

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

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

«На правах рукопису»
УДК 66.021

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО
Завідувач кафедри МАХНВ

_____ Андрій СТЕПАНЮК
“ _____ ” _____ 2025 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг та комп’ютерно-
інтегровані технології проектування інноваційного галузевого
обладнання»**

**зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
на тему: «Модернізація лінії каскадної екструзії з розробкою
шестеренного насоса»**

Виконав:

студент 2 курсу, групи ЛМ-41мп
Анатолій АБАЄВ _____

Науковий керівник:

доцент, к.т.н. Микола ШВЕД _____

Консультанти:

охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях
ст. викл., к.т.н. Андрій КОВТУН _____

розробка стартап-проекту
доцент, к.е.н. Наталія ЮДІНА _____

автоматичний контроль і керування процесом
професор, д.т.н. Олексій ЖУЧЕНКО _____

комп’ютерне моделювання процесів взаємодії
асистент Микита БИШКО _____

Рецензент: _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім’я та прізвище)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____ Анатолій АБАЄВ

Київ – 2025 року

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

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Напрямок підготовки – 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 133 - Галузеве машинобудування

Освітня програма (спеціалізація): Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАХНВ

_____ Андрій СТЕПАНЮК

“ ____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Абаєву Анатолію Юрієвичу

1. Тема дисертації : «Модернізація лінії каскадної екструзії з розробкою шестеренного насоса» затверджені наказом по університету від “ ____ ” _____ 2025 р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації: « ____ » _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до проекту: Сировина: біополімер марки LPA Ingeo 2003D
Продуктивність шестеренного насоса 0,01 кг/с (36 кг/год)

Гідравлічний опір формуючої головки 25 МПа

Температура переробки 453 К (180 °С)

4. Перелік завдань, які потрібно розробити:

а) основна частина: обґрунтувати вибір конструкції дисково-шестеренного екструдера, виконати розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкцій, а саме, технологічний, параметричний,

конструктивний, гідравлічний розрахунки, розрахунки на міцність і надійність елементів конструкцій цих апаратів.

б) маркетинг стартап–проектів: створити стартап–проект модернізованого апарату;

в) охорона праці: провести аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів, які пов’язані з експлуатацією дисково-шестеренного екструдера, запропонувати заходи щодо обмеження їх дії, виконати відповідні розрахунки, викласти основні правила безпечної експлуатації установки та дій обслуговуючого персоналу у надзвичайних ситуаціях;

г) частина автоматичного керування: скласти та обґрунтувати схему автоматизованого керування установкою; скласти специфікацію приладів;

д) комп’ютерне моделювання процесів взаємодії: моделювання процесів взаємодії, симуляційний експеримент, що підтверджує запропоновану модернізацію.

5. Перелік графічного матеріалу: принципова схема лінії для виробництва рукавної плівки – А1; складальні креслення: каскадний дисково-шестеренний екструдер – А1, Дисковий екструдер – А1, Шестеренний насос – А1, Лінія-А1, візок – А1, дозатор – А1, ілюстрація технічної ідеї патенту, результати комп’ютерного моделювання процесів, симуляційний експеримент, що підтверджує запропоновану модернізацію – А1.

6. Перелік публікацій: три тези доповідей за темою магістерської дисертації.

7. Консультанти розділів проекту:

Розділ	Ім’я ПРИЗВИЩЕ консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Андрій КОВТУН		
Розробка стартап-проекту	Наталія ЮДІНА		
Автоматичний контроль і керування процесом	Олексій ЖУЧЕНКО		
Комп’ютерне моделювання процесів взаємодії	Микита БИШКО		

8. Дата видачі завдання: 01 вересня 2025 р.

Магістрант

Анатолій АБАСЬ

Керівник

Микола ШВЕД

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

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДЕСЕРТАЦІЇ**

на здобуття ступеня магістр

зі спеціальності: 133 Галузеве машинобудування

**освітня програма (спеціалізація): Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані
технології проектування інноваційного галузевого обладнання**

**на тему: Модернізація лінії каскадної екструзії з розробкою шестеренного
насоса**

Київ 2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	2	3	4
1	Переддипломна практика. Узгодження теми, вихідних даних, визначення джерел інформації. Добір матеріалів. Складання звіту з практики. (Під час проходження практики необхідно виконання креслень орієнтовним обсягом – 5...7 форматів А1)	01.09.2025	виконав
2	Патентне дослідження. Формування ідеї модернізації. Створення стартап-проєкту.	27.09.2025	виконав
3	Обґрунтування актуальності проєкту. Опис установки. Схема установки. Вибір і опис конструкцій НШ, дискового екструдера та дозатора. Технічна характеристика установки, апаратів.	01.10.2025	виконав
4	Виконання моделювання запропонованої модернізації	10.10.2025	виконав
5	Параметричні розрахунки: визначення основних розмірів апаратів. Розрахунок гідравлічного опору апаратів	16.10.2025	виконав
6	Розробка складальних креслень апаратів і їх складальних одиниць. Добір конструктивних параметрів конструктивних елементів апаратів	19.10.2025	виконав
7	Розрахунки на міцність. Розробка програм і супроводжуючих документів. Виконання схем	21.10.2025	виконав
8	Консультації відповідно до графіку з питань охорони праці, економіки, технології машинобудування, автоматизації	05.11.2025	виконав
9	Уточнення графічної частини проєкту і специфікацій	18.11.2025	виконав
10	Оформлення пояснювальної записки. Перевірка відповідності проєкту діючим нормам за змістом і оформленням. Підготовка до захисту. Складення плану викладення доповіді, окремих питань	25.11.2025	виконав

1	2	3	4
11	Попередній захист магістерської дисертації	08.12.2025	виконав
12	Корегування проекту за результатами попереднього захисту. Отримання рецензії, відзиву. Підготовка до захисту	10.12.2025	виконав

Студент

_____ Анатолій АБАЄВ
(підпис)

Керівник магістерської дисертації

_____ Микола ШВЕД
(підпис)

РЕФЕРАТ

УДК 66.021

Магістерська дисертація на тему «Модернізація лінії каскадної екструзії з розробкою шестеренного насоса». КПІ ім. Ігоря Сікорського; Керівник к.т.н., доц. Швед М.П.– К., 2025, – 198 с.: 23 іл. – Викон. А.Ю. Абаєв.

Пояснювальна записка складається зі вступу, восьми розділів, висновків і списку посилань з 43 найменувань. Загальний обсяг записки становить 189 сторінку основного тексту, 23 рисунки, 32 таблиці.

Мета дисертації – модернізація лінії каскадної екструзії з розробкою шестеренного насоса.

Записка містить опис технологічного процесу, вибір типу екструдера, насоса шестеренного, дозатора і їх місце в технологічній схемі, технічну характеристику апаратів, обґрунтування вибору конструкцій апаратів, що проектуються і принцип дії їх основних складальних одиниць та деталей, порівняння основних показників розробленої конструкції дисково-шестеренного екструдера з аналогами, патентне дослідження конструкцій апаратів. Виконано модернізацію шестеренного насоса та CFD моделювання моделювання запропонованої модернізації. Наведено заходи, щодо охорони праці, рекомендації з монтажу та експлуатації. Проведено модернізацію установки та визначено очікувані техніко – економічні показники від впровадження модернізації. Проведено маркетингове дослідження стартап–проєктів: створено стартап–проєкт модернізованого апарату. Зазначена модернізація може бути рекомендована для впровадження у виробництво. Визначено рівень стандартизації та уніфікації. Розроблено автоматичну схему керуванням процесом.

КАСКАДНА ЕКСТРУЗИЯ, ШЕСТЕРЕННЫЙ НАСОС, БИОПОЛИМЕРЫ, ПОЛИАКТИД, ГОМОГЕНИЗАЦИЯ, БИО-ДЕСТРУКЦИЯ.

ABSTRACT

UDC 66.021

Master's Thesis titled "Modernization of a Cascade Extrusion Line with the Development of a Gear Pump". National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; Supervisor: PhD in Technical Sciences, Associate Professor M. P. Shved. – Kyiv, 2025. – 189 p.: 23 ill. – Completed by A. Yu. Abaiev.

The explanatory report consists of an introduction, eight chapters, conclusions, and a reference list containing 43 sources. The total volume of the report is 189 pages of main text, including 23 figures and 12 tables.

The purpose of the dissertation is the modernization of a cascade extrusion line through the development of a gear pump.

The report includes a description of the technological process, justification of the selected extruder type, gear pump and dosing unit, and their placement within the technological scheme. It presents the technical characteristics of the equipment, justification of the chosen designs of the projected apparatus, and the operating principles of their main assemblies and components. A comparative analysis of the key performance indicators of the developed disk-gear extruder design with existing analogues is provided, along with a patent review of apparatus designs.

The modernization of the gear pump has been carried out, and CFD modeling of the proposed upgrade has been performed. Measures on occupational safety, as well as recommendations for installation and operation, are included. The modernization of the unit has been implemented, and the expected technical and economic indicators of its industrial application have been determined.

A marketing study of startup projects has been conducted, resulting in the creation of a startup project for the modernized apparatus. The proposed modernization can be recommended for industrial implementation. The level of standardization and unification has been assessed. An automatic control scheme for the technological process has been developed.

CASCADE EXTRUSION, GEAR PUMP, BIOPOLYMERS, POLYLACTIDE, HOMOGENIZATION, BIODEGRADATION.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень та термінів	12
ВСТУП.....	14
1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КАСКАДНОГО ДИСКОВО-ШЕСТЕРЕННОГО ЕКСТРУДЕРА	16
1.1 Опис технологічного процесу.....	16
1.2 Вибір типу апарата, його місце в технологічній схемі.....	19
2. ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА	23
3. ОПИС ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО ДИСКОВОГО ЕКСТРУДЕРА	24
3.1 Конструкція і принцип дії каскадного дисково-шестеренного екструдера, основних складальних одиниць та деталей	24
3.2 Порівняння основних показників розробленої конструкції з аналогами.....	26
3.3 Патентне дослідження.....	31
4. РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ НАДІЙНІСТЬ ТА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ КОНСТРУКЦІЇ.....	35
4.1 Параметричний розрахунок дискового екструдера.....	46
4.2 Розрахунок шнекового дозатора.....	55
4.3 Розрахунок формуючої головки	57
4.4 Розрахунок диска на міцність	62
4.5 Розрахунок корпусу на міцність	65
4.6 Розрахунок гільзи на міцність	66
4.7 Розрахунок упорного підшипника та підшипника кочення.....	68
4.8 Розрахунок шпонкового з'єднання	70
4.9 Розрахунок клинопасової передачі.....	72

Відповідальна організація кафедра МАХНВ ФАПІЕ	Технічне узгодження Новохат О.А.	Розробник документа Абаєв А.Ю.	Документ затверджено Швед М.П.	
Власник документа КПІ ім. Ігоря Сікорського		Вид документа пояснювальна записка		Статус документа
		Назва, додаткова назва Модернізація лінії каскадної екструзії з розробкою шестеренного насоса		ЛМ41мп.01.101.001
		Інд. змін	Дата видання 10.12.2025	Мова Укр.
				Аркуш 9

4.10 Розрахунок фланцевого з'єднання	75
5. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	78
5.1 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	79
5.1.1 Мікроклімат, склад повітря робочої зони та промислова вентиляція.....	79
5.1.2 Виробниче освітлення	80
5.1.3 Виробничий шум та віброзахист	82
5.1.4 Небезпека враження електричним струмом	84
5.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях	85
5.2.1 Технічні та організаційні заходи щодо ліквідації й локалізації аварійних ситуацій	85
5.2.2 Технічні рішення систем запобігання пожеж та вибухів	88
5.2.3 Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	90
6. РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО МОНТАЖУ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ	91
6.1 Підготовка до монтажу	91
6.2 Монтаж	92
6.3 Запуск в експлуатацію	93
7. РІВЕНЬ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ТА УНІФІКАЦІЇ.....	96
8. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП - ПРОЕКТУ КАСКАДНОГО ДИСКОВО- ШЕСТЕРЕННОГО ЕКСТРУДЕРА	98
8.1. Опис ідеї проекту	98
8.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	101
8.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	103
8.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	120
8.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	124
8.6. Висновки.....	129
ВИСНОВКИ	132
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	136
ДОДАТОК А Автоматизація екструдера	142

ДОДАТОК Б CFD моделювання	155
ДОДАТОК В Розрахунку дискового екструдера	164
ДОДАТОК Г Розрахунок формуючої головки	182
ДОДАТОК Д Документація про патентне дослідження	191
ДОДАТОК Ж Публікації автора	198

Перелік скорочень, умовних позначень та термінів

Умовні позначення:

f – площа перетину площиною, перпендикулярною до осі, м^2 ;

V_0 – осьова складова колової швидкості, м/с ;

ρ_n – насипна густина гранул полімеру, кг/м^3 ;

S – крок нарізки, м ;

D – діаметр диска, м ;

G – продуктивність, кг/с ;

P – тиск, Па ;

T – температура, К ;

ρ – густина розплаву, кг/м^3 ;

ω – швидкість, м/с ;

μ – динамічна в'язкість, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

U – передаточне число;

m – модуль зачеплення, мм ;

c_T – теплоємність полімеру, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

G_o, G_{oe}, G_{HSH} – продуктивність дозатора, екструдера, насоса відповідно, кг/с ;

H – глибина нарізки або величина зазору диска, м ;

$i_{\dot{\alpha}\dot{\delta}}$ – ентальпія полімеру на вході в екструдер, Дж/кг

n – частота обертання, с^{-1} ;

$N_{\text{спож}}, N_{\text{хх}}$ – потужність, що споживається і холостого ходу відповідно, Вт ;

N_o – потужність дисипації, Вт ;

$T, T_{\text{пл}}, T_p$ – температура середньомасова, плавлення полімеру і розплаву відповідно, $^{\circ}\text{C}$;

γ – швидкість зсуву, с^{-1} ;

λ – теплопровідність полімеру, $\text{Вт}/(\text{м К})$;

скорочення:

НШ – насос шестеренний;

ЕКДШ – екструдер дисково-шестеренний;

PLA – полілактид

PBAT – полібутиленадипат-терефталат

PHA – полігідроксиалканоати

Вступ

У сучасних умовах стрімкого розвитку полімерної промисловості особливої актуальності набувають технології перероблення полімерних матеріалів, які здатні забезпечити високу якість продукції, енергоефективність та стабільність технологічного процесу. Полімери та композиційні матеріали на їх основі дедалі частіше замінюють традиційні конструкційні матеріали, оскільки поєднують високу міцність, хімічну стійкість, малу густину та економічну доцільність використання. Це зумовлює необхідність постійного вдосконалення обладнання для їх переробки, розширення номенклатури матеріалів та оптимізації режимів формування виробів.

Серед численних методів перероблення полімерів провідне місце займає екструзія — безперервний процес плавлення та продавлювання полімерного розплаву через формувальний інструмент. Традиційно цей процес здійснюють за допомогою одночерв'ячних екструдерів, які поєднують функції транспортування матеріалу, його пластифікації, гомогенізації та створення тиску. Незважаючи на широке застосування, класичні екструдери мають низку обмежень: інерційність у регулюванні, чутливість до коливань продуктивності живлення, нерівномірність тиску та температури, що особливо проявляється при роботі з сучасними модифікованими полімерними композиціями та високо-в'язкими розплавами.

У зв'язку з появою нових біополімерів (PLA, PHA, PBAT) та композитів з наповнювачами, пластифікаторами й барвниками, що значно змінюють реологічні властивості розплаву, виникає потреба у створенні універсальних, технологічно гнучких систем екструзії. Одним із найбільш перспективних напрямів є каскадні лінії, у яких процес переробки розділяється на декілька послідовних стадій (каскадів), кожна з яких виконує окрему функцію — пластифікацію, гомогенізацію, дегазацію, стабілізацію тиску тощо. Такий підхід дає змогу оптимізувати режими на кожній стадії незалежно, зменшити теплове та механічне навантаження на полімер, підвищити стабільність розплаву та якість готової продукції.

Одним із ключових елементів каскадних систем є шестеренний насос, який встановлюється після екструдера та виконує функції точного дозування й стабілізації тиску розплаву перед формувальною головкою. Завдяки високій точності, малим пульсаціям та незалежності від коливань у роботі екструдера, шестеренні насоси дозволяють суттєво підвищити якість виробів та рівномірність товщини плівки чи грануляту.

Проте традиційні конструкції насосів, що широко застосовуються в промисловості, виявляють низку недоліків при роботі з високо-в'язкими біополімерами: виникають застійні зони, зростають гідравлічні втрати, посилюється нерівномірність розподілу потоку, підвищується температура розплаву у критичних зонах, що призводить до його часткової деградації. Це ускладнює забезпечення стабільних режимів роботи та знижує якість готової продукції.

Тому актуальним є завдання модернізації каскадної лінії екструзії шляхом розроблення та оптимізації нової конструкції шестеренного насоса, здатного забезпечити рівномірне заповнення міжзубцевих порожнин, зменшити гідравлічні втрати, мінімізувати температурні градієнти та стабілізувати тиск навіть при роботі з високо-в'язкими біополімерами. Це сприятиме підвищенню енергоефективності обладнання, покращенню експлуатаційних характеристик та забезпеченню високої якості продукції.

Таким чином, мета магістерської роботи полягає у модернізації лінії каскадної екструзії шляхом розроблення та дослідження вдосконаленої конструкції шестеренного насоса для переробки полімерних матеріалів, зокрема PLA, та визначенні впливу конструктивних і режимних параметрів на технологічні показники процесу.

1. Призначення та область використання каскадного дисково-шестеренного екструдера

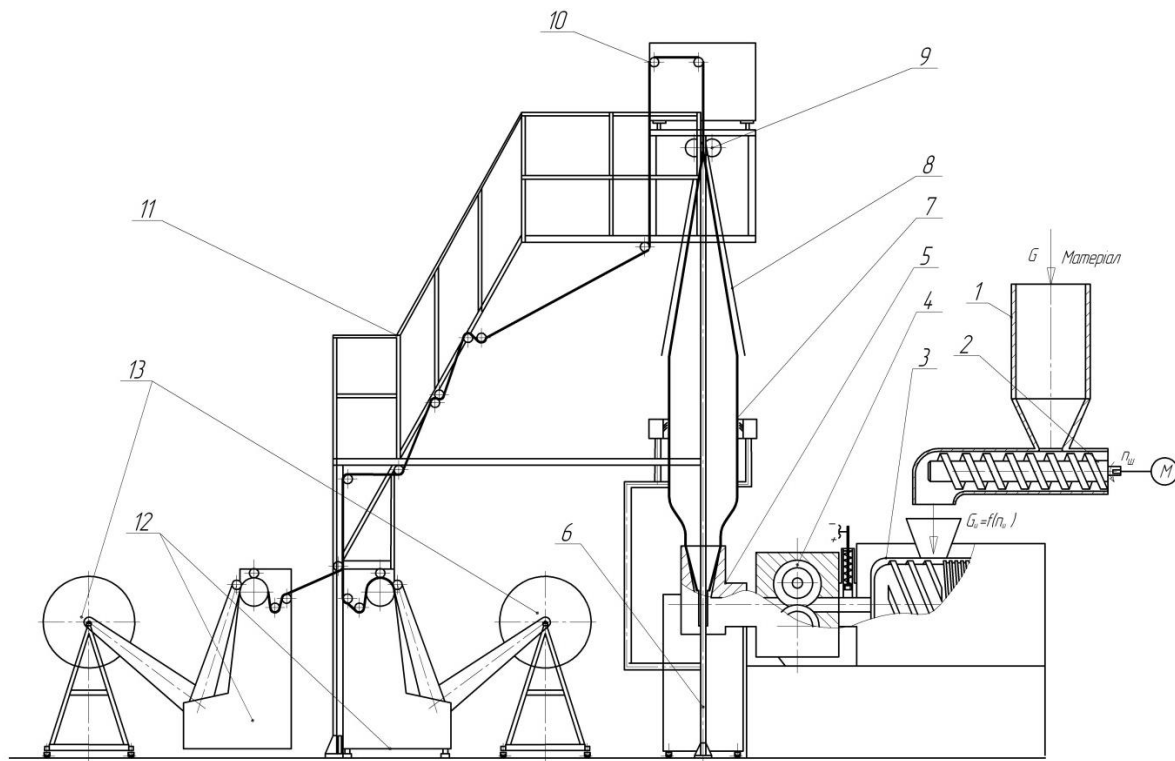
1.1 Опис технологічного процесу

У сучасній полімерній промисловості значна частина пакувальних та технічних матеріалів виробляється у вигляді тонких полімерних плівок, які займають провідне місце серед конструкційних і споживчих виробів. Плівкові матеріали універсальні, економічні, мають низьку масу, високу міцність, хороші бар'єрні властивості та придатні до перероблення. З огляду на глобальні вимоги до зменшення вуглецевого сліду та скорочення пластикових відходів, усе ширше застосування знаходять біорозкладні полімери, зокрема PLA, полібутиленадипат-терефталат (PBAT), полігідроксіалканоати (PHA) та інші матеріали з відновлюваної сировини. Особливий інтерес викликає PLA, оскільки він характеризується високою прозорістю, жорсткістю, безпечністю для контакту з харчовими продуктами та можливістю повного біорозкладання в умовах промислового компостування. Все це стимулює активний розвиток технологій його перероблення, а також модернізацію обладнання, яке здатне забезпечити стабільні режими екструзії для термочутливих і високо-в'язких біополімерів.

Однак перероблення PLA та подібних матеріалів супроводжується низькою технологічних викликів. Цей полімер має вузький діапазон температур плавлення та деградації, високу чутливість до вологості, значну в'язкість у розплавленому стані й схильність до гідролізу. Тому традиційні одночерв'ячні екструдери, які одночасно виконують функції транспортування, пластифікації, змішування та створення тиску, не завжди забезпечують належну стабільність параметрів при переробленні біополімерів. Поява нових композиційних матеріалів на основі PLA, модифікованих добавками, пластифікаторами і текучими агентами, ще більше ускладнює керування процесом. У таких умовах зростає актуальність використання каскадних систем

екструзії, де весь технологічний процес розділяється на кілька послідовних стадій із можливістю незалежного керування режимами на кожній з них. Саме каскадна схема «дисковий екструдер – шестеренний насос» дозволяє реалізувати високий рівень гомогенізації, стабілізації тиску, точного дозування та якісного формування тонкостінних плівок з біополімерів, зокрема PLA.

У даній роботі розглянуто лінію для виробництва рукавної біополімерної плівки з PLA (рисунок 1.1), виконану на базі каскадного дисково-шестеренного екструдера [1], до складу якого входять дисковий екструдер 1, нагнітальний дозуючий шестеренний насос 2 і шнековий дозатор 3. Особливістю такого екструдера є те, що всі три пристрої оснащені приводами (серводвигунами) 4,5,6 які мають високий ККД, що дозволить зменшити енергоспоживання приводів з можливістю безступінчастого регулювання кутової швидкості та моменту робочих органів через інтеграцію з програмованими логічними контролерами типу Siemens TIA Portal, а також те, що між дисковим екструдером і шестеренним насосом встановлено компенсатор 7 з ПЛК контролером Siemens SIMATIC S7-1500, який має високу продуктивність, гнучкість у програмуванні, підтримку інтерфейсів зв'язку PROFIBUS і PROFINET, можливість для інтеграції з іншими системами та забезпечує зворотній зв'язок із приводом дозатора узгоджуючи продуктивність дозатора і шестеренного насоса. Перероблюваний полімер з бункера 8 дозується в завантажувальну горловину 9 дискового розплавлювача-гомогенізатора, де він захоплюється багатозахідною гвинтовою нарізкою завантажувально-пластикувальної зони, розігрівається за рахунок енергії дисипації і у вигляді напіврозплаву надходить у торцевий робочий зазор 10 дискового екструдера, де завершується плавлення полімеру і гомогенізація розплаву. Під впливом вакууму, який створюється в шестеренному насосі, а також тиску, що забезпечується завантажувально-пластикувальною зоною та ефектом Вайссенберга, розплав заповнює порожнини між зубами шестерень, під час їх обертання – це забезпечує стабільну продуктивність і підтримання необхідного тиску розплаву для його проходження через формувальний інструмент 11.



1 - бункер завантажувальний; 2 - шнек дозуючий; 3 - екструдер черв'ячно-дисковий; 4 - насос шестеренний; 5 - головка формуюча; 6 – повітропровід; 7 - кільце обдувне; 8 - щоки складальні; 9 - валки тягнучі; 10 - валки обвідні; 11 – естакада; 12 - станки маніпуляційні; 13 - станки прийомні.

Рисунок 1.1 – Схема лінії для отримання біо-полімерної плівки на базі ЕКДШ

Після шестеренного насоса розплав надходить у кільцеву формувальну головку, де формується трубчастий рукав. Геометрія головки забезпечує:

- осесиметричний розподіл потоку;
- рівномірну товщину стінки рукава;
- мінімальні гідравлічні втрати.

Розплавлений рукав виходить з головки вертикально вгору. Внутрішній тиск у рукаві створюється за рахунок подачі повітря через центр головки, внаслідок чого відбувається роздування рукава до потрібного діаметра. Відношення діаметра роздутого рукава до діаметра вихідної матриці визначає ступінь роздування та впливає на механічні й оптичні властивості плівки.

Далі відбувається охолодження, стабілізація та складання рукава. Зовні рукав охолоджується повітряним кільцем, яке подає охолоджене повітря по кільцю навколо рукава. В зоні стабілізації застосовують спеціальні направ-

ляючі (корзини), що утримують форму рукава і запобігають його коливанням. При охолодженні PLA важливо уникати надмірних температурних градієнтів, щоб не спричинити внутрішніх напружень та оптичних дефектів. Після досягнення температури, за якої плівка зберігає форму, плівковий рукав проходить через плоскоскладальний пристрій, де він сплющується у двошарову плівку. Далі плівка подається до тягучих валків, де задається остаточна товщина та швидкість процесу. На заключному етапі плівка надходить на намотувальний пристрій, де формується рулон готової продукції. Паралельно здійснюється контроль:

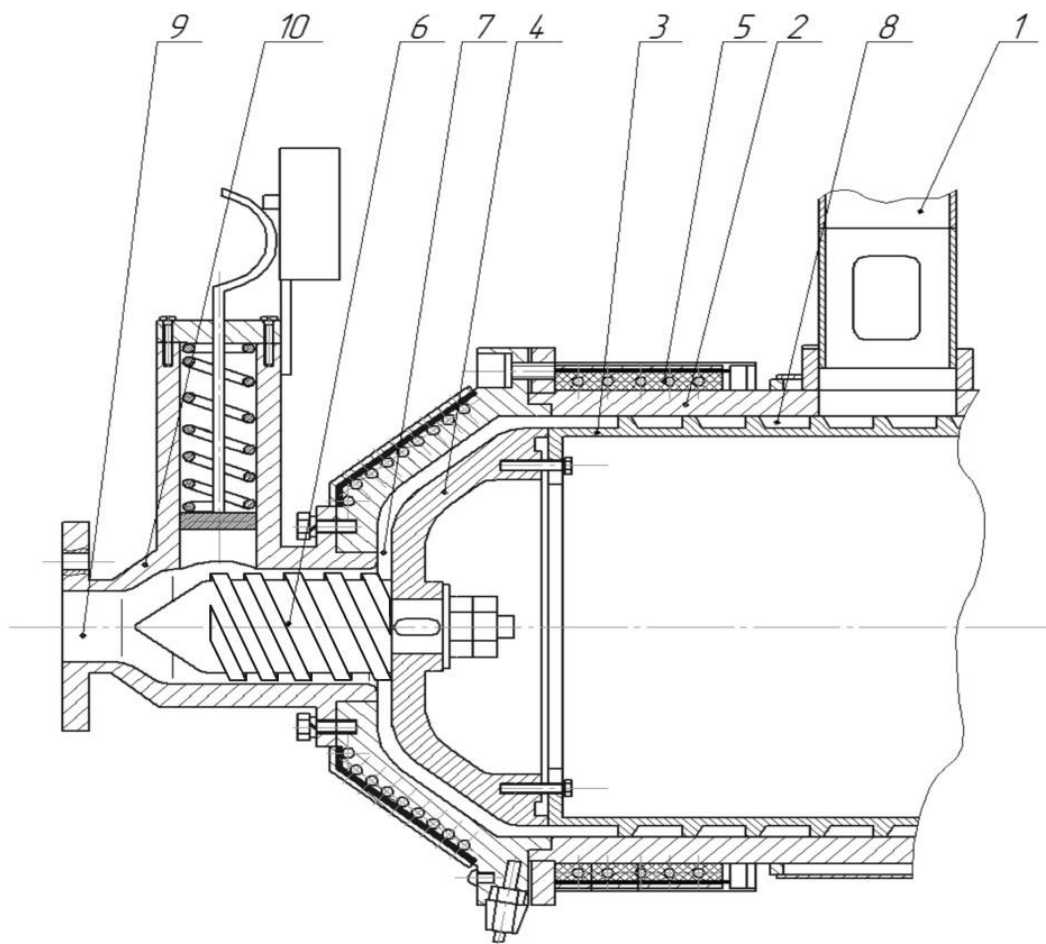
- товщини плівки (оптичними або контактними датчиками);
- температурних режимів;
- тиску у шестеренному насосі та головці;
- швидкості намотування.

1.2 Вибір типу апарата, його місце в технологічній схемі

У сучасних високопродуктивних лініях для отримання полімерних плівок особливе значення має апарат, який забезпечує якісну підготовку полімерного розплаву, стабілізацію тиску та рівномірність подачі матеріалу до формувальної головки. Це особливо актуально при переробленні термочутливих біополімерів, зокрема полілактиду (PLA), який має вузьке вікно технологічної переробки та значну чутливість до коливань температури, shear-rate та вологості. В таких умовах традиційні одночерв'ячні екструдери не завжди здатні забезпечити необхідну стабільність процесу, що призводить до зміни товщини плівки, дефектів оптики та нерівномірної структури.

Серед існуючих технологічних рішень найбільш ефективними є каскадні системи екструзії, у яких процес підготовки розплаву та створення тиску розділений на два самостійних, незалежно керованих каскади. Такий підхід дозволяє поєднати високі змішувальні властивості першого каскаду з високою точністю та стабільністю дозування другого каскаду, що є критичним для виробництва тонкостінних плівок із PLA.

Одним із найефективніших перших каскадів є дисковий екструдер зображений на рисунку 1.2, який працює за принципом плоскопаралельного зсувного потоку полімеру між дисками. На відміну від черв'ячних екструдерів, у яких параметри плавлення жорстко пов'язані з геометрією гвинта, дисковий екструдер дозволяє оперативно впливати на ступінь гомогенізації розплаву шляхом регулювання дискового проміжку без зупинки процесу. Це робить дискові екструдери значно гнучкішими в керуванні, особливо при роботі з полімерними композиціями, що містять добавки або модифікатори.



1 - завантажувальна воронка; 2 – корпус; 3 – гільза; 4 – диск; 5 – елемент нагрівальний; 6 – наконечник; 7 – робочий простір; 8 – транспортуючий простір; 9 – розвантажувальний отвір; 10 – поршневий компенсатор.

Рисунок 1.2 – Схема дискового екструдера

Дисковий екструдер володіє такими перевагами:

- високою диспергуючою та гомогенізуючою здатністю;

- низьким рівнем зсувних напружень (що важливо для PLA, який деградує при надмірних зусиллях зсуву);
- можливістю плавного регулювання якості змішування в процесі роботи;
- компактністю та порівняно малою енергоємністю;
- зменшенням інерційності технологічної системи.

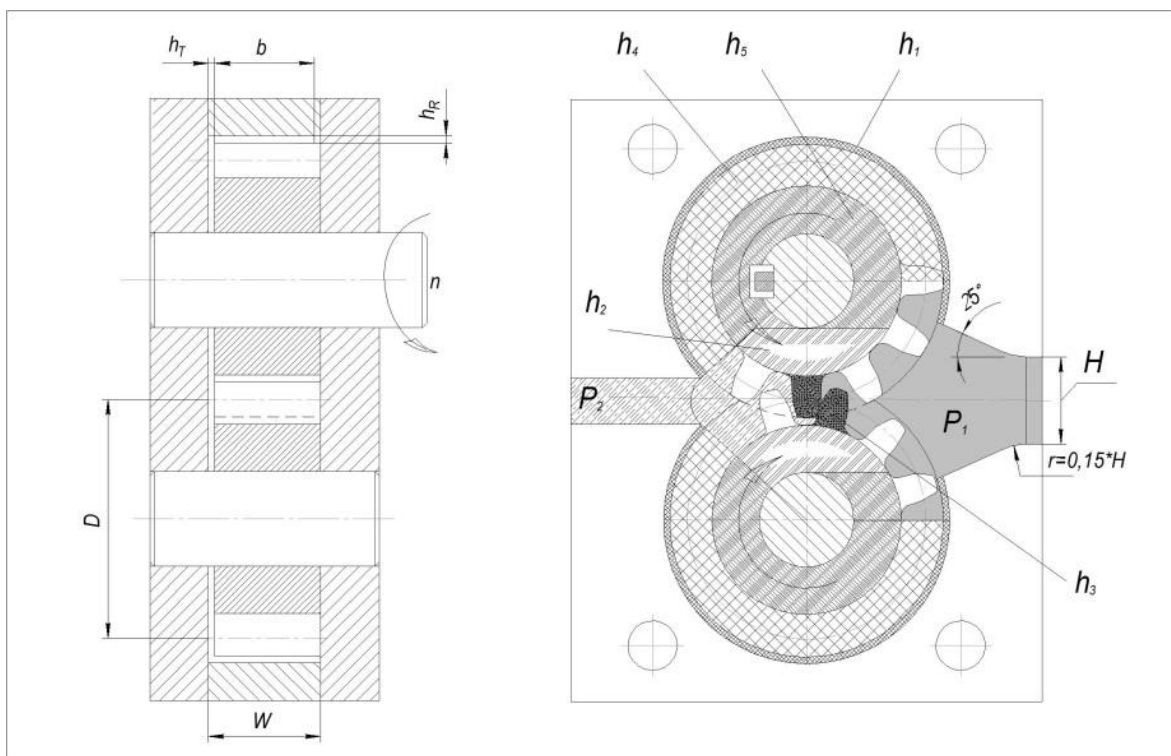
Внаслідок цих властивостей дискові екструдери широко застосовуються у виробництві плівок, де важливими є однорідність температури розплаву, рівномірність його структури та стабільність параметрів продуктивності.

Однак сам по собі дисковий екструдер не здатний забезпечити стабільні параметри тиску й рівномірне дозування розплаву, які необхідні для якісного формування плівкового рукава. Коливання подачі або тиску приводять до зміни товщини плівки, появи «дихання» рукава та дефектів структури. Тому другим каскадом доцільно застосовувати дозуючий шестеренний насос зображений на рисунку 1.3, який працює як високоточний полімерний насос і забезпечує:

- плавну, безпульсаційну подачу розплаву;
- стабільний тиск перед формувальною головкою;
- відсутність залежності продуктивності від опору головки;
- компенсацію нерівномірності роботи першого каскаду;
- значне підвищення точності виготовлення плівки.

Шестеренні насоси особливо ефективні при роботі з біополімерами, такими як PLA, оскільки навіть незначні коливання параметрів можуть призвести до деградації матеріалу, появи мутностей або мікродефектів у плівці.

Саме тому у даному проєкті обрано каскадний дисково-шестеренний екструдер, який оптимально поєднує змішувальні властивості дискового екструдера та високу точність дозування шестеренного насоса. Така система забезпечує якісне плавлення PLA, стабільність параметрів технологічного процесу та високу повторюваність характеристик плівки.



h_1 – перша зона радіальних зазорів; h_2 – друга зона торцевих зазорів; h_3 – третя зона торцевих зазорів; h_4 – четверта зона торцевих зазорів; h_5 – п’ята зона торцевих зазорів; P_1 – зона низького тиску; P_2 – зона високого тиску.

Рисунок 1.3 – Конструктивна схема модернізованого шестеренного насоса

Враховуючи необхідність стабільності параметрів при виробництві плівки та чутливість PLA до відхилень режимів, каскадний дисково-шестеренний екструдер є найбільш обґрунтованим рішенням у складі технологічної лінії для виготовлення біополімерних плівок.

2. Технічна характеристика

Продуктивність лінії, кг/год, (кг/с)	36 (0,01)
Ширина рукава, мм	600
Граничні відхилення по ширині, мм	± 5
Граничні відхилення від заданого значення товщини, %	± 2
Опір формуючої головки, МПа	25
Кінцевий продукт-плівка, товщиною, мкм	8...12
Діаметр рулону, мм, не більше, мм	800
Зсув плівки по торцю рулона, мм	0 – 6
Лінійна швидкість прийому плівки, регульована, м/с (м/хв)	0,06-1,38
Матеріал, що переробляється: біо-полімер полілактид PLA марка Ingeo 2003D за EU Plastics Regulation 10/2011	
Температура переробки К, (°C)	453 (180)
Густина розплаву, ρ , кг/м ³	967,77
В'язкість, як функція швидкості деформації та темп., Па·с	2004,3
електропостачання - мережа трьохфазного струму:	
1) напруга, В	380/220;
2) частота, Гц	50;
Встановлена потужність електроустаткування, кВт, не більше:	70
маса, кг	9800.

3. Опис та обґрунтування вибраного дискового екструдера

3.1 Конструкція і принцип дії каскадного дисково-шестеренного екструдера, основних складальних одиниць та деталей

Каскадний дисково-шестеренний екструдер [2] є основним апаратом технологічної лінії для виготовлення полімерної плівки з біополімерів, зокрема PLA. Його конструкція орієнтована на забезпечення високої однорідності розплаву, стабілізацію тиску, точне дозування та мінімізацію термодеструкції матеріалу. На відміну від класичних одночерв'ячних екструдерів, які поєднують у собі функції транспортування, пластифікації, змішування і створення тиску, каскадна схема дозволяє розділити процес на два незалежні етапи: інтенсивну гомогенізацію (перший каскад) та високоточне дозування з формуванням стабільного тиску (другий каскад). До основних вузлів каскадного дисково-шестеренного екструдера належать: дисковий розплавлювач-гомогенізатор (перший каскад);

корпус дискового екструдера з гільзою та нагрівальними зонами; механізм регулювання дискового проміжку; редуктор і приводний електродвигун із регульованою частотою обертання; опорно-упорний підшипниковий вузол; перехідний компенсатор подачі розплаву; шестеренний насос (другий каскад); кільцева формувальна головка для отримання рукава плівки. Ці вузли формують єдину технологічну систему, у якій перший каскад забезпечує якісну гомогенізацію PLA, а другий — стабільний гідростатичний тиск і точну подачу розплаву до формуючої головки, що є критичним для одержання рівномірної товщини плівки.

Корпус дискового екструдера являє собою товстостінну циліндричну оболонку, всередині якої встановлена гільза з високою зносостійкістю, що слугує каналом для транспортування нагрітої та частково розплавленої полімерної композиції. Вхідним елементом є завантажувальна воронка, через яку подаються попередньо висушені гранули PLA. Основним робочим органом

першого каскаду є обертовий диск, жорстко з'єднаний із приводом через клинопасову передачу і редуктор. У торцевому зазорі між нерухомою та рухомою поверхнями дисків виникають зсувні напруження, які забезпечують інтенсивне диспергування та гомогенізацію розплаву.

Зовнішня поверхня корпусу поділена на кілька температурних зон, кожна з яких оснащена електричними нагрівачами опору. Це дозволяє підтримувати оптимальний температурний профіль у межах 180–210 °С, необхідний для перероблення PLA без його термічного руйнування.

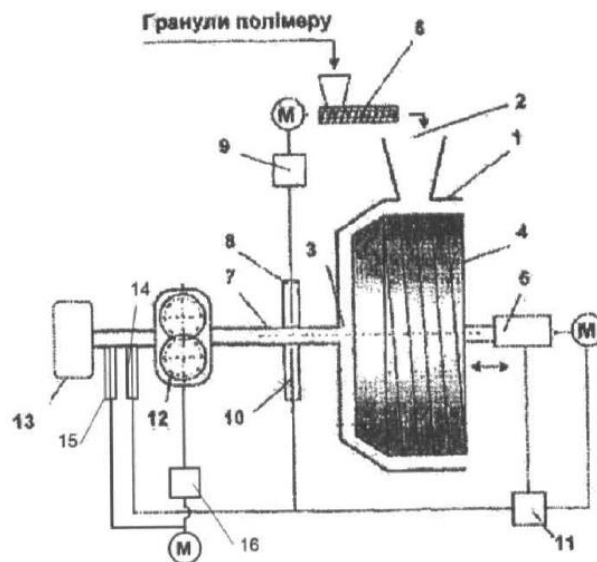
Оскільки на диск діють значні осьові навантаження, на тихохідному валу редуктора встановлений опорно-упорний підшипник, який сприймає момент опору матеріалу та забезпечує стабільність роботи вузла.

Після виходу із торцевого зазору дискового екструдера розплав PLA надходить у компенсатор, який служить для згладжування коливань потоку. Далі матеріал спрямовується до шестеренного насоса — другого каскаду каскадної системи. Особливо важливо, що дисковий екструдер працює у режимі дозованого живлення, що зменшує пульсації і покращує стабільність технологічного процесу. Однак для отримання рівномірної товщини плівки цього недостатньо — тому використання шестеренного насоса є обов'язковим. Шестеренний насос складається з: корпусу з вхідним і вихідним каналами; двох зубчастих коліс (ведучого та веденого); валів приводу; прецизійних торцевих і радіальних зазорів; системи підігріву корпусу; у модернізованому варіанті — спеціальної геометрії вхідної зони. Під час роботи насоса полімерний розплав потрапляє у міжзубцеві порожнини шестерень і переноситься від зони всмоктування до зони нагнітання. Оскільки об'єм порожнини, що переміщується, є сталим, шестеренний насос забезпечує: точне дозування; повністю безпульсаційну подачу; стабільний тиск перед формувальною головкою; незалежність продуктивності від опору головки. Це ключова перевага при виробництві плівки з PLA, де навіть невеликі відхилення тиску призводять до зміни товщини рукава. Таким чином, каскадна схема дозволяє досягти висо-

кої якості плівки, стабільності технологічного процесу та енергоефективності роботи всієї лінії.

3.2 Порівняння основних показників розробленої конструкції з аналогами

Дисковий екструдер (рисунок 3.1) складається з корпусу із завантажувальним та розвантажувальним отворами, у якому встановлено диск з можливістю обертання. Конструкція містить механізм регулювання величини дискового проміжку між корпусом і диском, а також дозатор сировини, розташований на вході до завантажувального отвору. На виході з розвантажувального отвору змонтовано розплавопровід із датчиками температури та тиску. Додатковий датчик температури встановлений після шестеренного насоса, а на його виході розміщено додатковий датчик тиску, з'єднаний через диференціальний перетворювач із приводом насоса. [3].

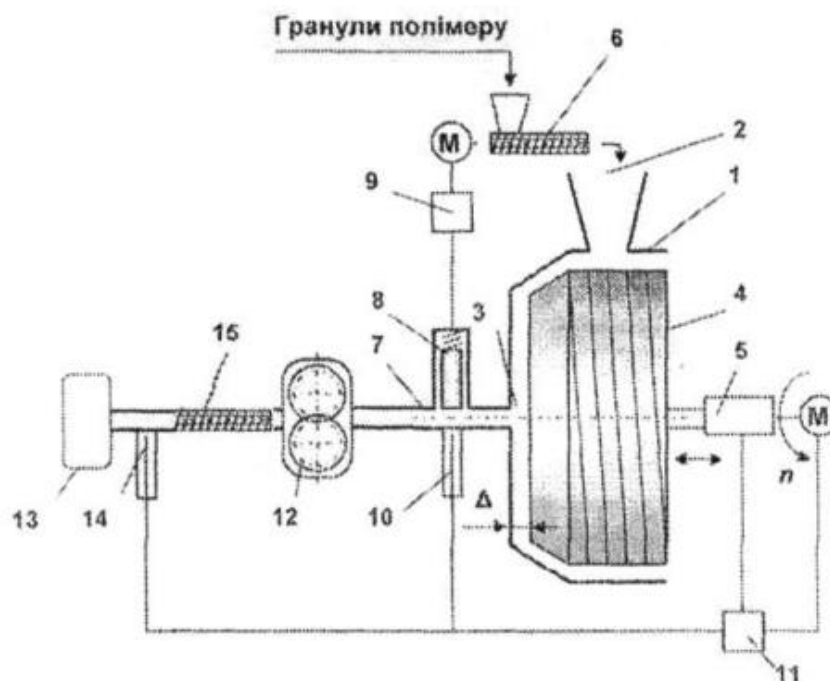


1 – корпус; 2 - завантажувальний отвір; 3 - розвантажувальний отвір; 4 – диск; 5 – регулятор дискового проміжку; 6 – ваговий дозатор; 8 – компенсатор; 9 – регулятор продуктивності; 10, 14 – датчик температури; 11 - регулятор частоти обертання диска; 12 - шестеренний насос; 13 - екструзійна головка; 15 - статичний змішувач, 16 - регулятор частоти обертання шестерень.

Рисунок 3.1 – Схема дискового екструдера №1

Недоліком цієї конструкції є температурна неоднорідність розплаву на виході з шестеренного насосу.

Наступна конструкція призначена вирішувати проблему температурної неоднорідності, завдяки встановленню статичного змішувача, який забезпечує високу якість розплаву на виході із формуючої головки (рисунок 3.2).



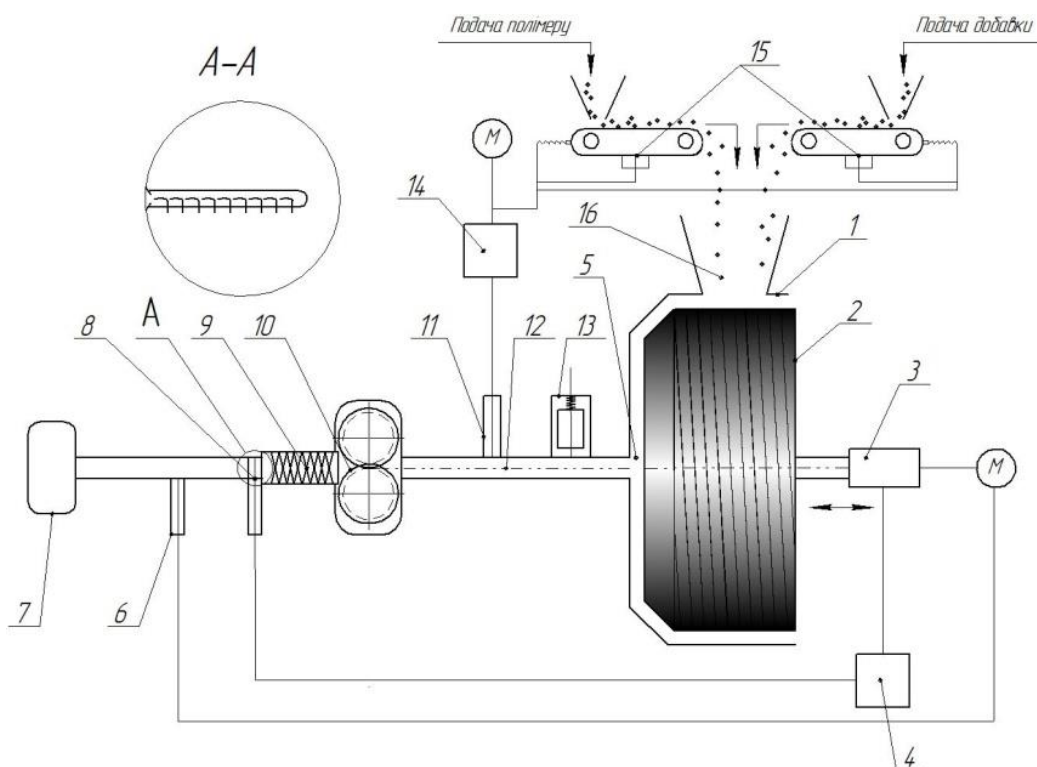
1 – корпус; 2 - завантажувальний отвір; 3 - розвантажувальний отвір; 4 – диск; 5 – регулятор дискового проміжку; 6 – ваговий дозатор; 8 – компенсатор; 9 – регулятор продуктивності; 10, 14 – датчик температури; 11 - регулятор частоти обертання диска; 12 - шестеренний насос; 13 - екструзійна головка; 15 - статичний змішувач.

Рисунок 3.2 – Схема дискового екструдера №2

Дисковий екструдер включає корпус із завантажувальним та розвантажувальним отворами, у якому встановлено диск, що може обертатися. У конструкції передбачено механізм регулювання величини дискового проміжку між корпусом і диском, а також дозатор сировини, розташований на вході до завантажувального отвору. На виході з розвантажувального отвору екструдера розміщено розплавопровід із компенсувальним елементом, після якого встановлено шестеренний насос. Датчики температури під'єднані до регу-

лятора частоти обертання диска. На виході зі шестеренного насоса розташований статичний змішувач. [4].

Жодна з двох попередніх конструкцій не забезпечує контролю та регулювання змішуючої здатності дискового екструдера. Використання двох вагових дозаторів дає змогу змінювати концентрацію легуючої добавки, а встановлення гребінчастої термопари — відстежувати та коригувати температурну неоднорідність розплаву. Тому для подальшої роботи обирається наступна конструкція (рисунок 3.3).



1 - корпус; 2 – диск; 3 – регулятор дискового проміжку; 4 – перетворювач сигналу; 5 – розвантажувальний отвір; 6,8 – термопара; 7 – формуючий інструмент; 9 – статичний змішувач; 10 – шестеренний насос; 11 - датчик тиску; 12 - розвантажувальний отвір; 13 - плунжерний компенсатор; 14 - регулятор продуктивності; 15- вагові дозатори; 16 - завантажувальний отвір.

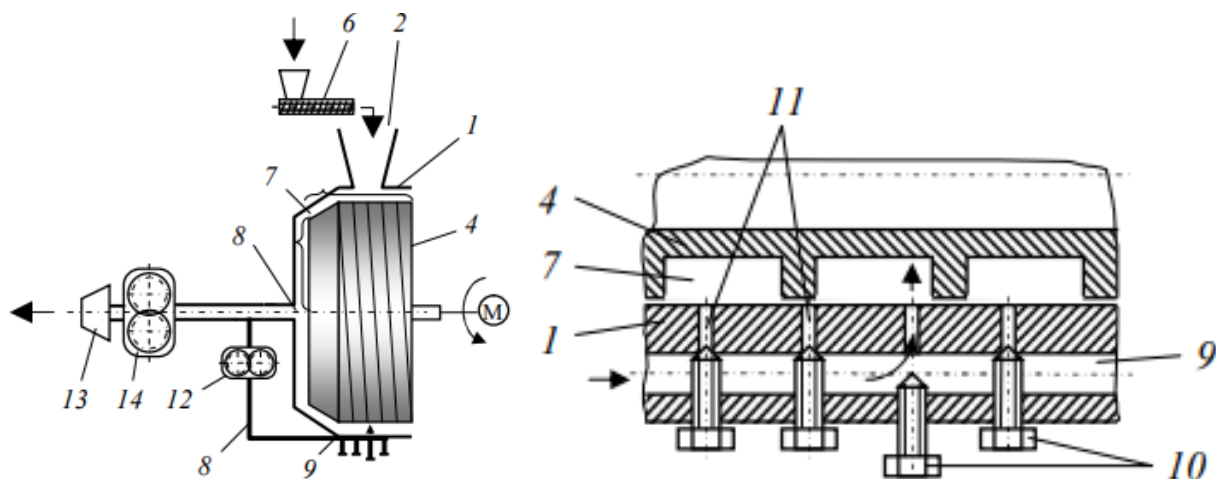
Рисунок 3.3 – Схема каскадного дисково-шестеренного екструдера №3

Полімерна композиція, призначена для переробки, подається ваговими дозаторами 15 у завантажувальний отвір 16 корпусу 1. Тут її підхоплює гвинтова нарізка диска 2, після чого матеріал транспортується вздовж каналу, плавиться та гомогенізується, рухаючись до розвантажувального отвору 5. У

разі відхилення тиску в розплавопроводі 12 від заданого значення, сигнал від датчиків тиску 11 передається на регулятор 14 продуктивності дозаторів 15, які відповідно зменшують або збільшують подачу компонентів у екструдер. Це забезпечує стабілізацію тиску на вході шестеренного насоса 10. Підпружинений плунжерний компенсатор 13 знижує інерційність системи та вирівнює тиск і продуктивність перед шестеренним насосом. Далі полімерна композиція під необхідним тиском заповнює міжзубні западини насоса, переміщується до виходу, проходить статичний змішувач 9 і формуючий інструмент 7. Рівень змішування розплаву визначають за температурним полем у каналі змішувача, яке вимірюється гребінчастою термопарою 8 (комплект одиночних термопар у спільному корпусі, розташованих по перерізу каналу). Отримані сигнали надходять у перетворювач 4, що керує регулятором величини дискового проміжку 3. Середню температуру розплаву відстежують за допомогою термопари 6. Її регулювання здійснюється шляхом зміни частоти обертання диска 2, що дозволяє коригувати термомеханічний вплив на розплав без зміни продуктивності екструдера [5].

Використання даного екструдера дає можливість, не зупиняючи установку, гнучко керувати процесом гомогенізації розплаву за рахунок можливості зміни величини дискового проміжку між корпусом і диском при сталій продуктивності, забезпечуючи при цьому високу температурну однорідність розплаву.

Наступна конструкція призначена для вирішення проблеми ефективності подачі розплаву, в патенті [6] описано конструкцію розплавопроводу, яка дозволяє ефективно подавати частину розплаву з виходу до робочого каналу диска залежно від перероблюваного матеріалу та режиму роботи екструдера, що суттєво розширює його технологічні можливості (рисунок 3.4).



1 – корпус; 2, 3 – завантажувальний і розвантажувальний отвори, відповідно; 4 – обертовий диск; 5, 6 – торцева й циліндрична частина частини обертового диска, відповідно; 7 – робочий канал; 8 – розплавопровід; 9 – розподільник розплаву; 10 – запірні болти; 11 – отвори; 12, 14 – шестеренні насоси; 13 – екструзійна головка

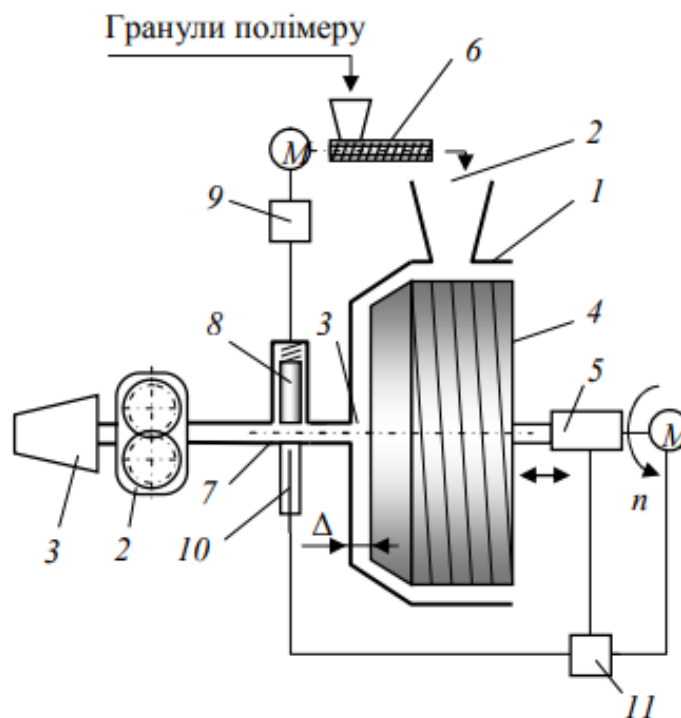
Рисунок 3.4 – Конструкції дискового екструдера зі складеним обертовим диском №4

Дисковий екструдер складається з корпусу із завантажувальним і розвантажувальним отворами, обертового диска, який має торцеву частину та циліндричну частину з гвинтовою нарізкою, утворюючи робочий канал між корпусом та диском. На виході з розвантажувального отвору розташовано розплавопровід, що сполучається з робочим каналом на ділянці циліндричної частини диска. Розплавопровід додатково оснащено розподільником розплаву, який може виконуватися у вигляді набору болтів для перекриття отворів у корпусі. Для забезпечення надійного руху розплаву розплавопровід може бути обладнаний шестеренним насосом, а для підвищення тиску під час подачі розплаву через екструзійну головку екструдер може містити додатковий шестеренний насос.

Твердий полімерний матеріал подається у завантажувальний отвір, де захоплюється нарізкою циліндричної частини диска та транспортується до торцевої частини, де відбувається його інтенсивне плавлення і гомогенізація. Частина розплаву повертається в робочий канал через розподільник, що за-

безпечує контакт розплаву з твердими частинками матеріалу та сприяє їх ефективному плавленню. Регулювання подавання розплаву здійснюється шляхом відкривання або перекривання отворів у корпусі за допомогою болтів, залежно від виду перероблюваного матеріалу та режиму роботи екструдера. Шестеренний насос забезпечує стабільний рух розплаву незалежно від змін тиску в технологічних зонах, що підвищує надійність роботи екструдера.

Наступна конструкція [7] дозволяє організувати активний вплив на температуру перероблюваного матеріалу, що у свою чергу, підвищує якість одержуваної продукції (рисунок 3.5).



1 – корпус; 2, 3 – завантажувальний і розвантажувальний отвори, відповідно; 4 – обертовий диск; 5 – механізм регулювання величини дискового проміжку; 6 – дозатор сировини; 7 – розплавопровід; 8 – компенсувальний елемент; 9 – регулятором продуктивності дозатора; 10 – датчик температури; 11 – регулятор частоти обертання диска; 12 – шестеренний насос; 13 – екструзійна головка

Рисунок 3.5 – Схема каскадного дисково-шестеренного екструдера №5

Дисковий екструдер включає корпус із завантажувальним та розвантажувальним отворами, обертовий диск, механізм регулювання величини дискового проміжку між корпусом і диском, дозатор сировини на вході завантажувального отвору, розплавопровід на виході з розвантажувального отвору, оснащений компенсувальним елементом у вигляді підпружиненого плунже-ра, а також датчиком температури, з'єднаним із регулятором частоти обер-тання диска та величини дискового проміжку. Екструдер може бути додатко-во оснащений шестеренним насосом та екструзійною головкою.

Перероблюваний матеріал надходить у завантажувальний отвір корпуса, де захоплюється нарізкою диска і транспортується до розвантажувального отвору. Сигнал від компенсувального елемента реагує на зміну опору на виході з екс-трудера та передається до регулятора продуктивності дозатора, який відповідно коригує подачу сировини, забезпечуючи стабільну роботу екструдера. Регулю-вання температури перероблюваного матеріалу здійснюється комбіновано: гру-бе регулювання досягається зміною величини дискового проміжку, а тонке – зміною частоти обертання диска. Зменшення дискового проміжку та збільшен-ня частоти обертання призводить до підвищення температури розплаву. Техні-чне обґрунтування обраної конструкції показано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1- Технічне обґрунтування обраної конструкції

№ кон-струкції	Складність кон-струкції, оцінка	Встановлена потужність, кВт/оцінка	Продуктив-ність, кг/год, (оцінка)	Маса лі-нії, 1000 кг	Кількість оцінка
1	4	2	40(5)	3,8(3)	14
2	4	3	40(5)	3,8(3)	15
3	4	5	40(5)	4,1(3)	17
4	5	5	40(5)	4,0(3)	18
Обраний Варіант 5	5	5	36(5)	3,1(5)	20

Висновок: обраний варіант є найкращим по обраним критеріям якості.

3.3 Патентне дослідження

У проекті розробляється конструкція шестеренного насоса у складі лінії каскадної екструзії для виготовлення біо-полімерної плівки.

Предметом пошуку є: конструкція шестеренного насосу.

Результатом пошуку є аналіз патенту на його сильні і слабкі сторони.

1. Патент запропонований авторами [6] US 7,648,658

Переваги:

- підвищення точності дозування завдяки оптимізованим торцевим зазорам;
- зменшення зворотного перетікання розплаву;
- врахування теплових деформацій корпусу для стабільної роботи;
- покращена робота насоса при високих температурах розплаву.

Недоліки:

- складність виготовлення ущільнювальних поверхонь;
- вхідна зона конструктивно не оптимізована для високо-в'язких полімерів;
- підвищена вартість виготовлення корпусу та шестерень.

2. Патент запропонований авторами [7] US 12,180,959 (2024)

Переваги:

- вдосконалена геометрія вхідної зони для рівномірного заповнення міжзубцевих порожнин;
- зменшення застійних зон і вихрових утворень;
- покращення стабільності тиску при значних коливаннях подачі;
- придатність до роботи з в'язкими полімерними розплавами.

Недоліки:

- геометрія вхідного каналу є складною у виготовленні;

- відсутність можливості регулювання профілю під різні полімери;
- потенційне утворення локальних температурних піків через складну форму входу.

3. Патент запропонований авторами [8] US 2023/0321887 A1 (2023)

Переваги:

- підвищена стабільність процесу за рахунок синхронізації роботи декількох насосів;
- зменшення пульсацій тиску;
- можливість компенсації коливань подачі розплаву з екструдера;
- покращення рівномірності товщини формованих полімерних виробів.

Недоліки:

- патент описує систему керування, а не конструктивні покращення насоса;
- висока складність інтеграції у виробничу лінію;
- потребує точного налаштування системи датчиків і програмного забезпечення.

4. Патент запропонований авторами [9] WO 2006/087208 A1

Переваги:

- покращена термостабільність корпусу насоса;
- зниження пульсацій тиску;
- оптимізоване навантаження на підшипникові вузли;
- можливість роботи з широким спектром полімерних розплавів.

Недоліки:

- використано традиційну круглу вхідну зону, яка не усуває застійних зон;
- недостатня адаптація до високо-в'язких біополімерів;
- складність очищення та обслуговування внутрішніх каналів.

5. Патент запропонований авторами [10] WO 2015/048984 A1

Переваги:

- оптимізація внутрішнього профілю каналу для покращеного потоку;

- можливість роботи з полімерними розплавами високої в'язкості;
- зниження гідравлічних втрат;
- покращене заповнення міжзубцевих порожнин завдяки точному профілюванню стінок.

Недоліки:

- складність виготовлення профільованих каналів за заданою формулою;
- висока вартість виробництва корпусу насоса;
- відсутність регулювання геометрії під різні полімери.

Патентні дослідження проводилися з метою виявлення сучасних технічних рішень у галузі екструзійного обладнання, визначення рівня інноваційності існуючих конструкцій шестеренних насосів, аналізу можливих аналогів та прототипів, а також оцінки патентної чистоти модернізованої конструкції, запропонованої у даній роботі. Дослідження охоплювало бази даних WIPO (PATENTSCOPE), USPTO, Espacenet, Google Patents та Державного реєстру патентів України.

У результаті проведених патентних досліджень встановлено:

1) у розроблюваному пристрої не використано суттєвих ознак, якими вирізняються проаналізовані прототипи. Усі суттєві ознаки розроблюваного пристрою є достатньо відомими й широко використовуваними на практиці. Це дозволяє припустити, що модернізація не потребуватиме придбання ліцензій на випуск нової продукції;

2) провідними державами у галузі обладнання для переробки біополімерних матеріалів методом екструзії є: США, Фінляндія, Німеччина, Японія та Україна. При цьому запатентовані винаходи й корисні моделі стосуються таких напрямів:

- підвищення зносостійкості шестерень та корпусу шляхом використання спеціальних матеріалів або покриттів (US 6,238,209; EP 3458124).
- Оптимізація торцевих і радіальних зазорів, що дозволяє зменшити втрати тиску та збільшити гідравлічний ККД (US 8,613,470; JP 2017035991).

- Застосування секційних або модульних насосів, придатних для роботи з низьков'язкими або високо-в'язкими полімерними розплавами (WO 2014/113822; DE 102016122418).

- Покращення теплообміну у корпусі насоса, зокрема за рахунок оптимізації каналів підігріву та охолодження (US 20150016940).

- Конструкції з внутрішнім змішуванням або зі зміщенням шестерень, що зменшують пульсації на виході (EP 2890041; CN 105831020).

3) аналіз патентів дає змогу зробити висновок, що в галузі обладнання для переробки біо-полімерних матеріалів методом екструзії, за допомогою дисково-шестеренного екструдера, основні розробки спрямовані на патентування нових конструкцій шестеренних насосів.

4. Розрахунки, що підтверджують надійність та працездатність конструкції

До недавнього часу на завершальному етапі екструзійного процесу для створення необхідного тиску та дозування полімерного розплаву переважно застосовувався в'язкісний одночерв'ячний дозуючий екструдер[2]. Ефективність цього апарата у режимі чистого дозування є вкрай низькою і, за даними промислових досліджень, не перевищує 10%, оскільки більша частина споживаної енергії витрачається на подолання внутрішнього тертя та зсуву в ущільненій полімерній масі, а не на формування стабільного об'ємного потоку. Крім того, черв'ячний екструдер конструктивно схильний до коливань продуктивності та пульсацій тиску, що виникають унаслідок нерівномірного заповнення каналу, зміни в'язкості розплаву, коливань крутного моменту та особливостей живлення. Це призводило до того, що виробники були змушені закладати у технічні умови підвищені допуски на геометричні розміри виробів, часто на рівні 10–15%, щоб компенсувати нестабільність процесу. Таке «завищення безпеки» неминуче спричиняло перевитрати сировини, оскільки збільшена товщина чи маса виробу ставали необхідністю для гарантування відповідності вимогам якості. Окрім цього, нестабільність дозування викликала зростання енергоспоживання, нерівномірний тепловий режим та підвищене навантаження на приводи та формувальні вузли. У сукупності це робило одночерв'ячні дозуючі екструдери недостатньо ефективними для сучасних технологій переробки полімерних і особливо біополімерних матеріалів, таких як PLA, які вимагають стабільного, безпульсаційного потоку.

У перспективі структура переробки полімерних матеріалів змінюватиметься за рахунок зростання частки екструзійних технологій [12], які застосовуються для виготовлення труб, листів, плівок та інших профільних виробів. Тому розроблення ресурсо- та енергоефективних методів екструзії біополімерів із використанням каскадних схем є актуальним напрямом.

Найбільш поширеними є каскадні комплекси, що складаються з двох екструдерів, тип яких обирають залежно від прийнятої технологічної схеми переробки. В одних конфігураціях перший екструдер забезпечує формування якісного розплаву, а другий — його стабільне дозування. В інших випадках перший екструдер використовується для підготовки агломерату, тоді як другий відповідає за кінцеву гомогенізацію та подачу розплаву до формуючого елемента.

У першому варіанті як пластикуючий екструдер можуть застосовувати одночерв'ячні, двочерв'ячні, планетарно-вальцеві, черв'ячно-роторні, дискові та інші типи екструдерів, тобто машини з динамічним змішувачем, що забезпечують підвищений ефект змішування.

Теоретичні та експериментальні дослідження процесів екструзії, виконані на кафедрі МАХНВ КПІ ім. Ігоря Сікорського, засвідчили, що плавлення та гомогенізація ефективніше відбуваються в умовах високих швидкостей зсуву при відносно низьких тисках [13]. Це відповідає моделі диспергованого плавлення, яка є у 4–5 разів ефективнішою за класичну пробкову модель Тадмора і ґрунтується на тому, що тверді частинки полімеру диспергуються в розплаві [14]. За такого підходу інтенсифікується процес плавлення завдяки збільшенню площі контакту твердих фрагментів із розплавом.

Операції створення тиску та дозування доцільніше виконувати за допомогою об'ємного дозуючого насоса з жорсткою напірною характеристикою, зокрема шестеренного насоса для розплавів [14].

Враховуючи наведені результати, на кафедрі МАХНВ була створена ресурсо- та енергоощадна система каскадної дисково-шестеренної екструзії (ЕКДШ), у якій операції дозованого живлення, плавлення, гомогенізації та дозування розплаву винесено в автономно керовані модулі рисунок 4.1.

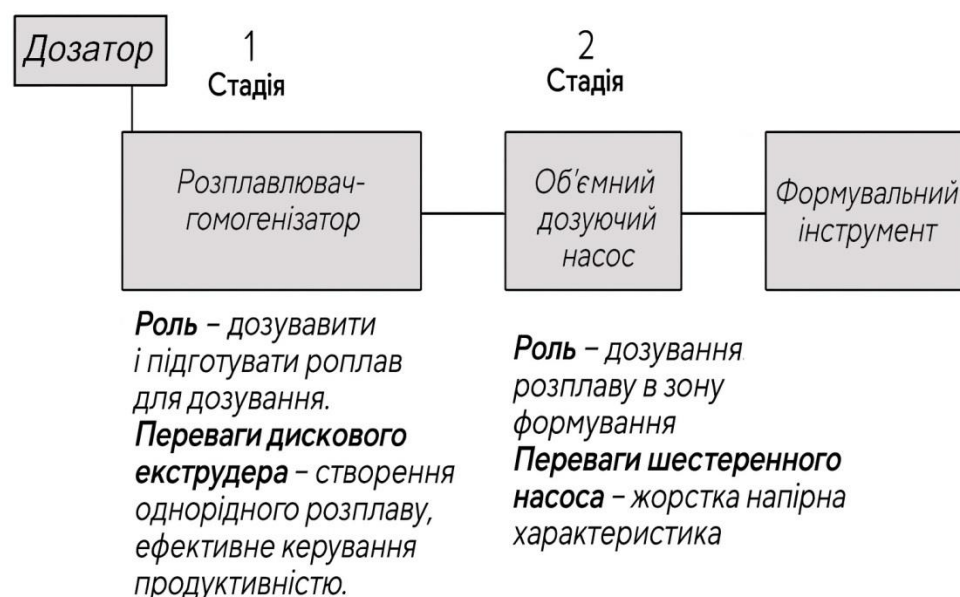


Рисунок 4.1 – Система каскадної екструзії

На першій стадії процесу як розплавлювач-гомогенізатор застосовується дисковий екструдер, що працює в режимі дозованого живлення. Такий режим забезпечує реалізацію моделі диспергованого плавлення, яка дає змогу істотно підвищити енергоефективність та якість формування розплаву. Завдяки низьким тискам у зоні плавлення енерговитрати на перехід полімеру у розплавлений стан можуть зменшуватися до 30%, а температура розплаву стає більш рівномірною та нижчою у порівнянні з традиційними схемами. Крім того, довжина зони плавлення скорочується у 2–4 рази, що позитивно впливає на термостабільність матеріалу.

Керованість процесу плавлення та гомогенізації значно покращується завдяки можливості змінювати термомеханічне навантаження на полімер без зміни продуктивності. Це забезпечується двома незалежними механізмами регулювання: у завантажувально-пластикуючій зоні — зміною частоти обертання шнека; у дисковій зоні — регулюванням робочого зазору між дисками. В сукупності це дозволяє підтримувати оптимальну температуру розплаву, уникати локальних перегрівів та забезпечувати високу якість гомогенізації.

Шестеренний насос, який працює на другій стадії каскадної схеми екструзії, виконує подвійну функцію. По-перше, він забезпечує вирівнювання пульсацій розплаву та стабілізацію коливань продуктивності, які в більшості

випадків не перевищують 1% від номінального значення. Такий рівень стабільності дає можливість виготовляти продукцію з меншими допусками на геометричні розміри, що призводить до суттєвої економії сировини та енергії. Саме стабілізація потоку є головним економічним аргументом на користь використання шестеренних насосів у технологіях дозування полімерних розплавів. По-друге, робота шестеренного насоса дозволяє розвантажити основний екструдер, даючи йому можливість працювати при нижчих тисках. Це веде до зменшення тепловиділення від зсуву та тертя, що, залежно від умов процесу, може забезпечити: загальне зниження енергоспоживання, або підвищення продуктивності лінії, якщо обмеженням раніше була надмірна температура розплаву[15].

Таким чином, поєднання дискового екструдера з шестеренним насосом у каскадній схемі дозволяє значно покращити керуваність процесу, забезпечити стабільність подачі та підвищити енергоефективність роботи всієї екструзійної лінії.

Каскадний дисково-шестеренний екструдер (рисунки 4.2), до складу якого входять дисковий екструдер 1, нагнітальний дозуючий шестеренний насос 2 і шнековий дозатор 3. Особливістю такого екструдера є те, що всі три пристрої оснащені приводами (серводвигунами) 4,5,6 які мають високий ККД, що дозволить зменшити енергоспоживання приводів з можливістю безступінчастого регулювання кутової швидкості та моменту робочих органів через інтеграцію з програмованими логічними контролерами типу Siemens TIA Portal, а також те, що між дисковим екструдером і шестеренним насосом встановлено компенсатор 7 з ПЛК контролером Siemens SIMATIC S7-1500, який має високу продуктивність, гнучкість у програмуванні, підтримку інтерфейсів зв'язку PROFIBUS і PROFINET, можливість для інтеграції з іншими системами та забезпечує зворотній зв'язок із приводом дозатора узгоджуючи продуктивність дозатора і шестеренного насоса. Перероблюваний полімер з бункера 8 дозується в завантажувальну горловину 9 дискового розплавляюча-гомогенізатора, де він захоплюється багатозахідною гвинтовою нарізкою

завантажувально-пластикувальної зони, розігрівається за рахунок енергії дисипації і у вигляді напіврозплаву надходить у торцевий робочий зазор 10 дискового екструдера, де завершується плавлення полімеру і гомогенізація розплаву. Під впливом вакууму, який створюється в шестеренному насосі, а також тиску, що забезпечується завантажувально-пластикувальною зоною та ефектом Вайссенберга, розплав заповнює порожнини між зубами шестерень, під час їх обертання – це забезпечує стабільну продуктивність і підтримання необхідного тиску розплаву для його проходження через формувальний інструмент 11. Нагрівачі ЕН1 і ЕН2 використовуються при стартовому розігріві, а далі екструдер працює в автогенному режимі.[13]

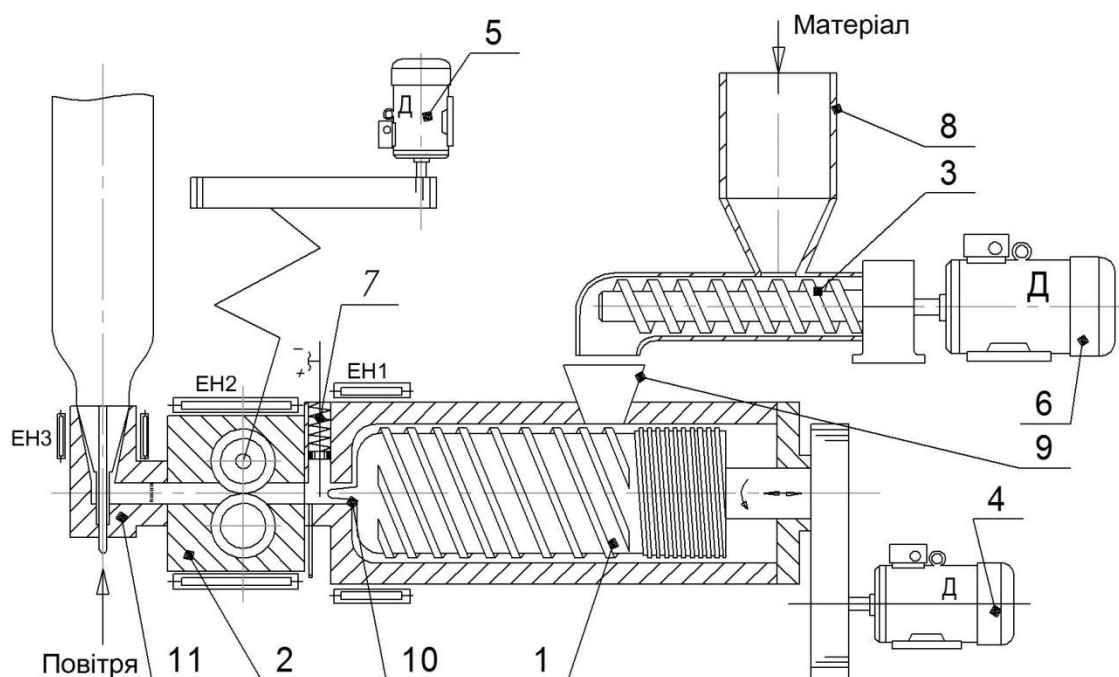


Рисунок 4.2. Схема каскадного дисково-шестеренного екструдера.

Процес гомогенізації реалізується на практиці не тільки в каналі черв'яка, а й в каналах робочих органів більш складної конфігурації, наприклад, в зазорі між нерухомим корпусом і обертовим диском[16]. Тому виникає необхідність розробки деякого узагальненого модуля апроксимації (розрахунку по елементах) дає можливість врахувати складність конфігурації робочих каналів конструктивних елементів. В багатьох випадках дія конструктивних елементів зводиться до зображених на рис. 4.3 випадків

течії в каналі черв'яка, зазорі між нерухомим і обертовими циліндрами, конусами, дисками.

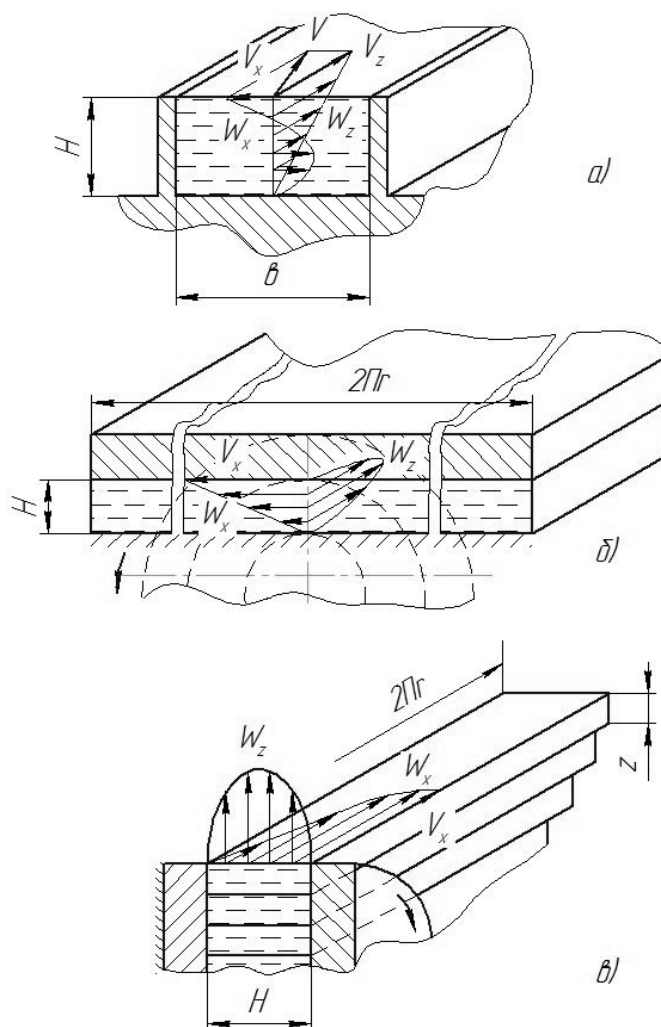


Рисунок 4.3 Схеми процесів гомогенізації

Ці течії, з врахуванням обмежень, характерних для робочих органів екструзійного устаткування, мають деякі загальні властивості, до яких належать: стаціонарність течії, мала ділянка гідродинамічної стабілізації в зв'язку з високою в'язкістю розплаву, якою можна знехтувати, двовірність течії і конструктивні особливості робочих каналів, суть яких полягає в тому, що один із розмірів набагато менший решти, тому зміна параметрів найбільш суттєва тільки вздовж однієї координати (y). Ці особливості дозволяють значно спростити математичні моделі і розглядати процес течії в прямокутній системі координат (рисунок 4.3), вважаючи, що відповідно до методу ступеневої апроксимації в межах елемента ряд параметрів, в тому числі і швидкість, можна вважати незмінним по координаті z .

Знехтуємо силами інерції і тяжіння в рівняннях руху, які набагато менші порівняно з силами в'язкості та тиску, і будемо вважати, що складова швидкості $W_y = 0$, а найбільша із складових W_x і W_z відбувається по координаті y . Тоді найбільш суттєве значення мають похідні $\partial W_x / \partial y$ і $\partial W_z / \partial y$, відповідно, компоненти тензора напруги τ_{yx} і τ_{yz} . З врахуванням сказаного, рівняння руху набувають вигляду:

$$-\frac{\partial W_x}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0 \quad (4.1)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \quad (4.2)$$

Зауважимо, що у випадках, зображених на рис. 4.1б, в градієнт тиску в напрямі x також дорівнює нулю. Компоненти тензора напруги відповідно дорівнюють:

$$\tau_{yx} = \mu(l_2, T) \frac{\partial W_x}{\partial y} \quad (4.3)$$

$$\tau_{yz} = \mu(l_2, T) \frac{\partial W_z}{\partial y} \quad (4.4)$$

причому, відмінними від нуля компонентами другого інваріанта l_2 є тільки $\gamma_x = \partial W_x / \partial y$ і $\gamma_z = \partial W_z / \partial y$.

При застосуванні методу ступеневої апроксимації в'язкість в межах елемента можна вважати постійною і визначати її за середніми для елемента значеннями γ_x , γ_z і середньою температурою T_c . Зміна ряду величин також відбувається стрибкоподібно на поверхні розділу елементів і в межах елемента їх можна вважати незмінними по координаті y . Тоді замість рівнянь для неньютонівської моделі рідини, які в даному випадку мають вигляд:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu^2 \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} = 0 \quad (4.5)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu^2 \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} = 0 \quad (4.6)$$

Граничні умови:

$$\text{при } y=0 \quad W_x = 0 \quad W_z = 0$$

при $y=H$ $W_x = V_x$ $W_z = \begin{cases} V_z \\ 0 \end{cases}$ - для каналу черв'яка і для зазорів відповідно.

Для визначення тиску використаємо рівняння нерозривності в інтегральній формі. Розглянемо складову швидкості W_z , яка визначає масову витрату через поперечні перерізи відповідних каналів: $S_k = bH$ для каналу черв'яка і $S_k = 2\pi rH$ для зазорів між циліндрами, конусами, дисками. Масова витрата в цьому випадку дорівнює:

$$G = \rho S_k \cdot \frac{1}{H} \int_0^H W_z dy \quad (4.7)$$

Розглянемо тепер складову швидкості W_x . Для зазорів між циліндрами, конусами, дисками для фіксованого радіуса тиск в тангенціальному напрямі незмінний, тому $\partial P / \partial x = 0$. Для каналу черв'яка складова W_x є циркуляційною складовою, бо визначає циркуляцію розплаву поперек каналу (рис. 4.1а). Тому масова витрата через будь-який переріз $H \Delta z$ дорівнює нулю:

$$G = \rho H \Delta z \frac{1}{H} \int_0^H W_x dy = 0 \quad (4.8)$$

Рівняння для визначення тиску в цьому випадку набуває вигляду

$$\int_0^H W_x dy = 0 \quad (4.9)$$

Для розрахунку температурних полів слід розв'язати рівняння енергії. Проте для випадку, коли процес ведеться в адіабатичному режимі, для обчислення середньої температури достатньо визначити потужність дисипації, яка йде на підвищення ентальпії розплаву. Для цього необхідно проінте-

грувати по об'єму елемента функцію дисипації в рівнянні енергії. Оскільки найбільше значення мають тільки компоненти $\partial W_x / \partial y$ і $\partial W_z / \partial y$, то рівняння для визначення потужності дисипації набуває вигляду:

$$\Delta N_{\partial} = \int_0^{S_k} \int_{z_1}^{z_2} \int_0^H \mu \left[\left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy dz \quad (4.10)$$

Відповідно до спрощень методу ступеневої апроксимації підінтегральна функція залежить тільки від координати y , тому рівняння (4.12) спрощується:

$$\Delta N_{\partial} = S_k \Delta z \int_0^H \mu \left[\left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 \right] dy \quad (4.11)$$

Таким чином розв'язання системи рівнянь (4.5) - (4.9), (4.11) і (4.13) дає можливість визначити компоненти швидкості W_x і W_z тиск P , а також потужність дисипації. Після руйнування полімерної пробки, яким завершується механізм процесу плавлення, розплав має нерозплавлені частинки цієї пробки. Тому для перехідної області можна припустити, що потужність дисипації витрачається на завершення плавлення цих частинок, а середня температура не змінюється і залишається рівною його температурі, обчислений в останньому модулі зони плавлення. Тоді масова витрата розплаву збільшиться на величину:

$$\Delta G_p = \frac{\Delta N_{\partial}}{i_c - i_{ex}} \quad (4.12)$$

де i_c - ентальпія розплаву при його середній для даного елемента температурі. Середньомасова температура полімеру в цьому випадку обчислюється за рівнянням:

$$T = 1 / G \left[G_p T_c + (G - G_p) T_{ex} \right], \quad (4.13)$$

де G_p - масова витрата розплаву, яку знаходимо, складаючи значення ΔG_p для всіх елементів.

Після завершення плавлення приріст середньої температури розплаву можна визначити з рівняння теплового балансу елемента Δz , звідки одержимо:

$$\Delta T = \frac{\Delta N_{\phi}}{GC}, \quad (4.14)$$

де C - теплоємність розплаву при його середній температурі.

Розглянемо випадок течії розплаву в зазорах між нерухомим і обертовим циліндрами, конусами, дисками (рис. 4.1 б, в). Зауважимо, що при відповідному виборі кроку розрахунку зміною швидкості по радіусу в межах елемента можна знехтувати, замінивши безперервну її зміну ступінчастою. Оскільки $\partial P / \partial x$ в розглядуваних випадках дорівнює нулю, то система рівнянь руху (4.5) і (4.6) набуває вигляду:

$$\frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} = 0 \quad (4.15)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} = 0 \quad (4.16)$$

Інтегруючи по y рівняння і визначаючи постійні інтегрування з граничних умов (4.7) і (4.8), одержимо:

$$W_x = V_x \frac{y}{H} \quad (4.17)$$

Значення $V_x = 2\pi r n$ залежить від радіуса r , однак, як уже говорилося, в межах елемента Δz вважається незмінним.

Інтегрування рівняння (4.36) дає наступний вираз для складової швидкості W_z :

$$W_z = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z} y^2 + C_1 y + C_2 \quad (4.18)$$

З граничної умови (4.7) маємо $C_2 = 0$. Використовуючи граничну умову (4.8) для випадку зазорів, одержимо:

$$\frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z} H^2 + C_1 H = 0 \quad (4.19)$$

звідки

$$C_1 = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z} H \quad (4.20)$$

Підставивши значення постійних інтегрування в (4.38), одержимо вираз, що описує профіль швидкості в напрямі z :

$$W_z = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z} (y^2 - Hy) \quad (4.21)$$

Таким чином, профіль складової швидкості W_x лінійний, а складової W_z , яка пов'язана з масовою витратою, параболічний. Ці складові для одного елемента зображені на рис. 8. 1б, в. Відзначимо ще раз, що обидва профілі незалежні від радіуса відповідно до методу ступеневої апроксимації тільки в межах елемента і стрибкоподібно змінюються при переході до іншого елемента. Тому при виборі кроку розрахунку по координаті z потрібно оцінювати можливу похибку обчислень. Для визначення градієнта тиску скористаємось рівнянням нерозривності (4.9). Підставивши в нього значення W_z відповідно до формули (4.21), одержимо:

$$G = \rho 2\pi r H \int_0^H W_z dy = \rho 2\pi r \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \int_0^H (y^2 - Hy) dy \quad (4.22)$$

Після інтегрування маємо:

$$G = -\frac{\rho \pi r H^3}{6\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (4.23)$$

Визначимо далі градієнт тиску:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{6G\mu}{\rho \pi r H^3} \quad (4.24)$$

і після підстановки одержаного виразу в (4.41), маємо:

$$W_z = \frac{3G}{\rho \pi r H^3} (Hy - y^2) \quad (4.25)$$

Інтегруючи рівняння (4.44) в межах від z_1 до z_2 і від P_1 до P_2 , одержимо наступний вираз для визначення приросту тиску:

$$\Delta P = -\frac{6G\mu}{\rho\pi rH^3} \Delta z \quad (4.26)$$

Визначимо тепер складові швидкості деформації, диференціюючи по y вирази (4.37) і (4.45):

$$\gamma_x = \frac{\partial W_x}{\partial y} = \frac{V_x}{H} \quad (4.27)$$

$$\gamma_z = \frac{\partial W_z}{\partial y} = \frac{3G}{\rho\pi rH^3} (H - 2y) \quad (4.28)$$

Потужність дисипації може бути визначена з рівняння (4.34) в якому значення складових швидкості деформації знаходяться відповідно до рівнянь (4.47) і (4.48). Температура полімеру знаходиться за рівнянням (4.15) залежно від наявності або відсутності в розплаві нерозплавлених частинок полімеру.[1]

4.1 Параметричний розрахунок дискового екструдера

Метою даного розрахунку є визначення та обґрунтування основних конструктивних і режимних параметрів диска дискового екструдера, зокрема діаметра диска, ширини каналу гвинтової нарізки, діаметра конусної частини, частоти обертання диска і механічної потужності на диску. Крім того, у межах розрахунку здійснюється вибір електродвигуна, який забезпечує надійну та енергоефективну роботу дискового екструдера за заданої продуктивності та технологічних умов перероблення полілактиду.

Головним робочим органом дискового екструдера є дискова головка. Розрахункова схема головки зображено на рисунку 4.4.

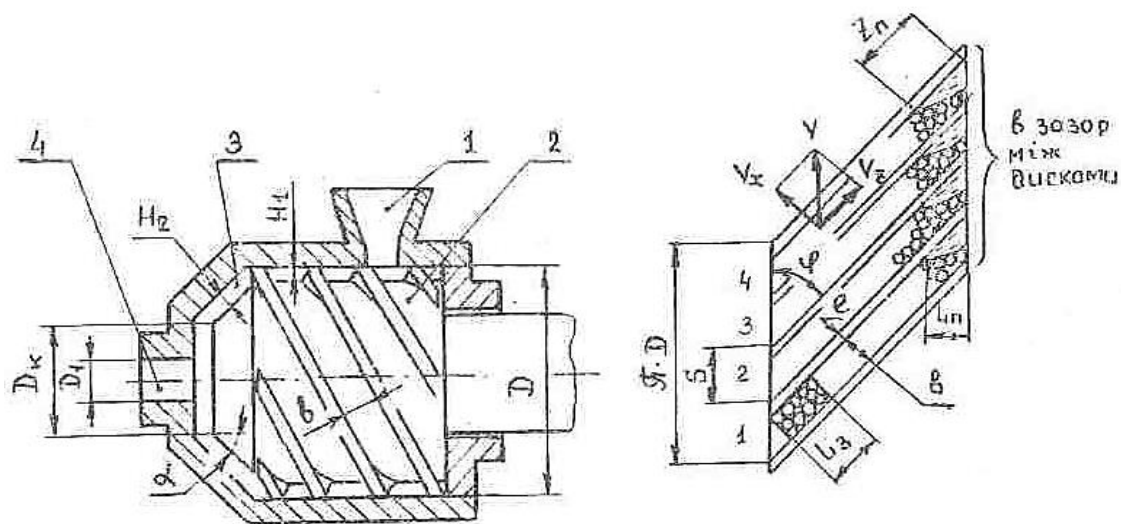


Рисунок 4.4 - Розрахункова схема дискової головки

Вихідні дані:

- початкове наближення діаметра диска D , м	0,25;
- глибина каналу нарізки диска H_1 , м	0,008;
- ширина отвору подачі гранул L_3 , м	0,08;
- число заходів нарізки K	4;
- діаметр вихідного отвору D_1 , м	0,065;
- число паралельних зазорів m	1;
- кут нахилу твірної диска α , град	40^0 ;
- кут гвинтової нарізки φ , град	$17,7^0$;
- зазор між дисками H_2 , м	0,005;
- продуктивність екструдера G_M , кг/год	36;
- коефіцієнт заповнення нарізки ψ	1;
- температура гранул на вході в екструдер $T_{вх}$, 0C	20;
- температура плавлення полімеру $T_{пл}$, 0C	110;
- температура стінки циліндра $T_{ц}$, 0C	190;
- температура розплаву на виході екструдера T_k , 0C	180;
- насипна маса гранул ρ_0 , $кг/м^3$	520;
- ентальпія гранул при температурі входу $i_{вх}$, Дж/кг	41900;

- теплофізичні властивості розплаву як функції температури:

- теплоємність полімеру при температурі $t = 120^0 \text{C}$:

$$c = 1000 \cdot (1,6436 + (3,6869E - 03)t + (-2,0592E - 06)tt) \frac{\text{Вт}}{\text{кг} \cdot ^0\text{C}};$$

- густина полімеру при температурі $t = 120^0 \text{C}$: $\rho = 600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

- теплопровідність полімеру при температурі $t = 120^0 \text{C}$:

$$\lambda = 0,1395711 + (7,927249E-04) \cdot t + (-1,24732E-06) t \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^0\text{C}};$$

- в'язкість розплаву $\mu(\gamma, T)$: $\mu = 40600 \cdot \gamma^{-0,7} \cdot e^{(-0,00998 (T - 120))}$ – реологічне рівняння в'язкості.

Скористаємось алгоритмом запропонованим [1].

Алгоритм розрахунку дискового екструдера.

Швидкість циліндра $V = \pi D n$ проектується на координаті осі:

$$V_x = V \sin \varphi. \quad (4.29)$$

$$V_z = V \cos \varphi. \quad (4.30)$$

Середня швидкість руху полімерної пробки вздовж витка нарізки, м/с:

$$V_{zt} = G / (\rho_H b H_1). \quad (4.31)$$

Нехтуємо силами інерції, оскільки розплав є високов'язкою рідиною, та силами тяжіння:

$$\rho g_x = \rho g_y = \rho g_z = 0. \quad (4.32)$$

Рух полімеру в плівці можна розглядати як рух між нерухомою (поверхня розділу) та рухомою (стінка циліндра) поверхнями в напрямі X, і між поверхнями, які рухаються зі швидкостями V_{zt} (поверхня розділу) та V_z (стінка циліндра) в напрямі Z. Тому вплив градієнтів тиску можна не враховувати:

$$\partial P / \partial x = 0, \partial P / \partial y = 0, \partial P / \partial z = 0.$$

З врахуванням спрощень система рівнянь руху має вид:

$$\mu = \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} = 0; \quad (4.33)$$

$$\mu = \frac{\partial^2 W_z}{\partial z^2} = 0. \quad (4.34)$$

Граничні умови для розв'язання цих рівнянь:

$$\text{при } y = 0 \quad W_x = 0; \quad W_x = V_{zt}; \quad (4.35)$$

$$\text{при } y = \delta \quad W_x = V_x; \quad W_z = V_z. \quad (4.36)$$

Якщо надалі вважати, що внутрішні джерела відсутні ($q_v = 0$), а в функції дисипації найбільшими похідними є $\frac{\partial W_x}{\partial y}$ та $\frac{\partial W_z}{\partial y}$, то рівняння енергії з врахуванням спрощень набуває вигляду:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu \left[\left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 \right] = 0. \quad (4.37)$$

На поверхні розділу температура полімеру дорівнює температурі плавлення $T_{пл}$, а на стінці циліндра, відповідно, - температурі цієї стінки $T_{ц}$.

Значення $T_{ц}$ задається і підтримується системою тепло забезпечення циліндра. Тоді граничні умови для розв'язання рівняння (4.1.9) будуть такими:

$$\text{при } y = 0 \quad T = T_{пл}; \quad (4.38)$$

$$\text{при } y = \delta \quad T = T_{ц}. \quad (4.39)$$

Рівняння теплового балансу для поверхні розділу:

$$dG_p (i_{пл} - i_{BX}) = q_{y=0} X dz. \quad (4.40)$$

Кількість розплаву dG_p , що утворюється за одиницю часу на поверхні розділу і переходить в область розплаву біля штовхаючого витка:

$$dG_p = \rho \delta dz W_c. \quad (4.41)$$

де: швидкість в напрямку x дорівнює:

$$W_c = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta W_x dy. \quad (4.42)$$

Тепловий потік на поверхні розділу ($y=0$) відповідно до закону Фур'є знаходять за рівнянням:

$$q_{y=0} = \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}. \quad (4.43)$$

Після підстановки отримаємо:

$$\rho \int_0^{\delta} W_x dy (i_{nl} - i_{ex}) = \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} X. \quad (4.44)$$

Для визначення ширини нерозплавленого полімеру X складемо рівняння матеріального балансу, згідно з яким збільшення масової витрати розплаву на довжині dz дорівнює зменшенню витрати твердого полімеру на тій же довжині:

$$-\rho_H V_{zT} (H - \delta) dX = \rho dz \int_0^{\delta} W_x dy. \quad (4.45)$$

Таким чином, система рівнянь (4.29) - (4.34), (4.37) з граничними умовами (4.36), (4.37), (4.39), а також рівняння (4.44) і (4.45) разом з функціями, які описують залежність властивостей від температури і в'язкості від компонент швидкості деформації і температури, є математичною моделлю модуля плавлення. Розв'язання цієї системи дозволяє визначити профілі швидкості й і температур, середню температуру розплаву і товщину плівки розплаву і нерозплавленого полімеру, масові витрати розплаву і нерозплавленого полімеру, потужності дисипації і нагріву або (охолодження) циліндра.

Для модуля гомогенізації існують свої залежності [11].

Рівняння руху мають вид:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0. \quad (4.46)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0. \quad (4.47)$$

Компоненти тензора напруги:

$$\tau_{yx} = \mu(l_2, T) \frac{\partial W_x}{\partial y}. \quad (4.48)$$

$$\tau_{yz} = \mu(l_2, T) \frac{\partial W_z}{\partial y}. \quad (4.49)$$

причому, відмінними від нуля компонентами другого інваріанта l_2 є тільки $\gamma_x = \frac{\partial W_x}{\partial y}$ і $\gamma_z = \frac{\partial W_z}{\partial y}$.

При застосуванні методу ступеневої апроксимації в'язкість в межах елемента можна вважати постійною і визначати її за середніми для елемента значеннями γ_x і γ_z і середньою температурою T_c . Зміна ряду величин також відбувається стрибкоподібно на поверхні розділу елементів і в межах елемента їх можна вважати незмінними по координаті y . Тоді для описання течії застосовується рівняння руху для Ньютонівської моделі рідини, які мають в даному випадку вид:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} = 0 \quad (4.50)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} = 0. \quad (4.51)$$

Граничні умови:

$$\text{при } y = 0 \quad W_x = 0; \quad W_z = 0; \quad (4.52)$$

$$\text{при } y = H \quad W_x = V_x; \quad W_z = 0. \quad (4.53)$$

Масова витрата для зазорів між дисками:

$$G = \rho S_k \frac{1}{H} \int_0^H W_z dy. \quad (4.54)$$

Рівняння для визначення тиску в цьому випадку набуває вигляду:

$$\int_0^H W_x dy = 0. \quad (4.55)$$

Оскільки найбільше значення мають тільки компоненти $\frac{\partial W_x}{\partial y}$ і $\frac{\partial W_z}{\partial y}$, то рівняння для визначення потужності дисипації набуває вигляду:

$$\Delta N_D = \int_0^{S_k} \int_{Z_1}^{Z_2} \int_0^H \mu \left[\left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy dz. \quad (4.56)$$

Відповідно до спрощень методу ступеневої апроксимації підінтегральна функція залежить тільки від координати y , тому рівняння спрощується:

$$\Delta N_D = S_K \Delta z \int_0^H \mu \left[\left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 \right] dy. \quad (4.57)$$

Таким чином, розв'язання системи рівнянь (4.22)–(4.26), (4.27), (4.28) дає можливість визначити компоненти швидкості W_x і W_z , тиск P , а також потужність дисипації. Після руйнування полімерної пробки, яким завершується механізм процесу плавлення, розплав має нерозплавлені частинки цієї пробки. Тому для перехідної області можна припустити, що потужність дисипації витрачається на завершення плавлення цих частинок, а середня температура розплаву не змінюється і залишається рівною його температурі, обчислений в останньому модулі зони плавлення. Тоді масова витрата розплаву збільшиться на величину:

$$\Delta G_P = \frac{\Delta N_D}{i_C - i_{BX}} \quad (4.58)$$

де i_S – ентальпія розплаву при його середній для даного елемента температурі.

Середньомасова температура полімеру в цьому випадку:

$$T = 1/G [G_P T_C + (G - G_P) T_{BX}]. \quad (4.59)$$

Після завершення плавлення приріст середньої температури розплаву можна визначити з рівняння теплового балансу елемента Δz , звідки одержимо:

$$\Delta T = \frac{\Delta N_D}{GC}. \quad (4.60)$$

де C – теплоємність розплаву при його середній температурі.

За один оберт кожен з каналів гвинтової нарізки диска знаходиться під отвором воронки тільки один раз, тому при відсутності дозатора масову витрату виз-

начають за формулою:

$$G = \psi \rho_0 b H_1 K L_3 n . \quad (4.61)$$

де : ρ_0 - насипна маса гранул;

b і H_1 - ширина і висота нарізки;

L_3 - ширина отвору;

ψ - коефіцієнт заповнення каналу.

Наступні викладки стосуються випадку, коли дозатор відсутній.

Довжина зони плавлення:

$$Z_{\Pi} = \frac{2G}{\rho_0 n b H_1 K} . \quad (4.62)$$

При застосуванні дозатора продуктивність регулюється, проте вона не буде перевищувати значення, обчисленого за наведеною формулою.

Швидкість обертання диска обмежена умовами заповнення каналів нарізки. Знайдемо число обертів n_0 , при яких гранула встигає пройти під дією сил тяжіння шлях, рівний глибині нарізки H_1 за час, який виток знаходиться під отвором воронки:

$$\sqrt{\frac{2H_1}{g}} = \frac{b}{\pi D n_0 \sin \varphi} . \quad (4.63)$$

$$\text{звідки } n_0 = \frac{b}{\pi D \sin \varphi \sqrt{\frac{2H_1}{g}}} . \quad (4.64)$$

З рівнянь одержуємо:

$$b = \sqrt{D \frac{A_1}{A_2}} . \quad (4.65)$$

$$n_0 = \frac{A_1}{b} . \quad (4.66)$$

$$\text{де: } A_1 = \frac{G}{H_1 K L_3 \rho_0 \psi} . \quad (4.67)$$

$$A_2 = \frac{1}{\pi \sin \varphi \sqrt{\frac{2H_1}{g}}} . \quad (4.68)$$

При розрахунках слід мати на увазі, що геометричні розміри диска пов'язані залежністю, яка впливає з чисто геометричних співвідношень:

$$D_{\min} \geq \frac{K(b+e)}{\pi \sin \varphi} . \quad (4.69)$$

При розрахунку процес подачі суттєвого впливу не має, тому його не враховують.

При змішуванні потоків напіврозплаву, які поступають з каналів гвинтової нарізки, відбувається деяке зниження температури розплаву і за рахунок виділеної теплоти плавиться частина нерозплавлених частинок.

При цьому середня температура знижується до значення:

$$T_1 = 0,5(T_p - T_{nl}) . \quad (4.70)$$

де T_p – температура розплаву, обчислена в останньому модулі плавлення.

Тоді витрата розплаву збільшиться на величину:

$$\Delta G_{p0} = G_p \frac{(i_p - i_1)}{i_1 - i_{BX}} \quad (4.71)$$

Блок-схема алгоритму розрахунку дискового екструдера, таблиця ідентифікаторів програми розрахунку, опис алгоритму та програма розрахунку наведені в Додатку В.

Висновок: розрахунок дискового екструдера показав, що для переробки полімерів із продуктивністю 36 кг/год (0,11 кг/с) він повинен мати діаметр диска 320,0 мм; ширина каналу нарізки 21,6 мм, число обертів диска 103,3 1/хв. (1,72 1/с), потужність двигуна 46,2 кВт. Таким чином врахувавши КПД двигуна $\eta_{дв} = 0,95$, пасової передачі $\eta_{рем.п} = 0,8$, редуктора $\eta_{ред} = 0,9$, муфти $\eta_{муф} = 0,95$, підшипникового вузла $\eta_{підш} = 0,95$, загальний КПД стано-

вись $\eta = 0,62$, а потужність двигуна, яка буде забезпечувати запас по потужності, дорівнює:

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_T}{\eta} = \frac{46,2}{0,62} = 74,5 \text{ кВт.}$$

По каталогу вибираємо асинхронний електродвигун марки АИМ250S4, потужністю 75 кВт, частоту обертів якого можна регулювати в діапазоні 1500- 2000 об/хв. Вибраний електродвигун необхідне число обертів забезпечує.

4.2 Розрахунок шнекового дозатора

Мета даного розрахунку полягає в підборі приводу дозатора, який би задовольняв встановлену продуктивність лінії ЛРП-600, продуктивністю 36 кг/год.

Розрахункова схема представлена на рисунку 4.1

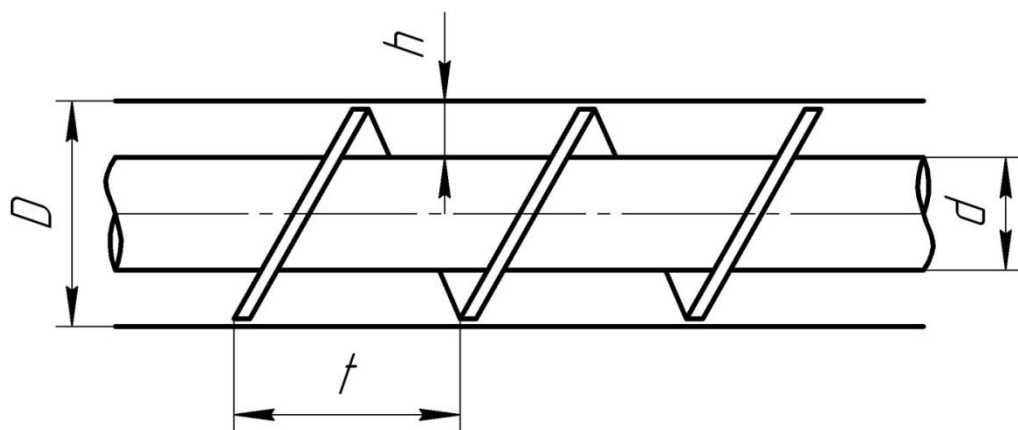


Рисунок 4.1 – Схема розрахунку шнекового дозатора

Вихідні дані:

Максимальна продуктивність, Q_{max} , кг/ГОД.....36
 Коефіцієнт тертя полімеру по сталі та по полімеру, f_1, f_20,2; 0,4
 Число витків дозуючого шнека, n8
 Крок витків шнека t , м.....0,05
 Довжина шнека дозатора l , м.....0,3

Потужність транспортування:

$$N_{mp} = \frac{Q_{\max} \cdot g \cdot (f_1 + f_2)}{\eta} = \frac{0,011 \cdot 9,81 \cdot 1,2 \cdot (0,22 + 0,4)}{0,5} = 0,2 \text{ кВт}$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

L – довжина витків шнека, м ;

η – ККД.

Вибір приводу дозатора:

В зв'язку з тим, що потужність транспортування спів розмірна з потужністю, що витрачається на холостий хід дозатора та являється значно меншою потужностей приводів що випускаються промисловістю, вибираємо привід безступінчастий спеціальний типу 1MBPP-0,75 $\frac{40}{5}$ з номінальною потужністю 0,75 кВт.

Між приводом та дозатором використовуємо ланцюгову передачу з передаточним відношенням $i=2$. Зміна передаточного відношення дозволяє змінювати значення максимальної та мінімальної продуктивності дозатора.

Перевірочний розрахунок продуктивності шнекового дозатора для гранул.

Продуктивність дозатора, кг/год :

$$Q = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \cdot t \cdot n \cdot \rho = \frac{3,14 \cdot (50^2 - 25^2)}{4} 10^{-6} \cdot 50 \cdot 60 \cdot 10^{-3} \cdot 650 \cdot n = 2,8 \cdot n \quad (4.72)$$

де D – зовнішній діаметр витків, м ;

d – внутрішній діаметр витків, м ;

t – крок гвинтової нарізки, м ;

ρ – насипна густина.

За формулою (4.72) підрахуємо продуктивність при різних числах обертів та зведемо отримані дані в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 Продуктивність шнекового дозатора

Кількість оборотів шнека, хв ⁻¹	Продуктивність, кг/год
5	14
10	28
15	42
20	56
30	84

Висновок: для розрахованої продуктивності $Q=36$ кг/год та передаточно-го відношення 2 номінальне число обертів вихідного валу мотор-варіатора рівне 13 хв^{-1} .

4.3 Розрахунок формуючої головки

Метою розрахунку є визначення різниці тиску між вхідним і вихідним перерізами головки (опір головки) для заданої продуктивності.

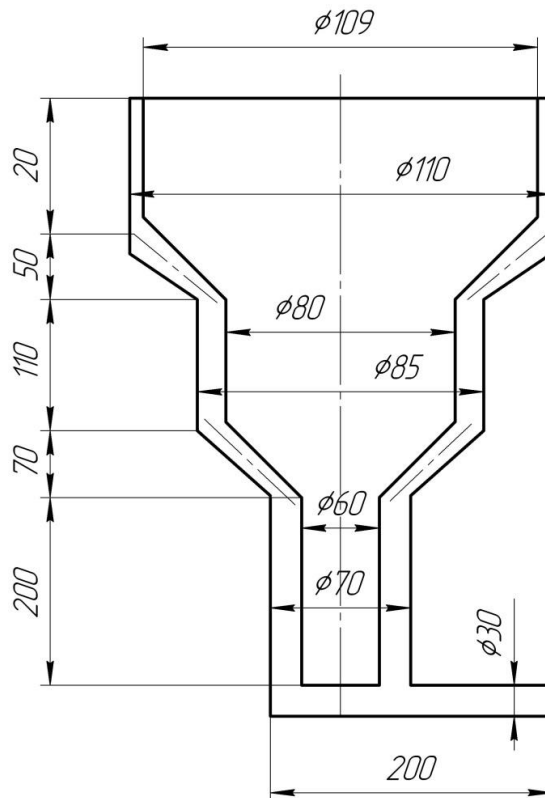


Рисунок 4.6 - Схема формуючої головки

Вхідні дані:

- продуктивність, Q_m , кг/год 36
- температура розплаву $T, ^\circ\text{C}$, (K) 180 (453)
- густина розплаву при температурі $T=180 ^\circ\text{C}$, ρ , кг/м³ 967,77

Алгоритм розрахований на обчислення в діалоговому режимі, тому геометричні параметри каналів і їх схема приведена на рисунку 4.6.

Скористаємось методикою запропонованою [11].

Математична модель розрахунку формуючої головки.

Коефіцієнт геометричної форми головки (K) входить до розрахункових формул продуктивності екструдерів. Він залежить від профілю та геометричних розмірів формуючих перерізів головки екструдера. При розрахунку формуючу головку умовно розбивають на ділянки, які відрізняються конфігурацією. Зазвичай канал головки, по якому тече розплав, має перерізи таких форм: циліндричний, кільцевий циліндричний, кільцевий конічний.

Визначають коефіцієнт геометричної форми відповідної елементарної ділянки (K_i), швидкість зсуву (γ_i) та ефективну в'язкість (η) розплаву для даної температури переробки, що дозволяє розрахувати перепад тиску на цій ділянці (ΔP_i) (усі значення K_i та γ_i , зазначені далі, вимірюються в см³ та с⁻¹ відповідно):

$$\Delta P_i = \frac{V_p \cdot \mu}{K_i}, \quad (4.73)$$

де V_p — об'ємна витрата розплаву, см³/с.

Коефіцієнт геометричної форми головки (K) розраховують за формулою:

$$K = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_1} + \sum \frac{1}{K_2} + \dots + \sum \frac{1}{K_i}} \quad (4.74)$$

Коефіцієнти геометричної форми окремих перерізів головки (K_i) та швидкості зсуву розплаву (γ_i) у цих перерізах обчислюють за наведеними нижче формулами.

Циліндричний канал:

$$K_1 = \frac{\pi z d_1^4}{128 L_1} \quad (4.75)$$

$$\gamma_1 = \frac{32 V_p}{\pi d_1^3} \quad (4.76)$$

де d_1 – діаметр каналу, см;

L_1 – довжина каналу, см.

Конічний канал:

$$K_2 = \frac{3\pi d_2^3 \cdot d_3^3}{128(d_2^2 + d_2 \cdot d_3 + d_3^2) \cdot L_2} \quad (4.77)$$

$$\gamma_2 = \frac{256 \cdot V_p}{\pi \cdot (d_2 + d_3)^3} \quad (4.78)$$

де L_2 – довжина конічного каналу, см;

d_2, d_3 – діаметри конуса відповідно на вході та виході розплаву, см.

Кільцевий циліндричний канал:

$$K_3 = \frac{\pi}{8L_3} \left[r_H^4 - r_{HB}^4 - \frac{(r_H^2 - r_{HB}^2)^2}{\ln \frac{r_H}{r_{HB}}} \right] \quad (4.78)$$

$$\gamma_3 = \frac{5,58 \cdot V_p}{\pi \cdot (r_H + r_{HB}) \cdot (r_H - r_{HB})^2} \quad (4.80)$$

де b_1 – ширина кільцевого зазору, см;

r_n , $r_{вн}$ – зовнішній та внутрішній радіуси циліндричного каналу відповідно, см;

L_3 – довжина кільцевого циліндричного каналу, см;

Кільцевий конічний канал:

$$K_4 = \frac{\pi \cdot (r_1 h_4 - r_2 h_3)}{6mL_4} \quad (4.81)$$

$$\gamma_4 = \frac{22,32 \cdot V_p}{\pi \cdot (r_1 + r_2) \cdot (h_3 + h_4)^2} \quad (4.84)$$

де r_1 , r_2 – середні радіуси окружності конічного кільцевого зазору відповідно на вході та виході, см;

h_3 , h_4 – товщина зазору на вході та виході відповідно, см;

L_4 – довжина кільцевого конічного каналу, см;

m – коефіцієнт, що враховує геометричні параметри, см^{-2});

$$m = \frac{2,3 \cdot (r_1 - r_2)^2}{(r_1 h_4 - r_2 h_3)^2} \cdot \lg \frac{r_1 h_4}{r_2 h_3} - \frac{(r_1 - r_2) \cdot (h_3 - h_4)}{(r_1 h_4 - r_2 h_3) \cdot h_3 \cdot h_4} - \frac{(h_3^2 - h_4^2)}{2 \cdot h_3^2 \cdot h_4^2} \quad (4.85)$$

Значення m залежно від вихідних даних може бути від'ємним.

Профіль тиску на початку зони подачі при відомих значеннях коефіцієнтів тертя:

$$P_2 = P_1 \exp \left\{ \frac{\pi D f_{\text{ц}} \Delta L}{bH} \left[\cos(\omega + \varphi) - f \sin(\omega + \varphi) - \frac{f}{f_{\text{ц}}} \frac{D - 2H}{D} \right] \right\} \quad (4.86)$$

Профіль тиску в зоні гомогенізації:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \frac{12 \mu \Delta z}{F_p H^3} \left(V_z F_d \frac{H}{2} - \frac{G}{\rho b} \right). \quad (4.87)$$

В зоні плавлення потік є двофазним, причому розплав і твердий полімер рухаються окремо.

Якщо вважати, що тиск по поперечному перерізу каналу диска [1] являє собою суму масових витрат твердого полімеру та розплаву і визначається рівнянням:

$$G = \rho_H X H V_{zT} + \rho(b - X) \left(\frac{V_z H F_d}{2} - \frac{H^3 F_d}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right). \quad (4.88)$$

звідки

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{12\mu}{H^3 \rho F_p (b - X)} \left[\rho_H X H V_{zT} + \frac{\rho(b - X) H V_z F_d}{2} - G \right]. \quad (4.89)$$

Інтегруючи це рівняння від Z_1 до Z_2 і від P_1 до P_2 , одержимо:

$$\Delta P = \frac{12\mu}{H^3 \rho F_p (b - X)} \left[\rho_H X H V_{zT} + \frac{\rho(b - X) H V_z F_d}{2} - G \right]. \quad (4.90)$$

В'язкість слід визначати за середнім для даного поперечного перерізу значенням:

$$\mu = \frac{1}{m+1} \sum_0^m \mu. \quad (4.91)$$

Потік розплаву в каналах плівкової головки одномірний, причому інтенсивність дисипації значно менша, ніж в екструдері (відсутні складові швидкості, які викликають циркуляцію в каналі диска, тангенціальні складові течії в зазорах), тому підвищення температури за рахунок дисипації в інженерних розрахунках можна не враховувати і потік вважати ізотермічним. Тоді розв'язок системи рівнянь для каналів простих форм описується загальною формулою:

$$G = \rho K \frac{\Delta P}{\mu}. \quad (4.92)$$

де ΔP - перепад тиску, μ - в'язкість розплаву, яка обчислюється за середніми для каналу значеннями швидкості деформації і температури; K – коефіцієнт геометричної форми, який залежить тільки від форми і розмірів каналу.

Масова витрата розплаву:

$$G = \rho \frac{Pr}{\sum_{i=1}^0 \frac{\mu_i}{K_i}}. \quad (4.93)$$

Блок-схема алгоритму розрахунку, таблиця ідентифікаторів програми, опис алгоритму і програма розрахунку формуючої головки приведені в Додатку Г.

Висновок: розрахунок формуючої головки показав, що її загальний опір дорівнює 24,49 МПа, що не перевищує тиск, створюваний в шестеренному насосі, рівним 25,5 МПа.

4.4 Розрахунок диска на міцність

Диск є основним робочим органом дискового екструдера і від правильного вибору його конструкції значною мірою залежить якість переробки матеріалу і продуктивність машини.

Метою цього розрахунку є перевірка того, чи знаходиться прогин диска в межах конструкційного зазору.

Базовий варіант розрахункової схеми диска зображено на рисунку 4.7.

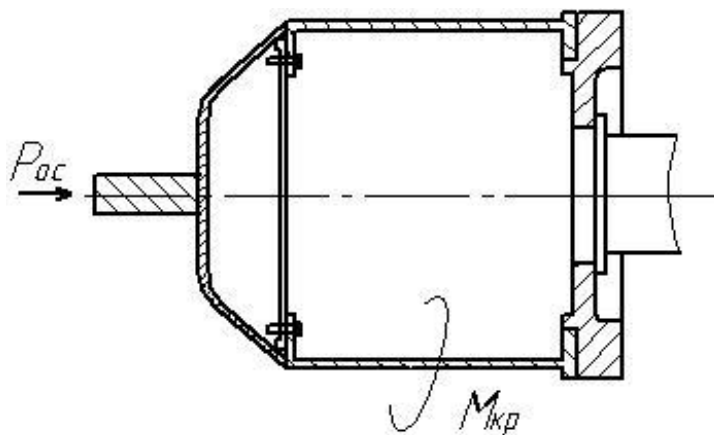


Рисунок 4.7 - Розрахункова схема диска

Поряд з розрахунком на міцність, диск перевіряють на жорсткість [26].

На диск діють такі силові фактори:

- осьове зусилля P_{oc} ;

- крутний момент $M_{кр}$;

Матеріал диска – Сталь 40Х ДСТУ4543:2016;

Термообробка: 147...197 НВ;

Визначимо осьове зусилля, що виникає у гвинтовому каналі диска, кН:

$$P_{oc} = P_{вх} \frac{\pi d^2}{4} = 15 \cdot 10^6 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,32^2}{4} = 1205,8 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

Перевірка на міцність.

Умова міцності:

$$\sigma = \frac{P_{oc}}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{1205,8 \cdot 10^3}{\frac{3,14 \cdot 0,32^2}{4}} = 15 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$\sigma \leq [\sigma]$$

$$15 \cdot 10^6 \text{ Па} < 150 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Умова міцності виконується.

Перевірка на стійкість.

Умова стійкості:

$$\sigma = \frac{P_{oc}}{\frac{\pi d^2}{4}} \leq [\sigma] \varphi_c$$

де $\varphi_c = f(\lambda)$ із графіка [2], $\varphi_c = 0,99965$.

$$[\sigma] \cdot \varphi = 150 \cdot 10^6 \cdot 0,99965 = 149,95 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

$$\lambda = \frac{l_{np}}{i} = \frac{2 \cdot 0,29}{0,07887} = 7,35.$$

$$l_{np} = 2 \cdot L_{,м}$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{f}} = \sqrt{\frac{\frac{3,14}{64} \cdot 0,32^4}{\frac{3,14}{4} \cdot 0,32^2}} = 0,07887 \text{ м.}$$

$$f = \frac{\pi d^2}{4}, \text{м} - \text{площа поперечного перерізу.}$$

Умова стійкості:

$$\sigma \leq [\sigma] \varphi.$$

$$15 \cdot 10^6 < 149,95 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

В результаті розрахунку ми бачимо що стійкість забезпечено.

Визначимо крутний момент, що діє на диск, Н·м:

$$M_{кр} = \frac{N}{\omega} = \frac{75 \cdot 10^3}{996 \cdot 9,81} = 7,676 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де N – потужність приводу, Вт.

ω – швидкість обертання диска, м²/с.

$$\omega = VR = \pi n DR \cdot 60 = 3,14 \cdot 103,3 \cdot 0,32 \cdot \frac{0,32}{2} \cdot 60 = 996 \text{ м}^2/\text{с.}$$

Визначимо максимальне дотичне напруження, що виникає:

$$\tau = \frac{M_{кр.}}{2 \cdot W_p} = \frac{7,676}{2 \cdot 0,0032} = 1199 \text{ Н}$$

Момент опору, м³:

$$W_p = \frac{\pi d^4}{64 \cdot \frac{d}{2}} = \frac{3,14 \cdot 0,32^4}{64 \cdot \frac{0,32}{2}} = 0,0032$$

Еквівалентне напруження, МПа:

$$\sigma_{ек} = \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} = \sqrt{10^2 \cdot 10^6 + 4 \cdot 0,0129^2 \cdot 10^6} = 10 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Умова стійкості на кручення:

$$\sigma_{ек} \leq [\sigma]$$

$$10 \cdot 10^6 \text{ Па} < 150 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Умова виконується.

Висновок: в результаті розрахунку видно, що диск витримує тиск, який діє на нього і складає 1205,8 кН. Він не прогнеться і не скрутиться, через те що умови стійкості забезпеченні.

4.5 Розрахунок корпусу на міцність

Мета: перевірка на міцність корпусу.

Розрахункова схема зображена на рисунку 4.8.

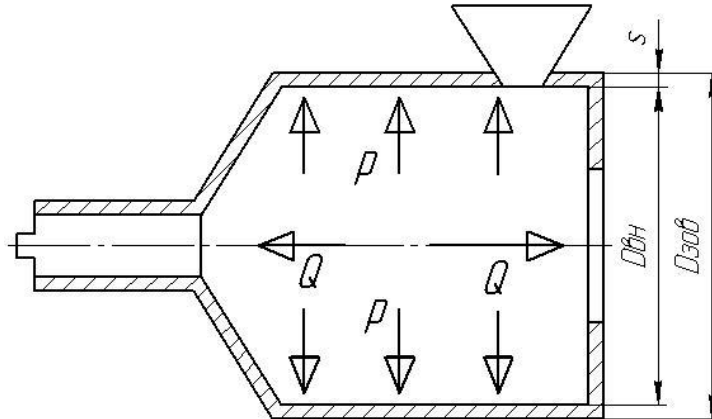


Рисунок 4.8 - Розрахункова схема корпусу

Вихідні дані:

- розрахунковий внутрішній тиск p , МПа 15;
- товщина стінки корпусу s , м 0,025;
- осьова сила Q , МПа 0,24;
- внутрішній діаметр корпусу; $D_{вн}$, м 0,32;
- зовнішній діаметр корпусу. $D_{зов}$, м 0,366.

Скористайтесь схемою розрахунку, запропонованою авторами [15].

Корпус являє собою товстостінний циліндр, навантажений внутрішнім тиском P та осьовою розтягуючою силою Q .

Матеріал корпусу – сталь 12X18H10T при температурі $T = 180^{\circ}\text{C}$.

$[\sigma] = 160,0$ МПа [23].

Напруга, що виникає в стінках корпусу від дії внутрішнього тиску, визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{P(D + S)}{2S\phi_R} = \frac{15 \cdot (0,32 + 0,025)}{2 \cdot 0,025 \cdot 1,0} = 103,5 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

де $\phi_R = 1,0$ – коефіцієнт міцності зварного шва;

Осьова напруга в корпусі:

$$\sigma_z = \frac{Q}{F} = \frac{PR_{BH}^2}{(R_H^2 - R_{BH}^2)} = \frac{15 \cdot 0,16^2}{(0,183^2 - 0,16^2)} = 48,7 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

де $R_H = 0,183$ мм – зовнішній радіус корпусу;

$R_{BH} = 0,160$ мм – внутрішній радіус корпусу..

Загальна сумарна напруга:

$$\sigma = \sigma + \sigma_z = 103,5 + 48,7 = 152,2 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Допустимий тиск визначається за формулою:

$$[P] = \frac{2[\sigma]\varphi_R S}{(D + S)} = \frac{2 \cdot 160 \cdot 1 \cdot 0,025}{(0,32 + 0,025)} = 46,4 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

$$P < [P].$$

$$15 \text{ МПа} < 46,4 \text{ МПа}.$$

Висновок: розрахунок корпусу екструдера на міцність показав, що виникаючі в ньому напруги не перевищують допустимих, тобто $15 \text{ МПа} < 46,4 \text{ МПа}$ - підтвердив його довговічність. $L_H = 1620655871,6 > 150000 \text{ год}.$

4.6 Розрахунок гільзи на міцність

Мета: перевірка міцності стінок гільзи від дії зовнішнього тиску.

Схема розрахунку зображена на рисунку 4.9.

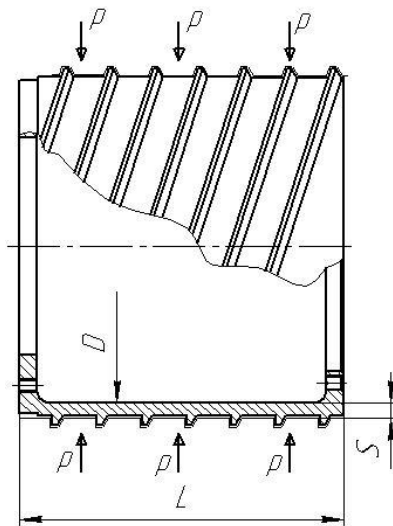


Рисунок 4.9- Розрахункова схема гільзи

Вхідні дані:

- товщина стінки гільзи S , м 0,0125;
- внутрішній діаметр D , м 0,28;
- розрахунковий зовнішній тиск в апараті P , МПа 15;
- довжина гільзи l , м 0,29;

Скористаємось алгоритмом розрахунку представленому [15].

Гільза являє собою тонкостінний циліндр, навантажений зовнішнім тиском P . Матеріал корпусу – сталь 40Х при температурі $T = 180^{\circ}\text{C}$, допустиме напруження для сталі дорівнює $[\sigma] = 252,0 \text{ МПа}$ [23].

Допустимий тиск з умови міцності:

$$[P]_{\Pi} = \frac{2 \cdot [\sigma] S}{D + S} = \frac{2 \cdot 252 \cdot 0,0125}{0,28 + 0,0125} = 21,5 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

$$[P]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E D}{n_y B_1 l} \left[\frac{100 \cdot S}{D} \right]^{2,5} =$$
$$= \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,97 \cdot 10^{11}}{1,5 \cdot 1} \cdot \frac{0,28}{0,29} \cdot \left[\frac{100 \cdot 0,0125}{0,28} \right]^{2,5} = 111,0 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$\text{де } B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100 \cdot S}} \right\}$$

$E = 1,97 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ - модуль поздовжньої пружності [27] для сталі 40Х при температурі $T = 180^{\circ}\text{C}$.

$$B_1 = 9,45 \cdot \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100 \cdot S}} = 9,45 \cdot \frac{0,28}{0,29} \cdot \sqrt{\frac{0,28}{100 \cdot 0,0125}} = 4,31.$$

Обираємо $B_1 = 1,0$.

Допустимий зовнішній тиск обчислимо за формулою:

$$[P] = \frac{[P]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[P]_{\Pi}}{[P]_E} \right)^2}} = \frac{21,5}{\sqrt{1 + \left(\frac{21,5}{111} \right)^2}} = 21,10 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$P < [P].$$

$$15 \text{ МПа} < 21,10 \text{ МПа}.$$

Напруга, що виникає в стінках гільзи від дії зовнішнього тиску, визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{P(D+S)}{2 \cdot S \phi_R} = \frac{15 \cdot (0,28 + 0,0125)}{2 \cdot 0,0125 \cdot 1,0} = 175,5 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

де $\phi_R = 1,0$ – коефіцієнт міцності зварного шва.

$$\sigma < [\sigma].$$

$$175,5 \text{ МПа} < 252 \text{ МПа}.$$

Висновок: розрахунок гільзи екструдера на міцність показав, що виникаючі в ній напруги не перевищують допустимих, тобто

$$\sigma < [\sigma] \quad 175,5 \text{ МПа} < 252 \text{ МПа},$$

$$P < [P] \quad 15 \text{ МПа} < 21,10 \text{ МПа}.$$

4.7 Розрахунок упорного підшипника та підшипника кочення

Метою розрахунку є: визначення довговічності підшипника.

Розрахункова схема підшипників представлена на рисунках 4.10, 4.11.

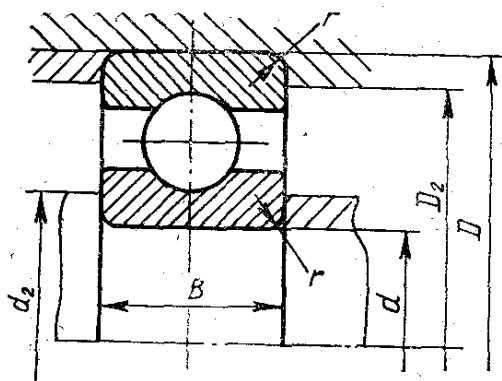


Рисунок 4.10- Розрахункова схема підшипника кочення

Підшипники кочення є основним видом опор. Вузол підшипника є невід'ємною і дуже відповідальною складовою дискового екструдера. Він сприймає на себе значні зусилля, якими навантажений диск під час роботи, і передає їх на станину.

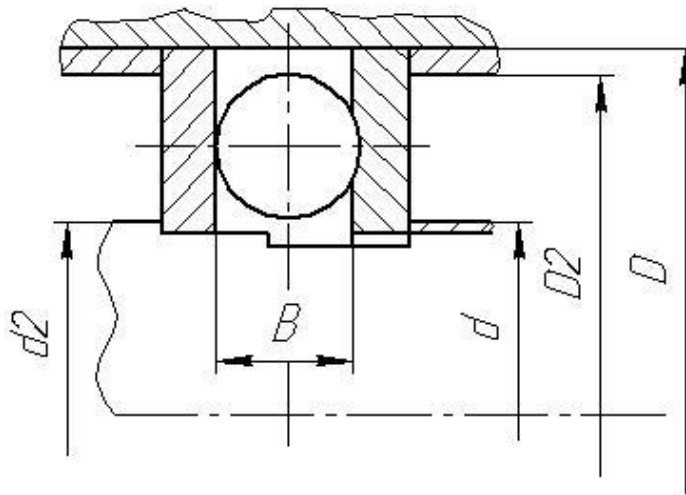


Рисунок 4.11- Розрахункова схема підшипника упорного

Вихідні дані:

- розміри підшипника: d , м 0,085;
 D , м 0,210;
 B , м. 0,052;
 - коефіцієнт працездатності C , Н. $135 \cdot 10^3$;

Підшипник повинен сприймати значні змінювані у часі зусилля і при цьому мати якомога більший ресурс роботи, оскільки його ремонт потребує суттєвих вартісних затрат і часу. Використовуємо шариковий радіальний однорядний підшипник №315, оскільки він простий та використовується в якості універсальних опор у вузлах, призначений для сприймання радіальних навантажень при високих частотах обертання, [25]

Обчислюємо еквівалентне динамічне навантаження, яке діє на підшипник:

$$P = FS = 1,31 \cdot 10^6 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,085^2}{4} = 6,91 \text{ кН};$$

де $F=1,31$ МПа- тиск формуючої головки;

S , м² - площа поперечного перерізу вала;

Довговічність підшипника:

$$L_H = \frac{10^6}{60} \cdot N \left(\frac{C}{P} \right)^3 = \frac{10^6}{60} \cdot 105 \cdot \left(\frac{174000}{6910} \right)^3 = 27941624461,3 \text{ год} > 150000 \text{ год},$$

де: $C = 174000$ кг – динамічна вантажопідйомність підшипника;

$p=3$ - степеневий показник;

$n=105$ об/хв – максимальне число обертів вала.

Упорні підшипники.

Осьове навантаження, яке діє на вал диска, сприймає упорний підшипник. Встановлюємо роликопідшипник упорний сферичний №8324 ($d \times D \times B = 120 \times 180 \times 72$) [17].

Розрахунок довговічності підшипника проведемо наступним чином.

Визначаємо еквівалентне динамічне навантаження, що діє на підшипник:

$$P = (F_A + 1,2 \cdot F_{p2}) K_\phi K_T = (p \frac{\pi d^2}{4} + 1,2 \cdot F_{p2}) K_\phi K_T = \\ = 1,31 \cdot 10^6 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,210^2}{4} \cdot 1,2 \cdot 1,1 = 60 \text{ кН}$$

де: F_A – осьове навантаження;

$F_{p2} = 0$ – радіальне навантаження;

$K_\phi = 1,2$ – динамічний коефіцієнт;

$K_T = 1,1$ – температурний коефіцієнт.

Довговічність підшипника:

$$L_H = \frac{10^6}{60} \cdot N \left(\frac{C}{P} \right)^3 = \frac{10^6}{60} \cdot 105 \cdot \left(\frac{247600}{60000} \right)^3 = 196328802,3 \text{ год} > 150000 \text{ год}.$$

де: $C = 247600$ кг – динамічна вантажопідйомність підшипника [25].

Висновок: Приймаємо $L_H = 150000$ год - довговічність підшипника.

4.8 Розрахунок шпонкового з'єднання

Мета: перевірка міцності вибраної шпонки на зріз.

Розрахункова схема такої шпонки наведена на рисунку 4.12.

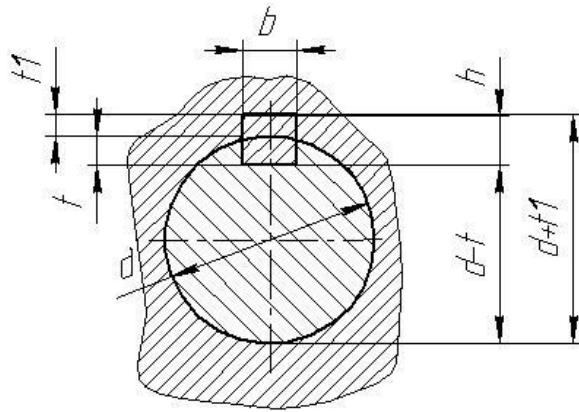


Рисунок 4.12 – Розрахункова схема шпонки

За діаметром вала $d = 0,038$ м виберемо згідно з [25] розміри перерізу шпонки $b = 0,012$ м, $h = 0,009$ м. Глибина паза вала $t_1 = 0,0038$ м. Шпонка виготовлена зі сталі 45 з $[\sigma_r] = 350$ МПа.

Алгоритм розрахунку представлений [25].

Найбільш небезпечною деформацією для шпонок і пазів є зминання від

крутного моменту T , Н*м:

$$\sigma_{зм} = \frac{2 \cdot T \cdot 10^3}{d l_p (h - t_1)} \leq [\sigma_{зм}]$$

де: l_p – робоча довжина шпонки, м;

T – крутний момент, кН*м;

d – діаметр вала, м;

Знайдемо крутний момент на валу шківа [25]:

$$T = 9550 \cdot \frac{N}{n} = 9550 \cdot \frac{75}{2000} = 358 \text{ кНм},$$

де: N – потужність електродвигуна, 75 кН*м;

n – частота обертання, 2000 об/хв.

$$l_p = \frac{2T \cdot 10^3}{d(h - t_1)[\sigma]_{зм}} = \frac{2 \cdot 358 \cdot 10^3}{0,038 \cdot (0,009 - 0,0038) \cdot 120} = 0,030 \text{ м}.$$

Повна довжина шпонки :

$$l = l_p + b = 0,030 + 0,012 = 0,042 \text{ м}.$$

Округливши це значення до найближчого зі стандартного ряду, остаточно одержуємо : $l = 0,045\text{м}$.

Перевіримо міцність вибраної шпонки на зріз.

Прийmemo допустиму напругу $[\tau]_{зр} = 70 \text{ МПа}$:

$$\tau_{зр} = \frac{2 \cdot T \cdot 10^3}{d b l_p} = \frac{2 \cdot 358 \cdot 10^3}{38 \cdot 12 \cdot 30} = 52,3 \text{ МПа} < 70 \text{ МПа}.$$

Умова міцності виконується.

Висновок: отже, призматична шпонка $12 \times 9 \times 45$ за міцністю підходить для розглянутого з'єднання.

4.9 Розрахунок клинопасової передачі

Метою розрахунку є: знаходження основних конструктивних розмірів шківів.

Розрахункова схема поверхні ведучого шківа зображена на рисунку 4.13.

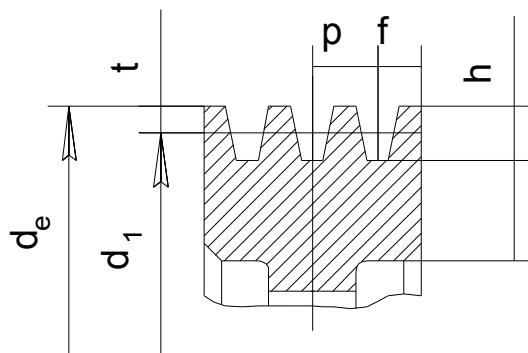


Рисунок 4.13 – Розрахункова схема поверхні ведучого шківа

Вхідні дані:

- потужність двигуна N , кВт 75;
- частота обертання n , об/хв 2000.

Скористаймось методикою запропонованою [26].

В залежності від розрахункової потужності $P_{\text{дв. р.}} = 75$ кВт і частоти обертання ведучого шківa $n_{\text{дв}} = 2000$ об/хв, вибираємо ремінь нормального перерізу Б.

Діаметр d_1 ведучого шківa слід користуватися рекомендацією $d_1 > d_{\text{min}}$, з метою підвищення строку служби паса. Де d_{min} – мінімальне значення діаметрів шківів для передбачення найбільшого моменту, $d_{\text{min}} = 90$ мм, тоді приймаю $d_1 = 125$ мм. [26]

Визначаємо колову швидкість, м/с і порівнюємо її з допустимою для цього паса:

$$v = \pi d_1 n_1 / 60 \cdot 1000 = 3,14 \cdot 125 \cdot 2000 / 60000 = 13,083 \text{ м/с}$$

Розраховуємо діаметр веденого шківa, мм:

$$d_2 = U d_1 (1 - \xi) = 1,04 \cdot 125 \cdot (1 - 0,015) = 128,05 \text{ мм}$$

де: U – передаточне число пасової передачі;

ξ – коефіцієнт потужного ковзання паса $\varepsilon = 0,015$

По [26] округляємо до найближчого значення і приймаємо $d_2 = 140$ мм.

Уточнюємо передаточне число:

$$U' = d_2 / d_1 (1 - \xi) = 140 / 125 \cdot (1 - 0,015) = 1,1032$$

Визначаємо відносну похибку передаточного числа за формулою:

$$\Delta = \left| \frac{u' - u}{u'} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{1,1032 - 1,04}{1,1032} \right| \cdot 100\% = 4,729\%$$

Знаходимо фактичну частоту обертання веденого шківa:

$$n_2 = \frac{n_1}{u} = \frac{2000}{1,04} = 1923 \text{ хв}^{-1}$$

Визначаємо орієнтовно міжосьову відстань, мм:

$$a' = k d_2 = 1,5 \cdot 140 = 210 \text{ мм}$$

де: приймаємо $k = 1,5$.

При цьому має виконуватися умова:

$$2 \cdot (d_1 + d_2) \geq a' \geq 0,55 \cdot (d_1 + d_2) + h$$

де: a – міжосьова відстань;

h – висота перерізу паса (табл. 3.9 [1]) $h = 10,5$ мм

$$2 \cdot (125+140) \geq 210 \geq 0,55 \cdot (125+140)+10,5$$

$$530 > 210 > 156,25$$

Умова виконується.

Визначаємо розрахункову довжину паса, мм:

$$\begin{aligned} L &= 2 \cdot a + \frac{\pi \cdot (d_1 + d_2)}{2} + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4 \cdot a} = \\ &= 2 \cdot 210 + \frac{3,14 \cdot (125 + 140)}{2} + \frac{(140 - 125)^2}{4 \cdot 210} = 836 \end{aligned}$$

Приймаємо стандартне значення $L = 800$ мм

Визначаємо число пробігів паса:

$$U = v / l \leq [v]$$

де: $[v]$ – допустиме число оборотів паса, 15 с^{-1}

$$U = 13,083/800 = 0,016 \leq [v] = 15 \text{ с}^{-1}$$

Уточнюємо міжосьову відстань:

$$a = [2L - \pi(d_1 + d_2) + ((2L - \pi(d_1 + d_2))^2 - 8(d_2 - d_1)^2)^{1/2}] / 8 = 270 \text{ мм}$$

Визначаємо потрібну кількість пасів:

$$z' = P_1/P_0/C_p/C_\alpha/C_L/C_z = 75/6,44/4,09/0,92/0,86/0,9 = 4,05$$

де: P_1 – потужність, кВт.

P_0 – допустима номінальна потужність (кВт) для одного клинового паса залежно від перерізу, діаметра ведучого шківа d_1 та його швидкості V ,
 $P_0 = 6,44$.

C_α - коефіцієнт кута обхвату, $C_\alpha = 0,92$;

C_1 - коефіцієнт, що враховує вплив на довговічність довжини паса залежно від відношення розрахункової довжини паса L_0 ; $C_1 = 0,86$;

C_p - коефіцієнт динамічності та режиму роботи передачі, $C_p = 0,92$;

C_z - коефіцієнт, що враховує кількість пасів у комплекті клинопасової передачі, $C_z = 0,9$.

Висновок: Кількість пасів дорівнює 4 шт., довжиною 800 мм.

4.10 Розрахунок фланцевого з'єднання

Мета: розрахувати діаметр болтів, їх кількість і розміри елементів фланця.

Розрахункову схему фланцевого з'єднання зображено на рисунку 4.11.

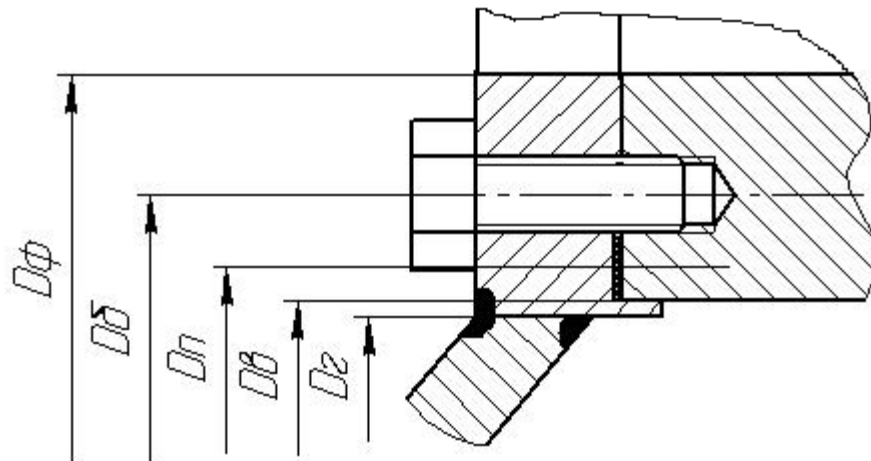


Рисунок 4.14 - Розрахункова схема фланцевого з'єднання

Вихідні дані :

робочий тиск p , МПа	15;
внутрішній діаметр фланця $D_в$, м	0,32;
середній діаметр ущільнення (прокладки) $D_п$, м	0,34;
зовнішній діаметр зварного шва на фланці $D_г$, м	0,31.

Скористаємось методикою запропонованою авторами [25].

Основною вихідною величиною при розрахунку болтів є розрахункове розтягуюче зусилля. При робочих умовах розрахункове розтягуюче зусилля в болтах визначається по формулі [25]:

$$p_6 = \frac{\pi D_{\Pi}^2}{4} p + p_{\Pi} = \frac{3,14 \cdot 0,35^2}{4} \cdot 15 + 0,132 = 1,57 \text{ МПа.}$$

де: p_{Π} – розрахункова сила осевого стискання ущільнюючих поверхонь в робочих умовах, необхідна для забезпечення герметичності, МН.

Розрахункову силу стискання прокладки прямокутного перерізу обчислюється по формулі:

$$p_{\Pi} = \pi D_{\Pi} b k p = 3,14 \cdot 0,35 \cdot 0,012 \cdot 1 \cdot 15 = 0,198 \text{ МН.}$$

де: $b = 0,012$ – ширина прокладки, м.

$k = 1$ – коефіцієнт, що залежить від матеріалу та конструкції матеріалу прокладки.

Діаметр болтового кола приблизно обчислюється за формулою:

$$D_6 = (1,0 - 1,2) D_B^{0,933} = 1,0 \cdot 0,33^{0,933} = 0,355 \text{ м.}$$

Розрахунковий діаметр болтів:

$$d_6 = \frac{D_6 - D_r}{2} - 0,006 = \frac{0,355 - 0,31}{2} - 0,006 = 0,016 \text{ м.}$$

і округлюємо в меншу сторону до ближнього стандартного розміру. Приймаємо $d_6 = 0,014$ м.

Число болтів обчислюють за формулою:

$$z = \frac{P_6}{\sigma_d F_6} = \frac{1,57}{125 \cdot 0,000673} = 19$$

де: $F_6 = \pi R^2$ – площа поперечного перерізу вибраного болта по внутрішньому діаметру різьби, м².

$\sigma_d = 125 \text{ МН/м}^2$ – допустиме напруження на розтягування в болтах.

Розрахункове число округляємо до ближнього числа, кратному чотирьом. Приймаємо $z_6 = 18$.

Зовнішній діаметр фланця:

$$D_{\phi} = D_{\phi} + (1,8 \div 2,5)d_{\phi} = 0,355 + 1,8 \cdot 0,014 = 0,380 \text{ м.}$$

Приймаємо $D_{\phi} = 0,400 \text{ м.}$

Для розрахунку висоти плоского фланця попередньо обчислюють наступні величини:

Приведене навантаження на фланець при робочих умовах:

$$p = \frac{D_{\phi}}{D_{\phi} - D_{\text{в}}} \left[p_{\phi} \frac{D_{\text{в}}}{D_{\phi}} \left(\frac{D_{\phi}}{D_{\text{п}}} - 1 \right) + \frac{\pi D_{\text{п}}^2}{4} p \left(1 - \frac{D_{\text{в}}}{D_{\text{п}}} \right) \right]$$

$$p = \frac{0,4}{0,4 - 0,32} \left[1,57 \cdot \frac{0,32}{0,36} \left(\frac{0,36}{0,34} - 1 \right) + \frac{3,14 \cdot 0,34^2}{4} \cdot 15 \cdot \left(1 - \frac{0,32}{0,34} \right) \right] = 0,81 \text{ МН}$$

Допоміжну величину Φ при робочих умовах:

$$\Phi = \frac{p}{\sigma_{\text{т}}} \psi_1 = \frac{0,81}{240} \cdot 1,1 = 0,00371 \text{ м}^2.$$

Допоміжна величина A :

$$A = 2 \cdot \psi_2 \delta^2 = 2 \cdot 5 \cdot 0,04^2 = 0,016 \text{ м}^2.$$

де: $\sigma_{\text{т}} = 240 \text{ МН/м}^2$ – границя текучості матеріалу фланців при робочій температурі.

$\delta = 0,04 \text{ м}$ – товщина обичайки, що з'єднує фланець.

Коефіцієнти ψ_1 та ψ_2 обчислюються із графіка [19].

Висоту фланця h обчислюють по формулам:

$$h = 0,5 \sqrt{\Phi} = 0,5 \cdot \sqrt{0,00371} = 0,0305 \text{ м.}$$

$$h = 0,27 \sqrt[3]{D_{\text{в}} \Phi} = 0,27 \cdot \sqrt[3]{0,32 \cdot 0,00371} = 0,0286 \text{ м.}$$

Приймаємо із двох випадків більше значення, $h = 0,0305 \text{ м.}$

Висновок: в результаті розрахунку видно, що для з'єднання нам потрібно 18 болтів М16 діаметром $d_{\phi} = 0,014 \text{ м.}$

5. Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях

Темою магістерської дисертації є «Модернізація лінії каскадної екструзії з розробкою шестереного насоса». Організація безпечних умов праці на виробництві рукавної плівки є одним з ключових елементів ефективної та безперебійної роботи технологічної лінії [29]. Процес екструзії, пов'язаний з високими температурами, тиском, обертальними вузлами, електрообладнанням та можливим виділенням продуктів термічного розкладу полімерів, вимагає впровадження комплексу технічних, організаційних та санітарно-гігієнічних заходів. Контроль параметрів технологічного процесу здійснює оператор лінії, пульт якого знаходиться в виробничому приміщенні, площею 200 м² і об'ємом 1200 м³.

У приміщенні, де розміщена лінія екструзії, діють потенційно небезпечні фактори: високотемпературні зони, рухомі частини обладнання, підвищений рівень шуму, нагріті поверхні, можливість утворення летких продуктів розкладу полімеру, а також ризики електротравматизму [30]. Тому виробниче середовище повинно бути організовано таким чином, щоб мінімізувати вплив цих факторів на працівників шляхом застосування систем вентиляції, протипожежного захисту, теплоізоляції, освітлення, засобів захисту та автоматизованих блокувань[30].

Діяльність персоналу повинна відповідати вимогам Закону України «Про охорону праці» від 14. 10 1992 р., Правил пожежної безпеки в Україні, НПАОП, державних санітарних норм мікроклімату, норм освітлення, вимог електробезпеки, а також стандартів, що регулюють експлуатацію технологічного обладнання. Основною метою системи охорони праці є запобігання виробничому травматизму, професійним захворюванням та забезпечення стабільної роботи технологічних процесів шляхом створення безпечного виробничого середовища.

5.1 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.1.1 Мікроклімат, склад повітря робочої зони та промислова вентиляція

Виходячи з прийнятої технологічної схеми маємо приміщення без надлишкового тепловиділення, тобто $Q < 20$ ккал/год м³. Категорія робіт оператора легка, так як показник енерговитрати складає до 273 Дж/с. Мікроклімат виробничої зони визначається температурою повітря, відносною вологістю, швидкістю руху повітря, температурою навколишніх поверхонь та інтенсивністю теплового випромінювання. Оскільки обладнання для екструзії працює з підвищеними температурами, важливо забезпечити належний контроль параметрів мікроклімату [31].

Параметри повітря робочої зони відповідають ДСН 3.3.6.042-99 та наказу МОЗ № 1596 від 14.07.2020: допустима температура 21–25⁰С (293 – 298 К), фактична вологість 40–60%, фактична швидкість руху повітря 0,2 м/с. Температура навколишніх поверхонь не вище ніж на 2 °С від оптимальної температури повітря. Забезпечення параметрів здійснюються в зимовий час за допомогою водяного опалення з температурою теплоносія 70 – 90 °С (343 – 363 К), а в теплий час року – вентиляцією.

Виділення продуктів випару трансформаторної оливи і солей з установки неможливо через те, що пильник герметичний.

В процесі виробництва рукавної плівки з біополімера марки LPA Ingeo 2003D виділяються шкідливі речовини такі як: лактид, ацетальдегід та вуглекислий газ.

Для відводу цих речовин в конструкції лінії передбачена місцева вентиляція, відкритого типу. До місцевих відсмоктувачів відкритого типу належать витяжні зонти, всмоктувальні панелі, бортові відсмоктувачі. Витяжні зонти передбачені для вловлювання потоків шкідливих речовин, які направлені вгору. Їх доцільно використовувати у випадку, коли джерело утворення

пилу, парів та газів переміщується по площині робочого місця, як в горизонтальній, так і у вертикальній площинах.

При проектуванні штучної (механічної) загально-обмінної вентиляції, яка призначена для вилучення з приміщення надлишків тепла, вологи та інших шкідливих виділень необхідно приймати розрахункові параметри згідно з ДБН В.2.5-67:2013.

Розрахунок механічної вентиляції повинен включати визначення найбільш раціонального способу вилучення або попередження утворення токсичних, пожежо - чи вибухонебезпечних концентрацій пароповітряних сумішей (загально обмінні або місцеві вентиляційні установки і системи); визначення необхідної кількості повітря для обмінної вентиляції, виходячи із відомої кратності повітрообміну в приміщенні, кількості шкідливих речовин, які вилучаються з приміщення, або надлишкового тепла, яке необхідно асимілювати до санітарно допустимих норм відповідно ДСН 3.3.6.042-99 та наказу МОЗ № 1192 від 09.07.2024.

5.1.2 Виробниче освітлення

Освітлення виробничого приміщення, де експлуатується лінія екструзії рукавної плівки, повинно відповідати вимогам чинних нормативів України, зокрема ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення», а також ДСТУ EN 12464-1:2016 «Освітлення робочих місць у приміщеннях». Правильна організація освітлення підвищує безпеку праці, зменшує втому операторів та забезпечує якісне візуальне спостереження за процесом екструзії, нормативні рівні освітленості наведені в таблиці 5.1

Таблиця 5.1 Нормативні рівні освітленості

Зона / вид робіт	Нормована освітленість, лк
Основне виробниче приміщення (робоча зона)	300–500 лк
Зона обслуговування екструдера	300–500 лк
Зона контролю якості (огляд плівки)	500–750 лк
Прохідні та допоміжні зони	100–200 лк

Рекомендації щодо організації освітлення:

- Використовувати комбіноване освітлення: загальне + місцеве.
- Для робочої зони екструдера передбачити антивідблискові світильники з непрямым або розсіяним світлом.
- Забезпечити рівномірний розподіл освітленості без різких перепадів яскравості.
- Використовувати світлодіодні світильники зі світловою температурою 4000–5000 К (нейтральне біле світло).
- Коефіцієнт пульсації світла не повинен перевищувати 5%.
- Передбачити аварійне освітлення відповідно до ДБН, особливо в зонах керування екструдером.
- Проводити регулярне чищення світильників та контроль світлового потоку не рідше одного разу на рік.
- Розташовувати світильники так, щоб виключити появу тіней на робочих поверхнях.

Додаткові заходи:

- Забезпечити достатнє освітлення для читання приладів, індикаторів та маркування на обладнанні.
- Встановити локальні джерела світла у місцях, де проводиться наладка та контроль плівки.
- За необхідності застосовувати захисні кожухи для світильників для захисту від пилу та температури.

5.1.3 Виробничий шум та віброзахист

В наш час експлуатація переважної більшості технологічного обладнання, енергетичних установок, машин та механізмів, пов'язана з виникненням шумів та вібрації різної частоти та інтенсивності, котрі спричиняють несприятливий вплив на організм людини.

Шум може тимчасово активізувати або постійно пригнічувати психічні процеси організму людини. Фізіологічні та біологічні наслідки можуть з'являтися у формі порушення функцій слуху та інших аналізаторів, зокрема вестибулярного апарату, координуючої функції кори головного мозку, нервової системи, систем травлення і кровообігу.

Встановлено, що втрата слуху настає при впливі шуму в діапазоні частот 3000 - 6000Гц, а порушення розбірливості мови - при частотах 1000 - 2000Гц. Найбільша втрата слуху має місце протягом перших десяти років роботи і з плином часу ця небезпека зростає.

Несподівані та імпульсні шуми можуть викликати переляк та неадекватну поведінку. Постійний шум може справляти певну дію на сенсорні функції знижуючи, наприклад, швидкість руху очей, звуження поля зору, викликаючи зміну кольорового сприйняття, порушення рівноваги, втрату больової чутливості.

Індивідуальні особливості людини, пов'язані з різними психологічними реакціями на вплив шуму, суттєво впливають на його сприйняття. Шум не лише погіршує самопочуття людини і знижує продуктивність праці на 10-15%, але нерідко призводить до професійних захворювань. Матеріальні збитки від цих захворювань значно більші, ніж від інших професійних захворювань. У зв'язку з цим боротьба з шумом має не лише санітарно - гігієнічне, але й велике техніко-економічне значення. Все це переконує в необхідності розробки комплексу інженерно - технічних та організаційних заходів щодо зниження шуму до нормативних значень.

Рівень звукового тиску (дБ) в октавних смугах частот, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку (дБ) для постійних робочих місць при працюючій установці, встановлені за ДСН № 3.3.6.037-99. Так як шумові характеристики електродвигунів згідно ДСН 3.3.6.037-99 перевищують передбачені норми допустимих рівнів звукового тиску рівня звуку і еквівалентних рівнів звуку на робочих місцях, то в цьому випадку споживач повинен прийняти міри, щодо зниження шуму до нормативних значень.

Причиною появи вібрації є встановлений черв'ячний дозатор та дисковий екструдер, що обертаються, вентилятор. Величина загальної технологічної вібрації на постійних робочих місцях при працюючій установці у виробничих приміщеннях не перевищує норм, встановлених за ДСН 3.3.6.039-99. Для зменшення вібрації черв'ячний дозатор, дисковий екструдер і вентилятор були поставлені на гумову підстилку товщиною 10 мм.

Основними організаційно-технічними, санітарно-гігієнічними, лікувально-профілактичними та загальнооздоровчими заходами, що зменшують несприятливий вплив вібрації на працюючих, повинні бути:

- застосування заходів по заміні парку вібронебезпечних машин і обладнання, що експлуатуються, та вдосконалення існуючих технологічних процесів і організації їх таким чином, щоб вібрації на робочих місцях, на робочих площадках, на підлозі робочого приміщення були вилучені або знижені до граничне допустимих величин;
- під час організації технологічних процесів слід передбачати заміну операцій, які виконуються вібруючим обладнанням, на процеси, вільні від вібрацій, що передаються через руки на організм працюючих;
- при неможливості повністю вилучити застосування вібруючих ручних інструментів і механізмів слід трудові операції, що супроводжуються контактом рук працюючих з вібруючими поверхнями, чергувати з роботами, вільними від вібрації, або з регламентованими перервами та активним відпочинком;

- робота з вібруючим обладнанням повинна проводитись в опалювальних приміщеннях з температурою повітря не менше ніж 18 °С при відносній вологості його від 40 до 60% та швидкості руху не більше ніж 0,2 м/с;
- під час роботи в холодний період року в неопалюваних приміщеннях або на відкритому повітрі, для періодичного обігрівання працюючих, повинні передбачатися опалювані приміщення з температурою повітря від 22 до 24 °С при швидкості його руху не більше ніж 0,2 м/с і відносній вологості від 40 до 60%, а на робочих місцях рекомендується передбачати місцеве обігрівання працюючих;
- проведення будь-яких робіт, які супроводжуються шумом, під час обідньої перерви в цехах, де застосовується віброінструмент, не дозволяється;
- всі працюючі з машинами, що генерують вібрацію, повинні проходити періодичний медичний огляд відповідно до наказу МОЗ України від 08.09.2025 № 1393;
- працюючі повинні бути забезпечені антивібраційними рукавицями відповідно до наказу Мінсоцполітики України № 180 від 29.03.2018;
- зменшення вібрацій, що передаються на руки працюючих, слід забезпечувати по шляху їх розповсюдження засобами віброізоляції та вібропоглинання, зокрема застосуванням пружинних і гумових амортизаторів, прокладок, облицювання рукояток вібропоглинальними матеріалами, застосуванням динамічних віброгасників, демпфуючих затискачів і т.інш.;
- перевірка наявності вібраційних характеристик (далі - ВХ) в паспортах на новопридбані машини (в технічному паспорті машини повинні бути приведені ВХ і методи їх контролю відповідно до вимог ДСН 3.3.6.037-99), а під час їх відсутності, а також за необхідністю, повинен проводитись вхідний контроль;
- вироби, що обробляються ручними інструментами, слід укладати або закріплювати пристроями так, щоб усунути виникнення додаткових вібрацій виробу;

– виключення контакту працюючого з вібруючими поверхнями за межами робочого місця або робочої зони (установлення огорожень, сигналізації, блокування, попереджувальних написів і т. інш.).

5.1.4 Небезпека враження електричним струмом

Згідно ПУЕ у відповідності до ступеня ураження людини електричним струмом приміщення в якому експлуатуються лінія належить до приміщень 3 категорії: приміщення з підвищеною небезпекою. Для живлення елементів установки використовується трифазна напруга 220/380 В з частотою 50 Гц, яка є дуже небезпечною для здоров'я і життя людини.

Основними причинами поразки електричним струмом є: дотик до відкритих струмопровідних елементів устаткування, що виявилось під напругою внаслідок порушення ізоляції, а також поразка кроковою напругою і через електричну дугу.

Для забезпечення електробезпеки передбачені організаційні і технічні заходи:

- інструктаж і навчання безпечним методам праці;
- установлення плакатів і знаків безпеки.(на небезпечних місцях - джерелах живлення, на регуляторах, і т. ін.)
- захисне відключення;
- вирівнювання потенціалу;
- застосування малих напруг 12 В для живлення переносних світильників і ручного електроінструмента;
- установлення попереджувальної сигналізації, блокувань;
- використання електрозахистних засобів, у т.ч. діелектричних рукавичок, інструментів з ізолюючими ручками, показчиків напруги.

5.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

5.2.1 Технічні та організаційні заходи щодо ліквідації й локалізації аварійних ситуацій

У виробничому приміщенні, де встановлена лінія екструзії рукавної плівки, передбачаються технічні та організаційні заходи, спрямовані на запобігання, локалізацію та ліквідацію можливих аварійних ситуацій. Дані заходи відповідають чинним нормам охорони праці України, зокрема Закону України «Про охорону праці», ДСН, ДБН, НПАОП та стандартам щодо експлуатації технологічного обладнання.

I. Технічні заходи

- Обладнання екструзійної лінії аварійними вимикачами (кнопками STOP) на доступних ділянках.
- Оснащення лінії та приміщення автоматичною системою аварійного відключення електроживлення.
- Встановлення датчиків температури, тиску та струму з автоматичним блокуванням при перевищенні допустимих значень.
- Наявність системи локальної вентиляції для відведення диму, пари та продуктів розкладу полімерів.
- Застосування теплоізоляційних кожухів на нагрітих частинах екструдера.
- Наявність первинних засобів пожежогасіння: вогнегасники (порошкові та CO₂), пожежні щити.
- Технічне обмеження доступу до обертових та гарячих частин обладнання (захисні кожухи, бар'єри).
- Періодичне технічне обслуговування екструдера, включаючи перевірку шнекової зони, електроприводів, датчиків та контролерів.
- Контроль справності електропроводки, кабелів, заземлення та захисного відключення (УЗО).

- Система аварійного освітлення на випадок знеструмлення.

II. Організаційні заходи

- Розробка та затвердження Плану локалізації та ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС).
- Проведення регулярних інструктажів з охорони праці та пожежної безпеки.
- Навчання персоналу діям у разі аварії: зупинка обладнання, евакуація, виклик спеціальних служб.
- Призначення відповідальних осіб за технічний стан обладнання та пожежну безпеку.
- Проведення щорічних тренувань з евакуації та ліквідації умовної аварії.
- Організація доступних шляхів евакуації, їх позначення та вільний доступ.
- Забезпечення працівників засобами індивідуального захисту (ЗІЗ): рукавиці, окуляри, спецодяг, респіратори.
- Ведення журналів технічного обслуговування, перевірки вогнегасників, інструктажів.
- Обмеження доступу сторонніх осіб до зони роботи екструдера.
- Встановлення чітких правил поведінки при аварійних сигналах та інструкцій у доступних місцях.

III. Дії персоналу у разі аварійної ситуації

- негайно зупинити екструдер за допомогою аварійної кнопки.
- Повідомити керівника зміни або відповідальну особу.
- У разі задимлення — увімкнути аварійну вентиляцію або відкрити технологічні отвори для провітрювання.
- При пожежі — застосувати наявні засоби пожежогасіння або викликати ДСНС.
- У разі витоку розплаву — відгородити небезпечну зону, не торкатися розплавленого полімеру.

- При нещасному випадку — надати першу допомогу згідно з інструкцією.
- У разі загрози — організувати евакуацію персоналу.

5.2.2 Технічні рішення систем запобігання пожеж та вибухів

Перероблюваний матеріал біополімер марки LPA Ingeo 2003D. Технологічний процес виробництва біодиструктивної рукавної плівки відноситься до категорії В.

Серед причин, що можуть викликати загорання, найбільш імовірними є такі:

- несправність електроустаткування;
- струми короткого замикання і навантаження кабелів живлення;
- загорання ізоляції електропроводки;
- використання вогню в неналежному місці.
- запобігання заpalення забезпечується такими мірами:
- дотриманням технологічних норм і правил експлуатації;
- обмеження в застосуванні відкритого вогню;
- палінням тільки у відведених для цього місцях;
- своєчасним проведенням інструктажу з техніки безпеки серед обслуговуючого персоналу;
- організацією агітації по протипожежній безпеці;
- наявністю засобів сигналізації, зокрема, системи електричної пожежної сигналізації (ЕПС) і засобів оперативного зв'язку з пожежною частиною;
- наявністю засобів пожежегасіння в безпосередній близькості від установки (пісок, ковдри, вогнегасники).

Стійкість споруди за ДБН В.1.1-7:2016 відповідає ступеню вогнестійкості II. Згідно ПУЕ клас зони установки II-IIa.

Для гасіння невеликих ділянок загорання при виключеному та включеному (до 1000В.) електроустаткуванні застосовують вуглекислотні вогнегасники ОУ-5 (6 шт.) та порошкові ОП-10 (3 шт.).

Відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 число евакуаційних виходів з будівель не менш за 2. Евакуаційні виходи розташовані розсосереджено. Ширина ділянок шляхів евакуації не менша 1 м, а дверей на шляху евакуації – не менше 0,8 м. Відстань до пожежного виходу повинна бути не більше 40 метрів. Кількість виходів - не менше двох. Ширина дверей евако-виходу – 2 метри. Двері еваковиходу повинні відкриватись назовні (рисунок 5.1).

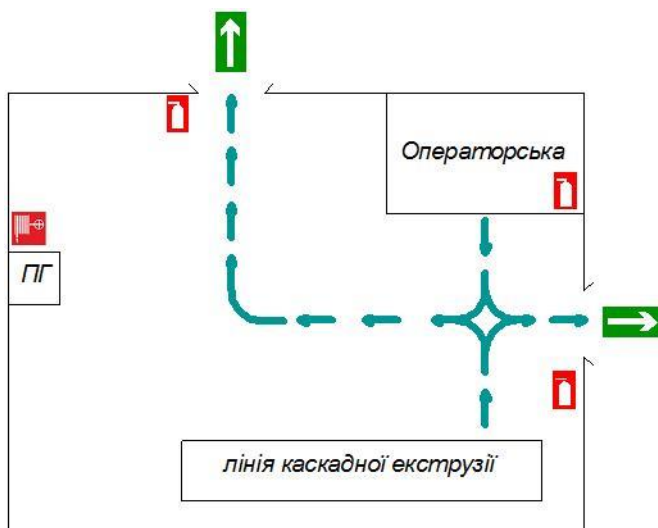


Рисунок 5.1 – План евакуації виробничого приміщення

Тип первинних засобів пожежогасіння - ручні вогнегасники порошкові, якими можна гасити різні матеріали, в тому числі негасимими іншими засобами. Порошкові суміші швидко ліквідують горіння при відносно малих витратах, не замерзають, не викликають корозії металів, в зоні горіння неелектропровідні, не псують речовини і матеріали.

Згідно ПУЕ для умови безпечного застосування електрообладнання все воно розподіляється на типи: вибухозахищене, для пожежних установок та нормального виконання. Електрообладнання, що використовується в цеху - нормального виконання.

5.2.3 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Система протипожежного захисту виробничого приміщення, де експлуатується лінія екструзії рукавної плівки, повинна відповідати вимогам чинних нормативних актів України: ДБН В.1.1-7:2016, ДБН В.2.5-56:2014, ДСТУ EN 13501, НПАОП 0.00-1.80-18, Правила пожежної безпеки в Україні (наказ МВС № 1417 від 30.12.2014).

I. Автоматичні системи виявлення та оповіщення:

- Установка автоматичної пожежної сигналізації на основі теплових та димових сповіщувачів.
- Система оповіщення персоналу згідно з ДБН В.1.1-7:2016.
- Виведення сигналів на центральний пункт пожежного спостереження.

II. Системи автоматичного пожежогасіння:

- Встановлення модульної установки порошкового або газового пожежогасіння відповідно до ДБН В.2.5-56:2014.
- Використання вуглекислотних модулів у зоні електрообладнання.
- Система локального гасіння в районі екструдера та електрошкафів.

III. Первинні засоби пожежогасіння:

- Порошкові вогнегасники з маркуванням ВП-6, ВП-9.
- Вуглекислотні вогнегасники ВВК-3, ВВК-5 для електрообладнання.
- Пожежний щит з інвентарем відповідно до Правил пожежної безпеки.

IV. Інженерно-технічні рішення:

- Протипожежні двері типу EI-30 згідно з ДСТУ EN 13501-2.
- Облаштування шляхів евакуації у відповідності до ДБН В.1.1-7:2016.
- Система димовидалення у зоні технологічного обладнання.
- Протипожежні розриви між обладнанням.

6. Рекомендації по монтажу та експлуатації

6.1 Підготовка до монтажу

Перед початком монтажних робіт необхідно організувати приймальну комісію, до складу якої входять представники замовника, розробника проектної документації, заводу-виробника обладнання та монтажною організації. Комісія здійснює комплексну перевірку готовності об'єкта до монтажу технологічної лінії, зокрема:

- оцінює якість та відповідність фундаментів проектній документації;
- перевіряє наявність актів на приховані роботи та іншої супровідної документації;
- контролює дотримання правил зберігання обладнання до моменту монтажу;
- перевіряє цілісність заводської упаковки і можливі пошкодження тари;
- визначає готовність приміщення до монтажу (температура, освітлення, вентиляція, доступність електроживлення тощо);
- контролює наявність та працездатність підйомно-транспортного обладнання з вантажопідйомністю не менше 2 тонн.

За результатами огляду складається акт обстеження об'єкта з висновком про можливість початку монтажних робіт.

Доставка технологічної лінії здійснюється в заводській упаковці, відповідно до маркування та рекомендацій заводу-виробника. Розпакування обладнання виконується у присутності уповноваженого представника виробника, оскільки будь-які порушення упаковки знімають із заводу-постачальника відповідальність за комплектність та справність вузлів, які перебували у пошкодженій тарі.

Після розпакування необхідно:

- провести перевірку комплектності згідно з упаковочним листом;

- оформити двосторонній акт приймання, у якому підтверджується стан обладнання та його комплектність;
- здійснити розконсервацію всіх елементів лінії відповідно до інструкції.

До початку монтажу весь обслуговуючий персонал повинен бути ознайомлений із конструкцією лінії, її технічними вузлами, електричними схемами, документацією зі стропування та вимогами чинного паспорта обладнання.

6.2 Монтаж

Монтаж технологічної лінії слід виконувати на першому поверсі або на міжповерховому перекритті, яке має достатню несучу здатність для сприйняття маси обладнання. Перед монтажем необхідно переконатися, що приміщення відповідає вимогам проекту та має підготовлені фундаментні основи для кожної машинної одиниці.

Піднімання та переміщення обладнання здійснюється відповідно до схем стропування, зазначених у конструкторській документації. Стропування повинно виконуватися тільки справними сертифікованими вантажопідіймальними засобами.

Дисковий екструдер, шестеренний насос, формувальна головка, а також інші машини лінії встановлюються на свої фундаменти згідно зі складальним кресленням. Після монтажу кожної одиниці обладнання необхідно перевірити горизонтальність установки за допомогою високоточних рівнів у місцях, передбачених кресленнями.

Монтаж електрообладнання виконується згідно з електричною принциповою схемою, проектом підключення та вимогами правил технічної експлуатації електроустановок. Для прокладання кабельних ліній до:

- шафи управління,
- пульта керування,

- систем вимірювання та регулювання температури,
- дискового екструдера,
- шестеренного насоса,
- охолоджувальної ванни та допоміжних механізмів,
- повинні бути передбачені траншеї, лотки або кабельні канали, виконані відповідно до вимог безпеки та пожежної безпеки.

Система охолодження під'єднується відповідно до складальних креслень. Необхідно забезпечити:

- стабільну подачу охолоджувальної води;
- відведення нагрітої води в окрему лінію;
- наявність контрольних кранів, фільтрів та запірної арматури.

Для забезпечення безпечних умов праці в зоні виділення летких речовин (над стренговою головкою чи формувальною головкою) на висоті 200–300 мм встановлюється витяжний зонт, підключений до вентиляційної системи із достатньою продуктивністю.

Після завершення монтажних робіт проводиться комплексна перевірка відповідності виконаних операцій технічній документації. Результати оформлюються актом готовності лінії до пуско-налагодочних робіт.

6.3 Запуск в експлуатацію

Перед введенням технологічної лінії в експлуатацію необхідно виконати комплекс перевірок механічної, електричної та технологічної частин обладнання. Пуско-налагоджувальні роботи проводяться у присутності представників заводу-виробника та відповідальних осіб замовника.

1. Механічна підготовка перед запуском.

Перевірити надійність кріплення всіх машин і вузлів лінії.

Перевірити правильність натягу клинових ременів дискового екструдера та гранулятора.

Переконатися у встановленні та фіксації всіх захисних кожухів, щитків та огорожень.

Встановити по шкалі регулювання робочий зазор дискового екструдера 0,3 мм і зафіксувати його обмежувальною гайкою механізму регулювання.

Перевірити наявність мастила в редукторах, варіаторах та інших вузлах, що вимагають змащування.

Заповнити охолоджувальну ванну водою.

Переконатися у наявності води в магістралях системи охолодження та справності запірної арматури.

Перевірити відсутність сторонніх предметів у завантажувальному бункері дискового екструдера.

Перевірити якість встановлення термопар і перетворювачів температури відповідно до інструкцій заводу-виробника.

Встановити на регуляторах температур потрібні уставки згідно з технологічним регламентом.

Завантажити живильник гранулами матеріалу для підготовки до пробного пуску.

2. Електричні перевірки перед подачею напруги.

Провести візуальний огляд монтажу шаф управління, пульта керування, зовнішніх з'єднань і датчикових ліній.

Перевірити правильність електричного монтажу шляхом прозвонки силових і сигнальних кіл.

Виміряти опір ізоляції проводів мегомметром на 1000 В відповідно до вимог ПТЕ.

Перевірити правильність установлених уставок теплових реле та автоматичних вимикачів.

Звірити розрахункові уставки опорів згідно з електричними схемами.

Переконатися в наявності напруги на джерелах живлення і правильності їх підключення.

Перевірити якість кріплення проводів під гвинтовими з'єднаннями та пайкою.

Перевірити відповідність маркування проводів і апаратури схематичній документації.

Переконатися, що встановлена апаратура відповідає специфікаціям електричної схеми.

Перевірити регулюючі та вимірювальні прилади згідно з інструкціями заводу-виробника.

3. Подання напруги та первинний запуск.

Увімкнути живлення схеми керування.

Перевірити роботу всіх індикаторів, датчиків і сигналізацій при подачі напруги.

Переконалися у коректному спрацьовуванні апаратів захисту та керування.

У ручному режимі перевірити роботу виконавчих механізмів, приводів та нагрівальних елементів.

Після підтвердження правильності роботи всіх систем допускається проведення пробного запуску під навантаженням із поступовим виходом на номінальні технологічні параметри.

7. Рівень стандартизації та уніфікації

При проектуванні машин та апаратів для полімерної та хімічної промисловості важливо максимально застосовувати стандартні, нормалізовані та уніфіковані конструктивні елементи, що забезпечує високу технологічність виготовлення та зменшує вартість експлуатації обладнання. Використання типових вузлів і деталей суттєво спрощує процес виробництва, ремонт, обслуговування та модернізації обладнання, а також підвищує його надійність.

Уніфікація полягає у раціональному скороченні кількості типорозмірів деталей, вузлів і елементів апарата. Завдяки цьому значна частина машин і агрегатів може використовуватися в різних виробничих процесах за умови дотримання певного діапазону технологічних параметрів. Уніфіковані конструкції дозволяють проводити заміну агрегатів, адаптувати обладнання до нових видів полімерів або умов роботи без суттєвих конструктивних змін.

Стандартизація передбачає зведення широкого набору виробів однотипного функціонального призначення до обмеженої кількості стандартних рішень, які відповідають вимогам національних та міжнародних норм (ДСТУ, ISO, EN тощо). Для сучасного екструзійного обладнання розроблені стандартизовані вимоги до:

- геометричних параметрів вузлів;
- систем управління;
- електротехнічної частини;
- безпеки праці та експлуатації;
- матеріалів і способів обробки деталей;
- точності та якості виготовлення.

Наявність достатнього рівня стандартизації та уніфікації в конструкції апарата забезпечує:

- зменшення вартості виготовлення обладнання;
- спрощення технічного обслуговування та ремонту;
- скорочення термінів виготовлення та постачання запасних частин;

- можливість оперативної модернізації вузлів;
- підвищення загальної надійності та ремонтпридатності системи.

Конструкція модернізованої каскадної дисково-шестеренної екструзійної системи також передбачає значний рівень уніфікації: використовуються типові приводи, підшипникові вузли, стандартні електронагрівачі, редуктори, елементи системи охолодження та кріпильні елементи. Це дозволяє адаптувати лінію до переробки різних полімерів, таких як PLA, PE, PP та їх суміші, без істотних змін конструкції.

Рівень стандартизації обладнання є високим, оскільки більшість складальних одиниць і деталей виготовляються відповідно до діючих норм і стандартів. Такий підхід забезпечує надійність роботи технологічної лінії, стабільність основних параметрів та зменшення експлуатаційних витрат упродовж усього терміну служби обладнання.

Рівень стандартизації та уніфікації характеризується коефіцієнтом застосованості по деталям і він визначається згідно методичних вказівок РД-33-74, затверджених держстандартом України [34].

Коефіцієнт застосовності по деталям визначається за формулою:

$$K_{пп}^D = \frac{N - N_0}{N} 100\% = \frac{116 - 2}{116} \cdot 100\% = 77\%$$

де N – загальна кількість деталей, N_0 – кількість оригінальних деталей у вузлі.

8. Розроблення стартап - проекту каскадного дисково-шестеренного екструдера

8.1 Опис ідеї стартап-проєкту

В рамках магістерської роботи було розроблено стартап-проєкт PLAFlow Tech, спрямований на підвищення технологічної ефективності процесів екструзії біорозкладних полімерів та комерціалізацію модернізованого шестеренного насоса для роботи з матеріалами PLA/PBAT. В даному розділі проведено аналіз ідеї стартап-проєкту PLAFlow Tech, який спрямований на технологічну модернізацію екструзійних ліній для переробки біополімерів PLA/PBAT та створення високоточних надтонких плівок. Розділ містить опис ідеї, техніко-економічний аналіз конкурентних характеристик та аудит технологічної здійсненності проєкту [35]. Зміст ідеї, можливі напрями застосування та вигоди для користувача подані у вигляді таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 Опис ідеї стартап-проєкту PLAFlow Tech

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
1) Виробництво надтонких біорозкладних плівок (8–10 мкм) на основі PLA/PBAT за допомогою каскадної лінії з модернізованим шестеренним насосом	• Пакування харчових продуктів • Одноразові пакети • Плівки для рітейлу та e-commerce • Сегмент HoReCa	• Значне зменшення товщини та маси плівки (економія матеріалу 35–60%) • Висока рівномірність товщини завдяки стабілізованій подачі розплаву • Екологічність (біорозкладність, відповідність трендам ЄС) • Низькі залишкові напруження та краща прозорість

2) Комерціалізація модернізованого шестеренного насоса (ретрофіт-модуль)	• Модернізація існуючих екструзійних ліній виробників плівок • Оснащення нових ліній як преміум-модуль	• Зниження гідравлічних втрат (–20%) • Зменшення пульсацій тиску ($3 \pm 3-4\%$ до $\pm 1-1,5\%$) • Зменшення температурного градієнта по ширині шестерень ($3 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $3 \text{ } ^\circ\text{C}$) • Зниження енергоспоживання приводу (до –8%) • Рівномірне заповнення міжзубцевих порожнин навіть для високов'язких біополімерів
3. Створення R&D-центру з тестування біополімерних рецептур та режимів екструзії	• Дослідження PLA/РВАТ/РНА-композицій • Тестування режимів екструзії для малих та середніх підприємств • Технологічний консалтинг і пілотне виробництво	• Доступ до науково обґрунтованих режимів переробки біополімерів • Зменшення браку на промислових лініях • Можливість створення власних рецептур під вимоги конкретного виробництва

Після аналізу встановлено, що основними складовими ідеї є: виробництво надтонких біоплівки, модернізація обладнання (retrofit-модуль) та створення R&D-центру. Це формує комплексний інноваційний продукт, який має чіткі ринкові переваги. Логотип стартап проекту зображений на рисунку 8.1.



Рисунок 8.1. Стартап-проект PLAFlow Tech

Аналіз техніко-економічних переваг ідеї

Визначено перелік техніко-економічних характеристик проекту та виконано порівняння з трьома конкурентами [36]. Кожен показник оцінено як слабкий (W), нейтральний (N) або сильний (S), результати подані у вигляді таблиці 8.2.

Таблиця 8.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту PLAFlow Tech

№ п/п	Техніко- економічні характерис- тики ідеї	Мій проєкт	Конку- рент 1 (Futamura NatureFlex)	Конку- рент 2 (TIPA Corp)	Конку- рент 3 (Bioplastics International)	W (сла- бка)	N (ней- тра- льна)	S (си- ль- на)
1	Рівномір- ність товщи- ни плівки	±5%	±8%	±10 %	±7– 9%			S
2	Гідрравлічні втрати / ста- більність по- дачі	Пуль- сації ±1– 1,5%	Пуль- сації ±3– 4%	Пуль- сації ±4– 5%	Пуль- сації ±3%			S

3	Температурний градієнт по ширині шестерень	3 °C	6–8 °C	5–7 °C	4–6 °C			S
4	Енергоспоживання процесу	21000 кВт·год /міс	24000 кВт·год /міс	26000 кВт·год /міс	25000 кВт·год /міс			S
5	Мінімальна товщина плівки	8–10 мкм	20–25 мкм	25–30 мкм	18–22 мкм			S
6	Продуктивність лінії	До 120 кг/год	70–100 кг/год	80–120 кг/год	60–90 кг/год		N	
7	Собівартість вузла	4800\$	4200\$	4000\$	4600\$	W		
8	Додаткова сертифікація	Потребує	Не потребує	Не потребує	Не потребує	W		

За результатами порівняльного аналізу встановлено, що проект PLAFLOW Tech має такі сильні сторони: стабільність товщини, низькі пульсації подачі, мінімальний температурний градієнт, енергоефективність та можливість екструзії надтонких плівок. Водночас виявлено слабкі сторони: підвищена собівартість вузла, потреба в додатковій сертифікації, високі вимоги до точності інтеграції та обмежені стартові виробничі потужності.

8.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

Проведено аудит технологій, за допомогою яких може бути реалізована ідея проєкту [37]. Оцінено наявність та доступність технологій, а також необхідність їх адаптації. Результати викладено в таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 Технологічна здійсненність ідеї проєкту PLAFlow Tech

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій (чи вони наявні, або їх необхідно розробити/доробити)	Доступність технологій (чи вони доступні авторам проєкту)
1	PLAFlow Tech – виробництво надтонких біорозкладних плівок та ретрофіт-модулів на базі модернізованого шестеренного насоса	Технологія 1 – класична шнекова екструзія біополімерів з рукавною головкою	Широко представлена на ринку та використовується для переробки PLA/PBAT, але має обмеження щодо мінімальної товщини плівки та стабільності процесу при високій в'язкості розплаву.	Формально доступна для придбання, однак потребує значних інвестицій у нове обладнання та не використовує наявну каскадну лінію з дисковим екструдером.
2	PLAFlow Tech – виробництво надтонких біорозкладних плівок та ретрофіт-модулів на базі модернізованого шестеренного насоса	Технологія 2 – одноступінчаста екструзійна лінія з шестеренним насосом класичної конструкції	Такі рішення пропонуються зарубіжними виробниками екструзійного обладнання (MAAG, Nordson тощо) і можуть бути адаптовані для біополімерів, але не забезпечують достатньої рівномірності подачі при екструзії надтонких плівок.	Доступні лише у разі закупівлі повного комплексу обладнання; інтеграція з існуючою дисково-шестеренною лінією є складною та економічно нецільною.
3	PLAFlow Tech – виробництво надтонких біорозкладних плівок та ретрофіт-модулів на базі модернізованого шестеренного насоса	Технологія 3 – каскадна дисково-шестеренна екструзія з модернізованим шестеренним насосом PLAFlow Tech (дисковий екс-	Базові елементи (дисковий екструдер, шестеренний насос) відпрацьовані та існують у вигляді дослідно-промислової лінії; модернізована вхідна зона насо-	Технологія фактично доступна авторам проєкту: є власна каскадна лінія, конструкторська документація на модернізований насос, результа-

		трудер + шестеренний насос із оптимізованою вхідною зоною)	са, алгоритми керування та режими екструзії зроблені в рамках даного проекту й потребують подальшого доведення до рівня промислового зразка.	ти випробувань та можливість подальшої дослідної й дослідно-промислової експлуатації.
--	--	--	--	---

Висновок: За результатами аналізу найбільш доцільною є технологія №3 каскадної дисково-шестеренної екструзії з модернізованим насосом PLAFlow Tech, яка доступна авторам проекту та потребує мінімального доопрацювання.

8.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту PLAFlow Tech

Ринкова оцінка є обов'язковим елементом обґрунтування стартап-проекту, оскільки дозволяє визначити наявність попиту, бар'єри входження та динаміку розвитку сегменту. Аналітична оцінка проводиться відповідно до вимог методичних рекомендацій: досліджуються масштаб ринку, кількість виробників, темпи росту, регуляторні вимоги та рівень рентабельності галузі [38]. Результати зведено у таблицю 8.4.

Таблиця 8.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту PLAFlow Tech

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців	25–35 компаній у Європі та Північній Америці, 10–15 у Азії, 5–7 в Україні. Ринок не монополізований, але зростає конкуренція зі сторони Китаю.

2	Загальний обсяг ринку, млн грн/рік	Світовий ринок PLA-плівок $\approx$ \$1,5 млрд/рік; https://www.verifiedmarketreports.com/product/pla-films-market-size-and-forecast/?utm_source=chatgpt.com/ ЄС $\approx$ \$550 млн/рік; https://www.expertmarketresearch.com/reports/europe-polylactic-acid-pla-market?utm_source=chatgpt.com Україна — 2,5–3,5 млрд грн/рік з темпом росту 12–15%. оціночні дані згідно Google
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає — драйвери: вимоги ЄС щодо декарбонізації, заборона одноразового пластику, попит на біорозкладні пакування.
4	Наявність обмежень для входу (бар'єри)	Середні. Потрібна сертифікація (EN 13432, OK Compost), інвестиції в обладнання, стабільний доступ до PLA/PBAT. Технологічний бар'єр для надтонких плівок досить високий.
5	Вимоги ринку до стандартизації та сертифікації	Обов'язкові стандарти: EN 13432, ASTM D6400, OK Compost Industrial / Home. Для України додатково — сертифікація харчового контакту.
6	Середня норма рентабельності в галузі	15–22% у секторі біоплівок. Преміальний сегмент дозволяє досягати 25%+ у виробників, що контролюють технологічну якість

Висновки:

За результатами аналізу ринок біорозкладних плівок швидко зростає (12–15%/рік в ЄС), що підтверджено аналітикою European Bioplastics, NatureWorks (2024) та Markets&Markets (2023). Ринок не монополізований, присутні як глобальні виробники (Futamura, TIPA, Total Corbion), так і велика кількість малих і середніх підприємств. Сертифікаційні бар'єри (EN 13432, ASTM D6400, OK Compost) є суттєвими для нових учасників, що підвищує вимоги до якості технологій. Рентабельність ринку становить 15–22%, а у преміальних сегментах

— до 25%. Сегмент надтонких PLA-плівок (8–10 мкм) майже вільний, оскільки більшість виробників працюють у діапазоні 18–30 мкм.

Отже, ринок є привабливим для входження, особливо у вузький сегмент надтонких високоякісних біоплівок, де PLAFlow Tech має суттєві технологічні переваги.

Характеристика потенційних груп клієнтів

На цьому етапі визначаються основні групи потенційних клієнтів, фактори, що впливають на їх поведінку, а також вимоги, які вони висувають до товару. Результати викладено в таблиці 8.5.

Таблиця 8. 5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту PLAFlow Tech

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Базова потреба: отримати екологічне пакування, що відповідає нормам ЄС, є біорозкладним, компостованим та здатне замінити одноразовий пластик.	- Виробники харчової продукції - Виробники косметики та побутової хімії - Рітейл (супермаркети, екомагазини) - Підприємства HoReCa - Виробники одноразових пакетів і біоплівок - Стартапи у	- Сильна залежність від сертифікації (EN 13432, OK Compost). - Висока чутливість до параметрів якості плівки (товщина, міцність, прозорість). - Різна цінова чутливість: харчовий сектор — середня, HoReCa — висока, преміум — низька.	- Рівномірність товщини плівки $\pm 5\%$. - Відсутність запаху. - Відповідність EN 13432, ASTM D6400, OK Compost. - Прозорість і стабільна міцність. - Придатність

		сфері сталого па- кування	• Високі вимоги до стабільності партій та передбачуваності постачань. • Готовність платити більше за 100% компостованість.	до нанесення друку. • Стабільна логістика та регулярність поставок.
2	Потреба перейти з ПЕ на PLA/PBAT через регуляторні вимоги та попит на екологічні пакувальні матеріали.	• Виробники поліетиєнових плівок • Виробники пакетів «майка» • Регіональні виробники рукавної плівки • OEM-виробники пакувальних матеріалів	• Висока цінова чутливість. • Обмежена готовність купувати нові лінії — більшість хоче модернізацію існуючих. • Орієнтація на стабільність та відсутність браку. • Цікавлять технології, що інтегруються з наявним обладнанням.	• Сумісність з існуючими лініями. • Продуктивність ≥ 100 кг/год. • Тонка плівка 8–12 мкм без рваних зон. • Плавна робота без пульсацій. • Технічна підтримка при запуску.
3	Потреба отримати високоточний модуль подачі розплаву, який працює з біополімерами без пульсацій та	• Виробники екструзійних ліній • Виробники шестеренних насосів • Лабораторні виробники	• Орієнтація на технологічний результат. • Вимоги до повного пакету креслень та 3D моделей. • Важлива репута-	• Технічна документація та 3D-моделі. • Сертифікація матеріалів. • Демонстра-

	деградації.	біополімерного обладнання	ція розробника технології.	ція роботи (демо-лінія).
		Інжинірингові центри	Купують невеликими партіями, але регулярно.	- Гарантована рівномірність подачі. - Можливість масштабування під інші приводи.

Висновки:

У результаті аналізу визначено такі ключові групи клієнтів:

Виробники полімерної плівки (PLA/PBAT/PE)

- Основна потреба: перейти на екологічні матеріали без втрати продуктивності.
- Висока чутливість до стабільності товщини $\pm 5\%$, якості партій, енергоефективності.
- Вимоги до обладнання: retrofit-інтеграція, відсутність пульсацій, стабільність процесу.

2. Виробники екструзійного обладнання (OEM)

- Потреба: підвищення конкурентоспроможності власних машин.
- Ключовий критерій: точні технічні характеристики насосів, можливість інтеграції.
- Поведінкові особливості: рішення приймаються повільно, важлива технічна документація.

3. Харчова промисловість, HoReCa, рітейл

- Потреба: сертифіковане екопакування.
- Висока залежність від сертифікації EN 13432 / OK Compost.
- Критично важливі параметри — прозорість, міцність, можливість нанесення друку.

4. Преміальні еко-бренди та виробники біоупаковки
 - Потреба: тонкі високоякісні плівки 8–12 мкм.
 - Вимоги до товару: гарантована рівномірність, відсутність дефектів, стабільність партій.

Аналіз факторів загроз стартап-проєкту

У межах таблиці 6 визначено ключові зовнішні та внутрішні загрози, що можуть впливати на результативність проєкту, а також можливі реакції компанії. Фактори, що впливають ринковому впровадженню проєкта сформовані в таблиці 8.6.

Таблиця 8.6 Фактори загроз для стартап-проєкту PLAFlow Tech

№п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Регуляторні зміни у сфері біопакування	Посилення регуляцій, нові вимоги до сертифікації (EN 13432, EU Packaging Directive) можуть збільшити витрати і затримати вихід на ринок.	Постійний моніторинг норм; раннє проходження сертифікації; співпраця з лабораторіями TÜV, Intertek; адаптація технології.
2	Зростання конкуренції зі сторони Китаю	Китайські виробники біоплівкок демпінгують ціни, що тисне на українські та європейські компанії.	Упор на якість, рівномірність товщини, стабільність партій; виробництво тонших плівок (8–10 мкм), яких китайські виробники здебільшого не роблять.
3	Дефіцит та подорожчання PLA/PBAT	Світовий дефіцит сировини призводить до непередбачуваних цін і перебоїв постачання.	Довгострокові контракти; диверсифікація постачальників (NatureWorks, Total Corbion, китайські виробники).
4	Технологічні ризики при масштабуванні	Під час переходу з лабораторного рівня на промисловий можуть виникати нестабільності процесу.	Додаткові промислові випробування; модульна конструкція насоса; цифровий контроль подачі.
5	Зниження купівельної спроможності	У період економічної нестабільності клієнти	Розробка продуктів під різні бюджети; оп-

	сті клієнтів	можуть повертатися до дешевших традиційних полімерів.	тимізація собівартості через енергоефективність; гнучкі комерційні пропозиції.
6	Фактори війни та мобілізації	Перебої з електропостачанням, ризики для персоналу, логістичні обмеження.	Резервні системи живлення, децентралізація виробництва, дублювання персоналу.
7	Порушення логістичних ланцюгів	Нестабільність постачання сировини та затримки імпорту.	Запасні склади, альтернативні маршрути доставки, контрактування кількох перевізників.
	Кібербезпека	Ризик атак на цифрові системи керування виробництвом.	Захищені мережі, регулярні аудити кібербезпеки, резервне копіювання.

Фактори можливостей

У таблиці 8.7 наведено ключові можливості, що сприяють розвитку стартап-проєкту PLAFlow Tech, а також можливі реакції компанії для їх реалізації.

Таблиця 8.7 Фактори можливостей для стартап-проєкту PLAFlow Tech

№п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Європейський тренд на заборону одноразового пластику	Урядові програми ЄС, Британії, Канади та США стимулюють перехід на біопакування, попит на PLA-плівки стрімко зростає.	Акцент на експорт; створення продуктів під стандарти ЄС; формування експортної бізнес-моделі.
2	Можливість виробництва супер-тонких біоплівок (8–10 мкм)	У світі лише кілька виробників здатні виробляти надтонкі PLA-плівки — високий попит і низька конкуренція.	Розробка лінійки BIO-UltraThin; демонстрація переваг; патентування вузла подачі PLAFlow Tech.
3	Можливість модернізації існуючих ліній клієнтів	Більшість компаній не хочуть купувати нову лінію — їм потрібна модернізація існуючого обладнання. Насос	Розробка retrofit-kit; технічна підтримка клієнтів; сервісний супровід.

		PLAFlow Tech легко інтегрується.	
4	Розширення сегменту еко-пакування та HoReCa	Заклади харчування, доставки та маркетплейси переходять на екологічні пакувальні рішення.	Вихід на HoReCa сегмент; співпраця з національними мережами; запуск кастомізованих пакувальних рішень.
5	Державні та міжнародні грантові програми	Еко-технології отримують підтримку через програми Horizon Europe, USAID, EBRD, Green Deal.	Підготовка грантових заявок; створення R&D центру; участь у міжнародних інноваційних програмах.

Ступеневий аналіз конкуренції

Сформулюємо характеристику конкурентного середовища за основними ознаками, а також визначимо їх вплив на діяльність стартап-проєкту [39]. Результат зображено в таблиці 8.8.

Таблиця 8.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку для стартап-проєкту PLAFlow Tech

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції — олігополія з елементами монополістичної конкуренції	На ринку є кілька великих гравців (Futamura, TIRA, Bioplastics International), але присутня значна кількість середніх та малих виробників. Продукти схожі за властивостями	Сформувати технологічну перевагу: надтонка плівка, стабільність товщини, енергоефективність. Позиціонувати себе як high-tech виробника з унікальною технологією PLAFlow Tech.

	ми, але відрізняються за рівнем технологічності та якістю.	
2. Конкурентна боротьба — міжнародна та галузева	Основна конкуренція формується міжнародними виробниками PLA-плівок. Локальні виробники є технологічно слабшими, але займають частину ринку.	Орієнтація на експорт; сертифікація під стандарти ЄС; випуск преміум-плівок; створення експортної бізнес-моделі.
3. Галузева ознака конкуренції — внутрішньогалузева	Конкурують виробники біоплівки з PLA/PBAT, а також виробники обладнання (насоси, екструдери).	Пропонувати retrofit-технологію: продаж модернізованого насоса виробникам обладнання та малим лініям. Створення додаткової ринкової ніші.
4. Конкуренція за видами товарів — товарно-родова, товарно-видова, між брендами	Товарно-родова: PLA-плівки проти ПЕ. Товарно-видова: різні товщини PLA-плівок. Між брендами: конкуренція між TIPA, NatureFlex та локальними виробниками.	Виробляти унікальний продукт (плівка 8–10 мкм), підвищити якість і стабільність. Позиціонувати PLAFlow як преміальний екопродукт.
5. Характер конкурентних переваг — цінова / нецінова	У бюджетних сегментах конкуренція цінова. У преміум-сегменті вирішальним є якість,	Зменшити собівартість через енергоефективність (–8%). Наголос на нецінових перевагах: сертифікація, стабільність

	стабільність, еко-логічні сертифікати.	виробництва, якість.
6. Інтенсивність конкуренції — марочна / немарочна	Ринок PLA-плівок в основному немарочний, окрім NatureFlex і TIPA. Більшість компаній працює як OEM.	Створити власний бренд PLAFlow Film як високотехнологічний екопродукт з чіткою перевагою — надтонкі та однорідні преміальні біоплівки.

Ступеневий аналіз конкурентного середовища показав, що ринок біорозкладних плівок, у тому числі сегмент PLA-плівок, характеризується монополістичною конкуренцією, у якій діє велика кількість виробників з диференційованою продукцією. Основний конкурентний тиск формується на міжнародному рівні, передусім з боку європейських та азійських компаній, що зумовлює необхідність орієнтації на високі технологічні стандарти якості.

Згідно аналізу за видами конкуренції, галузь поєднує товарно-родову, товарно-видову та міжбрендову конкуренцію, що потребує від виробників чіткої сегментації продуктів та підтримки стабільності техніко-економічних параметрів. Для PLAFlow Tech це означає необхідність акценту на унікальних технологічних властивостях — стабільність товщини, низькі пульсації подачі, можливість виробництва надтонких плівок 8–10 мкм, а також енергоефективність процесу.

Характер конкурентних переваг у галузі поєднує цінову та нецінову конкуренцію. Враховуючи значну присутність дешевої продукції азійського походження, PLAFlow Tech доцільно працювати переважно у площині нецінової конкуренції, пропонуючи високу якість, стабільність і технологічну інноваційність.

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Згідно з моделлю 5 сил Портера, у таблиці 8.9 наведено аналіз конкурентного тиску в галузі.

Таблиця 8. 9 Аналіз конкуренції в галузі за моделлю 5 сил М. Портера (PLAFlow Tech)

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Насиченість ринку прямими конкурентами Бар'єри входження в ринок Сила постачальників Сила клієнтів Загроза товарів-замінників	У галузі присутні міжнародні виробники (Futamura, TIPA, Bioplastics Intl.) та 30–40 середніх підприємств у ЄС і Китаї. Локальних виробників в Україні — 5–7. Конкуренція середня, з акцентом на якість.	Бар'єри середні: необхідність сертифікації EN 13432, значні інвестиції в обладнання, технологічна складність PLA, нестабільність постачання сировини.	Постачальники PLA/PBAT сильні: лише 8–10 світових виробників. Дефіцит сировини створює ризики. Ціни формуються глобально.	Клієнти (харчова промисловість, ритейл, HoReCa) можуть диктувати вимоги щодо якості, товщини, стабільності, сертифікації. Цінова чутливість залежить від сегменту.	ПЕ-плівки дешевші та широкі доступні; деякі компанії можуть залишатись на ринку, ПЕ через низьку ціну, попри екологічні тренди.

Висновки за результатами аналізу:

1. Інтенсивність конкурентної боротьби з боку прямих конкурентів — середня. Ринок активно зростає, і технологічні переваги PLAFlow Tech дозволяють ефективно конкурувати.
2. Можливість входу на ринок — реальна, але з наявними бар'єрами: сертифікація, нестабільність постачання PLA/PBAT та інвестиції. Технологія PLAFlow зменшує бар'єри завдяки можливості модернізації існуючого обладнання.
3. Сила постачальників є високою, оскільки виробників PLA/PBAT невелика кількість. Потрібні довгострокові контракти та диверсифікація постачальників.
4. Сила клієнтів — середня/висока. Клієнти чутливі до якості, стабільності товщини та екологічних сертифікатів, що підтверджує необхідність високого технологічного рівня PLAFlow Tech.
5. Загроза товарів-замінників — висока через дешевизну та доступність ПЕ-плівок. Однак регуляторні тренди ЄС та ріст попиту на біопакування працюють на користь PLAFlow Tech.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

На основі попередньо проведеного аналізу ринку (табл. 8.4), характеристик споживачів (табл. 8.5), факторів можливостей (табл. 8.7), факторів загроз (табл. 8.6) та результатів аналізу конкуренції (табл. 8. 8–8.9) формується узагальнений перелік факторів конкурентоспроможності стартап-проєкту PLAFlow Tech [40].

У таблиці 8.10 наведено ключові фактори, що найбільш суттєво впливають на позиціонування проєкту на ринку та визначають можливість його ефективного функціонування.

Таблиця 8.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності (PLAFlow Tech)

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Рівномірність товщини плівки	Ключовий параметр для харчових компаній, ритейлу та преміальних брендів. Конкуренти мають $\pm 8\text{--}12\%$, PLAFlow Tech забезпечує $\pm 5\%$. Дає економію сировини й зменшення браку.
	Можливість виробництва надтонких плівок $8\text{--}10\text{ мкм}$	На ринку лише кілька компаній здатні виробляти такі товщини з PLA/PBAT. Це дозволяє зайняти нішу з низькою конкуренцією й високою маржинальністю.
3	Енергоефективність (-8% споживання)	На фоні зростання цін на електроенергію енергоефективність стає критичним фактором. Дає прямий економічний ефект і підвищує шанси на гранти.
4	Стабільність подачі без пульсацій	Пульсації спричиняють брак, мікрорвані зони й зміну товщини. PLAFlow Tech знижує пульсації до $\pm 1\text{--}1.5\%$ проти $\pm 4\text{--}5\%$ у конкурентів.
5	Сертифікаційна відповідність	Клієнти жорстко вимагають відповідності EN 13432 / ASTM D6400 / OK Compost. Без цього неможливо продавати продукцію у ЄС.
6	Можливість інтеграції в існуючі	70% виробників не готові купувати

	лінії (retrofit)	нову лінію — хочуть модернізувати стару. Retrofit-насос PLAFlow Tech дає цю можливість.
7	Технологічна надійність і низька деградація PLA	Деградація — головна проблема PLA. Нова геометрія насоса забезпечує плавний перехід розплаву й менший перегрів.
8	Наявність власної демонстраційної лінії	Дозволяє проводити тестові екструзії для клієнтів, що підвищує довіру й конверсію продажів.

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту показані в таблиці 8.11.

Для аналізу використовуються фактори з Таблиці 8.10.

Таблиця 8.11 Порівняльний аналіз сильних і слабких сторін PLAFlow Tech

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали (1–20)	Рейтинг конкурентів	Коментар
1	Рівномірність товщини плівки	8	+3	Значно краща стабільність, ніж у конкурентів.
2	Надтонкі плівки 8–10 мкм	0	+3	Унікальна можливість, майже відсутні прямі конкуренти.
3	Енергоефективність (-8%)	6	+2	Конкуренти не пропонують енергоефективних насосів.
4	Подача без пульсацій	7	+2	Менше дефектів, ніж у інших систем подачі.
5	Сертифікаційна відповідність	5	+1	На рівні конкурентів, але стабільність дає перевагу.
6	Retrofit-інтеграція	9	+3	Унікальна пропозиція для виробників обладнання.
7	Низька деградація PLA	7	+2	Краща термостабільність завдяки новій геометрії насоса.
8	Демонстраційна лінія	4	+1	Підвищує довіру та конверсію продажів.

Висновок :

Аналіз показав, що основними сильними сторонами PLAFlow Tech є:

- технологічна перевага у стабільності товщини,
- мінімальні пульсації подачі,
- можливість виробництва надтонких плівок (ключова конкурентна перевага),
- достатня енергоефективність,
- простота інтеграції в існуючі лінії.

Слабкі сторони виявляються лише у порівнянні з окремими конкурентами за показниками сертифікації або досвідом у галузі.

SWOT-аналіз стартап-проєкту

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проєкту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 8.7-8.8) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 8. 11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища [42]. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, вже не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: значення одного й того ж чинника – чисельності споживачів – може мати різний вплив на ринкову ситуацію в залежності від подальшого впливу інших чинників. Так, для ринків, на яких основні можливості залежать від цінової конкуренції, чисельність покупців може бути можливістю (зростання місткості ринку), а для ринків з високими бар'єрами входження – ринкова загроза.

Таблиця 8.12 SWOT-аналіз стартап-проєкту PLAFlow Tech

Сильні сторони: • Висока рівномірність товщини плівки ($\pm 5\%$). • Надтонкі плівки 8–10 мкм. • Енергоефективність 21000 кВт·год /міс. • Стабільна подача без пульсацій. • Retrofit-інтеграція. • Низька деградація PLA. • Демонстраційна лінія.	Слабкі сторони: • Залежність від імпортової сировини. • Необхідність інвестицій клієнтів у модернізацію. • Потреба в додатковій сертифікації. • Низька впізнаваність бренду. • Обмежені потужності на старті.
Можливості: • Ріст ринку біопакування. • Тренд ЄС на екологічність (Green Deal). • Грантові програми підтримки. • Ринок обладнання для екструзії. • Ніша надтонких біоплівочок.	Загрози: • Конкуренція з ПЕ-плівками. • Залежність від світових цін PLA/PBAT. • Сильні міжнародні конкуренти. • Економічна нестабільність. • Зміни екологічного законодавства.

Висновок SWOT-аналізу:

SWOT-аналіз демонструє, що стартап-проєкт PLAFlow Tech має значні технологічні переваги, які формують конкурентний потенціал на міжнародному ринку. Сильні сторони проєкту зосереджені у сфері якості продукції, енергоефективності та технологічної гнучкості, що дозволяє ефективно задовольняти потреби клієнтів та адаптувати обладнання без необхідності повної заміни екструзійних ліній.

Можливості на ринку сприяють масштабуванню проєкту: зростання попиту на біопакування, глобальні екологічні тренди та доступ до міжнародних

грантів створюють сприятливі умови для розвитку PLAFlow Tech. Водночас наявні загрози — конкуренція з поліетиленом, залежність від ціни на PLA/PBAT та ситуація на світових ринках — вимагають активної стратегії ризик-менеджменту та диверсифікації постачальників. Загалом SWOT-матриця підтверджує, що PLAFlow Tech має високий рівень готовності до ринкового впровадження та може зайняти перспективну нішу завдяки унікальній технологічній модернізації шестеренного насоса.

Розроблення альтернатив ринкового впровадження

На основі попереднього SWOT-аналізу формуються можливі альтернативи ринкової поведінки, спрямовані на оптимальне виведення стартап-проекту на ринок [43]. Кожна альтернатива оцінюється з точки зору імовірності отримання необхідних ресурсів та строків реалізації. Результати зведені в таблиці 8.13.

Таблиця 8.13 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту PLAFlow Tech

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Імовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	A1 — Прямий вихід на ринок біоплівки з використанням власної демо-лінії: • запуск виробництва надтонких PLA-плівок; • продаж готової продукції B2B; • маркетинг плівки з підвищеною рівномірністю та екологічністю.	Середня / висока	6–12 місяців
2	A2 — Модель модернізації обладнання (retrofit): • продаж модернізованого насоса; • інтеграція на існуючі лінії; • партнерство з виробниками екструдерів.	Висока	3–6 місяців
3	A3 — Комбінована модель (плівка + retrofit): • виробництво власних біоплівок; • паралельний продаж модернізованих насосів; • диверсифікація доходів.	Середня	12–18 місяців

Висновок щодо вибору оптимальної альтернативи: на основі аналізу ймовірності отримання ресурсів та строків реалізації визначено, що оптимальною є альтернатива А2 — модель модернізації обладнання (retrofit). Вона забезпечує найкоротший час виходу на ринок та найвищу ймовірність залучення ресурсів, оскільки клієнтам не потрібно закуповувати нові екструзійні лінії, а лише модернізувати існуючі.

8.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

Вибір цільових груп споживачів

На основі аналізу потенційних клієнтів (табл. 8.5) визначаються ключові групи, для яких проєкт може забезпечити найвищу цінність, таблиця 8.14.

Таблиця 8.1. Вибір цільових груп потенційних споживачів PLAFlow Tech

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит у межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції / Простота входу
1	Виробники полімерних плівок (екструзійні лінії з PLA/PBAT/PE)	Висока — постійний попит на модернізацію обладнання, прагнення до енергоефективності й стабільності виробництва.	Високий — сегмент зростає, більшість виробників працюють на застарілих лініях.	Середня конкуренція / Висока простота входу (retrofit).
2	Виробники екструзійного обладнання та комплектуючих (ОЕМ-компанії)	Середня/висока — зацікавленість у покращенні характеристик своїх машин.	Середній — стабільний промисловий попит, потребує партнерств.	Низька/середня конкуренція / Середня простота входу (ОЕМ-контракти).
3	Харчова промисловість, рітейл, HoReCa (кінцеві споживачі біоплівки)	Середня — купують готову плівку, а не обладнання.	Високий — попит на екопакування зростає.	Висока конкуренція / Середня простота входу.
4	Еко-бренди та виробники біо-	Висока — потребують тонких і	Високий — нішовий, але	Низька конкуренція / Середня

	упаковки преміум-сегменту	стабільних плівок.	PLA-	швидко зростаючий сегмент.	простота входу.
--	---------------------------	--------------------	------	----------------------------	-----------------

Обрані цільові групи:

1. Виробники полімерних плівок (екструзійні лінії PLA/PBAT/PE) — найвищий рівень готовності до впровадження та простота виходу на ринок завдяки retrofit-модернізації.

2. Виробники екструзійного обладнання (ОЕМ-компанії) — стратегічний напрям для масштабування продажів та інтеграції модернізованого насоса PLAFlow Tech у нові промислові лінії.

Визначення базової стратегії розвитку

На цьому етапі формується стратегія охоплення ринку для обраних сегментів, таблиця 8.15.

Таблиця 8.15. Визначення базової стратегії розвитку PLAFlow Tech

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
1	A2 — Модель модернізації обладнання (retrofit)	Концентроване охоплення ринку — фокус на виробниках полімерних плівок та ОЕМ-компаніях.	• Унікальна технологія модернізованого шестеренного насоса • Можливість інтеграції без заміни обладнання • Преміальна якість та рівномірність плівки • Енергоефективність (–8%) • Низькі бар'єри входу для клієнта	Стратегія інноваційного розвитку — ріст через технологічні інновації та партнерства.

Визначення стратегії конкурентної поведінки

Таблиця 8.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки PLAFlow Tech

№ п/п	Чи є проєкт пер- воінноватором на ринку?	Чи буде компанія знижува- ти ціни?	Чи буде компанія ко- піювати характе- ристики конкурентів?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так — унікальна модернізація ше- стеренного насоса для екструзії PLA.	Ні — ставка на нецінову (ціннісну) конкурен- цію.	Ні — компанія формує унікальні характе- ристики: надтонкі плівки, стабільність, енергое- фективність.	Стратегія ди- ференціації через іннова- ції.

На основі попередніх розрахунків обґрунтовано оптимальну ринкову поведінку стартап-проєкту PLAFlow Tech, визначено цільові сегменти, побудовано стратегію розвитку та конкурентної поведінки. Найперспективнішим напрямом є вихід у преміальний сегмент надтонких PLA-плівок з акцентом на технологічне лідерство.

Визначення стратегії позиціонування

Позиціонування визначає, як споживач має сприймати товар, які асоціації про бренд формувати, таблиця 8.17.

Таблиця 8.17. Визначення стратегії позиціонування PLAFlow Tech

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стра- тегія розви- тку	Ключові конку- рентоспроможні позиції стартап- проєкту	Вибір асоціа- цій (три клю- чові)
1	• Стабільна рівно- мірність товщини • Надтонкі плівки • Відсутність пуль- сацій • Енергоефектив- ність • Легкість інтегра- ції (retrofit)	Стратегія ін- новаційного розвитку — фокус на тех- нологічній модернізації та партнер- ствах з виро- бниками	• Унікальний мо- дернізований ше- стеренний насос • $\pm 5\%$ стабіль- ність товщини • Надтонкі плівки 8–10 мкм • -8% енерговит- рат	1. «Інноваційне серце екструзій- ної лінії» 2. «Технологія преміальної PLA-плівки» 3. «Енергоефе- ктивна модер- нізація без за-

• Низька деградація PLA • Гарантована сертифікаційна якість	обладнання.	• Retrofit-інтеграція без заміни лінії • Преміальна термостабільність PLA • Готовність до сертифікації EN 13432	міни обладнання»
--	-------------	---	------------------

Висновок щодо стратегії позиціонування: стратегія позиціонування PLAFlow Tech полягає у формуванні комплексного сприйняття марки як високотехнологічного інноваційного рішення для модернізації екструзійних ліній. Основою позиціонування виступають унікальні технічні переваги модернізованого шестеренного насоса: підвищена рівномірність товщини, можливість виготовляти надтонкі PLA-плівки, енергоефективність та відсутність пульсацій подачі.

Обрані асоціації — «Інноваційне серце екструзійної лінії», «Технологія преміальної PLA-плівки», «Енергоефективна модернізація» — формують чітку ринкову позицію стартапу та забезпечують впізнаваність бренду в сегменті біополімерних технологій.

Визначення ключових переваг маркетингової концепції товару

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 8.18 підсумуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару, сильних сторін, потреб клієнтів та ринкових можливостей.

Таблиця 8.18 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару PLAFlow Tech

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Стабільна рівномі-	Гарантована	• Точність подачі $\pm 5\%$

	рність товщини бі- ополімерної плівки	стабільність подачі та від- сутність пульсацій	• Немає застійних зон • Температурний градієнт зниже- но з 6°C до 3°C
2	Можливість вироб- ництва надтонких PLA-плівок	Виготовлення плівок 8–10 мкм без де- фектів	• Рівномірний розподіл потоку • Оптимізована геометрія bell- mouth • Мінімізована деградація PLA
3	Енергоефективність виробництва	Зниження енергоспожи- вання процесу на ~8%	• Менші гідравлічні втрати • Оптимізований тиск $P_1 \rightarrow P_2$ • Нижче навантаження на привід
4	Простота інтеграції у наявне обладнан- ня	Retrofit- встановлення без заміни лінії	• Модульна конструкція • Сумісність із стандартними кріпленнями • Низькі витрати впровадження
5	Якість та відповід- ність стандартам	Сертифіка- ційна якість продукції	• Висока однорідність плівки • Відповідність EN 13432 • Екологічна безпека
6	Зниження техноло- гічних ризиків PLA	Стабільний ре- жим переробки навіть для PLA/PBAT	• Радіусне розширення каналу • Оптимальне заповнення порож- нин • Стабілізація тиску

8.5 Розроблення трирівневої маркетингової моделі товару

В цій частині показано опис товару на трьох рівнях: ідея → реальний то-
вар → підкріплення товару. Результат таблиця 8.19.

Таблиця 8.19 Опис трьох рівнів моделі товару PLAFlow Tech

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Опис базової потреби: забезпечення стабільної, рівномірної подачі біополімерного розплаву PLA/PBAT для виготовлення високоякісної екологічної плівки. <i>Основні функціональні вигоди:</i> • усунення пульсацій подачі; • можливість виробництва надтонких плівок (8–10 мкм); • енергоефективна робота екструзійної лінії; • зниження деградації PLA та підвищення термостабільності процесу.
II. Товар у реальному виконанні	<i>Властивості / характеристики:</i> 1. Технічні параметри насоса: • модернізований вхідний канал (прямокутний + радіус $r=0,15 \dots 0,25H$); • bell-mouth розширення $20^\circ \pm 5^\circ$; • радіусне згладження гострих зон; • полірована поверхня каналу $Ra \leq 0,4$ мкм. 2. Продуктивність та показники процесу: • рівномірність товщини плівки $\pm 5\%$; • зниження гідравлічних втрат ($0,28 \rightarrow 0,35$ МПа); • температурний градієнт знижено зі 6°C до 3°C; • енерговитрати –8%. <u>Якість</u>: відповідність стандартам EN 13432. <u>Пакування</u>: технічний паспорт + монтажний комплект. <u>Марка</u>: PLAFlow Tech GearPump™.
III. Товар з підкріпленням	<i>До продажу:</i> • технічна консультація та підбір параметрів;

	• 3D-модель для інтеграції; • перевірка сумісності. <i>Після продажу:</i> • гарантія 12–24 місяці; • сервіс 24/7; • налаштування та оптимізація; • навчання персоналу. <i>Захист від копіювання:</i> • патент на геометрію каналу; • приховані технологічні ноу-хау; • марка PLAFlow Tech GearPump™.
--	--

Висновок: Розроблена трирівнева модель товару PLAFlow Tech відображає як базові, так і розширені характеристики інноваційного рішення. На першому рівні визначено ключову цінність – стабільна рівномірність подачі біополімерного розплаву та зменшення технологічних ризиків PLA. На другому рівні описані реальні технічні характеристики виробу, що забезпечують конкурентні переваги. Третій рівень формує комплекс підтримки та сервісного супроводу, який робить товар завершеним ринковим продуктом і підсилює його захист від копіювання конкурентами.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проєкту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл.8. 20).

Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 8.20 Визначення меж встановлення ціни PLAFlow Tech GearPump™

№ п/п	Рівень цін на товари- замінники	Рівень цін на товари- аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни
1	2 500 – 4 000 USD (класичні шестеренні насоси без мо- дернізації)	5 000 – 7 000 USD (насоси під PLA, але без геомет- ричних удос- коналень)	15 000 – 60 000 USD/міс. (виро- бники плівки та ОЕМ-компанії)	Нижня межа: 4 800 USD Верхня межа: 7 500 USD

Ринковий аналіз показує, що товари-замінники (класичні шестеренні насоси) знаходяться у діапазоні 2500-4000 USD, тоді як вузькоспеціалізовані насоси для біополімерів — 5000-7000 USD. З огляду на унікальність PLAFlow Tech GearPump™ та його технічні переваги ($\pm 5\%$ стабільність, -8% енерговитрат, можливість виробляти надтонкі PLA-плівки), доцільно закласти нижню межу в 4800 USD, а верхню — 7500 USD. Це забезпечує конкурентоспроможність і прибутковість проєкту.

Визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (таблиця 8.21):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 8.21 Формування системи збуту PLAFlow Tech GearPump™

№ п/п	Специфіка за- купівельної по- ведінки цільових	Функції збуту, які має вико- нувати поста-	Глибина каналу збуту	Оптимальна си- стема збуту
----------	--	--	----------------------------	-------------------------------

	клієнтів	чальник товару		
1	- Високий рівень технічних вимог - Тривалий процес ухвалення рішення (B2B) - Необхідність демонстрації ефективності на реальному обладнанні - Потреба у сервісному супроводі та технічному аудиті	- Прямі технічні консультації - Демонстрація роботи насоса (відео або тест на лінії) - Адаптація конструкції під клієнта - Сервіс і підтримка 24/7 - Гарантійний супровід та навчання персоналу	Один або два рівні: виробник → клієнт; інколи виробник → дилер → клієнт	Комбінована система збуту: - власний прямий збут для великих виробників плівки; - через технічних дилерів/сервісних інтеграторів для OEM-компаній та регіональних ринків.

Оптимальною для PLAFLOW Tech є комбінована система збуту, що поєднує прямі продажі великим виробникам полімерної плівки з залученням технічних дилерів та інтеграторів для ринків, де потрібна локальна технічна підтримка. Такий підхід забезпечує мінімальну глибину каналу збуту, максимальний контроль якості консультацій та ефективне впровадження інноваційного продукту. Він дозволяє одночасно стабільно працювати з великими промисловими клієнтами та швидко масштабуватися через партнерські канали.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій [43], що спирається на попередньо обрану основу для позиціювання, визначену специфіку поведінки клієнтів таблиця 8.22.

Таблиця 8.22. Концепція маркетингових комунікацій PLAFlow Tech

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	- Високий рівень технічної компетентності - Орієнтація на економічну ефективність - Довгий B2B цикл прийняття рішення - Потреба у технічних демонстраціях	- Прямі переговори з інженерами - Галузеві виставки (PlastPol, K-Show, InterPlas) - LinkedIn та професійні спільноти - Технічні вебінари та демонстрації на виробництві - Статті у Plastics News, Extrusion World	«Інноваційне серце екструзійної лінії» «Технологія преміальної PLA-плівки» «Енергоефективна модернізація без заміни обладнання»	- Підкреслити технологічні переваги насоса - Показати економію енергії –8% - Продемонструвати виробництво плівок 8–10 мкм - Наголосити на простоті впровадження retrofit	«PLAFlow Tech — створює майбутнє біоплівки вже сьогодні» - Екологічно. Точно. Надійно. - Інновація, яка інтегрується за 1 день. - Якість, яку видно у кожному мікроні.

Концепція маркетингових комунікацій PLAFlow Tech орієнтована на промислових клієнтів із високими технічними вимогами та тривалим циклом ухвалення рішень. У центрі комунікаційної політики — технічні демонстрації, галузеві виставки, цільові професійні канали (зокрема LinkedIn) та спеціалізовані публікації. Основними завданнями рекламного повідомлення є підкреслення технологічних переваг модернізованого шестеренного насоса, економії енергії, здатності виробляти надтонкі PLA-плівки та простоти інтеграції retrofit-рішення. Концепція рекламного звернення формує у потенційного покупця стійку асоціацію з інноваційністю, точністю та екологічністю технології PLAFlow Tech.

8.6 Висновки

У результаті проведеного комплексного аналізу технологічних, ринкових та економічних аспектів стартап-проєкту *PLAFlow Tech* можна зробити такі узагальнюючі висновки:

1. Можливість ринкової комерціалізації проєкту.

Аналіз попиту, ринкової динаміки та конкурентного середовища показує, що існує реальна та стійка можливість успішного виведення продукту на ринок. Глобальний перехід виробників плівок до біополімерів (PLA, PHA, PBAT), зростання вимог до енергоефективності та якості продукції формують значний попит на технології модернізації екструзійних ліній. Проєкт характеризується високою рентабельністю та низькими ризиками виходу на ринок у порівнянні з традиційним виробництвом нових машин.

2. Перспективи впровадження з огляду на групи клієнтів та бар'єри входження.

Цільові сегменти клієнтів – виробники біополімерної плівки, OEM-компанії, сервісні інтегратори – демонструють високий рівень готовності до впровадження інноваційних технологій за умови доведення ефективності. Бар'єри входження для стартапу є відносно низькими завдяки модульному принципу інтеграції (*retrofit-модель*) та відсутності необхідності заміни всього екструзійного устаткування. Проєкт має чіткі конкурентні переваги: стабільність подачі, можливість виробництва надтонких плівок, зниження деградації PLA, –8% енерговитрат та технологічний захист конструкції. Це суттєво підвищує його конкурентоспроможність у порівнянні з аналогами.

3. Обрана альтернатива ринкової реалізації.

За результатами аналізу альтернатив оптимальним є варіант **A2 – модернізація існуючих екструзійних ліній (retrofit-рішення)**. Ця модель забезпечує:

- найвищу ймовірність отримання ресурсів;
- найкоротші строки впровадження;

- мінімальні витрати клієнтів;
- швидке масштабування на міжнародні ринки;
- можливість стабільного сервісного супроводу та розширення асортименту.

4. Перспективи подальшої імплементації проєкту

Проведений аналіз підтверджує доцільність подальшої реалізації та масштабування проєкту. Стартап має усі передумови для успіху:

- чітко сформовану ціннісну пропозицію;
- підтверджені техніко-економічні переваги;
- конкурентні ринкові позиції;
- доступність цільових каналів збуту;
- ефективну маркетингову стратегію та систему комунікацій.

Отже, проєкт PLAFlow Tech є ринково життєздатним, технічно обґрунтованим та економічно перспективним, а його впровадження сприятиме підвищенню ефективності виробництва біополімерної плівки та розвитку екологічних технологій в Україні та на міжнародному ринку.

Висновки

У магістерській дисертації за освітньо-професійною програмою магістра на тему: «Модернізація лінії каскадної екструзії з розробкою шестеренного насоса» було виконано комплекс робіт, спрямованих на підвищення ефективності технологічного процесу виробництва біо-полімерних плівок шляхом удосконалення конструкції шестеренного насоса в складі лінії каскадного дисково-шестеренного екструдера.

У роботі описано технологічний процес отримання біо-полімерної рукавної плівки, проаналізовано реологічні властивості сучасних полімерів, обґрунтовано доцільність використання каскадної схеми екструзії та вибір дисково-шестеренної компоновки. Проведено технічне обґрунтування конструкції екструдера, наведено розрахунки активних зон, температурних режимів, продуктивності та тиску, що підтверджують працездатність апарата.

Особливу увагу приділено розробці та модернізації шестеренного насоса, який у каскадній схемі виконує функції стабілізації тиску та точного дозування, що забезпечує зменшення пульсацій розплаву, підвищення точності геометричних розмірів плівки та зниження витрат полімерної сировини. Запропонована модернізація дозволяє покращити енергоефективність лінії, підвищити якість гомогенізації розплаву та забезпечити стабільність технологічних параметрів у широкому діапазоні режимів.

У роботі проведено патентне дослідження конструкцій шестеренних насосів та апаратів екструзії, визначено їх сильні та слабкі сторони, що дозволило сформулювати технічні вимоги до власної модернізованої конструкції. Наведено рекомендації щодо монтажу, пусконаладження та експлуатації обладнання, розглянуто вимоги охорони праці, стандартизації та уніфікації елементів лінії. Подано схему автоматичного керування процесом екструзії.

Графічна частина проєкту містить комплект з восьми креслень формату А1, що включають загальний вигляд модернізованої лінії каскадної екструзії.

зії, розроблену конструкцію шестеренного насоса, вузли та деталі апарата. Наукова частина дисертації містить результати технічних розрахунків основних вузлів обрах апаратів, CFD аналізу роботи нової конструкції шестеренного насоса, розроблений стартап проект спрямований на підвищення технологічної ефективності процесів екструзії біорозкладних полімерів та комерціалізацію модернізованого шестеренного насоса, аналізу гідродинаміки та тепломасообміну у зонах екструзії, а також встановлені залежності, що використовуються при конструюванні екструзійного обладнання.

У результаті виконаної роботи розроблено конструкцію шестеренного насоса для модернізації лінії каскадної екструзії, підготовлено матеріали для потенційного патентування та сформовано технічні рішення, що можуть бути впроваджені у промислове виробництво, три тези були опубліковані на наукових конференціях та подана наукова стаття. Отримані результати можуть бути використані для подальших наукових досліджень та практичної модернізації екструзійних ліній.

Conclusions

In the Master's thesis under the educational and professional master's program entitled "Modernization of a Cascade Extrusion Line with the Development of a Gear Pump", a comprehensive set of tasks was carried out aimed at improving the efficiency of the technological process for producing bio-polymer films through the enhancement of the gear pump design integrated into a cascade disk-gear extrusion system.

The thesis describes the technological process of manufacturing bio-polymer blown film, analyzes the rheological properties of modern polymers, and substantiates the feasibility of using a cascade extrusion configuration and the selection of a disk-gear arrangement. The technical justification of the extruder design is provided, including calculations of the active zones, temperature regimes, output capacity, and pressure characteristics, which confirm the operability and reliability of the apparatus.

Special attention is devoted to the development and modernization of the gear pump, which in a cascade extrusion scheme performs the critical functions of pressure stabilization and precise melt dosing. This ensures a reduction in melt pulsations, improves the dimensional accuracy of the film, and reduces polymer consumption. The proposed modernization enhances the overall energy efficiency of the line, improves melt homogenization quality, and stabilizes technological parameters across a wide range of operating conditions.

A patent study of existing gear pump designs and extrusion equipment was conducted, revealing their strengths and weaknesses, which enabled the formulation of technical requirements for the newly modernized pump design. Recommendations for installation, commissioning, and operation of the equipment were provided, along with considerations of occupational safety, standardization, and unification of line components. A schematic of the automated control system for the extrusion process is presented.

The graphical part of the project includes a set of eight A1-format engineering drawings that comprise the general view of the modernized cascade extrusion line, the developed gear pump design, and the principal assemblies and components of the apparatus. The scientific part of the thesis contains the results of engineering calculations of the main units, a CFD analysis of the operation of the new gear pump design, a developed startup project aimed at improving the technological efficiency of bio-polymer extrusion processes and commercializing the modernized pump, an analysis of hydrodynamics and heat-mass transfer in the extrusion zones, as well as the functional relationships used in the design of extrusion equipment.

As a result of the work, a gear pump design for the modernization of a cascade extrusion line was developed, materials for potential patent filing were prepared, and technical solutions suitable for industrial implementation were formulated. Three conference abstracts were published, and a scientific article was submitted. The obtained results may be used for further scientific research and practical modernization of extrusion lines.

Перелік посилань

1. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії: Наук. посібник. – К.: ІЗМН, 1999. – 220 с.
2. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 293 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084>
3. Патент №105955 (UA), МПК6 В29С 47/00, В29С 47/52 (2017.01). Дисковий екструдер/ Н.Г Воробей, М. П. Швед, Д. М. Швед; (UA)– Заявка u201509989, 13.10.2015; Опубл. 11.04.2016
4. Патент №115908 (UA), МПК6 В30В 11/22, В29С 47/00 (2017.01). Каскадний дисково-шестеренний екструдер / О.В Кеба, М. П. Швед, Д. М. Швед; (UA)– Заявка u201613028, 20.12.2016; Опубл. 25.04.2017
5. Патент №137963(UA), МПК (2019.01) В30В 11/22 (2006.01). Каскадний дисково-шестеренний екструдер / А.М. Ковба, М.П. Швед, Д.М. Швед; (UA). – Заявка №201904913, 08.05.2019; Опубл. 11.11.2019, Бюл. №21
6. Патент США US12180959 В2, МПК F04С 18/084(2013.01); F04С 2/08(2013.01); F04С 15/00 (2013.01) F04С 29/02 (2013.01); F16С(2013.01) Gear pump (2024)/ Rene Triebe, Mare Finkelder
7. Патент США US20230321887 А1, МПК В29В11/16, В29С 48/695, В29с 48/37 Device and Method for Controlling the Feed of Polymer Melt (2023)/ Dieter Gross, Sebastian Jost, Andreas Stuber
8. Патент Німечина WO2006087208 А1, МПК F16С 37/00 (2006/01) F04С 2/18 (2006/01)Gear pump (2006)/Alexander Jorg
9. Патент Німечина WO2015048984 А1, МПК F04С 2/18 (2006/01); F04С 15/05 (2006/01); F04С 13/00 (2006/01); F04С 2/08 (2006/01); Gear pump with improved inlet (2015)/ Heinen Michal, Triebe Rene
10. Патент США US7648658 В2, МПК В29В47/06, В29С 47/56, В29С 47/92 Alternate polymer extrusion method with reduced drool (2010) / Robert davis, Joseph Lteson . <https://patents.google.com/patent/US7648658B2/en>.

11. Дослідження лінії для виробництва рукавної полімерної плівки. Методичні вказівки / Укл.: Л.Б. Радченко, М.П. Швед, А.Р. Степанюк, І.О. Мікульонок. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 44 с.

12. Швед М. П. Переваги використання каскадних схем та дозуючих шестеренних насосів при екструзії полімерів. *Міжнародний науковий журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва»*. 2013. №1 / 2 (9). С. 21–25.

13. Швед Д.М. Процес екструзії полімерів на каскадному дисково-шестеренному екструдері// Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, Київ, 2017

14. Швед Д.М. Черв'ячно–шестеренний екструдер при переробці полімерних матеріалів / М.П. Швед, Д.А. Степанюк, Д.М. Швед // Міжнародний науковий журнал «Science Rise» – 2015. – №3/2 (8) – С.31–34.ISSN 2313–6286. \

15. «Промислові полімери та основи технології виробництва полімерних матеріалів»: навчальний посібник до дисципліни та практикумів для студентів хімічного факультету / упорядн. І. О. Савченко, В. Г. Сиромятніков. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2012. 112 с.

16. Сокольський О.Л., Сівецький В. І., Мікульонок І. О. Проектування формувальних пристроїв обладнання для перероблення пластмас : навч. посіб. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2-ге вид. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 159 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/64996>

17. Малишевська О. С. Досвід і перспективи вирішення проблеми поводження з полімерною упаковкою у світі та Україні. Біологія, біотехнологія, екологія. 2018. № 5 (75). URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/viewFile/dopovidi2018.05.002/10123>

18. Keller R., & Behrendt, N. Gear Pumps in Polymer Processing. Hanser Publishers, Munich, 2018. 244 p.

19. Ebnesajjad, S. Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics: Properties, Processing and Applications. — Elsevier / William Andrew, 2013. — 462 с.
20. Biopolymers and Composites – Processing and Applications — огляд обробки та застосування біополімерів та композитів.
https://dokumen.pub/handbook-of-biopolymers-1st-ed-2023-9811907099-9789811907098.html?utm_source=chatgpt.com
21. Техника переработки пластмасс / под ред. Н. И. Басова, В. М. Броя. — М.: Химия, 1985. — 528 с.
22. Jamshidian, M., Tehrany, E. A., Imran, M., Jacquot, M., & Desobry, S. Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2010, 9(5), pp. 552–571.
23. Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі й чавуни: Навчальний посібник. — К.: ІЗМН, 1999. — 148 с.
24. Радченко Л. Б. Моделювання неізотермічних процесів переробки термопластів методом екструзії. // Хімічна промисловість України . - №4, 1999. — с. 40-44.
25. Басов М. І., Казанков Ю. Ю., Любартович В. А. Розрахунок і конструювання обладнання для виробництва та переробки полімерних матеріалів. — Москва: Хімія, 1986. — 486 с.
26. Киркач Н. Ф., Баласанян Р. А. Розрахунок деталей машин: Навчальний посібник. — Харків: Основа, 1991. — 276 с.
27. Обладнання для одержання і формування полімерних композиційних матеріалів / Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, Г. Л. Рябцев, М. В. Сезонов // Хім. промисловість України. — 2001, №6.
28. Остапчук Ю. Г., Язловицький М. Л., Бернацький В. В. Дискові екструдери. Х., Техніка, 1972 — 132 с.

29. Жидецький В. Ц., Джигрей В. С. Практикум із охорони праці. Навч. посібн. / За ред. В. Ц. Жидецького. – Львів: Афіша, 2000. – 352 с.

30. Методичні рекомендації до виконання розділу «Охорона праці і безпека у надзвичайних ситуаціях» у магістерській дисертації для студентів енергетичних спеціальностей за освітньокваліфікаційним рівнем «магістр» / Укл.: Л. Д. Третьякова. – К.: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2014. – 22 с

31. Охорона праці та цивільний захист [Електронний ресурс] : підручник для студентів, які навчаються за спеціальностями галузей знань «Автоматизація та приладобудування» / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний, Ю. О. Полукаров, О. В. Землянська ; за ред. О. Г. Левченка. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 420 с. – Назва з екрана.

32. Приймак, Б. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Б. І. Приймак ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 7,47 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 310 с. – Назва з екрана.

33. Конструювання та розрахунок фланцевих з'єднань: Навч. посібник / В. Г. Доброногов, І. О. Мікульонук. – К.: НМК ВО, 1992. 104 с

34. Маркетинг стартап-проектів : навчальний посібник для усіх спеціальностей другого освітнього ступеню «магістр» / С. О. Солнцев, О. В. Зозульов, Н. В. Юдіна, Т. О. Царьова, Н. В. Язвінська ; за заг. ред. С.О. Солнцева ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 218 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27437>

35. Розроблення стартап-проекту : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.

36. Semeniuk, S., Levytskyi, V., Fomina, O., Fedorchenko, K., Yudina, N., Ratynskiy, V., Shcherbatiuk, O., Bendiuh, V., & Zhurakivska, Y. (2024).

Overcoming barriers to digitalization of small and medium-sized enterprises under martial law. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(13 (129), <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304997> .

37. Yudina N. V. Methods of the Startup-Project Developing Based on ‘the Four-Dimensional Thinking’ in Information Society // Marketing and Management of innovations. 3’2017, P. 245-256. DOI:10.21272/mmi.2017.3-23 <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2017/3/245-256>.

38. Yudina, N. Economic “Butterfly” and Futurology of the War in Ukraine. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. №23 (2022). PP. 77-82. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.23.2022.264637>.

39. Yudina, N. Algorythm Of Marketing Decision Making. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. №22 (2022). PP. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.22.2022.260163>.

40. Yudina, N. Future Study Implementation Into Marketing Activity Of Companies. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2021. №19 (2021). PP. 1-9 URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/240315>.

41. Yudina, N., Pidlisna, O. Marketing Perception Of Technological Uncertainty By Decision-Makers. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2021. №18 (2021). PP. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.18.2021.238105>.

42. Yudina, N., Instrumenty Zarządzania Przyszłością. Marketing Instytucji Naukowych I Badawczych, Vol. 38, Issue 4,, 2020, Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa. Poland, Warszawa, p. 1-19 ISSN 2353-8503 eISSN 2353-8414. http://minib.pl/wp-content/uploads/2020/12/4-Yudina_pl.pdf. DOI: 10.2478/minib-2020-0027.

43. Yudina, N. Business Forecasting of Marketing Activity Riskiness of Companies in Markets. Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". №17(2020). P. 372-383. URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/216380/>.

44. Інтелектуальна власність [Електронний ресурс] : навч. посіб. / І. О. Мікульонок. – 3-тє вид., переробл. і допов. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 239 с. – Бібліогр.: с. 228.

Додаток А

Автоматизація екструдера

Автоматизація дисково-шестеренного екструдера

А.1 Постановка задачі автоматизація дисково-шестеренного екструдера

Лінія створена на базі дискового екструдера з використанням обладнання для виробництва рукавної плівки. В якості вузла підвищення тиску використовується модифікований шестеренний насос НШ-20 з приводною станцією.

До складу установки входить (див. рисунок А.1 та А.2):

1. Дисковий екструдер ЕД-7,5 (4)
2. Шестеренний насос (10) типу НШ-20.
3. Головка кільцева (11) для виробництва плівки шириною від 200 до 600 мм та товщиною від 8 до 15 мкм.
4. Пристрій складуючий (5).
5. Пристрій прийомно-тягнучий (7)
6. Різноманітні пристрої охолодження (6) плівкового рукава.
7. Автоматичний намотувальний пристрій (10).
8. Шафа теплової автоматики, автоматики приводів лінії.
9. Пульти керування.

Експериментальні дослідження проводили на різних режимах:

- а). Швидкісних, при зміні швидкості обертів приводу насоса та шнекового живильника та зміні робочого зазору між дисками;
- б). Теплових, при різних температурних умовах переробки термопласту та охолодження рукава.

Після виходу обладнання на відповідний встановлений режим роботи (швидкісний, тепловий) проводимо заміри та реєстрацію наступних величин:

- а). Швидкості обертів насоса, дискового екструдера, шнекового живильника та намотувального пристрою,

- б). Температури корпусу нерухомого диску, перехідника, корпусу насоса та формуючої головки;
- в). Продуктивності екструдера;
- г). Вживаної потужності двигунами приводу диска, насоса та шнекового дозатора;
- д). Температури навколишнього середовища, температури розплаву в перехіднику на виході з робочого зазору;
- е). Тиск розплаву перед насосом та після нього;
- ж). Параметри рукава, якість рулону та виготовленої плівки.

Таблиця А.1. Технічні параметри екструдера каскадного дисково-шестеренного (ЕКДШ)

Найменування параметра	Показник
Перероблюваний матеріал	біо-полімер полілактид PLA марка Ingeo 2003D за EU Plastics Regulation 10/2011
Максимальна продуктивність в складі лінії для виробництва рукавної плівки, кг/год	36
Діаметр диска, мм	230
Частота обертів диска об/хв.	15-175
Діапазони регулювання робочого зазору, мм	0,5-5
Кількість шестеренних коліс	2
Модуль зачеплення, m	2,25
Кількість зубів, z	20
Ширина зуба, мм	32
Частота обертів шестерень об/хв	0-40
Опір формуючої головки, мПа	25
Встановлена потужність	
- Шнекового дозатора	0,2
- Дискового екструдера	75,0
- Шестеренного насоса	2,02
- Нагрівників	3,5

Швидкість обертів визначається по шкалі відградуйованого самопишучого приладу постійного струму типу Н-372 (клас точності 1,5, виміряна напруга не більше 500V).

Датчиком індикатора швидкості насосу є тахогенератор типу ТМГ-30П ($n=4000$ об/хв.), встановлений з тильної сторони електродвигуна постійного струму типу П-32 ($n=1000$ об/хв., $N=1$ квт, $I=5,7$ А) за допомогою пружного з'єднання, що виключає проковзування валів.

Швидкість шнекового живильника визначається по шкалі від градуйованого самопишучого приладу змінного та постійного струму типу Н-372 (клас точності 1,5, виміряна напруга не більше 500V).

Швидкість обертів ротора дискового екструдера постійна (250 об/хв.) та контролюється так само як і швидкість обертів інших електродвигунів за допомогою тахометра типу ІО-30 з пружним наконечником, попередньо протарированому за допомогою зразкового тахометра.

Температурний режим в головці, насосі, перехіднику та диску задається та фіксується електронними автоматичними потенціометрами типу ЕПВ-2-11А та ЕПВ2-04 (клас точності 0,5, шкала 0-300°C, група ХК), встановленого в окремій шафі.

Продуктивність екструдера по розплаву визначається шляхом зважування окремих злитків розплаву, видавленого екструдером за певний проміжок часу при встановленому режимі роботи екструдера.

При виготовленні плівки продуктивність замірюється за швидкістю витяжки та ваги 1 погонного метру плівки на аналітичних вагах. Встановлений режим визначаємо за трикратним заміром фіксованих параметрів, що дадуть один і той самий результат потужності двигунів, продуктивності, тиску та температури розплаву.

Температура розплаву полімеру в формуючій головці реєструється та записується за допомогою автоматичного самопишучого потенціометра типу ПСР-01 (клас точності 0,5; група ХК, шкала 0-200°C). В якості датчиків температури використовують 6 термопар типу ХК, розташованих в тефлоновому

кільці, що встановлено в матриці так, що приблизно половина гарячого спаю термопари омивається розплавом полімеру. Перед встановленням в головку, матриця разом з термопарами була проградуйована до 150°C в термостаті типу ТС-15М, заповненому маслом марки «циліндрове-6».

Використовувана потужність 3-х фазного коротко замкнутого електродвигуна приводу ротора типу АО2-42-4 ($N_d=7,5$ кВт, $n=1450$ об/хв.) записувалась самопишучим 3-х фазним ватметром типу Н-348 (клас точності 1,5) з трансформаторами струму типу І54 для зміни меж вимірювань, а також контролювалась переносним вимірювальним комплектом типу К-51.

Використовувана потужність електродвигуна постійного струму приводу насоса визначалась непрямим методом шляхом вимірювання струму самопишучим амперметром типу Н-370 (межа вимірюваного струму до 5А при $V=50mV$, клас точності 1,5) та напруги – самопишучим вольтметром типу Н-372 (межа вимірюваної напруги до 500V, клас точності 1,5).

Використовувана потужність визначалась шляхом перемножування показів вольтметра та амперметра.

Для заміру тиску розплаву полімеру використовуються датчики мембранного типу. Вони встановлюються до входу в насос, в перехіднику між корпусом диску та насосу, та після насосу.

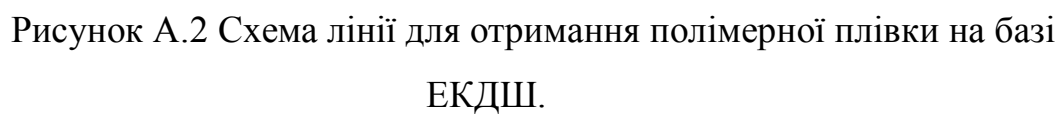
В залежності від величини вимірюваного тиску, тим товстішою повинна бути мембрана.

В якості основного матеріалу мембран використовувався пермалой, котрий володіє стійкими пружними властивостями.

Під час проведення дослідів проводилась візуальний запис показів датчика. Перед установкою датчиків тиску проводилась їх попереднє тарування на спеціальному стенді та будувалась тарувальна крива. Для виключення впливу температурних розширень на покази датчика під час замірів корпус його охолоджується водою.

Опис експериментальної установки

Каскадний дисково-шестеренний екструдер рисунок А.1, до складу якого входять шнековий дозатор 6, дисковий екструдер 4 і нагнітальний дозуючий шестеренний насос 10. Особливістю такого екструдера є те, що всі три пристрої оснащені приводами 2,5,8 з можливістю безступінчастого регулювання кутової швидкості робочих органів, а також те, що між дисковим екструдером і шестеренним насосом встановлено компенсатор 1, який має зворотній зв'язок із приводом дозатора та узгоджує продуктивність дозатора і шестеренного насоса. Перероблюваний полімер з бункера 3 дозується в завантажувальну горловину 6 дискового розплавлювача-гомогенізатора, де він захоплюється багатозахідною гвинтовою нарізкою завантажувально-пластикувальної зони, розігрівається за рахунок енергії дисипації і у вигляді напіврозплаву надходить у торцевий робочий зазор 9 дискового екструдера, де завершується плавлення полімеру і гомогенізація розплаву. Під дією вакууму, створеного в шестеренному насосі та тиску, що забезпечується завантажувально-пластикувальною зоною та ефектом Вайссенберга, розплав заповнює міжзубні западини шестерень, які під час обертання забезпечують сталу продуктивність і тиск розплаву, необхідний для його проходження крізь формувальний інструмент 11. В результаті попередніх розслідувань роботи дискового екструдера з шестеренним насосом нами була створена експериментальна установка, схема та загальний вигляд якої представлені на рисунку 3.2. та 3.3 відповідно.



А.2 Дисковий екструдер, як об'єкт автоматизації

Параметри що підлягають автоматизації та їх основні характеристики наведено в таблиці А.2

Таблиця А.2 - Параметри регулювання та контролю процесу

№ п/п	Найменування стадії екструзії, місце заміру параметра	Найменування параметра, що контролюється чи регулюється	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Вимоги до рівня автоматизації (контроль, регулювання, сигналізація)
1	2	3	4	5
1	Зона плавлення (1,2,3)	Температура	140 °С	Контроль, регулювання, сигналізація, реєстрація, індикація
2	Зона гомогенізації (4,5)	Температура	200 °С	Контроль, регулювання, сигналізація, реєстрація, індикація
3	Формуюча головка (6)	Тиск	30 МПа	Контроль, регулювання, сигналізація, реєстрація, індикація
4	Формуюча головка (7)	Температура	200 °С	Контроль, регулювання, сигналізація, реєстрація, індикація
5	Електродвигун (8)	Оберти	1500 об/хв.	Контроль, регулювання, сигналізація, реєстрація, індикація

В пресі має контролюватись та автоматично забезпечуватись: необхідний тиск в формуючій головці, за рахунок підтримки належних обертів двигуна; температура розплаву за рахунок електронагрівачів, встановлених на корпусі преса.

А.3 Система автоматизації дискового екструдера

А.3.1 Автоматичний контроль

В дисковому пресі контролюються наступні параметри:

1. Температура розплаву полімера контролюється ланцюгом: термopapa ТХК-05515 (поз 1-1,...,6-1) → нормуючий перетворювач НП-ТЛ (поз. 1-2,...,6-2) → вторинний показуючий і реєструючий прилад LOGOSCREEN 600 (поз. 1-3,...,6-3);
2. Тиск на виході з формуючої головки : пневмoeлeктpичний перетворювач САПФИР-22ДИ (поз. 7-1) → вторинний автоматичний показуючий і реєструючий прилад nanodac Recorder/Controller (поз.7-2);
3. Кількість обертів черв'яка преса: датчик тахогенератора ТГ-2 (поз. 8-1) → вторинний показуючий прилад (амперметр СА3020) (поз. 8-2).

А.3.2 Автоматичне регулювання

1. Температура розплаву полімера регулюється: вимірюючий блок ІО-04 (поз.1-4,...,6-4) → задатчик реостатний ЗУП (поз. 1-5,...,6-5) → регулюючий блок Р-12 (поз.1-6,...6-6) → станція керування БУ-21 (поз. 1-7,...6-7) → магнітний пускач ПБР-3М (поз. 1-8, 1-9, 2-8 2-9,...,5-8, 5-9, 6-8) → електричний виконавчий механізм МЭО-4.40-68
2. Регулювання тиску на виході з формуючої головки через регулювання обертів черв'яка: задатчик реостатний ЕРС3004 (поз. 7-4) → регулюючий блок Р-12 (поз. 7-3) → блок керування ЕРС3004 (поз. 7-5) → вимірюючий блок Н7ЕС-Н (поз. 8-3) → автоматичний регулюючий блок кількості обертів Altivar Machine ATV320U40N4 (поз. 8-4).

А.3.3 Технологічна сигналізація і захист

Система сигналізації працює наступним чином. Якщо в автоматичному контурі регулювання температур № 1, 2, 3, 4, 5, 6, значення параметра не відповідає допустимій нормі робочої температури, то автоматично вмикається сигналізація. Система оповіщає оператора преса про вихід технологічного параметра за задані межі: HL1 - вихід параметру за нижню допустиму границю значення, HL2 - вихід параметру за верхню допустиму границю значення.

В каскадному контурі регулювання тиску № 7-8, при виході технологічного параметра за задані межі, загоряються лампочки: HL15 - вихід параметру за нижню допустиму границю значення, HL16 - вихід параметру за верхню допустиму границю значення. Вмикається автоматична звукова сигналізація, якщо поточне значення тиску перевищує допустиму норму. У тому випадку якщо поточне значення перевищує критичну норму, то вмикається захист, після чого сигнал потрапляє на вимикання установки, тобто на пункт керування HSA (позиція 10-1).

Сигнальні лампочки HL17 – сигналізують про коректну роботу всього преса, а HL18 – про аварійний режим роботи.

Система сигналізації привертає увагу оператора не тільки візуально, а й за допомогою звуку. Для цього передбачений контур 9 з дзвінком, який спрацьовує при відхиленні технологічного параметра за критичні межі.

А.3.4 Дистанційне керування

На щиті автоматизації використовується блоки керування EPC3004 (позиція 1-7,...6-7, 8-5, 10-2), які подають сигнал на магнітні пускачі TeSys LC1-K09 (позиція 1-8, 1-9, 2-8 2-9,...,5-8, 5-9, 6-8, 10-2), що розміщені по місцю.

Пуск або зупинка привода преса відбувається на щиті автоматизації за допомогою ключа на станції керування Eurotherm 3216 (поз.10-1).

Висновок

У результаті проведеної роботи розроблено комплексну систему автоматизації дисково-шестеренного преса, яка забезпечує стабільний і керований процес переробки полімерних матеріалів у технології виготовлення рукавної плівки. Автоматизація охоплює ключові технологічні параметри: підтримання температури в окремих зонах екструдера, контроль і регулювання тиску в формуючій головці, а також стабілізацію частоти обертання черв'яка.

Виконані технічні рішення дали можливість створити інтегровану систему керування, що включає сучасні вимірювальні, реєструючі та регулюючі пристрої, здатні працювати в безперервному циклі й оперативно реагувати на будь-які відхилення параметрів від заданих значень. Такий підхід забезпечує високу точність контролю, своєчасне коригування режимів роботи преса та захист обладнання від аварійних ситуацій.

Автоматизована система дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, підвищити стабільність технологічного процесу та досягти високої повторюваності якості готової продукції. Забезпечення оптимальних температурних і тискових режимів сприяє покращенню структури полімерного розплаву, зменшенню внутрішніх напружень у плівці та підвищенню її експлуатаційних характеристик. Додатковою перевагою впровадження автоматизації є зростання енергоефективності та надійності роботи преса. Завдяки чіткій координації роботи нагрівачів, привода та формуючої головки вдається зменшити втрати енергії, оптимізувати цикл розігріву та виключити ризик перегріву матеріалу або перевантаження обладнання.

Таким чином, запропонована система автоматизації дисково-шестеренного преса забезпечує високий рівень технологічної керованості, підвищує продуктивність виробництва, зменшує кількість браку та створює умови для впровадження більш складних і високоточних процесів переробки по-

лімерів. Впровадження такої системи є технічно обґрунтованим та економічно доцільним кроком у модернізації виробництва полімерної продукції.

Таблиця А.3 Замовна специфікація засобів автоматизації

№ позиції на схемі	Найменування параметра	Граничне значення параметру	Місце встановлення	Найменування та характеристика	Тип моделі	Кількість	Місце виготовлення
1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 5-1, 6-1	Температура в зонах екструдера і в головці	200 °C	Корпус червячного екструдера	Термопара	ТХК-05515	6	«Львів-прилад», м.Львів
1-2, 2-2, 3-2, 4-2, 5-2, 6-2	Перетворення сигналу в електричний	(0...5 мА)	щит КВП	Нормуючий перетворювач	НП-ТЛ	6	«Термоприлад» м. Львів
1-3, 2-3, 3-3, 4-3, 5-3, 6-3	Температура стінки	200 °C	щит КВП	Вторинний прилад	LOGOSCREEN 600	6	ЛУМО, Німеччина
1-4, 2-4, 3-4, 4-4, 5-4, 6-4	Температура стінки	200 °C	щит КВП	Вимірюючий блок	SIMATIC S7-1200	6	Siemens , Німеччина
1-5, 2-5, 3-5, 4-5, 5-5, 6-5	Температура стінки	200 °C	щит КВП	Задатчик реостатний	ППЗ	6	ПрОТОН (Україна)
1-6, 2-6, 3-6, 4-6, 5-6, 6-6	Температура стінки	200 °C	щит КВП	Регулюючий блок	ЕРС3004	6	Schneider Великобританія
1-7, 2-7, 3-7, 4-7, 5-7, 6-7	Температура стінки	200 °C	щит КВП	Блок керування	ЕРС3004	6	Schneider Великобританія
1-8, 1-9, 2-8, 2-9, 3-8, 3-9, 4-8, 4-9, 5-8, 5-9, 6-8	Температура стінки	200 °C	місцеве	Магнітний пускач	TeSys LC1-K09	11	Schneider Великобританія

7-1	Тиск на вході в головку	30 МПа	щит КВП	Пневмоелектричний перетворювач	САПФИР-22ДИ	1	«Промприлад», м.Івано-Франк.	7-1	Тиск на вході в головку
7-2	Тиск на вході в головку	30 МПа	щит КВП	Вторинний автоматичний прилад	nanodac Recorder/Controller	1	Schneider Великобританія	7-2	Тиск на вході в головку
7-3	Тиск на вході в головку	30 МПа	щит КВП	Регулятор	P-12	1	«Львів прибор», м.Львів	7-3	Тиск на вході в головку
7-4	Тиск на вході в головку	30 МПа	щит КВП	Задатчик реостатний	ЕРС3004	1	Schneider Великобританія	7-4	Тиск на вході в головку
7-5	Тиск на вході в головку	30 МПа	щит КВП	Блок керування	ЕРС3004	1	Schneider Великобританія	7-5	Тиск на вході в головку
8-1	Частота обертання двигуна	1500 об./хв.	Місце	Тахогенератор	ТГ-2	1	Поставляється разом з двигуном	8-1	Частота обертання двигуна
8-2	Частота обертання двигуна	1500 об./хв.	щит КВП	Амперметр	СА3020	1	«Западприбор», м.Львів	8-2	Частота обертання двигуна
8-3	Частота обертання двигуна	1500 об./хв.	щит КВП	Вимірюючий блок	Н7ЕС-Н	1	Omron Японія	8-3	Частота обертання двигуна
10-1	Температура на стінці циліндра	200° С	Щит КВП	Панель ручного керування	Eurotherm 3216	1	Schneider Великобританія	10-1	Температура на стінці циліндра
10-2	Температура на стінці циліндра	200° С	місцевий	Магнітний пускач	TeSys LC1-K09	1	Schneider Великобританія	10-2	Температура на стінці циліндра
НЛ 1-НЛ 18	Світлова сигналізація	-	щит КВП	Сигнальна лампа	Harmony XB5	18	Schneider Франція	НЛ1 - НЛ18	Світлова сигналізація

Додаток Б

CFD моделювання

CFD аналіз роботи нової конструкції шетреного насоса лінії каскадної екструзії для біо-полімерів

Вступ

У сучасному хімічному та полімерному машинобудуванні значна увага приділяється підвищенню ефективності обладнання для перероблення високо-в'язких полімерних матеріалів, зокрема біорозкладних термопластів типу PLA, PHA та PBAT. Зростання попиту на біополімери спричинене потребою у зменшенні екологічного навантаження, переходом до технологій низьковуглецевого виробництва та посиленням вимог щодо екологічної безпеки упаковки. Проте, на відміну від традиційних поліетиленів і поліпропіленів, біополімери характеризуються значно вищою в'язкістю, нестабільністю реологічних властивостей та підвищеною чутливістю до температурних і гідродинамічних коливань.

Одним із ключових елементів екструзійних ліній, що забезпечує стабільність подачі полімерного розплаву, є шестеренний насос. Його призначення полягає у формуванні постійного, рівномірного тиску перед екструзійною головкою. Для перероблення PLA та сумісних біополімерів стабільність тиску відіграє особливо важливу роль, пульсації подачі та локальні перегріви призводять до деградації матеріалу, зміни молекулярної маси, появи внутрішніх напружень у готових виробах та коливань товщини плівки.

У зв'язку з цим виникає необхідність модернізації геометрії вхідної зони шестеренного насоса, зокрема оптимізації форми каналу підведення розплаву, кута нахилу стінок та розподілу швидкості потоку. Вдосконалення конструкції дозволяє зменшити інтенсивність рециркуляційних зон, забезпечити стабільніше заповнення міжзубцевих об'ємів та знизити гідродинамічні втрати.

Одним із найбільш ефективних інструментів для оцінки поведінки потоку в шестеренному насосі є CFD-моделювання, яке дозволяє візуалізувати

просторові поля швидкості та тиску, оцінити пульсації подачі та визначити ключові конструктивні недоліки без проведення тривалих експериментів. CFD-аналіз є сучасним і широко прийнятим методом дослідження гідродинаміки полімерних розплавів, оскільки враховує їх неньютонівську поведінку та складні режими течії в зоні зачеплення.

Тому актуальним є дослідження впливу модернізованої вхідної геометрії шестеренного насоса на рівномірність подачі високо-в'язких біополімерів PLA та зниження гідродинамічних пульсацій. Підвищення стабільності подачі розплаву є ключовою умовою для забезпечення високої якості біополімерних плівок і підвищення ресурсу роботи обладнання в екструзійних лініях.

Метою роботи є оцінка ефективності модернізованої конструкції шестеренного насоса шляхом проведення CFD-моделювання.

Матеріали та методи

CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics) ґрунтується на числовому розв'язанні системи рівнянь нерозривності та збереження імпульсу для в'язкої нестисливої рідини. Для розрахунків використано програмний комплекс SolidWorks Flow Simulation, який реалізує метод скінченних об'ємів. Область розрахунку розбивається на сукупність контрольних об'ємів (елементів сітки), для кожного з яких інтегральна форма рівнянь Нав'є–Стокса апроксимується алгебраїчними співвідношеннями. В результаті формується система лінійних рівнянь відносно тиску та компонент швидкості, яка розв'язується ітераційними методами до досягнення збіжності.

Геометрію насоса побудовано в середовищі **SolidWorks** на основі робочих креслень. Модель включає:

- корпус із вхідним і вихідним каналами;
- два співвісні зубчасті колеса (ведуче та ведене);
- вали, що задають обертальний рух шестерень;
- об'єм робочої рідини в міжзубцевих порожнинах та каналах.

Для CFD-аналізу створено обчислювальну область рідини шляхом виконання операції «Виключення твердих тіл» (тіло шестерень задаються як стінки, а розрахунок ведеться в порожнинах між ними). Як робочу рідину прийнято ньютонівську рідину з заданими густиною та динамічною в'язкістю, що відповідають умовам перекачування біополімера. Шестерні задавались як обертові тіла з фіксованою кутовою швидкістю, що відповідає номінальній частоті обертання насоса. Стінки корпусу та кришок – умова «no-slip» (відсутність просковзування).

Результати та їх обговорення

Для вдосконалення конструкції шестеренного насоса було проаналізовано патенти [14], [15]. На їх основі було придумано конструкцію НШ, модель якого наведено на рисунку Б.1.

В основу модернізації покладено задачу вдосконалити шестеренний насос для полімерного розплаву, у якому нова геометрія вхідної зони сприяє рівномірному розподілу потоку по ширині шестерень.

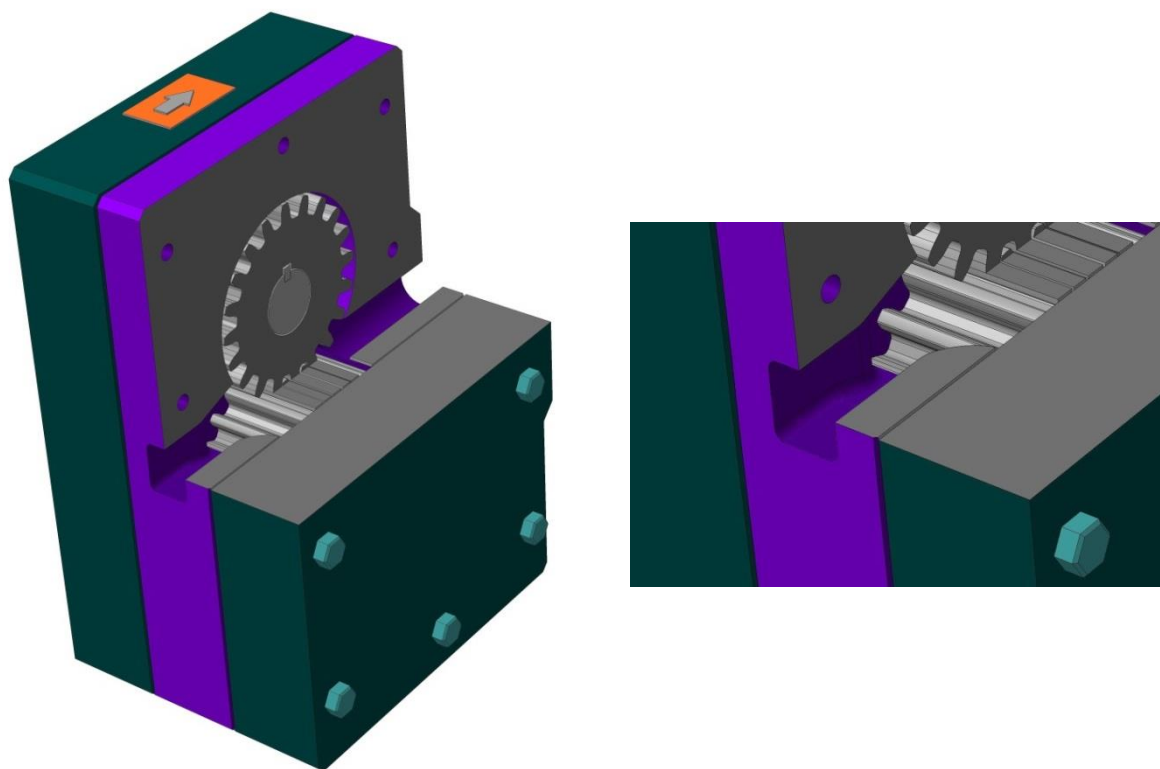


Рисунок Б.1 – Модель шестеренного насоса

Запропоноване конструктивне рішення, включає:

- геометрію вхідного отвору змінено з круглого на прямокутний із заокругленими кутами;
- верхню та нижню стінки каналу виконано з нахилом 25° до дотичної осі шестерень, що забезпечує рівномірний розподіл потоку по ширині;
- вхідна частина має плавне радіусне розширення (типу bell-mouth), аналогічне дифузору Вентурі, яке зменшує гідравлічні втрати та покращує заповнення міжзубцевих порожнин.
- для уникнення налипання біополімерів, поверхні каналу поліруються до $Ra \leq 0,4$ мкм і покриваються антипригарним шаром Ni-PTFE або DLC.

В модулі SOLIDWORKS Flow Simulation було здійснено моделювання руху потоків біо-полімеру в шестеренному насосі. На основі CFD-розрахунку отримано просторові поля швидкості та тиску в об'ємі насоса для базової та модернізованої конструкцій, результати показані на рисунках Б.2 ; Б.3. Та залежність масово усередненого тиску на виході шестеренного насоса від кута повороту шестерні ($0 \dots 360^\circ$), графічне порівняння двох варіантів конструкції наведено на рисунку Б.4.

Візуалізація показала, що:

- у базовому варіанті рисунок Б.2 в зоні входу в міжзубцеві порожнини присутні розвинені зони рециркуляції, спостерігається відрив потоку від стінки та неоднорідне заповнення об'єму між зубцями;
- у модернізованому варіанті рисунок Б.3 завдяки плавнішому підведенню та спрямуванню потоку інтенсивність рециркуляції зменшується, потік більш рівномірно заповнює міжзубцеві порожнини, зникають локальні застійні зони. Градієнт тиску між зоною всмоктування та зоною нагнітання розподілений рівномірніше, знижується локальне перевантаження на зубці в зоні виходу, що потенційно зменшує їх зношування.

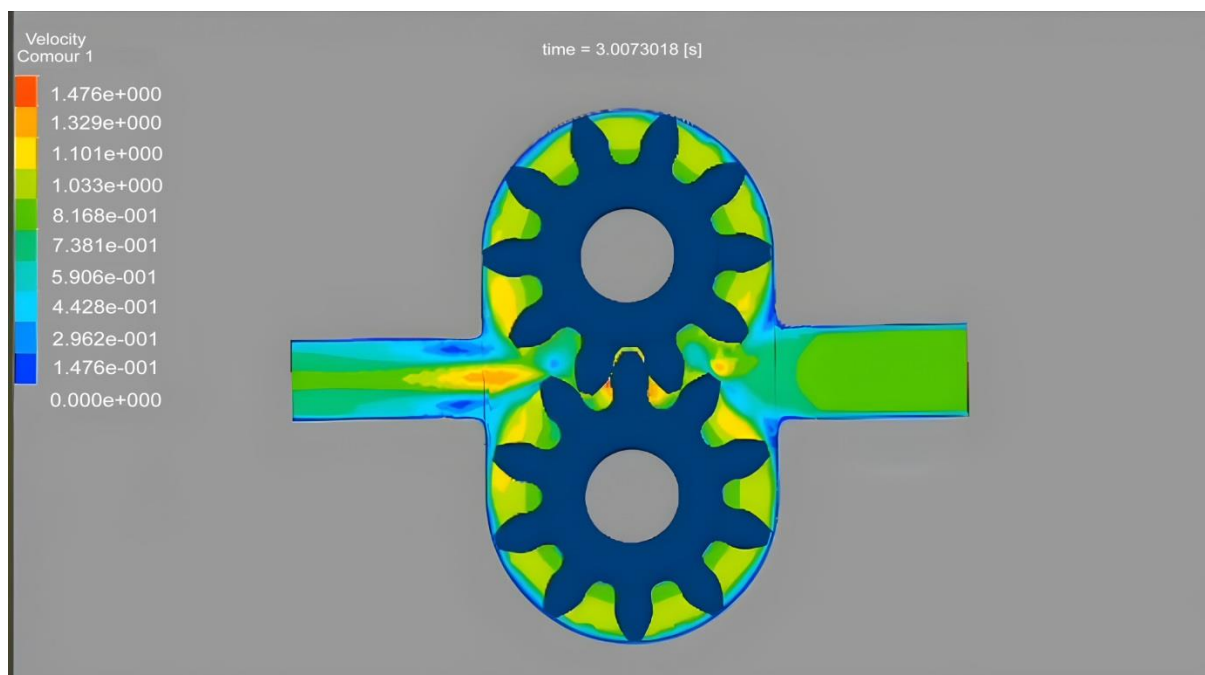


Рисунок Б.2 – Візуалізація потоків полімеру до модернізації

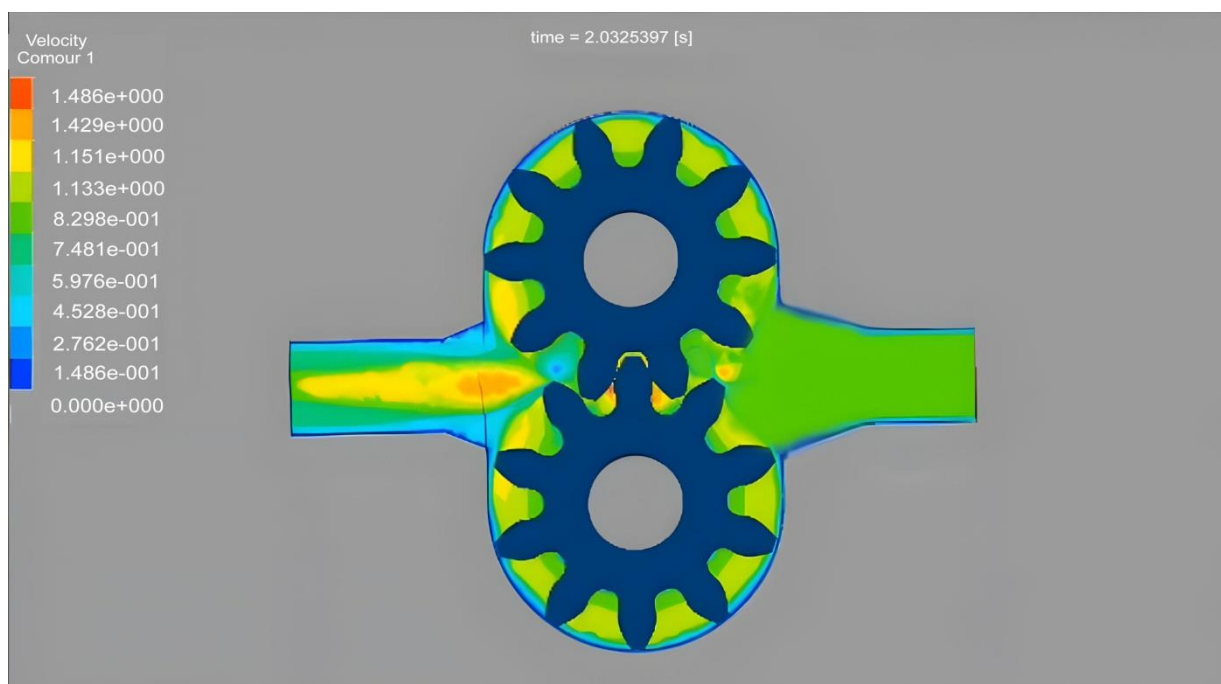


Рисунок Б.3 – Візуалізація потоків полімеру після модернізації

Аналіз інтегральних характеристик показав, що:

- пульсації витрати на виході насоса зменшуються;
- втрати повного тиску в області входу й виходу знижуються завдяки покращенню обтікання;

– підвищується гідравлічний ККД насоса, що може привести до зменшення споживаної потужності приводу при забезпеченні тієї ж продуктивності.

На рисунках Б.2 та Б.3 добре видно, що швидкісні вектори в модернізованій конструкції спрямовані більш упорядковано, а поле швидкостей на виході має меншу нерівномірність.

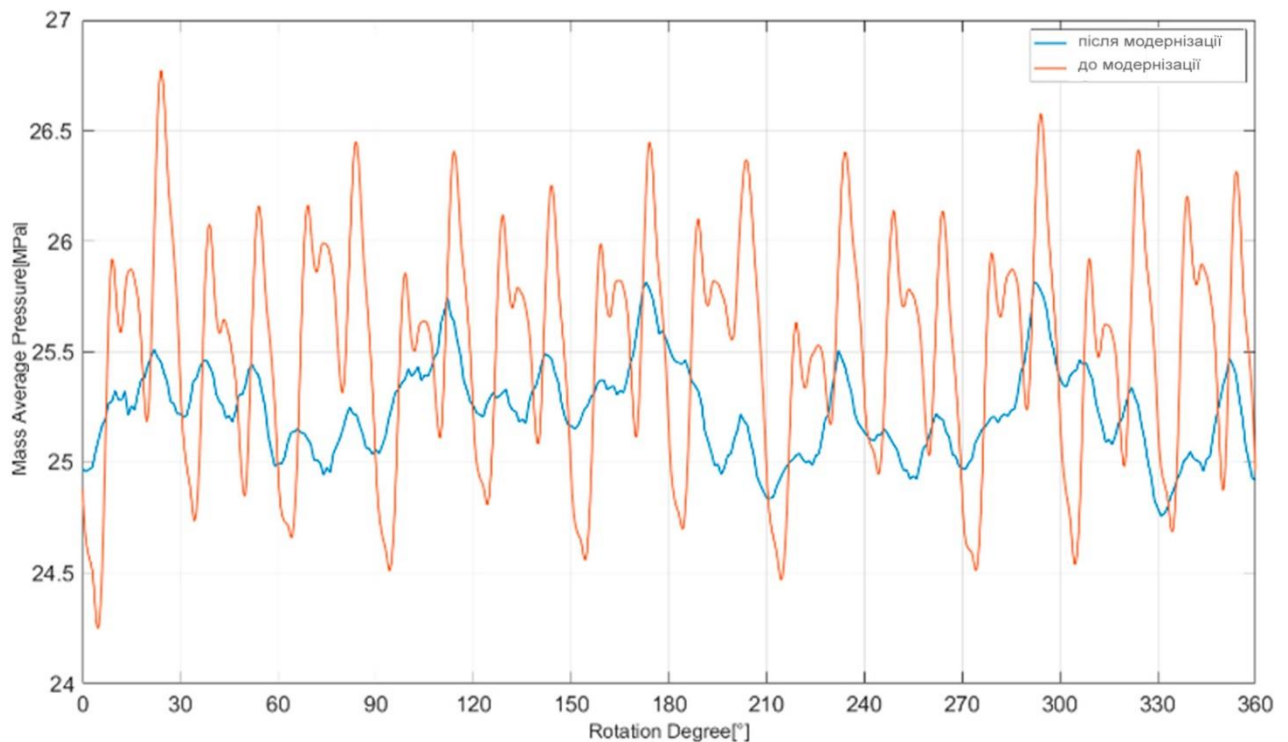


Рисунок Б.4 Графік залежності масового усередненого тиску на виході з шестеренного насоса

Аналіз графіка залежності масового усередненого тиску на виході з шестеренного насоса, рисунок Б.4 показує суттєве покращення стабільності роботи насоса після модернізації:

– для базової конструкції (синя крива «до модернізації») характерними є різкі піки й падіння тиску з амплітудою до 2,3–2,4 МПа. Форма кривої має виражено хаотичний характер із декількома власними гармоніками, що відповідає нерівномірному заповненню міжзубцевих порожнин, наявності потужних вихрових зон та внутрішніх перетікань;

– для модернізованої конструкції (червона крива «після модернізації») амплітуда пульсацій знижується приблизно до 0,45–0,55 МПа, а форма кри-

вої стає згладженою, майже гармонійною. Спостерігається чітко виражений періодичний характер коливань із істотно меншою амплітудою, що свідчить про стабілізований потік у зоні зачеплення шестерень.

Зниження амплітуди пульсацій становить близько 79 %, що підтверджує підвищення рівномірності подачі полімерного розплаву та зменшення гідродинамічних навантажень на зубчасті колеса. При цьому середній рівень тиску після модернізації зменшується приблизно на 0,3–0,4 МПа, що є наслідком зниження локальних втрат у вхідній області та покращення обтікання модернізованого каналу.

Результати впровадження

Таблиця Б.2 Порівняльні випробування модернізованого насоса.

Показник	До модернізації	Після модернізації
Втрати тиску у вхідній камері	0,35 МПа	0,28 МПа
Колівання тиску перед головкою	$\pm(3-4) \%$	$\pm(1-1,5) \%$
Температурний градієнт по ширині насоса	6 °С	3 °С
Рівномірність подачі (по ширині шестерень)	$\pm(10-12) \%$	$\pm 5 \%$
Енергоспоживання приводу	—	–8 %

Отримані дані свідчать, що модернізація сприяє зниженню гідравлічних втрат, покращенню температурної стабільності розплаву та підвищенню рівномірності подачі навіть при роботі з високо-в'язкими біополімерами.

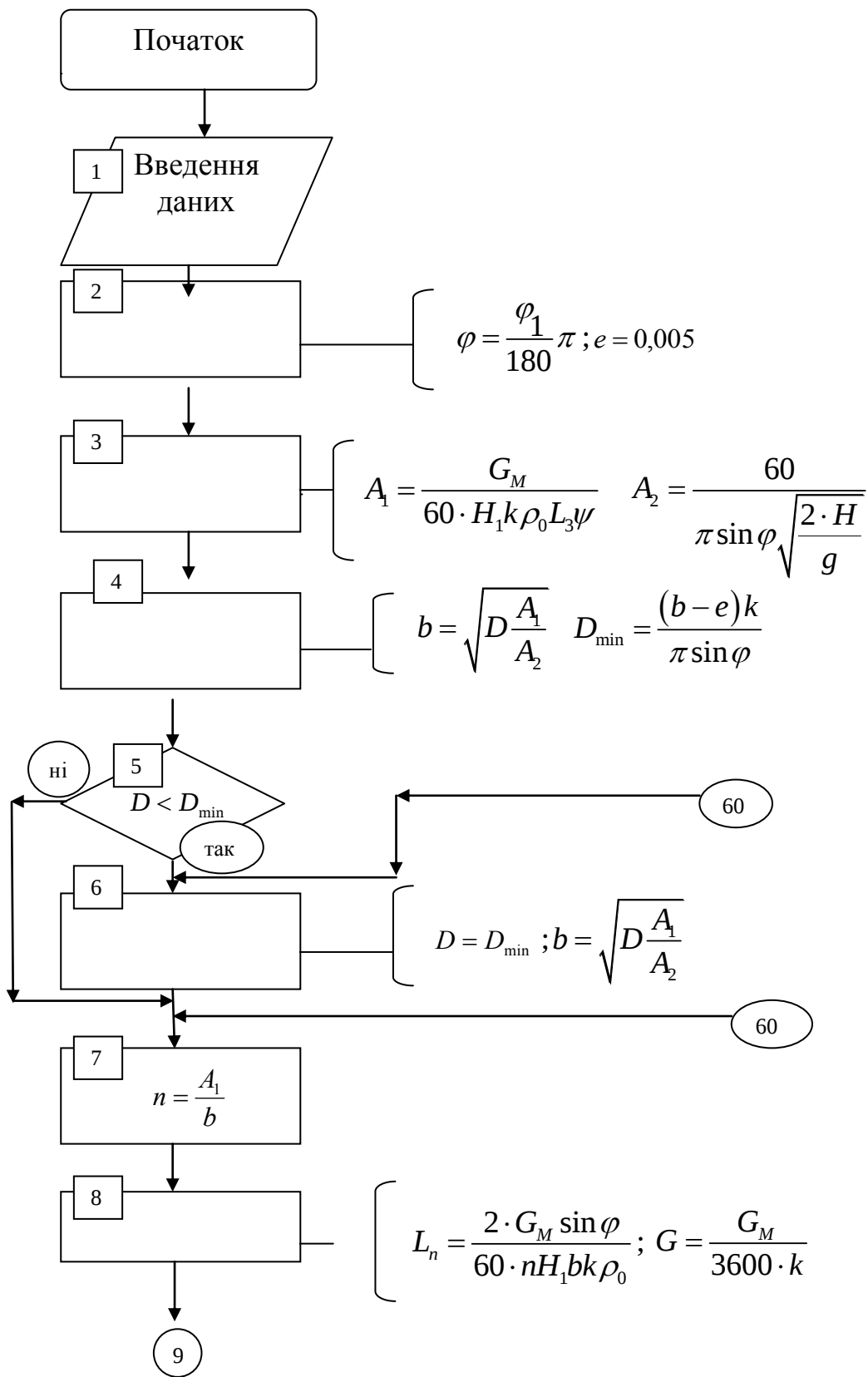
Висновки

Запропонована конструкція входної зони шестеренного насоса забезпечує оптимізований розподіл потоку розплаву, зменшення гідравлічних втрат і стабілізацію тиску у зоні подачі. Вдосконалення дозволяє знизити деградацію біополімерів PLA/PBAT та підвищити якість готової плівки. Розроблене рішення може бути впроваджене у промислові каскадні екструзійні лінії [3] для виготовлення біо- та фоторозкладних полімерних плівок.

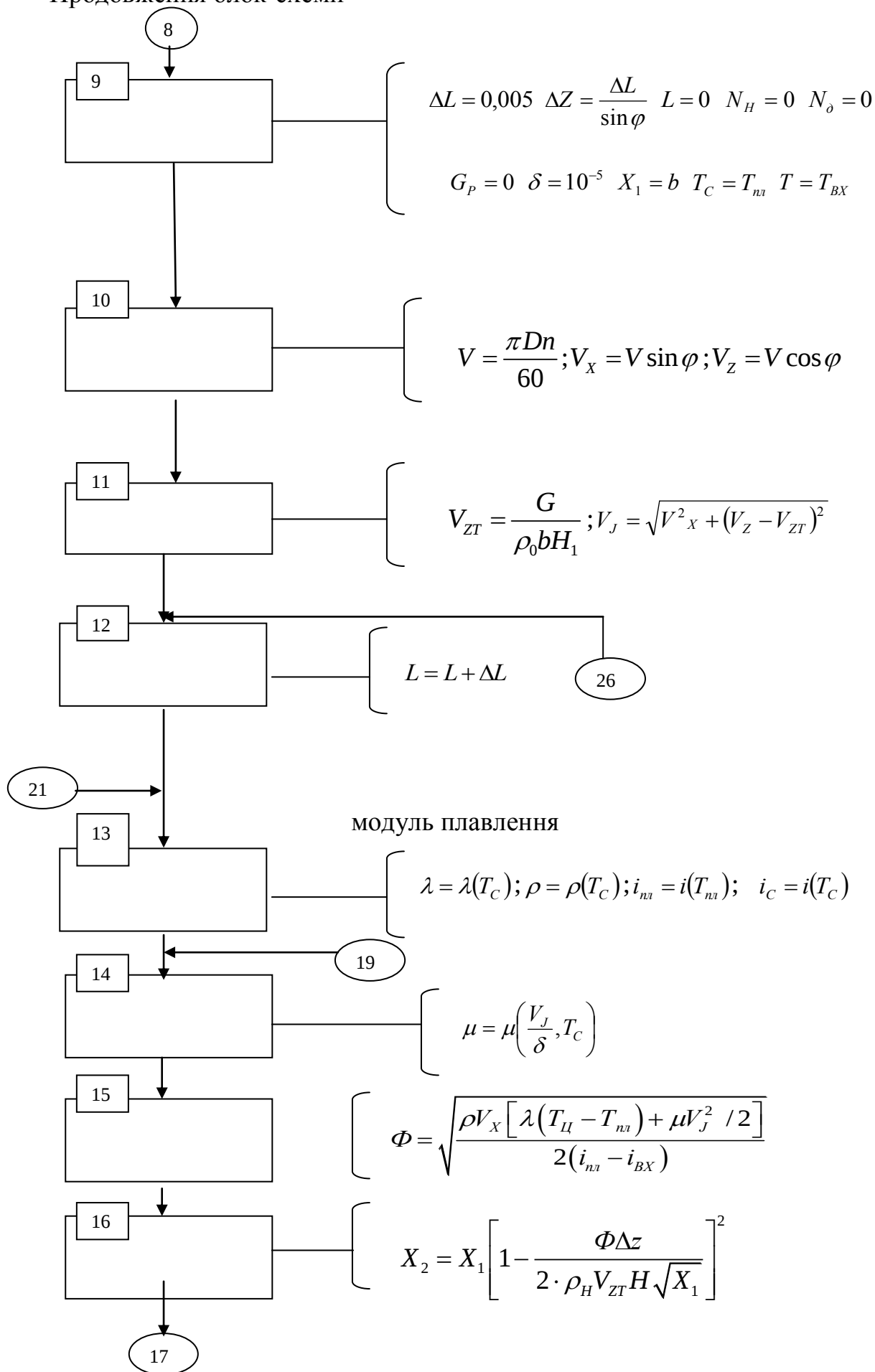
Додаток В

Блок-схема, таблиця ідентифікаторів, опис алгоритму та програма
розрахунку дискового екструдера

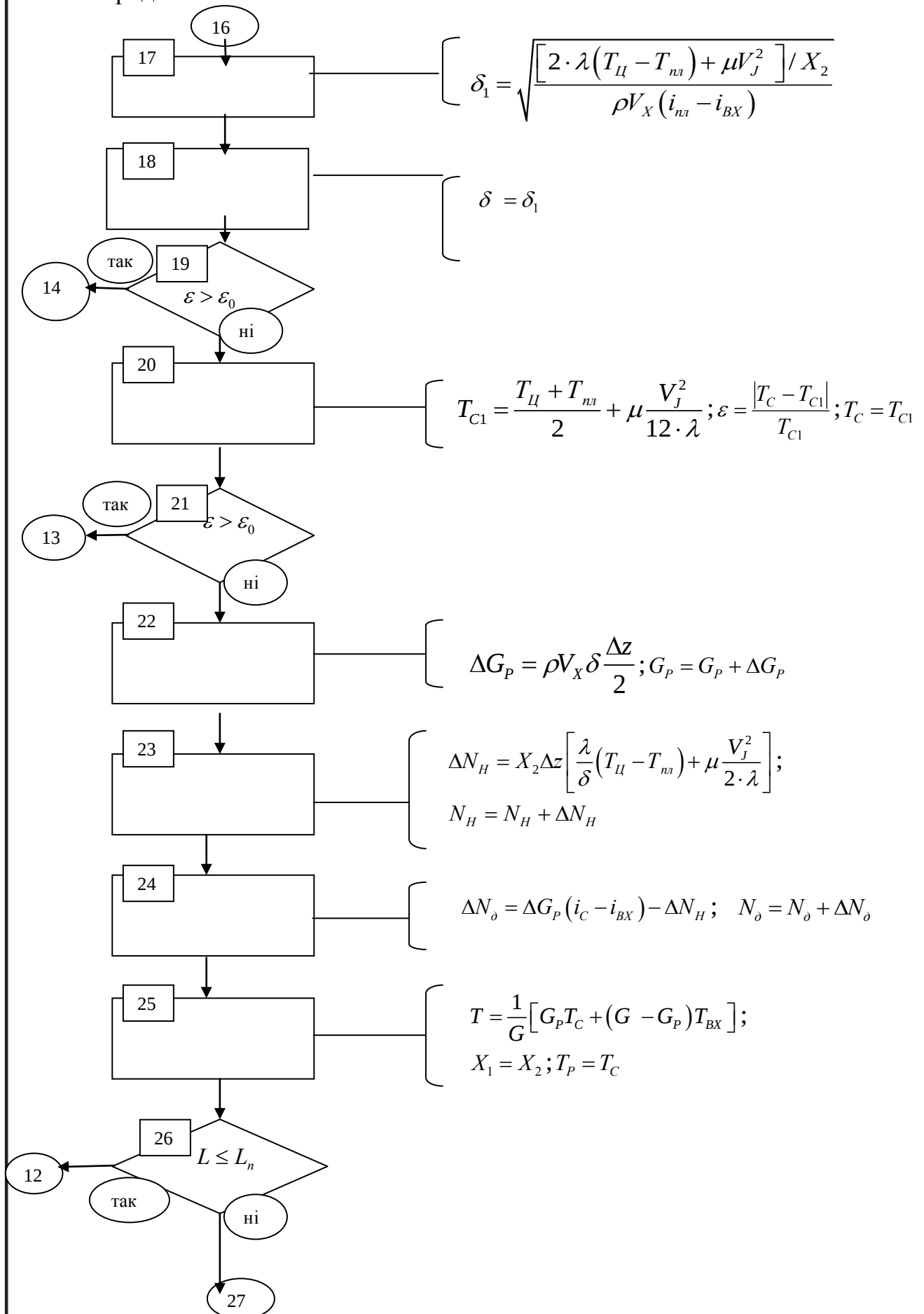
Блок – схема алгоритму розрахунку розрахунку дискового екструдера



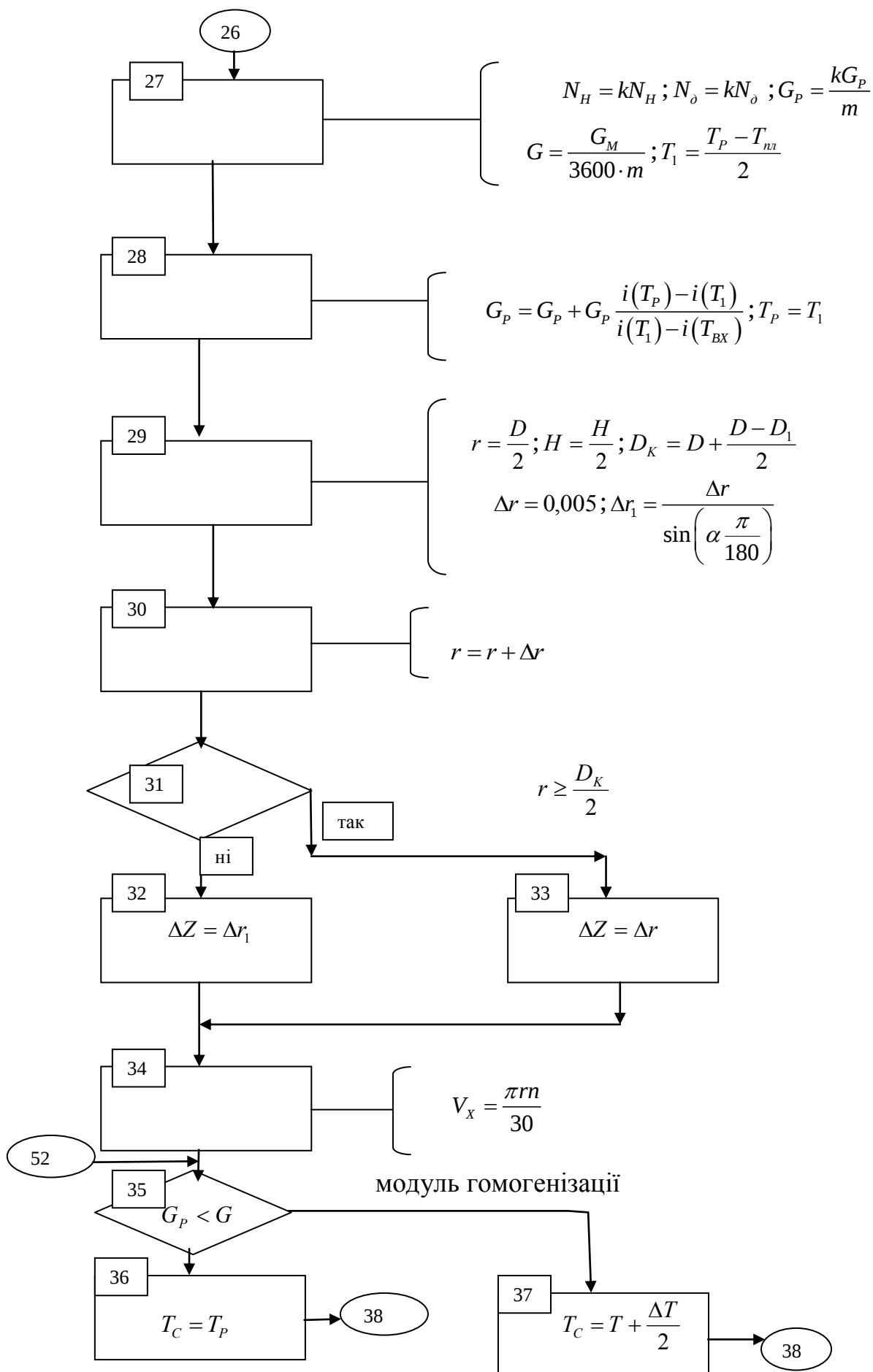
Продовження блок-схеми



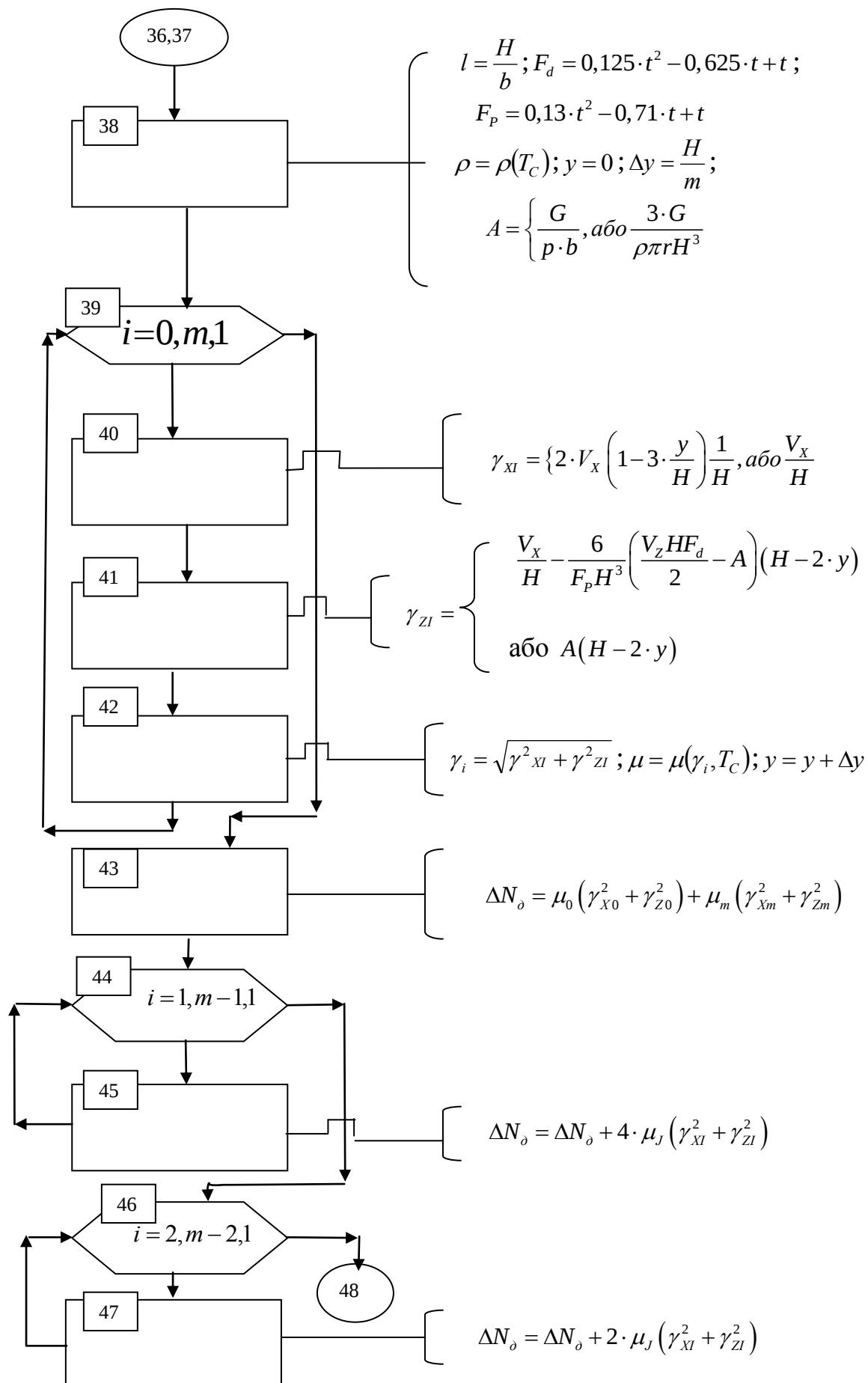
Продовження блок-схеми



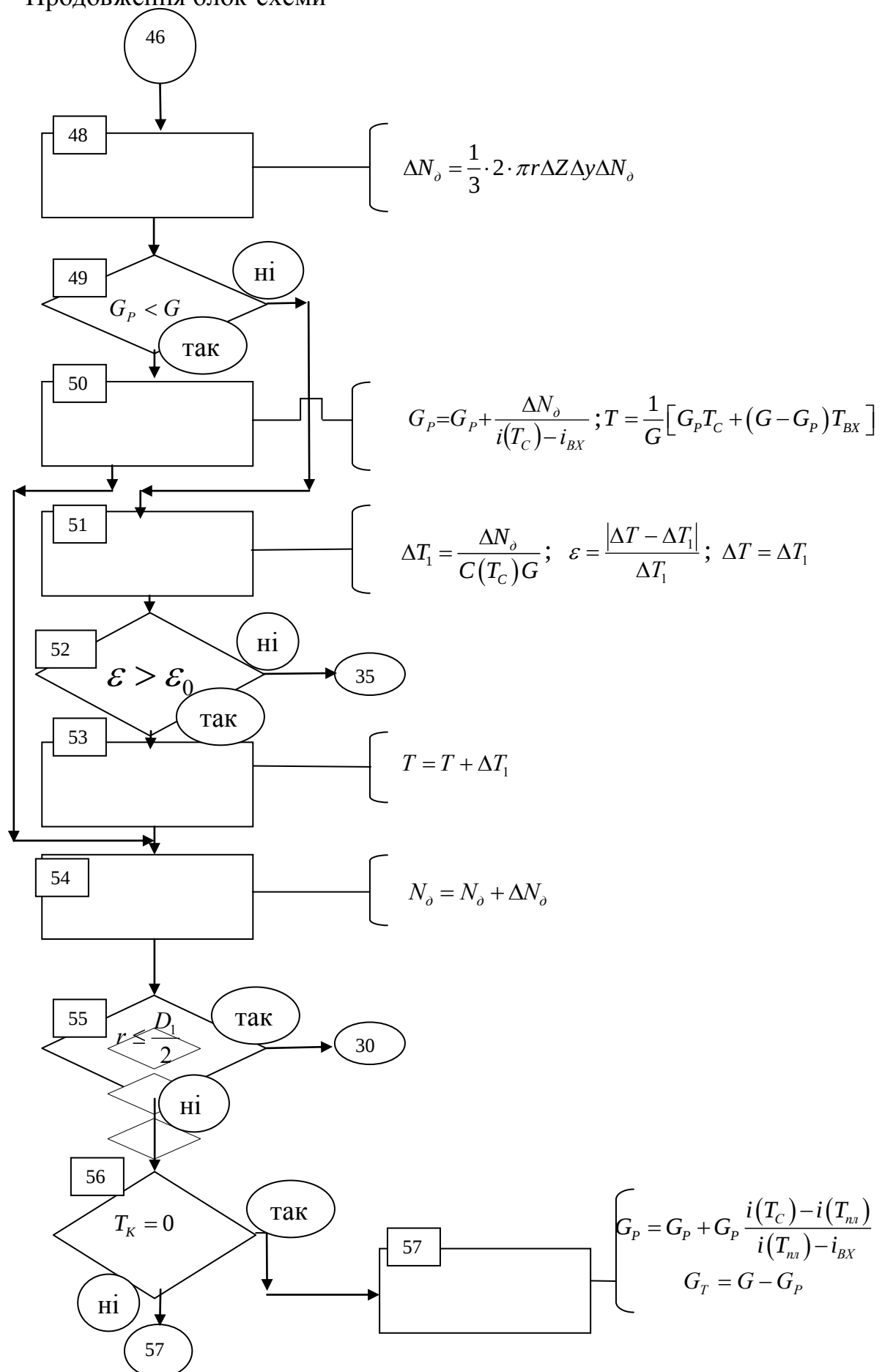
Продовження блок-схеми



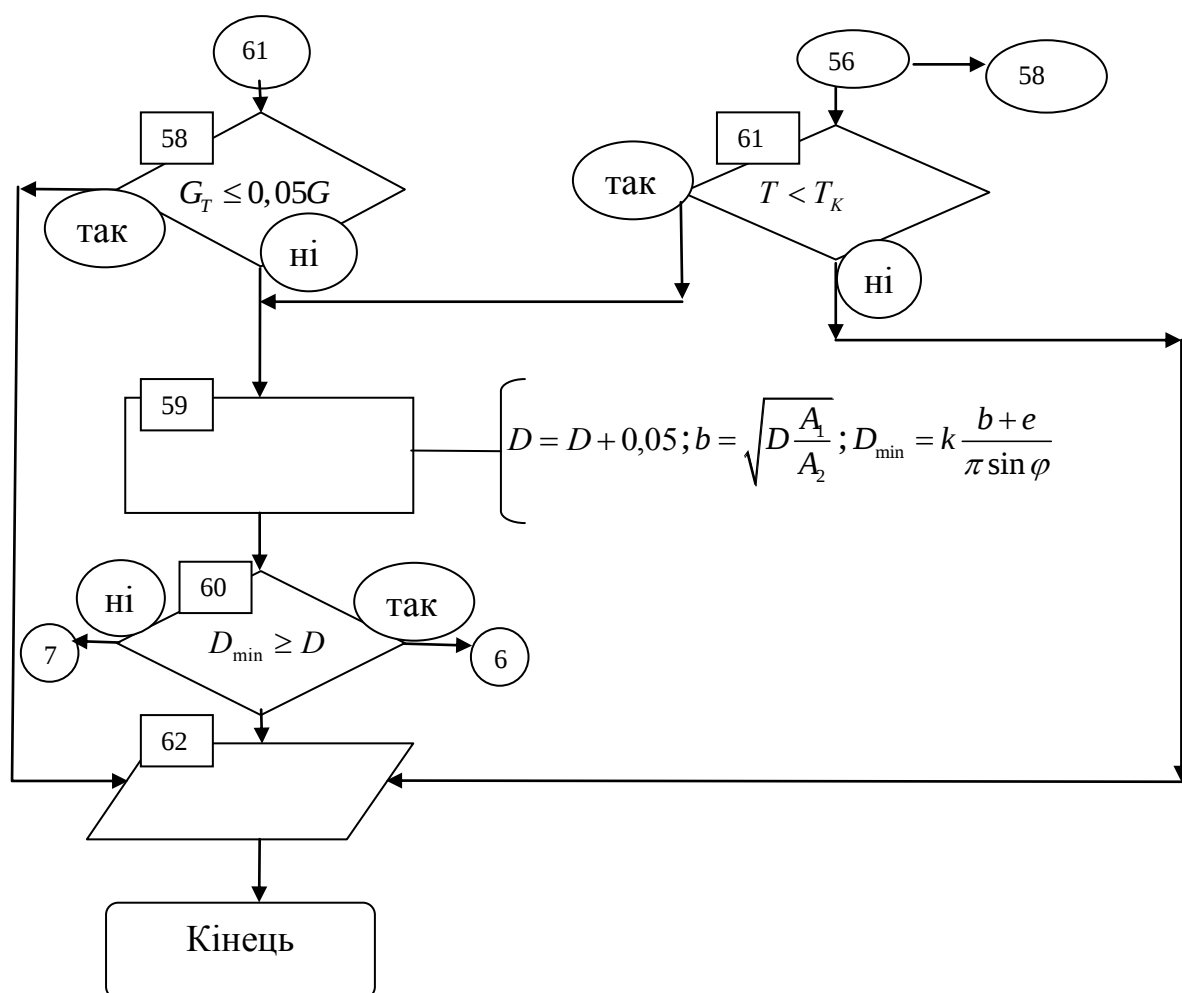
Продовження блок-схеми



Продовження блок-схеми



Продовження блок-схеми



Таблиця В. 1. Вхідні дані до програми розрахунку дискового екструдера

Найменування	Позначення одиниці величини	Ідентифікатор	Значення
1	2	3	4
Перше аближення діаметра диска	м	d	0,25
Глибина каналу нарізки	м	hi	0,008
Ширина отвору подачі гранул	м	lb	0,08
Число заходів нарізки	-	zd	4
Діаметр вихідного отвору	м	d1	0,065
Число паралельних заходів	-	nz	1
Кут нахилу твірної диска	град	al	60
Кут гвинтової нарізки	град	f1	15
Зазор між дисками	м	h2	0
Продуктивність екструдера	кг/год	gm	36
Коефіцієнт заповнення каналів	-	fr	1

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4
2	3	ih	41900
Ентальпія гранул	Дж/кг		
Температура гранул	$^{\circ}\text{C}$	tb	20
Температура плавлення	$^{\circ}\text{C}$	tp	110
Температура стінки циліндра	$^{\circ}\text{C}$	tz	180
Температура розплаву на виході	$^{\circ}\text{C}$	tk	180

Опис алгоритму розрахунку дискового екструдера:

В блоці 1 вводяться початкові дані.

У блоках 2 і 3 визначаються геометричні параметри диска, а також коефіцієнти $A1$ і $A2$, а в блоці 4, відповідно, ширина каналу і мінімальне значення діаметра диска, виходячи із геометричних співвідношень. Якщо задане у вихідних даних перше наближення діаметра диска буде менше від мінімального, то для подальших розрахунків приймається мінімальне значення діаметра і перераховується, виходячи з цього, ширина нарізки (блоки 5 і 6).

Далі в блоках 7 і 8 знаходяться число обертів, довжина зони плавлення і масова витрата через один канал нарізки, а в блоках 9 – 11 приймаються початкові значення і початкові наближення параметрів модуля плавлення, а також обчислюються всі складові швидкості.

Розрахунок процесу плавлення в каналах гвинтової нарізки забезпечується в блоках 12 – 14.

Модуль плавлення має два ітеративних цикли для обчислення товщини

плівки розплаву і ширини нерозплавленого полімеру (внутрішній цикл, блоки 14 - 19), і для обчислення середньої температури плівки розплаву (зовнішній цикл, блоки 13 - 21).

У блоках 22 - 24 знаходяться значення масової витрати розплаву, потужності нагрівників і дисипації для розглядуваного елемента Δz , а також їх сумарні значення.

В блоці 25 визначається середньомасова температура полімеру, запам'ятовується значення середньої температури розплаву, а ширина нерозплавленого полімеру на виході елемента приймається як перше наближення для наступного елемента.

Після обчислення процесу плавлення в блоках 27 і 28 визначаються сумарні значення потужностей, витрата розплаву і загальна витрата полімеру через один із паралельних зазорів (значення m приймається рівним 1 для однощільного і рівним 1,5 для двощільного екструдерів), а також перераховується значення температури T_p і масової витрати розплаву.

У блоці 29 приймаються початкове значення радіуса диска, кроки розрахунку, величини зазору між дисками, а також обчислюється значення діаметра конічної частини диска D_K .

Розрахунок процесу гомогенізації в зазорі забезпечується в блоках 30 – 55.

Розпочинається обчислення модуля гомогенізації.

Залежно від наявності або відсутності в розплаві нерозплавлених частинок, його середня температура T_C приймається рівною відповідно середній температурі розплаву T_p , обчислених в останньому модулі плавлення (блоки 35,36), або значення середньомасової температури T , обчислене в попередньому модулі гомогенізації, збільшується на величину $\Delta T/2$ (блоки 35,37), де ΔT – початкове наближення приросту температури обчислюваного модуля.

В блоці 38 обчислюється крок розрахунку Δu , а також обчислюються коефіцієнти F_d , F_p і величина A , яка в межах модуля залишається постійною. Далі в циклі визначаються значення складових швидкості деформації і в'язкості у вузлових точках по координаті u (блоки 39 – 42), а потім в блоках 43 – 48 знаходя-

ться потужність дисипації ΔN_d .

Якщо в розплаві є нерозплавлені частинки, то блоки 49 і 50 забезпечують обчислення масової витрати розплаву і середньомасової температури, а потім відбувається перехід на блок 54.

Якщо процес плавлення закінчився, то уточнюються значення приросту температури і знаходиться похибка його обчислення (блоки 49 і 51).

Якщо ця похибка більше ніж задане значення ε_0 , то блок 52 повертає на блок 35 для розрахунку наступного наближення.

В протилежному разі в блоці 53 обчислюється середньомасова температура T на виході модуля.

В блоці 54 знаходиться сумарне значення потужності дисипації. Обчислення модуля гомогенізації завершується.

Якщо у вхідних даних кінцеве значення температури розплаву T_K приймається рівним нулю, то це означає, що розрахунок ведеться до закінчення плавлення. У цьому випадку в блоках 56 – 58 перевіряється умова (13.12), і якщо вона виконується, то розрахунок закінчується і відбувається перехід на блок 62, який виводить результати. Якщо ж умова (13.12) не виконується, то в блоці 59 діаметр диска збільшується, обчислюються значення b і $D_{\min}$ і відбувається перехід на блоки 6 або 7 в залежності від значень D і $D_{\min}$. Якщо у вхідних даних задається значення T_K , то після блока 25 відбувається перехід на блок 61, в якому обчислена температура порівнюється зі значенням T_K . Якщо $T > T_K$, то розрахунок закінчується і виводяться його результати (блоки 61 і 62). В іншому випадку блок 61 здійснює перехід на блок 59 для продовження розрахунку при збільшеному діаметрі диска аналогічно тому, як це здійснюється при умові закінчення процесу плавлення.

Програма розрахунку дискового екструдера

CLS

' Розрахунок дискового екструдера

'

PRINT " Введіть вхідні дані для розрахунку"

GOTO 111

INPUT " - діаметр диска, м"; d

INPUT " - глибина каналу нарізки, м"; h1

INPUT " - ширина отвору подачі, м"; lb

INPUT " - число заходів нарізки"; zd

INPUT " - діаметр вихідного отвору, м"; d1

INPUT " - число паралельних зазорів"; nz

INPUT " - кут нахилу твірної диска"; al

INPUT " - кут гвинтової нарізки, град"; f1

INPUT " - зазор між дисками, м"; h2

INPUT " - продуктивність екструдера, кг/год"; gm

INPUT " - коефіцієнт заповнення каналів нарізки"; fr

INPUT " - температура поступаючих гранул, град С"; tb

INPUT " - температура плавлення, град С"; tp

INPUT " - температура стінки циліндра, град С"; tz

INPUT " - температура розплаву на виході, град С"; tk

INPUT " - насипна маса поступаючих гранул, кг/м³"; ro

INPUT " - ентальпія поступаючого полімеру, Дж/кг"; ih

111 :

d = .25: h1 = .008: lb = .09: zd = 4: d1 = .09: nz = 1: al = 60

f1 = 15: h2 = .003: gm = 200: fr = 1: tb = 20: tp = 110: tz = 180

tk = 180

ro = 520: ih = 41900

DEF fnc (t) = 1738.5 + 2.527 * t

DEF fnr (t) = 832 + .067 * t - .00302 * t ^ 2 + 5.24E-06 * t ^ 3

```

DEF fnla (t) = .20886 + 6.943E-05 * t
DEF fnip (t) = 388000 + 2350 * (t - 110)
DEF fnm (g, t) = 141293 * g ^ (-.53) * EXP(-5.4 * (t - 180)/453))
DIM gx(11), gz(11), mj(11)
f = f1 * 3.14 / 180: e = .005: sn = SIN(f): cn = COS(f)
a1 = gm / (60 * h1 * zd * ro * lb * fr)
a2 = 60 / (3.14 * sn * (2 * h1 / 9.81) ^ .5)
b = (d * a1 / a2) ^ .5: d6 = zd * (b + e) / (3.14 * sn)
IF d > d6 THEN 2
1 :
d = d6: b = (d * a1 / a2) ^ .5
2 :
n = a1 / b
lm = 2 * gm / (60 * n * h1 * b * zd * ro) * sn
g = gm / (3600 * zd)
dl = .005: l = 0: dz = dl / sn: nb = 0: nd = 0
vt = g / (ro * b * h1)
v = 3.14 * d * n / 60: vx = v * sn: vz = v * cn
x1 = b: de = .0001: gp = 0: tc = tp: t = tb: h = h1
vj = (vx ^ 2 + (vz - vt) ^ 2) ^ .5
'PRINT "lm="; lm; "n = "; n; " d = "; d; " b = "; b
3 :
l = l + dl
'
'      модуль плавлення
4 :
la = fnla(tc): r = fnr(tc)
5 :
mi = fnm(vj / de, tc)
fk = vx * r * (la * (tz - tp) + mi * vj ^ 2 / 2)

```

```

fg = 2 * (fnip(tp) - ih)
fa = (fk / fg) ^ .5
x2 = x1 * (1 - fa * dz / (2 * ro * vt * h * x1 ^ .5)) ^ 2
df = (2 * la * (tz - tp) + mi * vj ^ 2) * x2
ds = vx * r * (fnip(tp) - ih)
dd = (df / ds) ^ .5
ee = ABS(de - dd) / dd: de = dd
IF ee > .001 THEN 5
t1 = (tz + tp) / 2 + mi * vj ^ 2 / (12 * la)
ee = ABS(t1 - tc) / t1: tc = t1
IF ee < .001 THEN 4
dg = r * vx / 2 * de * dz: gp = gp + dg: x1 = x2
bn = x2 * dz / de * (la * (tz - tp) - mi * vj ^ 2 / 2)
nd = nd + dg * (fnip(tc) - ih) - bn
nb = nb + bn
t = (gp * tc + (g - gp) * tb) / g: tg = tc
'
' кінець модуля плавлення
'PRINT "l="; l; "t="; t; "nb="; nb; "nd="; nd
IF l < lm THEN 3
nb = zd * nb: nd = zd * nd: gp = zd * gp / nz
tr = (tg + tp) / 2: g = gm / (3600 * nz)
gp = gp + gp * (fnip(tg) - fnip(tr)) / (fnip(tr) - ih)
tg = tr
rd = d / 2: h = h2: dk = d1 + (d - d1) / 2
au = SIN(3.14 / 180 * al): dr = .005
6:
rd = rd - dr
IF rd > dk / 2 THEN dz = dr / au ELSE dz = dr
vx = 3.14 * rd * n / 30
'

```

```

'   модуль гомогенізації
7 :
IF gp < .95 * g THEN tc = tg ELSE tc = t + dt / 2
a = 3 * g / (3.14 * rd * fnr(tc) * h ^ 2)
y = 0: dy = .1: gx = vx / h
FOR i = 1 TO 11
gz(i) = ((a * (1 - 2 * y)) ^ 2 + gx ^ 2) ^ .5
mj(i) = fnm(gz(i), tc): y = y + dy
NEXT i
dn = mj(1) * gz(1) ^ 2 + mj(11) * gz(11) ^ 2
FOR i = 2 TO 10
qq = mj(i) * gz(i) ^ 2
IF INT(i / 2) = i / 2 THEN qq = 4 * qq ELSE qq = 2 * qq
dn = dn + qq
NEXT i
dn = 6.28 * rd * dz * dy * dn * h / 3
IF gp < .95 * g THEN 8
td = dn / (g * fnc(tc))
ep = ABS(td - dt) / td: dt = td
IF ep > .001 THEN 7
t = t + dt
GOTO 9
8 :
gp = gp + dn / (fnip(tc) - ih)
t = (gp * tc + (g - gp) * tb) / g
9 :
nd = nd + dn * nz
'   кінець модуля гомогенізації
'PRINT "rd="; rd; "t="; t; "nd="; nd
IF rd > d1 / 2 THEN 6

```

```

IF tk = 0 THEN 10
IF t < tk THEN 11 ELSE 12
10 :
gp = gp + (gp * (fnip(tc) - fnip(tp))) / (fnip(tp) - ih)
IF (g - gp) < .05 * g THEN 12
11 :
d = d + .005: b = (d * a1 / a2) ^ .5
d6 = zd * (b + e) / (3.14 * sn)
IF d6 > d THEN 1 ELSE 2
12 :
dd = 1000 * d: bd = 1000 * b: dk = 1000 * dk
nb = .001 * nb: nd = 1.2 / .8 * .001 * nd
13 :
PRINT
PRINT "  Результати розрахунку екструдера"
PRINT
PRINT USING " діаметр диска          ###.# мм"; dd
PRINT USING " ширина каналу нарізки      ###.# мм"; bd
PRINT USING " діаметр конуса диска        ###.# мм"; dk
PRINT USING " число обертів диска        ###.# 1/хв"; n
PRINT USING "потужність нагрівачів циліндра #####.# кВт"; nb
PRINT USING " потужність на диску        #####.# кВт"; nd
PRINT USING " температура розплаву       ###.# град С"; t
END

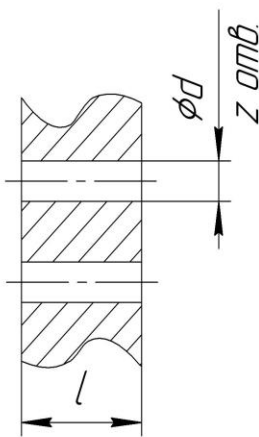
```

Результати розрахунку дискового екструдера

діаметр диска	320.0 мм
ширина каналу нарізки	21.6 мм
діаметр конуса диска	195 мм
число обертів диска	103.3 1/хв
потужність нагрівачів циліндра	2.9 кВт
потужність на диску	46,2 кВт
температура розплаву	182.3 град С

ДОДАТОК Г

Розрахунок формуючої головки



183

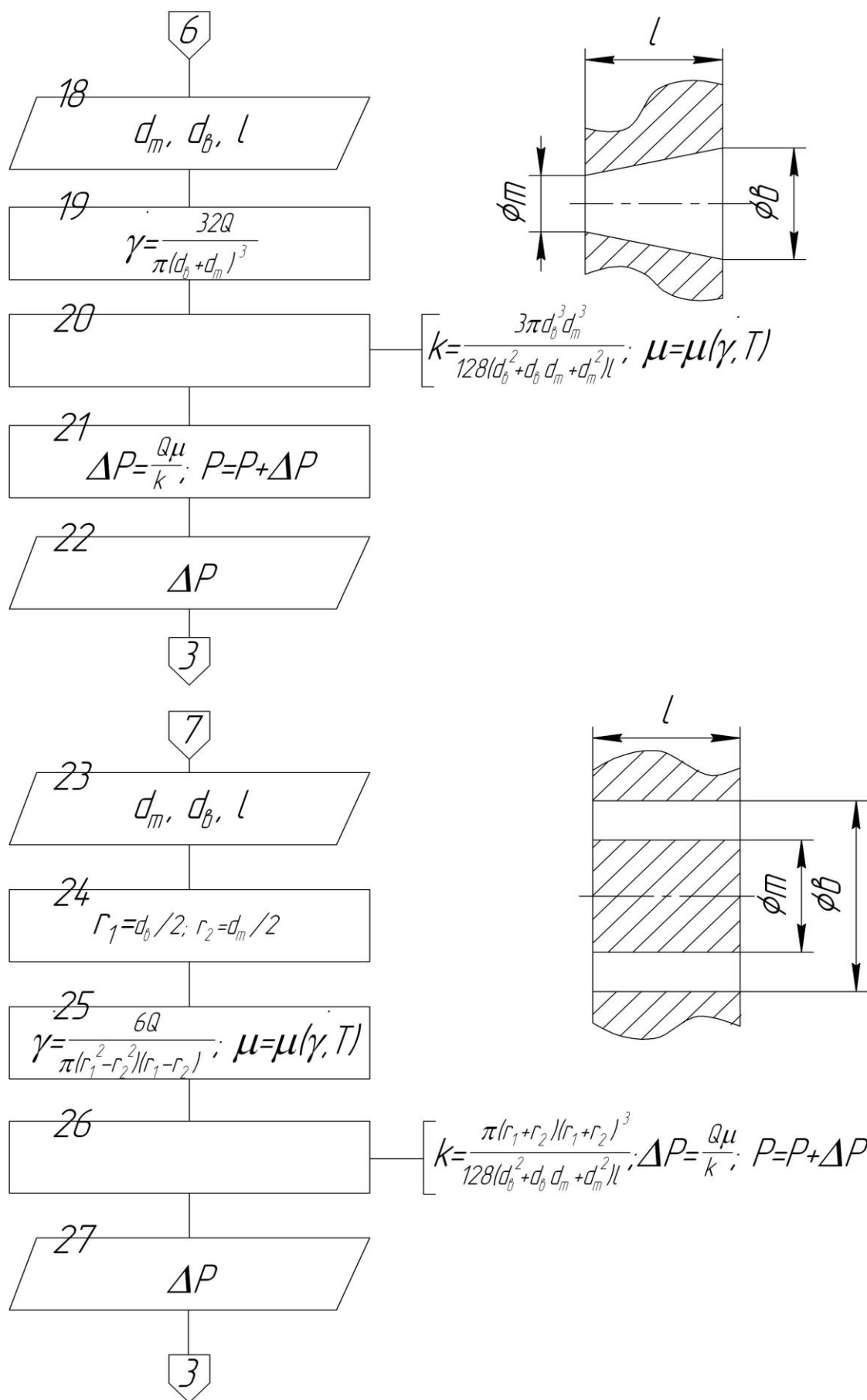


Рисунок Г.1 – Блок-схема до розрахунку формуючої головки (продовження).

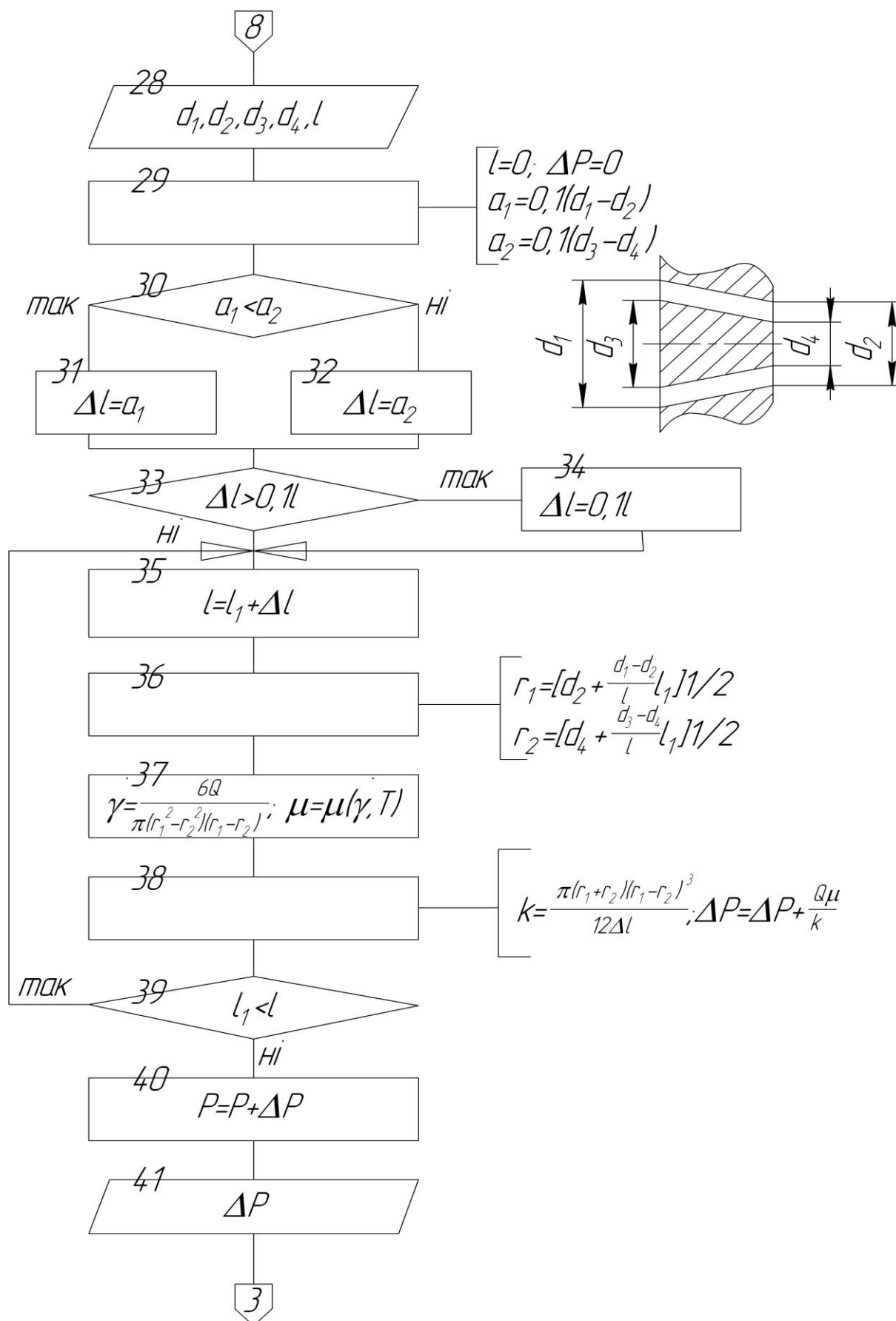


Рисунок Г.1 – Блок-схема до розрахунку формуючої головки (продовження).

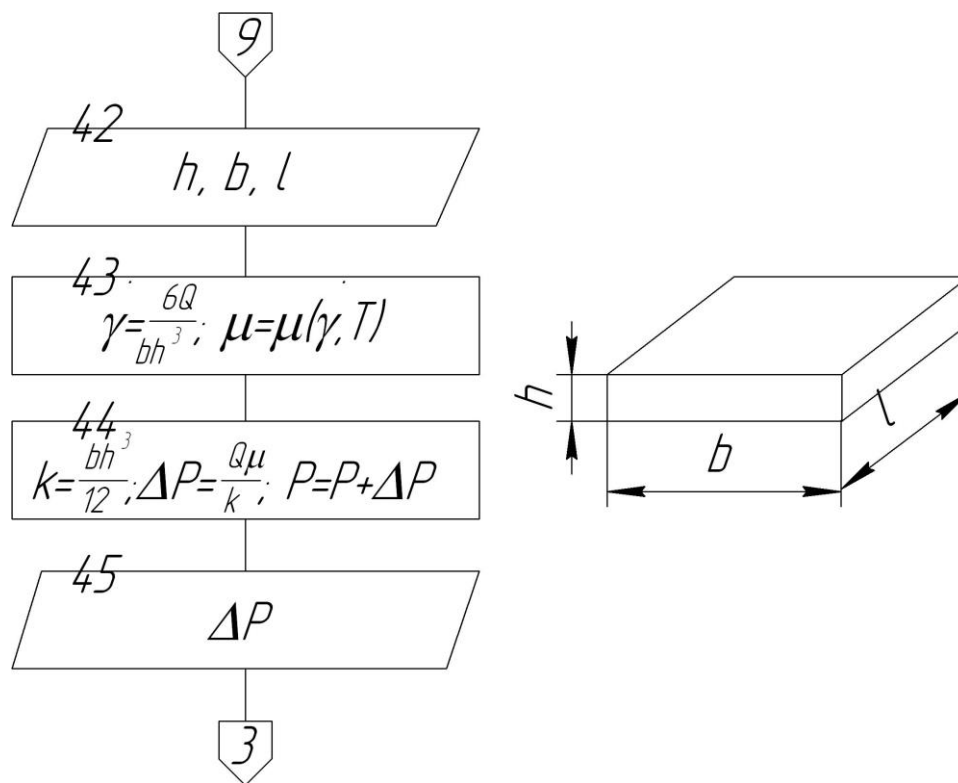


Рисунок Г.1 – Блок-схема до розрахунку формуючої головки (кінець).

Опис алгоритму розрахунку формуючої плівкової головки:

Вхідні дані вводяться в блоці 1, а в блоці 2 приймається значення тиску $P=0$ і обчислюється секундна об'ємна продуктивність. У блоці 3 у вигляді інформації виводиться перелік форм каналів і відповідні цим формам значення i , яке виводиться в блоці 4. Блоки 5-10 в залежності від введенного значення i вибирають ту частину алгоритму, в якій здійснюється розрахунок вибраного каналу. При $i=1$ обчислюється циліндричний канал або решітка, яка має Z отворів діаметром d (блоки 12-17), при $i=2$ обчислюються опір конічного каналу (блоки 18-22), а при $i=3$ кільцевого циліндричного каналу (блоки 23-27). При розрахуванні параметрів кільцевого конічного каналу ($i=4$, блоки 28-41) застосовується метод ступеневої апроксимації, у відповідності з яким кільцевий конічний канал розглядається, як ряд кільцевих циліндричних довжиною Δl . При цьому значення Δl вибирається не більше 0,1 від меншої різниці діаметрів, але не більше 0,1 загальної довжини (блоки 28-34). Плоскощільовий канал обчислюється в блоках 42-45 при $i=5$. Після розрахунку опору кожного каналу його значення виводиться (блоки 17, 22, 27,

41 і 45) і відбувається повернення на блок 3. При значенні $i=6$ розрахунок закінчується і блок 11 виводить сумарний опір головки. Необхідні для розрахунків розміри каналів подані на рисунку 4.6

```
CLS
PRINT TAB(20); "Розрахунок головки"
PRINT
DEF fnmu (ga, t) = 32900 * ga ^ (-.7) * EXP(-.006 * (t - 120))
PRINT
t = 180
g = 36
ro = 967.77
p = 0: q = g / (3600 * ro)
9 :
PRINT "Форма каналу, що обчислюється:"
PRINT "Круглий циліндричний або решітка (1)"
PRINT " Кільцевий конічний (2)"
PRINT "Кільцевий циліндричний (3)"
PRINT "Кільцевий конічний (4)"
PRINT "Плоскощільовий (5)"
PRINT "Розрахунок закінчено (6)"
INPUT i
IF i = 6 THEN 10
PRINT "Введіть розміри каналу:"
IF i = 1 THEN 1
IF i = 2 THEN 2
IF i = 3 THEN 2
IF i = 4 THEN 3
IF i = 5 THEN 4
1 :
INPUT "Діаметр, м"; d
INPUT "Довжина, м"; dm
INPUT "кількість каналів"; z
GOTO 11
2 :
INPUT "Більший діаметр, м"; db

INPUT "Менший діаметр, м"; dm
INPUT "Довжина, м"; l
IF i = 2 THEN 5
GOTO 6
3 :
INPUT "Більший діаметр більшого конуса, м"; d1
```

```

INPUT "Менший діаметр більшого конуса, м"; d2
INPUT "Більший діаметр меншого конуса, м"; d3
INPUT "Менший діаметр меншого конуса, м"; d4
INPUT "Довжина, м"; l
GOTO 7
4 :
INPUT "Ширина каналу, м"; b
INPUT "Довжина каналу, м"; l
INPUT "Висота каналу, м"; h
GOTO 8
11 :
g1 = q / z: ga = 32 * g1 / (3.14 * d ^ 3)
mj = fnmu(ga, t): k = 1.05975E-06
p1 = g1 * mj / k
p = p + p1
p1 = .000001 * p1
PRINT USING "    Опір каналу ###.## МПа"; p1
GOTO 9
5 :
ga = 32 * q / (3.14 * (db + gm) ^ 3): mj = fnmu(ga, t)
k = 3 * 3.14 * db ^ 3 * dm ^ 3 / (128 * (db ^ 2 + db * dm + dm ^ 2) * l)
p1 = q * mj / k
p = p + p1
p1 = .000001 * p1
PRINT USING "    Опір каналу ###.## МПа"; p1
GOTO 9
6 :
r1 = db / 2: r2 = dm / 2
ga = 6 * q / (3.14 * (r1 ^ 2 - r2 ^ 2) * (r1 - r2))
mj = fnmu(ga, t)
k = 3.14 * (r1 + r2) * (r1 - r2) ^ 3 / (12 * l)
p1 = q * mj / k
p = p + p1
p1 = .000001 * p1
PRINT USING "    Опір каналу ###.## МПа"; p1
GOTO 9
7 :
l1 = 0: p1 = 0
a1 = .1 * (d1 - d2): a2 = .1 * (d3 - d4)
IF a1 < a2 THEN dl = a1 ELSE dl = a2
IF dl > .1 * l THEN dl = .1 * l
12 :
l1 = l1 + dl
r1 = (d2 + ((d1 - d2) * l1) / l) / 2
r2 = (d4 + ((d3 - d4) * l1) / l) / 2

```

```

ga = 6 * q / (3.14 * (r1 ^ 2 - r2 ^ 2) * (r1 - r2))
mj = fnmu(ga, t)
k = 3.14 * (r1 + r2) * (r1 - r2) ^ 3 / (12 * dl)
p1 = p1 + q * mj / k
IF l1 < l - .5 * dl THEN 12
p = p + p1
p1 = .000001 * p1
PRINT USING "Опір каналу ###.## МПа"; p1
GOTO 9
8 :
ga = 6 * q / (b * h ^ 3): mj = fnmu(ga, t)
k = b * h ^ 3 / (12 * l)
p1 = q * mj / k: p = p + p1
p1 = .000001 * p1
PRINT USING "  Опір каналу ###.## МПа"; p1
GOTO 9
10 :
p = .000001 * p
PRINT
PRINT USING "Опір форм. головки ###.## МПа"; p
END

```

Результати розрахунку:

Форма каналу, що обчислюється:

Круглий циліндричний або решітка (1)

Введіть розміри каналу:

Опір каналу 0.10 МПа

Форма каналу, що обчислюється:

Кільцевий циліндричний (3)

Введіть розміри каналу:

Опір каналу 4.28 МПа

Форма каналу, що обчислюється:

Кільцевий конічний (4)

Введіть розміри каналу:

Опір каналу 2.18 МПа

Форма каналу, що обчислюється:

Кільцевий циліндричний (3)

Введіть розміри каналу:

Опір каналу 4.96 МПа

Форма каналу, що обчислюється:

Кільцевий конічний (4)

Введіть розміри каналу:

Опір каналу 6.15 МПа

Форма каналу, що обчислюється:

Кільцевий циліндричний (3)

Введіть розміри каналу:

Опір каналу 7.26 МПа

Розрахунок закінчено (6)

Опір форм. головки 24.49 МПа

Таблиця Г.1 Ідентифікатори

Найменування	Позначення одиниці величини	ідентифікатор	Одиниці виміру
Продуктивність головки	g	g	кг/с
Температура розплаву	t	t	
Густина полімеру	ρ	R(j)	кг/м
Складові тертя	γ	ga	Дж/кг К
В'язкість полімеру	μ	mu (ga, t)	Па с

Додаток Д

Документація про патентне дослідження

Документація про патентне дослідження виконано за методикою [44]

РЕГЛАМЕНТ ПОШУКУ № ЛМ41мп.01.101РП

Назва теми: Модернізація лінії каскадної екструзії з розробкою шестеренного насосу.

Шифр теми: ЛМ41мп.01.101.001

Етап: Проектування апарата та його складових частин.

Номер, дата завдання на проведення патентних досліджень:

ЛМ41мп.23.10.2025

Обґрунтування регламенту пошуку: Предмет пошуку – шестеренний насос.

Об'єкт пошуку: винаходи та корисні моделі.

Мета пошуку інформації: визначення патентної ситуації щодо апарата, що проектується (визначення патентної чистоти шестеренного насоса та тенденцій розвитку даного напрямку).

Визначення держав пошуку: Встановлюються такі держави пошуку: Україна, США, Англія, Германія.

Ретроспективність: У зв'язку з тим, що термін дії державних патентів в Україні становить 20 років, регламент пошуку встановлюємо з 2005-2025рр.

Класифікаційні індекси: Міжнародна патентна класифікація: B29C 47/60, B29C 47/72, B29C 67/20, B29C 47/64, B29C 47/78, B29C 47/38

Джерела інформації: Патентна інформація: описи до винаходів, офіційні патентні бюлетені Укрпатенту, патентів США, Англії, Германії.

Початок патентного пошуку: 23.10.25.

Закінчення патентного пошуку: 23.11.25.

Довідка про пошук № ЛМ41мп.01ДП

Завдання на проведення патентних досліджень: ЛМ41мп.23.10.2025

Етап: Проектування шестеренного насоса та його складових частин.

Номер, дата завдання на проведення патентних досліджень:
23.10.2025.

Номер, дата регламенту пошуку: ЛМ41мп.01РП.

Початок пошуку: 23.10.25. Закінчення пошуку: 23.11.25.

Таблиця Д.1 – Регламент пошуку (форма Б.1 згідно ДСТУ 3575-97)

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Мета пошуку інформації	Держава пошуку	Класифікаційні індекси МПК, НПК, МКПЗ, МКТП, УДК	Ретроспективність пошуку	Джерела інформації
Шестеренний насос	Визначення патентної ситуації щодо шестеренного насоса, що проектується. Визначення патентної чистоти конструкції. Аналіз тенденцій розвитку конструкцій шестеренних насосів для екструзії полімерів.	Україна, США, Англія, Німеччина	B29C47/60, B29C47/72, B29C67/20, B29C47/64, B29C47/78, B29C47/38, F04C2/00, F04C18/00	2005–2025 рр.	Укрпатент, USPTO, EPO (Espacenet), WIPO (Patentscope). Офіційні патентні бюлетені. Науково-технічна література з екструзії полімерів.

Таблиця Д.2 – Джерела інформації, що використані під час проведення пошуку

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Інформаційна база, використана під час пошуку	Бібліографічні данні першого та останнього за хронологією джерела інформації	
				Патентна інформація	Інша науково-технічна інформація
Шестеренний насос	Україна, США, Англія, Німеччина	B29C47/60, B29C47/72, B29C67/20, B29C47/64, B29C47/78, B29C47/38, F04C2/00, F04C18/00	Укрпатент USPTO Espacenet (EPO) WIPO Patentscope Google Patents	Описи винаходів патентів України №№ 1-60000. Описи корисних моделей патентів України №№ 1-2000.	Обладнання для одержання і формування полімерних композиційних матеріалів / Ю.Ю. Лукач, д.т.н., І. О. Мікульонюк, к.т.н., Г.Л. Рябцев, к.т.н., М.В. Сезонов // Хімічна промисловість України. — №6 . — 2001

Таблиця Д.3 – Патентна документація, що відібрана для аналізу

Назва апарата	Документи на об'єкти промислової власності	
	Бібліографічні дані	Відомості щодо їхньої дії
1	2	3
Шестеренний насос для полімерного розплаву	Патент: US12180959 B2 , МПК F04C 18/084(2013.01); F04C 2/08(2013.01); F04C 15/00 (2013.01) F04C 29/02 (2013.01); F16C(2013.01) Gear pump (2024)/ Rene Triebe, Mare Finkelder Назва: Gear pump (2024)	Діє
Шестеренний melt-pump високого тиску	Патент: US20230321887A1, МПК B29B11/16, B29C 48/695, B29C 48/37 Device and Method for Controlling the Feed of Polymer Melt (2023)/ Dieter Gross, Sebastian Jost, Andreas Stuber Назва: Device and Method for Controlling the Feed of Polymer Melt (2023)	Діє
Насос для перекачування розплавів полімерів	Патент: WO2006087208 A1, , МПК F16C 37/00 (2006/01) F04C 2/18 (2006/01)Gear pump (2006)/Alexander Jorg Назва: Gear pump (2006)	Діє
Екструзійна система з інтегрованим шестеренним насосом	Патент: WO2015048984 A1, МПК F04C 2/18 (2006/01); F04C 15/05 (2006/01); F04C 13/00 (2006/01); F04C 2/08 (2006/01); Gear pump with improved inlet (2015)/ Heinen Michal, Triebe Rene Назва: Gear pump with improved inlet (2015)	Діє
Шестеренний насос	Патент: US7648658 B2, МПК B29B47/06, B29C 47/56, B29C 47/92 Alternate polymer extrusion method with reduced drool (2010) / Robert davis, Joseph Lteson . https://patents.google.com/patent/US7648658B2/en . Назва: Alternate polymer extrusion method with reduced drool (2010)	Діє

Таблиця Д.4 – Інша науково-технічна документація, відібрана для подальшого аналізу

ОГД, його складові частини	Джерела інформації	Бібліографічні дані
Шестеренний насос	Інноваційне обладнання для приготування та перероблення полімерних матеріалів і гумових сумішей	монографія / І. О. Мікульонок, О. М. Гавва, Л. О. Кривопляс-Володіна. Київ: Національний університет харчових технологій, 2022. – 139 с.: іл. – Бібліогр.: с. 126–135.
Шестеренний насос	Публікації та технічні каталоги виробників melt-pump	MAAG Group. <i>Polymer Pump Systems Catalogue</i> , 2018–2023; Nordson Polymer Processing Systems. <i>Gear Pump Technical Guide</i> , 2020.
Шестеренний насос	монографія / Екструзія пінополімерів	В. В. Лукашова, І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко. — Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 175 с

Таблиця Д.5 – Аналіз новизни, винахідницького рівня та промислової придатності проєктованого об’єкта

ОГД, його складові частини	Найближчий аналог	Очікуваний результат	Можливості використання у промисловості або іншій сфері діяльності	Номер поданої заявки, дата подачі заявки
Шестеренний насос: 1) корпус 2) шестерні 3) вал приводу	UA 89049 U – шестеренний насос для полімерного розплаву	– зменшення пульсацій подачі; – підвищення однорідності потоку полімерного розплаву; – стабілізація тиску перед голівкою; – покращення якості виробів; – зниження енерговитрат при перекачуванні високов'язких полімерів.	Використання на лініях екструзії плівки, у грануляційних системах, у лініях переробки вторинних полімерів, у виробництві труб, профілів і литих заготовок.	PTC/EP20130703

Висновки про виконання регламенту патентного пошуку.

Патентний пошук виконано відповідно до затвердженого регламенту та охоплює всі визначені джерела інформації, держави та класифікаційні індекси. Пошук проведений у повному обсязі та з урахуванням ретроспективності 2005–2025 рр.

У результаті аналізу відібраних винаходів і корисних моделей встановлено таке:

- виявлені охоронні документи стосуються як шестеренних насосів для полімерного розплаву загалом, так і окремих їх конструктивних вузлів (вхідної зони, підшипникових опор, шестерень, систем охолодження та ущільнення);
- основні тенденції розвитку даного напрямку – це модернізація геометрії насосів, підвищення стабільності подачі розплаву, удосконалення підшипниково-ущільнювальних вузлів, зниження пульсацій та енерговитрат;
- сучасні технічні рішення спрямовані на оптимізацію роботи насоса в умовах високих температур і в'язкості, а також на інтеграцію melt-pump у складні екструзійні системи (у т.ч. каскадні).

Порівняння проектованої конструкції з відомими аналогами показало, що в апараті не використовуються конструктивні рішення, захищені чинними патентами, а запропоновані технічні особливості мають ознаки самостійності, новизни та промислової придатності.

Отже, проектований шестеренний насос є патентно чистим і може бути рекомендований для подання заявки на охоронний документ.

Додаток Ж

Публікації автора

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

студента групи ЛМ-41мп кафедри машин та апаратів хімічних та
нафтопереробних виробництв

Абаєва Анатолія Юрійовича

Статті фахових виданнях:

ІННОВАЦІЙНІ ПОЛІМЕРИ ДЛЯ СТІЙКОГО МАЙБУТНЬОГО: ЕКСТРУЗІЯ
БІО- ТА ФОТОДИСТРУКТИВНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК. Технічні науки
та технології: науковий журнал/Національний університет «Чернігівська
політехніка», - Чернігів:НУ «Чернігівська політехніка», 2025.-№ 2(40).- ст. 158

Тези доповідей на конференціях:

1) МОДЕРНІЗАЦІЯ ЛІНІЇ КАСКАДНОЇ ЕКСТРУЗІЇ З РОЗРОБКОЮ
ШЕСТИРЕНЧАТОГО НАСОСА. Збірник тез доповідей XXXVI Всеукраїнської
науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених
”Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів”2025р.
– ст.100-103

2) ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКСТРУЗІЇ ХАРЧОВОЇ ПЛІВКИ З PLA:
ВІД СИРОВИНИ ДО ГОТОВОГО ПРОДУКТУ. Збірник тез доповідей XXXVII
Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих
вчених ”Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних
матеріалів”2025р. – ст.88-92

3) МОДЕРНІЗАЦІЯ ШЕСТИРЕННОГО НАСОСА ДЛЯ ПЕРЕРОБЛЕННЯ
ВИСОКОВ'ЯЗКИХ БІОПОЛІМЕРІВ ТИПУ PLA. Збірник тез доповідей
XXXVII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і
молодих вчених ”Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних
матеріалів”2025р. – ст.273-279

УДК 678.023

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЛІНІЇ КАСКАДНОЇ ЕКСТРУЗІЇ З РОЗРОБКОЮ ШЕСТЕРЕНЧАТОГО НАСОСА

А.Ю. Абаєв, М.П. Швед

Національний технічний університет України «КПІ»

03056, Київ, пр. Перемоги, 37, корп 19

ixf@kpi.ua

Останнім часом у хімічному машинобудуванні значна увага приділяється вдосконаленню технологій, спрямованих на підвищення якості продукції, а також створенню нових економічних, високопродуктивних машин для переробки пластичних мас. Особливий інтерес викликають модифіковані дискові екструдери [1], які демонструють низку важливих переваг. Зокрема, такі екструдери забезпечують високий рівень змішувального ефекту за рахунок унікальної конструкції, що дозволяє суттєво знизити енерговитрати. Крім того, вони характеризуються коротким часом перебування матеріалу в зоні переробки, що мінімізує теплове навантаження на матеріал і сприяє збереженню його властивостей. Ще однією перевагою є можливість досягнення високих швидкостей зсуву за відносно низького тиску, що розширює спектр застосування таких машин. Варто також відзначити легкість забезпечення автогенного режиму роботи, що сприяє автоматизації процесу та підвищенню його ефективності. Завдяки цим характеристикам модифіковані дискові екструдери мають великий потенціал для використання в сучасних технологіях переробки пластичних мас, відкриваючи нові можливості для розвитку галузі.

Одним із недоліків дискових екструдерів є пульсація розплаву та недостатній тиск на виході, що обмежує можливість продавлювання розплаву через формувальний інструмент. Ці проблеми стали поштовхом для створення комбінованих дискових екструдерів [2], які об'єднують переваги різних

технологій для досягнення оптимальних результатів. Серед численних конструктивних рішень найефективнішим виявилось комбінування дискового екструдера з шестеренним насосом. Така конструкція має низку важливих переваг. По-перше, вона забезпечує високу якість підготовки розплаву завдяки ефективному змішуванню та рівномірному нагріванню матеріалу. По-друге, точність дозування значно зростає, що критично важливо для виробництва продукції з високими вимогами до геометрії та однорідності. По-третє, реалізація високого тиску на виході дозволяє формувати вироби складної конфігурації, розширюючи сферу застосування таких екструдерів. Таким чином, комбіновані дискові екструдери вирішують основні недоліки традиційних моделей, відкриваючи нові можливості для підвищення ефективності та якості виробничих процесів у галузі переробки пластичних мас.

Було створено каскадний дисково-шестеренний екструдер (рис. 1), до складу якого входять дисковий екструдер 1, нагнітальний дозуючий шестеренний насос 2 і шнековий дозатор 3. Особливістю такого екструдера є те, що всі три пристрої оснащені приводами (серводвигунами) 4,5,6 які мають високий ККД, що дозволить зменшити енергоспоживання приводів з можливістю безступінчастого регулювання кутової швидкості та моменту робочих органів через інтеграцію з програмованими логічними контролерами типу Siemens TIA Portal, а також те, що між дисковим екструдером і шестеренним насосом встановлено компенсатор 7 з ПЛК контролером Siemens SIMATIC S7-1500, який має високу продуктивність, гнучкість у програмуванні, підтримку інтерфейсів зв'язку PROFIBUS і PROFINET, можливість для інтеграції з іншими системами та забезпечує зворотній зв'язок із приводом дозатора узгоджуючи продуктивність дозатора і шестеренного насоса. Перероблюваний полімер з бункера 8 дозується в завантажувальну горловину 9 дискового розплавлювача-гомогенізатора, де він захоплюється багатозахідною

гвинтовою нарізкою завантажувально-пластикувальної зони, розігрівається за рахунок енергії дисипації і у вигляді напіврозплаву надходить у торцевий робочий зазор 10 дискового екструдера, де завершується плавлення полімеру і гомогенізація розплаву. Під впливом вакууму, який створюється в шестеренному насосі, а також тиску, що забезпечується завантажувально-пластикувальною зоною та ефектом Вайссенберга, розплав заповнює порожнини між зубами шестерень, під час їх обертання – це забезпечує стабільну продуктивність і підтримання необхідного тиску розплаву для його проходження через формувальний інструмент 11.

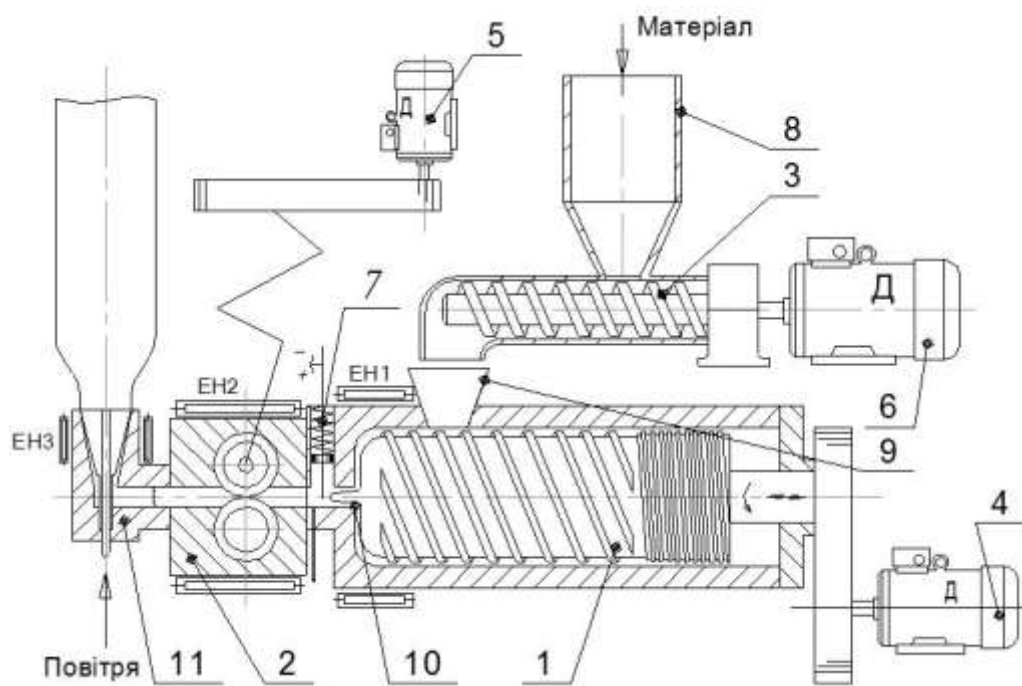


Рис.1 Схема каскадного дисково-шестеренного екструдера.

У ході проведення попередніх досліджень екструдера в складі лінії для виробництва рукавної плівки ЛРП-600, використовуючи автоматичні регулятори PID (Proportional-Integral-Derivative) які складаються з трьох основних компонентів:

- пропорційального (P) — відповідає за швидкість реагування на відхилення від заданого значення. Чим більший коефіцієнт пропорційного компонента, тим швидше регулятор намагається відкоригувати значення;
- інтегрального (I) —

відповідає за усунення помилок на основі історії відхилень. Інтегральний компонент усуває постійні відхилення та допомагає уникнути "погойдування" системи; - диференціального (D) — враховує швидкість зміни відхилень, забезпечуючи більш плавне регулювання. Це допомагає зменшити коливання системи змінюючи кутові швидкості дозатора, дискового екструдера і шестеренного насоса, що дало можливість досягнути стабільні технологічні режими переробки полімерів. Дослідження зразків плівки підтвердили їх відповідність нормативним вимогам. За умови продуктивності 35 кг/год товщина плівки може коливатися в межах 8–10 мкм. Для порівняння, на лінії з черв'ячним пресом ЧП45×25 [3] мінімальна товщина плівки становить 25–30 мкм, але при цьому питомі енерговитрати зростають на 20–25 %.

Список літератури

1. Дослідження шестеренчастого насоса як нагнітального пристрою дискового екструдера для переробки полімерних матеріалів / Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, М. В. Сезонов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 3. — С. 136—139.
2. Обладнання для одержання і формування полімерних композиційних матеріалів / Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, Г. Л. Рябцев, М. В. Сезонов // Хімічна промисловість України. — 2001. — № 6. — С. 55—61.
3. Дослідження лінії для виробництва рукавної полімерної плівки. Методичні вказівки / Укл.: Л.Б. Радченко, М.П. Швед, А.Р. Степанюк, І.О. Мікульонок. — К.: НТУУ «КПІ», 2008. — С. 30—34.

УДК 678.023

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКСТРУЗІЇ ХАРЧОВОЇ ПЛІВКИ З PLA: ВІД СИРОВИНИ ДО ГОТОВОГО ПРОДУКТУ

А.Ю. Абасєв, М.П. Швед

Національний технічний університет України

«Київський Політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

03056, Київ, пр. Берестейський, 37, корп 19

ixf@kpi.ua

В умовах зростаючої екологічної свідомості та посилення вимог до зменшення пластикових відходів значної уваги набуває використання біорозкладних полімерів. Одним із найперспективніших матеріалів для виробництва харчової упаковки є полілактид (PLA) [1]. Він виготовляється з відновлюваних джерел, таких як кукурудзяний крохмаль або цукрова тростина, та може повністю розкладатися в умовах промислового компостування.

Харчова плівка з PLA має ряд переваг перед традиційними нафтохімічними полімерами, такими як поліетилен (PE) та поліпропілен (PP):

- висока прозорість і блиск, що покращує презентацію продуктів;
- хороший бар'єр для запахів і жирів;
- відповідність вимогам щодо безпечності харчових упаковок;
- можливість компостування після використання, що зменшує негативний вплив на довкілля.

Разом з тим, процес екструзії PLA має свої технологічні особливості, пов'язані з його низькою термостійкістю, високою в'язкістю у розплавленому стані та необхідністю точного контролю температури. У цій роботі розглядаються основні температурні та швидкісні параметри екструзії харчової плівки з PLA, що впливають на якість кінцевого продукту.

Особливу увагу приділяють процесу підготовки сировини – висушування PLA перед екструзією, так як PLA є гігроскопічним полімером, тобто активно поглинає вологу з навколишнього середовища. Навіть незначна кількість води (понад 250 ppm) може спричинити гідроліз під час екструзії, що призведе до зменшення молекулярної маси, зниження в'язкості та погіршення механічних властивостей плівки (зниження міцності на розтяг, утворення газових бульбашок у плівці, зниження оптичної прозорості). Використовують адсорбційні сушарки з точкою роси -40°C або нижче, температурою сушіння: $60\text{--}80^{\circ}\text{C}$, тривалістю 4–6 годин, при швидкості потоку осушеного повітря $1,8\text{--}2,5\text{ м}^3/\text{кг}$ PLA на годину.

PLA має вузький температурний діапазон переробки, тому точний контроль температури є критично важливим. Перегрів може викликати термічну деструкцію, а недостатнє нагрівання — проблеми з текучістю та формуванням плівки. PLA має псевдопластичну поведінку – в'язкість зменшується при збільшенні швидкості зсуву. При надто високій швидкості зсуву PLA може деградувати та втрачати механічні властивості. Тому важливо підібрати оптимальне співвідношення температури та швидкості обертання шнека.

Кафедрою машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв НТУУ «КПІ» було проведено дослідження з виробництва PLA плівки в екструзійній установці, яка розроблена на основі високоефективного та універсального каскадного дисково-шестеренчатого екструдера, що складається з дискового розплавлювача, черв'ячного екструдера-домішувача та дозуючого шестеренчастого насоса на основі методу екструзії рукава з роздуванням за схемою «знизу – нагору». Процес екструзії біо- та фоторозкладних плівок з PLA передбачає встановлення певних температурних і швидкісних параметрів для кожного етапу. В якості сировини було використано гранули Ingeo 2003D від компанії NatureWorks LLC. В процесі дослідження для забезпечення

оптимального плавлення та транспортування PLA Ingeo 2003D отримали наступний температурний профіль нашого екструдера (Табл.1):

Таблиця 1. Температурний профіль екструдера

Зона екструзії	Температура, °C
Зона подачі	185-190
Зона пластифікації	190-195
Зона компресії	195-205
Зона дозування	205-210
Матриця	210

За результатами досліджень розроблено номограму для визначення узгоджених режимів роботи каскадного дисково-шестеренного екструдера, для розплаву PLA Ingeo 2003D, приведена на рис. 1.

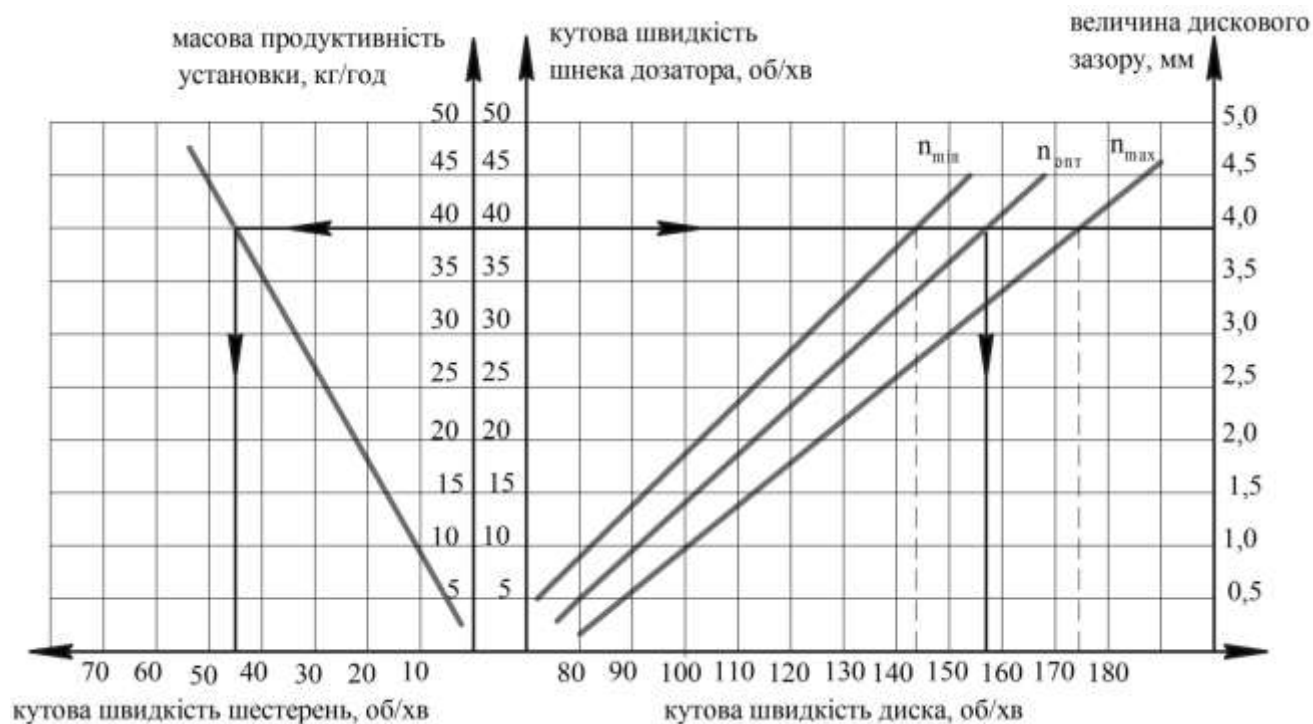


Рисунок.1. Номограма для визначення режимів роботи дисково-шестеренного екструдера

Система дозволяє гнучко керувати процесом екструзії. Хоча основні параметри (оберти шнека, насоса, екструдера та зазор) задаються згідно з продуктивністю, оператор може швидко впливати на температуру чи однорідність розплаву. Для цього не потрібно змінювати ні продуктивність, ні температуру в зонах обігріву — достатньо відкоригувати оберти та робочий зазор екструдера в межах 10%. Це забезпечує значну оперативну маневреність.

PLA Ingeo 2003D має псевдопластичну поведінку – в'язкість зменшується при збільшенні швидкості зсуву. При надто високій швидкості зсуву PLA може деградувати та втрачати механічні властивості. Тому важливо підібрати оптимальне співвідношення температури та швидкості подачі розплаву шестеренчастим насосом, що допомагає уникнути термодеструкції та отримати якісну плівку. Під час роботи отримали оптимальний температурний профіль для PLA Ingeo 2003D в діапазоні 185–210°C та оптимальну швидкість обертання шестерні дозуючого шестеренчастого насоса $n = 0,75$ об/с, при цьому опір формуючої головки склав $P = 25,3$ МПа, а продуктивність лінії $Q = 0,011$ кг/с.

Запропонована технологія дозволяє виробляти різноманітні екологічно безпечні плівки, корисні для виробників, споживачів та торгівлі. Ключовою перевагою є те, що виробництво біо- та фоторозкладних плівок можна легко інтегрувати в існуючі технологічні лінії без значних змін, що робить перехід на нові матеріали економічно вигідним. Одночасно вдосконалюються і традиційні матеріали: вони стають міцнішими, тоншими і легшими, з'являються нові види багаторазової упаковки [2]. Таким чином, біо- та фотополімери — це перспективний крок до стійкого розвитку в пакувальній галузі. Незважаючи на виклики, їхнє впровадження є важливим інструментом у боротьбі з забрудненням пластиком.

Література:

1. Замотаев П.В. Полимеры, разрушающиеся под действием природных

факторов // Упаковка – 1999. – №4. – С. 34–37.

2. Гавва О.М. Шляхи вдосконалення та розвитку технологій і обладнання пакування / Матеріали науково-практичної конференції «Пакувальна індустрія». – Алушта, 2007. – С. 162-175.

УДК 678.023

МОДЕРНІЗАЦІЯ ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА ДЛЯ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ВИСОКОВ'ЯЗКИХ БІОПОЛІМЕРІВ ТИПУ PLA

А.Ю. Абаєв, М.П. Швед

Національний технічний університет України «КПІ»

03056, Київ, пр. Берестейський, 37, корп 19

У сучасному хімічному машинобудуванні особлива увага приділяється створенню енергоефективного, надійного та технологічно-гнучкого обладнання для перероблення полімерних матеріалів, зокрема біорозкладних термопластів. Одним із ключових елементів екструзійних ліній є шестеренний насос [1], який забезпечує стабільну подачу полімерного розплаву до формувального вузла.

При роботі з високо-в'язкими біополімерами типу полілактиду (PLA) або сополімерів РВАТ, РНА, традиційні конструкції насосів мають обмеження [2] — виникають локальні застійні зони, перегрів розплаву, пульсації тиску та зниження гомогенності потоку. Це погіршує якість готової плівки та зменшує ресурс роботи насоса.

Метою дослідження є підвищення ефективності роботи шестеренного насоса за рахунок удосконалення геометрії вхідної зони, що забезпечує швидке, стабільне й рівномірне заповнення міжзубцевих порожнин полімерним розплавом.

В основу модернізації покладено задачу вдосконалити шестеренний насос для полімерного розплаву, у якому нова геометрія вхідної зони сприяє рівномірному розподілу потоку по ширині шестерень.

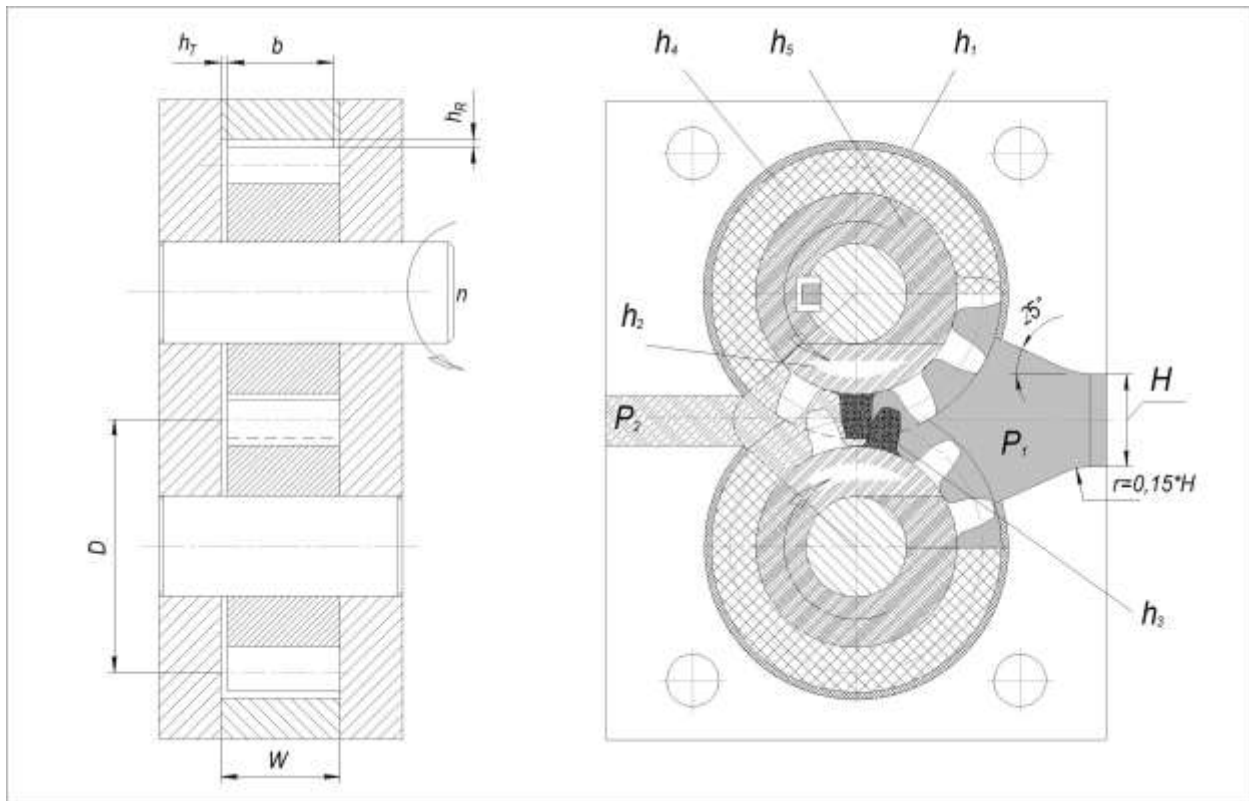
Під час експлуатації класичного насоса з круглим вхідним отвором спостерігаються нерівномірні гідродинамічні поля та локальні зони застою. Для їх усунення запропоновано конструктивне рішення, що включає:

- геометрію вхідного отвору змінено з круглого на прямокутний із заокругленими кутами;
- верхню та нижню стінки каналу виконано з нахилом 25° до дотичної осі шестерень, що забезпечує рівномірний розподіл потоку по ширині;
- вхідна частина має плавне радіусне розширення (типу bell-mouth), аналогічне дифузору Вентурі, яке зменшує гідравлічні втрати та покращує заповнення міжзубцевих порожнин.
- для уникнення налипання біополімерів поверхні каналу поліруються до $Ra \leq 0,4$ мкм і покриваються антипригарним шаром Ni-PTFE або DLC.

Сутність модернізації показана на рисунку 1, на якому зображено поздовжній розріз шестеренного насоса.

Для оцінки впливу модернізованої конструкції корпусу й вхідної/вихідної зони шестеренного насоса доцільно застосувати методи CFD-моделювання, які дозволяють відтворити картину течії в міжзубцевих порожнинах, зони рециркуляції, розподіл тиску та швидкостей без виконання дороговартісних експериментів.

CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics) ґрунтується на числовому розв'язанні системи рівнянь нерозривності та збереження імпульсу для в'язкої нестисливої рідини. Для розрахунків використано програмний комплекс SolidWorks Flow Simulation, який реалізує метод скінченних об'ємів. Область розрахунку розбивається на сукупність контрольних об'ємів (елементів сітки), для кожного з яких інтегральна форма рівнянь Нав'є–Стокса апроксимується алгебраїчними співвідношеннями. В результаті формується система лінійних рівнянь відносно тиску та компонент швидкості, яка розв'язується ітераційними методами до досягнення збіжності.



h_1 – перша зона радіальних зазорів; h_2 – друга зона торцевих зазорів; h_3 – третя зона торцевих зазорів; h_4 – четверта зона торцевих зазорів; h_5 – п'ята зона торцевих зазорів; P_1 – зона низького тиску; P_2 – зона високого тиску

Рисунок 1 – Конструктивна схема модернізованого шестеренного насоса

Геометричні параметри модернізованого вузла

- Ширина каналу: $W = b - 1 \dots 2$ мм, де b — ширина шестерень.
- Висота каналу: $H = 0,35 \dots 0,55 D$, де D — міжосьовий діаметр.
- Радіус заокруглення кутів: $r = 0,15 \dots 0,25 H$.
- Кут розкриття bell-mouth: $20^\circ \pm 5^\circ$.
- Довжина плавного переходу: $1,2 \dots 1,5 H$.

Геометрію насоса побудовано в середовищі **SolidWorks** на основі робочих креслень. Модель включає:

- корпус із входним і вихідним каналами;

- два співвісні зубчасті колеса (ведуче та ведене);
- вали, що задають обертальний рух шестерень;
- об'єм робочої рідини в міжзубцевих порожнинах та каналах.

Для CFD-аналізу створено обчислювальну область рідини шляхом виконання операції «Виключення твердих тіл» (тіло шестерень задаються як стінки, а розрахунок ведеться в порожнинах між ними). Як робочу рідину прийнято ньютонівську рідину з заданими густиною та динамічною в'язкістю, що відповідають умовам перекачування біополімера. Шестерні задавались як обертові тіла з фіксованою кутовою швидкістю, що відповідає номінальній частоті обертання насоса. Стінки корпусу та кришок – умова «no-slip» (відсутність просковзування).

Результати та їх обговорення

На основі CFD-розрахунку отримано просторові поля швидкості та тиску в об'ємі насоса для базової та модернізованої конструкцій. Результати показані на рисунках 2 та 3. Візуалізація показала, що:

- у базовому варіанті (рисунок 2) в зоні входу в міжзубцеві порожнини присутні розвинені зони рециркуляції, спостерігається відрив потоку від стінки та неоднорідне заповнення об'єму між зубцями;
- у модернізованому варіанті (рисунок 3) завдяки плавнішому підведенню та спрямуванню потоку інтенсивність рециркуляції зменшується, потік більш рівномірно заповнює міжзубцеві порожнини, зникають локальні застійні зони.

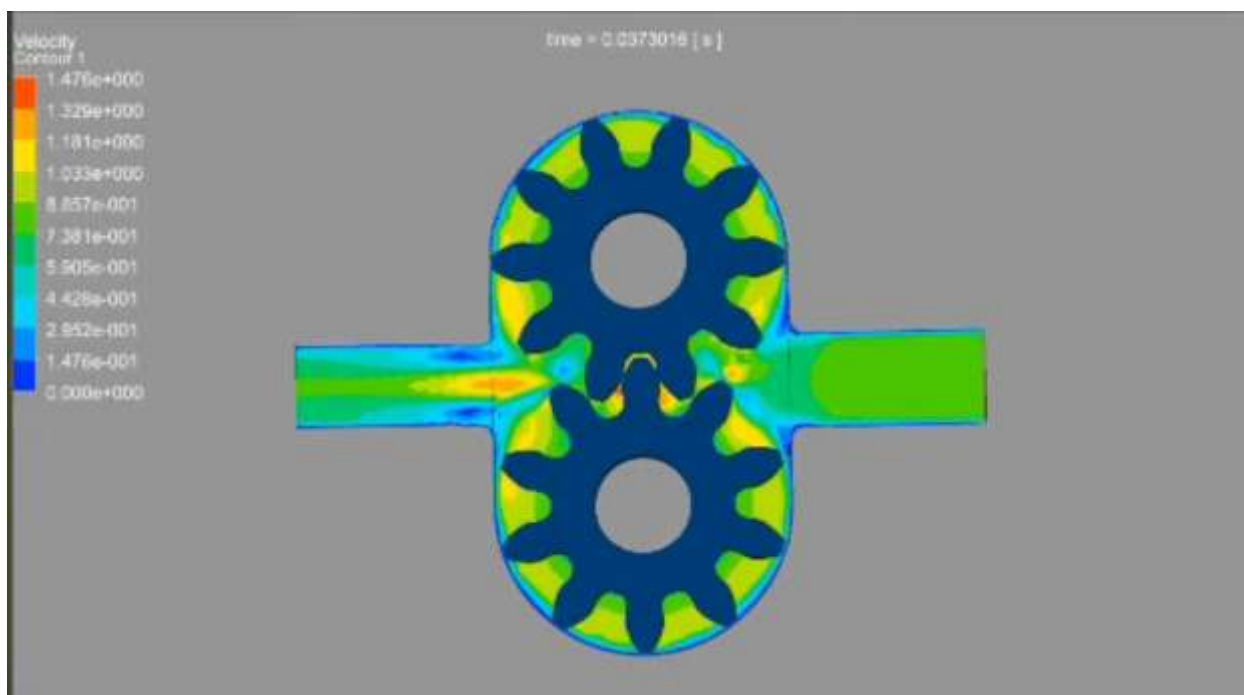


Рисунок 2 – Візуалізація потоків полімеру до модернізації

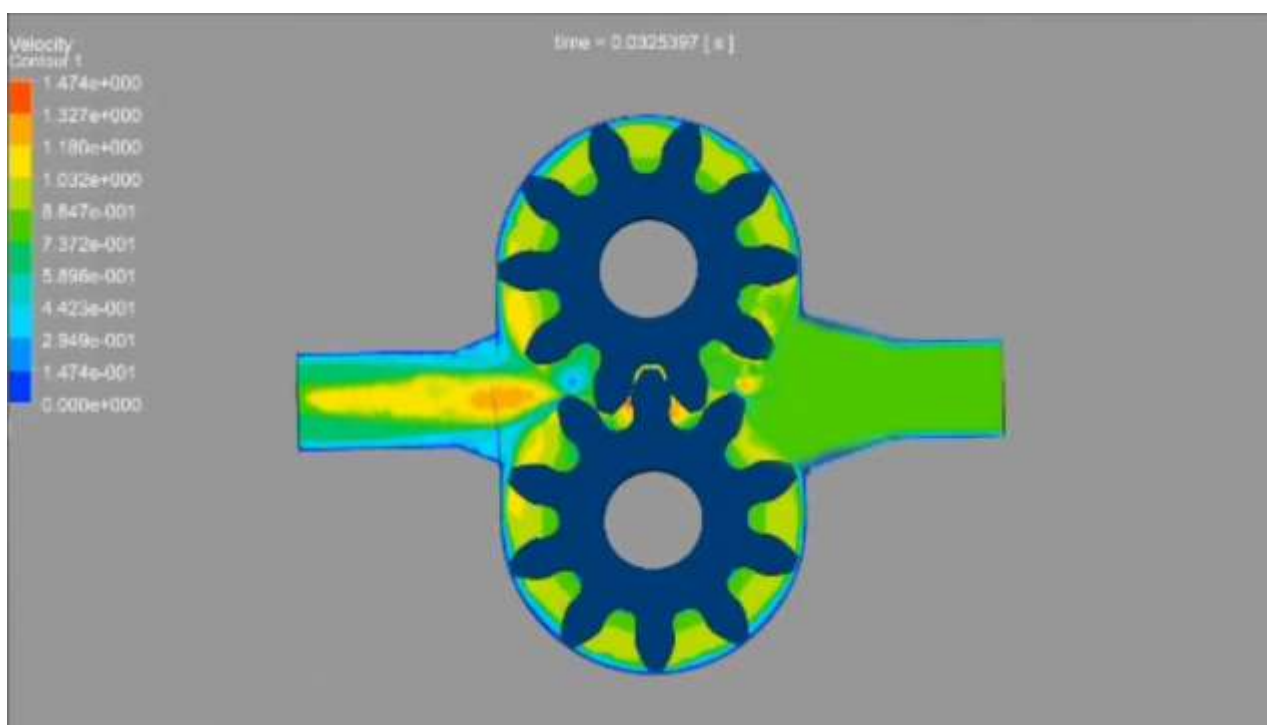


Рисунок 3 – Візуалізація потоків полімеру після модернізації

Візуалізації розподілу тиску демонструють, що у модернізованому корпусі градієнт тиску між зоною всмоктування та зоною нагнітання

розподілений рівномірніше, знижується локальне перевантаження на зубці в зоні виходу, що потенційно зменшує їх зношування.

Аналіз інтегральних характеристик показав, що:

- пульсації витрати на виході насоса зменшуються;
- втрати повного тиску в області входу й виходу знижуються завдяки покращенню обтікання;
- підвищується гідравлічний ККД насоса, що може привести до зменшення споживаної потужності приводу при забезпеченні тієї ж продуктивності.

На рисунках 2 та 3 добре видно, що швидкісні вектори в модернізованій конструкції спрямовані більш упорядковано, а поле швидкостей на виході має меншу нерівномірність.

Результати впровадження

Таблиця 1. Порівняльні випробування модернізованого насоса.

Показник	До модернізації	Після модернізації
Втрати тиску у вхідній камері	0,35 МПа	0,28 МПа
Коливання тиску перед головкою	$\pm(3-4) \%$	$\pm(1-1,5) \%$
Температурний градієнт по ширині насоса	6 °C	3 °C
Рівномірність подачі (по ширині шестерень)	$\pm(10-12) \%$	$\pm 5 \%$
Енергоспоживання приводу	—	-8 %

Отримані дані свідчать, що модернізація сприяє зниженню гідравлічних втрат, покращенню температурної стабільності розплаву та підвищенню рівномірності подачі навіть при роботі з високо-в'язкими біополімерами.

Висновки: запропонована конструкція вхідної зони шестеренного насоса забезпечує оптимізований розподіл потоку розплаву, зменшення гідравлічних

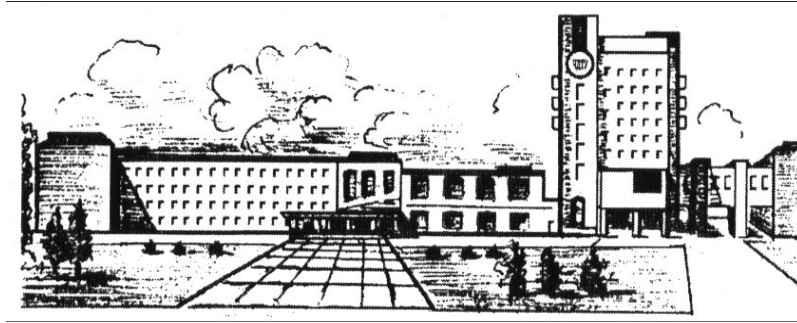
втрат і стабілізацію тиску у зоні подачі. Вдосконалення дозволяє знизити деградацію біополімерів PLA/PBAT та підвищити якість готової плівки. Розроблене рішення може бути впроваджене у промислові каскадні екструзійні лінії [3] для виготовлення біо- та фоторозкладних полімерних плівок.

Список літератури

1. Дослідження шестеренчастого насоса як нагнітального пристрою дискового екструдера для переробки полімерних матеріалів / Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, М. В. Сезонов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 3. — С. 136—139.
2. Keller, R., & Behrendt, N. Gear Pumps in Polymer Processing. — Hanser Publishers, Munich, 2018. — 244 p. — pp. 50—53.
3. Jamshidian, M., Tehrany, E. A., Imran, M., Jacquot, M., & Desobry, S. Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2010, 9(5), pp. 552–571.

ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 2(40)



Чернігів 2025

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 7 від 30.06.2025 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975 (зі змінами від 09.02.2021 № 157), відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – № 2(40). – 522 с.

У журналі вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки» за спеціальностями: прикладна механіка, матеріалознавство, машинобудування, інформаційно-комп'ютерні технології, електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, хімічні та харчові технології, будівництво та геодезія. Статті прорецензовані провідними вченими у відповідних галузях знань.

Журнал «Технічні науки та технології» буде корисним для науковців, науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та студентів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 62:67.05

Головний редактор:

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка».

Заступник головного редактора:

Болотов М. Г., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Члени редакційної колегії:

Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування

Бойко С. В., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Дмитрієв Д. О., доктор технічних наук, професор, Херсонський національний технічний університет;

Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Марков О. Є., доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія;

Новомлинець О. О., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Охрімченко О. А., доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор, почесний член редколегії;

Повстяной О. Ю., доктор технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет;

Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Сіра Н. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Федориненко Д. Ю., доктор технічних наук, професор, Tohoku University, Японія;

Ющенко С. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Michał Bembek, Doctor of Engineering Sciences, Professor, AGH University of Krakow (Krakow, Poland).

Інформаційно-комп'ютерні технології

Азаров О. Д., доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет;

Дорош М. С., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Єременко В. С., доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Криворучко О. В., доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Мелешко С. В., доктор технічних наук, професор, Центральноукраїнський національний технічний університет;

Павленко П. М., доктор технічних наук, професор, Державний університет «Київський авіаційний інститут»;

Семенов С. Г., доктор технічних наук, професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця;

Цюцюра С. В., доктор технічних наук, професор, Державний торговельно-економічний університет.

Енергетика, електротехніка та електромеханіка

Вінніков Д., доктор технічних наук, професор, Таллінський університет технологій (Естонія);

Волков І. В., доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України;

Галкін І., доктор технічних наук, професор, Ризький технічний університет (Латвія);

Гусев О. О., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Пристапа А. Л., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Ромеро-Кадавал Е., доктор технічних наук, професор, Університет Естремадури (Іспанія);

Степенко С. А., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Хімічні та харчові технології

Антонюк І. Ю., кандидат технічних наук, доцент, Державний торговельно-економічний університет;

Буяльська Н. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Гуменюк О. Л., кандидат хімічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Дударев І. М., доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет;

Звірко О. І., доктор технічних наук, професор, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України;

Плаван В. П., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну;

Самохвалова О. В., кандидат технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі;

Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка;

Трус І. М., доктор технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Челябієва В. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Будівництво та геодезія

Білик С. І., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Крячок С. Д., кандидат технічних наук;

Михайловський Д. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Паляниця Б. Б., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Львівська політехніка»;

Савенко В. І., кандидат технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Сахо Є. Ю., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Терещук О. І., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Юрченко В. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-158-163](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-158-163)

УДК 678.023

Анатолій Юрійович Абаєв¹, Микола Петрович Швед²¹студент кафедри машин та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: abayev@uk.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0039-9655>²кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: npchved46@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7725-1447>

ІННОВАЦІЙНІ ПОЛІМЕРИ ДЛЯ СТІЙКОГО МАЙБУТНЬОГО: ЕКСТРУЗІЯ БІО- ТА ФОТОДЕСТРУКТИВНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК

У роботі розглянуто проблему забруднення навколишнього середовища полімерними відходами та перспективи використання біо- та фотодеструктивних полімерів (PLA, PHA, PBAT) для виготовлення плівок. Описано особливості екструзії з роздуванням на каскадному дисково-шестеренному екструдері, зазначено оптимальні температурні та швидкісні параметри процесу. Розкрито роль добавок у формуванні властивостей плівок. Визначено значення міжнародних стандартів для оцінки біорозкладності. Зроблено висновок про важливість впровадження інноваційних полімерів у пакувальну промисловість задля екологічної стійкості.

Ключові слова: біополімери; екструзія; PLA; PHA; PBAT; біорозкладність; пакувальні плівки; фоторозклад.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. У сучасному світі проблема забруднення навколишнього середовища полімерними відходами набуває дедалі більшої гостроти. Традиційні полімери, такі як поліетилен (PE) та поліпропілен (PP), розкладаються у природних умовах сотні років, що створює значне навантаження на екологію. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є розробка та використання біорозкладних полімерних матеріалів, зокрема полілактиду (PLA), полігідроксіалканоатів (PHA) та полібутиленадипат-терефталату (PBAT). Ці матеріали здатні розкладатися під впливом природних факторів, таких як волога, кисень, ультрафіолетове випромінювання та діяльність мікроорганізмів [1-2]. Водночас вони демонструють механічні властивості, які дозволяють використовувати їх для виробництва плівкових матеріалів, що можуть стати екологічною альтернативою традиційним пластикам [3].

Постановка проблеми. Значний науковий і промисловий інтерес викликає питання розробки ефективної технології виготовлення біорозкладних плівок. Метод екструзії з роздуванням є одним із найбільш поширених і економічно вигідних процесів у виробництві полімерних пакувальних матеріалів. У цьому дослідженні розглядається можливість використання PLA, PHA та PBAT для отримання біо- та фоторозкладних полімерних плівок методом екструзії на каскадному дисково-шестеренному екструдері.

PLA, PHA та PBAT мають різні характеристики, що визначають їхнє застосування в пакувальній індустрії. PLA зазвичай використовують для виготовлення легких плівок і упаковок, проте його термостійкість обмежена. PHA і PBAT, у свою чергу, мають кращі механічні властивості при низьких температурах, що робить їх більш ефективними для виготовлення плівок, які повинні витримувати більші навантаження. У порівнянні з традиційними полімерними матеріалами, PLA, PHA та PBAT демонструють значні переваги з погляду біорозкладу та екологічної безпеки. Їхнє широке застосування в майбутньому дозволить знизити забруднення навколишнього середовища пластиковими відходами, що є критично важливою проблемою для сучасного суспільства. На рис. 1 наведено графік порівняння механічних, термічних і біорозкладних властивостей PLA, PHA та PBAT.

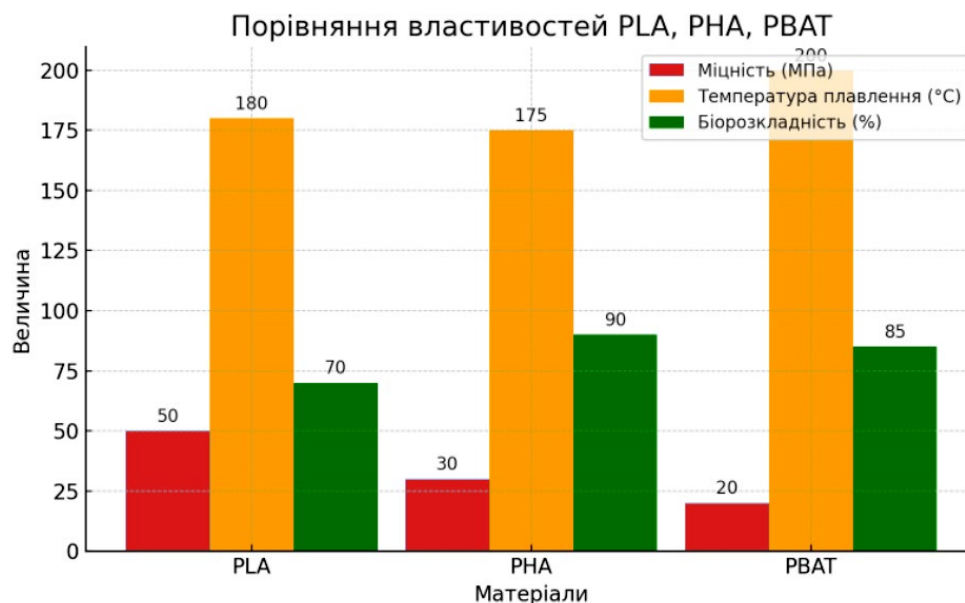


Рис. 1. Порівняння властивостей PLA, PHA та PBAT

Для підтвердження екологічної безпеки біополімерів важливо звернути увагу на міжнародні стандарти, які регулюють використання біорозкладних матеріалів [4]. Одним із таких стандартів є ISO 14851, який визначає методи тестування біорозкладу матеріалів у морській воді. Цей стандарт є важливим для оцінки здатності біополімерів, таких як PLA, PHA та PBAT, до розкладу в природних умовах, зокрема в морському середовищі. Такі тестування допомагають встановити, наскільки швидко та безпечно ці матеріали можуть розкладатися, зменшуючи загрози для навколишнього середовища. Відповідність цим стандартам є важливим кроком до забезпечення довіри споживачів та промислових виробників до біорозкладних полімерів, а також до їхнього впровадження на масовому рівні в різних сферах, включаючи пакувальну промисловість.

Виділення недосліджених частин проблеми. Незважаючи на активний розвиток досліджень у сфері біорозкладних полімерів (PLA, PHA, PBAT), залишаються недостатньо вивченими ключові аспекти їх промислового застосування. Зокрема, недостатньо досліджено: оптимальну взаємодію полімерних матриць із добавками (пластифікаторами, стабілізаторами) при високошвидкісній екструзії, що впливає на стабільність процесу та якість плівок; довгострокову поведінку матеріалів у реальних умовах експлуатації, особливо під комбінованим впливом УФ-випромінювання, механічних навантажень та біотичних факторів; ефективність розкладу в різних природних середовищах (окрім морської води, згідно ISO 14851), таких як ґрунти чи прісноводні екосистеми; масштабування технології для каскадних дисково-шестеренних екструдерів, зокрема вплив параметрів екструзії на механічні властивості плівок. Ці прогалини обмежують широке впровадження екологічно безпечних плівок у пакувальну галузь, що потребує комплексного науково-технічного обґрунтування.

Мета. Розробити та оптимізувати технологію виробництва біо- та фоторозкладних полімерних плівок (PLA, PHA, PBAT) методом екструзії з роздуванням на каскадному дисково-шестеренному екструдері, з оцінкою їхніх властивостей та відповідності міжнародним стандартам біорозкладу, для застосування в пакувальній промисловості як екологічної альтернативи традиційним пластикам.

Методика дослідження. Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв НТУУ «КПІ» імені Ігоря Сікорського здійснює дослідження процесів виробництва плівки з такими якостями на основі методу екструзії рукава з роздуванням за схемою

«знизу – нагору» рис. 2. Процес екструзії біо- та фоторозкладних плівок з PLA, PHA і PBAT передбачає встановлення певних температурних і швидкісних параметрів для кожного етапу. Типові температури для екструзії PLA знаходяться в межах 180–210 °С, для PHA — 170–190°С, а для PBAT — 190–220°С. Ці температури є оптимальними для плавлення матеріалів та забезпечення їхнього ефективного змішування.

Екструзійна установка розроблена на основі високоефективного та універсального каскадного дисково-шестеренчатого екструдера, рис. 2, що складається з дозатора 1, дискового розплавлювача – гомогенізатора 2 та дозуючого шестеренчастого насоса 3. Для виготовлення плівок із PLA, PHA чи PBAT необхідно ретельно підготувати полімерну суміш, що включає не лише самі полімери, але й добавки, які покращують властивості кінцевого продукту. До таких належать пластифікатори, стабілізатори, антиоксиданти, а також барвники або інші речовини, що покращують розкладність матеріалу під впливом світла та природних факторів [5].

Вихідний гранульований полімер і необхідні добавки шнековими дозаторами 1 подаються в бункер дискового екструдера. Особливу увагу слід приділити вибору стабілізаторів для біополімерів, оскільки вони часто схильні до деградації при високих температурах або впливу ультрафіолетових променів. Окрім того, додавання пластифікаторів дозволяє збільшити гнучкість плівок, що важливо для багатьох застосувань, зокрема для пакувальних матеріалів. Процес змішування, усереднення та фарбування полімерної маси відбувається в дисковому екструдері 2, а створення тиску та дозування – у шестеренному насосі 3, які з'єднані послідовно.

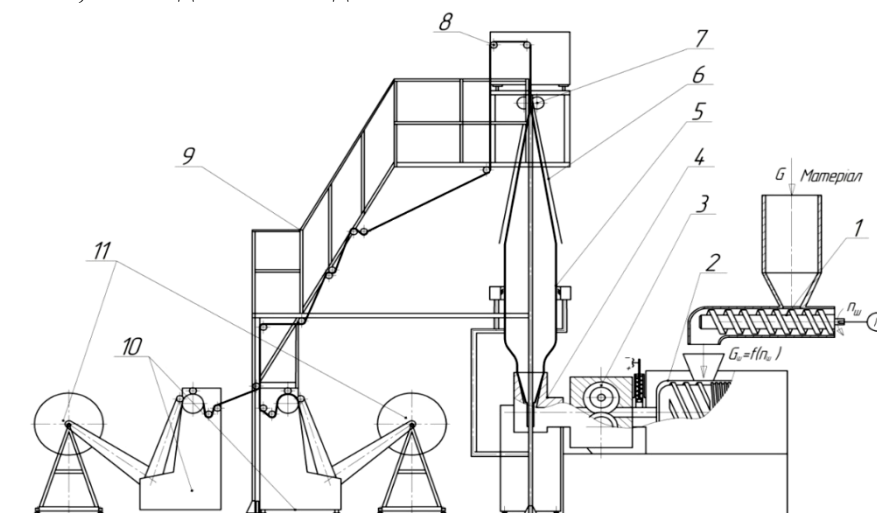


Рис. 2 – Схема установки для виробництва рукавної плівки

1 – дозатор сировини; 2 – екструдер дисковий; 3 – насос шестеренний; 4 – формуюча головка; 5 – кільце охолодження; 6 – складальні пластини; 7 – тягучі валки; 8 – обвідні валки; 9 – естакада; 10 – маніпуляційні верстати; 11 – прийомні верстати

Полімерна маса рухається від завантажувальної воронки до формувальної головки. Під час руху вздовж дискового екструдера в багатозахідній завантажувально-пластикувальній зоні гранули ущільнюються, завдяки обертанню диска й дисипації механічної енергії приводу в теплову плавляться, а в торцевих робочих зазорах розплав гомогенізуються і стає однорідним. Далі, отриманий розплав під тиском 5-7 МПа заповнює міжзубні впадини шестеренного насоса 3 і переноситься ними в зону високого тиску 20-25 МПа, проходить кільцеву формувальну головку 4, одночасно через дорн кільцевої головки в середину рукава подається повітря, яке роздуває його до певних розмірів, надаючи трубчасту форму. Після формування плівки за допомогою роздування, наступним етапом є її охолодження. Для цього плівка обдувається холодним повітрям у кільці охолодження

5, що дозволяє швидко знизити температуру полімеру і запобігти його деформації. Далі плівковий рукав складається за допомогою складальних пластин 6 і направляється між гумованими валками тягнучого пристрою 7, обминаючи обвідні валки 8 на верстаті-маніпулятори 10. Після них складена плівка попадає на прийомні верстати 11, де намотується в рулони у вигляді рукава або полотна.

Результати дослідження. Було проведено дослідження з виробництва PLA плівки в екструзійній установці, яка розроблена на основі високоефективного та універсального каскадного дисково-шестеренчатого екструдера, що складається з дискового розплавлювача, черв'ячного екструдера-домішувача та дозуючого шестеренчастого насоса на основі методу екструзії рукава з роздуванням за схемою «знизу – нагору». Як сировину було використано гранули Ingeo 2003D від компанії NatureWorks LLC. У процесі дослідження для забезпечення оптимального плавлення та транспортування PLA Ingeo 2003D отримали наступний температурний профіль нашого екструдера (табл. 1).

Таблиця 1 – Температурний профіль екструдера

Зона екструзії	Температура, °C
Зона подачі	185-190
Зона пластифікації	190-195
Зона компресії	195-205
Зона дозування	205-210
Матриця	210

У процесі проведення реологічних досліджень отримали залежність в'язкості PLA від температури (рис. 3). В'язкість розплаву PLA Ingeo 2003D зменшується зі збільшенням температури, що є характерним для термопластичних полімерів. Це впливає на текучість матеріалу під час екструзії та, відповідно, на якість кінцевої плівки.

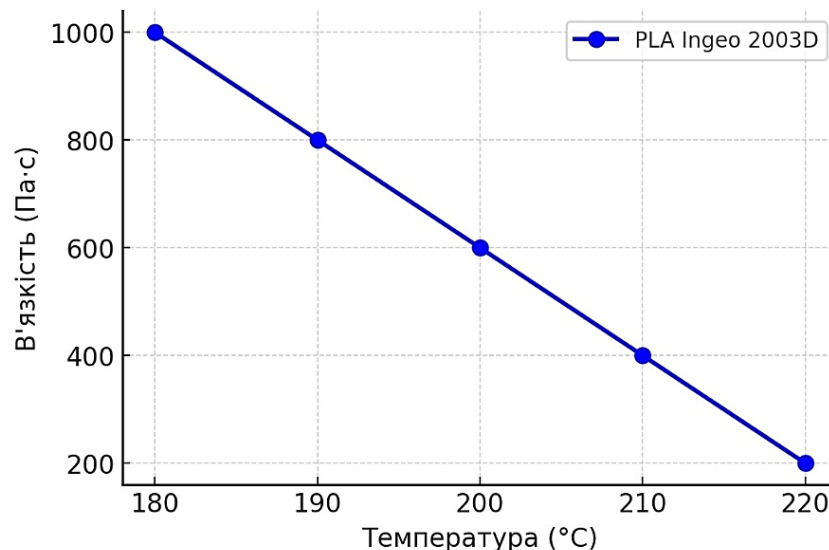


Рисунок 3. Залежність в'язкості PLA Ingeo 2003D від температури

PLA Ingeo 2003D має псевдопластичну поведінку – в'язкість зменшується при збільшенні швидкості зсуву. При надто високій швидкості зсуву PLA може деградувати та втрачати механічні властивості. Тому важливо підібрати оптимальне співвідношення температури та швидкості подачі розплаву шестеренчастим насосом, що допомагає уникнути термодеструкції та отримати якісну плівку. Під час роботи отримали оптимальний температурний профіль для PLA Ingeo 2003D в діапазоні 185–210 °C та оптимальну швидкість обертання шестерні дозуючого шестеренчастого насоса $n = 0,75$ об/с, при цьому опір формуючої головки склав $P = 25,3$ МПа, а продуктивність лінії $Q = 0,011$ кг/с.

Висновки. За вищенаведеною технологією можна одержувати найрізноманітніші екологічно безпечні плівки, які стануть у пригоді як виробнику, так і споживачу. Вдосконалення методів виробництва біо- та фоторозкладних плівок, зокрема на основі екструзії, дозволяє інтегрувати ці матеріали в наявні технологічні лінії без значних змін у виробничих процесах, що зменшує витрати та робить перехід до використання нових матеріалів більш доступним для виробників. При цьому традиційні пакувальні матеріали постійно вдосконалюються, що підвищує їх якість. Завдяки впровадженню нових наукових і технологічних розробок вдається покращити властивості матеріалів, зменшити товщину та вагу упаковки, а також створити нові види багаторазової тари [6]. Таким чином, біо- та фотодеструктивні полімери є важливим кроком до створення сталих екологічних технологій у пакувальній промисловості та інших сферах, що з часом можуть стати основним інструментом у боротьбі з пластиковими відходами. Їх широке впровадження вимагатиме подолання певних труднощів, але з огляду на важливість екологічної проблеми це є перспективним напрямком для майбутнього розвитку полімерної галузі.

Список використаних джерел

1. Замотаєв, П. В. (1999). Полімери що руйнуються під дією природних факторів. *Упаковка*, (№4), 34-37
2. Sudesh, K., Abe, H., & Doi, Y. (2000) Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates: biological polyesters. *Progress in Polymer Science*, 25(10), 1503-1555. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00035-6).
3. He, X., Jin, Y., Tang, L., & Huang, R. (2023). A brief review and perspective on the functional biodegradable films for food packaging. *arxiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2311.16932>.
4. *International Organization for Standardization*. (2020). ISO 14851: Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium - Method by measuring the oxygen demand in a closed respirometer. <https://www.iso.org/standard/72776.html>.
5. Niaounakis, M. (2015). *Biopolymers. Processing and Products*. William Andrew Publishing <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00487-1>.
6. Гавва, О. М. (2007). Шляхи вдосконалення та розвитку технологій і обладнання пакування. У *Матеріали науково-практичної конференції «Пакувальна індустрія»* (с. 162–175).

References

1. Zamotaiev, P. V. (1999). Polimery shcho ruiniuiutsia pid diieiu pryrodnykh faktoriv. [Polymers that degrade under the influence of natural factors]. *Upakovka – Packaging*, (4), 34-37.
2. Sudesh, K., Abe, H., & Doi, Y. (2000) Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates: biological polyesters. *Progress in Polymer Science*, 25(10), 1503-1555. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00035-6).
3. He, X., Jin, Y., Tang, L., & Huang, R. (2023). A brief review and perspective on the functional biodegradable films for food packaging. *arxiv preprint* <https://arxiv.org/abs/2311.16932>.
4. *International Organization for Standardization*. (2020). ISO 14851: Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium- Method by measuring the oxygen demand in a closed respirometer. <https://www.iso.org/standard/72776.html>.
5. Niaounakis, M. (2015). *Biopolymers. Processing and Products*. William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00487-1>.
6. Havva, O. M. (2007). Shliakhy vdoskonalennia ta rozvytku tekhnolohii i obladnannia pakuvannia. [Ways to improve and develop packaging technologies and equipment]. *Pakuvalna industriia: naukovo-praktychna konferentsiia – Packaging industry: Scientific and Practical Conference* (pp. 162-175).

Отримано 23.04.2025

Anatolii Abayev¹, Mykola Shved²

¹Student, Department of Machinery and Apparatus of Chemical and Petroleum Refineries
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: abayev@uk.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-0039-9655>

²PhD in Technical Sciences,
Associate Professor of Department of Machinery and Apparatus of Chemical and Petroleum Refineries
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: npchved46@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-7725-1447>

**INNOVATIVE POLYMERS FOR A SUSTAINABLE FUTURE:
EXTRUSION OF BIO- AND PHOTODEGRADABLE POLYMER FILMS**

The article addresses the global issue of environmental pollution caused by conventional polymer waste and explores innovative solutions using biodegradable and photodegradable polymers, including: polylactic acid (PLA), polyhydroxyalkanoates (PHA), and polybutylene adipate terephthalate (PBAT). These materials are capable of decomposing under the influence of natural factors such as moisture, oxygen, ultraviolet radiation, and microbial activity. The study focuses on the extrusion-blow molding process for producing environmentally friendly films from these polymers using a cascade disk-gear extruder. The structure of the extrusion line is described, including the disc plasticizer, screw mixing extruder, and gear metering pump.

Optimal processing conditions were defined, namely: typical temperature ranges are 180–210 °C for PLA, 170–190 °C for PHA, and 190–220 °C for PBAT. The technological process also includes the precise formulation of the polymer blend, which incorporates various additives—such as plasticizers, stabilizers, antioxidants, and pigments—to enhance film performance and degradability. Particular attention is given to the role of stabilizers, considering the thermal and UV sensitivity of biodegradable polymers.

In the article, relevance of international standards is emphasized, especially ISO 14851, which determines test methods for biodegradation of plastics in marine environments. Compliance with these standards is crucial for industrial implementation of these materials. The research conducted at the Department of Machines and Apparatuses of Chemical and Petroleum-Refining Industries of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute confirms the feasibility of applying biodegradable materials using existing industrial extrusion equipment with minimal modification.

It is concluded in the study that development and industrial integration of bio- and photodegradable films represent a vital step toward sustainable packaging technologies. These materials offer significant ecological benefits and have the potential to replace conventional plastics in multiple applications, supporting the global movement toward circular economy and environmental responsibility.

Keywords: biopolymers; extrusion; PLA; PHA; PBAT; biodegradability; packaging films; photodegradation.

Fig.: 3. **Table:** 1. **References:** 6.

**ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ
НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ
«ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**

Шановні дописувачі!

Для подання статті необхідно спочатку надіслати статтю та інформацію про автора, з яким контактувати щодо публікації статті, оформлені за встановленими вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології». За умови відповідності статті спеціальностям, за якими акредитовано журнал, відповідності нормам академічної доброчесності за результатами перевірки на плагіат, позитивної незалежної рецензії від призначеного редакційною колегією рецензента, стаття розміщується в макеті журналу.

Редакційна колегія забезпечує розгляд та незалежне рецензування поданих до публікації матеріалів вченими, які мають науковий ступінь та здійснюють дослідження за спеціальністю, що відповідає тематиці поданого для публікації матеріалу, і є авторами (спів-авторами) загальною кількістю не менше трьох публікацій у наукових виданнях, включених до категорії «А» та/або категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, та/або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus за відповідною спеціальністю, оприлюднених упродовж останніх п'яти років.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації наукової статті становить:

- **80 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **60 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам достатньо електронної версії журналу).

Остаточна вартість публікації формується після готовності електронного макету журналу та повідомляється автору, відповідальному за публікацію статті. Оплата підтверджується квитанцією.

**УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ
ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ
ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ»: <http://tst.stu.cn.ua/>**

Контактна інформація:

Мороз Наталія Вікторівна

Тел.: (0462) 665-225

E-mail: tst.technical.sj@gmail.com

**Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.
Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи,
що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.**

*Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів
як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору
(тиражування, розповсюдження тощо).*

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 2(40)

Технічний редактор, відповідальна за випуск
Редактор
Комп'ютерна верстка

Н. В. Мороз
О. С. Смелова
О. П. Журко

Заснований у 2015 році. Ідентифікатор медіа
відповідно до Реєстру суб'єктів у сфері медіа від 31.08.2023 р. № 782 R30-01210

Підписано до друку 01.07.2025. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 60,68.
Тираж 100 пр. Замовлення № 16/25.

Редакційно-видавничий відділ
Національного університету «Чернігівська політехніка»
14030, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.

формат	поз.	Позначення	Посилання	К-сть	Матеріал
A1		Складальний кресленник	ЛМ41мн.01.101.001	1	
	1	Шнековий дозатор	ЛМ41мн.01.103.001	1	
	2	Дисковий екструдер	ЛМ41мн.01.102.001	1	
	3	Шестеренний насос	ЛМ41мн.01.106.001	1	
	4	Візок шестеренного насоса	ЛМ41мн.01.105.001	1	
	5	Головка формуюча	ЛМ41мн.01.101.002	1	
	6	Пристрій тягнучий	ЛМ41мн.01.101.003	1	
	7	Пристрій охолоджуючий	ЛМ41мн.01.101.004	1	
	8	Естакада	ЛМ41мн.01.101.005	1	
	9	Пристрій центруючий	ЛМ41мн.01.101.006	1	
	10	Пристрій складаючий	ЛМ41мн.01.101.007	1	
	11	Фільтр	ЛМ41мн.01.101.008	1	
	12	Пристрій прийому рулонів	ЛМ41мн.01.101.009	1	
	13	Візок прийому рулонів	ЛМ41мн.01.101.010	1	
	14	Пульт управління	ЛМ41мн.01.101.011	1	
	15	Станок намотувальний	ЛМ41мн.01.101.012	1	
	16	Пристрій активуючий	ЛМ41мн.01.101.013	1	
Відповідальна організація МАХНВ ФАПІЄ		Технічне узгодження Новохат О.А.	Розробник документа Абаєв А.Ю.	Документ затверджено Швед М.П.	
Власник документа КПІ ім. Ізоря Сікорського кафедра МАХНВ ФАПІЄ			Вид документа специфікація		Статус документа
			Назва, додаткова назва Лінія ЛРП 600		ЛМ41мн.01.101.001
			Інд. змін	Дата видання	Мова
				10.12.2025	Укр.
			Аркуш 1/1		

[illegible]

формат	поз.	Позначення	Посилання	к-сть	Material			
A1		Складальний кресленник	ЛМ41мп.01.102.001	1				
	1	Диск в зборі	ЛМ41мп.01.102.002	1				
	2	Корпус диска	ЛМ41мп.01.102.003	1				
	3	Компенсатор	ЛМ41мп.01.102.004	1				
	4	Корпус	ЛМ41мп.01.102.005	1				
	5	Станина	ЛМ41мп.01.102.006	1				
	6	Каретка	ЛМ41мп.01.105.007	1				
	7	Направляюча	ЛМ41мп.01.102.008	1				
	8	Муфта	ЛМ41мп.01.102.009	1				
	9	Кронштейн	ЛМ41мп.01.102.010	1				
	10	Стійка	ЛМ41мп.01.102.011	1				
	11	Щиток	ЛМ41мп.01.102.012	1				
	12	Щиток	ЛМ41мп.01.102.013	1				
	13	Фланець	ЛМ41мп.01.102.014	1				
	14	Елемент нагрівальний	ЛМ41мп.01.102.015	1				
	15	Кожух	ЛМ41мп.01.102.016	1				
	16	Механізм переміщення	ЛМ41мп.01.102.017	1				
	17	Стакан	ЛМ41мп.01.102.018	1				
	18	Кришка	ЛМ41мп.01.102.019	1				
	19	Колесо черв'ячне	ЛМ41мп.01.102.020	1				
	20	Стакан	ЛМ41мп.01.102.021	1				
	21	Вал черв'ячний	ЛМ41мп.01.102.022	1				
	22	Шків	ЛМ41мп.01.102.023	1				
	23	Шків	ЛМ41мп.01.102.024	4				
	24	Прокладка	ЛМ41мп.01.102.025	1				
	25	Кришка	ЛМ41мп.01.102.026	1				
Відповідальна організація МАХНВ ФАПІЄ		Технічне узгодження Новохат О.А.	Розробник документа Абасєв А.Ю.	Документ затверджено Швед М.П.		1:1		
Власник документа КПІ ім. Ізоря Сікорського кафедра МАХНВ ФАПІЄ			Вид документа специфікація		Статус документа			
			Назва, додаткова назва Екструдер дисковий ЕД 320		ЛМ41мп.01.102.001			
					Інд. змін	Дата видання	Мова	Аркуш
						10.12.2025	Укр.	1/4

формат	поз.	Позначення	Посилання	к-сть	Матеріал	
	26	Кришка	ЛМ41мп.01.102.027	1		
	27	Прокладка	ЛМ41мп.01.102.028	1		
	28	Шайба	ЛМ41мп.01.102.029	1		
	29	Втулка	ЛМ41мп.01.102.030	1		
	30	Кришка	ЛМ41мп.01.102.031	1		
	31	Прокладка	ЛМ41мп.01.102.032	1		
	32	Вал	ЛМ41мп.01.102.033	1		
	33	Колесо черв'ячне	ЛМ41мп.01.102.034	1		
	34	Направляюча	ЛМ41мп.01.102.035	1		
	35	Гайка	ЛМ41мп.01.102.036	1		
	36	Втулка	ЛМ41мп.01.102.037	1		
	37	Шайба	ЛМ41мп.01.102.038	1		
	38	Рейка	ЛМ41мп.01.102.039	1		
	39	Кришка	ЛМ41мп.01.102.040	1		
	40	Прокладка	ЛМ41мп.01.102.041	8		
	41	Шпонка	ЛМ41мп.01.102.042	1		
	42	Втулка	ЛМ41мп.01.102.043	1		
	43	Гільза	ЛМ41мп.01.102.044	1		
	44	Штуцер	ЛМ41мп.01.102.045	1		
	45	Лімб	ЛМ41мп.01.102.046	1		
	46	Пластина	ЛМ41мп.01.102.047	1		
	47	Скоба	ЛМ41мп.01.102.048	1		
	48	Болт	ISO 4017-M8 x 12	2		
	49	Болт	ISO 4017-M8 x 16	10		
	50	Болт	ISO 4017-M8 x 20	6		
	51	Болт	ISO 4017-M10 x 25	2		
	52	Болт	ISO 4017-M12 x 25	16		
	53	Болт	ISO 4017-M16 x 30	18		
	54	Болт	ISO 4017-M20 x 35	3		
	55	Болт	ISO 4017-M20 x 40	4		
	56	Болт	ISO 4017-M6 x 25	4		
ЛМ41мп.01.102.001			Інд. змін	Дата видання	Мова	Аркуш
				10.12.2025	Укр.	2/4

формат	поз.	Позначення	Посилання	К-сть	Матеріал	
	57	Вушко-У	ISO 8330:2022	10		
	58	Гайка	ISO 4037-M6	4		
	59	Гайка	ISO 4037-M8	1		
	60	Гайка	ISO 4037-M12	1		
	61	Гайка	ISO 4037-M24	4		
	62	Гайка	ISO 4039-BM68	1		
	63	Гвинт	ISO 4017-BM12-6gx 10	1		
	64	Гвинт	ISO 4017-BM6-8g x 10	32		
	65	Гвинт	ISO 4017-BM8-8g x 10	4		
	66	Гвинт	ISO 4017-BM10-8g x 10	4		
	67	Гвинт	ISO 4017-BM16-8g x 10	8		
	68	Диск торцевий	ISO 268-1/2 II-60-У	1		
	69	Диск торцевий	ISO 268-1/2 I-20-У	1		
	70	Кільце	DIN 5417 B12	2		
	71	Кільце	DIN 5417 B25	1		
	72	Кільце	ISO 6418-81	3		
	73	Кільце	ISO 6418-81	1		
	74	Контгайка	ISO 4099- 15-Ц	3		
	75	Масльонка	DIN 71412 - 1.2.Ц6	1		
	76	Маховик	ISO 5598 - 250 MH8-64	1		
	77	Підшипник	ISO 104:2022-8182	1		
	78	Підшипник	ISO 104:2022-8315	1		
	79	Підшипник	ISO 104:2022-60209	2		
	80	Підшипник	ISO 104:2022-411	1		
	81	Ремінь	EN12841:2006-C-2500Ш	4		
	82	Стрічка	EN12841:2006-9-12-У	8		
	83	Стрічка	EN12841:2006-16-28-У	2		
	84	Шайба	ISO 7090-8.65Г.05	20		
	85	Шайба	ISO 7090-10.65Г.05	4		
	86	Шайба	ISO 7090-12.65Г.05	16		
	87	Шайба	DIN 127-16.65Г.05	30		
ЛМ41мн.01.102.001			Інд. змін	Дата видання	Мова	Аркуш
				10.12.2025	Укр.	3/4

[illegible]

формат	роз.	Позначення	Посилання	К-сть	Матеріал
A1		Складальний кресленник	ЛМ41мп.01.106.001		
	1	Пластина нижня	ЛМ41мп.01.106.002	1	
	2	Пластина середня	ЛМ41мп.01.106.003	1	
	3	Пластина верхня	ЛМ41мп.01.106.004	1	
	4	Шестерня ведуча	ЛМ41мп.01.106.005	1	
	5	Муфта напрвляюча	ЛМ41мп.01.106.006	1	
	6	Муфта з'єднувальна	ЛМ41мп.01.106.007	1	
	7	Кришка	ЛМ41мп.01.106.008	1	
	8	Вал	ЛМ41мп.01.106.009	1	
	9	Шестерня ведома	ЛМ41мп.01.106.010	1	
	10	Вісь	ЛМ41мп.01.106.011	1	
	11	Гвинт	ISO 4017-M16 x 68	10	
	12	Гвинт	ISO 4017-M16 x 73	13	
	13	Шпонка	ISO 773-69-8x7x23	1	
Відповідальна організація МАХНВ ФАПІЕ		Технічне узгодження Новохат О.А.	Розробник документа Абаєв А.Ю.	Документ затверджено Швед М.П.	
Власник документа КПІ ім. Ізоря Сікорського кафедра МАХНВ ФАПІЕ		Вид документа специфікація		Статус документа	
		Назва, додаткова назва Насос шестеренний		ЛМ41мп.01.106.001	
				Інд. змін	Дата видання
				Мова	Аркуш
				Укр.	1/1

формат	поз.	Позначення	Посилання	К-сть	Матеріал
A1		Складальний кресленник	ЛМ41мп.01.105.001	1	
	1	Рама	ЛМ41мп.01.105.002	1	
	2	Насос шестеренний	ЛМ41мп.01.105.003	1	
	3	Вал	ЛМ41мп.01.105.004	1	
	4	Муфта	ЛМ41мп.01.105.005	1	
	5	Редуктор	ЛМ41мп.01.105.006	1	
	6	Шків D=238	ЛМ41мп.01.105.007	1	
	7	Шків D=117	ЛМ41мп.01.105.008	1	
	8	Салазки	ЛМ41мп.01.105.009	2	
	9	Болт	ISO 4017-M6 x 25	16	
	10	Болт	ISO 4017-M20 x 80	4	
	11	Болт	ISO 4017-M20 x 130	8	
	12	Гайка	ISO 4037-M16	16	
	13	Гайка	ISO 4037-M16	12	
	15	Кільце	ISO 8458-MH180	8	
	17	Шайба	ISO 7090-A12.31	28	
	18	Шпонка	ISO 773-69-8x7x23	1	
	19	Шпонка	ISO 773-69-10x9x40	1	
	14	Двигун	AIP 100 L6 ISO 60034	1	
	16	Ремінь	ISO 1081:1995	3	
Відповідальна організація		Технічне узгодження	Розробник документа	Документ затверджено	
МАХНВ ФАПІЕ		Новохат О.А.	Абаєв А.Ю.	Швед М.П.	
Власник документа		Вид документа		Статус документа	
КПІ ім. Ізоря Сікорського кафедра МАХНВ ФАПІЕ		специфікація			
		Назва, додаткова назва		ЛМ41мп.01.105.001	
		Візок шестеренного насосу		Інд. змін	Дата видання
					10.12.2025
				Мова	Аркуш
				Укр.	1/1

[illegible]