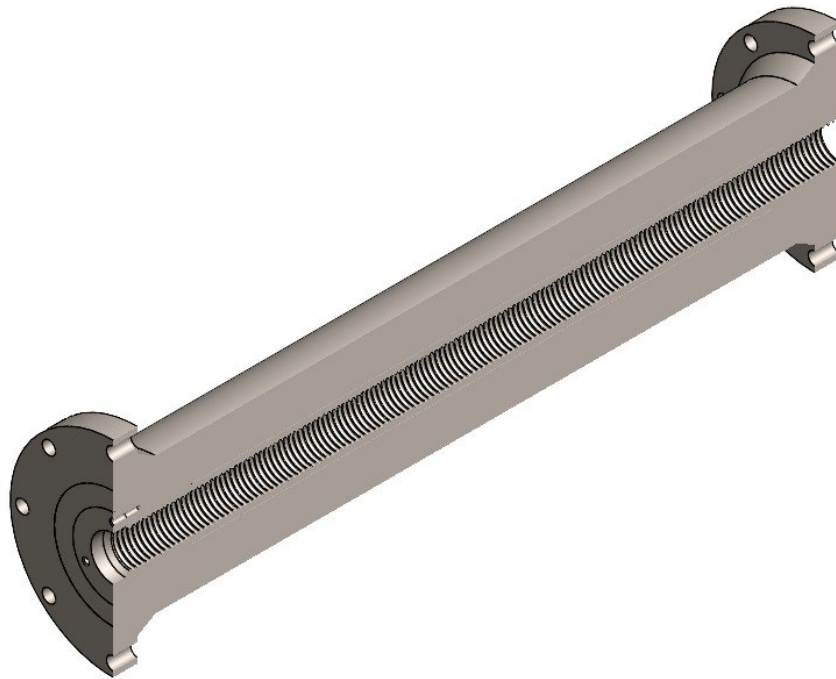


Рисунок 7.13 – Модель модернізованої конструкції корпусу у розрізі

Задаємо жорстке закріплення для моделі модернізованої конструкції (рис.7.14).

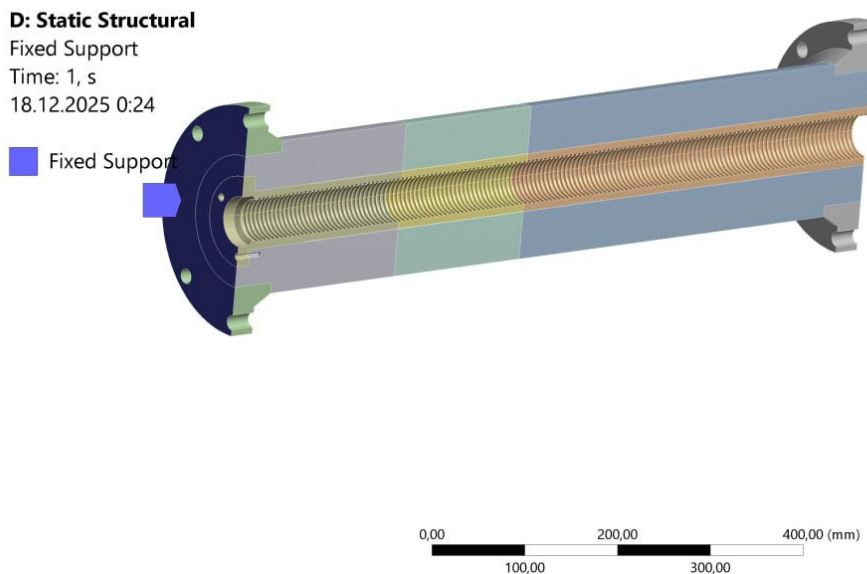


Рисунок 7.14 – Схема закріплення

Для моделі модернізованої конструкції задано навантаження $P=50$ МПа, яке імітує тиск матеріалу на внутрішні поверхні. Зазначене значення тиску є достатнім для більшості експлуатаційних режимів і може бути використане для випробування моделі модернізованої конструкції. Умови навантаження наведено на рисунку 7.15.

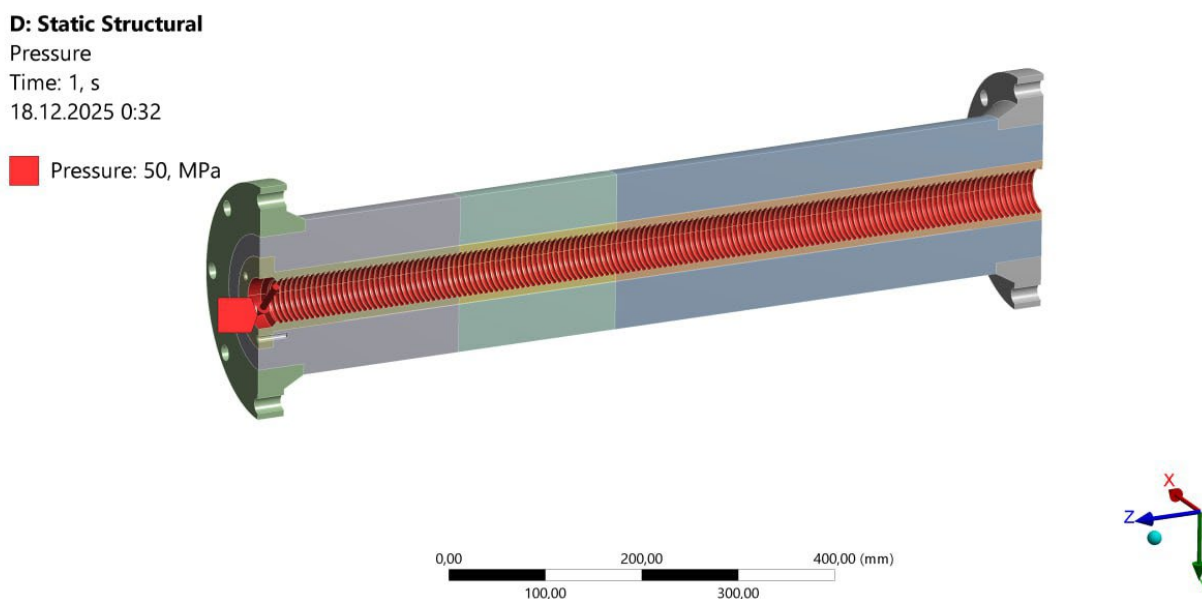


Рисунок 7.15 - Схема розподілення навантаження

У розрахунковій моделі задається температура зони нагріву екструдера, що відповідає робочим умовам переробки полімеру та враховується під час теплового аналізу (рис. 7.16).

C: Steady-State Thermal

Temperature

Time: 1, s

19.12.2025 4:57

- A** Temperature: 180, °C
- B** Temperature 2: 100, °C
- C** Temperature 3: 40, °C

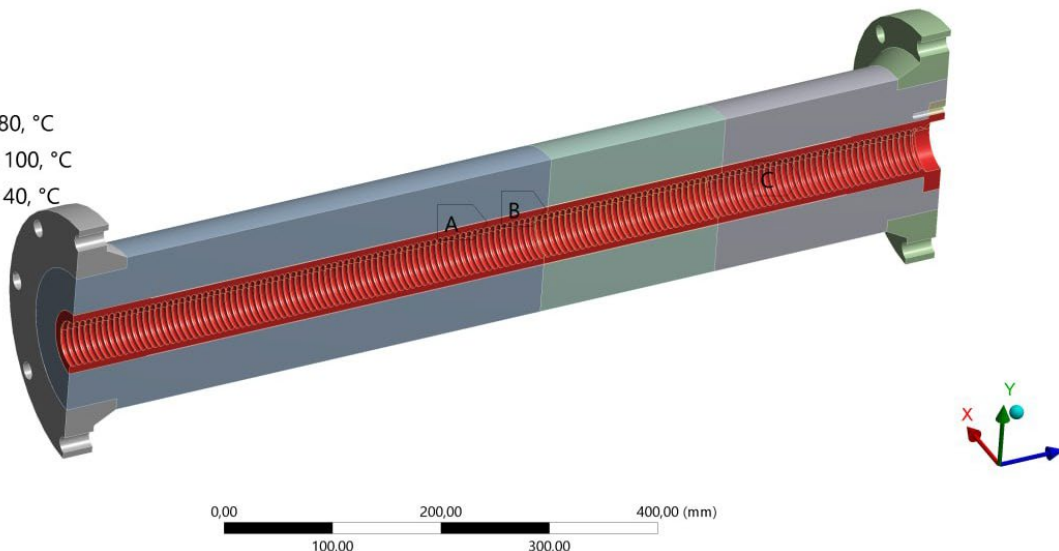


Рисунок 7.16 – Схема розподілення температури всередині

Також у моделі враховується температура навколишнього середовища, що забезпечує коректну оцінку теплообміну корпусу екструдера з довкіллям та наближає розрахунок до реальних умов експлуатації (рис. 7.17).

D: Transient Thermal

Temperature

Time: 1, s

19.12.2025 5:01

- Temperature: 22, °C

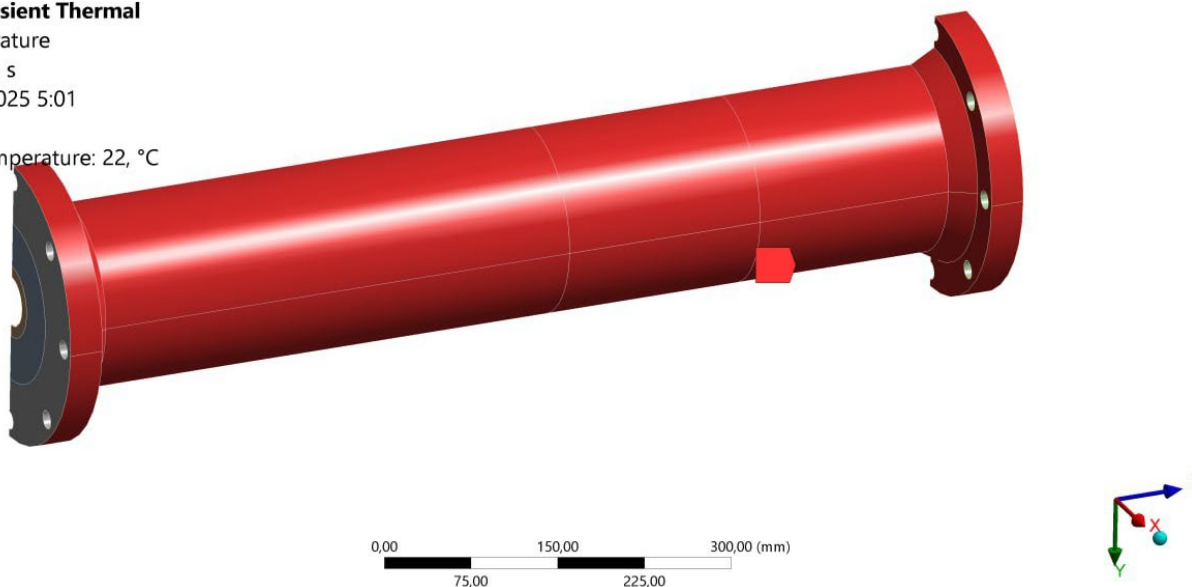


Рисунок 7.17 – Схема розподілення температури навколишнього середовища

Побудуємо сітку скінченних елементів (рис.7.18).

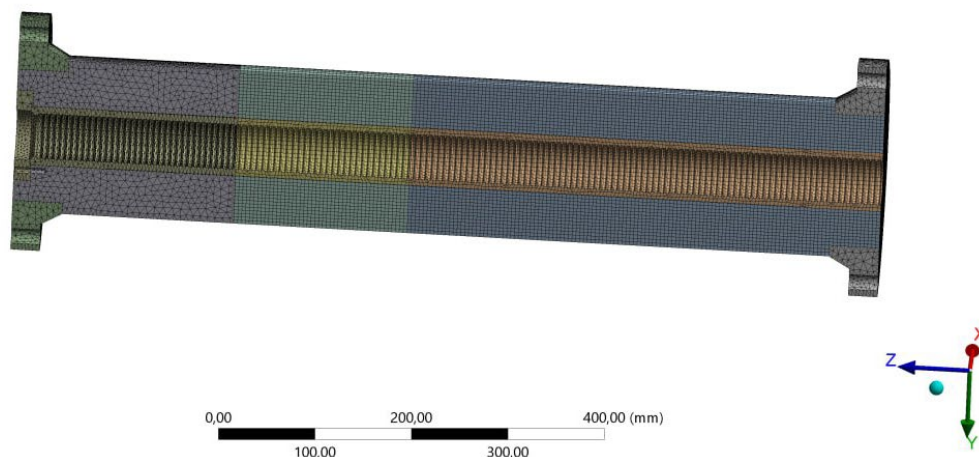


Рисунок 7.18 – Побудова сітки скінченних елементів

Результати розрахунку температурних навантажень (рис. 7.19):

D: Transient Thermal

Temperature

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1

19.12.2025 4:52

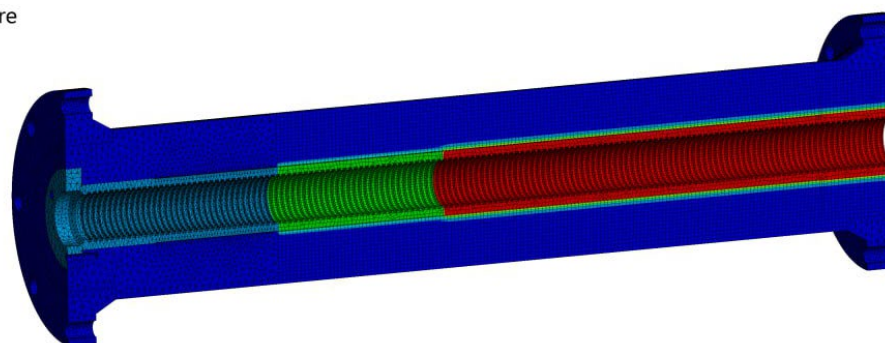
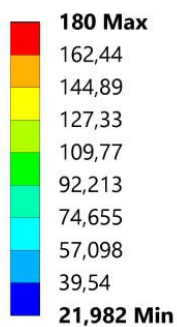


Рисунок 7.19 – Схема розподілу температурних навантажень, °C

Результати розрахунку еквівалентних напружень (рис. 7.20):

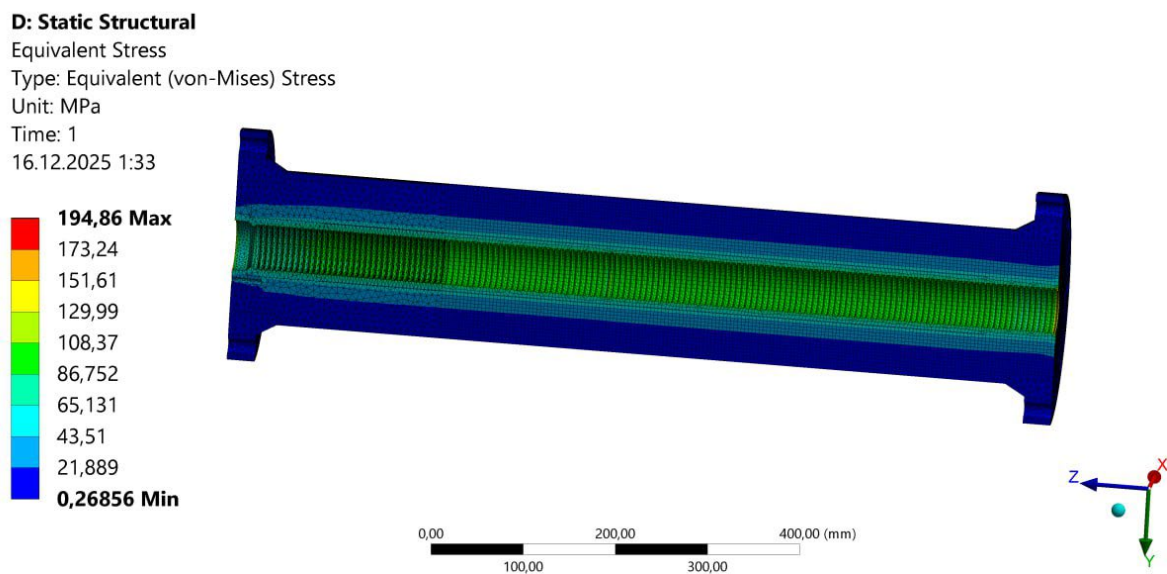


Рисунок 7.20 - Поле еквівалентних напружень, МПа

Результати розрахунку розподілу головного вектору переміщень (рис. 7.21):

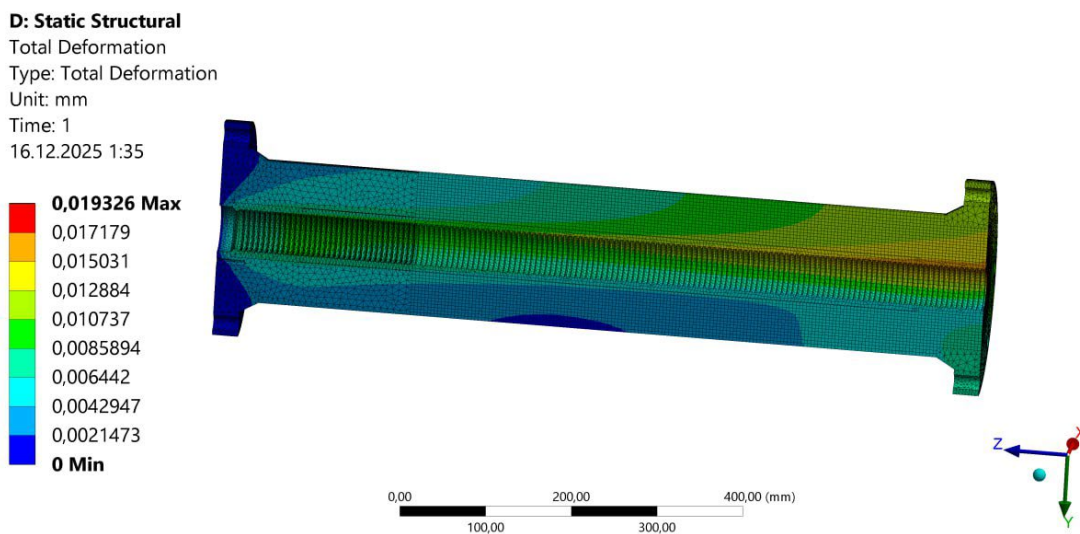


Рисунок 7.21 – Поле розподілу головного вектору переміщення, мм

Результати розрахунку запасу міцності (рис. 7.22):

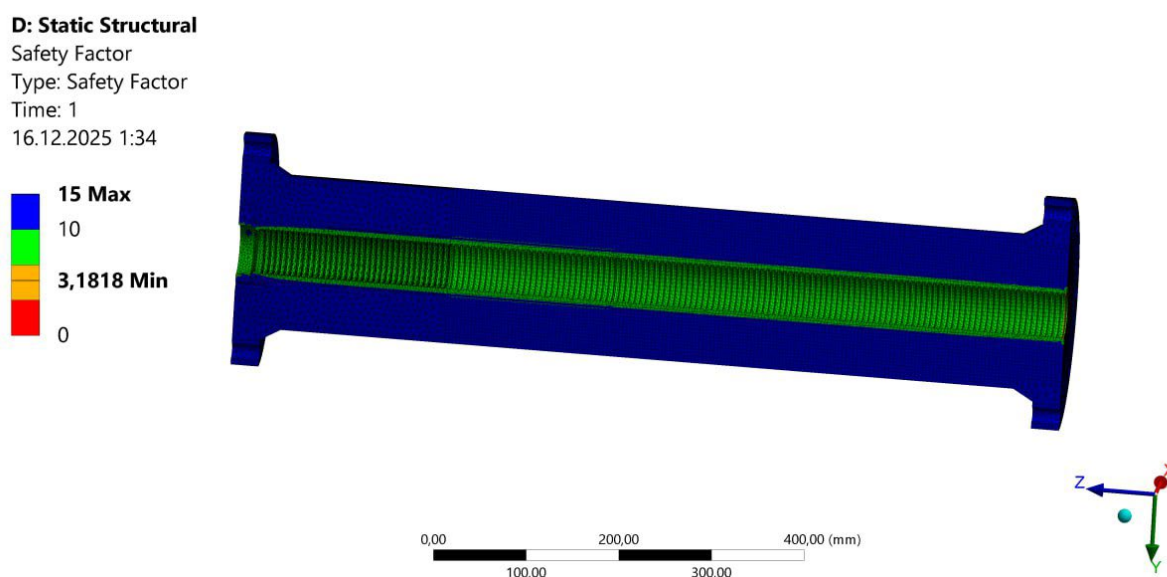


Рисунок 7.22 – Поле запасу міцності

Коефіцієнт запасу міцності не повинен бути нижче допустимого значення:

$$n = \sigma_T / \sigma_{\text{ЕКВ}}$$

$$n = 620 / 194,9 = 3,181$$

Розрахований коефіцієнт запасу міцності корпусу перевищує допустиме значення для легованої сталі, що підтверджує його здатність сприймати задані навантаження без порушення працездатності.

7.3 Порівняння результатів розрахунків

Отримане значення коефіцієнта запасу міцності модернізованої конструкції корпусу є меншим порівняно з базовою конструкцією, проте істотно перевищує мінімально допустиме нормативне значення для легованої сталі. Зниження коефіцієнта запасу міцності з 3,513 до 3,181 пояснюється зростанням максимальних еквівалентних напружень за Мізесом з 176,5 МПа до 194,9 МПа, які локалізуються в зонах внесених конструктивних змін.

Зазначене зростання напружень припадає на ділянки виконання проточок у корпусі, що зумовлено зменшенням ефективної товщини поперечного перерізу та скороченням відстані між зонами прикладання навантажень. Такий ефект був

прогнозованим на етапі проектування модернізованої конструкції, оскільки введення проточок неминуче призводить до концентрації напружень у локальних зонах.

Водночас результати розрахунків показали, що максимальні переміщення корпусу є незначними та становлять 0,0193 мм для модернізованої конструкції, що свідчить про відсутність критичних деформацій. Незважаючи на зменшення коефіцієнта запасу міцності, його значення перевищує нормативний рівень $[n] = 1,6$, що підтверджує відповідність корпусу вимогам міцності та обґрунтовує можливість його надійної експлуатації в промислових умовах.

Результати нестационарного теплового аналізу показали, що в обох моделях максимальна температура в зоні нагріву становить близько 180 °C і відповідає робочим умовам. Модернізована конструкція характеризується більш рівномірним розподілом температури вздовж корпусу та меншими локальними перепадами, що свідчить про покращені умови тепловідведення і зниження термічних навантажень.

Корисний ефект запропонованого патентного рішення полягає у покращенні умов течії полімерного розплаву в екструзійному каналі та зниженні рівня локальних напружень у конструктивних елементах екструдера. Введення конструктивних змін забезпечує більш рівномірний розподіл тиску, зменшення гідродинамічного опору та стабілізацію процесу екструзії, що, у свою чергу, сприяє підвищенню якості готової продукції.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації виконано комплексний аналіз та модернізацію технологічної лінії для виготовлення рукавної полімерної плівки методом екструзії. Проведено детальне дослідження базової конструкції екструдера та формувальної головки, а також принципів їх роботи, що дало змогу виявити основні конструктивні та технологічні недоліки, які негативно впливали на стабільність процесу формування плівки та якість готової продукції. Зокрема, обмежені можливості регулювання гідродинамічного опору потоку розплаву у формувальному каналі ускладнювали керування процесом у безперервному режимі та могли призводити до нерівномірності товщини плівки й підвищених навантажень на елементи екструзійної головки.

З метою усунення виявлених недоліків було виконано літературно-патентний огляд сучасних технічних рішень, за результатами якого обрано та впроваджено конструктивну модернізацію формувальної головки екструдера. Запропоноване технічне рішення забезпечило покращення умов регулювання потоку розплаву, підвищення стабільності процесу екструзії рукавної плівки, а також створило передумови для дистанційного керування технологічними параметрами без порушення безперервності виробництва.

У межах дипломного проекту також виконано розділ «Охорона праці», в якому проаналізовано основні шкідливі та небезпечні виробничі фактори, характерні для процесу екструзії полімерних плівок, і розроблено заходи щодо зниження їхнього впливу на обслуговуючий персонал. Розрахунки напружено-деформованого стану модернізованої формувальної головки, виконані в програмному середовищі ANSYS, підтвердили міцність, працездатність і надійність запропонованої конструкції за умов експлуатаційних навантажень.

У розділі «Технологія машинобудування» розроблено технологічний процес виготовлення основних деталей екструзійної головки, зокрема корпусу та вала, з оформленням маршрутних і операційних карт, що забезпечує можливість практичної реалізації запропонованої конструкції в умовах серійного або

одиночного виробництва.

У результаті виконання дипломного проєкту розроблено модернізовану технологічну лінію для виготовлення рукавної полімерної плівки, яка є повністю працездатною та придатною до впровадження у промислових умовах. Запропоновані конструктивні рішення сприяють підвищенню стабільності екструзійного процесу, покращенню якості плівки, зростанню продуктивності лінії та більш ефективному використанню полімерної сировини, що, у свою чергу, дозволяє знизити виробничі витрати та підвищити економічну ефективність виробництва.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мікульонок І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : монографія. Київ : ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. 265 с.
2. Мікульонок І. О. Термопластичні композитні матеріали та їх наповнювачі. Класифікація та загальні відомості // Хімічна промисловість України. 2005. № 5. С. 30–39.
3. Основи проектування одночерв’ячних екструдерів : навч. посіб./ І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко .– К. : НТУУ «КПІ», 2015.– 200 с.
4. Процеси та обладнання хімічної технології. У 2-х ч.: підручник / Корнієнко Я.М., Лукач Ю.Ю., Мікульонок І.О., Ракицький В.Л., Рябцев Г.Л. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 716 с.
5. Пат. №US7635217B2, США, В29В7/481, Гален Дж. Рокі, Браян С. Платтнер - заявл. - 03.01.2008, опубл. - 22.12.2009
6. Пат. №US20100260882A1, США, А23N17/005, Джозеф П. КірнсГален Дж. РокіФіліп Б. ВілцЕнтоні Л. БрунінгЛафе Н. Бейлі - заявл. - 08.04.2009, опубл. - 14.10.2010.
7. Пат. №CN213082302U, Китай, 宫元正姜明智陈正 - заявл. - 09.06.2020, опубл. - 30.04.2021.
8. Пат. №US3900188А, США, В22D19/0009, Wilhelm Seufert - заявл. - 13.11.1973, опубл. - 19.08.1992.
9. Пат. №US20050189025A1, США, В29С48/682, Wilhelm Seufert - заявл. 26.01.2005, опубл. - 14.03.2006.
10. Мікульонок І.О. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв: підручник. Київ: НТУУ «КПІ», 2010. 412 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2061>

11. Мікульонок І.О. Виготовлення обладнання хімічних виробництв : підруч. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 236 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50358>
12. Маркетинг стартап-проектів : навчальний посібник для усіх спеціальностей другого освітнього ступеню «магістр» / С. О. Солнцев, О. В. Зозульов, Н. В. Юдіна, Т. О. Царьова, Н. В. Язвінська ; за заг. ред. С.О. Солнцева ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 218 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27437>
13. Розроблення стартап-проекту : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.
14. Кострюков В.А. Приклади розрахунку по отопленню та вентиляції, ч.1. Отоплення, ч.П. Вентиляція. , 1964.
15. Жидецкий В.Ц., Джигирей В.С.. Практикум з охорони праці - Львів: Афіша, 2000 р.
16. Андреев І. А., Мікульонок І. О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. Київ: ІВЦ «Політехніка», 2002. 216 с.

Додаток 1

ТАБЛИЦЯ РОЗГЛЯНУТИХ ПАТЕНТІВ

№ п/п	Предмет пошуку	Країна видачі, вид і номер документа	Сутність заявленого технологічного рішення
1	Extruder having variable mid-barrel restriction and adjacent high intensity mixing assembly	US7635217B2, США, Гален Дж. Роки, Браян С. Платтнер	Сутність заявленого технологічного рішення полягає у створенні розподільного клапана для двошнекового екструдера, який завдяки поворотному болту з наскрізним і боковим каналами дозволяє змінювати напрям потоку розплаву та швидко знімати шнеки без демонтажу обладнання, що забезпечує зручне обслуговування та підвищену ефективність роботи екструдера.
2	Extruder assembly with alternating converging and diverging barrel sections	US20100260882A1, США, Джозеф П. КірнсГален Дж. РокиФіліп Б. ВілцЕнтоні Л. БрунінгЛафе Н. Бейлі	У патенті модернізовано шнековий екструдер шляхом впровадження внутрішнього охолодження порожнистого шнека з каналами для циркуляції рідини чи газу, що забезпечує регулювання температури, запобігає перегріванню полімеру та підвищує стабільність і ефективність екструзійного процесу.
3	Barrel winding type water channel of double-screw extruder	CN213082302U, Китай, 宫元正姜明智陈正	У патенті модернізовано систему охолодження корпусу двошнекового екструдера шляхом впровадження спірального водяного каналу між корпусом і кожухом, що забезпечує рівномірне охолодження, а завдяки

			уцільненням і фіксаторам підвищує надійність, знижує вартість і спрощує виготовлення.
4	Screw extruder housing with a wear-resistant lining	US3900188A, США, Wilhelm Seufert	У патенті запропоновано корпус шнекового екструдера зі знімною гільзою, зафіксованою тверднучим матеріалом у зазорі між нею та корпусом. Це підвищує зносостійкість, спрощує заміну гільзи та дає змогу інтегрувати канали для терморегулювання.
5	Diverter valve for an extruder, in particular a twin-screw extruder	US20050189025A1, США, Wilhelm Seuffer	У патенті запропоновано розподільний клапан із поворотним болтом, що дозволяє змінювати напрям потоку розплаву без демонтажу обладнання. Це спрощує обслуговування, зменшує простоту та полегшує керування процесом.

Додаток 2

ЛІСТИНГ ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ НА ЕОМ

```
#include <iostream>
using namespace std;
int main()
{
    double Q = 13.6, cm = 2409, tk = 225, tn = 20;
    double Gm = floor((Q / 3600) * 10000) / 10000;
    cout << "Gm = " << Gm << " kg/c\n";
    double Em = floor(((Gm * cm * (tk - tn)) * pow(10, -3)) * 1000) / 1000;
    cout << "Em = " << Em << " kVt\n\n";
    double pi = 3.14, d = 0.009, ro = 1000, v = 1, cb = 4200, tb1 = 25, tb2 = tn;
    double F = (pi * pow(d, 2)) / 4;
    cout << "F = " << F << " m^2\n";
    double Gb = ro * F * v;
    cout << "Gb = " << Gb << " kg/c\n";
    double E0 = floor(((Gb * cb * (tb1 - tb2)) * pow(10, -3)) * 1000) / 1000;
    cout << "E0 = " << E0 << " kVt\n\n";
    double tp = 22, tc = tn, dk = 0.071, Lk = 0.921;
    double T = tp - tc;
    cout << "T = " << T << " grad C\n";
    double a = (9.74 + 0.07 * T) * pow(10, -3) * pow(10, 3);
    cout << "a = " << a << " Vt/(m^2*K)\n";
    double Fk = pi * dk * Lk;
    cout << "Fk = " << Fk << " m^2\n";
    double Ep = floor((Fk * a * (tp - tc)) * 100) / 100;
    cout << "Ep = " << Ep << " kVt\n\n";
```

```
double D = 0.045, ny1 = 1.1 * pow(10, 3), L = 1.071, h = 1.5 * pow(10, -3), P =  
50 * pow(10, 6), fi = 0.31, n = 1.155, ny2 = 1.5 * pow(10, 2), e = 4.5 * (10, -3), tet =  
0.11 * pow(10, -3);
```

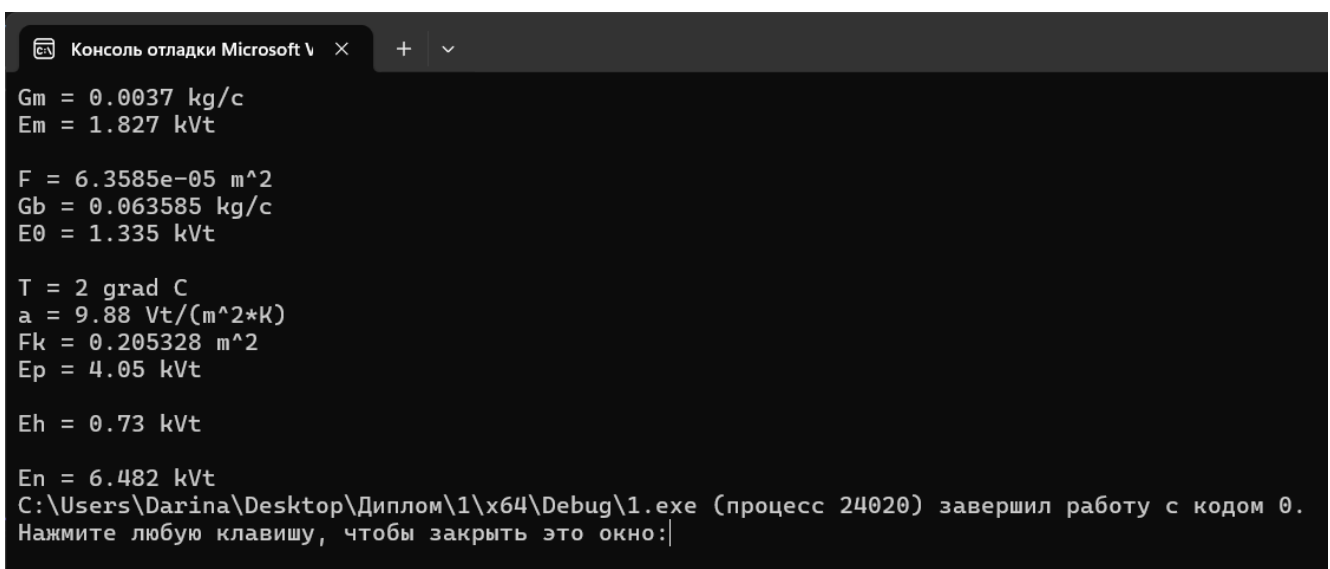
```
double Eh = floor(((((((pow(pi, 3)) * (pow(D, 3)) * ny1 * L) / h) + ((Q * P)  
/ pow(cos(fi), 2)) + (((pow(pi, 2)) * (pow(D, 2)) * (pow(n, 2)) * ny2 * e * L) / tet *  
tan(fi))) * 9.8 * pow(10, -10))) * 100) / 100;
```

```
cout << "Eh = " << Eh << " kVt\n\n";
```

```
double En = Em + E0 + Ep - Eh;
```

```
cout << "En = " << En << " kVt";
```

```
}
```



```
Консоль отладки Microsoft V x + v  
Gm = 0.0037 kg/c  
Em = 1.827 kVt  
  
F = 6.3585e-05 m^2  
Gb = 0.063585 kg/c  
E0 = 1.335 kVt  
  
T = 2 grad C  
a = 9.88 Vt/(m^2*K)  
Fk = 0.205328 m^2  
Ep = 4.05 kVt  
  
Eh = 0.73 kVt  
  
En = 6.482 kVt  
C:\Users\Darina\Desktop\Диплом\1\х64\Debug\1.exe (процесс 24020) завершил работу с кодом 0.  
Нажмите любую клавишу, чтобы закрыть это окно:|
```

Додаток 3

Формат	Зона	Поз.	Познака	Найменування	Кільк.	Прим.																																			
<i>Документація</i>																																									
A1			ЛП4.1.01724.2.002-70 СК	Складальний кресленик																																					
<i>Складальні одиниці</i>																																									
A4	1		ЛП4.1.01724.2.002.01-70	Рама	1																																				
A4	2		ЛП4.1.01724.2.002.02-70	Кажух корпуса	1																																				
A4	3		ЛП4.1.01724.2.002.03-70	Бункер	1																																				
A4	4		ЛП4.1.01724.2.002.04-70	Система охолодження	1																																				
A4	5		ЛП4.1.01724.2.002.05-70	Корпус	1																																				
A4	6		ЛП4.1.01724.2.002.06-70	Воранка завантажувальна	1																																				
<i>Деталі</i>																																									
A3	7		ЛП4.1.01724.1.002.07-70	Черв'як	1																																				
A3	8		ЛП4.1.01724.1.002.08-70	Втулка	1																																				
A3	9		ЛП4.1.01724.1.002.09-70	Плита несуча	1																																				
<i>Стандартні вироби</i>																																									
		10		Болт фундаментний М30х400	6																																				
		11		Болт М16х90 ГОСТ 7798-70	6																																				
		12		Гайка М30.6.06 ГОСТ 5915-70	6																																				
		13		Шайба 16.65Г.05 ГОСТ 11598-80	6																																				
		14		Шайба 30.65Г.05 ГОСТ 11598-80	6																																				
ЛП4.1.01724.2.002-70																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;">Зн.</td> <td style="width: 10%;">Арх.</td> <td style="width: 20%;">№ докум.</td> <td style="width: 10%;">Підп.</td> <td style="width: 10%;">Дата</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Розроб.</td> <td>Аснולהва</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Перев.</td> <td>Витвицький</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Нхконтр.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Затв.</td> <td>Соколяський</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>							Зн.	Арх.	№ докум.	Підп.	Дата			Розроб.	Аснולהва						Перев.	Витвицький						Нхконтр.							Затв.	Соколяський					
Зн.	Арх.	№ докум.	Підп.	Дата																																					
Розроб.	Аснולהва																																								
Перев.	Витвицький																																								
Нхконтр.																																									
Затв.	Соколяський																																								
Модернізований екструдер для виробництва плівки				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;">Лист</td> <td style="width: 10%;">Аркулш</td> <td style="width: 10%;">Аркулш</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> </table>			Лист	Аркулш	Аркулш		1	2																													
Лист	Аркулш	Аркулш																																							
	1	2																																							
				КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФАПІЕ																																					

Формат	Зона	Лист	Познака	Найменування	Кільк.	Прим.
Перед. застосування						
ЛП4 ім.01724.3.000-70						
A3			ЛП4 ім.01724.2.002-70СК	Складальний креслення		
Документація						
Деталі						
A3	1		ЛП4 ім.01724.1.002-70	Фланець	2	
A4	2		ЛП4 ім.01724.1.003-70	Корпус	1	
A3	3		ЛП4 ім.01724.1.005-70	Гільза модернізована	1	
Лінійне / діаметр						
№ ЛП докум.						
Зона від ЛП						
Лінійне / діаметр						
ЛП4 ім.01724.2.002-70						
Лист						
Арх						
№ докум.						
Підп.						
Дата						
Лист						
Арх						
Архив						
Корпус модернізований						
КПІ ім. Ізоря Сікорського ФАПЕ						
Лист						
Арх						
Архив						
1						
Лист						
Арх						
Архив						
1						

Додаток 4

Дослідження еквівалентних напружень та деформації корпусу екструдера в системі Ansys

Асмолова Д.І., студ., Швець Д.А., студ., Вітвицький В.М., PhD, ас.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Проведено дослідження напружено-деформованого стану корпусу екструдера з удосконаленою системою кріплення з використанням програмного комплексу ANSYS.

Ключові слова: черв'ячний екструдер, корпус, проектування, моделювання.

Вступ. У процесі екструзії корпус екструдера відіграє важливу роль у забезпеченні стабільних умов переміщення, компресії та плавлення полімерного матеріалу, оскільки в ньому розміщуються основні робочі елементи та підтримуються необхідні температурно-силові параметри процесу. Високі вимоги до продуктивності зумовлюють необхідність модернізації корпусів екструдерів з метою підвищення їх зносостійкості, теплопровідності та механічної міцності [1].

Конструкція корпусу залежить від типу перероблюваного матеріалу та умов роботи екструдера, що дозволяє використовувати обладнання для виробництва труб, профілів, листів і волокон. Сучасні напрями розвитку екструзійного обладнання спрямовані на вдосконалення конструкцій корпусів, підвищення енергоефективності та впровадження автоматизованих систем контролю.

Модернізація корпусів екструдерів сприяє підвищенню надійності обладнання, зменшенню витрат на обслуговування та зниженню загальних витрат на виробництво й експлуатацію устаткування [2].

Основна частина. Для порівняльної оцінки несучої спроможності двох різних конструкцій корпусу екструдера, а саме базової та модернізованої за патентом [3], у програмному забезпеченні CAD-моделювання SolidWorks були створені їхні 3D-моделі, які надалі завантажено до САЕ-системи ANSYS для проведення чисельного аналізу методом скінченних елементів.

Для оцінювання міцності корпусу проведено кінцево-елементне моделювання в програмному середовищі ANSYS за таких умов:

- корпус жорстко закріплений у місцях монтажного кріплення до опорної конструкції
- до внутрішніх поверхонь корпусу прикладено тиск величиною 50 МПа, який імітує тиск матеріалу під час роботи екструдера і згідно [2] являється достатнім навантаженням для більшості реальних випадків і підходить для тесту моделі корпусу на міцність;
- матеріалом виготовлення корпусу є легрована сталь з межею текучості $\sigma_T = 620$ МПа.

Проведено числове моделювання, а саме перевірка на міцність обох моделей корпусу екструдера під дією зовнішнього навантаження і визначено напружено-деформований стан кожної конструкції. На рис. 1-4 наведено результати проведеного моделювання, а саме еквівалентні напруження за Міссом базової (рис. 1) та модернізованої (рис. 3) конструкції корпусу, МПа та загальні переміщення базової (рис. 1) та модернізованої (рис. 3) конструкції корпусу, мм.

Для базового корпусу бачимо, що максимальні еквівалентні напруження (рис. 1) $\sigma_{max} = 176,5$ МПа. Запас міцності конструкції в такому випадку складає

$$n = \sigma_T / \sigma_{max} = 620 / 176,5 = 3,513$$

Для модернізованого корпусу бачимо, що максимальні еквівалентні напруження (рис. 3) $\sigma_{max} = 194,9$ МПа. Запас міцності конструкції в такому випадку складає

$$n = \sigma_T / \sigma_{max} = 620 / 194,9 = 3,181$$

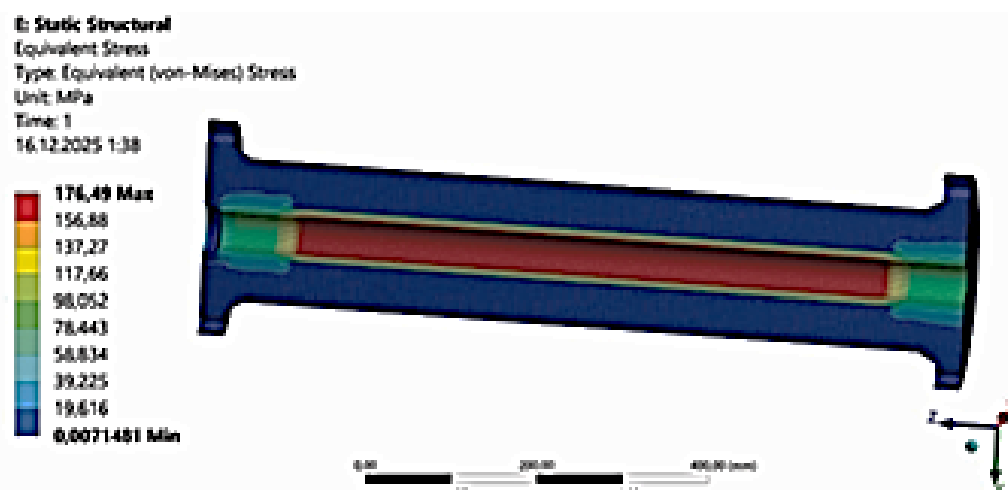


Рисунок 1 – Еквівалентні напруження за Мізесом базової конструкції, МПа

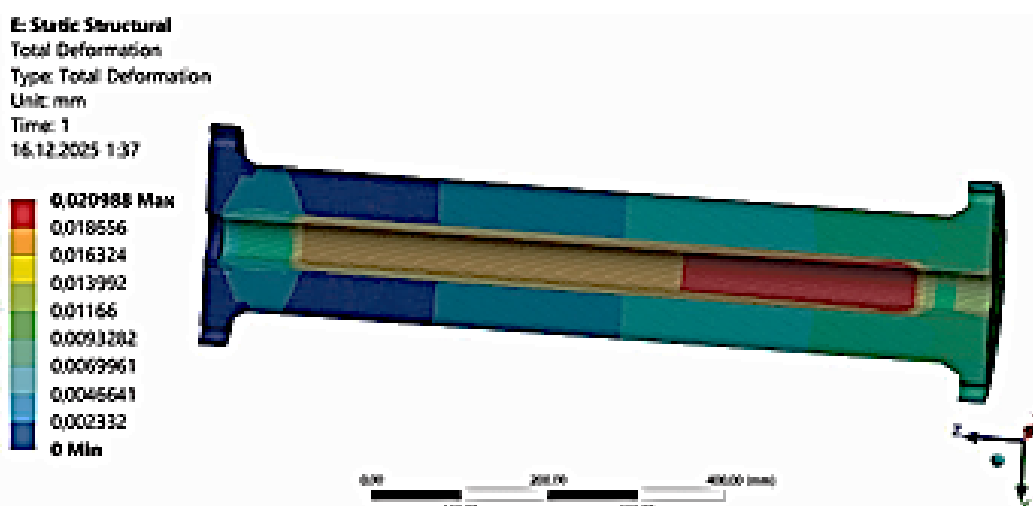


Рисунок 2 – Загальні переміщення базової конструкції, мм

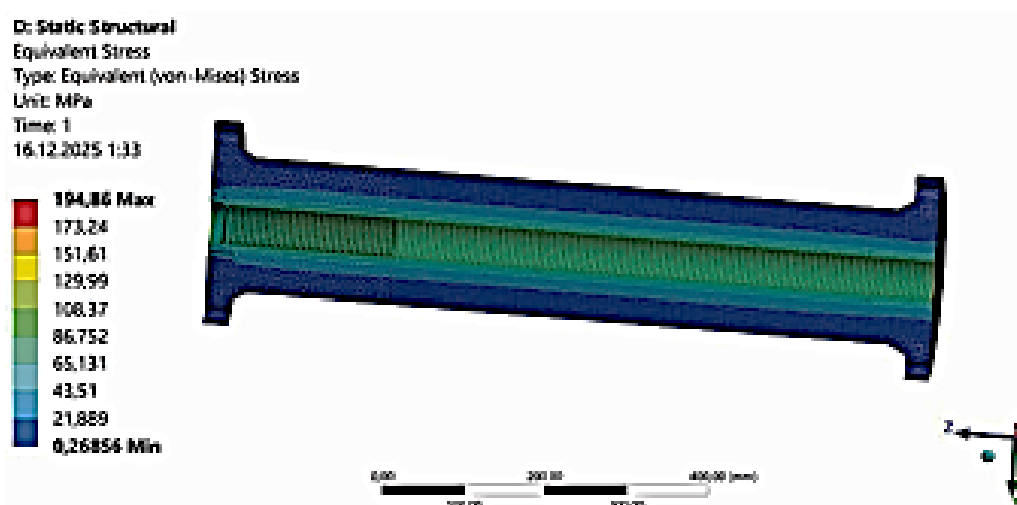


Рисунок 3 – Еквівалентні напруження за Мізесом модернізованої конструкції, МПа

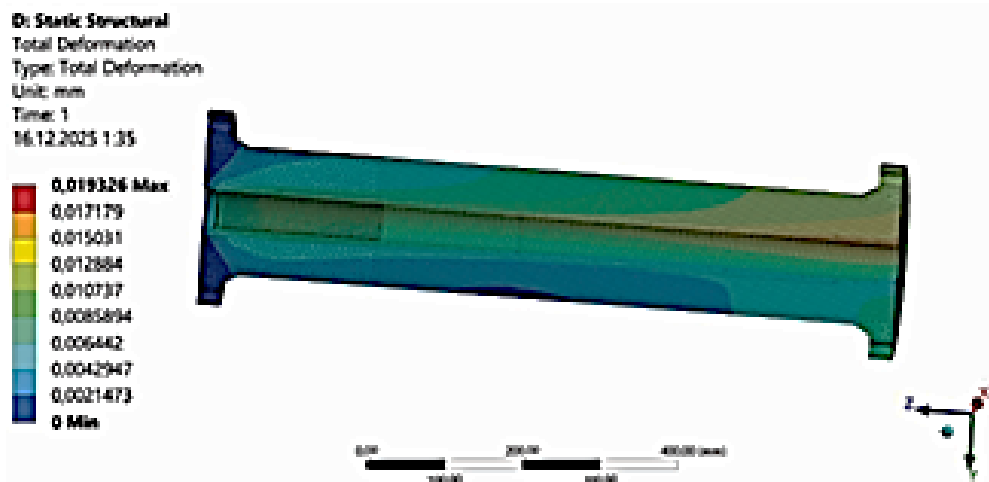


Рисунок 4 – Загальні переміщення модернізованої конструкції, мм

Максимальні переміщення складають 0,021 мм для базової конструкції (рис. 2) і 0,0193 мм для модернізованої конструкції (рис. 3) корпусу.

Аналізуючи отримані результати бачимо, що максимальні переміщення незначні, а максимальні напруження в модернізованій конструкції зросли з 176,5 до 194,9 МПа, що призвело до зменшення коефіцієнта запасу з 3,513 до 3,181. Така зміна вочевидь зумовлена внесенням конструктивних змін, а саме виконання проточок у корпусі. Їх наявність призвело до зменшення ефективної товщини перерізу та, відповідно, до скорочення відстані між навантаженими зонами, що спричинило підвищення локальних напружень – у результаті чого коефіцієнт запасу міцності знизився порівняно з початковою конструкцією.

Одночасно з цим, отримання значення коефіцієнта запасу модернізованої конструкції значно перевищує мінімально допустимий рівень $[n] = 1,6$, що свідчить про відповідність конструкції вимогам міцності та підтверджує можливість її використання в умовах промислової експлуатації.

Висновки. Таким чином, результати чисельного аналізу, виконаного в програмному комплексі ANSYS, свідчать про те, що запропонована модернізація конструкції корпусу екструдера відповідає вимогам міцності та працездатності за заданих умов навантаження. Унаслідок внесення конструктивних змін, зокрема виконання проточок, спостерігається певне підвищення локальних напружень і, відповідно, зменшення коефіцієнта запасу міцності порівняно з базовою конструкцією. Водночас отримане значення коефіцієнта запасу перевищує мінімально допустимий рівень, що підтверджує допустимість застосування даної конструкції в промислових умовах. Запропоновані конструктивні рішення не призводять до втрати несучої здатності корпусу та забезпечують його надійну роботу в процесі тривалої експлуатації.

Перелік посилань

1. Витвицький В. М., Мікульюнок І. О. Моделювання процесу живлення черв'ячного екструдера полімерною сировиною. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 136 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41177>
2. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів: навч. посіб. / І. О. Мікульюнок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 200 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25367>
3. Пат. №US7635217B2, США, В29В7/481, Гален Дж. Рокі, Браун С. Платтнер - заявл. - 03.01.2008, опубл. - 22.12.2009

СЕКЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ І ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ



Модернізація корпусу екструдера

Асмолова Д.І., студ., Швець Д.А., студ., Витвицький В.М., PhD, ас.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Описано підвищення ефективності та надійності роботи екструдера шляхом удосконалення конструкції його корпусу, що забезпечить кращі умови тепловідведення, підвищення жорсткості та зменшення зносу вузлів.

Ключові слова: черв'ячний екструдер, корпус, модернізація.

Вступ. Екструзія є одним із ключових процесів сучасного полімерного виробництва, забезпечуючи формування виробів різного призначення — від плівки та труб до компаундів і технічних профілів. Ефективність роботи екструдера значною мірою залежить від конструктивних особливостей його основних вузлів, серед яких корпус відіграє визначальну роль. Саме корпус забезпечує створення необхідних термомеханічних умов, стабільність тиску та рівномірність пластикації матеріалу, що безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту [1-2].

З розвитком технологій полімерної переробки, підвищенням вимог до енергоефективності, продуктивності та довговічності обладнання зростає потреба в удосконаленні конструкцій традиційних екструзійних систем. Корпус екструдера зазнає високих температурних та механічних навантажень, що з часом призводить до зносу, появи дефектів поверхні, зниження рівномірності теплопередачі та втрати точності технологічних параметрів. Тому модернізація корпусу стає важливим напрямом підвищення ефективності роботи обладнання.

Удосконалення конструкції корпусу дозволяє не лише продовжити ресурс екструдера, а й оптимізувати процес тепловідведення, покращити жорсткість системи, мінімізувати енергетичні витрати та стабілізувати процес екструзії [3].

Основна частина. Для обґрунтування вибору конструктивних рішень під час модернізації корпусу екструдера було здійснено аналіз сучасних технічних розробок, захищених патентами у сфері екструзійного обладнання. Особливу увагу приділено конструктивним вдосконаленням, що впливають на інтенсивність змішування, стабілізацію тиску та покращення гідродинаміки потоку, оскільки саме ці параметри визначають ефективність роботи корпусу екструдера. Серед досліджених джерел для подальшого використання обрано два патенти, які найбільш чітко відображають актуальні тенденції розвитку екструзійних систем та мають безпосередню прикладну цінність для вдосконалення конструкції.

Перший обраний патент [4] описує комбіновану систему регулювання тиску та інтенсивного змішування матеріалу в екструдері. У конструкції (рис. 1) реалізовано середньобарельний регульований клапан-заслінку 1 в поєднанні із зоною інтенсивного гомогенізування, утвореною чергуванням шнекових ділянок 4, 5 різного напрямку навівки. Таке технічне рішення забезпечує змінний гідравлічний опір потоку полімерного розплаву, підвищує рівень питомої механічної енергії процесу та ефективність перемішування без додаткового теплового навантаження.

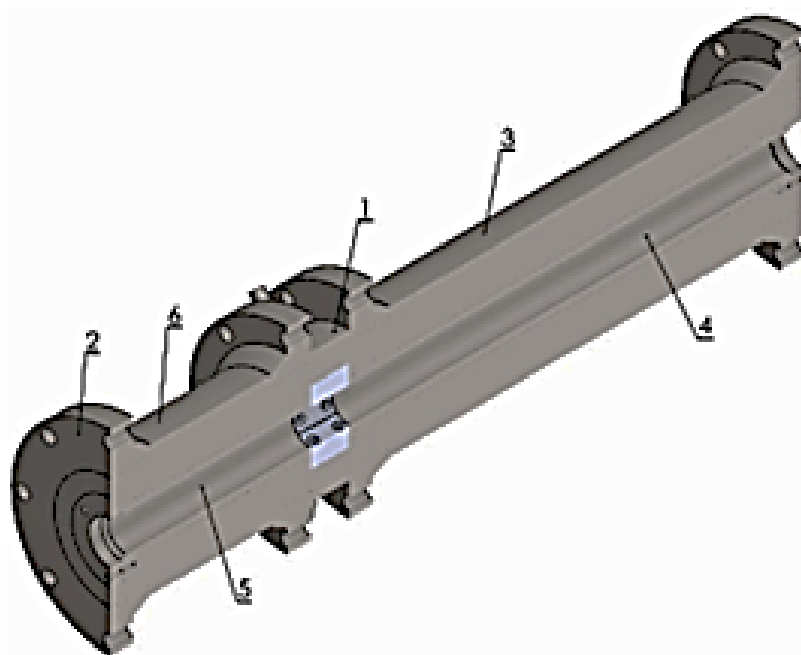


Рисунок 1 – Вузол обмежувального клапана потоку: 1 – клапан-заслінка; 2 – фланець; 3,6 – корпус; 4,5 – гільза

У другому обраному патенті [5] показано конструктивне вдосконалення конструкції екструдера, спрямованого на підвищення рівномірності переробки матеріалу та продуктивності обладнання. Проведена модернізація передбачає чергування звужувальних і розширювальних ділянок корпусу екструдера, що створює змінні зони тиску вздовж черв'яка. Це забезпечує інтенсивніше стискання й зсув матеріалу в зоні звуження та контрольоване розширення потоку в наступних ділянках, що сприяє покращенню однорідності суміші, зменшенню термічних коливань і стабілізації структури екструдату. Така архітектура також дозволяє використовувати більші матриці з більшою кількістю отворів, підвищуючи продуктивність без погіршення якості продукту.

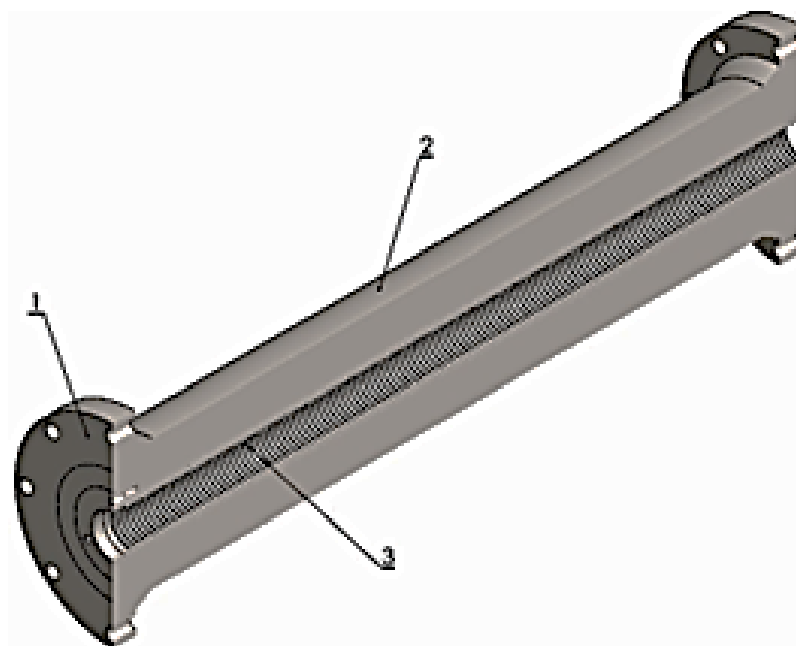


Рисунок 2 – 3D-модель циліндра одношнекового екструдера: 1 – фланець; 2 – корпус; 3 – гільза модернізована

Отже, обрані патенти [2–3] комплексно відображають два ключові напрями розвитку сучасних екструдерів — оптимізацію робочого процесу через регулювання тиску в робочій зоні та вдосконалення геометрії робочого каналу для рівномірного змішування й покращення технологічного процесу виробництва продукції.

Висновки. Аналіз обраних патентів дозволив визначити сучасні інженерні рішення, які можна використати під час модернізації корпусу екструдера. Перша модернізація показує, що застосування керованої заслінки в середній частині корпусу дає змогу регулювати тиск і покращувати змішування матеріалу. А друга – демонструє ефективність зміни геометрії робочого каналу шляхом чергування звужених і розширених ділянок, що забезпечує більш рівномірну переробку матеріалу та стабільну якість екструдату. Запропонований підхід поєднує регулювання параметрів процесу та вдосконалену форму каналу, що дозволяє покращити теплообмін, зменшити енергоспоживання та забезпечити стабільну роботу екструдера.

Перелік посилань

1. Мікульонюк І.О. Механічні процеси та обладнання виробництва полімерних і будівельних матеріалів і виробів : підруч. 5-ге вид., переробл. та доповн. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 102 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74513>
2. Витвицький В. М., Мікульонюк І. О. Моделювання процесу живлення черв'ячного екструдера полімерною сировиною. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 136 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41177>
3. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів: навч. посіб. / І. О. Мікульонюк, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 200 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25367>
4. Пат. №US7635217B2, США, В29В7/481, Гален Дж. Рокі, Браун С. Платтнер - заявл. - 03.01.2008, опубл. - 22.12.2009
5. Пат. №US20100260882A1, США, А23N17/005, Джозеф П. КірнсГален Дж. РокіФіліп Б. ВілцЕнтоні Л. БрунінгЛафе Н. Бейлі - заявл. - 08.04.2009, опубл. - 14.10.2010.