

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

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ **Олександр СОКОЛЬСЬКИЙ**

«_____» _____ 2026 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг пакування та пакувального обладнання»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему: Екструдер для грануляції відходів упаковки з модернізацією живильника

Студент IV к, групи ЛУ-21 Хорошун Юрій Володимирович

(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник проєкту:

д.т.н., доцент, Сокольський О.Л.

(вчена ступінь, звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Консультанти з питань

МОДЕРНІЗАЦІЇ: д.т.н., проф. Щербина В.Ю.

ТЕХ. МАШ.: ст. викл. Борщик С.О.

ОХОРОНИ ПРАЦІ: ст. викл. Ковтун А.І.

РЕЦЕНЗЕНТ

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

Студент _____

Київ 2026

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

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олександр СОКОЛЬСЬКИЙ

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту
Хорошуну Юрію Володимировичу

1. Тема проєкту «Екструдер для грануляції відходів упаковки з модернізацією живильника», керівник проєкту Сокольський Олександр Леонідович, д.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «19.05» 2026 р. № 1817-С
2. Термін подання студентом проєкту 14.06.2026 р.
3. Вихідні дані до проєкту

Черв'ячний екструдер для грануляції відходів упаковки (ЧП 45×25): діаметр черв'яка – $D = 45$ мм, робоча довжина черв'яка – $L = 1,35$ м, крок витка – 35 мм, ступеневий стержень $\varnothing 40/\varnothing 34/\varnothing 39,5$ мм; матеріал перероблення – поліпропіленгліколь (PPG) марки 40, температура перероблення – 230 °С, густина розплаву – 1036 кг/м³; продуктивність – 30 кг/год; матеріал черв'яка – сталь 40ХН; модернізація живильника – за патентом US 9 227 344 В2.

4. Зміст пояснювальної записки

Пояснювальна записка містить такі текстові частини: «Пояснювальна записка», «Охорона праці», «Технологія машинобудування», «Загальні висновки», «Перелік посилань», «Додатки». ПЗ включає такі розділи: Вступ; Призначення та галузь застосування виробу; Технічна характеристика базової машини; Опис базової конструкції, її основних частин та принципу дії; Літературний та патентний огляд, обґрунтування запропонованої модернізації; Розрахунки; Охорона праці; Технологія машинобудування; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу

1 Технологічна схема виробництва; 2 Загальний вигляд машини з модернізацією; 3 Складальне креслення модернізованого вузла (живильника); 4 Деталювання; 5 Плакат 3D-моделювання вузла для числового розрахунку; 6 Плакат результатів числового розрахунку (базовий і модернізований шнек).

6. Консультанти розділів проєкту

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

7. Дата видачі завдання 19.05.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Вступ	19.05.26-22.05.26	
2	Призначення та галузь застосування виробу, який проєктується	23.05.26-24.05.26	
3	Технічна характеристика базової машини	25.05.26-26.05.26	
4	Опис базової конструкції, її основних частин та принципу дії	27.05.26-30.05.26	
5	Літературний та патентний огляд стану питання	31.05.26-02.06.26	
6	Розрахунки	03.06.26-05.06.26	
7	Охорона праці та навколишнього середовища	06.06.26-08.06.26	
8	Технологія машинобудування	09.06.26-12.06.26	
9	Загальні висновки	13.06.26-14.06.26	

Студент

Ю.В. Хорошун

Керівник проєкту

О.Л. Сокольський

ЗМІСТ

ВСТУП.....	1
1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБУ	3
2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОЇ МАШИНИ.....	4
3 ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ.....	5
3.1 Основні складові частини.....	5
3.2 Принцип дії	6
3.3 Класифікація та конструктивні особливості	7
4 ЛІТЕРАТУРНИЙ ТА ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД.....	9
4.1 Огляд існуючих рішень	9
4.2 Обґрунтування запропонованої модернізації.....	17
4.3 Опис конструкції модернізованого завантажувального пристрою.....	21
5 РОЗРАХУНКИ	22
5.1 Параметричні та кінематичні розрахунки	22
5.2 Розрахунок шнекового живильника	25
5.3 Розрахунок на міцність	26
5.4 Тепловий розрахунок	26
5.5 Тривимірне моделювання модернізованого вузла	28
5.6 Числові розрахунки (метод скінченних елементів).....	33
6 ОХОРОНА ПРАЦІ	38
6.1 Мікроклімат та повітря робочої зони.....	39
6.2 Виробничий шум та вібрація	40
6.3 Виробниче освітлення.....	41
6.4 Електробезпека	41
6.5 Пожежна безпека	42
7 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ.....	45

ЛУ21.067246.01-90ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Розроб.		Хорошун			Екструдер для грануляції відходів упаковки з модернізацією живильника			Літ.
Перевір.		Сокольський						Арк.
								Аркушів
Н. контр.								
Затв.		Сокольський						
								КП ім. Ігоря Сікорського, ФАПБ, ХПСМ, гр. ЛУ-21
								1 53

7.1 Опис і призначення деталі «Проміжна вставка»	45
7.2 Вибір та розрахунок пристосування для певної операції	47
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	54
ДОДАТКИ	55

					ЛУ21.067246.01-90ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Екструдер для грануляції відходів упаковки з модернізацією живильника	Літ.	Арк.	Аркушів	
Розроб.		Хорошун					1	53	
Перевір.		Сокольський				КП ім. Ігоря Сікорського, ФАПШЕ, ХПСМ, гр. ЛУ-21			
Н. контр.									
Затв.		Сокольський							

РЕФЕРАТ

У цьому дипломному проєкті розроблено модернізацію живильника екструдера для грануляції відходів упаковки, що є темою бакалаврської дипломної роботи. Робота включає такі розділи, як «Пояснювальна записка», «Розрахунки», «Охорона праці», «Технологія машинобудування» та графічну частину. Загальний обсяг дипломного проєкту становить 70 сторінок, 22 рисунки, 9 таблиць, 8 джерел та 6 аркушів графічної частини формату А1.

У проєкті описано технологічний процес грануляції відходів полімерної упаковки, в якому використовується одночерв'ячний екструдер ЧП 45×25. Призначення і роль екструдера в технологічній схемі також детально розглянуто.

Робота містить технічну характеристику, конструкцію і принцип дії черв'ячного екструдера, а також параметричні, кінематичні, теплові розрахунки та розрахунки на міцність, що підтверджують його працездатність і надійність.

У проєкті проведено літературно-патентний пошук для вибору варіанта модернізації живильника. Модернізація полягає в коаксіальному розміщенні циклона всередині завантажувальної воронки із застосуванням набивного шнека, який примусово подає подрібнений матеріал у зону змішування. Це усуває зводоутворення й забивання вихідного отвору та забезпечує рівномірну подачу легких фракцій сировини. Ефективність запропонованого рішення підтверджено порівняльним числовим моделюванням напружено-деформованого стану базового та модернізованого шнека методом скінченних елементів: запас міцності модернізованої конструкції становить 2,98 проти 2,79 у базової.

Ключові слова: екструдер, грануляція, відходи упаковки, живильник, циклон, набивний шнек, черв'як, модернізація, числове моделювання.

ABSTRACT

In this diploma project, the modernization of the feeder of an extruder for granulation of packaging waste has been developed, which is the topic of the bachelor's diploma work. The work includes such parts as "Explanatory note", "Calculations", "Occupational safety", "Mechanical engineering technology" and the graphic part. The total volume of the diploma project is 53 pages, 15 figures, 9 tables, 8 references and 6 sheets of A1 format graphic part.

The project describes the technological process of granulation of polymer packaging waste, in which the single-screw extruder ЧП 45×25 is used. The purpose and role of the extruder in the technological scheme are also considered in detail.

The work contains the technical characteristics, design and operating principle of the screw extruder, as well as parametric, kinematic, thermal and strength calculations that confirm its operability and reliability.

A literature and patent search was carried out in the project to select a variant of feeder modernization. The modernization consists in the coaxial arrangement of a cyclone inside the feed hopper with a stuffing screw that forcibly feeds the shredded material into the mixing zone. This eliminates bridging and clogging of the outlet and ensures uniform feeding of light fractions of raw material. The effectiveness of the proposed solution is confirmed by comparative numerical simulation of the stress-strain state of the base and modernized screw by the finite element method: the safety factor of the modernized design is 2.98 versus 2.79 for the base one.

Keywords: extruder, granulation, packaging waste, feeder, cyclone, stuffing screw, screw, modernization, numerical simulation.

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ

ДП – дипломний проєкт;
ПЗ – пояснювальна записка;
ОПП – освітньо-професійна програма;
МСЕ – метод скінченних елементів;
СЕ – скінченний елемент;
PPG – поліпропіленгліколь;
D – діаметр черв'яка, м;
L – робоча довжина черв'яка, м;
t – температура перероблення, °C;
 ρ – густина, кг/м³;
Q – продуктивність, кг/год;
 ΣK_z – сумарний коефіцієнт геометричної форми головки;
 ΔP – перепад тиску в екструзійній головці, Па;
поб – частота обертання черв'яка, об/с;
 σ_t – границя текучості, МПа;
 σ_b – границя міцності, МПа;
 σ_{max} – максимальні еквівалентні напруження, МПа;
 Δ_{max} – максимальні переміщення, мм;
E – модуль пружності, Па;
 ν – коефіцієнт Пуассона;
n – запас міцності.

ВСТУП

Полімерні матеріали є основою сучасної пакувальної індустрії, проте після використання упаковка перетворюється на значний обсяг відходів, що потребують перероблення. Найпоширенішим методом рециклінгу термопластичної упаковки є екструзійна грануляція: подрібнені відходи розплавляються, гомогенізуються та формуються у гранули, придатні для повторного використання у виробництві. Ефективність цього процесу значною мірою визначається стабільністю живлення екструдера сировиною.

Подрібнені відходи упаковки — обрізки плівок, стрічок та інших тонкостінних виробів — мають низьку насипну густину, розвинену поверхню та схильність до злипання. У завантажувальній воронці такі матеріали утворюють зводи й затори, через що подача сировини в зону переробки стає нерівномірною, а продуктивність і якість гранул — нестабільними. Тому вдосконалення завантажувального пристрою (живильника) є актуальним завданням для обладнання з перероблення відходів упаковки.

Метою дипломного проєкту є підвищення стабільності подачі сировини та працездатності одночерв'ячного екструдера для грануляції відходів упаковки шляхом модернізації живильника.

Для досягнення мети поставлено такі завдання: проаналізувати призначення, технічну характеристику та конструкцію базової машини — одночерв'ячного екструдера ЧП 45×25; виконати літературний та патентний огляд систем подачі матеріалу в шнекових екструдерах; обґрунтувати модернізацію завантажувального пристрою на основі обраного патентного рішення; виконати параметричні, кінематичні, теплові розрахунки та розрахунки на міцність; побудувати тривимірні моделі та провести порівняльний числовий аналіз напружено-деформованого стану базової і модернізованої конструкцій методом скінченних елементів; виконати розрахунок шнекового живильника; розробити розділи з охорони праці та технології машинобудування.

Об'єктом проєктування є одночерв'ячний екструдер ЧП 45×25 для грануляції відходів упаковки з поліпропіленгліколю марки 40 продуктивністю 30 кг/год за температури перероблення 230 °С. Предметом — конструкція завантажувального пристрою (живильника) та шнека екструдера.

Сутність запропонованої модернізації, виконаної за патентом US 9 227 344 B2, полягає в коаксіальному розміщенні циклона всередині завантажувальної воронки із застосуванням набивного шнека, який примусово транспортує матеріал крізь вихідний отвір циклона в зону змішування. Це усуває зводоутворення та забивання навіть для легких і схильних до злипання фракцій, підвищує ступінь заповнення міжжиткового простору та забезпечує рівномірну подачу грануляту.

Розрахунки виконано за інженерними методиками проєктування екструзійного обладнання у середовищі Mathcad із застосуванням програми інтерполяції в'язкості мовою Visual Basic for Applications; тривимірне моделювання здійснено в SolidWorks, числовий аналіз — у CAE-системі ANSYS. Результати роботи можуть бути використані підприємствами, що переробляють відходи полімерної упаковки методом екструзії.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБУ

Одночерв'ячний екструдер ЧП 45×25 призначений для перероблення термопластичних полімерних матеріалів, зокрема відходів упаковки, методом екструзії з наступним гранулюванням. Машина забезпечує безперервне транспортування, ущільнення, плавлення та гомогенізацію сировини з подальшим продавлюванням розплаву крізь гранулювальну головку й формуванням гранул сталого гранулометричного складу.

Виріб орієнтований насамперед на вторинне перероблення полімерних відходів упаковки — обрізків плівок, стрічок та інших напівфабрикатів. Перероблення таких матеріалів дозволяє отримувати вторинний гранулят, придатний для подальшого використання у виробництві, що відповідає сучасним вимогам ресурсозбереження та поводження з полімерними відходами.

Галуззю застосування екструдера є підприємства хімічної, переробної та пакувальної промисловості, а також лінії вторинного перероблення полімерів. Порівняно з альтернативними методами формування полімерів (пресуванням, литтям) екструзійне гранулювання забезпечує найбільш ефективний та безперервний процес перероблення гранульованої й подрібненої сировини, що зумовлює його широке використання у великотоннажних виробництвах.

2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОЇ МАШИНИ

Основні технічні характеристики базового одночерв'ячного екструдера ЧП 45×25 наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика екструдера ЧП 45×25

Найменування параметра	Значення
Тип екструдера	одночерв'ячний, ЧП 45×25
Перероблюваний матеріал	поліпропіленгліколь (PPG), марка 40
Температура перероблення, °C	230
Густина розплаву, кг/м³	1036
Масова продуктивність, кг/год	30
Об'ємна продуктивність, мм³/с	8043,76
Діаметр черв'яка, мм	45
Робоча довжина черв'яка, м	1,35
Крок гвинтової нарізки, мм	35
Внутрішній діаметр циліндра, мм	45
Зовнішній діаметр циліндра, мм	75
Діаметр кожуха, мм	237
Частота обертання черв'яка, об/с (об/хв)	1,266 (≈76)
Перепад тиску в екструзійній головці, Па	1,318·10 ⁶
Температура кожуха / навколишнього повітря, °C	60 / 20
Матеріал черв'яка	сталь 40ХН
Маса корпусу, кг	24,358
Потужність приводу, кВт	за розрахунком (розд. 5)

3 ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ

Екструдер для грануляції являє собою комплексне технологічне обладнання, основними складовими частинами якого є циліндр (корпус), черв'як, привід із редуктором, завантажувальний пристрій, система нагрівання й охолодження та екструзійна (гранулювальна) головка. Принципову схему одночерв'ячного екструдера наведено на рисунку 3.1.

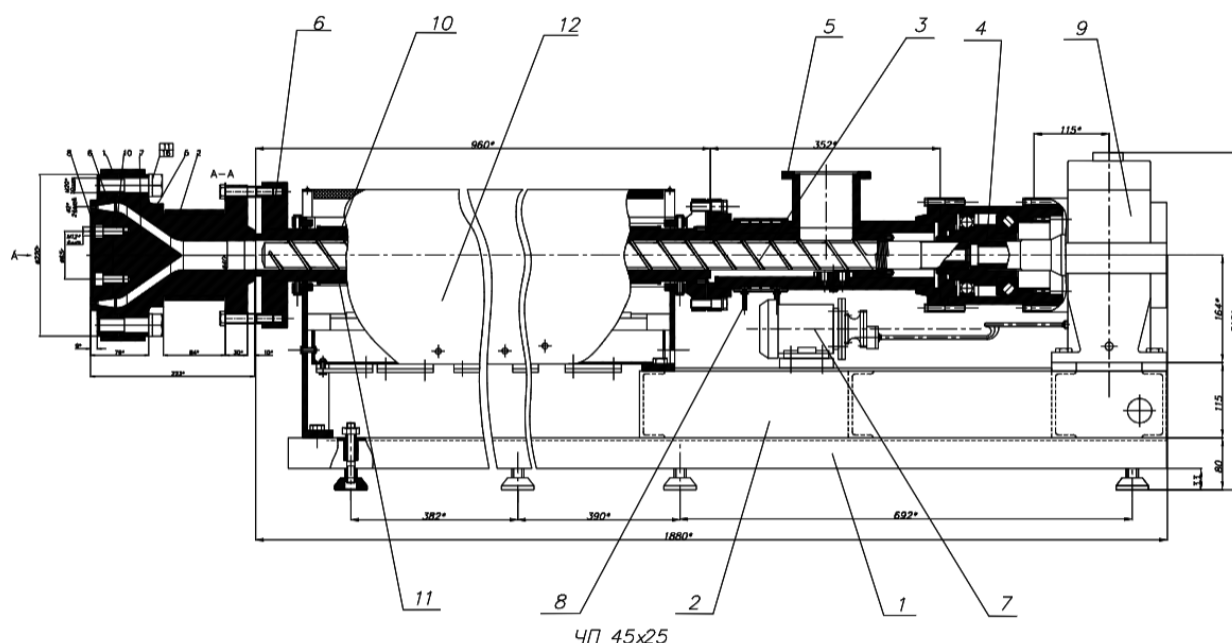


Рисунок 3.1 – Принципова схема одночерв’ячного екструдера: 1 – рама (станина); 2 – кожух станини; 3 – завантажувальний патрубок; 4 – підшипниковий вузол; 5 – завантажувальна лійка; 6 – фланцеве з’єднання головки; 7 – система змащення (насос); 8 – нагрівники; 9 – редуктор (привід); 10 – черв’як (шнек); 11 – циліндр; 12 – кожух термоізоляції

Циліндр (корпус) є базовою несучою деталлю, всередині якої обертається черв'як. Внутрішня поверхня циліндра піддається інтенсивному зношуванню та сприймає тиск розплаву, тому виготовляється зі зносостійких сталей. Зовні на

циліндрі розміщують нагрівники, поділені на кілька зон із незалежним регулюванням температури.

Черв'як є основним робочим органом машини, що транспортує, ущільнює, плавить і гомогенізує матеріал. Передача крутного моменту від редуктора до черв'яка здійснюється через шліцьове з'єднання, що дозволяє демонтувати черв'як без розбирання фланцевих вузлів. Через значні осьові навантаження обов'язковим є застосування упорного підшипника, інтегрованого в редуктор або винесеного окремо.

Привід із редуктором забезпечує обертання черв'яка із заданою частотою. Частота обертання плавно регулюється приводами постійного або змінного струму; зі збільшенням діаметра черв'яка максимальна допустима частота його обертання зменшується.

Завантажувальний пристрій (лійка, бункер) призначений для подачі сировини в зону живлення екструдера. Саме цей вузол визначає стабільність подачі матеріалу й підлягає модернізації в межах цього проєкту.

Система нагрівання й охолодження підтримує заданий температурний режим. Нагрівання циліндра здійснюється переважно електричними нагрівачами опору, контрольованими термopарами. Для відведення надлишку теплоти дисипації застосовують повітряні або рідинні системи охолодження; зону подачі зазвичай охолоджують водою для запобігання передчасному плавленню матеріалу.

Екструзійна головка формує розплав. Для грануляції застосовують прямотечійні та кільцеві гранулювальні головки. У цьому проєкті розглядається стренгове гранулювання, за якого розплав продавлюється крізь отвори фільтрної плити, охолоджується у водяній ванні, після чого стренги ріжуться на гранули обертовим ножом.

3.2 Принцип дії

Гранульований або подрібнений полімер подається у завантажувальну лійку 2 (рисунок 3.1), після чого транспортується вздовж циліндра 4 за

допомогою обертового черв'яка 3, що приводиться в рух приводом 1. Завдяки спеціально підібраній геометрії черв'яка матеріал у процесі переміщення ущільнюється, плавиться та гомогенізується, після чого під тиском надходить до екструзійної головки, закріпленої на циліндрі фланцевим з'єднанням 6. Повітря, що міститься між частинками сировини, витискається назад через завантажувальну лійку внаслідок ущільнення матеріалу.

Основна частина теплоти, необхідної для плавлення полімеру, утворюється за рахунок дисипації механічної енергії приводу (в'язкого тертя в розплаві); додаткове тепло підводиться від нагрівників 5 на поверхні циліндра. Оскільки зміна частоти обертання черв'яка одночасно впливає і на продуктивність, і на тепловий режим, керування процесом передбачає узгоджене регулювання обох параметрів.

Оскільки насипна густина полімеру менша за густину розплаву, у зоні плавлення об'єм гвинтового каналу поступово зменшується, переважно за рахунок зменшення глибини нарізки. Відношення площ поперечного перерізу каналу в зоні подачі та зоні гомогенізації називають ступенем стиснення черв'яка.

3.3 Класифікація та конструктивні особливості

Екструдери класифікують за діаметром черв'яка та відношенням його робочої довжини до діаметра (L/D). Типові діаметри становлять від 20 до 320 мм, а значення L/D для пластикувальних екструдерів зазвичай дорівнює 20–30. Для термонестабільних полімерів використовують менші значення L/D , тоді як для машин із дегазацією воно може перевищувати 40.

Найпоширенішим є тризонний черв'як, який по довжині поділяється на зону подачі (з циліндричним осердям і максимальною глибиною каналу), зону плавлення (з конічним осердям) та зону гомогенізації (з циліндричним осердям і найменшою глибиною нарізки). Зазвичай крок гвинтової нарізки дорівнює діаметру черв'яка (кут підйому близько $17,7^\circ$), а основним параметром, що підлягає визначенню, є глибина каналу в різних зонах. Для базового екструдера

ЧП 45×25 діаметр черв'яка становить 45 мм, робоча довжина — 1,35 м, крок витка — 35 мм.

4 ЛІТЕРАТУРНИЙ ТА ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД

Метою патентно-літературного огляду є виявлення технічних рішень, здатних підвищити стабільність роботи екструдера для грануляції, насамперед у зоні подачі матеріалу. Пошук виконувався з використанням баз даних Українського національного органу інтелектуальної власності (www.uipv.ua), Google Patents та Espacenet Європейського патентного відомства. Відібрані рішення охоплюють основні напрями вдосконалення систем завантаження та подачі сировини в шнекових екструдерах.

4.1 Огляд існуючих рішень

Завантажувальний пристрій є одним із ключових вузлів екструдера, що визначає стабільність і продуктивність усього технологічного процесу [1]. Особливої актуальності надійна подача матеріалу набуває у виробництвах, де поряд зі свіжим гранулятом переробляються подрібнені відходи упаковки — обрізки плівок, стрічок та інших полімерних напівфабрикатів. Через низьку насипну густину та схильність до злипання такі матеріали утворюють зводи на виході сепаратора, що спричиняє нестабільну роботу подавального шнека та погіршення якості екструдату [2].

Оскільки саме в зоні завантаження найчастіше виникають проблеми нерівномірної подачі, утворення зводів і забивання, патентний пошук було зосереджено на конструктивних рішеннях систем подачі та завантаження матеріалу. За результатами огляду відібрано шість патентів, що охоплюють різні підходи до вирішення зазначеної проблеми.

Патент US9227344B2 (BSW Machinery Handels GmbH, США, 2016 р.) [3].

Патент стосується пристрою подачі грануляту та наповнювача до шнека екструдера. Ключова проблема, яку вирішує винахід, — схильність подрібнених відходів та легких фракцій матеріалу до утворення «зводів» у вихідному отворі

циклона, що призводить до забивання та нерівномірної подачі. Причинами утворення зводів є статичний заряд частинок, їхня схильність до агломерації та мала вага. Наслідком є нестабільна робота шнекового транспортера, часті перерви у виробництві та збільшена витрата свіжого грануляту.

Запропоноване рішення передбачає розміщення циклона всередині завантажувальної воронки коаксіально з нею, так що вихідний отвір циклона виходить у кільцеподібну зону воронки. Набивний шнек проходить аксіально крізь вихідний отвір циклона і заходить у зону змішування. Завдяки цьому матеріал виводиться не лише під дією сили тяжіння, а примусово транспортується шнеком — це усуває утворення зводів і підвищує ступінь заповнення. Повітряна циркуляція всередині циклона додатково підтримує матеріал у розпушеному стані. Циклон має конічну сепараційну зону та циліндричну зону подачі, внутрішній діаметр якої відповідає зовнішньому діаметру набивного шнека; зона змішування виконана у формі воронки із поперечним перерізом, що звужується в напрямку транспортування, що сприяє

ущільненню та гомогенізації суміші перед потраплянням на основний шнек

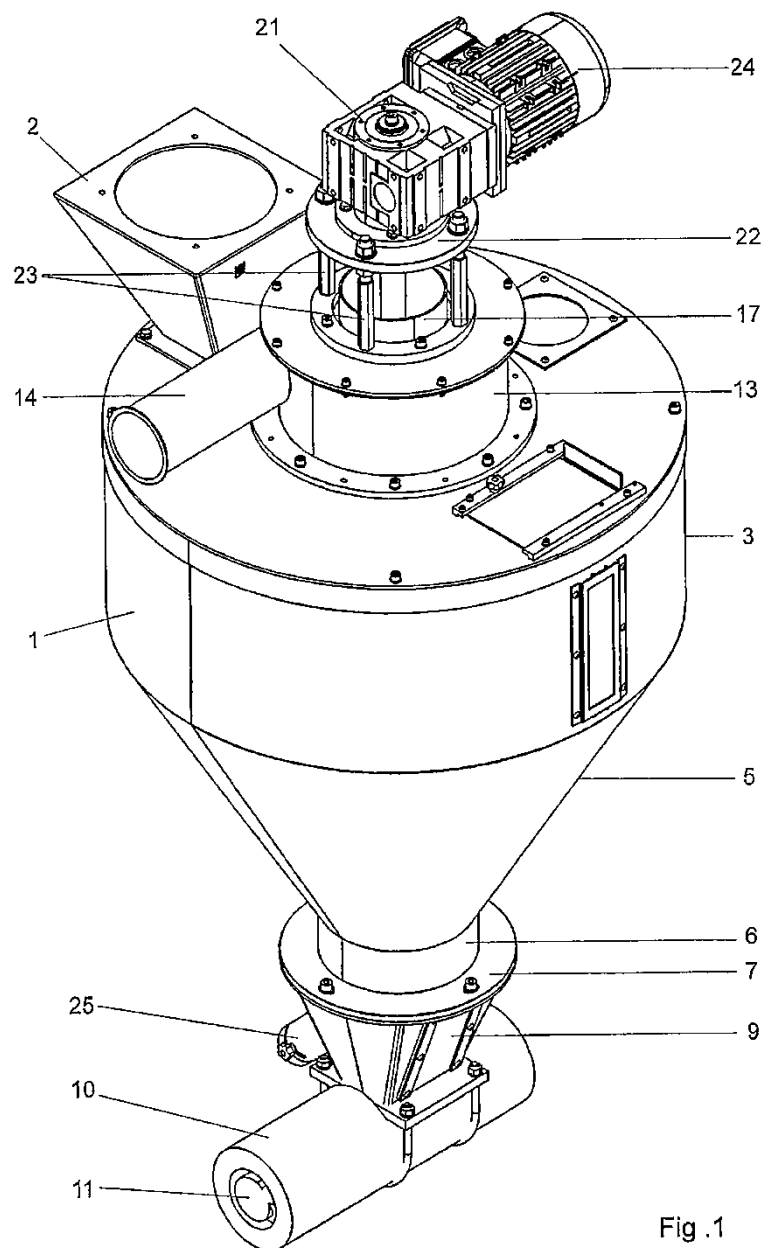


Fig .1

екструдера.

Рисунок 4.1 – Загальний вигляд завантажувального пристрою за патентом
US9227344B2

Патент US11597118B2 (AIM3D GmbH, США, 2023 р.) [4].

Патент описує пристрій та метод екструзії термомеханічно деформованих гранульованих матеріалів у вертикальному шнековому екструдері компактної конструкції. Задача винаходу — суттєво скоротити відношення довжини до діаметра шнека, зберігаючи високий рівень ущільнення матеріалу. Ключове

рішення полягає у розміщенні у воронкоподібній зоні подачі подрібнювального інструменту, закріпленого радіально на внутрішній стінці воронки.

Подрібнювальний інструмент виконує дві функції: унеможливорює обертання матеріалу разом зі шнеком і примусово направляє його в осьовому напрямку; крім того, частина грубого грануляту подрібнюється, утворюючи пил, який заповнює проміжки між великими частинками та підвищує насипну густину ще до зони плавлення. Це дозволяє скоротити відношення L/D екструдера до 1–3 замість стандартних 16–20. Конструкція розроблена насамперед для компактних мобільних екструдерів у системах адитивного виробництва.

Fig. 1

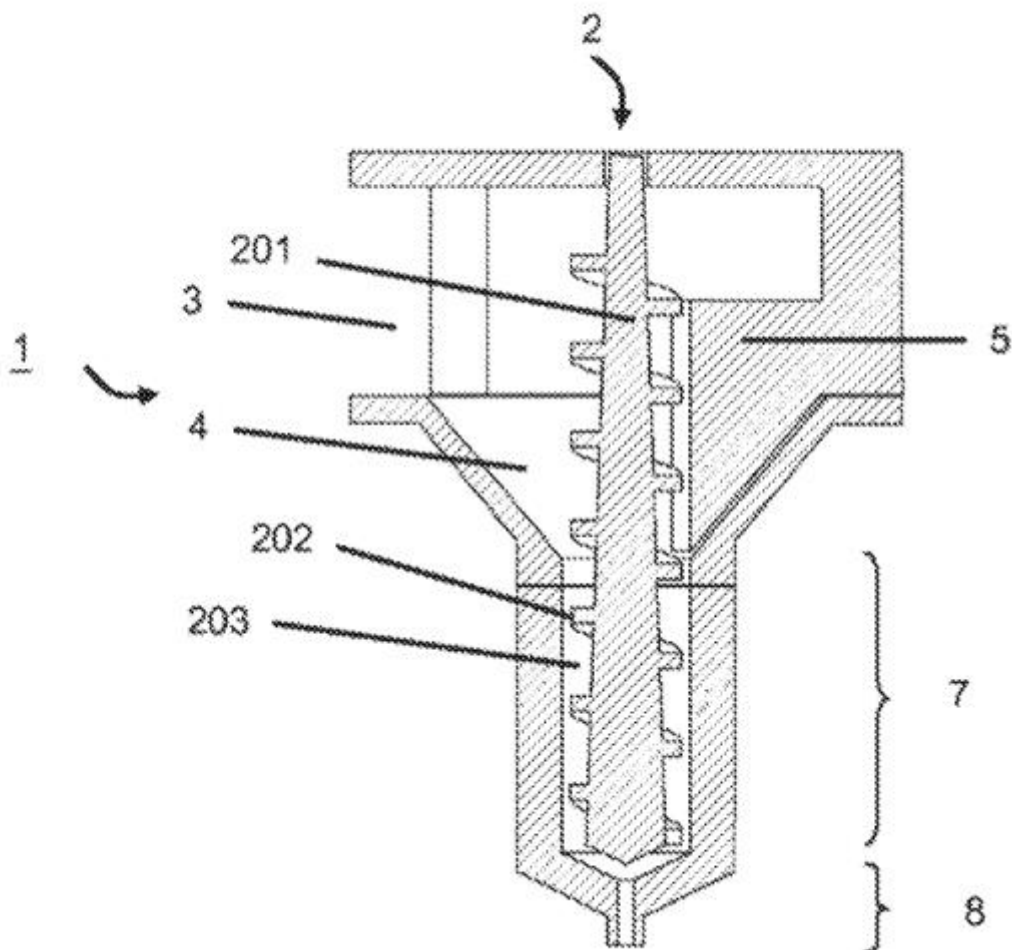
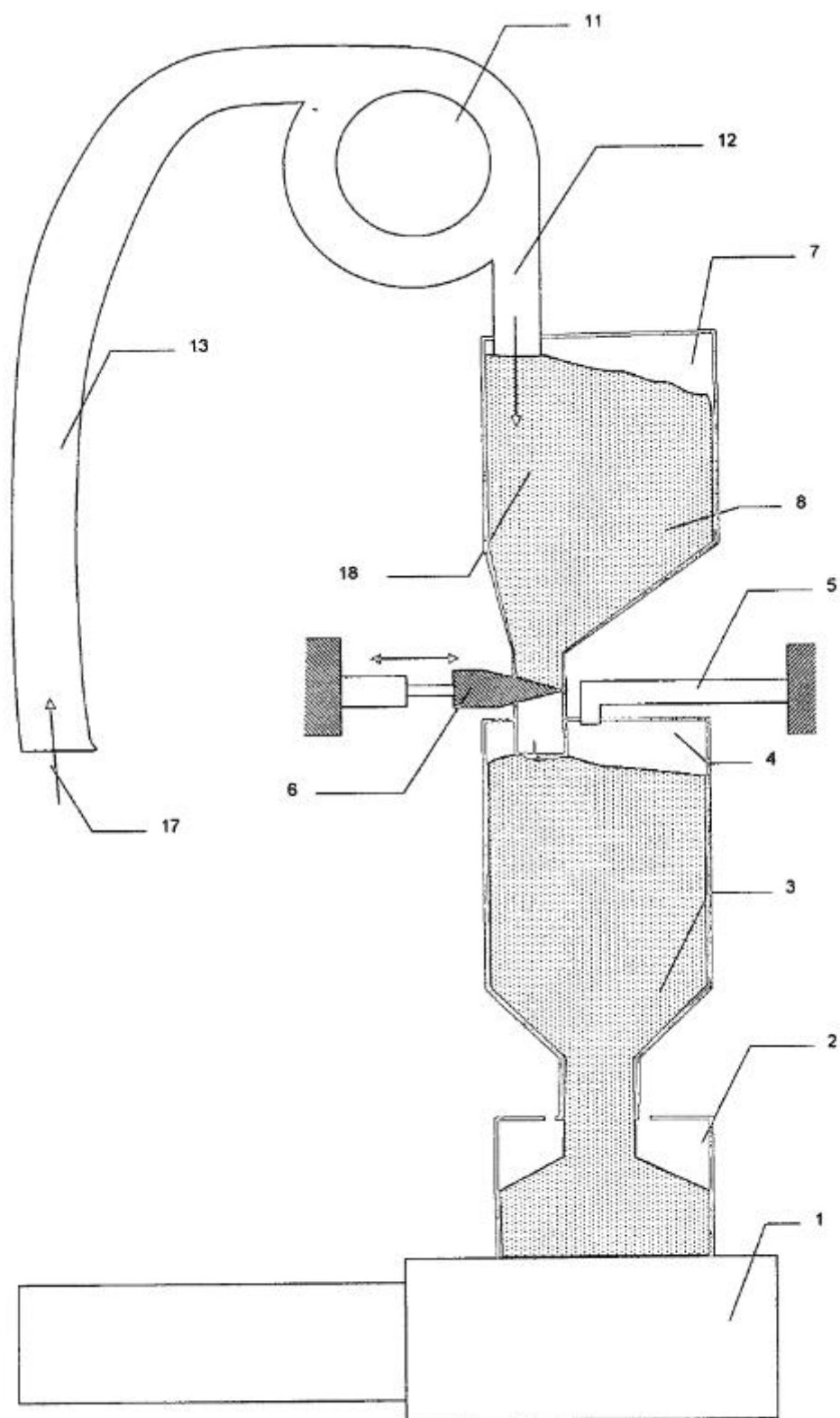


Рисунок 4.2 – Загальний вигляд за патентом US11597118B2

Патент DE102004051196A1 (Rolf Hessenbruch, Німеччина, 2006 р.) [5].

Патент присвячений методу контрольованого заповнення та спорожнення бункерних систем для подачі грануляту в екструдер. Система складається з накопичувального бункера і зважувального бункера з комп'ютерним управлінням, з'єднаних засувним клапаном. У традиційних системах обидва бункери підтримуються майже повністю заповненими, що ускладнює перехід між різними видами матеріалу.

Запропоноване рішення полягає в тому, що обсяг матеріалу в накопичувальному бункері становить лише задану частку від погодинної потреби (наприклад, одну п'яту або одну десяту). Кожного циклу накопичувальний бункер повністю спорожнюється у зважувальний, після чого знову наповнюється на ту саму частку під управлінням комп'ютера. Це забезпечує швидкий і чистий перехід між різними видами грануляту без ручного втручання.



Figur 1

Рисунок 4.3 – Схема бункерної системи за патентом DE102004051196A1

Патент CN208068820U (Beijing Technology and Business University, Китай, 2018 р.) [6].

Патент описує повністю автоматичну систему подачі для полімерного екструдера з функціями антиблокування, автоматичного регулювання швидкості та рівномірного змішування. Систему розроблено для переробки полімолочної кислоти (PLA), гранули якої мають гладку поверхню і схильні до ковзання та застрягання у щілинах спіральних транспортерів.

Система включає два транспортери з вихровими пластинами на ланцюговому контурі, що одночасно запобігає застряганням та рівномірно змішує компоненти. Чотири лазерні сканери вимірюють ступінь заповнення відсіків, і програмований контролер підтримує його в діапазоні 50–80%, регулюючи швидкість двигуна. Накопичувальний бункер обладнаний триступеневою дуговою мішалкою та інтелектуальними зірчастими клапанами, що автоматично регулюють перехід матеріалу між зонами.

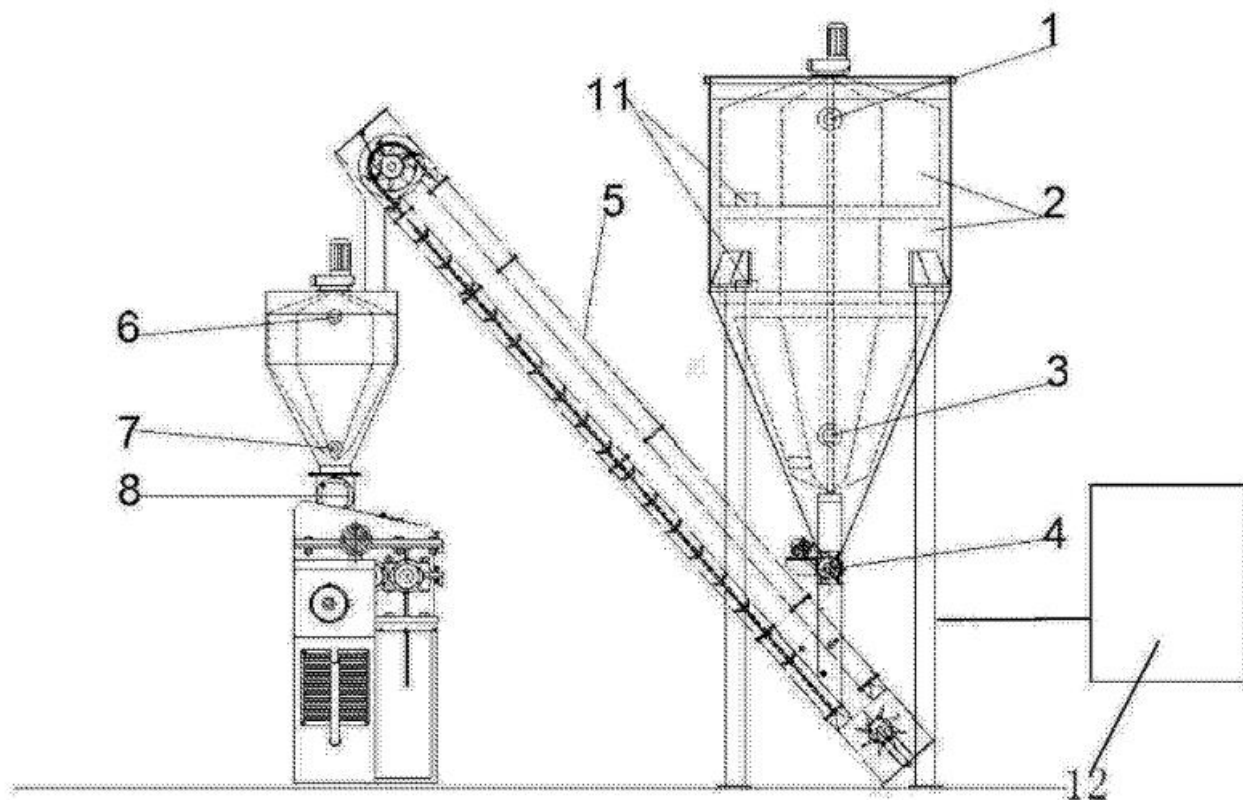


Рисунок 4.4 – Система подачі за патентом CN208068820U

Патент CN114368126A (Huazhong University of Science and Technology, Китай, 2022 р.) [7].

Патент розкриває пристрій примусової подачі для екструдера, розміщений безпосередньо в зоні завантажувального отвору циліндра. Проблема полягає в тому, що на вторинних зонах завантаження двошнекових екструдерів матеріал із поганою текучістю або низькою густиною не може самостійно потрапити в зону переробки і накопичується біля стінок отвору, що порушує точність компаундування.

Пристрій містить дві штовхальні пластини, симетрично розташовані вздовж внутрішніх стінок завантажувального отвору, що здійснюють зворотно-поступальний рух за допомогою кривошипно-шатунного механізму або пневмоциліндрів. Нижні кінці пластин виконані дугоподібними за радіусом отвору циліндра, що забезпечує щільне прилягання до шнеків і максимальний ефект вштовхування матеріалу. Конструкція проста, компактна і не потребує суттєвого доопрацювання основного обладнання.

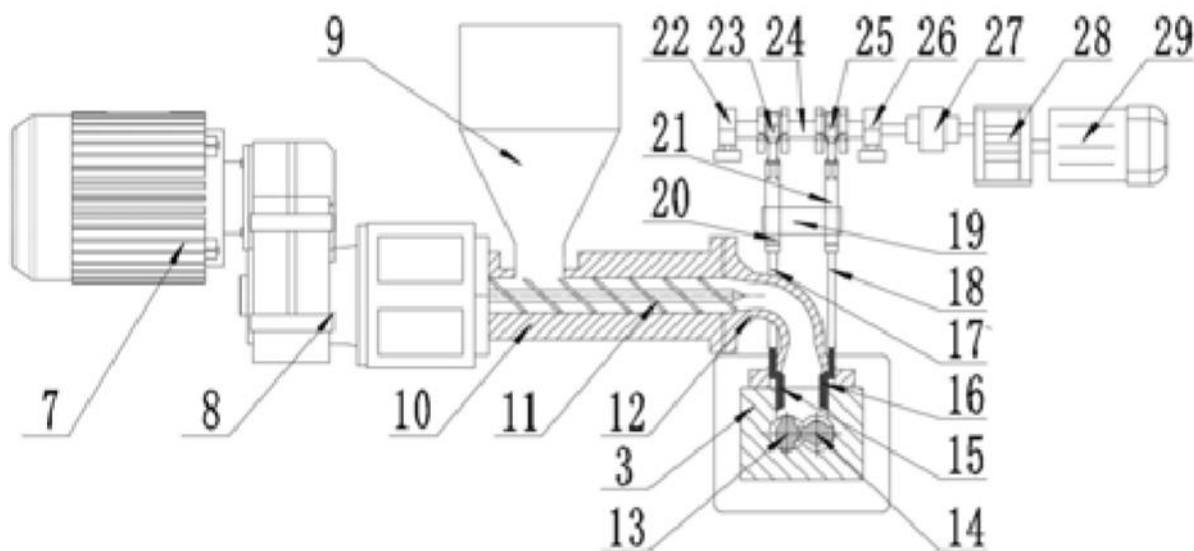


Рисунок 4.5 – Пристрій примусової подачі за патентом CN114368126A

Патент JP2006272555A (Toshiba Machine Co. Ltd., Японія, 2006 р.) [8].

Патент стосується методу подачі термопластичного матеріалу — полімерного порошку, матеріалів із низькою насипною густиною та добавок — до двошнекового екструдера за допомогою кількох ваговтрачаючих дозаторів.

Проблема полягає в тому, що під час завантаження сировини дозатор тимчасово втрачає точність дозування; якщо в цей момент завантажуються й інші дозатори, ефект накладається, спричиняючи нестабільність тиску в екструдері.

Запропоноване рішення передбачає навмисний часовий зсув між циклами завантаження різних дозаторів: дозатор очікує заздалегідь встановлений час (понад 0,3 від середнього часу перебування матеріалу в екструдері) і лише потім починає власне завантаження. Метод експериментально підтверджено — він значно скорочує коливання тиску в голівці екструдера та підвищує рівномірність товщини плівки або листа.

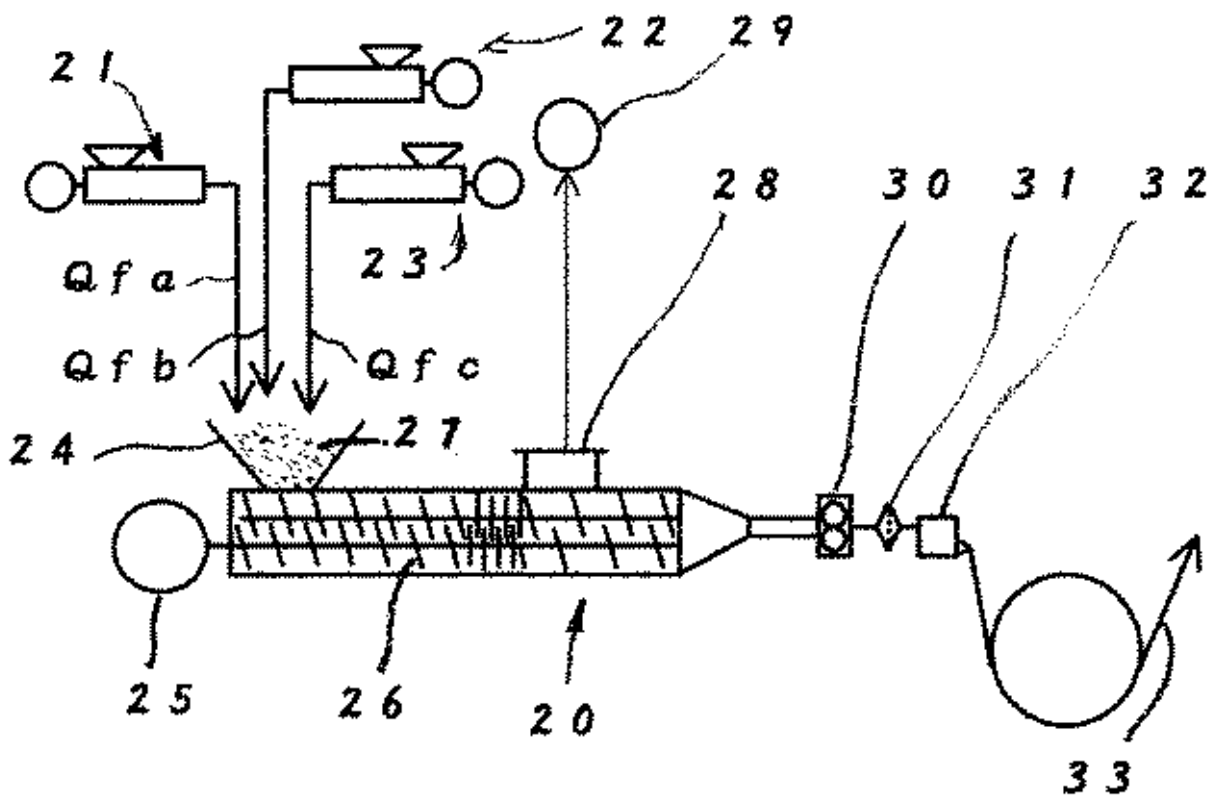


Рисунок 4.6 – Схема подачі за патентом JP2006272555A

4.2 Обґрунтування запропонованої модернізації

За результатами проведеного патентно-літературного огляду для подальшого дослідження і впровадження обрано технічне рішення, захищене патентом US9227344B2 [3]. Вибір обумовлений тим, що саме цей патент найбільш безпосередньо спрямований на вирішення проблеми, актуальної для

досліджуваного екструдера, — запобігання забиванню завантажувальної воронки та забезпечення рівномірної подачі грануляту.

Основна перевага рішення полягає в коаксіальному розміщенні циклона всередині завантажувальної воронки та застосуванні набивного шнека, що проходить крізь вихідний отвір циклона у зону змішування. Матеріал більше не спирається лише на силу тяжіння, а примусово транспортується шнеком — це усуває утворення зводів навіть під час роботи зі схильними до злипання або легкими фракціями. Повітряна циркуляція всередині циклона підтримує матеріал у розпушеному стані, а конічна форма шнека в нижній частині сепараційної зони забезпечує максимальний ступінь заповнення.

На основі обраного технічного рішення розроблено 3D-модель модернізованого завантажувального пристрою для досліджуваного екструдера ЧП 45×25 (рисунок 4.7).

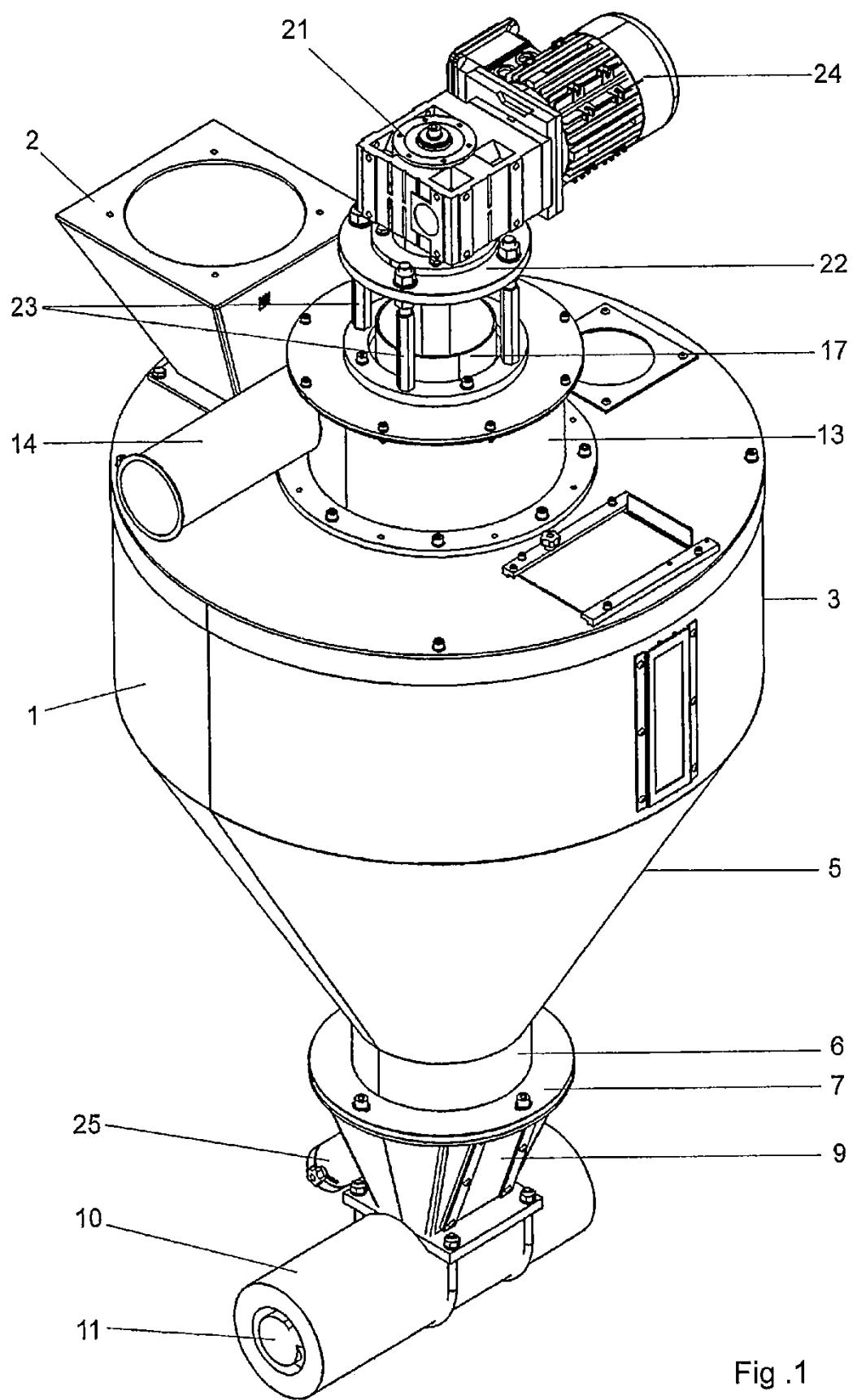


Fig .1

Рисунок 4.7 – 3D-модель розробленої (модернізованої) конструкції

завантажувального пристрою

Порівняно з іншими розглянутими патентами це рішення має суттєві переваги. Патенти DE102004051196A1, CN208068820U та JP2006272555A вирішують питання автоматизації, дозування й управління процесом, однак не впливають безпосередньо на конструкцію зони подачі та не усувають механічну причину утворення зводів. Патент CN114368126A також реалізує примусову подачу, але орієнтований на вторинні завантажувальні отвори двошнекових систем і потребує суттєвого переобладнання циліндра. Патент US11597118B2 є ефективним рішенням для компактних екструдерів адитивного виробництва, однак не розрахований на промислові грануляційні лінії.

Запропонована конструкція забезпечує такі переваги:

- надійне запобігання зводоутворенню — примусове транспортування шнеком унеможливорює зависання матеріалу незалежно від його фізичних властивостей та умов навколишнього середовища;
- керований склад суміші — роздільна подача компонентів із наступним змішуванням у визначеній зоні дозволяє точно витримувати задане співвідношення відходів і грануляту;
- скорочення транспортних шляхів — коаксіальна компоновка усуває виносні змішувачі та вертикальні транспортери, зменшуючи ймовірність сегрегації матеріалу;
- підвищення ступеня заповнення черв'яка — рівномірна примусова подача суміші безпосередньо до екструдера стабілізує продуктивність і знижує коливання тиску в зоні плавлення;
- спрощення обслуговування — оглядовий лючок у змішувальній секції забезпечує швидкий доступ для усунення можливих засмічень без зупинки виробництва.

Таким чином, технічне рішення за патентом US9227344B2 є найбільш відповідним за призначенням, конструктивно обґрунтованим і придатним для практичного застосування без кардинальної зміни базової конструкції досліджуваного обладнання.

4.3 Опис конструкції модернізованого завантажувального пристрою

На основі обраного технічного рішення (патент US9227344B2) розроблено модернізований завантажувальний пристрій (рисунок 4.7), що складається з двоступеневого завантажувального бункера та набивного (шнекового) живильника, розміщеного коаксіально у вихідній горловині бункера. Така компоновальна схема реалізує принцип примусової подачі сировини й безпосередньо усуває механічну причину утворення зводів у зоні завантаження.

Завантажувальний бункер має двоступеневу конструкцію: верхню циліндричну частину, конічний перехід із кутом нахилу стінки 165° , що забезпечує самопливне спрямування матеріалу до осі, та нижній вихідний патрубок діаметром $\varnothing 40$ мм, сумісний з гільзою черв'яка екструдера. Товщина стінки бункера — 4 мм. Для під'єднання трубопроводу подачі (відсмоктування) подрібненого матеріалу передбачено бічний патрубок, а у верхній частині — фланець для кріплення кришки. Вихідний отвір бункера фланцево з'єднується з корпусом екструдера.

Усередині вихідної горловини співвісно встановлено набивний шнек, виконаний як ступеневий стержень діаметрами $\varnothing 40/\varnothing 34/\varnothing 39,5$ мм з рівномірною гвинтовою нарізкою кроком 35 мм (8,3 витка, висота робочої зони 290 мм). Хвостовик завдовжки 123 мм слугує для з'єднання живильника з приводом через редуктор. Профіль витка — трапецієподібний, що покращує захоплення й транспортування легких фракцій.

Принцип дії модернізованого вузла: подрібнені відходи упаковки надходять у бункер самопливом, а обертовий набивний шнек примусово транспортує їх крізь вихідний отвір $\varnothing 40$ мм у зону живлення екструдера. Завдяки цьому усувається зводоутворення й забивання вихідного отвору навіть для легких і схильних до злипання фракцій, підвищується ступінь заповнення міжвиткового простору черв'яка та забезпечується рівномірна, стабільна подача матеріалу в зону переробки. Тривимірні моделі деталей модернізованого вузла та їх побудову в SolidWorks наведено в підрозділі 5.4.

Запропонована конструкція має такі переваги: надійне запобігання зводоутворенню завдяки примусовому транспортуванню матеріалу шнеком незалежно від його фізичних властивостей; керований склад переробної суміші за рахунок роздільної подачі компонентів із наступним змішуванням у визначеній зоні; скорочення транспортних шляхів завдяки коаксіальній компоновці, що зменшує ймовірність сегрегації; підвищення ступеня заповнення черв'яка та стабілізація тиску в зоні плавлення; спрощення обслуговування завдяки передбаченому оглядовому лючку для усунення можливих засмічень без зупинки виробництва.

5 РОЗРАХУНКИ

У розділі наведено параметричні, кінематичні та теплові розрахунки одночерв'ячного екструдера ЧП 45×25, перевірний розрахунок на міцність, результати числового моделювання шнека методом скінченних елементів (МСЕ), а також розрахунок шнекового живильника модернізованого завантажувального пристрою. Параметричні й теплові розрахунки виконано за інженерною методикою проєктування одночерв'ячних екструдерів [1] у програмному середовищі Mathcad; інтерполяцію кривих в'язкості розплаву реалізовано програмою мовою Visual Basic for Applications (лістинг — у додатку Б); тривимірне моделювання виконано в SolidWorks, числовий аналіз — у CAE-системі ANSYS Workbench.

5.1 Параметричні та кінематичні розрахунки

Об'єктом параметричного розрахунку є основний черв'як екструдера діаметром $D = 45$ мм і робочою довжиною $L = 1,35$ м із квадратним кроком гвинтової нарізки $t = D = 45$ мм. За масовою продуктивністю $\Pi = 30$ кг/год та густиною розплаву $\rho = 1036$ кг/м³ об'ємну секундну продуктивність визначено за залежністю:

$$Q = \frac{10^9 \Pi}{3600 \rho} = \frac{10^9 \cdot 30}{3600 \cdot 1036} = 8043,76 \text{ мм}^3/\text{с}, \quad (5.1)$$

Розрахунок коефіцієнта геометричної форми формуючої головки.

Екструзійну (гранулювальну) головку поділено на п'ять ділянок постійної геометрії: дві циліндричні ділянки круглого перерізу, три конічні кільцеві канали з конічною щілиною та одну ділянку круглого конічного каналу. Для кожного типу каналу коефіцієнт геометричної форми K визначають за відповідною залежністю:

$$K = \frac{\pi d^4}{128 L} \quad (\text{круглий циліндричний канал}); \quad (5.2)$$

$$K = \frac{3\pi D^3 d^3}{128 L (D^2 + Dd + d^2)} \quad (\text{круглий конічний канал}); \quad (5.3)$$

$$K = \frac{\pi(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6 L \omega} \quad (\text{конічний кільцевий канал}), \quad (5.4)$$

де для конічного кільцевого каналу допоміжний параметр ω обчислюють як:

$$\omega = \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1\delta_2 - R_2\delta_1} \right)^2 \ln \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2}. \quad (5.5)$$

Для ділянок із кількома паралельними каналами (z отворів) одиничний коефіцієнт множать на z . Основні геометричні параметри ділянок наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Основні параметри ділянок формуючої головки

№	Тип каналу	L, мм	D (d ₀), мм	d ₁ , мм	d ₂ , мм	z
1	Круглий циліндричний	7,5	2	—	—	24
2	Круглий конічний	2,6	—	2	5,9	24
3	Конічний кільцевий зі щілиною	25	—	135,9	142,9	1
4	Конічний кільцевий зі щілиною	90,8	—	40	142,9	1
5	Круглий циліндричний	97,1	40	—	—	1

Для конічних кільцевих ділянок 3 і 4 прийнято відповідно $R_1 = R_2 = 65$ мм, $\delta_1 = 13$ мм, $\delta_2 = 5,9$ мм та $R_1 = 20$ мм, $R_2 = 18,2$ мм, $\delta_1 = 6,1$ мм, $\delta_2 = 5,9$ мм; обчислені за наведеною залежністю допоміжні параметри становлять $\omega = -0,011$ і $\omega = 1,695 \cdot 10^{-3}$ відповідно.

Сумарний коефіцієнт геометричної форми головки визначають як для послідовно з'єднаних опорів:

$$\Sigma K_z = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{1}{K_5}} = 1,129 \text{ мм}^3. \quad (5.6)$$

Значення коефіцієнтів геометричної форми по ділянках і їх сумарне значення наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Значення коефіцієнтів геометричної форми

№ ділянки	1	2	3	4	5	ΣK_z
K, мм ³	1,257	22,065	847,483	23,741	647,084	1,129

Розрахунок геометричних параметрів черв'яка.

Геометрію черв'яка визначають на підставі емпіричних залежностей за відомим відношенням $L/D = 30$. Прийнято діаметр $D = 45$ мм, крок нарізки $t = D = 45$ мм, ширину гребеня витка $e = 4,5$ мм, зазор між гребенем і циліндром $\delta = 0,09$ мм. Кут підйому гвинтової лінії:

$$\varphi = \arctg \frac{t}{\pi D} = \arctg \frac{45}{\pi \cdot 45} = 0,308 \text{ рад} \approx 17,7^\circ. \quad (5.7)$$

Глибину каналу в зоні дозування h_2 визначають за глибиною каналу в зоні завантаження $h_1 = 6,3$ мм і ступенем стиснення $i = 2,3$ (за відношенням площ поперечного перерізу каналу):

$$h_2 = 0,5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i} (D - h_1)} \right] = 2,494 \text{ мм}. \quad (5.8)$$

Зведені геометричні параметри основного черв'яка наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Геометричні параметри основного черв'яка

Параметр	Зона завантаження	Зона стискання	Зона дозування
Довжина зони, мм	225	450	675
Глибина каналу h, мм	6,3	6,3→2,494	2,494
Крок нарізки t, мм	45	45	45
Кут підйому витка φ , °	17,7	17,7	17,7
Ширина гребеня e, мм	4,5	4,5	4,5
Ступінь стиснення i	—	—	2,3

Розрахунок необхідної частоти обертання черв'яка.

Частоту обертання, потрібну для забезпечення заданої продуктивності, визначають через коефіцієнти прямого (α), зворотного (β) потоку та потоку витоку (γ):

$$\alpha = \frac{\pi D h_2 (t-e) \cos^2 \varphi}{2} = 6,483 \cdot 10^3 \text{ мм}^3; \quad (5.9)$$

$$\beta = \frac{h_2^3 (t-e) \sin 2\varphi}{24 l_d} = 0,022 \text{ мм}^3; \quad (5.10)$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 D^2 \delta^3 \operatorname{tg} \varphi \sin \varphi}{10 e l_d} = 4,631 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3, \quad (5.11)$$

де $l_d = 675$ мм — довжина зони дозування. Необхідна частота обертання черв'яка:

$$n = \frac{Q(\Sigma K_z + \beta + \gamma)}{\alpha \Sigma K_z} = 1,266 \text{ об/с } (\approx 76 \text{ об/хв}). \quad (5.12)$$

Розрахунок перепаду тиску в екструзійній головці.

Для кожної ділянки постійної геометрії за об'ємною продуктивністю визначено швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ (для циліндричного каналу $\dot{\gamma} = 32Q/(\pi d^3)$, для конічного $\dot{\gamma} = 256Q/[\pi(D+d)^3]$, для кільцевого $\dot{\gamma} = 22,32Q/[\pi(R_1+R_2)(\delta_1+\delta_2)^2]$); результати наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Значення швидкостей зсуву на ділянках головки

№ ділянки	1	2	3	4	5
$\dot{\gamma}, \text{с}^{-1}$	426,735	55,393	1,231	10,389	1,28

В'язкість розплаву PPG марки 40 за температури 230 °С для відповідних швидкостей зсуву визначено лінійною інтерполяцією кривих в'язкості в логарифмічних координатах (програма мовою VBA, додаток Б); результати — у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Значення в'язкості розплаву

№ ділянки	1	2	3	4	5
$\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$	156,64	368,49	557,28	497,22	556,79

Гідравлічний опір кожної ділянки визначають за основною залежністю (Q — об'ємна продуктивність за (5.1)); результати наведено в таблиці 5.6:

$$\Delta P_i = \frac{Q \mu_i}{K_i}; \quad (5.13)$$

$$\Delta P = \Sigma \Delta P_i = 1,318 \cdot 10^6 \text{ Па}. \quad (5.14)$$

Таблиця 5.6 – Гідравлічний опір формуючої головки

№ ділянки	Гідравлічний опір, $\times 10^6$ Па	Сумарний опір ΔP , Па
-----------	-------------------------------------	-------------------------------

1	1,003	$1,318 \cdot 10^6$
2	0,134	
3	0,005	
4	0,168	
5	0,007	

Розрахунок потужності приводу черв'ячної машини.

Складову потужності, що розсіюється внаслідок в'язкого тертя у гвинтовому каналі та в зазорі між гребенем і циліндром у зоні дозування, визначають за енергетичною методикою [1]. У наведених нижче залежностях лінійні розміри підставляють у міліметрах, коефіцієнт α — у мм³, перепад тиску ΔP — у мегапаскалях, частоту обертання $n_{\min}$ — в об/хв; множники 10^{-15} та 10^{-13} забезпечують переведення результату в кіловати. Частота обертання у хвилинній розмірності $n_{\min} = n \cdot 60 = 75,9$ об/хв. Геометричний фактор каналу:

$$I = \frac{\pi^2 D^2 - 4t^2}{\pi^2} + \frac{\pi^2 D^5}{t^2 + \pi^2 D^2} = 8,395 \cdot 10^4. \quad (5.15)$$

Потужність, що споживається у гвинтовому каналі (швидкість зсуву $\dot{\gamma}_k$, в'язкість μ_k за кривою течії):

$$\dot{\gamma}_k = \frac{\pi^2 D^2 n_{\min}}{60 h_2 \sqrt{\pi^2 D^2 + 2t^2}} = 65,4 \text{ с}^{-1}; \quad \mu_k = 351,5 \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad (5.16)$$

$$N_1 = \frac{\pi^3 (t-e) l_d I \mu_k n_{\min}^2}{36 t} \cdot 10^{-15} + \frac{\alpha \Delta P n_{\min}}{6} \cdot 10^{-13} = 0,1 \text{ кВт}. \quad (5.17)$$

Потужність, що споживається в зазорі між гребенем і циліндром (швидкість зсуву $\dot{\gamma}_z$, в'язкість μ_z за кривою течії):

$$\dot{\gamma}_z = \frac{\pi D n_{\min}}{60 \delta} = 19,9 \text{ с}^{-1}; \quad \mu_z = 568,0 \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad (5.18)$$

$$N_2 = \frac{\pi^3 D^3 e l_d \mu_z n_{\min}^2}{36 \delta t} \cdot 10^{-15} = 0,193 \text{ кВт}. \quad (5.19)$$

Сумарна потужність дисипації у зоні дозування та потужність, спожита черв'яком у цій зоні:

$$N_d = N_1 + N_2 = 0,293 \text{ кВт}; \quad N_r = 2N_d = 0,585 \text{ кВт}. \quad (5.20)$$

З урахуванням ККД приводу $\eta = 0,8$ потужність дисипації у зоні дозування становить $N_r/\eta = 0,732 \text{ кВт}$. Це лише складова, що розсіюється у зоні дозування;

повна потужність приводу враховує також транспортування твердого матеріалу, його плавлення та створення тиску в усіх зонах, а також пускові режими під навантаженням. Тому за стандартним рядом приймають електродвигун потужністю:

$$N_{\text{дв}} = 5,5 \text{ кВт.} \quad (5.21)$$

5.2 Розрахунок шнекового живильника

Модернізований завантажувальний пристрій оснащено набивним (шнековим) живильником, який примусово подає матеріал у зону змішування, усуваючи зводи утворення. Площу живого перерізу потоку матеріалу визначають за залежністю:

$$S = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \lambda, \quad (5.22)$$

де D — зовнішній діаметр витків; d — діаметр вала; $\lambda = 0,125 \dots 0,4$ — коефіцієнт заповнення перерізу. Швидкість подавання матеріалу вздовж осі шнека $v = t \cdot n$. Об'ємна продуктивність живильника:

$$V = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) t n \lambda \psi, \quad (5.23)$$

де t — крок навивки; n — частота обертання вала; ψ — коефіцієнт зниження продуктивності (для горизонтального живильника $\psi \approx 1$). Масова продуктивність $\Pi = V \cdot \rho$. Потужність приводу живильника:

$$N = \frac{\Pi g (KL + H)}{\eta \cdot 3600}, \quad (5.24)$$

де $K = 1,2 \dots 2,5$ — коефіцієнт опору переміщенню продукту; L — довжина шнека; H — висота підйому продукту; η — ККД передачі. Для горизонтального живильника $H = 0$.

Прийнято: $D = 0,040$ м; $d = 0,034$ м; крок навивки $t = 0,040$ м; частота обертання $n = 4,0$ об/с; $\lambda = 0,35$; $\psi = 1,0$; $\rho = 450$ кг/м³; $K = 1,5$; $L = 0,25$ м; $\eta = 0,85$. Тоді:

$$S = \frac{\pi}{4} (0,040^2 - 0,034^2) \cdot 0,35 \approx 1,221 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad (5.25)$$

$$V = \frac{\pi}{4} (0,040^2 - 0,034^2) \cdot 0,040 \cdot 4,0 \cdot 1,0 \approx 1,95 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}; \quad (5.26)$$

$$\Pi = V \rho \cdot 3600 = 1,95 \cdot 10^{-5} \cdot 450 \cdot 3600 \approx 31,6 \text{ кг/год}; \quad (5.27)$$

$$N = \frac{PgKL}{\eta \cdot 3600} = \frac{31,6 \cdot 9,81 \cdot 1,5 \cdot 0,25}{0,85 \cdot 3600} \approx 38 \text{ Вт.} \quad (5.28)$$

Масова продуктивність живильника 31,6 кг/год перевищує задану продуктивність екструдера 30 кг/год, що підтверджує достатню подачу матеріалу; потужність привода живильника незначна, що підтверджує доцільність застосування набивного живильника в модернізованій конструкції.

5.3 Розрахунок на міцність

Виконано попередній аналітичний розрахунок шнека на міцність за умов кручення під дією крутного моменту $M = 500 \text{ Н} \cdot \text{м}$ (детальний скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану — у підрозділі 5.6). Найнебезпечнішим є переріз ступеневого стержня найменшого діаметра $d = 34 \text{ мм}$ (ділянка ступеневого стержня, див. 3D-модель у підрозділі 5.5). Полярний момент опору перерізу:

$$W_\rho = \frac{\pi d^3}{16} = \frac{\pi \cdot 34^3}{16} = 7716,6 \text{ мм}^3. \quad (5.29)$$

Найбільші дотичні напруження кручення:

$$\tau = \frac{M}{W_\rho} = \frac{500000}{7716,6} = 64,8 \text{ МПа.} \quad (5.30)$$

Границя текучості сталі 40ХН при крученні (за енергетичною теорією міцності):

$$\tau_T = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} = \frac{900}{1,732} = 519,6 \text{ МПа.} \quad (5.31)$$

Коефіцієнт запасу міцності за номінальними напруженнями кручення:

$$n = \frac{\tau_T}{\tau} = \frac{519,6}{64,8} = 8,0. \quad (5.32)$$

Отримане значення $n = 8,0$ значно перевищує нормативне допустиме $[n] = 2,0$, тобто гладкий переріз стержня має значний запас за номінальними напруженнями. Реальним критичним місцем є зона шпонкового пазу з концентрацією напружень; її напружено-деформований стан і дійсний коефіцієнт запасу міцності визначено числовим методом у підрозділі 5.6.

5.4 Тепловий розрахунок

Тепловий розрахунок виконано для визначення теплоти, яку потрібно підвести до екструдера електронагрівачами для виходу на робочий режим, та часу розігрівання корпусу. Рівняння теплового балансу екструдера:

$$Q_N + Q_{N1} = G_m C_m (t_{\text{роб}} - t_{\text{поч}}) + Q_o + Q_{\text{втр}}, \quad (5.33)$$

де Q_N — теплота від дисипації механічної енергії приводу (приймається на рівні близько 60 % встановленої потужності двигуна $N_{\text{дв}} = 5,5$ кВт: $Q_N \approx 3,28 \cdot 10^3$ Вт); Q_{N1} — теплота від електронагрівачів; $G_m = 0,00833$ кг/с, $C_m = 2200$ Дж/(кг·К) — масова продуктивність і питома теплоємність полімеру; $t_{\text{роб}} = 230$ °C — робоча температура нагрівання полімеру, $t_{\text{поч}} = 20$ °C — температура подавання; Q_o — теплота, що відводиться охолоджувальною водою; $Q_{\text{втр}}$ — тепловтрати в навколишнє середовище.

Теплота, що відводиться водою (витрата $G_v = \rho \cdot f \cdot v = 0,376$ кг/с; площа перерізу каналу $f = \pi(R_p^2 - r_p^2) = 4,534 \cdot 10^{-4}$ м²; $\Delta t_v = 10$ °C):

$$Q_o = G_v C_v \Delta t_v = 0,376 \cdot 4200 \cdot 10 = 1,578 \cdot 10^4 \text{ Вт}. \quad (5.34)$$

Тепловтрати в навколишнє середовище конвекцією та випромінюванням від поверхні кожуха (температура кожуха $t_k = 60$ °C, навколишнього повітря $t_{\text{пов}} = 20$ °C). Режим течії повітря визначають за критеріями Грасгофа і Прандтля:

$$\text{Gr} = \frac{g D^3 \beta (t_k - t_{\text{пов}})}{\nu^2} = 1,905 \cdot 10^5; \quad \text{Gr} \cdot \text{Pr} = 1,339 \cdot 10^5 \text{ (перехідний режим);} \quad (5.35)$$

$$\text{Nu} = 0,54 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} = 10,33; \quad (5.36)$$

коефіцієнт тепловіддачі від кожуха конвекцією ($\lambda = 0,0259$ Вт/(м·К), $D = 0,237$ м — діаметр кожуха):

$$\alpha_k = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{D} = 1,129 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (5.37)$$

Площа поверхні кожуха $F = 2\pi \cdot R_k \cdot (R_k + h) = 0,663$ м². Втрати конвекцією:

$$Q_k = \alpha_k F (t_k - t_{\text{пов}}) = 29,9 \text{ Вт}. \quad (5.38)$$

Втрати випромінюванням (ступінь чорноти сталі $\varepsilon = 0,6$; $T_1 = 273 + t_k = 333$ К, $T_2 = 273 + t_{\text{пов}} = 293$ К):

$$Q_{\text{вп}} = 5,67 \varepsilon F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 111,1 \text{ Вт}; \quad (5.39)$$

$$Q_{\text{втр}} = Q_{\text{вп}} + Q_k = 141,1 \text{ Вт}. \quad (5.40)$$

Теплота, яку треба підвести електронагрівачами:

$$Q_{N1} = G_m C_m (t_{\text{роб}} - t_{\text{поч}}) + Q_o + Q_{\text{втр}} - Q_N = 1,649 \cdot 10^4 \text{ Вт}. \quad (5.41)$$

Розрахунок часу розігрівання корпусу.

Об'єм корпусу (зовнішній діаметр $D_z = 70,5$ мм, внутрішній $D = 45$ мм, $\rho_{\text{ст}} = 7800$ кг/м³):

$$V = \left(\frac{\pi D_z^2}{4} - \frac{\pi D^2}{4} \right) L = 3,123 \cdot 10^6 \text{ мм}^3; \quad (5.42)$$

$$G = V \rho_{\text{ст}} = 24,358 \text{ кг}. \quad (5.43)$$

Теплота на нагрівання корпусу від $t_{\text{поч}} = 20$ °С до робочої температури $t_{\text{роб}} = 230$ °С (питома теплоємність сталі $c = 460$ Дж/(кг·К)):

$$Q_{\text{корп}} = cG(t_{\text{роб}} - t_{\text{поч}}) = 460 \cdot 24,358 \cdot 210 = 2,353 \cdot 10^6 \text{ Дж}. \quad (5.44)$$

Час розігрівання корпусу:

$$\tau = \frac{Q_{\text{корп}}}{Q_{N1}} = \frac{2,353 \cdot 10^6}{1,649 \cdot 10^4} = 142,7 \text{ с} \approx 2,378 \text{ хв}. \quad (5.45)$$

5.5 Тривимірне моделювання модернізованого вузла

Перед числовим аналізом напружено-деформованого стану в системі автоматизованого проєктування SolidWorks побудовано тривимірні моделі деталей модернізованого живильника — набивного шнека та завантажувального бункера. Моделювання виконано послідовним застосуванням операцій витягування, обертання, побудови спіральної траєкторії та фігурного вирізання.

Моделювання набивного шнека живильника.

На площині Front Plane створено ескіз основного тіла у вигляді кола $\varnothing 40$ мм, який операцією Boss-Extrude витягнуто в циліндричний стержень; далі

сформовано ступеневу геометрію стержня з трьома ділянками $\varnothing 40/\varnothing 34/\varnothing 39,5$ мм (рисунок 5.1).

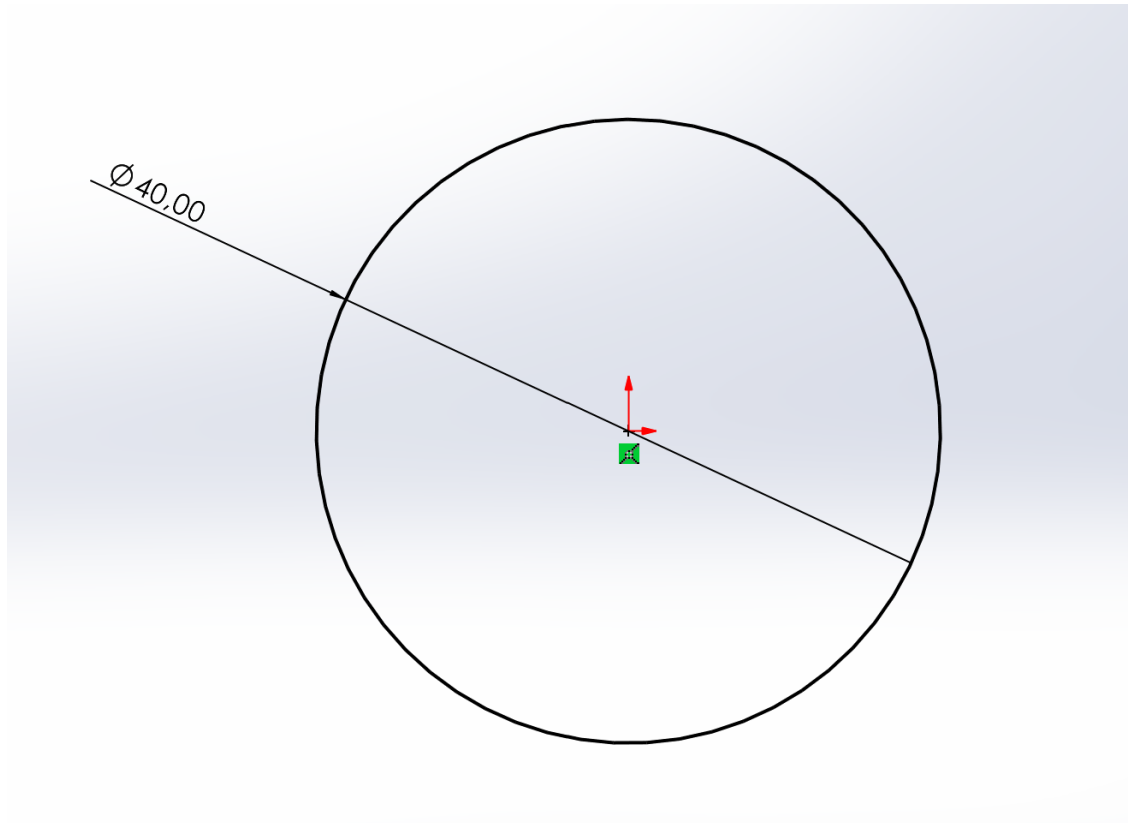


Рисунок 5.1 – Ескіз ступеневого стержня черв'яка живильника

Командою Helix/Spiral задано гвинтову траєкторію (метод «висота та крок»): висота 290 мм, крок 35 мм, діаметр 39,5 мм, напрям за годинниковою стрілкою, початковий кут 155° , що відповідає 8,3 витка робочої зони (рисунок 5.2).

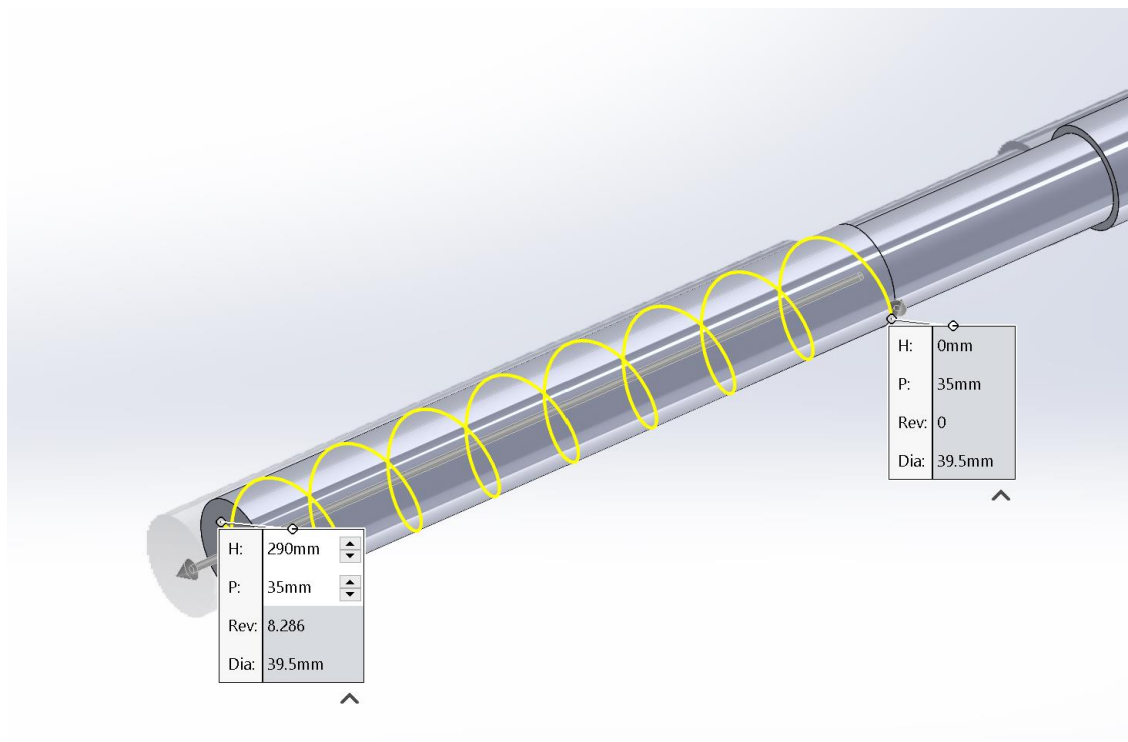


Рисунок 5.2 – Побудова гвинтової траєкторії (Helix/Spiral)

На перпендикулярній до траєкторії площині побудовано трапецієподібний профіль витка (загальна ширина 28 мм, ширина дна канавки 18 мм, радіус заокруглення стінок R5 мм), після чого операцією Cut-Sweep уздовж спіралі сформовано рівномірну гвинтову нарізь (рисунок 5.3).

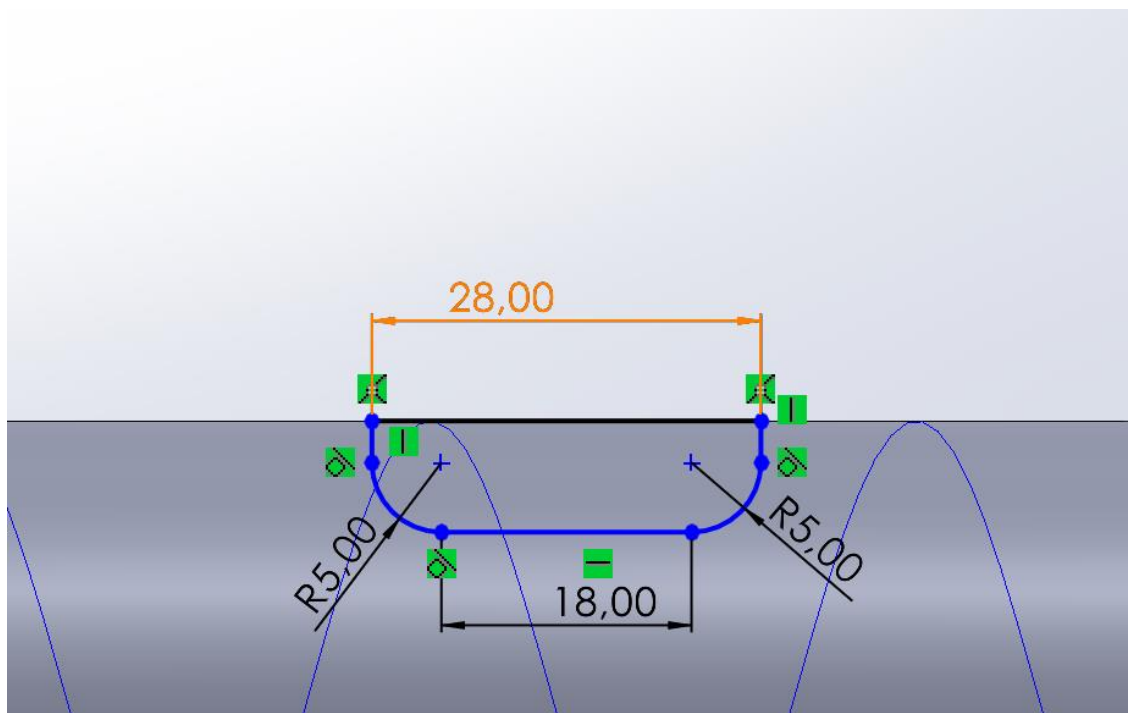


Рисунок 5.3 – Ескіз профілю витка черв'яка

На торці деталі сформовано хвостовик завдовжки 123 мм зі шпонковим пазом для з'єднання з приводом; на переходах між ступенями стержня додано скруглення, а на торці — фаску для зменшення концентраторів напружень. Готову 3D-модель набивного шнека наведено на рисунку 5.4.

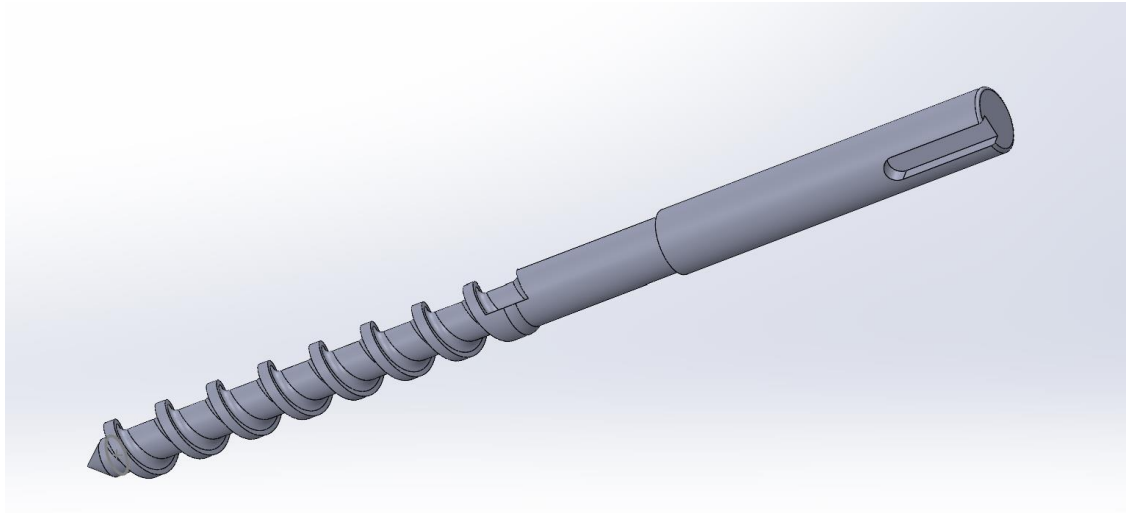


Рисунок 5.4 – Готова 3D-модель набивного шнека живильника

Моделювання завантажувального бункера.

Бункер спроектовано як окрему деталь двоступеневої конструкції. На площині Front Plane побудовано ескіз осьового перерізу основного тіла: верхня циліндрична частина висотою 25 мм, конічна ділянка висотою 180 мм з кутом нахилу стінки 165° , нижній вихідний циліндр $\varnothing 40$ мм висотою 120 мм, товщина стінки 4 мм (рисунок 5.5).

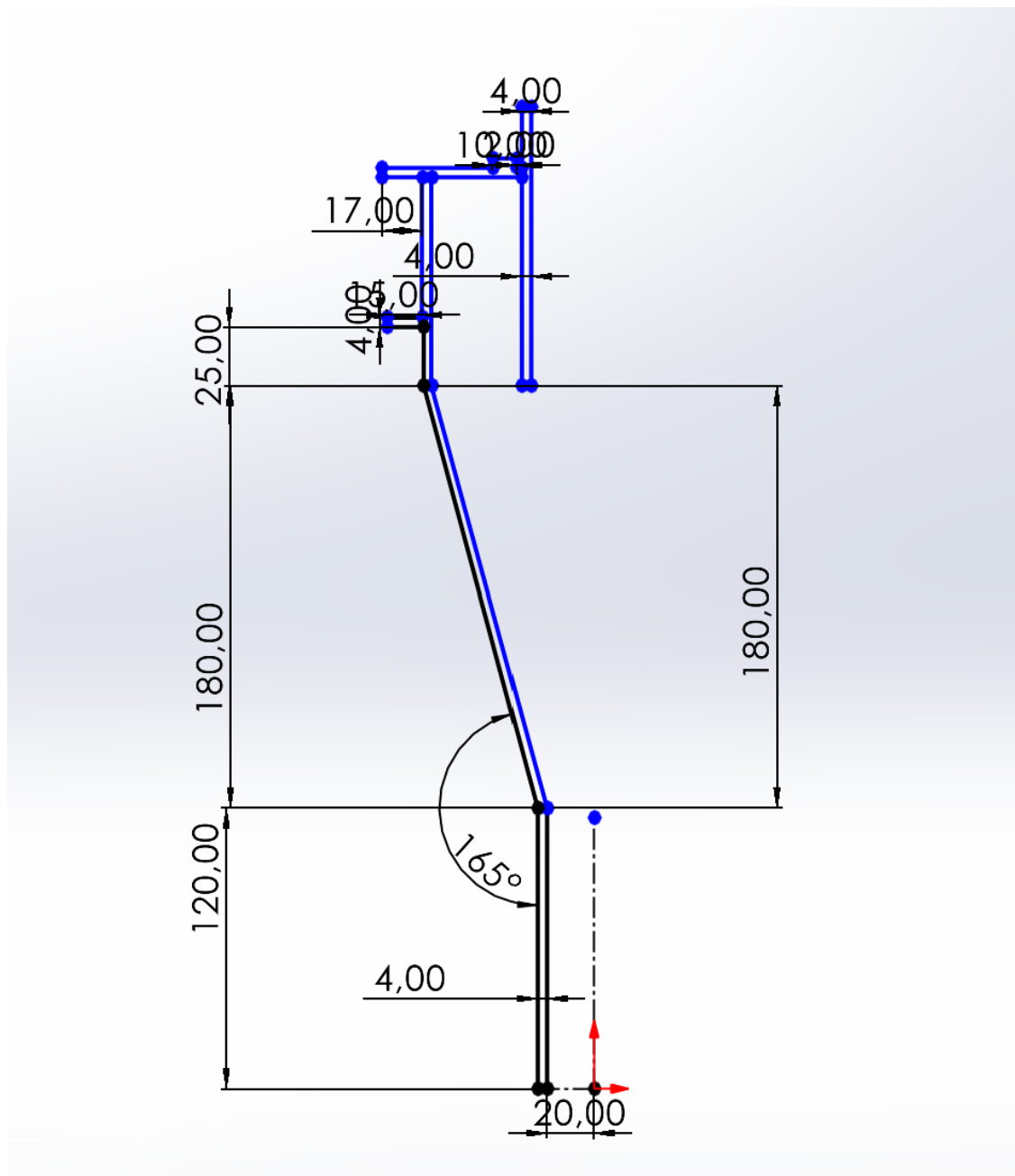


Рисунок 5.5 – Ескіз осьового перерізу тіла бункера

Операцією Revolve обертанням ескізу на 360° сформовано основне тіло бункера (рисунок 5.6); подальшими операціями обертання й витягування додано нижній фланець-патрубок з'єднання з корпусом екструдера ($\varnothing 50/\varnothing 40$), верхній кільцевий фланець кріплення кришки та бічний патрубок завдовжки 74 мм для під'єднання трубопроводу подачі матеріалу.

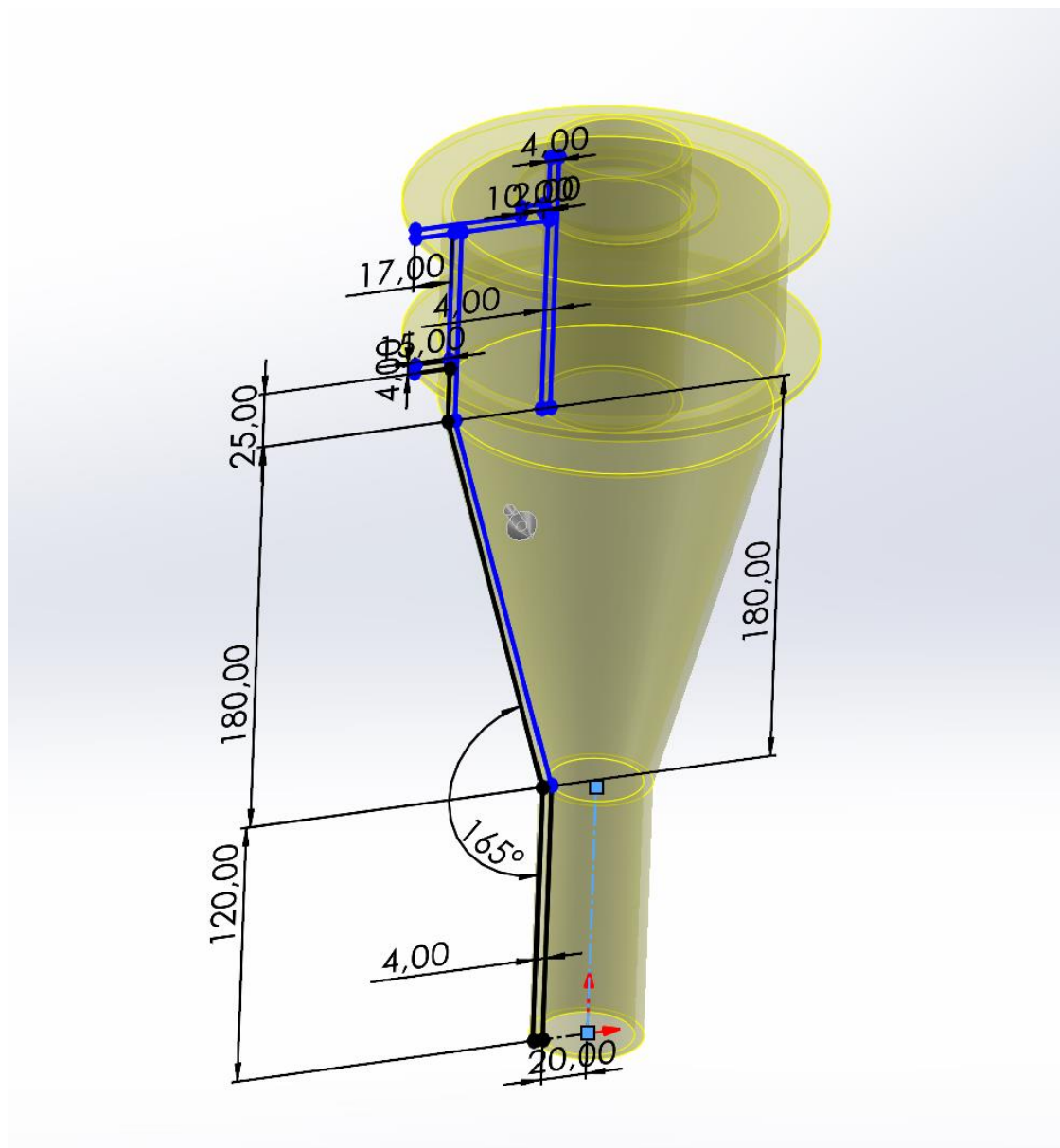


Рисунок 5.6 – Формування тіла бункера обертанням осьового перерізу (Revolve)

У результаті отримано повну 3D-модель модернізованого завантажувального бункера (рисунок 5.7), що реалізує коаксіальне розміщення вихідної горловини всередині конічної воронки із самопливним спрямуванням матеріалу та бічним патрубком подачі.

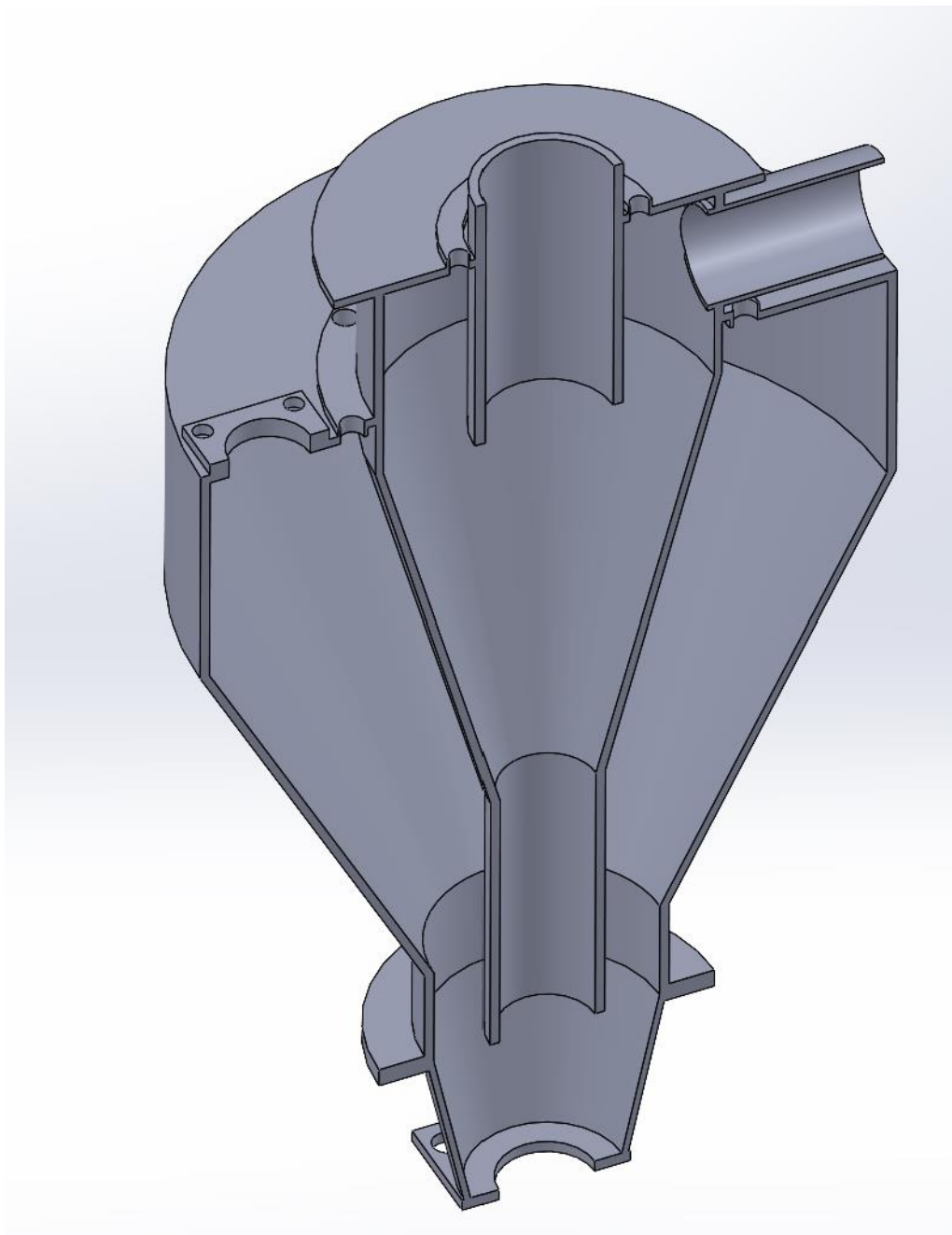


Рисунок 5.7 – Готова 3D-модель модернізованого завантажувального бункера
Побудовані моделі використано для підготовки складального креслення модернізованого вузла, деталювання та для числового аналізу напружено-деформованого стану шнека (підрозділ 5.6).

5.6 Числові розрахунки (метод скінченних елементів)

Для дослідження напружено-деформованого стану шнека та підтвердження його міцності й жорсткості застосовано метод скінченних елементів у CAE-системі ANSYS Workbench (модуль Static Structural). Матеріал шнека — сталь 40XH (ДСТУ 7809:2015): $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$; $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; $\nu = 0,3$; σ_T

$\sigma = 900$ МПа; $\sigma_v = 1050$ МПа. Тривимірну модель, побудовану в SolidWorks, імпортовано в ANSYS Mechanical; прийнято сітку скінченних елементів розміром 6 мм. Граничні умови: Cylindrical Support на поверхні хвостовика (Radial = Fixed, Axial = Fixed, Tangential = Free) імітує підшипник кочення; Fixed Support по гранях шпонкового пазу моделює з'єднання з редуктором; крутний момент $M = 500$ Н·м прикладено до 16 граней витків уздовж осі Z. Розрахункову схему шнека з граничними умовами та навантаженнями наведено на рисунку 5.8.

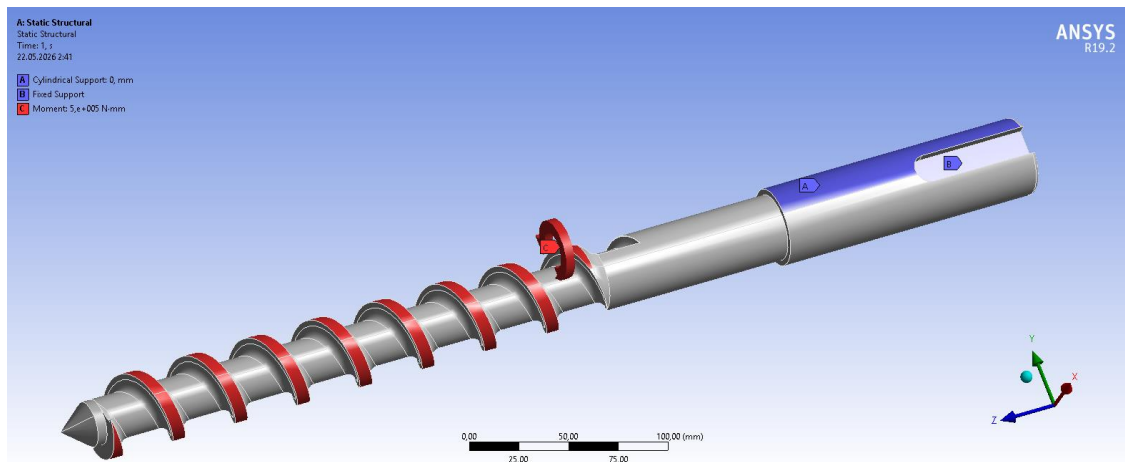


Рисунок 5.8 – Розрахункова схема шнека з граничними умовами та навантаженнями

Результати числового розрахунку базового шнека.

Максимальні сумарні переміщення спостерігаються на вільному кінці шнека й становлять $\Delta_{\max} = 0,66755$ мм (рисунок 5.9); найбільш навантаженою є зона шпонкового пазу, де максимальні еквівалентні напруження за Мізесом $\sigma_{\max} = 322,1$ МПа (рисунок 5.10), а максимальна пружна деформація $\epsilon_{\max} = 0,0016202$ мм/мм. Епюру коефіцієнта запасу міцності наведено на рисунку 5.11.

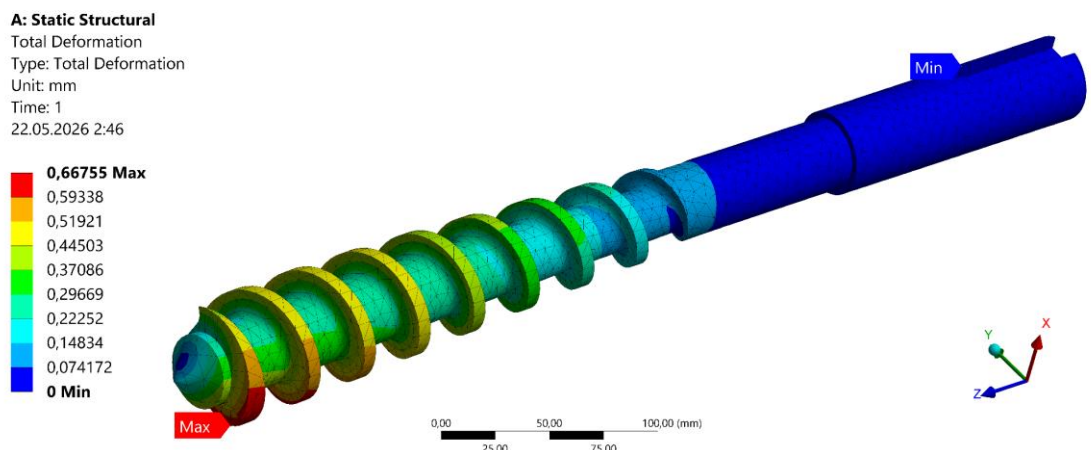


Рисунок 5.9 – Епюра сумарних переміщень базового шнека (Total Deformation),
MM

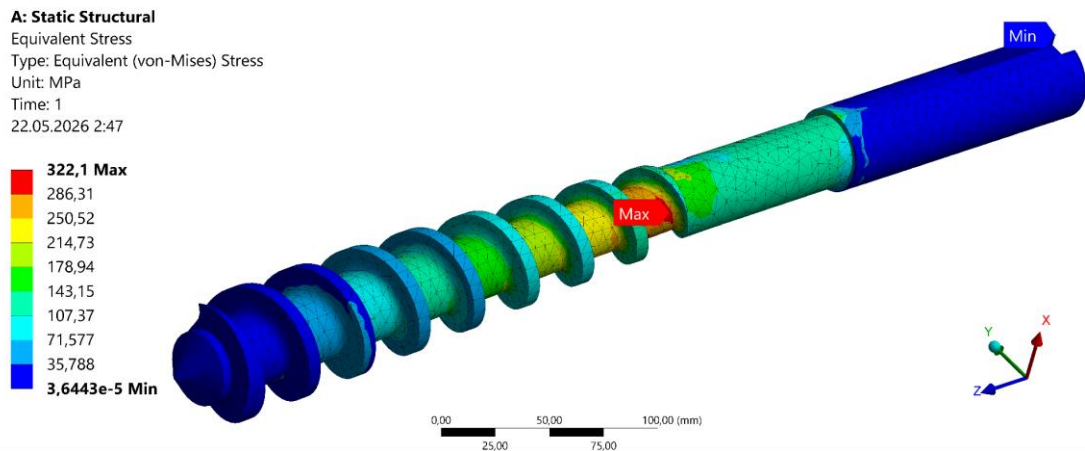


Рисунок 5.10 – Епюра еквівалентних напружень базового шнека (Equivalent Stress), МПа

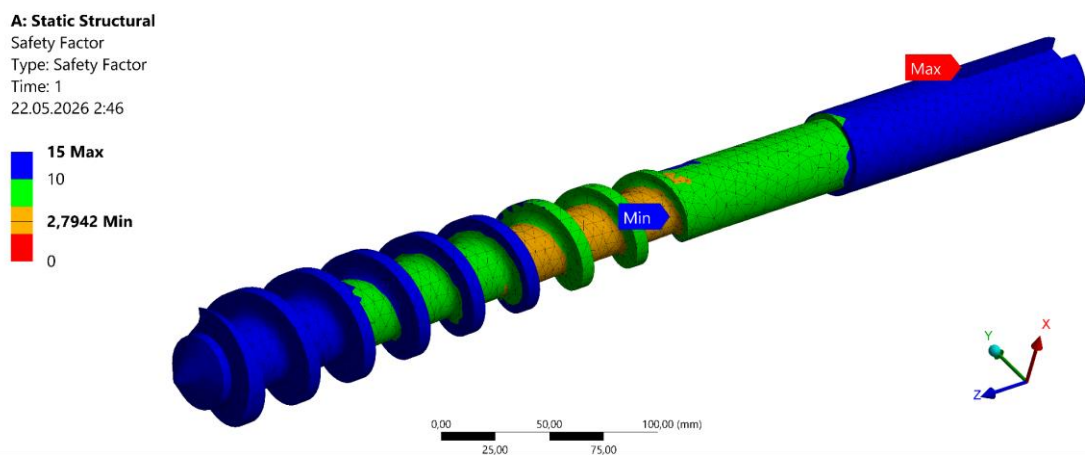


Рисунок 5.11 – Епюра коефіцієнта запасу міцності базового шнека (Safety Factor)

Інженерний коефіцієнт запасу міцності за критерієм текучості (четверта теорія міцності):

$$n = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max}} = \frac{900}{322,1} = 2,79. \quad (5.46)$$

Значення $n = 2,79$ перевищує нормативне допустиме $[n] = 2,0$, що підтверджує працездатність базової конструкції шнека.

Результати числового розрахунку модернізованого шнека.

Модернізована конструкція відрізняється збільшеною довжиною робочої зони живильника та зміненою геометрією витків у зоні завантаження. Матеріал,

сітка та граничні умови ідентичні базовій моделі. $\Delta_{\max} = 0,84764$ мм (рисунок 5.12; на 27,0 % більше через більше плече навантаження); $\sigma_{\max} = 302,05$ МПа (рисунок 5.13; на 6,2 % менші); $\epsilon_{\max} = 0,001517$ мм/мм. Епюру коефіцієнта запасу міцності наведено на рисунку 5.14.

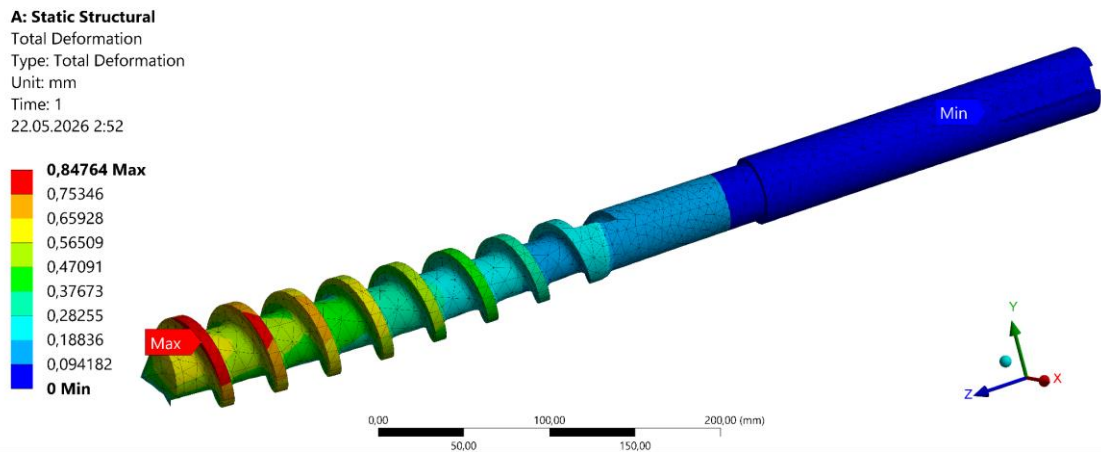


Рисунок 5.12 – Епюра сумарних переміщень модернізованого шнека (Total Deformation), мм

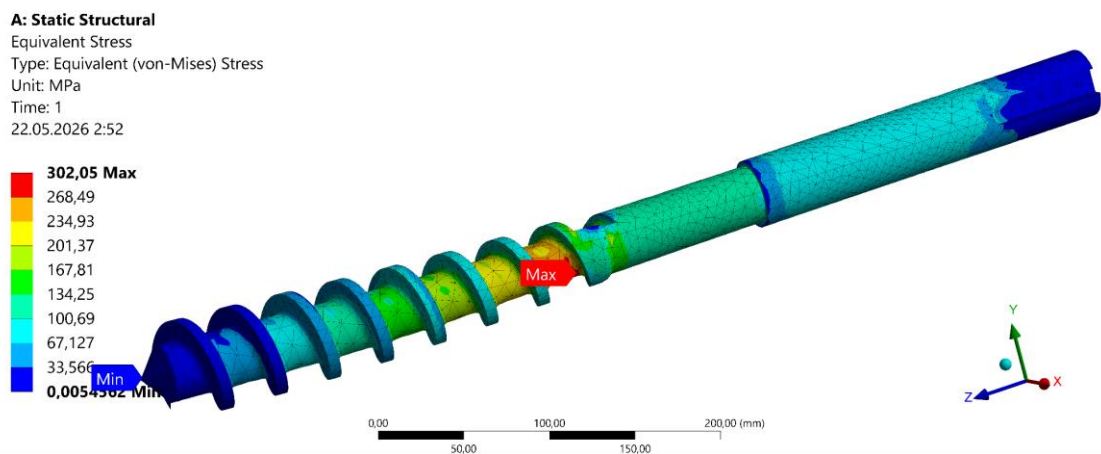


Рисунок 5.13 – Епюра еквівалентних напружень модернізованого шнека (Equivalent Stress), МПа

A: Static Structural
 Safety Factor
 Type: Safety Factor
 Time: 1
 22.05.2026 2:53

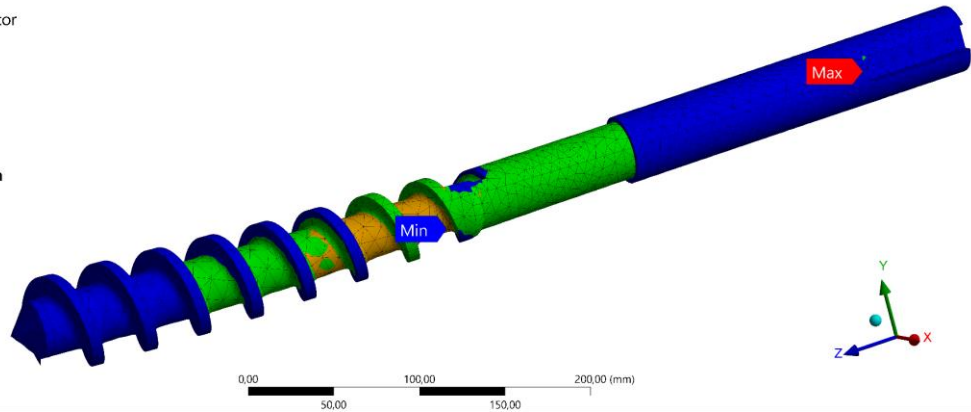


Рисунок 5.14 – Епюра коефіцієнта запасу міцності модернізованого шнека (Safety Factor)

Інженерний коефіцієнт запасу міцності:

$$n = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max}} = \frac{900}{302,05} = 2,98. \quad (5.47)$$

Порівняння результатів числового моделювання наведено в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Порівняння результатів числового моделювання

Параметр	Базовий шнек	Модернізований	Зміна
$\Delta_{\max}$, мм	0,66755	0,84764	+27,0 %
$\sigma_{\max}$, МПа	322,1	302,05	-6,2 %
$\varepsilon_{\max}$, мм/мм	0,0016202	0,001517	-6,4 %
n (інженерний)	2,79	2,98	+6,8 %
Висновок	Працездатний	Працездатний	—

Обидві конструкції є працездатними: максимальні еквівалентні напруження не перевищують межі текучості сталі 40ХН, а коефіцієнти запасу міцності перевищують нормативне $[n] = 2,0$. Модернізований шнек має менші напруження та більший запас міцності, що свідчить про рівномірніший розподіл навантаження.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці являє собою систему правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності. Завданням цього розділу є аналіз умов праці оператора екструзійної лінії для грануляції відходів упаковки, виявлення потенційно небезпечних і шкідливих виробничих чинників та розроблення інженерно-технічних і організаційних заходів, що знижують виробничий ризик до допустимого рівня.

Об'єктом проектування є одночерв'ячний екструдер ЧП 45×25, який переробляє відходи полімерної упаковки на основі поліпропілену (матеріал PPG марки 40 густиною 1036 кг/м³) з продуктивністю 30 кг/год. Технологічний процес супроводжується плавленням і гомогенізацією полімеру за температури до 230 °С з подальшим його гранулюванням. Оператор обслуговує лінію у виробничому приміщенні з прийнятими розмірами дільниці 6×9 м заввишки 6 м (площа 54 м², об'єм 324 м³). За одночасної роботи двох працівників на одну особу припадає близько 27 м² площі та 162 м³ об'єму, що перевищує мінімальні значення (6 м² площі та 15 м³ об'єму на одного працівника), установлені санітарним законодавством.

Під час експлуатації екструдера на оператора можуть впливати такі небезпечні та шкідливі виробничі чинники:

- підвищена температура поверхонь обладнання (циліндр, формувальна головка, розплав полімеру до 230 °С) та можливість термічних опіків;
- надлишкові тепловиділення, що погіршують мікроклімат робочої зони;
- забруднення повітря робочої зони продуктами термоокиснювальної деструкції поліпропілену (оксид вуглецю, альдегіди, леткі органічні сполуки) та пилом полімеру в зонах завантаження і гранулювання;
- підвищені рівні шуму та вібрації від електропривода, редуктора, вузла гранулювання й подрібнювача відходів;

- небезпека ураження електричним струмом унаслідок використання електронагрівників та електропривода напругою 380/220 В;
- рухомі елементи (черв'як, ножі гранулятора, привідні передачі), що створюють механічну небезпеку;
- пожежна небезпека, зумовлена горючістю полімеру, його розплаву та пилу;
- недостатня освітленість робочих місць.

Нижче розглянуто заходи з нормалізації основних чинників виробничого середовища та забезпечення безпеки праці оператора.

6.1 Мікроклімат та повітря робочої зони

Параметри мікроклімату нормуються згідно з ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Роботи з обслуговування екструдера (завантаження сировини, контроль перебігу процесу, періодичне технічне обслуговування) за рівнем енерговитрат 175–232 Вт належать до категорії Па — роботи середньої важкості. Оптимальні та допустимі значення температури, відносної вологості й швидкості руху повітря для цієї категорії наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри мікроклімату для категорії робіт Па (за ДСН 3.3.6.042-99)

Показник мікроклімату	Холодний період (опт. / доп.)	Теплий період (опт. / доп.)
Температура повітря, °С	18–20 / 17–23	21–23 / 18–27
Відносна вологість, %	40–60 / ≤ 75	40–60 / ≤ 65
Швидкість руху повітря, м/с	≤ 0,2 / ≤ 0,3	0,3 / 0,2–0,4

Оскільки робота екструдера супроводжується значними тепловиділеннями, для підтримання нормованих параметрів передбачено теплоізоляцію нагрітих поверхонь циліндра й формувальної головки, а також припливно-витяжну вентиляцію із загальнообмінною та місцевою системами; у холодний період приміщення обладнують системою опалення.

Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони визначають за наказом МОЗ України від 09.07.2024 № 1192 «Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони». Під час термічного перероблення поліпропілену можливе виділення оксиду вуглецю (ГДК 20 мг/м³, IV клас небезпеки), альдегідів та аерозолі полімеру. Для запобігання перевищенню ГДК над зоною плавлення і гранулятором установлюють місцеві відсмоктувачі, які видаляють газоподібні продукти деструкції безпосередньо з місць їх утворення; ефективність вентиляції контролюють періодичними замірами концентрацій.

6.2 Виробничий шум та вібрація

Основними джерелами шуму та вібрації на лінії є електродвигун привода, редуктор, вузол гранулювання й подрібнювач відходів. Допустимі рівні шуму на постійних робочих місцях регламентує ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку»: еквівалентний рівень звуку на робочому місці оператора не повинен перевищувати 80 дБА. Параметри виробничої вібрації нормуються за ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації».

Для зниження шуму та вібрації передбачено встановлення привода й редуктора на віброізолювальні опори (амортизатори), балансування обертових частин, застосування звукоізолювальних кожухів на вузлах гранулювання та подрібнення, своєчасне технічне обслуговування підшипникових вузлів. За неможливості зниження шуму технічними засобами до 80 дБА працівників забезпечують засобами індивідуального захисту органів слуху (протишумними навушниками або вкладишами). Контроль рівнів шуму проводять не рідше одного разу на квартал з веденням журналу вимірювань.

6.3 Виробниче освітлення

Раціональне освітлення робочих місць забезпечує безпечне обслуговування лінії, контроль якості гранул і знижує зорове стомлення. Нормування виконують за ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення». Зорові роботи оператора (спостереження за процесом, контроль гранул розміром 0,5–1 мм) належать до робіт середньої точності (IV розряд зорової роботи): за системи загального штучного освітлення нормована освітленість становить 200 лк, за комбінованої системи — до 300–400 лк.

У приміщенні передбачають суміщене освітлення — природне бічне через віконні прорізи та штучне загальне рівномірне. Для штучного освітлення застосовують світлодіодні світильники з індексом передавання кольору не нижче 80; у зоні пульта керування та контролю гранул установлюють місцеве освітлення. Для безпечної евакуації влаштовують аварійне (евакуаційне) освітлення, що забезпечує освітленість не менше 0,5 лк на підлозі вздовж шляхів евакуації. Стан освітлювальних установок і чистоту світильників контролюють згідно з графіком планово-запобіжних робіт.

6.4 Електробезпека

Електрообладнання екструзійної лінії (електронагрівники циліндра, електропривід, шафа керування) живиться від трифазної мережі змінного струму напругою 380/220 В із глухозаземленою нейтраллю (система TN-S). За небезпекою ураження електричним струмом приміщення належить до класу з підвищеною небезпекою — через наявність струмопровідного пилу та можливість одночасного дотику працівника до заземлених металоконструкцій і корпусів обладнання.

Вимоги електробезпеки регламентують НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» та ДСТУ EN 60204-1:2019 «Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги». Загальні принципи зниження ризику під час проєктування машини відповідають

ДСТУ EN ISO 12100:2016 «Безпечність машин. Загальні принципи проєктування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків».

Для захисту персоналу передбачено захисне заземлення (занулення) корпусів електрообладнання з опором заземлювального пристрою не більше 4 Ом; застосування пристроїв захисного вимкнення (ПЗВ); надійну ізоляцію струмовідних частин та їх огороження; блокування, що знеструмлює привід під час відкривання захисних кожухів; попереджувальні знаки й світлову сигналізацію наявності напруги. Персонал, який обслуговує електроустановки, проходить навчання та перевірку знань з присвоєнням відповідної групи з електробезпеки; опір ізоляції й заземлення перевіряють не рідше одного разу на шість місяців.

6.5 Пожежна безпека

Пожежну безпеку забезпечують відповідно до Кодексу цивільного захисту України та Правил пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2014), затверджених наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417. Категорію приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпечністю визначають за ДСТУ Б В.1.1-36:2016. З огляду на наявність твердих горючих речовин (поліпропілену, його розплаву та пилу) дільниця грануляції належить до категорії В — пожежонебезпечної.

Потенційними джерелами запалювання є нагріті поверхні циліндра й головки, перегрів розплаву полімеру, коротке замикання в електропроводці та розряди статичної електрики. Для запобігання пожежам і їх ліквідації передбачено автоматичну пожежну сигналізацію з тепловими та димовими сповіщувачами; первинні засоби пожежогашіння — порошкові вогнегасники ВП-5 у виробничій зоні та вуглекислотні ВВК-5 поблизу електрообладнання; підтримання чистоти поверхонь і своєчасне видалення полімерного пилу; контроль справності систем терморегулювання екструдера; заборону відкритого вогню та зберігання сировини на відстані не менше 1,5 м від нагрітих поверхонь.

Розробляють план евакуації, проводять інструктажі та практичні протипожежні тренування з персоналом.

Розроблені у розділі заходи з нормалізації мікроклімату, чистоти повітря робочої зони, зниження шуму й вібрації, забезпечення освітленості, електро- та пожежної безпеки дають змогу створити безпечні й здорові умови праці оператора екструзійної лінії для грануляції відходів упаковки та знизити виробничий ризик до допустимого рівня.

Нормативні посилання до розділу

- Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII (зі змінами).
- Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI (зі змінами).
- ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. — Чинний.
- ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. — Чинний.
- ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. — Чинний.
- Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони : наказ МОЗ України від 09.07.2024 № 1192. — Чинний.
- ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. — Чинний.
- НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. — Чинний.
- ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. — Чинний.
- ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Загальні принципи проєктування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків. — Чинний.
- Правила пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2014) : затв. наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417. — Чинний.

– ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. — Чинний.

7 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

7.1 Опис і призначення деталі «Проміжна вставка»

У межах технологічної частини проєкту розроблено технологічний процес механічного оброблення деталі «Проміжна вставка» (позначення ЛУ-21.10724.000.02-70), яка входить до складу гранулювальної головки екструдера ЧП 45×25. Вставка розташовується між фланцем корпусу головки та фільтрною плитою і виконує одночасно кілька функцій: центрує елементи головки відносно осі каналу, перерозподіляє потік розплаву по перерізу та вирівнює його швидкісне поле перед фільтрною плитою. Для проходження розплаву у вставці по колу діаметром 115 мм виконано вінець із 20 наскрізних ступінчастих отворів; чотири отвори на колі діаметром 65 мм слугують для кріпильних елементів, що стягують пакет головки.

Умови експлуатації деталі визначаються параметрами процесу грануляції: температура розплаву PPG марки 40 становить близько 230 °С, а тиск у головці за результатами параметричного розрахунку сягає 1,32 МПа. Отже, деталь працює за помірних механічних навантажень, проте за підвищеної температури та в контакті з полімерним розплавом, що висуває вимоги до точності спряжуваних поверхонь і якості каналів.

Габаритні розміри деталі: зовнішній діаметр 170 мм, характерні діаметри ступінчастого профілю – 115 та 85 мм; маса 10 кг. Креслення деталі виконано на форматі А2 у масштабі 1:5. Шорсткість посадкових і торцевих спряжуваних поверхонь – Ra 3,2 мкм, решти поверхонь – Ra 6,3 мкм. Ескіз деталі наведено на рисунку 7.1.

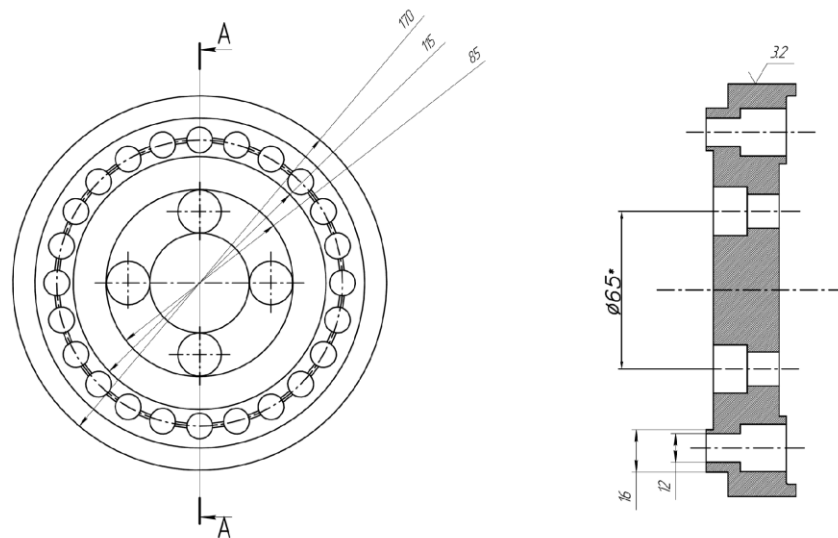


Рисунок 7.1 – Проміжна вставка гранулювальної головки: головний вид і розріз А–А

Матеріалом деталі обрано конструкційну вуглецеву якісну сталь 45 за ДСТУ 7809:2015. Цей вибір зумовлений сприятливим поєднанням міцності, оброблюваності різанням та вартості: сталь 45 добре обробляється точінням і свердлінням, за потреби може піддаватися нормалізації чи поліпшенню, а її механічних характеристик цілком достатньо для рівня навантажень, що діють на вставку в складі головки.

З погляду технологічності деталь є тілом обертання типу «диск» зі ступінчастим профілем, усі поверхні якого доступні для оброблення стандартним різальним інструментом. Зовнішня циліндрична поверхня, ступінчастий профіль і торці обробляються точінням за два установи; система отворів виконується свердлінням за кондуктором, що забезпечує задану точність їх розташування по колах. Конструкція не містить важкодоступних елементів, тому деталь слід визнати технологічною.

Вибір заготовки.

З огляду на форму деталі та дрібносерійний характер виробництва заготовкою прийнято круглий гарячекатаний прокат за ДСТУ 4738:2007 діаметром 180 мм, відрізаний на довжину 75 мм. Маса такої заготовки становить:

$$m_3 = \rho \cdot (\pi/4) \cdot D^2 \cdot L = 7850 \cdot 0,785 \cdot 0,18^2 \cdot 0,075 \approx 15 \text{ кг}, (7.1)$$

Коефіцієнт використання матеріалу:

$$K_{BM} = m_d / m_3 = 10 / 15 \approx 0,67. (7.2)$$

Отримане значення є прийнятним для деталей типу «диск», що виготовляються з прокату в умовах дрібносерійного виробництва; застосування штампованої або литої заготовки за такої програми випуску економічно недоцільне.

Розробка технологічного процесу виготовлення деталі.

Технологічний процес побудовано за принципом концентрації переходів на верстатах із ЧПК. Маршрут оброблення містить дві токарні операції (оброблення деталі з двох установів) та вертикально-свердлильну операцію для виконання системи отворів. На операції 005 заготовку закріплюють у трикулачковому патроні, підрізають торець та обточують зовнішню поверхню Ø170, поверхню Ø85 і прилеглі ступені профілю начорно й начисто. На операції 010 деталь перевстановлюють, підрізають другий торець у розмір і формують ступінчасті поверхні з протилежного боку. На операції 015 за кондуктором свердлять вінець отворів по колу Ø115 мм із цекуванням ступенів на розміри 12 і 16 мм та чотири кріпильні отвори по колу Ø65 мм, після чого зенкують фаски. Завершують процес слюсарна та контрольна операції. Розроблений технологічний процес детально описано в маршрутній карті (МК), картах ескізів (КЕ) та операційних картах (ОК), наведених у додатку Е.

7.2 Вибір та розрахунок пристосування для певної операції

Для токарних операцій 005 і 010 застосовується трикулачковий самоцентрувальний патрон. Для деталі типу «диск» діаметром 170 мм за відносно малої довжини такий патрон є оптимальним рішенням: три кулачки, що переміщуються синхронно від спірального диска, автоматично суміщають вісь заготовки з віссю шпинделя та надійно утримують її під час підрізання торців і

обточування зовнішньої поверхні та ступінчастого профілю. Конструкцію патрона показано на рисунку 7.2.

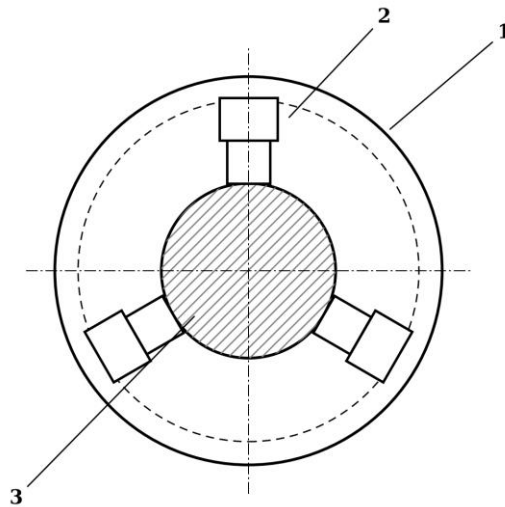


Рисунок 7.2 – Схема трикулачкового самоцентрувального патрона: 1 – корпус;
2 – кулачки; 3 – заготовка

Розрахунок сили закріплення деталі.

Під час точіння на заготовку діє дотична складова сили різання, що створює момент, який прагне повернути деталь у кулачках. Цьому моменту протидіє момент сил тертя між кулачками та заготовкою, створюваний силою затиску. Схему сил наведено на рисунку 7.3.

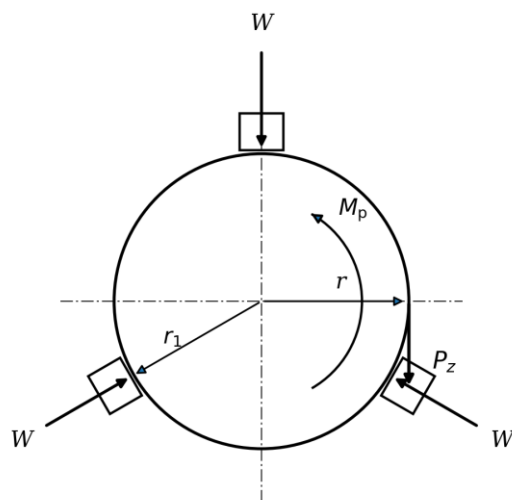


Рисунок 7.3 – Схема сил, що діють на деталь у процесі оброблення

Головну складову сили різання для чорнового точіння визначаємо за емпіричною залежністю:

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^n \cdot K_p, (7.3)$$

де $C_p = 300$, $x = 1,0$, $y = 0,75$, $n = -0,15$ – коефіцієнт і показники степеня для точіння конструкційної сталі твердосплавним різцем; $t = 2,5$ мм – глибина різання; $s = 0,5$ мм/об – подача; $v = 120$ м/хв – швидкість різання; $K_p = 0,9$ – узагальнений поправковий коефіцієнт. Після підстановки:

$$P_z = 10 \cdot 300 \cdot 2,5 \cdot 0,5^{0,75} \cdot 120^{-0,15} \cdot 0,9 \approx 1957 \text{ Н} \approx 1,96 \text{ кН}. (7.4)$$

Надійність закріплення враховуємо загальним коефіцієнтом запасу:

$$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 1,15 \cdot 1,0 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \approx 2,69, (7.5)$$

де $K_0 = 1,5$ – гарантований запас; $K_1 = 1,2$ – враховує зростання сили різання на чорновому переході; $K_2 = 1,15$ – враховує затуплення інструмента; $K_3 = 1,0$ – різання без ударів; $K_4 = 1,3$ – ручний привод затиску; $K_5 = 1,0$ – зручне розташування рукоятки. Сумарне зусилля затиску трьома кулачками з умови рівноваги моментів:

$$W_{\text{сум}} = K \cdot P_z \cdot r / (f \cdot r_1) = 2,69 \cdot 1957 \cdot 0,0875 / (0,35 \cdot 0,090) \approx 14,6 \text{ кН}, (7.6)$$

де $r = 87,5$ мм – радіус оброблюваної поверхні; $r_1 = 90$ мм – радіус контакту кулачків із заготовкою; $f = 0,35$ – коефіцієнт тертя для рифлених кулачків.

Приймаємо сумарне зусилля затиску 15 кН, тобто близько 5 кН на кожен кулачок. Це значення є мінімально необхідним для запобігання провертанню заготовки на чорнових переходах; стандартний трикулачковий патрон відповідного типорозміру забезпечує такі зусилля з запасом, отже, вибране пристосування задовольняє умови оброблення деталі «Проміжна вставка».

Таким чином, у розділі описано призначення та умови роботи деталі «Проміжна вставка», обґрунтовано вибір матеріалу й заготовки, розроблено маршрутний технологічний процес механічного оброблення з оформленням маршрутної карти, карт ескізів та операційних карт за встановленими формами

(додаток Е), а також вибрано й розраховано верстатне пристосування для токарних операцій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розв'язано задачу підвищення стабільності подачі сировини та працездатності одночерв'ячного екструдера ЧП 45×25 для грануляції відходів упаковки шляхом модернізації живильника. За результатами виконаної роботи зроблено такі висновки.

1. Проаналізовано призначення, технічну характеристику та конструкцію базової машини — одночерв'ячного екструдера ЧП 45×25, призначеного для перероблення відходів упаковки з поліпропіленгліколю марки 40 (густина розплаву 1036 кг/м³) продуктивністю 30 кг/год за температури 230 °С; описано основні складові частини та принцип дії машини.

2. Виконано літературний та патентний огляд систем подачі матеріалу в шнекових екструдерах, у якому розглянуто шість патентних рішень провідних виробників. Для модернізації обрано рішення за патентом US 9 227 344 B2 — коаксіальне розміщення циклона всередині завантажувальної воронки з набивним шнеком, що примусово подає матеріал у зону змішування, усуває зводоутворення й забивання та забезпечує рівномірне завантаження легких фракцій подрібненої упаковки.

3. Виконано параметричні та кінематичні розрахунки екструдера: сумарний коефіцієнт геометричної форми головки $\Sigma K_z = 1,129$; перепад тиску в екструзійній головці $\Delta P = 1,318 \cdot 10^6$ Па; частота обертання черв'яка 1,266 об/с. Тепловим розрахунком визначено масу корпусу 24,358 кг і час його нагрівання до робочої температури 2,378 хв. В'язкість розплаву визначено інтерполяцією кривих течії програмою мовою Visual Basic for Applications.

4. Перевірним розрахунком на міцність установлено, що за робочого крутного моменту 500 Н·м максимальні дотичні напруження кручення в небезпечному перерізі ступеневого стержня становлять 64,8 МПа, а коефіцієнт запасу міцності за номінальними напруженнями дорівнює 8,0, що значно перевищує нормативне значення.

5. У середовищі SolidWorks побудовано тривимірні моделі вузла, а в САЕ-системі ANSYS методом скінченних елементів проведено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану базової та модернізованої конструкцій шнека зі сталі 40ХН. Для базової конструкції отримано максимальні переміщення 0,7098 мм, еквівалентні напруження 322,1 МПа та запас міцності 2,79; для модернізованої — 0,84764 мм, 302,05 МПа та 2,98 відповідно. Максимальні напруження модернізованої конструкції менші на 6,2 %, а запас міцності зріс із 2,79 до 2,98, що свідчить про рівномірніший розподіл навантаження та підтверджує працездатність запропонованого рішення.

6. Виконано розрахунок шнекового живильника модернізованого завантажувального пристрою: об'ємна продуктивність $V = 1,95 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, масова продуктивність $\Pi = 31,6 \text{ кг/год}$, що перевищує задану продуктивність екструдера 30 кг/год і забезпечує гарантовану подачу матеріалу. Для горизонтального розташування живильника (висота підйому продукту $H = 0$) потужність привода визначається лише опором переміщенню матеріалу в корпусі та становить $N = 38 \text{ Вт}$.

7. Розроблено розділ з охорони праці, у якому проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі чинники під час експлуатації екструзійної лінії та запропоновано заходи з нормалізації мікроклімату й чистоти повітря робочої зони, зниження шуму і вібрації, забезпечення освітленості, електро- та пожежної безпеки.

8. У технологічному розділі розроблено технологічний процес механічного оброблення деталі «Проміжна вставка» гранулювальної головки: обґрунтовано вибір матеріалу (сталь 45) та заготовки (круглий прокат $\varnothing 180 \text{ мм}$, $K_{BM} = 0,67$), складено маршрут із двох токарних і вертикально-свердильної операцій з оформленням маршрутної, ескізних та операційних карт, а також вибрано й розраховано трикулачковий самоцентрувальний патрон із потрібним зусиллям затиску близько 15 кН.

9. Результати дипломного проєкту — обґрунтована конструкція модернізованого живильника, комплекс виконаних розрахунків та графічна

частина — можуть бути використані підприємствами, що переробляють відходи полімерної упаковки методом екструзійної грануляції.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мікульонюк І. О. Технологія перероблення полімерів : підручник. 5-те вид., переробл. та доповн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 314 с.
2. Екструзійне обладнання : навч. посіб. / уклад.: В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, Д. Г. Швачко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 144 с.
3. Щербина, В. Ю., Кочерга, А. Ю. (2025). Дослідження руху частинок матеріалу в трубних обертових апаратах (укр.). Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (4), 43–50. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2025.348813>
4. Щербина В.Ю., Гондляр О.В., Сівецький В.І. Іжніринг інноваційних технологій та обладнання. Механічне обладнання для виробництва в'язучих будівельних матеріалів [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. – 147 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45720>
5. Device for feeding granulate and filler material to an extruder screw of an extruder : pat. US9227344B2, B29B 7/60 / Schmalholz P. ; BSW Machinery Handels GmbH. Publ. 05.01.2016.
6. Device and method for the extrusion of thermo-mechanically deformable materials in bulk form, and compact screw extruder : pat. US11597118B2 / AIM3D GmbH. 2023.
7. Verfahren zum kontrollierten Befüllen und Entleeren von Granulattrichtern : pat. DE102004051196A1 / Hessenbruch R. 2006.
8. Full automatic feed system of polymer extruder : pat. CN208068820U / Beijing Technology and Business University. 2018.
9. Forced feeding device of extruder and extruder : pat. CN114368126A / Huazhong University of Science and Technology. 2022.
10. Method of feeding thermoplastic material to a twin-screw extruder using loss-in-weight feeders : pat. JP2006272555A / Toshiba Machine Co. Ltd. 2006.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця розглянутих патентів

Таблиця А.1 – Перелік розглянутих патентів

№ п/п	Предмет пошуку	Країна, вид і номер документа	Сутність заявленого технічного рішення
1	Device for feeding granulate and filler material to an extruder screw of an extruder	US9227344B2, США, Schmalholz P. / BSW Machinery Handels GmbH	Коаксіальне розміщення циклона всередині завантажувальної воронки із застосуванням набивного шнека, що проходить крізь вихідний отвір циклона у зону змішування. Матеріал примусово транспортується шнеком, що усуває зводоутворення і забивання навіть для легких або схильних до злипання фракцій, підвищує ступінь заповнення та забезпечує рівномірну подачу грануляту.
2	Device and method for the extrusion of thermo-mechanically deformable materials; compact screw extruder	US11597118B2, США, Rückborn T., Zielke R. та ін. / AIM3D GmbH	Встановлення подрібнювального інструменту у воронкоподібній зоні подачі вертикального екструдера. Інструмент унеможливає обертання матеріалу зі шнеком, направляє його осьово та подрібнює частину грануляту, підвищуючи насипну густину. Дозволяє суттєво скоротити відношення L/D і отримати компактну конструкцію.
3	Verfahren zum kontrollierten Befüllen und Entleeren von Granulattrichtern	DE102004051196A1, Німеччина, Hessenbruch R.	Метод керованого заповнення бункерної системи з двох бункерів, у якій накопичувальний бункер містить лише задану частку погодинної потреби й щоциклу повністю спорожнюється у зважувальний під контролем комп'ютера. Мінімізує залишок матеріалу та забезпечує швидкий і чистий перехід між видами грануляту.
4	Full automatic feed system of polymer extruder	CN208068820U, Китай, Beijing Technology and Business University	Повністю автоматична система подачі з вихровими пластинами на ланцюговому транспортері, триступеневою дуговою мішалкою та лазерними сканерами контролю заповнення. Контролер підтримує заповнення відсіків у діапазоні 50–80%, забезпечуючи рівномірну безперебійну подачу та однорідне змішування.

№ п/п	Предмет пошуку	Країна, вид і номер документа	Сутність заявленого технічного рішення
5	Forced feeding device of extruder and extruder	CN114368126A, Китай, Huazhong University of Science and Technology	Дві штовхальні пластини зі зворотно-поступальним рухом у зоні завантажувального отвору циліндра, що приводяться кривошипно-шатунним механізмом або пневмоциліндрами і примусово вштовхують матеріал у зону переробки; дугоподібні нижні кінці виключають мертві зони накопичення.
6	Method of feeding thermoplastic material to a twin-screw extruder using loss-in- weight feeders	JP2006272555A, Японія, Toshiba Machine Co. Ltd.	Введення навмисного часового зсуву між циклами завантаження кількох ваговтрачаючих дозаторів (понад 0,3 середнього часу перебування матеріалу). Усуває накладання похибок дозування, скорочує коливання тиску в голівці та підвищує рівномірність товщини плівки/листа.

Додаток Б

Лістинг програми інтерполяції в'язкості (VBA)

```
Sub Pomoica7()  
    Dim n, i As Integer  
    Dim g0, x, g(), u() As Single  
    n = Cells(2, 6)  
    g0 = Cells(1, 6)  
    i = 0  
    ReDim g(n)  
    ReDim u(n)  
    For j = 0 To (n - 1)  
        g(j) = Cells(j + 2, 2)  
        u(j) = Cells(j + 2, 3)  
    Next j  
    For i = 0 To (n - 1)  
        If g0 < g(i) Then  
            Ln1 = Log(g(i - 1))  
            Ln2 = Log(g(i))  
            Ln3 = Log(u(i - 1))  
            Ln4 = Log(u(i))  
            Ln5 = Log(g0)  
            x = y0(Ln1, Ln2, Ln3, Ln4, Ln5)  
            Cells(14, 12) = Exp(x)  
            n = ((Ln4 - Ln3) / (Ln2 - Ln1)) + 1  
            Cells(15, 12) = n  
            m = Exp(x - (n - 1) * Ln5)  
            Cells(16, 12) = m  
            Exit For  
        End If  
    Next i  
End Sub  
  
Function y0(x1, x2, y1, y2, x0)  
    y0 = ((y2 - y1) / (x2 - x1)) * (x0 - x1) + y1  
End Function
```

Додаток В

Специфікації до графічної частини

Нижче наведено специфікації до складальних креслень графічної частини за переліком складових частин виробів. Позначення документів, матеріали та стандартні вироби остаточно уточнюються за робочими кресленнями; специфікації оформлюються за ДСТУ ГОСТ 2.106 на окремих аркушах формату А4.

В.1 Специфікація складального креслення «Екструдер ЧП 45×25» (ЛУ-21.107243.000.00 СК)

Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.
1	ЛУ-21.107243.001.00	Рама (станина)	1

2	ЛУ-21.107243.002.00	Кожух станини	1
3	ЛУ-21.107243.003.00	Завантажувальний патрубок	1
4	ЛУ-21.107243.004.00	Підшипниковий вузол	1
5	ЛУ-21.107243.005.00	Завантажувальний пристрій (модернізований)	1
6	ЛУ-21.107243.006.00	Фланцеве з'єднання головки	1
7	ЛУ-21.107243.007.00	Система змащення (насос)	1
8	ЛУ-21.107243.008.00	Нагрівники	—
9	—	Редуктор (привід)	1
10	ЛУ-21.107243.010.00	Черв'як (шнек)	1
11	ЛУ-21.107243.011.00	Циліндр	1
12	ЛУ-21.107243.012.00	Кожух термоізоляції	1

Примітка. Поз. 9 (редуктор) і нагрівники поз. 8 — стандартні (купівельні) вироби; їх кількість, типорозміри та позначення за каталогами зазначають у специфікації на окремих аркушах.

В.2 Специфікація складального креслення «Завантажувальний пристрій (модернізований)» (ЛУ-21.10724.000.02 СК)

Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.
1	ЛУ-21.10724.001.02	Бункер завантажувальний	1
2	ЛУ-21.10724.002.02	Шнек набивний (живильник)	1
3	ЛУ-21.10724.003.02	Фланець верхній	1
4	ЛУ-21.10724.004.02	Кришка	1
5	ЛУ-21.10724.005.02	Патрубок бічний (подачі матеріалу)	1
6	ЛУ-21.10724.006.02	Фланець нижній (з'єднання з корпусом)	1
7	ЛУ-21.10724.007.02	Втулка	1
8	—	Болт М10 ГОСТ 7798-70	—
9	—	Гайка М10 ГОСТ 5915-70	—

Примітка. Кріпильні (стандартні) вироби поз. 8, 9 наведено орієнтовно; остаточні типорозміри й кількість визначають за робочими кресленнями вузла.

Додаток Г

Особисті досягнення студента

За матеріалами дипломного проєкту опубліковано тези доповіді: Хорошун Ю. В., Сокольський О. Л., Скомороха Н. В. Вдосконалення завантажувального бункера екструдера // Матеріали XXIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. — С. 110–111. Копію опублікованих тез наведено нижче.

Вдосконалення завантажувального бункера екструдера

Хорошун Ю.В., студ., Сокольський О.Л., д.т.н., доц., Скомороха Н.В., студ.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

У роботі проаналізовано недоліки існуючих систем подачі матеріалу до черв'яка екструдера та запропоновано конструктивне рішення на основі інтеграції циклонного сепаратора з набивним шнеком у завантажувальний бункер. Реалізація такого підходу забезпечує стабільне повернення подрібнених технологічних відходів у виробничий цикл без порушення рівномірності подачі гранулята.

Ключові слова: завантажувальний пристрій; циклон; набивний шнек; полімерні відходи; екструзія

Вступ. Завантажувальний бункер є одним із ключових вузлів екструдера, що визначає стабільність і продуктивність усього технологічного процесу [1]. Особливої актуальності питання надійної подачі матеріалу набуває у виробництвах, де поряд зі свіжим гранулятом необхідно переробляти подрібнені відходи – крайні обрізки плівок, стрічок та інших полімерних напівфабрикатів. Через низьку насипну густину та схильність до злипання такі матеріали утворюють зводи на виході сепаратора, що призводить до нестабільної роботи подавального шнека і погіршення якості екструдату [2]. Існуючі конструкції не вирішують цієї проблеми в повній мірі, тому пошук ефективного технічного рішення залишається актуальним завданням.

Аналіз патентного рішення та конструкція удосконаленого пристрою. За результатами патентного пошуку для вдосконалення живильника вторинної полімерної сировини обрано рішення [3], що принципово відрізняється від традиційних схем компоновки основних елементів. Ключовою особливістю є співвісне розміщення циклонного сепаратора безпосередньо всередині конічного бункера для гранулята, що дозволяє суміщати функції сепарації та змішування в єдиному компактному вузлі. Набивний шнек встановлено вертикально по осі циклона таким чином, що він одночасно запобігає зводуутворенню і примусово подає відходи в змішувальну зону (рис. 1).

Принцип роботи та переваги конструкції. Подрібнені відходи надходять до циклона пневматично через тангенціальний патрубок. Під дією відцентрових сил частинки відокремлюються від повітряного потоку та осідають у нижній циліндричній частині циклона, звідки набивний шнек примусово переміщує їх крізь вихідний отвір. У лійкоподібній змішувальній секції відходи з'єднуються зі свіжим гранулятом, що надходить з бункера по кільцевому зазору навколо циклона. Готова суміш безпосередньо подається до черв'яка екструдера.

Конструкція має такі переваги.

Надійне запобігання зводуутворенню – примусове транспортування шнеком унеможливує зависання матеріалу незалежно від його фізичних властивостей та умов навколишнього середовища.

Керований склад суміші – роздільна подача компонентів із наступним їх змішуванням у визначеній зоні дозволяє точно витримувати задане співвідношення відходів і гранулята.

Скорочення транспортних шляхів – коаксіальна компоновка усуває необхідність у виносних змішувачах і вертикальних транспортерах, що зменшує ймовірність сегрегації матеріалу.

Підвищення ступеня заповнення черв'яка – рівномірна примусова подача суміші безпосередньо до екструдера стабілізує продуктивність і знижує коливання тиску в зоні плавлення.

Спрощення обслуговування – передбачений оглядовий лючок у змішувальній секції забезпечує швидкий доступ для усунення можливих засмічень без зупинки виробництва.

На основі патентної пропозиції було розроблено конструктивне рішення у 3D.

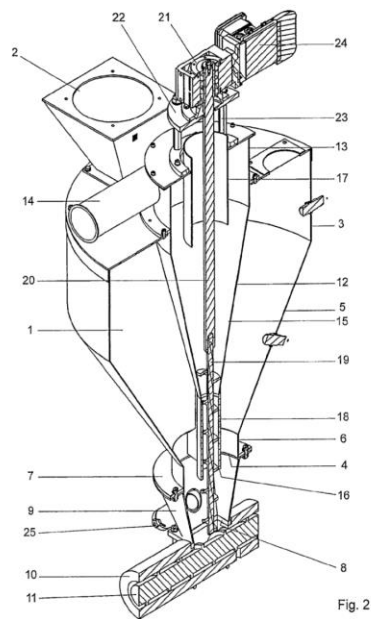
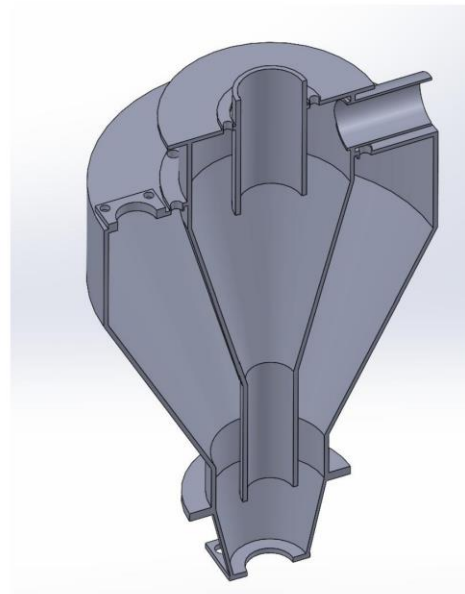


Fig. 2

a



б

Рисунок 1 – Вдосконалений завантажувальний пристрій:
а – схема конструкції [3]; б – 3D модель розробленої конструкції

Висновок. Розглянуте патентне рішення дозволяє комплексно вирішити проблему надійного введення подрібнених полімерних відходів у процес екструзії. На відміну від традиційних схем, де циклон і бункер є окремими агрегатами, запропонована інтегрована конструкція забезпечує компактність, стабільність подачі та можливість точного регулювання складу переробної суміші. Впровадження такого пристрою є перспективним насамперед для підприємств, що виробляють полімерні плівки та тканини з одночасною переробкою крайових обрізків.

Перелік посилань

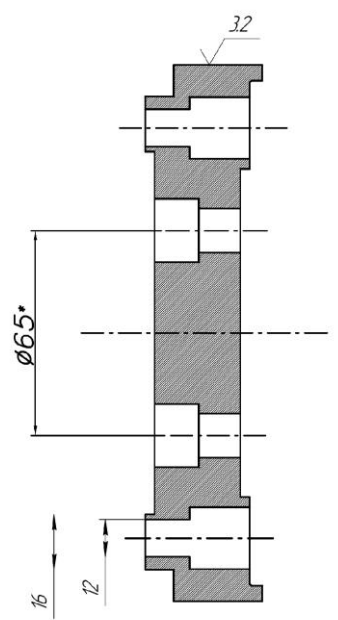
1. Мікульонюк І.О. Технологія перероблення полімерів : підруч. 5-те вид., переробл. та доповн. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 314 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74268>
2. Екструзійне обладнання : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, Д. Г. Швачко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 144 с. URI: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/73944>
3. Device for feeding granulate and filler material to an extruder screw of an extruder : US 9,227,344 B2, B29B 7/60 / Schmalholz, Peter. – Jan. 5, 2016.

Додаток Д

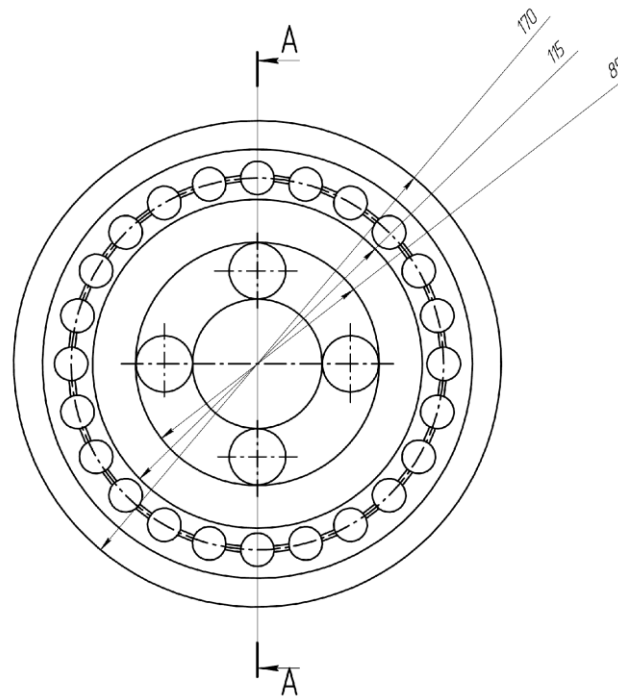
Комплект документів технологічного процесу

Технологічний процес механічного оброблення деталі «Проміжна вставка» (ЛУ-21.10724.000.02-70) оформлено комплектом документів за стандартами ЄСТД: маршрутна карта (МК) за ГОСТ 3.1118-82 (форма 1), карти ескізів (КЕ) за ГОСТ 3.1406-86 (форма 3) для операцій 005, 010, 015 та операційні карти (ОК) за ГОСТ 3.1404-86 (форма 2).

Дубл.																
Взамін																
Підпис										Зм	Ар	№ док.	Підпис	Дата		
Розробив	Хорошун Ю. В.					КПІ ім. Ігоря Сікорського	ЛУ-21.10724.000.02-70									
Перевірив	Борщик С. О.															
Затв.						ПРОМІЖНА ВСТАВКА										
Н. контр.																
M01	Сталь 45, ДСТУ 7809:2015															
M02	Код	ОВ	МД	ОМ	Н. роз.	КВМ	Код заготовки				Профіль і розміри			КД	МЗ	
		кг	10			0,67					Круг Ø180×75			1	15	
A	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, найменування операції							Позначення документа				
B	Код, найменування обладнання					См.	Проф.	P	УП	КР	КОВД	ОН	ОП	Кшт.	Тп.з	Тшт.
A03	01	01	01	005	3608 Токарна з ЧПК											
B04	38261.XXXX Токарний верстат з ЧПК 16K20Ф3															
05																
A06	01	01	01	010	3608 Токарна з ЧПК											
B07	38261.XXXX Токарний верстат з ЧПК 16K20Ф3															
08																
A09	01	01	01	015	3708 Вертикально-свердильна											
B10	38261.XXXX Вертикально-свердильний верстат 2Н135															
11																
A12	01	01	01	020	0108 Слюсарна											
B13	Верстак слюсарний															
14																
A15	01	01	01	025	0200 Контрольна											
B16	Стіл ВТК, засоби вимірювання															
МК	Обробка різанням															

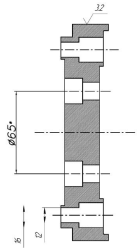
Дубл.															
Взамін															
Підпис									Зм	Ар	№ док.	Підпис		Дата	
Розробив	Хорошун Ю. В.					КПІ ім. Ігоря Сікорського									
Перевірив	Борщик С. О.														
Утв.							ПРОМІЖНА ВСТАВКА					1	1	010	
Н. контр.															
															
КЕ	Обробка різанням														

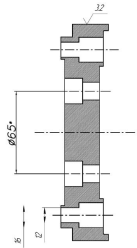
Дубл.														
Взамін														
Підпис								Зм	Ар	№ док.	Підпис		Дата	
Розробив	Хорошун Ю. В.					КПІ ім. Ігоря Сікорського								
Перевірив	Борщик С. О.													
Утв.							ПРОМІЖНА ВСТАВКА					1	1	015
Н. контр.														

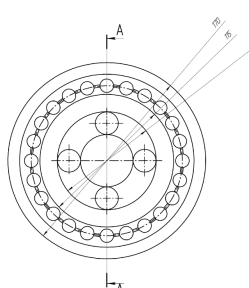


KE

Обробка різанням

Дубл.														
Взамін														
Підпис								Зм	Ар	№ док.	Підпис		Дата	
Розробив	Хорошун Ю. В.				КПІ ім. Ігоря Сікорського									
Перевірив	Борщик С. О.													
Н. контр.					ПРОМІЖНА ВСТАВКА							Н		005
				Назва операції				Матеріал						
				Токарна з ЧПК				Сталь 45, ДСТУ 7809:2015						
				Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри				МЗ	Коод		
					кг	10	Круг Ø180×75				15			
				Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми						
				Токарний верстат з ЧПК 16К20Ф3										
				То	Тд	Тп.з	Тшт.	МОР						
								Емульсія						
Р					ПН	D або B	L	t	i	s	n	v		
P01	1. Підрізати торець начорно, начисто;													
T02	2. Точити Ø170 начорно, начисто;													
O3	3. Точити поверхню Ø85 та прилеглі ступені профілю начорно, начисто;													
O04	4. Точити фаски згідно з кресленням.													
T05														
T06														
P07														
O8														
O9														
O10														
OK		Обробка різанням												

Дубл.														
Взамін														
Підпис								Зм	Ар	№ док.	Підпис		Дата	
Розробив	Хорошун Ю. В.				КПІ ім. Ігоря Сікорського									
Перевірив	Борщик С. О.													
Н. контр.					ПРОМІЖНА ВСТАВКА							Н		010
				Назва операції				Матеріал						
				Токарна з ЧПК				Сталь 45, ДСТУ 7809:2015						
				Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри				МЗ	Коод		
					кг	10	Круг Ø180×75				15			
				Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми						
				Токарний верстат з ЧПК 16К20Ф3										
				То	Тд	Тп.з	Тшт.	МОР						
								Емульсія						
Р					ПН	Д або В	L	t	i	s	n	v		
P01	1. Підрізати другий торець, витримавши загальну довжину деталі;													
T02	2. Точити ступінчасті поверхні профілю з протилежного боку начорно, начисто;													
03	3. Точити фаски згідно з кресленням.													
O04														
T05														
T06														
P07														
08														
09														
O10														
OK		Обробка різанням												

Дубл.														
Взамін														
Підпис								Зм	Ар	№ док.	Підпис		Дата	
Розробив	Хорошун Ю. В.				КПІ ім. Ігоря Сікорського									
Перевірив	Борщик С. О.													
Н. контр.					ПРОМІЖНА ВСТАВКА							Н		015
				Назва операції				Матеріал						
				Вертикально-свердлильна				Сталь 45, ДСТУ 7809:2015						
				Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри				МЗ	Коод		
					кг	10	Круг Ø180×75				15			
				Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми						
				Вертикально-свердильний верстат 2Н135										
				То	Тд	Тп.з	Тшт.	МОР						
								Емульсія						
Р					ПН	D або B	L	t	i	s	n	v		
P01	1. Свердлити отвори по колу Ø115 мм за кондуктором (діаметр – згідно з кресленням);													
T02	2. Цекувати ступені отворів, витримавши розміри 12 та 16 мм;													
O03	3. Свердлити 4 отвори по колу Ø65 мм згідно з кресленням;													
O04	4. Зенкувати фаски в отворах.													
T05														
T06														
P07														
O08														
O09														
O10														
OK		Обробка різанням												