

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

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

«На правах рукопису»

УДК 678.023.3

До захисту допущено

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф.

 Я.М. Корнієнко

“16” 05 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування

на тему: **Процес дозування при каскадній екструзії полімерів**

Виконав: студент VI курсу, групи ЛН-61м

Великоіваненко Сергій Павлович

Науковий керівник: кандидат технічних наук,

доцент Швед М.П.

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних

ситуаціях канд. техн. наук, доцент І.М. Ковтун

Консультант з розроблення стартап-проекту

канд. економ. наук, доцент Н. В. Юдіна

Рецензент


(посада, вчене звання науковий ступінь, прізвище і ініціали)

Рецензент


(посада, вчене звання науковий ступінь, прізвище і ініціали)

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

Студент  С.П. Великоіваненко

Київ 2018

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

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

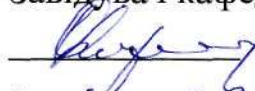
Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою

Спеціальність: 133 Галузеве машинобудування

Спеціалізація: Інжиніринг, обладнання та технології хімічних і нафтопереробних виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф.

 Я.М. Корнієнко

“ 1 ” 09 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Великоіваненку Сергію Павловичу

1. Тема дисертації: Процес дозування при каскадній екструзії полімерів.

Науковий керівник Швед Микола Петрович, к.т.н., доцент
затверджена наказом по університету від «21» березня 2018 р. № 979-с.

2. Строк подання студентом дисертації: 18 травня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження: процес дозування при каскадній екструзії полімерів.

4. Предмет дослідження: продуктивність, тиск та їх коливання.

5. Перелік завдань, які необхідно розробити:

- обґрунтувати систему каскадної екструзії;
- розробити фізико-математичні моделі процесів дозування при екструзії полімерів;
- розробити методику експериментальних досліджень та створити експериментальну установку;
- провести експериментальні дослідження;
- узагальнити результати експериментів;
- розробити алгоритми та методики розрахунку дозуючих черв'ячного та шестеренного насосів;

- надати рекомендацій, щодо обґрунтування та практичного використання дисково-шестеренного екструдера при переробленні полімерних матеріалів

6. Перелік ілюстрованого матеріалу:

- складальне креслення апарату (1×A1);
- презентація магістерської дисертації.

7. Перелік публікацій заплановано публікування двох статей у наукових фахових виданнях України, участь у 4 конференціях з опублікуванням 4 тез доповідей та отримання одного патента України на корисну модель.

8. Консультанти розділів дисерції

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	канд. техн. наук, доцент Ковтун І.М.	12.02.18 	14.05.18 
Розроблення стартап-проекту	канд. економ. наук, доцент Н.В. Юдіна		

9. Дата видачі завдання: 01 вересня 2016 р.

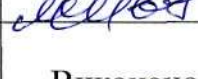
Науковий керівник

 М.П. Швед

Завдання прийняв до виконання

 С.П. Великоіваненко

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів дисертації	Примітка
1	2	3	4
1	Аналіз процесів та обладнання для переробки полімерних матеріалів.	1.09.2016-31.12.2016	Виконано 
2	Теоретичне дослідження процесу дозування при каскадній екструзії полімерів. Фізична модель. Математична модель дозування.	01.02.2017-28.02.2017	Виконано 
3	Підготовка тез доповідей на конференцію. Підготовка статті до публікації.	01.11.2016-01.12.2016	Виконано 
4	Проведення експериментальних досліджень.	01.03.2017-30.06.2017	Виконано 
5	Експериментальна перевірка фізичної та математичної моделей	01.09.2017-30.11.2018	Виконано 
6	Рекомендації щодо раціонального ведення процесу та ймовірного його використання на виробництві.	01.12.2017-30.11.2017	Виконано 
7	Підготовка матеріалів до публікації результатів досліджень. Подання за матеріалами досліджень заявки на отримання патенту України на корисну модель.	01.10.2017-01.12.2017	Виконано 
8	Розроблення технологічної концепції дискового екструдера та удосконалення методики розрахунку.	20.03.2018-01.04.2018	Виконано 
9	Попередній захист.	24.04.2018-15.05.2018	Виконано 
10	Оформлення кваліфікаційної роботи. Подання до захисту.	10.05.2018	Виконано 

Студент



підпис

С.П.Великоіваненко

Науковий керівник дисертації



підпис

М.П.Швед

РЕФЕРАТ

Дисертація освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» на тему: «Процес дозування при каскадній екструзії полімерів» / КПП ім. Ігоря Сікорського»; Керівник М.П. Швед. – К., 2018. –181 с. : іл. – 49: табл. – 33. Виконавець С.П. Великоіваненко – Бібліогр.: 126 ст.

Робота складається з вступу та п'ятьох розділів. Загальний обсяг роботи 181 аркушів основного тексту, 49 ілюстрацій, 33 таблиць, переліку посилань з 52 найменувань та 6 додатків.

Об'єкт дослідження – процес дозування при каскадній екструзії полімерів.

Предмет дослідження – продуктивність, тиск та їх коливання.

Мета роботи – обґрунтування каскадного процесу перероблення полімерів із застосуванням дозуючих насосів.

Методи дослідження: теоретичний та експериментальний аналіз процесу дозування при каскадній екструзії полімерів.

Результати роботи та їх новизна:

- Науково обґрунтовано каскадний двохстадійний спосіб екструзії полімерів.
- Обґрунтована методика визначення узгоджених режимів роботи обладнання в схемах каскадної дисково-черв'ячної та дисково-шестеренної екструзії.
- Вдосконалено фізичну та математичну моделі процесів дозування при перенесенні маси в черв'ячному та шестеренному насосах.
- Отримані розрахункові залежності для визначення основних параметрів процесів дозування в умовах каскадної дисково -шестеренної та дисково-черв'ячної екструзії .

За результатами роботи опубліковано дві статті у фахових виданнях, чотири тези доповідей на конференціях, одержаний патент України на корисну модель.

ЕКСТРУЗИЯ, ДИСКОВО-ШЕСТЕРЕННИЙ ЕКСТРУДЕР, НЕНЬЮТОНІВСЬКА РІДИНА, ДОЗУВАННЯ, ШЕСТЕРЕННИЙ НАСОС.

РЕФЕРАТ

Диссертация образовательно-квалификационного уровня «магистр» на тему: «Процесс дозирования при каскадной экструзии полимеров» / КПИ им. Игоря Сикорского. Руководитель М.П. Швед. - М., 2018. -181 с. : Ил. - 49: табл. - 33. Исполнитель С.П. Великоиваненко - Библиогр .: 126 ст.

Работа состоит из введения и пяти разделов. Общий объем работы 181 листов основного текста, 49 иллюстраций, 33 таблиц, списка литературы из 52 пункта и 6 приложений.

Объект исследования – процесс дозирования при каскадной экструзии полимеров.

Предмет исследования – производительность, давление и их колебания.

Цель работы – обоснование каскадного процесса переработки полимеров с применением дозирующих насосов.

Методы исследования: теоретический и экспериментальный анализ процесса дозирования при каскадной экструзии полимеров.

Результаты работы и их новизна:

- Научно обоснованно каскадный двухстадийный способ экструзии полимеров.
- Обоснована методика определения согласованных режимов работы оборудования в схемах каскадной дисково-червячной и дисково-шестерённой экструзии.
- Усовершенствовано физическую и математическую модели процессов дозирования при переносе массы в червячном и шестеренном насосах.
- Полученные расчетные зависимости для определения основных параметров процессов дозирования в условиях каскадной дисково-шестеренно и дисково-червячной экструзии.

По результатам работы опубликовано две статьи в профессиональных изданиях, четыре тезиса докладов на конференциях, полученный патент Украины на полезную модель.

ЭКСТРУЗИЯ, ДИСКОВО-ШЕСТЕРЕННЫЙ ЭКСТРУДЕР,
НЕНЬЮТОНОВСКАЯ ЖИДКОСТЬ, ДОЗИРОВАНИЕ.

ABSTRACT

The Master diploma project theme is « The process of dosing in cascade extrusion of polymers» / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; Scientific adviser: N.P. Shwed. K., 2018 – 181 p. fig.– 49 tabl. – 33. – Developer: S.P. Velikoivanenko. – Bibliogr.: 126 p.

The diploma project consists of the introduction and fiver chapters. Total volume is 181 padges, 49 figure,33 tables, the list of references with 52 names and 6 appendices.

The research object is the process of dosing in cascade extrusion of polymers.

Object of the research are productivity, pressure and their fluctuations.

The purpose of the work is the foundation of cascade extrusion process of polymers with using gear pump.

Methods are: a theoretical analysis of extrusion process, the mathematical modeling of the numerical methods and experimental investigation of the extrusion process, determine the reliability of simulation results and analysis.

The results and the novelty:

- physical-mathematical model of processes of dosing in extrusion of polymers were formed;
- value for the results of experimental studies was proven;
- established method of calculating the energy-power parameters of the pumps ware esteblished;
- the system of cascade disk-gear extrusion of polymers was created.

According to the results of the research were published two articles and four abstracts at conferences. Ukraine patent for utility model was received.

EXTRUSION, DISK-GEAR EXTRUDER, UNNEWTONIAN LIQUID, DOSAGE, GEAR PUMP.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	11
Вступ.....	13
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСІВ ПРИ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ	16
1.1 Процеси при екструзії полімерів.	16
1.1.1 Процес живлення.....	17
1.1.2 Процес плавлення.....	22
1.1.3. Процес гомогенізації та дозування.....	27
1.2. Одночерв'ячна екструзія	36
1.3 Двочерв'ячна екструзія.....	42
1.4 Каскадна екструзія.	45
1.5 Висновок та мета і задачі дослідження.....	56
2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ ПРИ ДОЗУВАННІ РОЗПЛАВІВ ПОЛІМЕРІВ.	58
2.1 Фізична модель процесу дозування.	58
2.2 Математична модель процесу дозування в дозуючих насосах	60
2.3 Гідродинамічна модель дозування маси в дозуючих насосах.....	62
2.4 Порівняльна характеристика шестеренного та черв'ячного насосів при каскадній екструзії полімерів.....	66
2.5 Висновки	71
3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	73
3.1 Мета та задачі експериментальних досліджень.....	73
3.2 Методика проведення експериментальних досліджень.....	73

3.2.1 Вимірювання продуктивності, частоти обертання, величини робочих зазорів та тиску	74
3.2.2 Вимірювання та регулювання температури робочих органів та розплаву полімеру	75
3.4 Опис експериментальної установки.....	76
3.5 Матеріали, що досліджувалися та їх властивості	80
3.6 Дослідження продуктивності шестеренного та червячного насосів від тиску	80
3.6.1 Дослідження підвищення температури розплаву та продуктивності в шестеренному та черв'ячному насосах.....	82
3.7 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	83
3.7.1 Небезпека ураження електричним струмом.....	83
3.7.2. Повітря робочої зони	88
3.7.3 Виробничий шум та віброзахист.	89
3.7.4. Освітлення на робочих місцях	90
3.7.5 Пожежна безпека.....	91
3.7.6 Надзвичайні ситуації.....	93
3.8 Висновки	94
4 ОБГРУНТУВАННЯ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	96
4.1 Опис технологічного процесу.....	96
4.2 Методика розрахунку каскадного дисково-шестеренного екструдера	97
4.2.1 Розрахунок дискового екструдера.....	97
4.2.2 Розрахунок параметрів шестеренного насосу	99
4.2.3 Розрахунок параметрів черв'ячного насосу.	100
5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	102

5.1 Аналіз стартап-проекту	102
5.2 Висновки	119
ВИСНОВКИ.....	120
ВЫВОДЫ.....	122
CONCLUSIONS	124
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	126
Додаток А. Оцінка похибок вимірювання.....	131
Додаток Б. Алгоритм та розрахунок дискового екструдера.....	137
Додаток В. Алгоритм та програма розрахунку шестеренного насосу	153
Додаток Г. Алгоритм та програма розрахунку черв'ячного насосу	161
Додаток Д. Перелік та копії опублікованих праць	170
Додаток Ж. Специфікація до складального креслення	179

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

c_T – теплоємність полімеру, Дж/(кг·К);

H – глибина нарізки або величина зазору диска, м;

n – частота обертання, s^{-1} ;

P – тиск, Па;

t – час відбору проби, с;

ρ – густина розплаву, kg/m^3 ;

μ – в'язкість розплаву, Па·с;

γ – швидкість зсуву, s^{-1} ;

λ – теплопровідність полімеру, Вт/(м·К);

f_s – динамічний коефіцієнт тертя на поверхні шнека;

f_b – динамічний коефіцієнт тертя на поверхні циліндра;

α_k – кут зачеплення;

F_{na} – нормальна сила, яка діє на активній стороні нарізки черв'яка, Н;

F_{np} – нормальна сила, яка діє на твердий шар на пасивній стороні нарізки черв'яка, Н;

F_{fa} – сила тертя між твердою пробкою і активною стороною нарізки черв'яка, Н;

F_{fp} – сила тертя між твердим шаром і пасивною стороною нарізки черв'яка, Н;

Q_ϕ – фактична продуктивність шестеренного насоса, cm^3/s ;

Q_t – теоретична продуктивність шестеренного насоса, cm^3/s ;

$Q_{вт}$ – втрати продуктивності в зазорах шестеренного насоса, cm^3/s ;

$Q_{вс}$ – втрати продуктивності при всмоктуванні на вході в шестеренний насос, cm^3/s ;

$N_{\Delta P}$ – потужність, що витрачається на створення тиску та подолання сил тертя в підшипниках, Вт;

N_{mp} – потужність, що витрачається на подолання сил тертя в зазорах та на циркуляцію розплаву у міжзубних впадинах, Вт;

N_{mp} – потужність холостого ходу, яка визначається експериментальним шляхом, Вт.

Скорочення:

НШ – насос шестеренний;

ЕКДЧ - екструдер каскадний дисково-черв'ячний;

ЕКДШ – екструдер каскадний дисково-шестеренний;

ЧП – черв'ячний прес;

кафедра МАХНВ – кафедра машин та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв;

НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Вступ

Екструзія — процес отримання виробів шляхом екструдювання матеріалу через формувальний отвір у матриці. Зазвичай використовується у виробництві будівельних матеріалів, виробів з полімерних матеріалів, конструкційних металевих профілів а також, в харчовій промисловості, шляхом протискування пластифікованого матеріалу через отвір екструзійної головки преса.

У промисловості переробки полімерів методом екструзії виготовляють різні погонні вироби, такі, як труби, листи, плівки, оболонки кабелів, профілі тощо. Основним технологічним устаткуванням для переробки сировини у вироби методом екструзії є дискові та шнекові екструдери.

На сьогоднішній день основною сировиною для виробництва полімерних труб є поліолефіни (поліетилен і поліпропілен), які займають ключові позиції (63%) у загальному обсязі виробництв полімерів, який за 2016 р. становив майже 220 млн. т. При цьому доля поліетилену склала 70,1 млн. т, а поліпропілену 39,1 млн. т.[1]

Високі обсяги виробництва та переробки полімерних матеріалів вимагають від виробників створювати економічні високопродуктивні машини для переробки пластичних мас. Останніми роками основна увага при створенні екструзійних процесів приділялася підвищенню продуктивності на якій базуються основні показники. Одним із варіантів покращення цих показників є підвищення ресурсоенергозбереження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська робота виконана згідно з тематичним планом кафедри МАХНВ НТУУ «КПІ ім.І.Сікорського» та у відповідності з напрямком підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр»

Мета і задачі дослідження.

Мета роботи — обґрунтування каскадного процесу перероблення полімерів із застосуванням дозуючих насосів.

Задачі дослідження:

- обґрунтування системи каскадної екструзії;
- розроблення фізико-математичних моделей процесів дозування при екструзії полімерів в черв'ячному та шестеренному насосах;
- розроблення методики експериментальних досліджень та створення експериментальної установки;
- проведення експериментальних досліджень;
- узагальнення результатів експериментів;
- розроблення алгоритму та методики розрахунку черв'ячного та шестеренного дозуючого насосу;
- надання рекомендацій, щодо обґрунтування та практичного використання дисково-шестеренного екструдера при переробленні полімерних матеріалів.

Об'єкт дослідження – є процес дозування при каскадній екструзії полімерів.

Предмет дослідження – продуктивність, тиск та їх коливання при дозуванні розплавів полімерів.

Методи досліджень. Дослідження процесу проводили за допомогою фізико-математичного моделювання з перевіркою адекватності побудованої моделі шляхом порівняння результатів розрахунків за нею з експериментально отриманими величинами.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Науково обґрунтовано каскадний двохстадійний спосіб екструзії полімерів, при якому забезпечується регульований рівень гомогенізації розплаву полімеру і стабільність тиску та продуктивності на вході в формуючий інструмент.

2. Обґрунтована методика визначення узгоджених режимів роботи обладнання в схемах каскадної дисково-черв'ячної та дисково-шестеренної екструзії.

3. Вдосконалено фізичну та математичну моделі процесів дозування при перенесенні маси в черв'ячному та шестеренному насосах, які базуються на

рівняннях нерозривності, руху, енергії та реологічних рівняннях псевдопластичних рідин.

4. Отримані розрахункові залежності для визначення основних параметрів процесу дозування в умовах каскадної екструзії.

Особистий внесок здобувача полягає у:

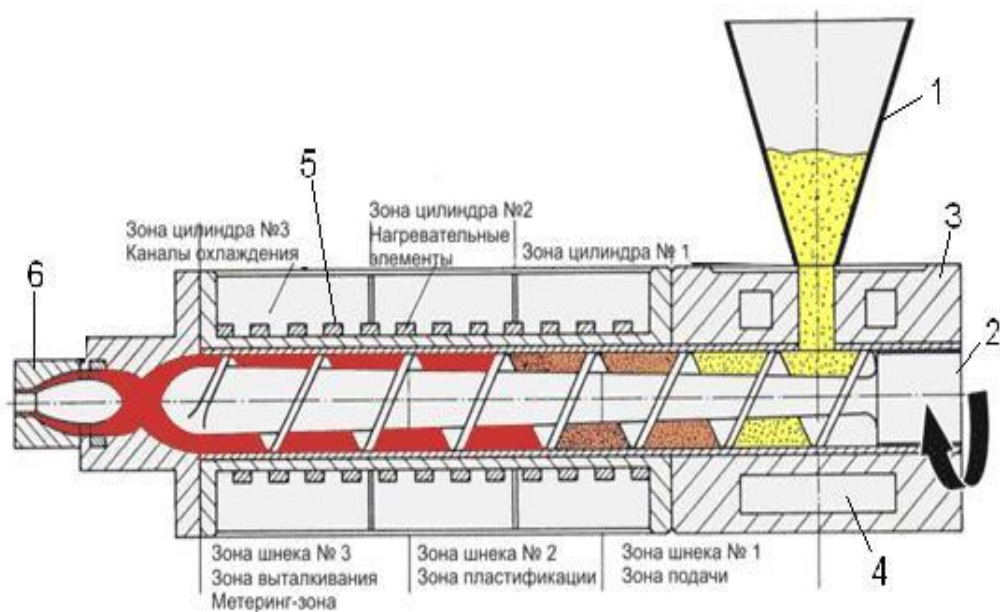
- участі в розробці фізичної та математичної моделей процесів дозування в черв'ячному та шестеренному насосі;
- розробці методики і проведенні експериментальних досліджень;
- аналізі та математичній обробці експериментальних даних;
- участі в написанні наукових статей з даної тематики.

Практичне значення одержаних результатів. У ході проведення попередніх досліджень каскадного дисково-шестеренного екструдера в складі лінії для виробництва полімерних труб, змінюючи кутові швидкості дозатора, дискового екструдера і шестеренного насоса, були досягнуті стабільні технологічні режими переробки полімерів. Проведені дослідження показали, що максимальні відхилення продуктивності експериментальної лінії з використанням шестеренного насоса не перевищували 1 % проти 5% для тієї ж експериментальної лінії на базі каскадного дисков–черв'ячного екструдера.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСІВ ПРИ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ

1.1 Процеси при екструзії полімерів.

Екструзія – це процес переведення твердого сипучого полімеру у в'язкоподібний стан з подальшим формуванням із розплаву виробів заданої конфігурації. При цьому одночасно необхідно виконати наступні операції: живлення, стискання, плавлення твердого полімеру, змішування розплаву, створення тиску та дозування розплаву. Всі ці процеси пов'язані між собою і часто виконуються одним робочим органом, наприклад черв'яком, що ускладнює їх оптимізацію, так як зміна параметрів у якомусь одному із вище названих процесів призводить до зміни параметрів в інших процесах. Умовно ці операції групуються в зони детальний розподіл яких наведено на рисунку 1 [2].



1 - бункер; 2- черв'як (шнек); 3- циліндр; 4- порожнина для циркуляції води; 5- нагрівач; 6- формувальна головка з адаптером

Рисунок 1.1 – Схема одночерв'ячної екструзії

1.1.1 Процес живлення

Якщо твердий сипучий матеріал досяг завантажувального отвору екструдера, він буде просуватись по ньому до тих пір, поки не потрапить у канал черв'яка. Тут сила тяжіння, яка раніше визначала механізм руху, перестас діяти. Зазвичай в екструдерах шнек і циліндр розташовуються у горизонтальній площині, і роль сили тяжіння стає незначною. Матеріал у каналі черв'яка просувається вперед в результаті руху поверхні черв'яка відносно поверхні циліндра. Швидкість переміщення твердого матеріалу в значній мірі визначається силами, які діють на границях твердих поверхонь.

Експериментально встановлено, що у більшості випадків полімерні сипучі матеріали легко ущільнюються в передній частині каналу черв'яка. У результаті тверді частинки утворюють шар (тверду пробку), який переміщується вздовж каналу за механізмом поршневого руху. Таким чином, усі елементи рухаються з однаковою швидкістю у будь-якому поперечному перетині твердої пробки. Внутрішньої деформації у твердій пробці немає. Утворення матеріалом твердої пробки відбувається лише тоді, коли створено достатній тиск у каналі шнека.

Перший всебічний аналіз руху твердого матеріалу в одношнекових екструдерах був проведений Дарнелом і Молом у 1956 році [3]. Пізніше багато дослідників розвивали ці роботи, однак основа аналізу лишилась незмінною. Для того щоб перейти до кількісного опису процесу руху твердої речовини, який викликано силою тертя, Дарнелом і Молом були зроблені наступні припущення:

- окремі тверді частинки ведуть себе подібно суцільному середовищу;
- тверда пробка знаходиться в контакті з усією стінкою каналу, тобто поверхнею циліндра, тілом черв'яка, активною стороною нарізки та пасивною стороною нарізки;
- глибина шнека постійна;
- зазором між виступом нарізки черв'яка і циліндром можна знехтувати;
- тверда пробка рухається як поршень;

- тиск є функцією відстані вздовж каналу черв'яка;
- коефіцієнт тертя не залежить від тиску;
- силами тяжіння можна знехтувати;
- зміною густини твердої фази матеріалу в пробці нехтуємо.

Перші п'ять припущень приймаються у більшості теорій руху твердого матеріалу. Останні п'ять припущень часто різними дослідниками не розглядались. Основний метод аналізу руху матеріалу полягає у розгляді елемента твердої пробки в каналі шнека і визначанні усіх сил, які діють на нього. Визначальні сили – це сили тертя на границях і сили, які виникають внаслідок градієнтів тиску в твердому шарі.

На рисунку 1.2 представлена схема, яка ілюструє сили, які діють на елемент твердої пробки. При цьому вводиться припущення, що шнек нерухомий, а циліндр обертається [4].

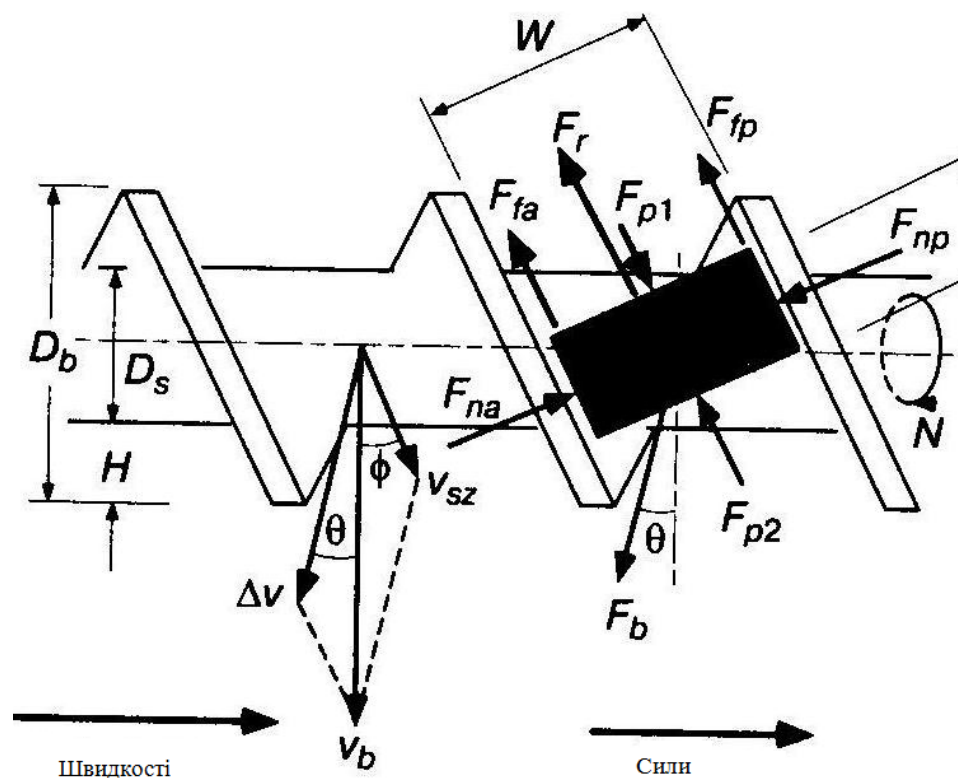


Рисунок 1.2 – Схема сил, які діють на елемент твердого шару в зоні живлення

F_r – сила тертя між твердою пробкою і тілом шнека визначається рівнянням:

$$F_r = P \cdot W \cdot dz \cdot f_s, \quad (1.1)$$

де P – тиск;

W – ширина твердої пробки;

dz – товщина твердої пробки;

F_{na} – нормальна сила, яка діє на активній стороні нарізки, визначається співвідношенням:

$$F_{na} = P \cdot H \cdot dz + F^*, \quad (1.2)$$

де F^* – невідома додаткова, нормальна сила;

H – глибина каналу нарізки шнека.

F_{np} – нормальна сила, яка діє на твердий шар на пасивній стороні нарізки:

$$F_{np} = P \cdot H \cdot dz. \quad (1.3)$$

F_{fa} – сила тертя між твердою пробкою і активною стороною нарізки:

$$F_{fa} = F_{na} \cdot f_s. \quad (1.4)$$

F_{fp} – сила тертя між твердим шаром і пасивною стороною нарізки:

$$F_{fp} = P \cdot H \cdot dz \cdot f_s, \quad (1.5)$$

F_{p1} – сила, яка діє на поверхні елемента твердої пробки внаслідок локального тиску P :

$$F_{p1} = W \cdot H \cdot P. \quad (1.6)$$

F_{p2} – сила, яка діє на поверхні твердої пробки внаслідок локального тиску $P+dP$:

$$F_{p2} = W \cdot H \cdot (P + dP). \quad (1.7)$$

Якщо градієнт тиску у напрямку вздовж каналу дорівнює нулю, тоді $F_{p1}=F_{p2}$. Результируюча сила F_b являє собою силу тертя між твердим шаром і поверхнею циліндра:

$$F_b = P \cdot W \cdot dz \cdot f_b, \quad (1.8)$$

де f_b – динамічний коефіцієнт тертя на поверхні циліндра.

Сила F_b утворює кут θ з площиною, яка перпендикулярна до осі шнека. Напрямок дії сили F_b визначається напрямком різниці векторів швидкостей між циліндром і твердим шаром:

$$\Delta \vec{V} = \vec{V}_b - \vec{V}_{sz}, \quad (1.9)$$

де V_b – вектор швидкості циліндра; $\vec{V}_{sz}$ – вектор швидкості твердого шару. З діаграми швидкостей, яка зображена на рисунку 1.8, стають зрозумілими напрями $\Delta \vec{V}$ і F_b . Кут θ являє собою кут, який визначає напрям руху твердого матеріалу. Якщо цей кут визначено, то швидкість руху твердого шару може бути визначена з рівняння:

$$V_{sz} = V_b \left[\cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{\tan(\theta + \varphi)} \right]. \quad (1.10)$$

Рівняння (1.10) може бути переписано наступним чином:

$$V_{sz} = V_b \cdot \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \varphi)}. \quad (1.11)$$

Якщо відома швидкість руху твердого шару, то продуктивність визначається з рівняння:

$$M_s = \rho \cdot H \cdot p \cdot W \cdot V_{sz} = \rho \cdot H \cdot p \cdot W \cdot V_b \cdot \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \varphi)}, \quad (1.12)$$

де ρ – густина твердого шару;

p – число паралельних гвинтових каналів.

На даному етапі маємо дві невідомі величини: додаткова сила F^* та кут руху твердого матеріалу θ . Метод вирішення рівняння, який запропонували Дарнел і Мол, полягає у розкладанні усіх сил на аксіальні і тангенціальні складові. Сума усіх сил в аксіальному напрямі приймається рівною нулю. При цьому допускається, що прискоренням можна знехтувати. Тангенціальні складові сил створюють рівновагу крутих моментів, сума яких також рівна нулю. Додаткова сила F^* тоді визначається шляхом вирішення двох рівнянь рівноваги і виразу для кута, який представляє напрям руху твердого матеріалу.

Зміни ширини каналу і кута підйому гвинтової лінії по висоті каналу достатньо малі, оскільки в більшості екструзій них шнеків зовнішній діаметр шнека набагато менший, ніж глибина каналу. Якщо прийняти, що кривизною каналу можна знехтувати, канал шнека можна розгорнути на плоскій поверхні. Похибка, яка при цьому допускається, цілком прийнятна внаслідок обмеженої точності і невисокої відтворюваності більшості даних по коефіцієнту тертя. З вище сказаних припущень випливають два спрощення: перше – ширина каналу і кут підйому гвинтової лінії постійні по висоті каналу; друге – додаткова сила F^* може бути безпосередньо визначена з балансу сил у напрямі, який поперечний до осі каналу:

$$F^* = F_s \cdot \sin(\theta + \varphi). \quad (1.13)$$

Вираз для кута руху твердого матеріалу θ отримуємо з балансу сили у напрямі вісі каналу:

$$P \cdot W \cdot dz \cdot f_b \cdot [\cos(\theta + \varphi) - f_s \cdot \sin(\theta + \varphi)] = W \cdot H \cdot dP + P \cdot dz \cdot f_s \cdot (W + 2 \cdot H). \quad (1.14)$$

Для того щоб отримати залежність тиску від відстані в напрямі вісі каналу рівняння (1.14) необхідно проінтегрувати. Тиск при $z=0$ дорівнює $P=P_0$.

Тоді розв'язок рівняння представляється наступним чином:

$$\ln \frac{P}{P_0} = \left\{ \frac{f_b}{H} \cdot [\cos(\theta + \varphi) - f_s \cdot \sin(\theta + \varphi)] - f_s \cdot \frac{(W + 2 \cdot H)}{W \cdot h} \right\} \cdot z. \quad (1.15)$$

Рівняння (1.15) показує, що при певному куті руху твердого матеріалу тиск збільшується експоненціально як функція відстані вздовж каналу.

Аналіз представленої моделі руху твердого матеріалу під дією сил тертя дозволяє зробити наступні висновки. Продуктивність зони завантаження в значній мірі залежить від співвідношення сил тертя між полімером і черв'яком, між полімером і циліндром. При рівності інших умов збільшення коефіцієнта тертя між пробкою полімеру і циліндром та зменшення коефіцієнта тертя між черв'яком і пробкою полімеру сприяють підвищенню продуктивності зони завантаження.

Велика частина потужності, яка підводиться приводом, розсіюється у вигляді теплоти на поверхні тертя. Ця теплота частково відводиться системою охолодження, а частково йде на підвищення температури полімерної пробки. При досяганні температури плавлення механізм сухого тертя переходить у механізм в'язкісного тертя. Неізотермічність процесу суттєво впливає на значення коефіцієнта тертя, що в свою чергу, впливає на характер розподілення сил тертя і весь процес дозування.

1.1.2 Процес плавлення

Вперше процес плавлення в одношнекових екструдерах був описаний Маддоком [5]. Його спостереження базувались на результатах експериментів, в яких шнек виймався з екструдера на різних стадіях процесу плавлення. Черв'як з матеріалом лишався в екструдері, і машина швидко охолоджувалась. Після чого черв'як виймався з циліндра за допомогою гідравлічного поршня. Далі стан матеріалу було проаналізовано для різних перетинів і точках по радіусу каналу. Опис Маддока був точним, але лише якісним. Тип плавлення, який розглядався Маддоком, відносився до моделі плавлення безперервного шару твердої фази.

Пізніше Тадмор з співробітниками провів широку експериментальну роботу по дослідженню процесу плавлення в одночерв'ячних екструдерах [6]. Окрім експериментальної роботи вони виконали теоретичний аналіз процесу пластикації і розробили класичну математичну модель плавлення Тадмора [7].

Ідеалізований поперечний перетин каналу шнека в зоні плавлення представлено на рисунку 1.3. Припускають, що шнек нерухомий. Таким чином, у поперечному перетині, перпендикулярному до лопатей черв'яка, циліндр рухається до активної лопаті шнека з швидкістю $\vec{V}_{bx}$, яка дорівнює компоненті швидкості циліндра $\vec{V}_b$ у площині, яка перпендикулярна до гвинтової лінії каналу шнека. У результаті такого руху в тонкому розплавленому шарі між твердим шаром і циліндром виникає висока

швидкість зсуву. При цьому виділяється значна кількість теплоти внаслідок в'язкого тертя при протіканні в шарі розплаву. Оскільки шар дуже тонкий, то вплив градієнта тиску на профіль швидкостей в шарі розплаву дуже малий. Тому протіканні в шарі розплаву виявляється, по суті, протіканням, яке обумовлене рухом граничної поверхні, і швидкість зсуву та інтенсивність тепловиділення відносно рівномірні по всій глибині шару розплаву.

Для прогнозування швидкості плавлення має бути відома кількість теплоти, яка підводиться до поверхні розділу твердий матеріал-розплав. Ця величина може бути знайдена, якщо відомі профілі температур у розплавленому і твердому шарах. Температурний профіль у розплаві може бути визначений з профілю швидкостей у розплавленому шарі. Для того щоб вивести вираз для температурного профілю робляться наступні припущення:

- процес є усталеним;
- густина розплаву полімеру і теплопровідність постійні;
- конвективне перенесення теплоти не враховується;
- перенесення теплоти здійснюється лише у напрямі, нормальному до границі розділу.

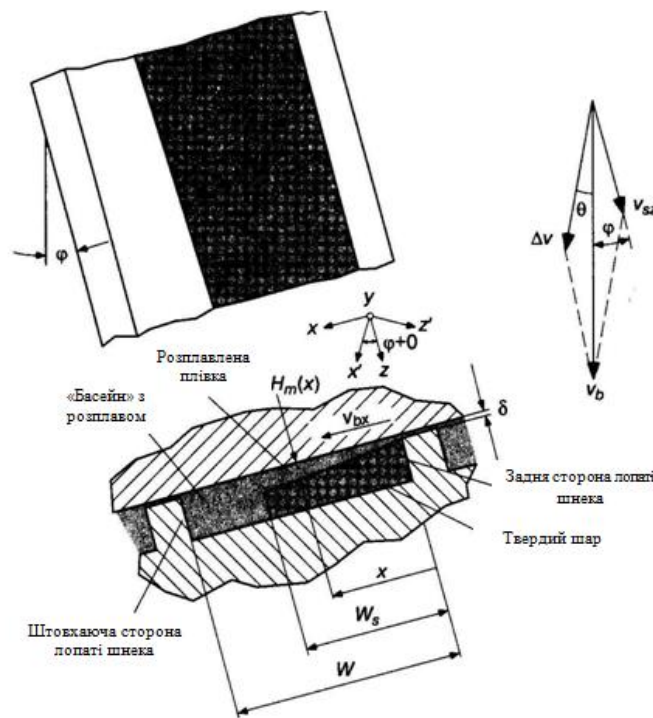


Рисунок 1.3 – Модель плавлення Тадмора

При таких припущеннях рівняння збереження енергії може бути записано у вигляді:

$$k_m \cdot \frac{d^2 T}{dy^2} + \tau_{x'y} \cdot \frac{\partial v_{x'}}{\partial y} = 0. \quad (1.16)$$

Напруження зсуву можуть бути визначені з рівняння руху. Для того, щоб отримати вираз для напруження зсуву, зроблені наступні припущення:

- течія полімерного розплаву ламінарна;
- інерцією і масовими силами нехтуємо;
- ковзання біля стінок відсутнє;
- градієнти тиску в розплавленому шарі відсутні;
- температурною залежністю в'язкості можна знехтувати.

За таких припущень повне рівняння руху може бути записане наступним чином:

$$\frac{d\tau_{x'y}}{dy} = 0. \quad (1.17)$$

Напрямок координати x' визначається векторною різницею швидкостей між циліндром і твердим шаром. Величина цієї різниці ΔV . Кут θ в тангенціальному напрямі задається наступною формулою:

$$\theta = \arctan\left(\frac{V_b \cdot \sin \varphi}{V_b \cdot \cos \varphi - v_{sz}}\right) - \varphi. \quad (1.18)$$

Кут θ той самий, що і кут руху твердого матеріалу. Якщо розплав полімеру поводить себе як ньютонівська рідина, то рівняння (1.17) приймає вигляд:

$$\frac{d^2 V_{x'}}{dy^2} = 0. \quad (1.19)$$

У результаті подвійного інтегрування, приймаючи граничні умови $V_{x'}(0)$ та $V_{x'}(H_m) = \Delta v$, отримуємо наступний профіль лінійних швидкостей:

$$V_{x'} = \frac{y}{H_m} \Delta V. \quad (1.20)$$

Рівняння (1.16) тепер набуває вигляду:

$$k_m \cdot \frac{d^2 T}{dy^2} + \mu \cdot \left(\frac{\Delta V}{H_m} \right)^2 = 0. \quad (1.21)$$

Граничні умови при цьому $T(0) = T_m$ та $T(H_m) = T_b$. Знову двічі інтегруємо і отримуємо профіль, який описується рівнянням другого порядку:

$$T(y) = \left(\frac{-\mu \cdot \Delta V^2}{2 \cdot k_m \cdot H_m^2} \right) \cdot y^2 + \left(\frac{2 \cdot k_m \cdot \Delta T_b + \mu \cdot \Delta V^2}{2 \cdot k_m \cdot H_m} \right) \cdot y + T_m, \quad (1.22)$$

де $\Delta T_b = T_b - T_m$.

Аналіз приведених рівнянь може пояснити чому іноді збільшення температури циліндра не призводить до прискорення процесу плавлення. Коли температура циліндра T_b збільшується, потік теплоти також збільшується. Однак при цьому виділення теплоти внаслідок дисипації зменшується, так як в'язкість у розплавленому шарі знижується з підвищенням температури розплаву.

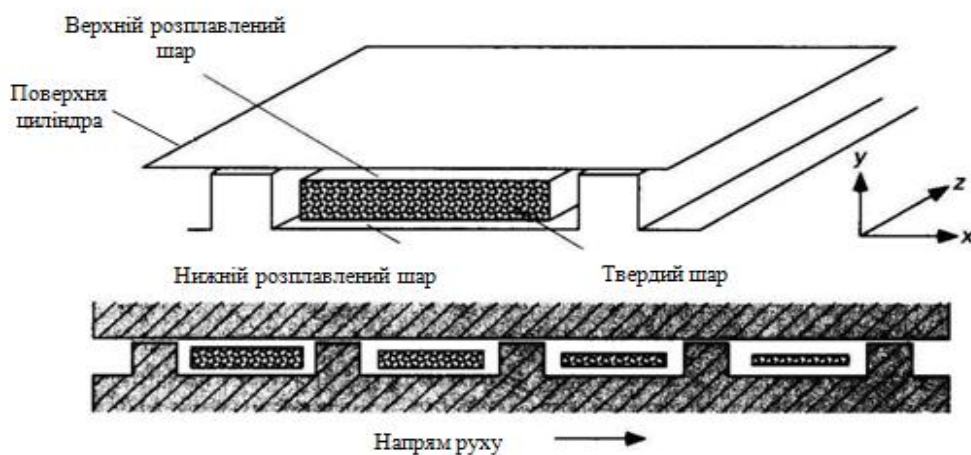
Багато інших дослідників повторили експерименти з шнековою екструзією, які були виконані Маддаком, а пізніше Тадмором з співробітниками; більшість авторів підтвердили основну модель плавлення Тадмора. Виключення складають досліди Кленка. Кленк досліджував плавлення полівінілхлориду (ПВХ) і виявив, що розплав збирається у пасивного торця каналу. Кленк пояснив такий незвичайний характер плавлення при екструзії ПВХ ковзанням розплаву вздовж стінки. Кокс та співавтори при екструзії порошкового поліетилену низької густини спостерігали як незвичайний характер плавлення розплаву, який збирався біля пасивного торця каналу, так і нормальний характер плавлення. Незвичайний характер плавлення зустрічався при низькій частоті обертання шнека, неглибоких каналах і при високих температурах циліндра. Таким чином, модель Тадмора не є універсальною для усіх випадків плавлення в шнекових екструдерах.

Деккер досліджував характер плавлення поліпропілену при екструзії в одношнекових екструдерах. Він не виявив ніякого явного місця, де б

збирався розплав, ні на одній з сторін каналу, але тверда фаза в більшій або меншій мірі була розподілена у розплаві. Ліндт розробив математичну модель, яка описує такий характер плавлення (рисуюнок 1.4).

Деякі найважливіші припущення цієї моделі:

- твердий шар не деформується;
- твердий шар повністю оточений шаром розплаву, плавлення проходить по всьому периметру твердого шару;
- товщина шару розплаву постійна у напрямі, який перпендикулярний перетину каналу шнека.



Рисуюнок 1.4 – Модель плавлення Деккера-Ліндта

Як згадувалось раніше, плавлення суцільного шару твердої фази найчастіше спостерігається в одночерв'ячних екструдерах. Проте, в деяких експериментальних дослідженнях було встановлено, що тверді частинки в дійсності не контактують, а розподілені у розплавленому матеріалі. Дана модель називається дисперсійною моделлю плавлення і детально її буде розглядано у розділі 2.

Підсумовуючи вище сказане, можна зробити наступні висновки. Процес плавлення полімеру є достатньо складним і його механізм реалізується по різному у залежності від полімеру, який переробляється, конструкції і типорозміру екструдера, а також режиму переробки. У зв'язку з цим існує велика кількість теоретичних робіт, що ускладнює вибір необхідної моделі для кожного окремого випадку. Найбільш універсальною є

модель плавлення Тадмора, уточнення якої можна використовувати при розробці моделі плавлення для конкретного випадку.

Важливим питанням є розрахунок тиску в зоні плавлення. Складність у тому, що в цій зоні існує як область розплаву, так і область твердого полімеру, який переміщується у каналі черв'яка, оточений тонким шаром розплаву. Великий вплив на точність розрахунків має швидкість руху полімерної пробки, яка не є постійною. Суцільність пробки зберігається у черв'яках з короткою зоною стиснення. У черв'яках з довгою зоною стиснення можливі порушення суцільності пробки, що викликає пульсації розплаву і тиску.

1.1.3. Процес гомогенізації та дозування

Дослідження процесу гомогенізації здійснювалось в багатьох теоретичних і експериментальних роботах, оскільки цей процес найбільш впливає на якість одержуваного розплаву і найбільш коректно описується класичними рівняннями збереження кількості руху та енергії. Як правило, при теоретичних розв'язках приймається за основу плоскопаралельна модель черв'яка, для якої здійснюється розв'язання згаданих рівнянь збереження при відповідних умовах однозначності як в ізотермічному, так і в неізотермічному наближеннях для ньютонівських і неньютонівських моделей рідин. Для практичних розрахунків достатньо ефективним є метод ступеневої апроксимації, який допускає використання більш простих розрахункових залежностей при збереженні необхідної для інженерних розрахунків точності і ефективно реалізується на комп'ютері.

Як уже відзначалось, для інтенсифікації процесу змішування і гомогенізації запропонована значна кількість змішувальних елементів, тому при конструюванні робочих органів екструдерів виникає необхідність вибору таких із них, які найбільш ефективні для даного конкретного полімеру чи композиції. Ми розглянемо розрахунок геометрії класичного тризонного черв'яка, а рекомендації щодо вибору змішувальних елементів будуть дані в наступних розділах.

Аналіз теоретичних і експериментальних робіт показує, що процеси течії, які відбуваються в каналах робочих органів екструзійного устаткування, мають ряд загальних особливостей, до яких відносяться:

- стаціонарність процесу підготовки розплаву;
- висока в'язкість полімеру, внаслідок якої ділянкою гідродинамічної стабілізації та силами інерції і тяжіння можна знехтувати;
- ламінарний режим течії;
- переважна двовимірність потоку, в якому одна із складових швидкості відповідальна за продуктивність (масову витрату), а інша визначає в значній мірі інтенсивність дисипації.
- конструктивні особливості робочих каналів, які полягають у тому, що один із розмірів набагато менший решти (глибина каналу нарізки черв'яка, зазор між нерухомим і обертовим циліндрами, конусами, дисками в комбінованих екструдерах та ін.).

Ці особливості дозволяють у ряді випадків суттєво спростити розрахункові залежності. Слід при цьому зазначити, що ускладнені моделі, які наводяться в літературних джерелах, дають за твердженнями авторів задовільну точність порівняно з експериментальними даними, незважаючи на різні уточнення і підходи до розв'язання рівнянь. Звідси можна зробити висновок, що ускладнення моделей дає уточнення, які знаходяться в межах похибок експериментів і похибок визначення реологічних та теплофізичних властивостей. Отже, для інженерних розрахунків у багатьох випадках можна з достатньою точністю користуватись більш простими залежностями, в які входять тільки величини, що мають найбільший вплив на процес.

У відповідності з методом ступеневої апроксимації розглянемо процес в межах елемента (модуля) ΔL (Δz), виділеного в зоні гомогенізації. Розрахункова схема подана на рис. 1.6. Враховуючи згадані вище особливості течії, залишимо тільки найбільш суттєві величини в рівняннях збереження кількості руху та енергії. Такими величинами є компоненти

тензора напруги τ_{yx} , τ_{yz} і, відповідно, компоненти швидкості деформації

$$\dot{\gamma}_x = \frac{\partial W_x}{\partial y} \text{ та } \dot{\gamma}_z = \frac{\partial W_z}{\partial y} [8].$$

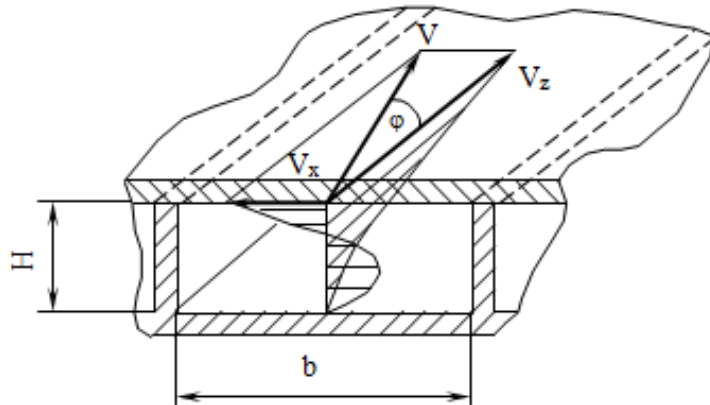


Рис. 1.5. Розрахункова схема процесу гомогенізації

Рівняння збереження кількості руху з врахуванням зазначених вище спрощень набувають вигляду:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0; \quad (1.23)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0. \quad (1.24)$$

У цих рівняннях вважається, що сили тиску в потоці полімеру зрівноважуються силами в'язкості. Компоненти тензора напруги при цьому дорівнюють:

$$\tau_{yx} = \mu(\dot{\gamma}, T) \frac{\partial W_x}{\partial y}; \quad (1.25)$$

$$\tau_{yz} = \mu(\dot{\gamma}, T) \frac{\partial W_z}{\partial y}. \quad (1.26)$$

Підставляючи ці вирази в рівняння (1.23) і (1.24), одержимо:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu(\dot{\gamma}, T) \frac{\partial W_x}{\partial y} \right] = 0; \quad (1.27)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu(\dot{\gamma}, T) \frac{\partial W_z}{\partial y} \right] = 0. \quad (1.28)$$

Граничні умови для розв'язання цих рівнянь наступні:

$$\text{при } y = 0 \quad W_x = 0; \quad W_z = 0; \quad (1.29)$$

$$\text{при } y = H \quad W_x = -V_x; \quad W_z = V_z. \quad (1.30)$$

Для визначення градієнтів тиску запишемо рівняння нерозривності в інтегральній формі. Складова W_x визначає циркуляцію розплаву поперек каналу (рис. 1.5), тому масова витрата через будь-який переріз $H\Delta z$ дорівнює нулю:

$$G_x = \rho H \Delta z \frac{1}{H} \int_0^H W_x dy = 0 \quad (1.31)$$

де $\frac{1}{H} \int_0^H W_x dy$ - середня швидкість руху. Звідси маємо залежність для визначення тиску в напрямі x :

$$\int_0^H W_x dy = 0 \quad (1.32)$$

Складова швидкості W_z визначає масову витрату вздовж координати z (продуктивність), тому рівняння нерозривності має вигляд:

$$G = \rho b H \frac{1}{H} \int_0^H W_z dy \quad (1.33)$$

Важливою характеристикою розплаву є якість його змішування. Оскільки полімери і їх композиції мають високу в'язкість, то для них вирішальне значення має ламінарне змішування, яке забезпечується відповідними швидкісними полями і накопленою деформацією зсуву. Ці поля в об'ємі робочих органів неоднорідні, тому різною буде і інтенсивність дисипації, яка є основною причиною виникнення температурної неоднорідності розплаву. Із врахуванням особливостей процесу і властивостей полімеру можна одержати досить прості залежності, які дають можливість оцінити цю температурну неоднорідність з достатньою для інженерних розрахунків точністю. Як уже зазначалось, робочі органи екструдерів характерні тим, що в них один із розмірів набагато менший решти, тому найбільша швидкість зміни параметрів відбувається вздовж цього розміру. Коефіцієнт теплопровідності полімерів відносно невеликий і значно більший вплив на температурну неоднорідність має дисипативне тепловиділення в макрооб'ємі полімеру. Для порівняння можна навести

лінію для виробництва полімерних труб, де теплота дисипативного плавлення і гомогенізації вводиться в полімер в об'ємі каналів черв'яка, довжина якого становить 25-30 діаметрів, а відводиться в зоні охолодження, довжина якої сягає десятків метрів. Окрім цього, коефіцієнт теплопровідності не має властивостей адитивності і при переробці композиційних матеріалів з різною ступінню наповнення в багатьох випадках взагалі невідомий. Для перевірки цього припущення нами були проведені розрахунки температурних полів при градієнтній течії розплаву в зазорі між двома циліндрами, один з яких обертається. Розв'язання рівняння енергії здійснювалось чисельними методами із врахуванням і без врахування складової теплопровідності для адіабатичних умов. Розбіжність результатів не перевищувала 5% в основному потоці і була дещо більшою тільки в тонкому пристінному шарі.

Із врахуванням сказаного вище рівняння енергії набуває вигляду:

$$\rho C \left(W_x \frac{\partial T}{\partial x} + W_y \frac{\partial T}{\partial y} + W_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q_d, \quad (1.34)$$

де потужність дисипації $q_d = \tau_{yx} \frac{\partial W_x}{\partial y} + \tau_{yz} \frac{\partial W_z}{\partial y}.$ (1.35)

Якщо знехтувати конвективним переносом енергії вздовж осі y і вважати, що температура по координаті x внаслідок циркуляції розплаву не міняється ($H \gg b$), то рівняння (1.34) можна спростити і з врахуванням залежностей (1.25), (1.26) і (1.35) записати у вигляді:

$$\rho C W_z \frac{\partial T}{\partial z} = \mu(\dot{\gamma}, T) \left[\left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 \right]. \quad (1.36)$$

Граничною умовою для його розв'язання є розподіл температур на вході елемента, який приймається рівним розподілу температур на виході попереднього елемента, а при розрахунку першого елемента його можна прийняти рівним температурі розплаву на виході зони плавлення.

Потужність дисипації в об'ємі елемента визначимо шляхом інтегрування по об'єму q_d :

$$\Delta N_{\partial} = \int_0^b \int_0^H \int_{z_1}^{z_2} \mu(\dot{\gamma}, T) \left[\left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy dz. \quad (1.37)$$

Із врахуванням припущень методу ступеневої апроксимації підінтегральна функція залежить тільки від координати y , оскільки y відповідності з цим методом всі змінні, що входять в останню функцію, змінюються тільки вздовж цієї координати. Тому рівняння (1.37) набуває вигляду:

$$\Delta N_{\partial} = b \Delta z \int_0^H \mu(y) \left[\left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 \right] dy \quad (1.38)$$

Таким чином, система рівнянь і граничних умов (1.27)-(1.30), (1.32), (1.33), (1.34), (1.35) і (1.37) разом з функціями, що описують залежність теплофізичних властивостей від температури та в'язкості від швидкості зсуву і температури є математичною моделлю модуля гомогенізації. Слід зазначити, що ця модель описує адіабатичний (автогенний) процес, тобто не враховує теплообмін з системою теплозабезпечення циліндра. Однак за винятком випадків, коли зовнішній теплообмін має суттєве значення (переробка полімерів з низькою в'язкістю та ін.), для проектних розрахунків така модель дозволяє обчислити найбільш прийнятні умови процесу, оскільки враховує введення енергії в розплав тільки внаслідок дисипації в масі полімеру.

Як раніше відзначалось, процес плавлення в зоні плавлення не закінчується і з цієї зони надходять нерозплавлені частинки полімеру, утворюючи перехідну область. Для розрахунку цієї області будемо вважати, що середня температура розплаву залишається рівною температурі розплаву на виході останнього елемента (модуля) зони плавлення, а енергія дисипації витрачається на завершення плавлення нерозплавлених частинок. Тоді витрата нерозплавленого полімеру зменшиться на величину:

$$\Delta G_p = \frac{\Delta N_{\partial}}{i(T_p) - i_{ex}}, \quad (1.39)$$

а середньомасова температура для j -го елемента дорівнює:

$$T = \frac{1}{G} \left[\sum_{i=1}^j (\Delta G_{pi} T_p) + (G - \sum_{i=1}^j \Delta G_{pi}) T_{\infty} \right]. \quad (1.40)$$

Наявність перехідної зони, в якій розміри напіврозплавлених частинок можуть бути одного порядку з глибиною каналу, суттєво ускладнює розрахунок гідродинаміки, оскільки непросто підібрати реологічні рівняння, що задовільно описують поведінку полімеру в цих умовах. Тому в першому наближенні скористуємось профілями швидкості, одержаними для ньютонівської моделі рідини, що в багатьох випадках дає задовільну для інженерних розрахунків точність. При необхідності можуть бути внесені уточнення шляхом використання більш складних реологічних залежностей, але це у більшості випадків вимагає чисельних розрахунків рівнянь гідродинаміки. Розв'язання рівнянь руху для ньютонівської рідини наводиться в багатьох літературних джерелах. Розглянемо його докладніше.

В наближенні методу ступеневої апроксимації в межах елемента в'язкість будемо вважати постійною і визначати її для середніх для розглядуваного елемента значень $\dot{\gamma}_x$ і $\dot{\gamma}_z$. Тоді рівняння руху (1.27) і (1.28) набувають вигляду:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} = 0; \quad (1.41)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} = 0. \quad (1.42)$$

Розглянемо спочатку складову W_x і, інтегруючи двічі рівняння (1.41), одержимо:

$$W_x = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2. \quad (1.43)$$

Із граничної умови (1.29) знаходимо $C_2=0$, а з граничної умови (1.30) маємо:

$$C_1 = -\frac{V_x}{H} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} H. \quad (1.44)$$

Підставивши значення постійних інтегрування в (1.43), одержимо:

$$W_x = -V_x \frac{y}{H} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (Hy - y^2). \quad (1.45)$$

Для визначення градієнту тиску підставимо одержану залежність в рівняння (1.32):

$$\int_0^H W_x dy = \int_0^H \left[-V_x \frac{y}{H} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (Hy - y^2) \right] dy = 0. \quad (1.46)$$

Інтегруючи (9.24) і розв'язуючи одержаний вираз відносно градієнта тиску, маємо:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{6\mu V_x}{H^2}. \quad (1.47)$$

Підставивши далі вираз (1.47) в рівняння (1.45), після перетворень знаходимо функцію, що описує швидкісне поле в напрямі x :

$$W_x = V_x \left(2 \frac{y}{H} - 3 \frac{y^2}{H^2} \right) \quad (1.48)$$

Профіль швидкості W_x наведений на рис. 1.5. Неважко бачити, що при $y = \frac{2}{3}H$ швидкість дорівнює нулю і складова W_x забезпечує циркуляцію розплаву в поперечному напрямі навколо малорухомого шару розплаву всередині каналу черв'яка. Складова швидкості деформації визначається так:

$$\dot{\gamma}_x = \frac{\partial W_x}{\partial y} = 2 \frac{V_x}{H} \left(1 - 3 \frac{y}{H} \right). \quad (1.49)$$

Розв'язуючи аналогічно рівняння (1.28) разом з граничними умовами (1.29) і (9.8), одержимо вираз для визначення складової швидкості W_z :

$$W_z = V_z \frac{y}{H} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z} (Hy - y^2). \quad (1.50)$$

Для знаходження градієнта тиску підставимо одержаний вираз в рівняння нерозривності (1.33):

$$G = \rho b H \frac{1}{H} \int_0^H \left[V_z \frac{y}{H} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z} (Hy - y^2) \right] dy. \quad (1.51)$$

Після інтегрування одержимо:

$$G = \rho b \left(V_z \frac{H}{2} - \frac{H^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right). \quad (1.52)$$

Більш точний розв'язок рівняння руху із врахуванням зміни швидкості W_z і вздовж координати x , тобто гальмівної дії бічних стінок, докладно описаний, наприклад, в роботах Мак-Келві, Тадмора і ін., дозволив ввести в рівняння (1.52) уточнюючі коефіцієнти, з врахуванням яких згадане рівняння набуває вигляду:

$$G = \rho b \left(V_z \frac{H}{2} F_d - \frac{H^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial z} F_p \right), \quad (1.53)$$

де коефіцієнти F_d і F_p визначаються за формулами:

$$F_d = \frac{16b}{\pi^3 H} \sum_{i=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{i^3} \operatorname{th} \left(\frac{i\pi H}{2b} \right), \quad (1.54)$$

$$F_p = 1 - \frac{192H}{\pi^5 b} \sum_{i=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{i^5} \operatorname{th} \left(\frac{i\pi H}{2b} \right). \quad (1.55)$$

Обидва коефіцієнти форми залежать тільки від відношення (H/b) і при малих його значеннях наближаються до одиниці. Для зручності розрахунків рівняння (1.54) і (1.55) апроксимовані наступними поліномами:

$$F_d = 0,125 \left(\frac{H}{b} \right)^2 - 0,625 \left(\frac{H}{b} \right) + 1, \quad (1.56)$$

$$F_p = 0,130 \left(\frac{H}{b} \right)^2 - 0,710 \left(\frac{H}{b} \right) + 1. \quad (1.57)$$

Визначимо градієнт тиску з рівняння (1.53):

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{12\mu}{H^3 F_p} \left(V_z \frac{H}{2} F_d - \frac{G}{\rho b} \right) \quad (1.58)$$

і підставимо одержаний вираз в рівняння (1.50). В результаті одержимо залежність, що описує складову швидкості W_z :

$$W_z = V_z \frac{H}{2} - \frac{6}{H^3 F_p} \left(V_z \frac{H}{2} F_d - \frac{G}{\rho b} \right) (Hy - y^2). \quad (1.59)$$

Відповідно компонента швидкості деформації дорівнює:

$$\dot{\gamma}_z = \frac{\partial W_x}{\partial y} = \frac{V_z}{H} - \frac{6}{H^3 F_p} \left(V_z \frac{H}{2} F_d - \frac{G}{\rho b} \right) (H - 2y). \quad (1.60)$$

Систематизованим дослідженням процесів екструзії полімерних матеріалів приділялась значна частина уваги зарубіжними та вітчизняними вченими, такими як: Д.М. Мак-Келві, З. Тадмор, К. Раувендааль, Торнер Р.В. В.С. Кім, Ю.Ю. Лукач, Л.Б. Радченко та інші. В дослідженнях цих авторів основна увага була спрямована на розгляд фізичних та математичних моделей процесів черв'ячної екструзії з метою отримання залежностей для визначення продуктивності та енергосилових параметрів екструзійних машин і майже не приділялась увага вивченню проблеми коливання продуктивності на виході екструдера, економії сировини та енергії.

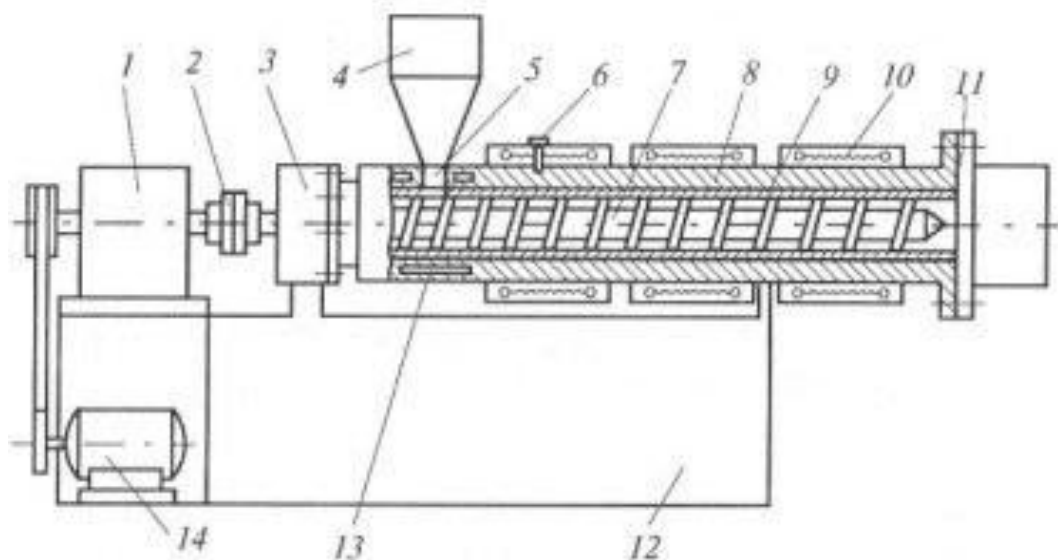
На сьогоднішній день питання мінімізації перевитрат ресурсів та енергії є актуальними, тому при дослідженні процесів черв'ячної екструзії, пріоритетним є створення нових екструзійних процесів та обладнання при максимальному заощадженні матеріальних та енергетичних ресурсів [9].

Аналіз існуючих технічних умов, регламентів та стандартів на виготовлення полімерних виробів, таких як труби, плівки, листи та інше, показав [10,11,12,13] що допуски на їх основні геометричні розміри часто на 10-15% перевищують номінально необхідні. Одним із шляхів заощадження ресурсів та енергії при екструзії полімерів могло б бути зменшення допусків на геометричні розміри. Тож для вирішення даної проблеми потрібно розглядати зону гомогенізації та дозування.

Так для проведення всіх вище названих процесів екструзії необхідне відповідне обладнання.

1.2. Одночерв'ячна екструзія

Найчастіше для виконання процесів екструзії полімерів використовуються одночерв'ячні екструдери, типова конструкція якого представлена на рисунку 1.6 [14]. Основними конструктивними елементами одночерв'ячного екструдера є привід, який складається з електродвигуна 14 і редуктора 1, який зв'язаний муфтою 2 з шнеком 7, бункера 4, підшипників 3, циліндра 8 та формуючого інструмента 11. Усі конструктивні елементи екструдера змонтовані на станині 12.



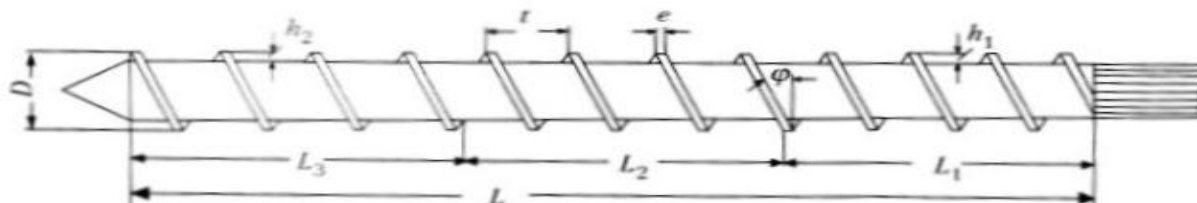
- 1 – редуктор, 2 – муфта, 3 – підшипниковий вузол, 4 – бункер, 5 –
воронка,
6 – термопари, 7 – шнек, 8 – циліндр, 9 – гільза, 10 – зовнішні нагрівники,
11 – головка, 12 – станина, 13 – сорочка обігріву, 14 – електродвигун

Рисунок 1.6 – Схема одночерв'ячного екструдера

Матеріал, що перероблюється, подається з бункера 4 через завантажувальну воронку 5 у канал шнека. Шнек обертається у середині корпуса 8, який споряджено зносостійкою гільзою 9. Осьове зусилля, яке виникає в процесі переробки і діє на шнек, сприймається упорним підшипником 3. Нагрівання циліндра 8 до температури переробки здійснюється зовнішніми нагрівниками 10. Температура корпуса вимірюється і регулюється за допомогою термопар 6, які розташовані у кожній зоні. Матеріал, що перероблюється, при русі по гвинтовому каналу шнека нагрівається, пластифікується і у вигляді розплаву продавлюється через головку 11, у якій в окремих випадках встановлюється пакет сіток. Для запобігання налипанню полімеру до шнека в зоні воронки 5 матеріальний циліндр 8 охолоджується холодною водою, яка подається в сорочку обігріву 13.

Продуктивність екструдера і якість підготовки розплаву значно залежить від конструкції і геометрії шнека(рис. 1.7) – основного робочого

органу. У зв'язку з цим основну увагу приділяють створенню такої геометрії черв'яка яка найбільш задовольняла б технологічний процес підготовки розплаву. Завдяки відповідним чином спроектованій геометрії черв'яка полімер при переміщенні стискається, плавиться, гомогенізується і під певним тиском потрапляє у формуючу головку. Насипна маса полімеру, що надходить, менше густини розплаву, тому в області плавлення об'єм каналу черв'яка поступово зменшується, найчастіше за рахунок зменшення глибини нарізки і досить рідко за рахунок зменшення ширини каналу.



D —діаметр, L —довжина, L_1 , L_2 , L_3 —довжини відрізків з різною глибиною нарізки, h_1, h_2 —глибина нарізки на початку та в кінці шнеку, t —крок витка, e —ширина гребеня, ϕ —кут гвинтової нарізки

Рисунок 1.7 – Шнек

Класифікація екструзійних шнеків:

1. Шнек з однозахідною нарізкою (типові шнеки). Типовий шнек зі збільшеною західністю в зоні живлення представлений на рисунку 1.9 а. Додаткові витки згладжують коливання тиску, що відбуваються внаслідок перерв у підживленні матеріалом з завантажувального бункера при обертанні шнека. Важлива перевага двухзахідної геометрії полягає в тому, що сили, які діють на шнек, збалансовані таким чином, що прогин шнека стає менш імовірним. Недоліком такої конструкції є те, що додаткові витки зменшують поперечний переріз каналу і збільшують поверхню контакту твердої пробки і шнека. Таким чином, можна знизити коливання тиску, але при цьому зменшиться швидкість переміщення твердого матеріалу. Тому застосування двухзахідної нарізки в зоні харчування екструдерів з плавним, гладким перетином циліндра часто призводить до зниження їх продуктивності.

На рисунку 1.8 б, показаний шнек зі змінним зростаючим кроком нарізки. Змінний крок дозволяє використовувати оптимальний кут нахилу нарізки локально, тобто оптимальний кут нахилу в зоні живлення для переміщення твердого матеріалу і оптимальний кут нахилу в зоні дозування для переміщення розплаву [15].

На рисунку 1.8 в, показаний шнек зі змінним кроком нарізки часто використовуваний для екструзії гумових сумішей. У цій конструкції крок зменшується уздовж осі на протидію тому, як це зроблено на шнеку, показаному на рисунку 1.8 б. Зменшення кроку призводить до поперечного стиску матеріалу в каналі шнека. В результаті цього звичайне стиснення, обумовлене зменшенням глибини каналу, можна знизити або взагалі не застосовувати. Фактично багато шнеків такого типу зберігають постійну глибину каналу уздовж всієї його довжини.

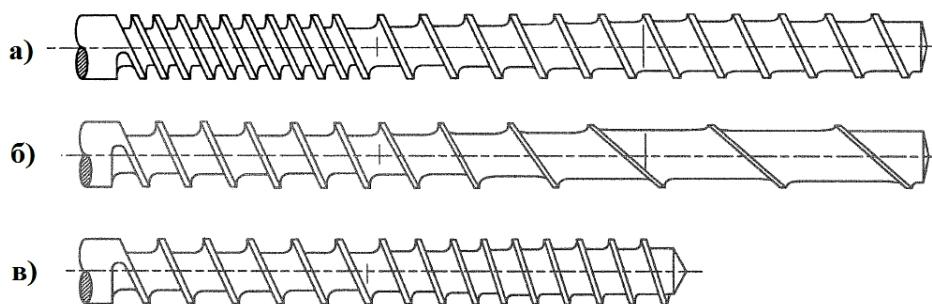


Рисунок 1.8 – Конструкції типових шнеків

На рисунку 1.9 а, показаний шнек без зони дозування і без зони живлення. Такий шнек складається тільки із зони стиснення, що забезпечує плавний стиск матеріалу. Пряма протилежність шнеку без зони живлення і дозування - шнек з дуже різким стисненням, зображений на рисунку 1.9 б. У таких шнеках довжина зони стиснення менше $1D$. Шнек без зони дозування використовується для зниження тепловиділень від внутрішнього тертя (енерговитрат) в зоні транспортування розплаву за рахунок відносно глибоких каналів в цій частині шнека з глибиною, що зменшується лінійно уздовж осі. На схожому принципі ґрунтується використання декомпресійного шнека, показаного на рисунку 1.9 в. Кінець шнека має велику глибину каналу, за якою слідує зона декомпресії. В останній зоні

глибина каналу постійна, при цьому глибокий канал в кінці шнека знижує здатність шнека генерувати тиск.

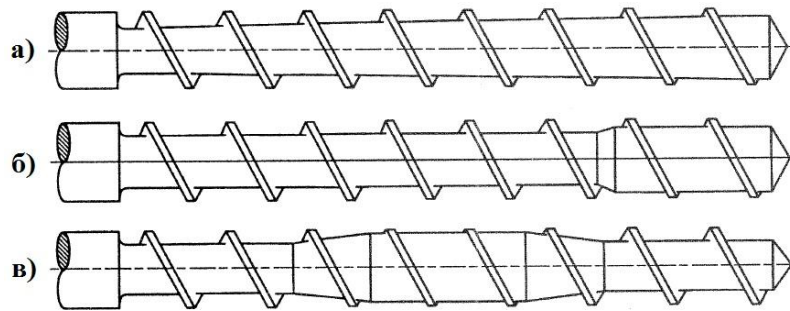


Рисунок 1.9 – Конструкції типових шнеків

2. Типовий шнек з багатозахідною нарізкою (рисунок 1.10) має як переваги, так і недоліки. Багатозахідна нарізка несприятливо впливає на транспортування твердого полімеру і на швидкість переміщення розплаву. З іншого боку, використання шнека з такою нарізкою може значно поліпшити якість плавлення за умови, що кут нахилу нарізки досить великий. Використання багатозахідної нарізки несприятливо позначається й на енерговитратах, особливо для розплавів з низьким показником плинності, близьких за своєю поведінкою до ньютонівської рідини.

Перевага двухзахідної нарізки полягає в симетричності витків шнека. Це може знизити тенденцію шнека до деформацій при різких змінах тиску по довжині. Інша можлива перевага полягає в тому, що в зоні живлення більш регулярно здійснюється захоплення матеріалу. Завдяки такій конструкції забезпечується більш висока швидкість плавлення. Оскільки багатозахідна нарізка негативно впливає на транспортування твердого полімеру і на швидкість переміщення розплаву, має сенс розташувати її тільки на певній частині шнека (зона плавлення).

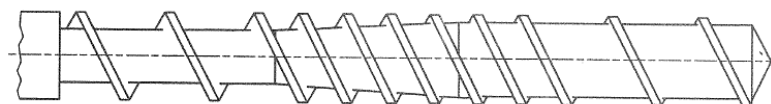


Рисунок 1.10 – Шнек з багато західною нарізкою для покращення якості плавлення розплаву

3. Шнек Мейлlefера (рисунок 1.11) відноситься до бар'єрних шнеків. Бар'єрна зона починається в місці, де бар'єрний виток встановлений на

шнеку. Зазор між бар'єрним витком і циліндром, як правило, більше, ніж зазор між основними лопатями і циліндром. Бар'єрний зазор великий настільки, щоб полімерний розплав міг текти над бар'єром, а тверді полімерні частинки не проходили через нього. В результаті твердий матеріал залишається на активній стороні бар'єрного витка, а розплав полімеру в основному на пасивній стороні. Таким чином, бар'єрний виток призводить до фазового поділу, відокремлюючи твердий матеріал від розплаву (рисунок 1.12).

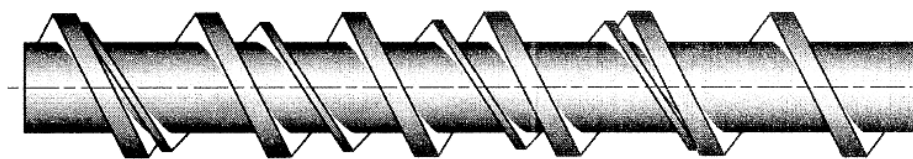


Рисунок 1.11 – Шнек Майллефера

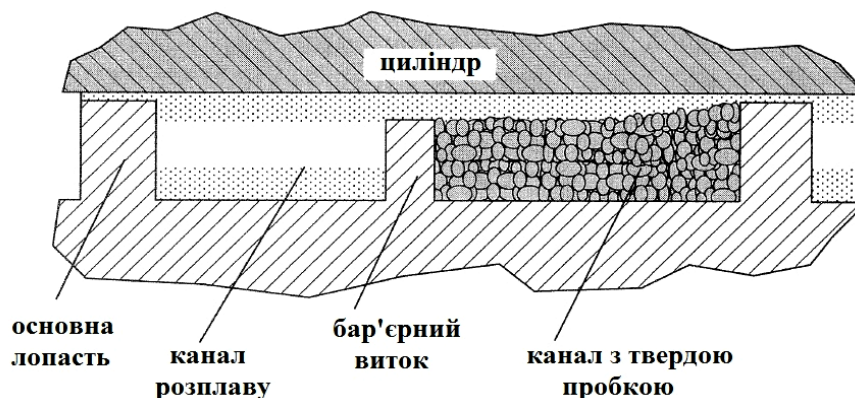


Рисунок 1.12 – Фазовий поділ в бар'єрному шнеку

Така геометрія забезпечує повне плавлення твердого матеріалу, оскільки останній не може проникнути за бар'єрну зону. Перетин твердим матеріалом бар'єрного зазору допустимий, але відбувається лише в тому випадку, якщо його частки зменшаться в розмірі настільки, що вони можуть розплавитися досить швидко. Інша перевага бар'єрної конструкції полягає в тому, що всі полімери при перебігу через бар'єрний зазор поддаються порівняно високому зсуву, відбувається інтенсивне змінування.

Основна особливість шнека Мейллефера полягає в тому, що кут нахилу бар'єрного витка більше, ніж кут нахилу основної лопаті нарізки. В

результаті ширина каналу з твердим матеріалом безперервно зменшується при відповідному збільшенні ширини каналу з розплавом. Така геометрія допускає плавну і поступову зміну розмірів каналів. Її недолік полягає в тому, що ширина каналу з твердим полімером зменшується, тому швидкість плавлення також знижується, оскільки остання визначається шириною твердої пробки. Основна перевага шнека Мейлlefера полягає в здатності до фізичного поділу рідкої і твердої фаз матеріалу. В результаті знижується ймовірність утворення плівки розплаву між твердою пробкою і шнеком, і, отже, знижується ймовірність руйнування твердого матеріалу. Таким чином, процес плавлення буде проходити більш стабільно, але не обов'язково більш швидко.

Завдяки дослідженню процесів, що проходять в одночерв'ячних екструдерах, виявляються можливості їх удосконалення шляхом підбору відповідної геометрії робочих органів, застосування систем автоматизованого керування процесом, що дозволяє виготовляти вироби потрібної якості з вузьким діапазоном допусків на їх розміри при енергетично оптимальних режимах. Проте все більше застосування знаходять вироби з композиційних матеріалів з різними наповнювачами і добавками. Це ставить перед машинобудуванням завдання розробки більш універсальних екструзійних машин, якими є багаточерв'ячні, і каскадні екструдери [2].

1.3 Двочерв'ячна екструзія.

Живлення та транспортування матеріалу в такому екструдері проходить не за рахунок сил тертя, а за рахунок його продавлювання об'ємів під дією гребнів черв'яків, які узгоджено обертаються, то морфологія і агрегатний стан полімерного матеріалу не впливають на продуктивність машини. Тому двочерв'ячні екструдери здатні переробляти порошкові і гранульовані матеріали, композиції з дисперсним і коротковолокнистим наповнювачем, розплави або пасти, які прилипають до черв'яка, і створювати значний тиск для продавлювання через формуючу головку [16]. Іншою

важливою відмінністю між одношнековими і двошнековими екструдерами є відмінність профілів швидкості. Профілі швидкості в одношнекових екструдерах вивчені достатньо добре і легко можуть бути описані. В той час як у двошнекових екструдерах профілі швидкості є досить складними і їх набагато важче описати аналітично, так як опис течії полімеру з врахуванням втрат у зоні зачеплення викликає значні труднощі.

Моделі течії полімеру в двошнекових екструдерах з врахуванням втрат в зоні зачеплення шнеків мають ряд суттєвих переваг. Наприклад, вони дають змогу описати перемішування, теплопровідність, високу здатність плавлення і дегазації, а також гарне регулювання температури сировини. Недоліком моделей є їх надмірна складність. Теорія процесів в двошнекових екструдерах розроблена не настільки добре, як для одношнекових. Тому важко передбачити роботу двочерв'ячного екструдера, базуючись лише на знанні геометрії черв'яка, властивостях полімеру й умовах переробки; і навпаки, важко підібрати оптимальну геометрію шнека, коли необхідний певний режим роботи в окремих випадках роботи екструдера. Така ситуація спонукає до використання двошнекових екструдерів модульної конструкції. Ці машини мають змінні елементи шнека і циліндра, наприклад, екструдери типу ZE компанії Krauss-Maffei, зображені на рисунку 1.13 .

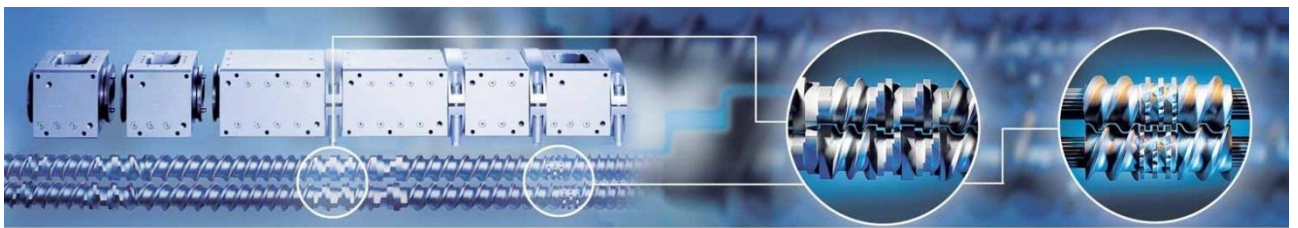
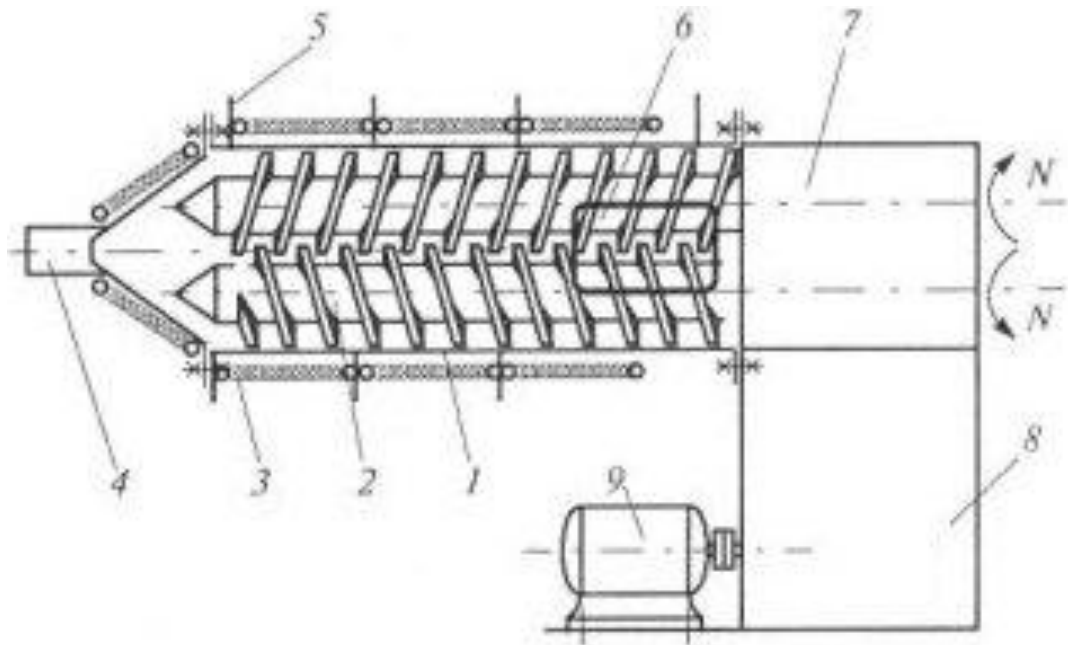


Рисунок 1.13 – Елементи модульного екструдера типу ZE
компанії Krauss-Maffei

Основними елементами двошнекових екструдерів (рис. 1.14) є два шнеки 2, які, зазвичай, обертаються назустріч один одному в циліндрі 1. Матеріал, що перероблюється, завантажується в екструдер через завантажувальне вікно 6. За допомогою шнеків 2 розігрітий електронагрівниками 3 розплав полімеру продавлюється через формуючий інструмент 4. Температурний режим переробки контролюється термопарами

5. Привід шнека складається з електродвигуна 9 та редуктора 8, а виникаюче розпірне зусилля сприймається підшипниковим вузлом 7, який складається з послідовно розташованих двома рядами упорних і радіальних підшипників кочення.



1 – циліндр, 2 – шнеки, 3 – електронагрівники, 4 – формуючий інструмент,

5 – термопари, 6 – завантажувальне вікно, 7 – підшипниковий вузол,
8 – редуктор, 9 – електродвигун

Рисунок 1.14 – Схема двочерв'ячного екструдера

Складністю такої конструкції є проблема розташування підшипникового вузла. З метою її вирішення було розроблено конічні двошнекові екструдери (рис. 1.15).

Конічні двошнекові екструдери мають наступні переваги:

- задня міжосьова відстань достатньо велика для розміщення крупних упорних підшипників;
- глибокі витки шнеку в зоні завантаження забезпечують можливість подачі більшої кількості матеріалу в зону плавлення, особливо, коли це стосується порошкоподібних композиційних матеріалів з поганою сипучістю;

– при однаковій потужності плавлення довжина нарізаної частини шнеку кінцевого екструдера менша, ніж у екструдера з паралельно розташованими шнеками.

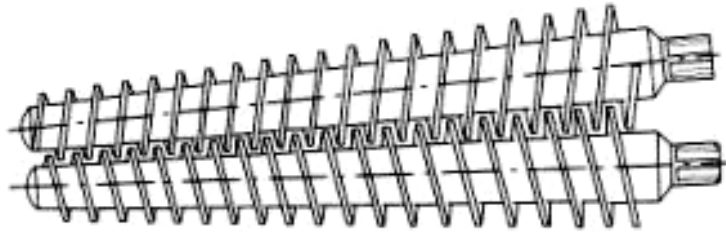


Рисунок 1.15 – Конічні спарені шнеки

У випадках, коли необхідна підвищена пластикація, введення домішок, фарбування, спінення, наповнення, переробка композиційних матеріалів чи вакуумування розплаву необхідно реалізовувати більш гнучке керування процесами, які в одночерв'ячних чи двочерв'ячних екструдерах є занадто інерційними, що не завжди може забезпечити достатньо високий рівень переробки.

З цією метою все частіше використовують каскадні екструдери, в основу конструкції яких закладений принцип розділення технологічного процесу на основні окремі операції з можливістю автономного управління.

1.4 Каскадна екструзія.

У загальному випадку при переробці термопластів необхідно перевести полімер із твердого у в'язкотекучий стан. Цей процес можна розділити на такі основні операції як завантаження, стиснення і плавлення, вакуумування, термостатування, дозування розплаву і, в деяких випадках, його фільтрація. На практиці з автономним управлінням виділяються не всі ці операції, а лише ті, які потребують особливого технологічного процесу.

Під визначені масовій витраті і задані параметри розплаву полімеру в каскадному процесі екструзії існує різноманітна варіація створення окремих операцій для проведення процесу, які будуть задовольняти дані характеристики. Прикладом може бути використання різноманітної комбінації геометричних розмірів робочих органів екструдерів (черв'ячний

пресс) окремих операцій при заданій варіації або кількості обертів, або відношення довжини до діаметру, або обох варіантів. Тому при моделюванні необхідно додатково сформулювати умови стикування окремих каскадів.

Найширошого використання отримали каскадні машини, які утворюються двома екструдерами, що обираються виходячи з умов заданої схеми технологічного процесу перероблення полімерів.

В одному технологічному процесі перший каскад відповідає за виготовлення якісного гомогенного розплаву, а інший – за перенесення цього розплаву.

Використовують аналогічну схему переробки, під час якої перший каскад підготовляє агломерат, а інший відповідає за доведення гомогенізації та дозування його до формувального інструмента.

За першою схемою в ролі пластифікуючого екструдера застосовують агрегати, яким характерна така властивість як високий рівень перемішування.

На наступному етапі знаходиться, найчастіше, машини з одним черв'ячним пресом довжина якого $6...12D$ або насоси з шестеренними колесами.

При використанні іншої схеми на першому етапі використовують екструдери з одним або двома червячними пресами довжина , яких становить $5...7D$ та сталою частотою обертання, а на другому етапі використовують прес з одним робочим органом і довжиною з геометричним розміром $9...15D$ та кількістю обертів, яка в три рази більша за прийняту по замовчанням.

На рисунках нижче деякі приклади таких екструдерів.

Дослідниками з піднебесної «Сомітомо денки» створена двохстадійна високоякісна та швидкісна каскадна схема екструзії – TSP [17-18].

Дана схема представляє собою на першому етапі підведення теплової енергії до перероблюваного полімеру від нагрівачів, які встановлені з-зовні та попереднє стискання полімеру. На першому етапі геометричний розмір, який відповідає висоті витка черв'яка, що обертається з звичайною частотою, більший, ніж геометричний розмір, який відповідає висоті витка зони в якій

проходить процес живлення в звичайному екструдері, цим шляхом і отримується зменшення швидкості зсуву розплаву.

На другому етапі зовнішній нагрів необхідний в більшій мірі для початку роботи агрегату, а в робочому режимі процес адіабатний, або з наявністю охолодження. На другому етапі основним джерелом енергії, що йде на кінцеве плавлення полімеру та його змішування, є енергія дисипації, яка утворюється за рахунок високої швидкості зсуву.

Система екструзії TSP має наступні особливості: частота обертання черв'яка на другій сходинці по крайній мірі в два рази перевищує частоту обертання черв'яка в звичайних екструдерах; черв'як має дві зони – живлення та дозування, а відношення $L / D \leq 12$. Так як на цій стадії використовується черв'як з підвищеною частотою обертання, то він може бути меншого діаметру, ніж в звичайному екструдері для досягнення тієї ж продуктивності.

На першій стадії екструзії системи TSP забезпечується плавлення приблизно половини кількості розплаву, головним чином, завдяки зовнішнім нагрівачам і його стисненню. На другій стадії відбувається остаточне плавлення та гомогенізація розплаву, в основному, завдяки високій частоті обертання черв'яка на другій сходинці.

У відповідності з описаною схемою екструзії фірма «Sumitomo Electric Ind - LTD» розробила двостадійний екструдер, рисунок 1.16, що має технічні параметри, які надані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри двостадійного екструдера фірми Sumitomo

Параметри	Перша стадія	Друга стадія
Діаметр черв'яка, мм	115	90
Максим. частота обертання, хв^{-1}	80	350
Довжина черв'яка	$13 D$	$9 D$
Потужність двигуна, кВт	55	37

Екструдер використовується для накладання ізоляції на провід. Після підтвердження ефективності дослідного зразка фірма «Сумітомо денкі»

розробила та виготовила серію екструдерів, які успішно пройшли випробування в промисловості протягом чотирьох років.

Їх продуктивність при накладанні ізоляції на кабель виявилась на 70-100% вища, ніж продуктивність звичайних екструдерів. Одночасно значно покращилась якість поверхні виробів. Екструдери з успіхом застосовувались при формуванні пустотілих виробів з гранульованого поліетилену. При цьому відмічено збільшення продуктивності на 50-60%. Інша японська фірма «Japan Steel Works Ltd» створила розробила двоступінчатий каскадний екструдер TS – 80/90, рисунок 1.6, що складається з горизонтального пластикуючого двочерв'ячного екструдера та вертикального чи горизонтального одночерв'ячного дозуючого екструдера, з'єднаних між собою хрестоподібним циліндром.

Кінцеві частини черв'яків (ротори) двочерв'ячного екструдера мають дві або декілька гвинтових лопатей з кутом нахилу протилежним куту нахилу гвинтової нарізки черв'яків для підвищення інтенсивності змішування матеріалів.

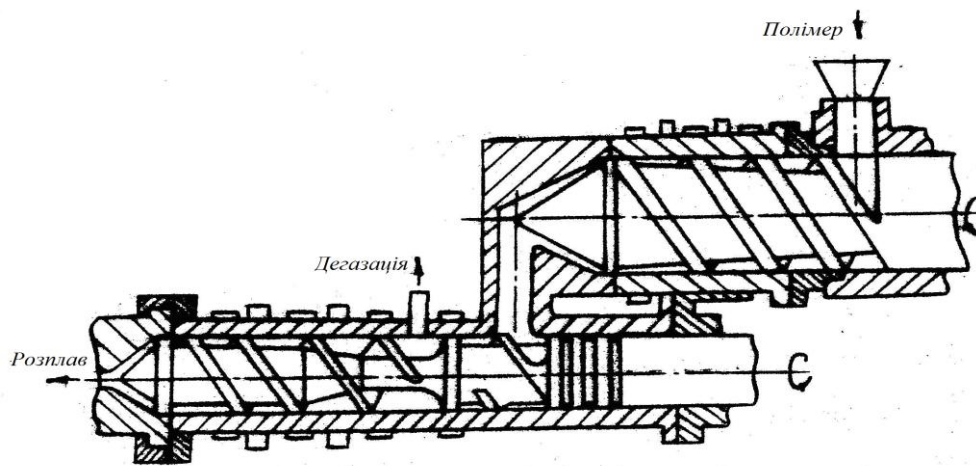


Рисунок 1.16 – Схема каскадного екструдера фірми Sumitomo Electric Ind - LTD

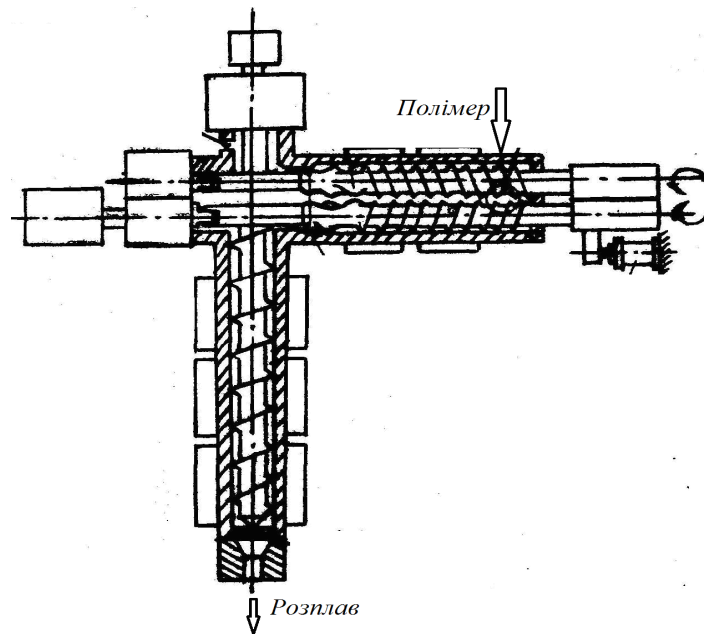


Рисунок 1.17 – Схема каскадного екструдера фірми Japan Steel Works Ltd

Гранулятор каскадний серії GSL [34] рисунок 1.18 компанії ГлобалМаш призначений для переробки дробленого пластику ПП, ПЕ, ПС, дроблених плівок і пластмас малої насипної густини, плівки ПЕ, ПП у вигляді дроблених частинок ПП мішків, для наступного їх використання в вигляді гранульованого вторинної сировини.

Особливо ефективний для переробки полімерних відходів з полігонів з високою ступінню забрудненості, плівки після мийки з малою насипною густиною, дробленої пластикової фракції після мийки. Завдяки наявності двох екструдерів з фільтрами розплаву, досягається висока ступінь фільтрації. На кожному екструдері встановлений фільтр розплаву з гідроприводом зміни сітки, фільтр з двухсекційним шибером, з квадратною секцією зміни фільтрації, з високою пропускною можливістю. Опціонально встановлюється датчик тиску і температури розплаву. До датчику підключається керування двигуна екструдера, при перевищенні тиску розплаву заданих значень, автоматика відключає головний привід і включає аварійну сигналізацію. Також датчик налаштовується таким чином, що при перевищенні заданого встановленого значення подається світло-звукова сигналізація, подається сигнал оператору, що необхідно змінити сітку на

фільтрі, а при підвищенні встановленого значення відключається привід екструдера.



Рисунок 1.18 – Каскадний екструдер серії GSL

Особливості:

- швидкість двигуну першого і другого екструдера регулюється частотним перетворювачем;
- циліндр і шнек екструдерів виготовлені з легованої сталі з азотуванням поверхні і поліровкою;
- автоматичні термо-контроллери управляють нагрівом циліндрів і головок;
- шнек першого екструдера виконаний з зоною стиску, змішування і дегазації;
- циліндр першого екструдера з отвором для дегазації, з отвором для дренажу води на вході сировини. Встановлена система вакуумної дегазації.
- вхідний отвір в циліндрі першого екструдера виконано з збільшеним входом для роботи на дробленій плівці;
- редуктор приводу першого і другого екструдерів є герметичний і масло наповнений, встановлений трубчатий теплообмінник;
- на першому екструдері встановлена переливна труба з нагрівальними елементами. Стренгова голова з нагрівними елементами встановлена на другому екструдері;
- швидкість стренгорізу регулюється частотними перетворювачами;

- використовується бункер з вимушеною подачею сировини;

Каскадний гранулятор складається з двох екструдерів. В першому екструдері відбувається попереднє розплавлення, стиск, змішування, дегазація вихідної сировини. Розплав, що отримується відрізняється неоднорідною густиною і екстрадується з перепадами тиску. Після переливу розплаву у другий екструдер, розплав повністю пластикується і гомогенізується, в результаті вихід стренгів з головки у вигляді однорідної маси з єдиним показником швидкості і товщини, що гарантує високу якість гранул. В каскадному екструдері застосовується стренгова система гранулювання. Вихідні стренги проходять через ванну з водою, охолоджуються, кристалізуються і нарізаються на гранули стренгорізом.

Каскадний екструдер фірми Farrel Pomini [35] рисунок 1.19.

Особливості:

- легкозамінні деталі;
- можливість виконувати різні вироби;
- створений для високо абразивного матеріалу;
- є можливість доповнення твердих адитивів в хвості екструзійної лінії;
- збільшує потужність дисперсії;
- постійна температура при вивантаженні.

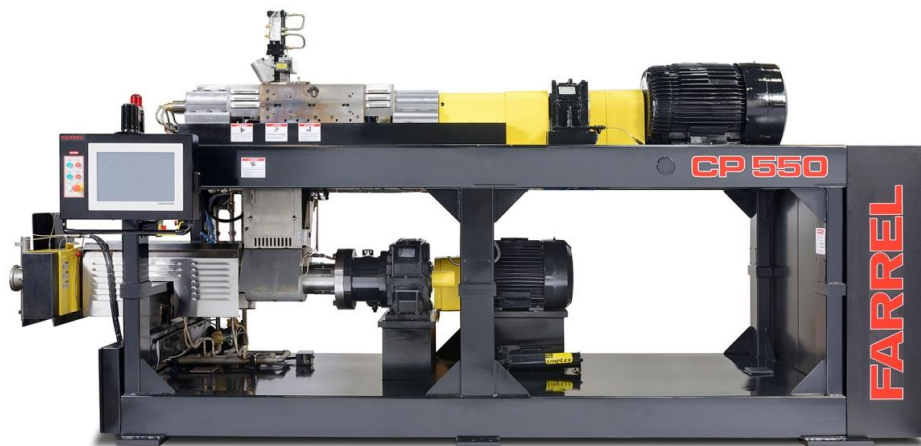


Рисунок 1.19 – Каскадний екструдер фірми Farrel Pomini

Екструдер каскадний SLE-K-125-125 [36] рисунок 1.20 призначений для отримання однорідного розплаву з перемеленої, або агломерованої пластмасової сировини і наступне її перероблення через стреногову голову, з

наступною різкою на гранули в грануляторі. Екструдер може бути оснащений дозатором для «пушонкі», який дозволяє подавати в зону завантаження сировини з невеликою насипною густиною (дроблена плівка). Виготовляється з 1 зоною дегазації (зона переливу з верхнього екструдера в нижній, є додатковою зоною дегазації).



Рисунок 1.20 – Каскадний екструдер SLE-K-125-125

Перевагами використання екструдера є:

- сумарне збільшення довжини шнеків суттєво збільшує гомогенність розплаву;
- використання 2-х фільтруючих елементів – суттєво покращують чистоту розплаву і якість отриманих гранул;
- підвищена площа дегазування майже повністю виключає пароутворення в гранулах;
- ергономіка всіх вузлів екструдера і використання одного пульта управління на 2 екструдері поліпшує роботу персоналу;
- проста конструкція у порівнянні з двушнековим екструдером;
- можливість введення технологічних добавок в розплав, і рівномірне розподілення по об'єму матеріалу;
- можливість кутової компоновки двох екструдерів робить лінію більш компактною.

Каскадний екструдер фірми Battenfeld [37] рисунок 1.21. Шнек діаметром 75 мм забезпечує оптимальні технологічні параметри по критерії співвідношення «об'єм\швидкість обертання шнеку». Усі кінцеві продукти процесу екструзії можна отримати на машині одного типорозміру. Для цього

необхідно просто налаштувати швидкість обертання шнеку і вибрати продуктивність привідного апарата. Серед важливих особливостей високошвидкісних екструдерів можна відмітити наступне:

- енергозбереження порівнюючи з традиційними системами становить 15...25%;
- менший об'єм машини забезпечує більш короткий час пере налаштування і більш довгий час роботи;
- збільшення якості за рахунок значно скороченого часу обробки;
- зниження вимог до необхідного робочого простору при збільшенні об'ємів випуску продукції;
- компактність агрегату полегшує його технічне обслуговування;
- більш низька вартість запасних частин;



Рисунок 1.21 – Каскадний екструдер фірми Battenfeld

Інший каскадний екструдер фірми Battenfeld для виробництва плівки рисунок 1.22. Вихідний матеріал подається в екструдер звичайним способом – через воронку. В першій зоні одно шнекового екструдера виробляється гомогенний розплав з якого потім на участку планетарних валків в умовах високого вакууму удаляються гази. Для того щоб створити тиск, до планетарної частини під'єднується ще один короткий одно шнековий екструдер, який направляє дезагований полімерний матеріал в насос розплаву, а звідти в сопло.

Переваги:

- простий режим технологічного процесу;
- економія енергії в результаті анулювання попередньої сушки;
- надійна конструкція;

- можливість переробляти полімерних відходів;
- переобладнання на інший матеріал без зміни шнеків.

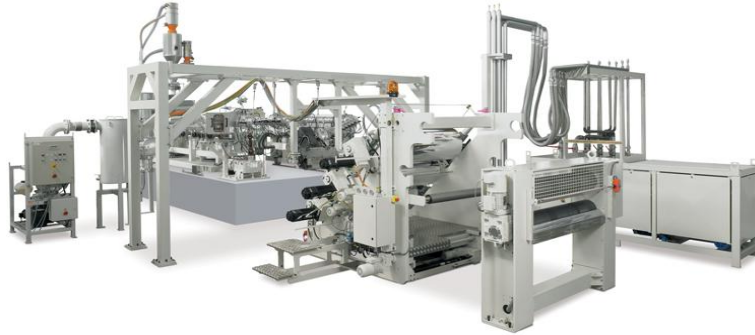


Рисунок 1.22 – Каскадний екструдер фірми Battenfeld для виробництва плівки.

Аналізуючи існуючі схеми каскадних екструдерів і їх апаратне оформлення можна зробити висновок, що майже у всіх екструдерах процеси створення тиску та дозування виконуються в'язкісним черв'ячним екструдером, максимальна теоретична енергоефективність якого складає 33,3%, а на практиці вона не перевищує і 10% [21]. Тому використання в'язкісного черв'ячного насоса для створення тиску та дозування не завжди можуть задовольнити вимоги переробників, особливо, в плані гомогенізації, гнучкого безінерційного керування процесом переробки та стабільності продуктивності на виході з екструдера.

З урахуванням вищесказаного на кафедрі МАХНВ була розроблена ресурсоенергоощадна система каскадної дисково-шестеренної екструзії (ЕКДШ), яка передбачає виведення в автономно-керуємі таких операцій, як дозоване живлення, плавлення, гомогенізація та дозування розплаву, рисунок 1.23

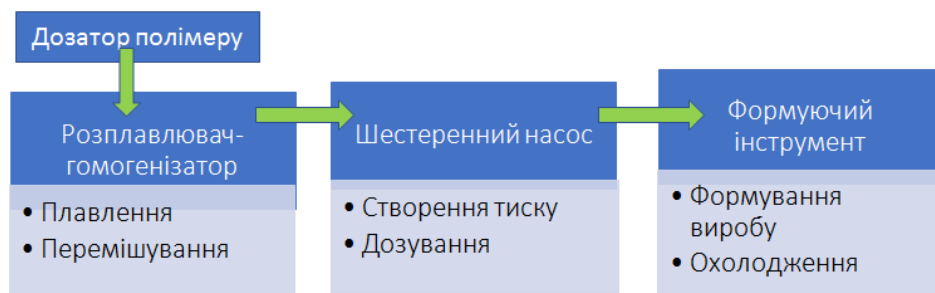


Рисунок 1.23 – Система каскадної екструзії

Огляд літературних та патентних матеріалів показав, що використання каскадних екструдерів у технологічних лініях для переробки полімерів у порівнянні з лініями на базі класичних одночервячних екструдерів дає можливість:

- збільшити продуктивність на 50-100% з одночасним покращенням якості продукції та зниженням основних питомих показників на 20-30%;
- відвести гази з розплаву;
- якісно керувати технологічними процесами;
- збільшити перелік матеріалів, що перероблюються, та продуктів, що одержують з них;
- в деяких випадках збільшити ККД за рахунок покращення окремих процесів та переважного використання в каскадах екструдерів.

Аналогічні дослідження коливань продуктивності показали [23], до та після встановлення шестеренного насоса показали, що коливання продуктивності в другому випадку практично згладжуються і стабілізуються. При цьому коливання продуктивності не перевищують 1%, проти 5% в екструдерах без шестеренного насоса, рисунок 1.24

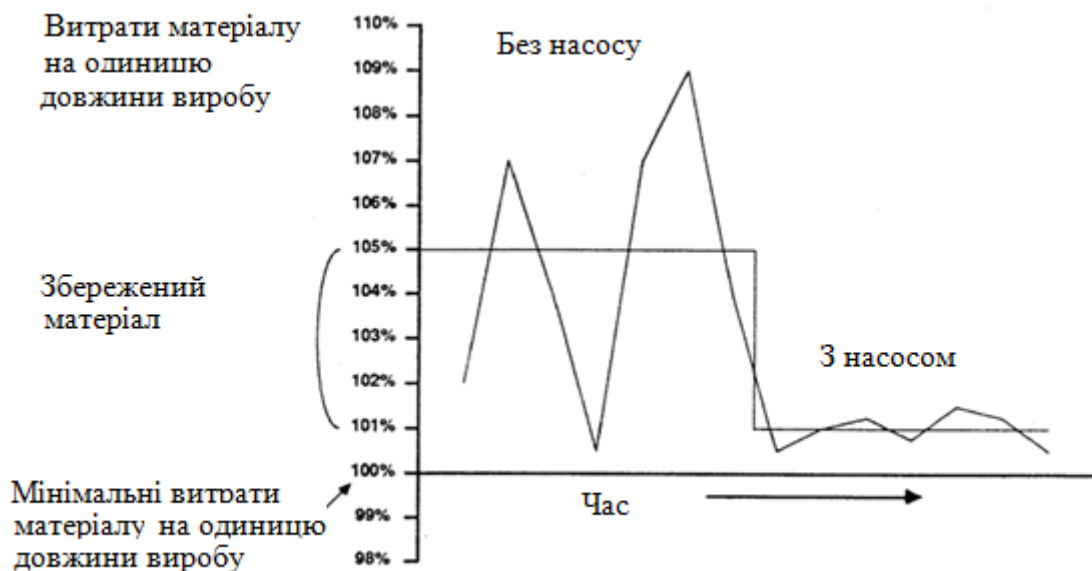


Рисунок 1.24 – Графік залежності витрати матеріалу від часу

Можна зазначити, що використання каскадної схеми екструзії, дозволяє гнучко керувати процесами плавлення та гомогенізації, дозволяє

моделювати процеси з точними граничними умовами, а також дає змогу для автономної роботи процесів переробки з використанням комп'ютерних технологій.

1.5 Висновок та мета і задачі дослідження.

Огляд сучасного стану екструзійного обладнання показує, що в останній час у зв'язку зі зростаючими обсягами виробництва полімерної продукції та високими вимогами щодо її якості в його розвитку встановилися три основні тенденції:

- модернізація існуючих універсальних екструдерів шляхом розробки нових конструкцій черв'яків та вдосконаленої схеми екструзії;
- створення комбінованих схем екструзії;
- створення нових типів екструдерів з використанням каскадних схем екструзії.

Аналіз відомих каскадних схем екструзії показує, що на першій стадії, як правило, застосовується екструдер який володіє високим пластифікуючим і змішуючим ефектом. На другій стадії для дозування розплаву застосовують в основному червячний насос, а останнім часом все частіше шестеренний насос.

На основі аналізу літературних і патентних матеріалів, попередньо проведених експериментальних досліджень була запропонована двохстадійна схема каскадної дисково-шестеренної екструзії з використанням у якості генератора розплаву – дискового екструдера, а для створення тиску та дозування розплаву – шестеренного насоса [24].

Метою роботи є обґрунтування каскадного процесу перероблення полімерів із застосуванням дозуючих насосів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі дослідження:

- обґрунтувати систему каскадної екструзії;
- розробити фізико-математичні моделі процесів дозування при екструзії полімерів;

- розробити методику експериментальних досліджень та створити експериментальну установку;
- провести експериментальні дослідження;
- узагальнити результати експериментів;
- розробити алгоритми та методики розрахунку дозуючих червячного та шестеренного насосів;
- надати рекомендацій, щодо обґрунтування та практичного використання дисково-шестеренного екструдера при переробленні полімерних матеріалів

2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ ПРИ ДОЗУВАННІ РОЗПЛАВІВ ПОЛІМЕРІВ.

2.1 Фізична модель процесу дозування.

Процеси дозування при екструзії полімерів мають визначальне значення з точки зору ресурсоенергозаощадження. Останнім часом при екструзії полімерів набули поширення черв'ячні та шестеренні насоси.

Процеси дозування відбуваються в екструзійних установках як єдина система яка поєднала в собі такі ключові характеристики, як якість продукції та економічність без яких неможливо задовольнити зростаючі потреби суспільства. Встановлення дозуючого насосу між розпалювачем–гомогенізатором та формувальною головкою дозволяє виробляти продукцію з якісно новим рівнем, досягти більшої точності і якості, що дає змогу вести процес з ресурсоенергозаощадженням.

Червячний насос–це фактично вязкісний насос, в склад якого входить матеріальний циліндр з полим отвором, в якому знаходиться вал з червячною нарізкою. Процес створення тиску та переміщення розплаву в такому насосі відбувається за рахунок проштовхування гребенем нарізки червяка розплаву за рахунок в'язкості (прямотечія). Частина розплаву за рахунок від'ємного градієнту тиску рухається в протилежному напрямку (протитечія) забезпечуючи перемішування розплаву.

Шестеренний насос, рисунок 2.1,– це поєднання двох шестерень, які знаходяться в постійному зачепленні і при обертанні створюють об'ємний шестеренний насос. Розплав, який надходить з розплавлювача-гомогенізатора у вхідний отвір шестеренного насоса, потрапляє в міжзубні впадини шестерень і переноситься ними до вихідного отвору. Одна шестерня рухається за допомогою зовнішнього джерела, а інша – завдяки першій шестерні. Таким чином відбувається перенесення розплаву міжзубними впадинами із зони низького тиску в зону високого тиску. Оскільки між поверхнями шестерень і корпусом насоса наявні щілини. Тоді при цьому

розплаву, за рахунок перепаду тисків, повертається назад і забезпечує змащування поверхонь тертя в насосі. З одного боку, втрати продуктивності мають бути мінімальними, а, з іншого – потрібно забезпечити змащування робочих поверхонь тертя в насосі, що є пріоритетним завданням під час проектування шестеренних насосів.

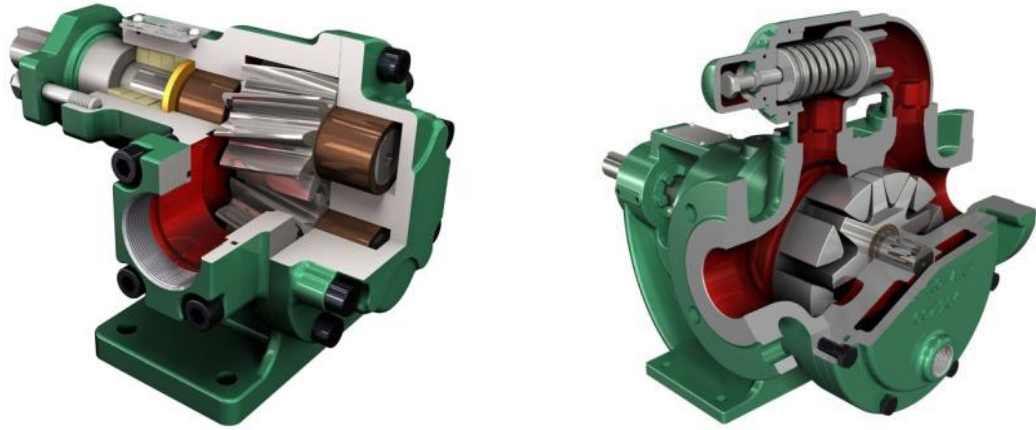


Рисунок 2.1 Шестеренний насос з зовнішнім РМ і внутрішнім *PD* зачепленням

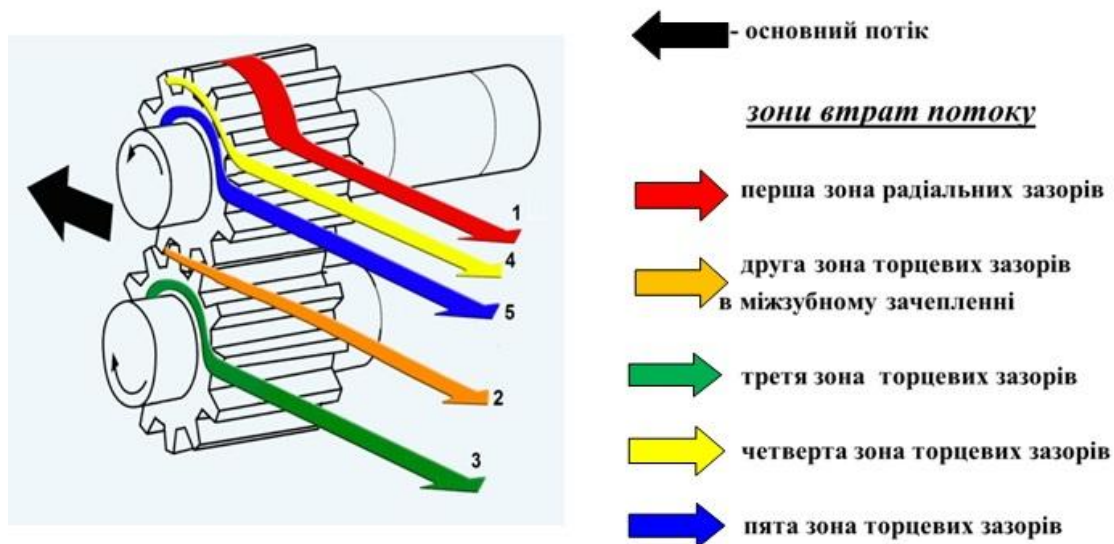
Зазори в НШ по яких рухається розплав представлені на рисунку 2.2 . і можуть бути класифіковані наступним порядком:

зона номер 1, h_1 – зазори радіальні між поверхнею плити в формі циліндра, та виступів кіл шестеренних зубів, кількість даних зазорів – два;

зона номер 2, h_2 – торцеві зазори між площиною шестеренних зубів, які знаходяться в зачепленні, та площинами плит верхньої та нижньої, даних зазорів два;

зона номер 3, h_3 – торцеві зазори в області, яка обмежується колами западин шестеренних зубів і поверхнею вала зі сторони зачеплення та радіусами, які проведені з центру шестеренного колеса в місця початку та закінчення радіального зазору зі сторони зачеплення, даних зазорів чотири;

зона номер 4, h_4 – торцеві зазори між шестеренними колесами та боковими пластинами насосу в зоні, яка обмежена колами виступів і колами впадин шестеренних зубів та радіусами, які проведені з центру колеса в точки початку та



1— втрати потоку через радіальні зазори; 2 — зона торцевих зазорів в міжзубному зачепленні; 3,4,5 — зони торцевих зазорів

Рисунок 2.2 – Структура потоків розплаву в шестеренному насосі кінця радіального зазору зі сторони протилежного полюсу зачеплення, даних зазорів чотири.

Зона номер 5, h_5 – торцеві зазори між шестеренними колесами та боковими пластинами насосу в області, яка обмежена колами впадин шестеренних зубів та поверхнею вала, та радіусами, які виходять з центру колеса в точки початку та кінця радіального зазору зі сторони протилежного полюсу зачеплення, даних зазорів чотири.

2.2 Математична модель процесу дозування в дозуючих насосах

Знеаходження головних величин процесів перенесення в ЧП та НШ потребує опису та аналізу гідродинамічної моделі процесу, яка є математичним моделюванням основних законів фізики: збереження маси, кількості руху та енергії.

Моделювання процесу дозування досить складне через те, що процес описується комбінацією при черв'ячній екструзії: перенесенням частини розплаву рухомою поверхнею відносно нерухомої і перенесення розплаву за рахунок градієнту тисків. При шестеренній екструзії окрім двох вищеназваних процесів додається дискретне перенесення маси міжзубними

впадинами шестеренних коліс. При чому напрямлення градієнтів дозування для прямої течії і протитечії в НШ не завжди співпадають. Тоді, фактичні об'ємні витрати Q_{ϕ} в червячному насосі можуть бути представлені рівнянням, м³/с:

$$Q_{\phi} = Q_{np} - Q_{nm} \quad (2.1)$$

А в шестеренному насосі рівнянням

$$Q_{\phi} = Q_T + Q_{np} \pm Q_{nm} \quad (2.2)$$

де Q_{np} – прямотечія, яка обумовлена в'язкістю розплава, м³/с;

Q_{nm} – протитечія, яка обумовлена градієнтом тиску, м³/с;

Q_T – об'ємна витрата (теоретична продуктивність), яка розраховується на основі теорії евольвентного зачеплення, м³/с.

До переліку необхідних формул для визначення теоретичної продуктивності НШ відноситься рівняння проф. Д. Тома [25], яка точна для зачеплення з боковим зазором у випадку повного використання рідиною об'єму, який є защемлений при ступені перекриття $\xi \geq 1$:

$$Q_m = 2\pi b n \left(R_g^2 - R^2 - \frac{t_0^2}{12} \right), \quad (2.3)$$

де b – ширина шестеренного колеса, м; R_g – радіус кола виступів шестерні, м; R – радіус основного кола, м; t_0 – крок зачеплення зубів по основному колу, м; n – частота обертання шестерень, с⁻¹.

Та для виконання високоякісного дозування, від якого залежність якості продукції зростає, необхідно враховувати об'ємні втрати продуктивності через зазори, величина якої залежить від насосу та його геометричних параметрів, від в'язкості розплаву і умови проведення процесу дозування.

2.3 Гідродинамічна модель дозування маси в дозуючих насосах

При знаходженні формул для розрахунку течії робочої рідини по каналах дозуючих червячного та шестеренного насосів приймаються наступні припущення:

- адіабатичний режим роботи, теплота ззовні не підводиться;
- зазори становлять однакові розміри висоти по довжині;
- рідина прилипає до поверхонь з якими контактує, тоді швидкість граничного шару рідини на поверхні робочих шестеренних коліс рівна коловій швидкості їх в заданій точці, в той час як на поверхні середніх та бокових плит її швидкість дорівнює нулю;
- рідина вважається однорідною та ізотропною;
- зазори між деталями, які переміщуються невеликі, тоді течія рідини в таких малих щілинах ламінарна, проте зазори одночасно і достатньої величини, щоб в них зберігались об'ємні якості рідини;
- дія сили тяжіння та сили інерції рідини, що перекачується знахтувана, отже вплив сил інерції менший, ніж з в'язкосними силами рідини;
- рух рідини усталений та однонаправлений.

Так як висота зазорів набагато менша інших геометричних розмірів, то для обрахунку течії рідини по зазору, який утворений двома паралельними стінками, одна з них переміщається в своїй площині зі швидкістю $\pm V_x$. Тоді можна використати плоско-паралельну модель руху рідини в прямокутній системі координат, рисунок 2.3.

Візьмемо до розгляду якийсь елементарно малий об'єм розплаву полімеру **а**. Силі, яка утворюється за рахунок дії перепаду тисків ΔP , починає протидіяти напруга зсуву τ , яка має вплив на нижню поверхню (площину) dx ; на верхній поверхні напруга зсуву діє в протилежному напрямку, так як шар рідини, що прилипає до даної поверхні, має швидкість, більшу, ніж дана частинка. Через зменшення градієнту швидкості напруження зсуву на верхній площині зсуву менше, ніж на нижній, на нескінченно малу величину.

Реальний профіль швидкостей поступального руху виникає в результаті додавання векторів в кожній точці швидкостей обох потоків. Епюри фактичного профілю швидкостей, що відповідають різним значенням потоку під тиском, приведені на рисунку 2.3.

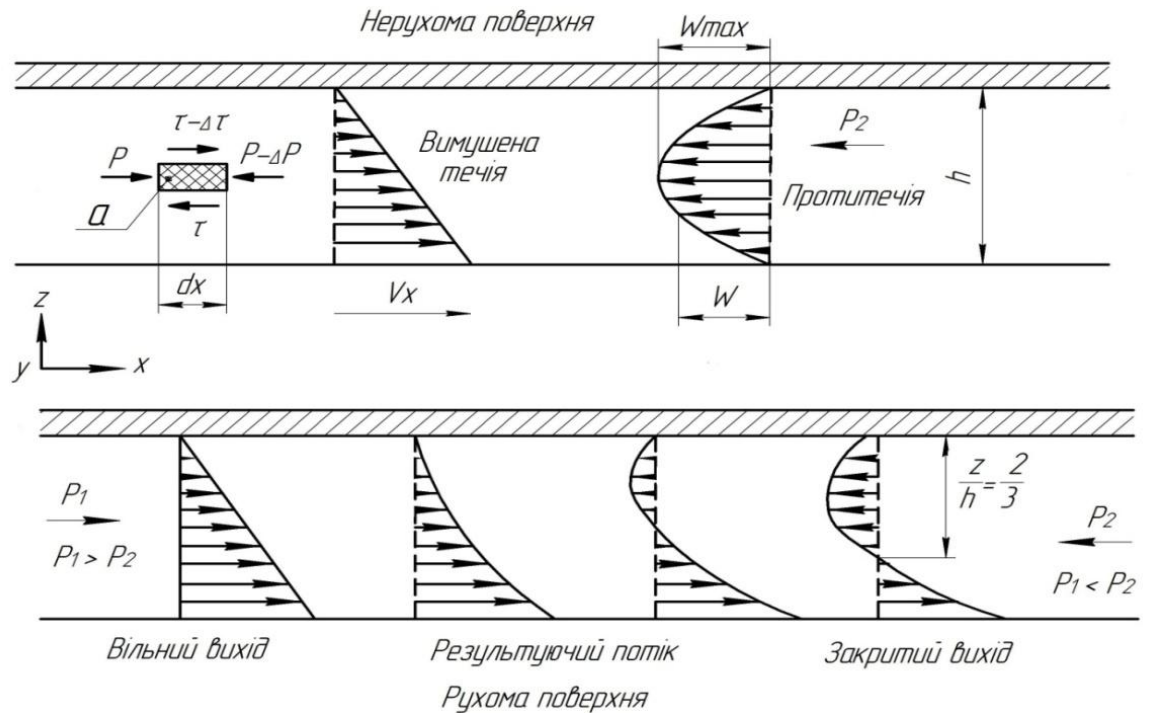


Рисунок 2.3 – Епюри профілів швидкості

Для сталого одновимірного руху реальної ізотропної нестискуваної рідини, рівняння Нав'є–Стокса, в напрямі вісі x можна записати в наступному вигляді [26]: Ліва частина даного рівняння представляє інерційні сили, а права – представляє гравітаційні, в'язкісні та сили тиску:

$$\rho \frac{\partial W_x}{\partial t} + \rho \left(W_x \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_y \frac{\partial W_x}{\partial y} + W_z \frac{\partial W_x}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}^i}{\partial z}, \quad (2.4)$$

Рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial W_x}{\partial x} = 0, \quad (2.5)$$

Тоді, ізотермічна течія рідини описується рівнянням руху (2.4 і нерозривності (2.5), в яких компоненти W_x , тиск P і компоненти напруги $\tau_{xx}^i, \tau_{xy}^i = \tau_{yx}^i, \tau_{xz}^i = \tau_{zx}^i$ невизначені, (виходячи з умов рівноваги моментів сил дотичні компоненти напруги попарно рівні).

Приймаючи до уваги, що сили в'язкості та тиску набагато більші за інерційні та сили тяжіння, якими можна нехтувати (2.4). Тоді, $W_y = 0$, $W_z = 0$, а найбільша зміна складової W_x відбувається по координаті z . В такому випадку найбільш суттєве значення має похідна $\frac{\partial W_x}{\partial z}$ і, відповідно, компонента тензора напруги τ_{zx}^i . Для подальшого розв'язку системи рівнянь необхідно додати реологічне рівняння:

$$\tau_{zx} = \mu(I_2, T_c) \frac{\partial W_x}{\partial z}; \quad (2.6)$$

де I_2 – другий тензор швидкостей деформації (девіатор) діагональні елементи якого описують деформацію елемента без зміни його об'єму і їх сума дорівнює нулю, причому, відмінним від нуля є тільки компонент $\gamma_x = \frac{\partial W_x}{\partial z}$.

Граничні умови:

$$\text{при } z = h \Rightarrow W_x = 0; \quad (2.7)$$

$$\text{при } z = 0 \Rightarrow W_x = \pm V_x. \quad (2.8)$$

де V_x – швидкість руху пластини в дозуючих насосах може бути величиною додатньою або від'ємною в залежності від того, чи співпадає напрям руху пластини з напрямом руху рідини чи протилежний йому (рис. 2.3).

Враховуючи, що в'язкість в межах елемента є константою, то визначати її необхідно за середнім для елемента значенням швидкості деформації $\gamma_x = \frac{\partial W_x}{\partial z}$, із середньою температурою T_c , рівняння руху в каналі приймає вигляд [27]:

$$\frac{\partial^2 W_x}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}. \quad (2.9)$$

Інтегруючи двічі по z рівняння (2.10), одержимо швидкість потоку рідини:

$$W_x = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{z^2}{2} + C_1 z + C_2. \quad (2.10)$$

Приймаємо, що нижня пластина переміщується зі швидкістю V_x відносно нерухомої верхньої пластини (рис. 2.3). Відповідно, тоді у вище приведених рівняннях, які описують рух рідини, необхідно врахувати вязкісне перенесення рідини рухомою пластиною.

Граничні умови у даному випадку:

$$\text{При } z = h \Rightarrow W_x = 0; \quad (2.11)$$

$$\text{При } z = 0 \Rightarrow W_x = \pm V_x. \quad (2.12)$$

Сталі інтегрування C_1 і C_2 , визначаються з граничних умов:

$$C_1 = \pm \frac{V_x}{h}; \quad (2.13)$$

$$C_2 = \pm \frac{V_x}{2} - \frac{1}{\mu} \frac{h^2}{8} \frac{\partial P}{\partial x}; \quad (2.14)$$

звідси

$$W_x = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) \frac{\partial P}{\partial x} \pm \frac{V_x z}{h} \pm \frac{V_x}{2}. \quad (2.15)$$

Після інтегрування по висоті каналу та необхідних перетворень, виведене рівняння описує об'ємні витоки розплаву в прямокутних каналах черв'ячного насосу, при умові, що $\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{P_1 - P_2}{L}$:

$$Q_\phi = b \cdot \int_0^h W_x dz = \frac{P_2 - P_1}{12\mu L} b h^3 \pm \frac{V_x b h}{2}. \quad (2.16)$$

Права частина рівняння (2.16) – це об'ємний видаток вимушеної течії під дією різниці тисків, а друга – об'ємний видаток за рахунок в'язкої складової.

У випадку шестеренного насосу враховуючи прийняту класифікацію, об'ємна продуктивність по всіх групах зазорів насоса може бути визначена за залежністю:

$$Q_\phi = \sum_{i=1}^{i=5} \left\{ \frac{P_2 - P_1}{12\mu_i L_i} b_i h_i^3 \pm \frac{V_{xi} b_i h_i}{2} \right\} \quad (2.17)$$

Тоді фактична об'ємна продуктивність шестеренного насосу визначається за рівнянням:

$$Q_{\phi} = Q_m - Q_{em} = 2\pi b n \left(R_B^2 - R^2 - \frac{t_0^2}{12} \right) - \sum_{i=1}^5 \left[\underbrace{\frac{P_1 - P_2}{12 \mu_i L_i} b_i h_i^3}_a \pm \underbrace{\frac{V_{xi} b_i h_i}{2}}_b \right] \quad (2.18)$$

де P_1, P_2 – тиски на вході і виході із насоса відповідно, Па;

V_{xi} – швидкість рухомої поверхні в i -му зазорі, м/с;

b – ширина шестерень, м;

b_i – ширина i -го зазору, м;

h_i – висота i -го зазору, м;

μ_i – середня в'язкість псевдопластичної рідини, яка залежить від швидкості зсуву та температури для i -ї групи зазорів і може бути визначена за законом Оствальда де Віля, Па с;

$$\mu = \left| \frac{\partial W_x}{\partial z} \right|^{n-1} \cdot k_0 \cdot \exp \left[-\frac{\beta \cdot (T - T_0)}{T_0 + 273} \right] \quad (2.19)$$

де k_0 – коефіцієнт консистентності при початковій температурі полімеру (T_0) на вході в зазор;

β – температурний коефіцієнт;

n – показник степеня реологічного рівняння;

L_i – середня довжина i -ї зони зазорів,

2.4 Порівняльна характеристика шестеренного та черв'ячного насосів при каскадній екструзії полімерів

В черв'ячних екструдерах зона гомогенізації та дозування побудовані таким чином, що для створення тиску фактично використовується в'язкісний гвинтовий насос (черв'ячний насос).

Одними із найважливіших параметрів при екструзії полімерів є тиск та продуктивність на виході з екструдера для визначення яких приймаються

відповідні припущення: плоско - щільовий канал, режим стаціонарний, ширина плоского каналу набагато більша його висоти.

В черв'ячному насосі перенесення маси обумовлюється перенесенням частини розплаву рухомою поверхнею відносно нерухомої за рахунок в'язкості(прямотечія), а також перенесенням частини розплаву за рахунок градієнту тисків(протитечія) .

Скористаємося вище наведеними припущеннями в розділі 2.3 та використаємо плоско-паралельну модель для математичного моделювання руху розплаву. Тоді продуктивність зони дозування з таким червячним в'язкісним насосом може бути визначена за формулою

$$G = \rho \left(\frac{V_z b h}{2} F_d - \frac{b h^3 \Delta P}{12 \mu L} F_p \right) \quad (2.20)$$

де b – ширина каналу;

h – глибина каналу;

μ – не ньютонівська в'язкість, яка залежить від швидкості зсуву та температури;

ΔP – різниця тисків на вході і виході із зони дозування;

L – середня довжина каналу зони;

F_d , F_p коефіцієнти які враховують гальмівну дію бокових стінок каналу черв'яка;

V_z – швидкість рухомої поверхні відносно нерухомої в плоско паралельній моделі руху рідини.

Перший член в правій частині рівняння (2.20) визначає об'ємний видаток розплаву обумовлений вимушеною течією без градієнту тиску вздовж вісі каналу (прямотечія). Другий член – це об'ємний видаток за рахунок течії розплаву під дією градієнта тиску (протитечія), тобто, при відсутності руху між шнеком і циліндром (нульова швидкість шнека) .

Таким чином, в рівнянні перший член характеризує величину продуктивності екструдера, а другий член – перемішуючу здатність зони дозування. Як видно із рівняння при збільшенні глибини каналу h протитечія

зростає швидше чим прямо течія, тому продуктивність знижується, а перемішуюча здатність зони дозування зростає .

З іншого боку протитечія є чутливою до коливань тиску в кінці зони дозування, що неминуче призводить до нестабільності продуктивності на виході з екструдера. Тому, щоб коливання продуктивності менше залежали від перепадів тиску в формуючому інструменті, більшість шнеків конструюються так, щоб в зоні дозування течія під дією градієнта тиску була відносно малою при одночасно достатній перемішуючій здатності. Взаємозалежність між прямо течією і протитечією пояснюється профілем швидкостей вздовж вісі каналу для різних значень градієнта тиску, які представлені на рисунку 2.6[5].

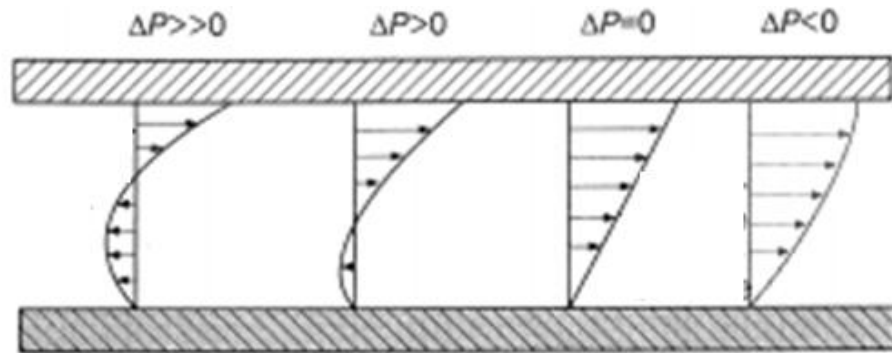


Рис. 2.6. Профілі швидкостей вздовж вісі каналу

Якщо градієнт тиску дорівнює нулю ($\Delta P=0$), то профіль швидкості лінійний і відповідає вимушеній в'язкій течії. Коли перепад тиску негативний ($\Delta P<0$), протитечія між шнеком і циліндром збільшує сумарну швидкість вимушеної течії. Коли перепад тиску позитивний ($\Delta P>0$), в зоні течії розплаву створюється тиск, і сумарна швидкість зменшується, а протитечія збільшується покращуючи перемішування. В випадку якщо градієнт тиску значно більший нуля ($\Delta P>>0$), то продуктивність дорівнює нулю, і полімер циркулює в екструдері, це означає що екструдер має закритий вихід, а протитечія дорівнює прямо течії з максимальним перемішуючим ефектом.

Таким чином, значні коливання тиску призводять до коливань об'ємного видатку протитечії , а відповідно, і до коливань загальної продуктивності, які і диктують завищені допуски на геометричні розміри, що

призводить до перевитрати сировини та енергії, яка витрачається на її перероблення.

Рішеннями проблеми може бути вдосконалення процесу дозування іншим пристроєм, продуктивність якого менш чутлива до коливань тиску як на вході так і на виході з пристрою. Останнім часом все частіше для процесів дозування використовують об'ємний шестеренний насос характерною відзнакою якого є високий внутрішній гідравлічний опір. При використанні такого насосу, особливу увагу необхідно приділяти обертам насоса та тиску на вході, які повинні забезпечити повне заповнення міжзубних впадин. Величина зазорів між рухомими та нерухомими поверхнями в шестеренному насосі, після певних спрощень теж може бути представлено, як плоско-щільові канали по яких частина розплаву повертається на вхід насосу, змащуючи поверхні тертя. Продуктивність такого насосу може бути розрахована за залежністю

$$G = 2\pi v n \rho (R_e^2 - R^2 - \frac{t_0^2}{12}) - \rho (\frac{\Delta P}{12\mu L} b h^3 \pm \frac{V b h}{2}) \quad (2.21)$$

де v – ширина шестерні;

R_e – радіус кола виступів шестерні;

R – радіус основного кола;

t_0 – крок зачеплення зубів по основному колу;

n – число обертів шестерні.

V – швидкість рухомої поверхні відносно нерухомої;

b – ширина зазору;

h – висота зазору;

ΔP – різниця тисків на вході і виході в шестеренному насосі;

L – середня довжина зазору;

μ – неньютонівська в'язкість, яка залежить від температури та швидкості зсуву.

В наведеному виразі перша складова відображає теоретичну продуктивність шестеренного насосу, яка розраховується на основі теорії

евольвентного зачеплення, або ж це паспортні дані заводу виробника насосу. Друга і третя складові відображають сумарні витоки через зазори між рухомими та нерухомими поверхнями шестеренного насосу.

В нових насосах фактична продуктивність складає 90-95% від розрахункової. Якщо продуктивність насосу знижується до 80%, то необхідно контролювати процес зношування поверхонь тертя, а якщо продуктивність падає до 70%, то слід подумати про його заміну, так як його подальше використання не призводить до очікуваної економії сировини та енергії.

Відомо, що витоки через будь який канал прямо пропорційні перепаду тисків і обернено пропорційні його гідравлічному опору $R_{гидр}$, який залежить від в'язкості рідини та розмірів каналу. Тому для черв'ячного та шестеренного насосів витоки та їх коливання за рахунок перепаду тисків можуть бути представлені в обох випадках залежністю:

$$G_{пот} = \rho \frac{\Delta P}{R_{гидр}} = \rho \frac{\Delta P}{12\mu L / bh^3} \quad (2.22)$$

Приймаючи до уваги, що висота каналу h в зоні дозування черв'ячного екструдера складає 5–8 мм, а в шестеренному насосі висота зазорів складає $(50–100) \cdot 10^{-3}$ мм, при приблизно однаковій загальній ширині та довжині каналів. До того ж доля протитечії в черв'ячному насосі відноситься до всього видатку насоса, а в шестеренному насосі тільки до його частини, яка складає не більше 10% від загальної продуктивності екструдера. Тому гідравлічний опір шестеренного насосу в рази більший, ніж в черв'ячному, тобто, шестеренний насос практично не чутливий до коливань тиску як на вході так виході з насосу, забезпечуючи стабілізацію продуктивності на виході екструдера [30].

Характеристика впливу коливань тиску та продуктивності на товщину стінки труби при використанні традиційного екструдера з черв'ячним насосом та того ж екструдера оснащеного шестеренним насосом показано на рисунку 2, де в якості прикладу приведена поліпропіленова труба, діаметром

32 мм з номінальною товщиною стінки 3,6 мм та максимальним додатнім допуском 0,6 мм.

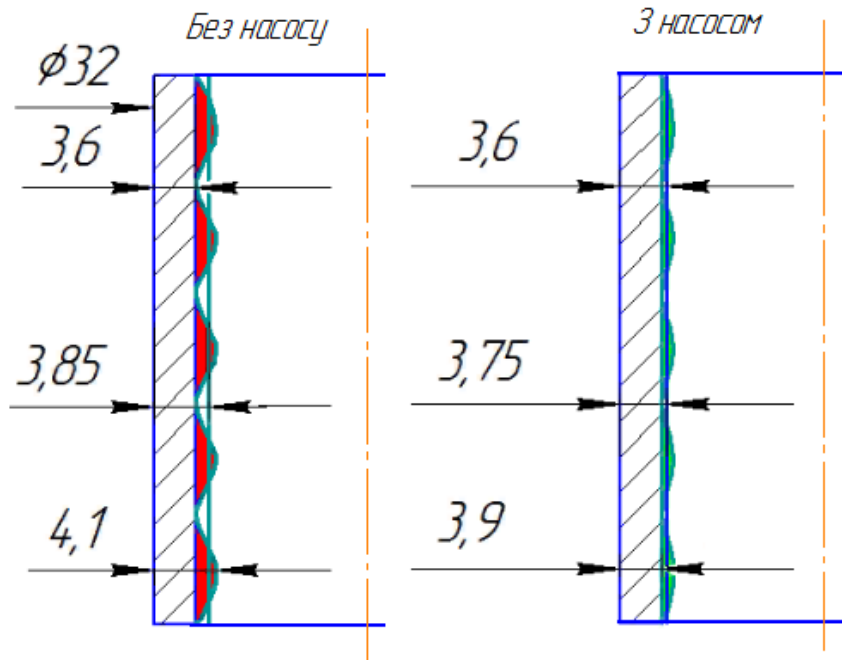


Рисунок 2.7 – Коливання товщини стінки труби

З рисунку видно, що використання шестеренного насоса дозволяє зменшити середню товщину стінки на 4%, що дає змогу економити сировину та енергію.

2.5 Висновки

1. Розроблено фізичну модель процесів перенесення в дозуючих червячному та шестеренному насосах.
2. Створено математичну модель процесів перенесення в червячному та шестеренному насосах розв'язок яких дозволяє розраховувати продуктивність, та її коливання в червоному та шестеренному насосах. Математична модель побудована з використанням плоско-паралельної моделі та враховує теплофізичні властивості полімерного розплаву.
3. Приведена порівняльна характеристика насосів із якої видно, що використання НШ може забезпечити кращу стабілізацію тиску та продуктивності та відповідно зменшення допусків на геометричні розміри з

економією сировини та енергії, що і є економічною підставою для використання шестеренного насосу при дозуванні розплавів полімерів.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Мета та задачі експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є перевірка математичної моделі на адекватність та порівняння параметрів ЕКДШ і ЕКДЧ. Для вирішення поставленої задачі була створена експериментальна установка на базі дискового екструдера, який використовується в якості розплавлювача-гомогенізатора та двох вузлів для створення тиску та дозування. Перший у вигляді дозуючого шестеренного насосу, а другий у вигляді дозуючого черв'ячного насосу. Всі пристрої були укомплектовані вимірювальними пристроями та блоками керування.

Задачею експериментальних досліджень є визначення продуктивності та її коливання з використанням шестеренного та черв'ячного насосів.

3.2 Методика проведення експериментальних досліджень

Беремо до уваги, що каскадний екструдер з дозуючими насосами відрізняється з новітніми аналогами серед обладнання та відсутності досвіду його використання, то робота з його дослідження виконувалась в наступній хронології.

В першу чергу визначались залежність продуктивності живильника від частоти обертання шнека, гранулометричного складу сировини, стабільність живлення, питомі енерговитрати. При одночасній роботі дискового екструдера та живильника визначалась частота обертання диска, величина робочих зазорів, споживана потужність, температура розплаву, температурні профілі диска і корпусу розплавлювача і залежності від продуктивності та перероблюваних матеріалів.

В другочергу після приєднання до дискового екструдера дозуючих шестеренного або черв'ячного насосів визначались режими сумісної роботи дозатора сировини, дискового екструдера та дозуючого насосу. Сталість

режимів роботи визначалась по сталим температурах, споживаній потужності та тиску відповідно для кожного з пристроїв. По результатах досліджень розроблялись номограми, які дозволяли оперативно вибирати раціональні режими сумісної роботи пристроїв каскадного екструдера.

В останню чергу при дослідженні параметрів шестеренного та червячного насосів вимірювались частота обертів робочих органів пристроїв, продуктивність та її коливання, тиск, температури розплаву на вході та виході з насосів. При цьому витримувався наступний порядок проведення експериментів. Встановлювалась необхідна частота обертання диска та шнека живильника. Далі пересуванням корпусу вздовж вісі встановлювали кількість обертів диску, далі налаштовували тиск на вході в насоси в межах 7 МПа. Температура розплаву на вході та виході були основними характеристиками та їх співпадіння з цими ж характеристиками, отриманими на другій черзі, говорило про подібний режим роботи розплавлювача–гомогенізатора.

3.2.1 Вимірювання продуктивності, частоти обертання, величини робочих зазорів та тиску

Замірювання продуктивності машини робилось ваговим методом. Шляхом зважування кількості полімерного матеріалу, розплаву або готової одиниці, отриманих інтервал часу.

Проміжки часу відбору матеріалу замірлися стрілковим 30-секундним секундоміром «51СП» (шкала 15 хв, похибка показів $\pm 0,4$ сек.).

За отриманими результатами відповідних замірів продуктивність машини визначалась за формулою:

$$G = \frac{k \cdot \bar{g}}{\Delta t}, \quad (3.1)$$

де $\bar{g}$ - маса розплаву, що видає екструдер, кг;

Δt - інтервал відбору проби, с;

k - коефіцієнт перетворення величин.

Маса визначалась на вагомірі ТВЕ-2,1-0,01 гр. Похибка вимірювання маси склала не більше 2,5 %.

Частоти обертання робочих органів пристроїв: шнека живильника, диска та шестерень чи черв'яка вимірювались тахометром типу Walcom DT-6236В. Похибка вимірювання склала не більше 2 %.

Робочі зазори вимірювались за допомогою спеціальних каліброваних щупів в діапазоні 1-10 мм. Похибка складала не більше 2 %.

Тиск на виході дискового екструдера та після черв'ячного або шестеренного насосів вимірювався мембранним манометром МТ-2У-М клас точності 1, шкала 0-10 МПа, ціна поділки 0,1 МПа. Похибка вимірювання тиску склала не більше 3 %.

3.2.2 Вимірювання та регулювання температури робочих органів та розплаву полімеру

Температура розплавлювача замірялась термопарами типу ТХК-529 та ТХК-539 (градуювання ХК, показник теплової інерції не більше 5 с, діапазон вимірювання температур 0-400 °С) до комплекту з мілівольтметрами типу МР64-03 ІІІ градуювання ХК зі шкалою 0-300 °С, клас точності 1,5.

Температура розплаву на виході з дискового розплавлювача та дозуючих насосів визначалась термопарами ТХК-0671, ТХК-0871, ТХК-0971 (градуювання ХК, показник теплової інерції не більше 4с, діапазон вимірювання температури 0-400 °С, арматура розрахована на тиск $650 \cdot 10^3$ Па) з мілівольтметром МПП-152 (градуювання ХК, шкала 0-300 °С, клас точності 0,5).

З необхідністю зменшення похибок, які можуть виникати при використанні термопар дотримувались відповіді правила їх налаштування та використання. Похибка вимірювання температури у початковому діапазоні (50-250 °С) склала не більше 3%.

3.4 Опис експериментальної установки

Каскадні екструдери рисунки. 3.2–3.4, складаються з шнекового дозатор 1, дискового екструдера 2 і нагнітального дозуючого насосу 3. Особливістю таких каскадних екструдерів є те, що всі три пристрої оснащені приводами 5,6,7 з можливістю регулювання обертів робочих органів, а також те, що між дисковим екструдером і дозуючими насосами встановлено компенсатор 4, який маючи зворотній зв'язок із приводом дозатора узгоджує продуктивності дозатора дискового екструдера та дозуючих насосів. Перероблюваний полімер з бункера потрапляє в завантажувальну горловину 9 дискового розплавлювача-гомогенізатора, де він захоплюється багатозахідною гвинтовою нарізкою завантажувально-пластикувальної зони і розігрівається за рахунок перетворення механічної енергії в теплову (дисипація). Далі у вигляді напіврозплаву полімер надходить у торцевий робочий зазор 8 дискового екструдера, де завершується плавлення полімеру і його гомогенізація. Під дією тиску, що забезпечується завантажувально-пластикувальною зоною та ефектом Вайссенберга, розплав заповнює западини шестеренного, або червячного насосів, які під час обертання надають сталу продуктивність і тиск, який необхідний для його подолання гідравлічного опору формуючого інструменту 10. В результаті попередньо проведених досліджень роботи дискового екструдера з дозуючими насосами була створена експериментальна установка, схема та загальний вигляд якої представлені на рисунку 3.3. та 3.5.

У таблиці 3.1 надані технічні параметри каскадного екструдера.

Для отримання виробів високої якості необхідно, щоб робота екструдера і процеси, які проходять в ньому, були стабільними і протікали в оптимальному режимі. Однак, практично це важко реалізується через ряд факторів від яких залежать продуктивність екструдера і якість екструдата.

Дослідження по визначенню коливань продуктивності, жорсткості напірної характеристики, зростання температури та питомих витратах енергії проводились на вище приведених установках.

Таблиця 3.1 – Технічні параметри експериментального екструдера каскадного.

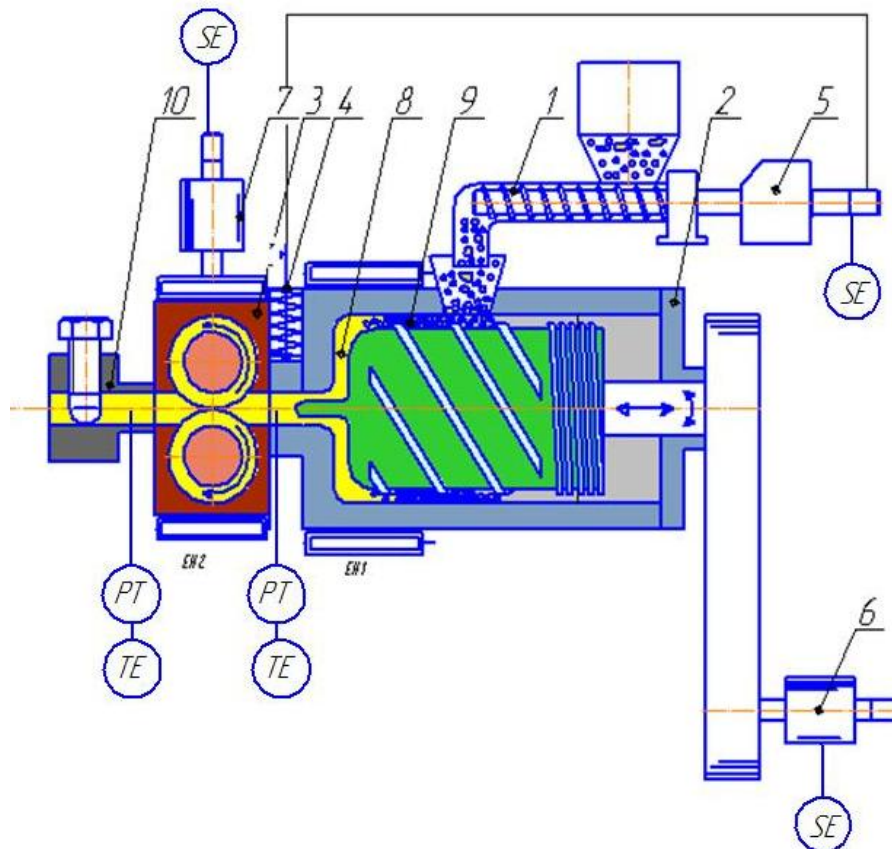
Найменування параметра	Показник
Перероблюваний матеріал	Поліетилен низького тиску марки 27303-003
Максимальна продуктивність лінії, кг/год	30
Діаметр диска, мм	185
Частота обертів диска об/хв.	15-175
Діапазони регулювання робочого зазору, мм	0,5-5
Тиск на виході дискового екструдера, МПа	2–7
Потужність шнекового дозатора	0,2
Потужність дискового екструдера	7,0

Таблиця 3.2 - Технічні параметри шестеренного насосу

Найменування параметра	Показник
Тиск на вході, Мпа	5–7
Тиск на виході, Мпа	15–26
Встановлена потужність, кВт	2,02
Частота обертів шестерень об/хв	0-40
Кількість шестеренних коліс	2
Модуль зачеплення, m	3,5
Кількість зубів, z	16
Ширина зуба, мм	24

Таблиця 3.3 – Технічні параметри черв'ячного насосу

Найменування параметра	Показник
Тиск на вході, Мпа	5–7
Тиск на виході, Мпа	15–26
Діаметр шнека, мм	90
Частота обертів шнека об/хв.	13-138
Відношення довжини робочого органу до діаметру	5:1



1-шнековий дозатор, 2-дисковий екструдер, 3-шестеренний насос, 4-компенсатор, 5,6,7-приводи обертових органів каскадного екструдера, 8-торцевий робочий зазор, 9-завантажувально – пластикувальна зона, 10-дроселюючий пристрій

Рисунок 3.2 - Схема каскадного дисково-шестеренного екструдера[32]

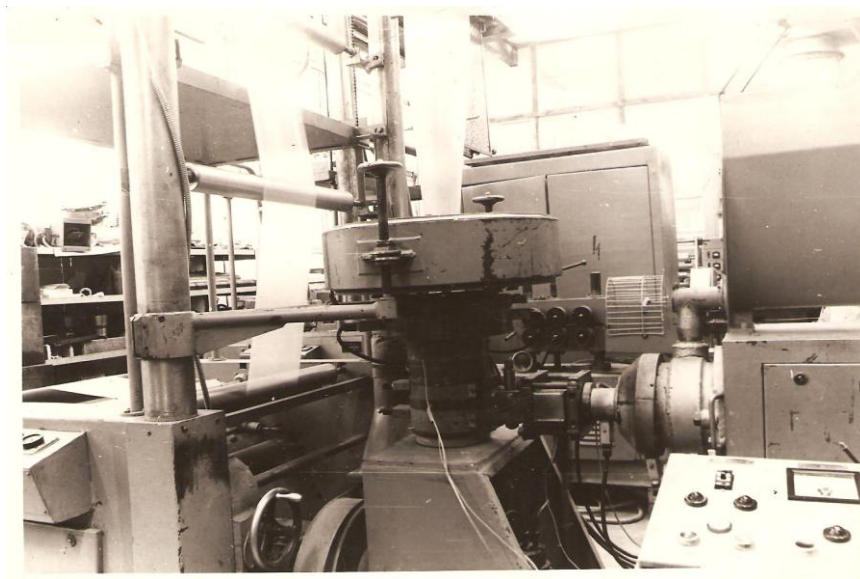
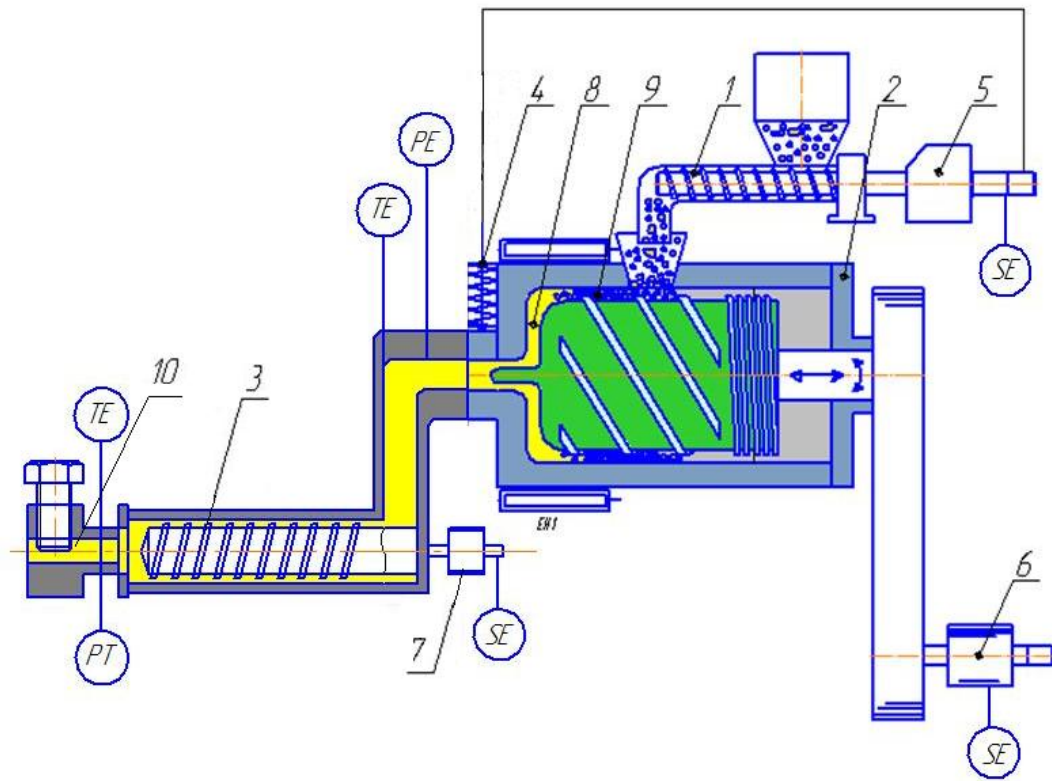


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд каскадного дисково-шестеренного екструдера



1-шнековий дозатор, 2-дисковий екструдер, 3-черв'ячний насос, 4-компенсатор, 5,6,7-приводи обертових органів каскадного екструдера, 8-торцевий робочий зазор, 9-завантажувально – пластикувальна зона, 10-дроселюючий пристрій

Рисунок 3.4 - Схема каскадного дисково-черв'ячного екструдера [33]

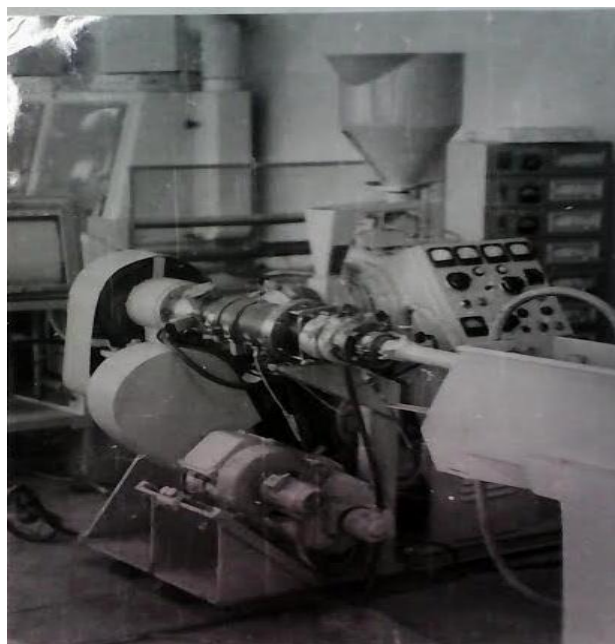


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд каскадного дисково-черв'ячного екструдера

3.5 Матеріали, що досліджувалися та їх властивості

При виборі матеріалу для дослідження схилялись до таких міркувань: матеріал має широко використовуватися в промисловості.

Тоді, в якості модельного середовища під час проведення експериментальних робіт, був використаний Поліетилен низького тиску марки 27303-003 [34].

Основні фізико-механічні, теплофізичні і реологічні характеристики поліетилену визначалися за [35, 36] і в лабораторних умовах з використанням капілярного віскозіметра ІРТ–3 та приведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Основні фізико–механічні і теплофізичні характеристики матеріалу

Найменування параметра	Показник
Щільність при 20°C, кг/м ³	940–950
Руйнуюча напруга, МН/м ² : – розтягнення – вигин	9,8–16,7 11,8–16,7
Відносне подовження при розтягуванні, %	500–600
Модуль пружності при розтягуванні, МН/м ²	147–245
Модуль пружності при вигині, МН/м ²	118–225
Твердість по Бріннелю, МН/м ²	13,7–24,5
Температура плавлення, °C	105–108
Питома теплоємність при 25°C, кДж/(кг·°C)	1,9–2,5
Теплопровідність, Вт/(м·K)	0,29
Тангенс кута діелектричних втрат при 10 Гц и 20°C	(2–3)·10 ⁻⁴
Насипна щільність гранульованого матеріалу, кг/м ³	520
В'язкість при 180°C, Па·с	1300
Текучість розплаву при 180°C, г/10 хв	3

3.6 Дослідження продуктивності шестеренного та червячного насосів від тиску

Дослідження впливу тиску на продуктивність та її коливання, які проводилась на каскадному дисково–шестеренному і на каскадному дисково–черв'ячному екструдерах, де в якості дозатора розплаву та створювача тиску використовувались шестеренний насос та черв'ячний прес наведено на рисунку 3.6, з аналізу якого зрозуміло, що при зміні тиску від 14

до 26 МПа в дисково-шестеренному екструдері продуктивність зменшилась на 10 %, а в черв'ячно-шестеренному на 33%.

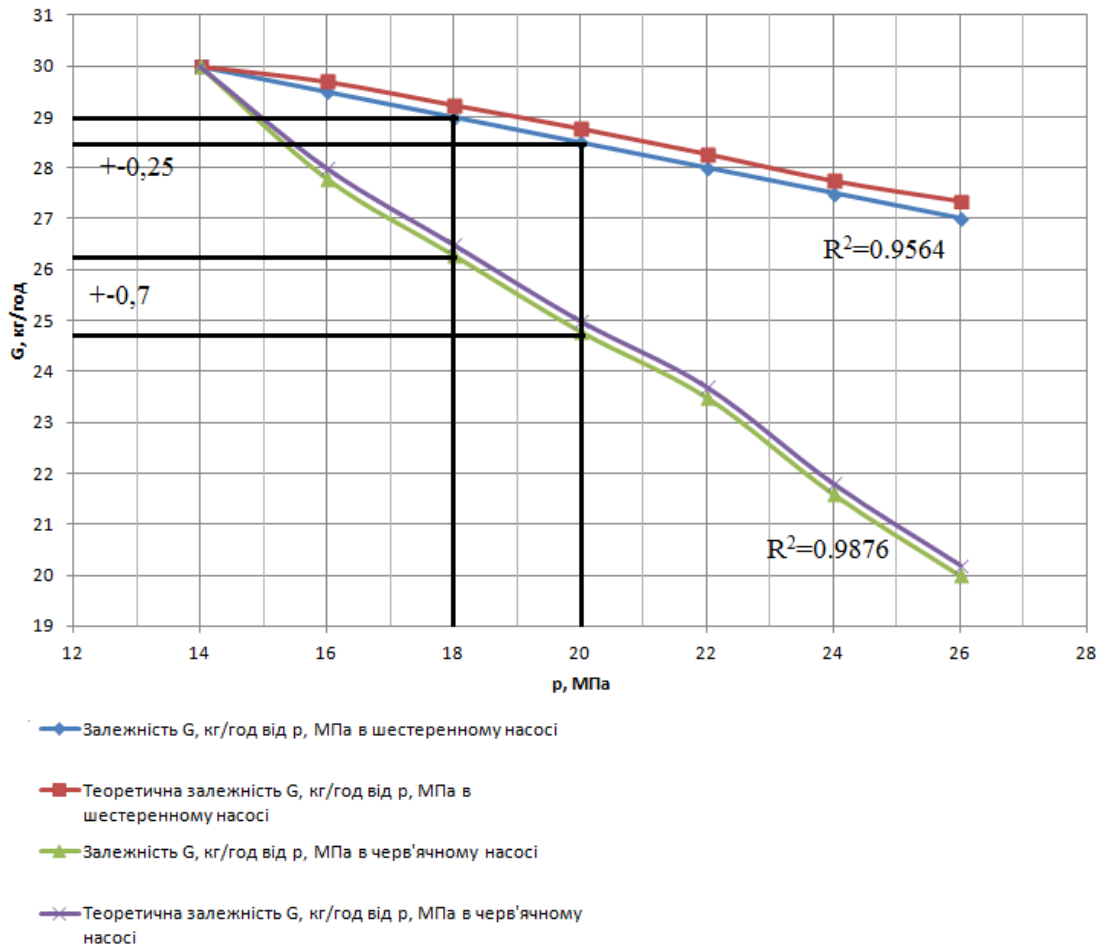


Рисунок 3.6 – Залежність продуктивності від тиску в шестеренному та черв'ячному насосах (ПНТ марки 27303-003, $P_1 = 7$ МПа,

$$T = 200^{\circ}\text{C}, n = \text{const})$$

Це означає, що при зміні тиску в формуючому інструменті в межах $\Delta P = 19 \pm 1$ МПа при дисково-шестеренній екструзії коливання продуктивності складатимуть $\pm 0,25$ кг/год, що підтверджують і теоретичні розрахунки.

Також коливання значень продуктивності в даному діапазоні при дисково-червячній екструзії являють $\pm 0,7$ кг/год, що в три рази перевищує попередній варіант. Таким чином, при номінальній продуктивності в 30 кг/год в дисково-черв'ячному екструдері необхідно приймати продуктивність на 3 % більше, тобто 30,9 кг/год, а на дисково-шестеренному екструдері тільки на 1 % більше, тобто 30,4 кг/год.

3.6.1 Дослідження підвищення температури розплаву та продуктивності в шестеренному та черв'ячному насосах

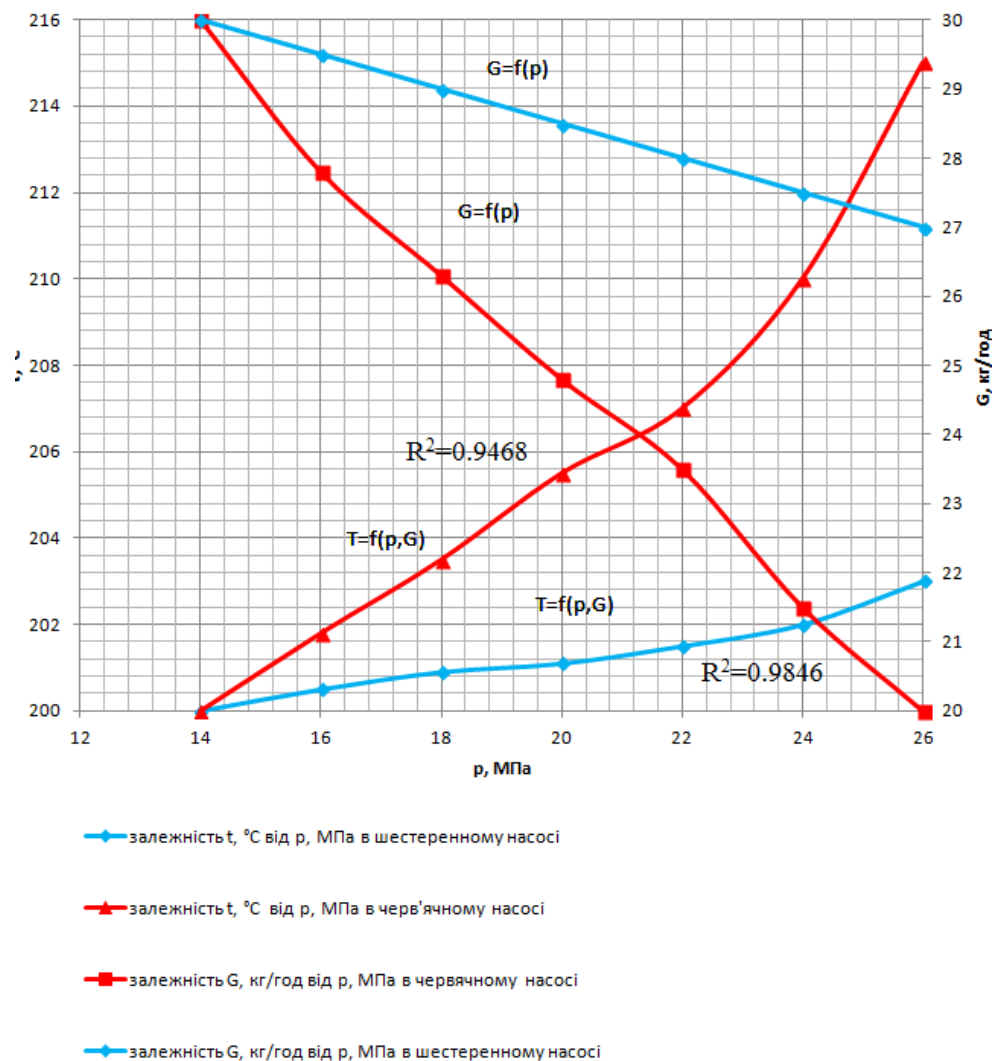


Рисунок 3.8– Залежність температури розплаву та продуктивності від тиску в черв'ячному та шестеренному насосах (ПНТ марки 27303-003, $n = \text{const}$)

Дослідження підвищення температури розплаву в дисково-шестеренному та дисково-черв'ячному екструдерах приведені на рисунку 3.8. Так, в діапазоні тиску від 14 до 26 МПа при дисково-шестеренній екструзії температура зростала на 3 °C, від 200 до 203 °C, а при дисково-червячній екструзії на 15 °C, від 200 до 215 °C, що в 4 рази більше, ніж за енергоефективним способом.

Отже, отримані результати підтверджують положення фізико–математичної моделі, а аналіз теоретичних та експериментальних даних дає змогу зробити висновок, що їх розбіжність не перевищує 14 %.

3.7 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Сучасний розвиток науки та техніки приносить принципові нововведення у всі сфери матеріального виробництва, суттєво змінюючи технологічні процеси та матеріали що використовуються, предмети та знаряддя праці. В свою чергу зміни технології та устаткування призводять до трансформації умов праці та трудового процесу в цілому. Тому при розробці нової техніки, технологічних процесів, організації виробництва необхідно провести науковий аналіз можливих небезпечних та шкідливих виробничих факторів та розробити заходи і засоби, спрямовані на мінімізацію їх несприятливого впливу на працюючу людину.

Темою магістерської дисертації є «Процес дозування при каскадній екструзії полімерів». Контроль параметрів технологічного процесу здійснює оператор лінії, пульт якого знаходиться в виробничому приміщенні, площею 200 м² і об'ємом 1200 м³. При обслуговуванні лінії можуть виникнути наступні шкідливі та небезпечні виробничі фактори:

- пожежна безпека;
- безпека ураження електричним струмом;
- виробничий шум та вібрації;
- безпека впливу елементів устаткування нагрітих до високих температур;
- повітря робочої зони.
- вплив деталей, що рухаються і обертаються, механізмів і матеріалів.

3.7.1 Небезпека ураження 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 безпекою [37]. Для живлення

елементів установки використовується трифазна напруга 220/380 В з частотою 50 Гц з ізольованою нейтраллю, 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.

Оскільки для роботи лінії використовується напруга 220/380 В частотою 50Гц, то використовуємо трьохфазну мережу з ізольованою нейтраллю.

Засоби забезпечення електробезпеки:

а) в робочому режимі:

- забезпечено недосяжність струмоведучих частин (ізоляція, розташування на недосяжній висоті, більш 2,5 м., огорожа);
- подвійна ізоляція;
- блокування небезпеки (пристрої, які запобігають потраплянню людей під напругу)
- орієнтація в електроустановках, (маркування, надписи, позначення, таблиці, попереджувальні сигнали, світлова сигналізація);
- все електрообладнання надійно заземлено згідно ГОСТ 12.1.030-81 та показано на рисунку 3.9;

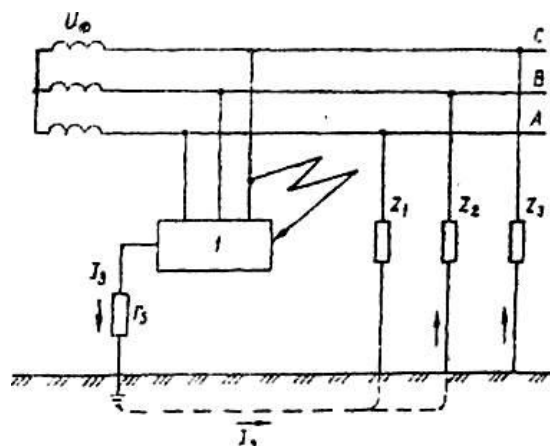


Рисунок 3.9 – Схема заземлення

б) в аварійному режимі:

- захисне заземлення, опір якого 3,5 Ом, відповідно ГОСТ 12.1.030 – 86 .

Забезпечення електробезпеки при експлуатації апаратів для даної лінії є дуже важливим чинником, знижує смертність та травматизм серед обслуговуючого персоналу в виробничих умовах.

Всі заходи проведені згідно ГОСТ 12.1.030 – 86.

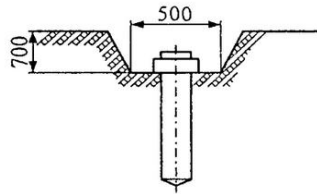


Рис. 3.2.2 – установка вертикального заземлення в траншеї

Вертикальні заземлювачі з'єднуються сталевюю смугою, яка приварюється до кожного заземлювача.

Розрахунок заземлення зводиться до визначення числа заземлювачів і довжини сполучної смуги виходячи з допустимого опору заземлення.

Початкові дані

1. Виконання мережі – з ізолюованою нейтраллю. Тип заземлюваного пристрою – вертикальні сталеві труби з розмірами:

$l_B = 3\text{ м}$; $d_B = 0,35\text{ м}$; товщина стінки - $\delta = 3,5\text{ мм}$; відстань між вертикальними заземлювачами $a = 3\text{ м}$; глибина закладання заземлювачів - $H_0 = 0,7\text{ м}$; $B_C = 40\text{ мм}$.

2. Грунт – глина; склад – однорідний; вологість - мала. Кліматична зона – III.

Розв'язок:

1. Визначаємо R_D – допустиме (нормативне значення опору розтікання струму в заземлюваному пристрої. Згідно з ПУЕ, $R_D \leq 4\text{ Ом}$.

2. Визначаємо розрахунковий питомий опір глини для III кліматичної зони:

$$\begin{aligned}
r_{розр} &= r_{табл} \cdot K_c \\
r_{табл} &= 60 \text{ Ом} \cdot \text{М} \\
K_c &= 3,5 \\
r_{розр} &= 60 \cdot 1,5 = 90 \text{ Ом} \cdot \text{М}
\end{aligned}
\tag{3.6}$$

3. Визначаємо H – відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача

$$H = H_0 + \frac{l_B}{2} = 0,7 + \frac{3}{2} = 2,2 \text{ м} \tag{3.7}$$

4. Визначаємо опір розтікання струму в одному вертикальному заземлювачі:

$$\begin{aligned}
R_B &= 0,366 \cdot \frac{\rho_{розр}}{l_B} \left(\lg \frac{2 \cdot l_B}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot H + l_B}{4 \cdot H - l_B} \right); \\
R_B &= 0,366 \cdot \frac{90}{3} \left(\lg \frac{2 \cdot 3}{0,035} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 2,2 + 3}{4 \cdot 2,2 - 3} \right); \\
R_B &= 26,4 \text{ Ом}
\end{aligned}
\tag{3.8}$$

5. Визначаємо орієнтовну кількість вертикальних заземлювачів при $\eta_e = 1$:

$$\eta_{op} = \frac{R_B}{R_0 \cdot \eta_B} = \frac{26,4}{4 \cdot 1} = 6,6; \tag{3.9}$$

Приймаємо $\eta_{op} = 7$ шт.

6. Визначаємо коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів η_B . Заземлювачі розташовані в ряд, приймаємо $\eta_B = 0,7$.

7. Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів з врахуванням коефіцієнта використання:

$$\eta_B = \eta_{op} / \eta_B = 7 / 0,7 = 9,9. \tag{3.10}$$

Приймаємо $n = 10$ шт.

8. Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму у вертикальних заземлювачах при $n = 10$ шт без врахування з'єднувальної стрічки:

$$R_{розр.в.} = \frac{R_B}{n \cdot \eta_B} = \frac{26,4}{10 \cdot 0,7} = 3,8 \text{ Ом} \tag{3.11}$$

9. Визначаємо довжину з'єднувальної стрічки:

$$L_c = 1,05 - a \cdot (n - 1) = 1,05 - 3 - 10 = 3,8 \text{ Ом.} \quad (3.12)$$

10. Визначаємо опір розтікання струму:

$$R_r = 0,366 \cdot \frac{90}{31,5} \cdot \lg \frac{2 \cdot (31,5)^2}{0,7 \cdot 0,04} = 5,48 \text{ Ом} \quad (3.13)$$

11. Приймаємо коефіцієнт використання вертикального заземлювача $\eta_r = 0,56$.

12. Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі з врахуванням η_r :

$$R_{розр.г.} = \frac{R_r}{\eta_r} = \frac{5,48}{0,56} = 9,8 \text{ Ом} \quad (3.14)$$

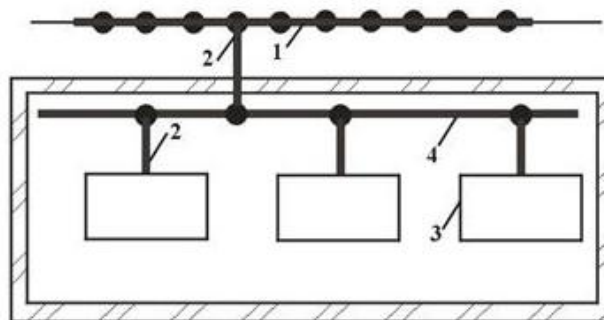
13. Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму заземлювального пристрою:

$$R_{розр.} = \frac{R_{розр.в.} \cdot R_{розр.г.}}{R_{розр.в.} + R_{розр.г.}} = \frac{3,8 \cdot 9,8}{3,8 + 9,8} = 2,7 \text{ Ом.} \quad (3.15)$$

Отриманий розрахунковий опір розтікання струму відповідає вимогам ГОСТ 12.1.030-82.

14. Вибираємо матеріал та поперечний перетин з'єднувальних провідників і магістральної шини. Приймаємо сталеву шину товщиною $\delta = 4 \text{ мм}$ і перетином 100 мм^2 .

Схема з'єднування обладнання з магістральною шиною та з'єднання магістральної шини з заземлювальним пристроєм наведена на рис. 3.10



1 – заземлюючий пристрій, 2 – заземлюючі провідники; 3 – обладнання, що заземлюється, 4 – внутрішня магістраль заземлення.

Рис. 3.10 Схема захисного заземлення:

В даному випадку використовується електромагнітне блокування. Електромагнітне блокування дозволяє виключити можливість виникнення небезпечних ситуацій: включення або відключення роз'єднувача під навантаженням, включення заземлюючих ножів на частину лінії під навантаженням, подачу навантаження на заземлену частину лінії. Виконується таке блокування за допомогою однакових по конструкції електромагнітних замків і одного електромагнітного ключа.

Всі заходи проведені згідно ГОСТ 12.1.030 – 86.

3.7.2. Повітря робочої зони

Умови роботи на розроблюваному екструдері та лінії в цілому за ГОСТ 12.1.005-88 відносяться до категорії середньої тяжкості (енерговитрати 150...200 ккал/год) [38].

Склад повітря робочої зони залежить від параметрів метеорологічних умов: температури, відносної вологості, а також кількості шкідливих речовин, що виділяються машиною при плавленні поліетилену. При цьому при температурі 150 °С виділяється окис вуглецю, альдегіди, ефіри та інші токсичні речовини. Гранично допустима концентрація (ГДК) для окису вуглецю становить 20 мг/м³, для альдегідів – 8 мг/м³.

Для безпосереднього відводу шкідливого повітря чи газів, від місця їх виникнення чи виділення, під головкою дискового екструдера встановлюється вентиляційний ковпак закритого типу з фільтром продуктивністю 360 м³/год.

Для забезпечення безпеки робітників видалення шкідливостей супроводжується подальшим очищенням повітря.

Температура повітря в робочій зоні, вміст шкідливих домішок для забезпечення безпеки відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», які наведені в таблиці 3.5:[39]

Таблиця 3.5 - Параметри метеорологічних умов.

Параметри	Допустимі		Фактичні	
	Теплий	холодний	теплий	холодний
Температура t°C	20-24	17-24	20-23	18-22
Відносна вологість W, %	До 75	До 75	40-70	До 75
Швидкість руху повітря V, м/с	0,3	0,2	0,3	0,2

3.7.3 Виробничий шум та віброзахист.

Шум, який створюється при роботі екструдера та іншого устаткування лінії, непостійний. Основними джерелами шуму при роботі є вали та черв'яки, що обертаються, електродвигуни, вентилятори та інше устаткування, в яких шум досягає 90 дБА. Зони з рівнем шуму більше 80 дБА позначені знаками безпеки й у таких зонах допускається працювати тільки в засобах індивідуального захисту, згідно з ГОСТ 12.4.051-87, які знижують шум до 20-22 дБА [40-41].

Заходи по зниженню шуму:

Зниження шуму досягається шляхом шумопоглинання. Для цього використовують облицювання з перфорованим покриттям та плити. Щоб досягнути максимального ефекту використання шумопоглинаючого покриття, вкриваємо ним не менше 60% внутрішньої площі. Вихлопні патрубки насосів з'єднані з герметичним каналом, який забезпечує ізоляцію шума вихлопа.

Звукоізолююча здатність дверного проїому приміщення є не нижче 30 дБА.

Стіни і перекриття цього приміщення забезпечені звукоізолюючим облицюванням з коефіцієнтом звукопоглинання не нижче 0,7 і мають звукоізолюючу здатність не нижче 50 дБА, згідно ДСН 3.3.6.037-99

Для зменшення шуму елементів, що обертаються, необхідно слідкувати за рівнем мастила в підшипникових вузлах. Мікрофон при

вимірюванні рівня звуку встановлено на висоті 1,5-1,8 м від полу. Ці заходи дозволили знизити рівень шуму до 60 дБА.

Вібрація може спричинювати стійкі порушення фізіологічних функцій організму людини, тому зменшення вібрації до безпечних параметрів є досить відповідальним завданням. Вібробезпечні умови праці забезпечуються застосуванням і підтримкою в умовах експлуатації технічного стану обладнання на рівні, передбаченому нормативно-технічною й експлуатаційною документацією на них.[42]

Рівень вібраційної швидкості складає 26дБ.

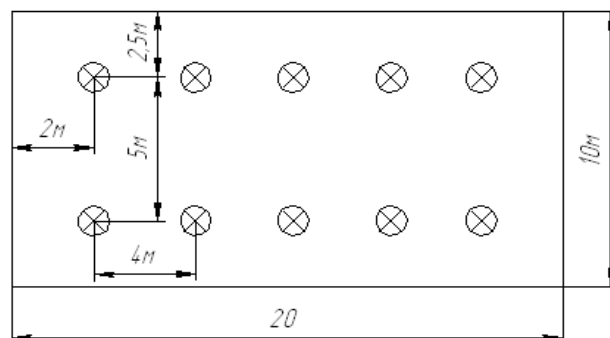
Норми вібрації встановлюються для тривалості робочої зміни 8 годин.

Існують наступні методи зменшення вібрацій ГОСТ 26568-85:

- дія на джерело вібрації, зниження вібрації на шляху їх розповсюдження;
- шляхом застосування відповідної організації праці;
- застосування засобів індивідуального захисту та проведенням лікувально - профілактичних заходів. ДСН 3.3.6.039-99.

3.7.4. Освітлення на робочих місцях

Для цеху висотою до 6 м, в якому знаходиться лінія, передбачено природне і штучне освітлення. Для світильників штучного освітлення підходять світильники типу ДРЛ 400 (діаметр: 0,395 м; висота: 0,552 м; потужність: 250 Вт; кількість 10 штук; $E_{\text{факт}} = 300\text{лк}$), що відповідає вимогам СНиП 23-05-2010 [43].



- лампа типу ДРЛ(10шт);

Рисунок 3.11 - Схема освітлення цеху

Вони мають бути розташовані так, щоб забезпечувались надійність їх закріплення, безпечність, зручність обслуговування і необхідне освітлення з урахуванням його рівномірності (Рисунок 3.11)

Лампи створюють світло, що за яскравістю наближається до природного. Для приміщення також передбачене бокове освітлення (крізь отвори в зовнішніх стінах).

Даний вид роботи (загальне постійне спостереження) природної освітленості

3.7.5 Пожежна безпека

Перероблюваний матеріал ПНТ. Технологічний процес виробництва полімерних труб до категорії В [44].

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 запалення 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 СНиП 2.01.02-85 відповідає ступеню вогнестійкості II. Згідно ПУЕ клас зони установки П-Па.

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 СНиП 2.09.02-85 число евакуаційних виходів з будівель не менш за 2. Евакуаційні виходи розташовані роззосереджено [45]. 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 еваковиходу – 2 метри. Двері еваковиходу повинні відкриватись назовні. (рис. 3.12). Тип первинних засобів пожежогасіння - ручні вогнегасники порошкові, якими можна гасити різні матеріали, в тому числі негасимими другими 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.

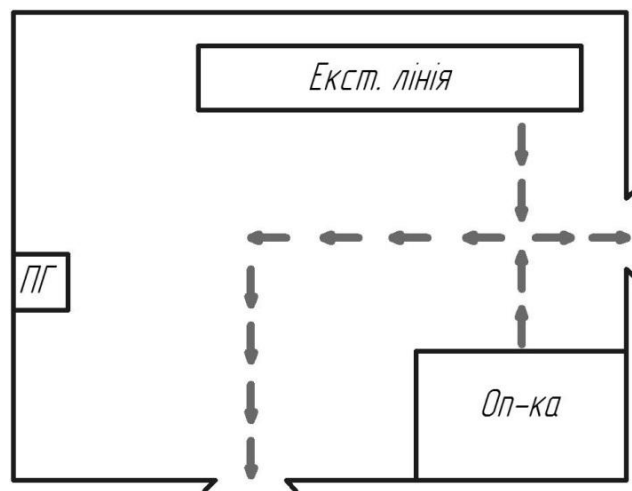


Рисунок 3.12– План евакуації виробничого приміщення

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.

Безпека при експлуатації балонів:

Балон повинен бути розрахований так, щоб напруження в стінка при гідравлічному випробуванні не перевищувало 90% границі текучості для даної марки сталі.

Вимоги до балонів зі сталі малого та середнього об'ємів на робочий тиск $P_p < 19,6$ МПа регламентується ГОСТ 949 – 73, а до сталевих балонів великого об'єму для газів $P_p < 25$ МПа – ГОСТ 9731 – 79.

Балони малого та середнього об'ємів випускаються ємність, л:

0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 20; 25; 32; 40; 50.

Робочий тиск P_p у балонах малого та середнього об'єму, МПа: із вуглицевої сталі – 9,8; 14,7; 19,6; з легованою сталі – 14,7; 19,6.

На верхній сферичній частині кожного балону повинні бути нанесені наступні данні: товарний знак заводу-виробника, номер балона по системі нумерації підприємства-виробника, дата виготовлення (випробування) та рік наступного випробування, вид термообробка , робочий тиск і пробний гідравлічний тиск, об'єм балона, маса балона, клеймо ОТК.

3.7.6 Надзвичайні ситуації

При роботі лінії використовуються горючі змащувальні матеріали, також плавлення поліетилену здійснюється при досить високій температурі $T = 443$ °К. Згідно з ОНТП 24 - 86 приміщення для розроблюваної лінії Ф 20-110 для нанесення ізоляції на дроти та кабелі відноситься до категорії В – пожежонебезпечні, так як містить горючі речовини, клас зони П – Па (ПУЕ). Тому можливими причинами пожежі можуть бути:

- порушення технологічного режиму;
- несправність електрообладнання й електромережі;
- куріння в невстановлених місцях.

Відповідно до СНиП 2.09.02-85 число евакуаційних виходів з будівель, повинно бути не менш за 2. Евакуаційні виходи повинні розташовуватись розосереджено. Ширина ділянок шляхів евакуації повинна бути не менша 1 м, а дверей на шляху евакуації - не менше 0,8 м. Відстань

від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу 50 м.

У приміщенні встановлені пожежні гідранти, теплові сповіщувачі, які спрацьовують при підвищенні температури до вище заданої межі $T=345\text{ }^{\circ}\text{K}$.

Засобом захисту статичної електрики є заземлення.

Первинним засобом гасіння пожежі є ОУ - 10 у кількості 4 шт;

- ящики з піском - 2 шт;
- пожежні гідранти - 6 шт

Протипожежна безпека лінії відповідає вимогам СНиП 2.01.02-85

3.8 Висновки

Результати проведених експериментальних досліджень працездатності експериментального НШ та ЧП дозволяє зробити наступні висновки:

1. Запропоновані аналітичні рішення адекватно описують параметри процесів дозування при дисково–червячній та дисково–шестеренній екструзіях.

2. Експериментально встановлено, що застосування шестеренного насосу при виробництві труб на пілотній установці з продуктивністю до 30 кг/год із ПВГ марки 27303-003 дозволило зменшити допуски на товщину стінки в 3 рази з економією сировини до 1,6 кг/год.

3. Експериментально встановлено, що розрахункові залежності для визначення продуктивності шестеренного та червячного насосів при значеннях тиску $\Delta P = 19\text{ МПа}$ та температурі $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ адекватно описують експериментальні дані з розбіжністю, що не перевищує 12 %.

4. Експериментально встановлено, що при застосуванні шестеренного насосу при переробці поліетилену марки 27303-003 сталих обертів при зміні тиску від 14 до 28 МПа продуктивність знизилася на 10 %, а при використанні червячного насосу за тих же умов на 33 %.

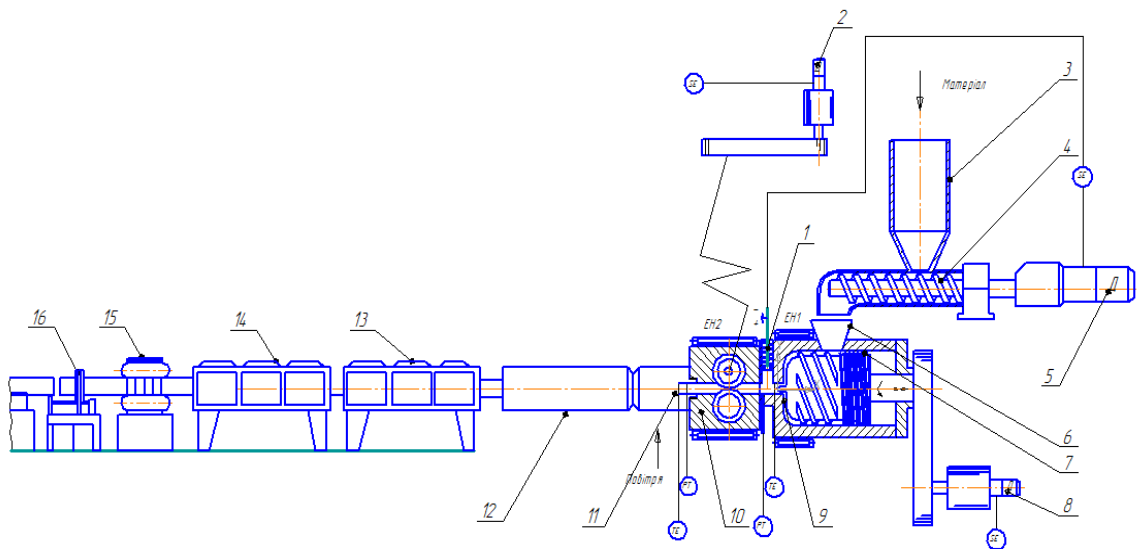
5. Експериментально встановлено, що застосування шестеренного насосу для переробки поліетилену марки 27303-003 при робочому тиску $\Delta P = 19 \pm 1$ МПа забезпечується стабілізація продуктивності на рівні $28,75 \pm 0,25$ кг/год (відхилення 0,64 %), що в 3 рази менше ніж при використанні червячного насосу.

6. Дослідженнями встановлено, що застосування запропонованої схеми з використанням шестеренного насосу при переробці поліетилену марки 27303-003 при зміні тиску в діапазоні від 14 до 28 МПа призводить до збільшення середньомасової температури розплаву на 3°C з 200°C до 203°C , що в 3.7 разів менше, ніж у випадку застосування черв'ячного насосу. Результати теоретичних та експериментальних досліджень покладено в методику розрахунку процесів каскадної дисково–шестеренної та дисково–червячної екструзії.

4 ОБГРУНТУВАННЯ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Опис технологічного процесу

За результатами експериментальних досліджень було розроблено технологічну схему промислової установки для виробництва труб діаметром 8–32 мм із поліетилену високої густини на базі каскадного дисково-шестеренного екструдера (рисунок. 4.1).



- 1 – компенсатор; 2,5,8 – приводи; 3,6 – бункери; 4 – шнековий дозатор;
- 7 – дисковий екструдер; 9 – торцевий робочий зазор дискового екструдера; 10 – шестеренний насос; 11 – формувальна головка;
- 12 – калібрувальний пристрій; 13 – вакуум ванна; 14 – ванна зрошення; 15 - тягнучий пристрій, 16 – відрізний пристрій

Рисунок 4.1 – Лінія для виробництва труб із термоеластопластів

Матеріал з бункеру 3 шнековим дозатором 4 потрапляє до завантажувальної горловини 6 де дисковим екструдером 7 він стискається, плавиться та вимішується та потрапляє до шестеренного насосу 10. Під дією вакууму, створеного в шестеренному насосі та тиску, який 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 фільтр та формуючий інструмент 11. Після якого сформований виріб проходить через калібратор 12 та проходить через охолоджувальні ванни 13, 14 – потрапляє до відрізного пристрою 16 де розділяється на необхідні елементи заданої довжини. Після формуючого інструменту розплав надходить до калібрувального пристрою 12 де формується готова труба після чого вона охолоджується в вакуум ванні та ванні зрошення після чого за допомогою тягнучого пристрою 15 поступає на намотування.

4.2 Методика розрахунку каскадного дисково-шестеренного екструдера

4.2.1 Розрахунок дискового екструдера

Мета розрахунку: обчислити розплавлював-гомогенізатор з дозованим живлення. На рисунку 4.2 зображена розрахункова схема розплавлювала-гомогенізатора у ролі дискового екструдера.

Вихідні дані:

Початкове наближення діаметра диска, м	D ;
Глибина каналу нарізки диска, м	H_1
Ширина отвору подачі гранул, м	L_3
Число заходів нарізки,	K
Діаметр вихідного отвору, м	D_1
Число паралельних зазорів	m
Зазор між дисками, м	H_2
Продуктивність екструдера, кг/год	G_m
Температура гранул на вході в екструдер, °C	$T_{вх}$
Температура полавлення гранул, °C	$T_{пл}$
Температура стінки циліндра, °C	$T_{ц}$
Температура розплаву на виході з екструдера, °C	T_k

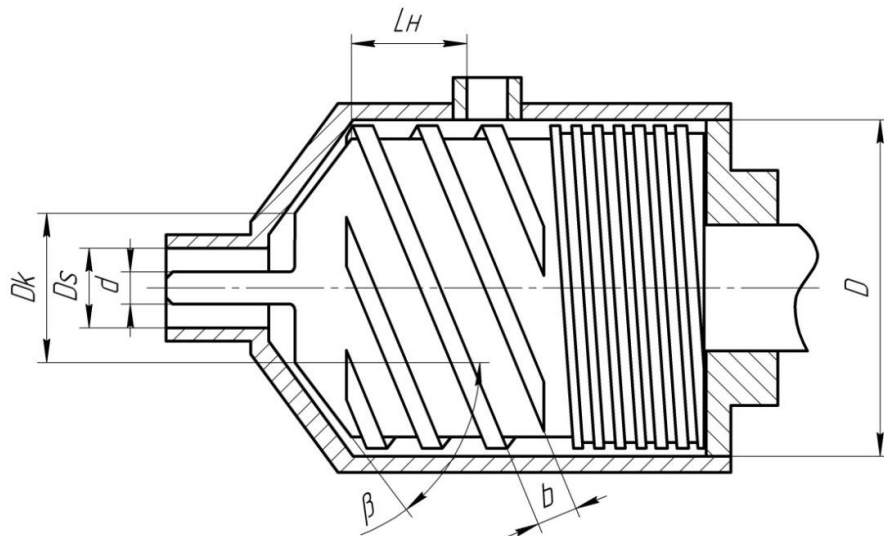


Рисунок 4.2 – Розрахункова схема дискового екструдера

Знаходимо масову витрату:

$$G = \psi \rho_0 b H_1 K L_3 n \quad (4.1)$$

де ρ – густина розплаву, а ψ – коефіцієнт заповнення каналу.

Довжина зони плавлення:

$$L_n = \frac{2G}{\rho_0 n b H_1 K} \quad (4.2)$$

Розраховуємо кількість обертів диску:

$$n_0 = \frac{b}{\pi D \sin \varphi \sqrt{\frac{2H_1}{g}}} \quad (4.3)$$

З формули 4,3 можна знайти:

$$b = \sqrt{D \frac{A_1}{A_2}} \quad (4.3)$$

$$n_{.0} = \frac{A_1}{b} \quad (4.4)$$

де

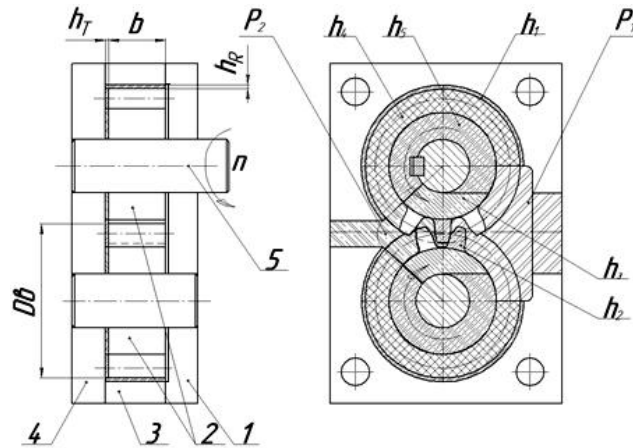
$$A_1 = \frac{G}{H_1 K L_3 \rho_0 \psi} \quad (4.5)$$

$$A_2 = \frac{1}{\pi \sin \varphi \sqrt{\frac{2H_1}{g}}} \quad (4.6)$$

Алгоритм та програма розрахунку наведені у додатку В.

4.2.2 Розрахунок параметрів шестеренного насосу

Мета роботи: розрахувати фактичну продуктивність, потужність, яка витрачається на створення тиску та на тертя в розплаві по всіх зазорах насосу, а також визначити збільшення температури розплаву від підвищення тиску. На рисунку 4.3 зображено схему груп зазорів НШ.



1 – верхня плита; 2 – шестерні; 3 – середня плита; 4 – нижня плита; 5 – вал приводу; 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 4.3 – Схема шестеренного насоса

Вихідні дані:

Тиск на вході P_1 , МПа	7
Опір формуючої головки P_2 , МПа	25
Кількість обертів шестерень n , об/с	20
Температура розплаву t , °C	200
Модуль зачеплення зубів m	3
Кількість зубів z	16
Кількість зубів, що входять в радіальний зазор z_1	11
Діаметр валу D_v , мм	30
Кут зачеплення зубів α , град	15
Ширина вінця шестерні b , м	0,024

Торцевий зазор h_T , м

$5 \cdot 10^{-6}$

Алгоритм та програма розрахунку енергосилових параметрів шестеренного насоса наведена у додатку Г.

4.2.3 Розрахунок параметрів черв'ячного насосу.

Мета роботи: визначити фактичну продуктивність, потужність, яка витрачається на створення тиску та на тертя в розплаві. На рисунку 4.4 зображено схему черв'ячного насоса.

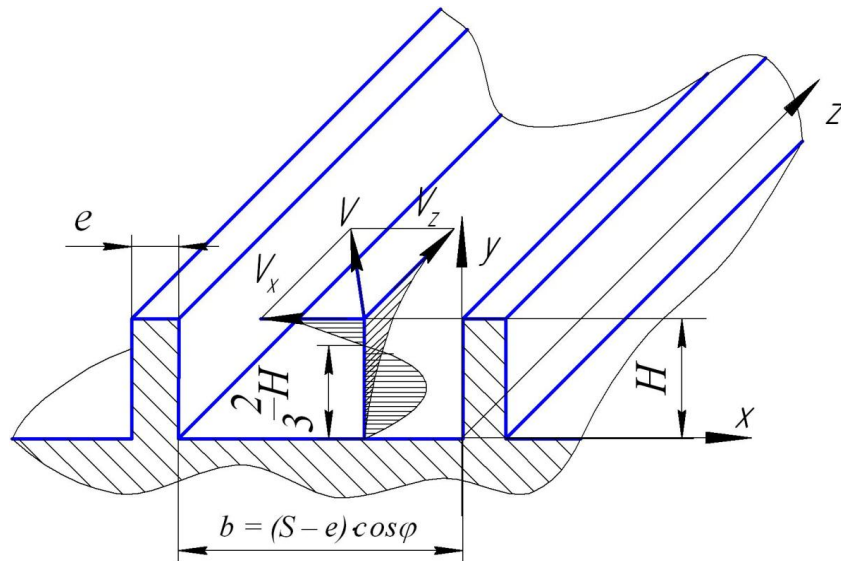


Рисунок 4.4 – Довільний перетин модуля гомогенізації

Вихідні дані:

діаметр черв'яка, м	0.090
крок гвинтової нарізки, м	0.090
ширина витка нарізки, м	0.007
робоча довжина черв'яка, м	0,45
продуктивність червячного насосу, кг/год	30
початкове наближення числа обертів. 1/хв	30
найменша температура стінки циліндра, °С	175
найбільша температура стінки циліндра, °С	180
необхідна температура розплаву, °С	200

Алгоритм та програма розрахунку енергосилових параметрів шестеренного насоса наведена у додатку Д.

Результати розрахунку екструдера:

глибина каналу в зоні гомогенізації: 3.217 мм;

число обертів черв'яка: 45 об/хв.;

температура розплаву полімеру: 200 °C;

5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1 Аналіз стартап-проекту

Екструзія є складним технологічним процесом який широко застосовується у хімічній промисловості як завершальна стадія виробництва, від ефективної організації якої залежить якість та собівартість готової продукції. Основними апаратами які забезпечують ефективний процес екструзії виступають черв'ячні та дискові екструдери.

Вдосконалення процесу екструзії полімерів в технологічному виробництві полімерних труб. Всі розрахунки проведені за методикою [47].

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Аутсорсинг інженерних послуг з удосконалення процесу екструзії полімерів	1. Харчова промисловість; 2. Переробна промисловість; 3. Фармацевтична промисловість 4. Хімічна промисловості.	1. Покращена якість готової продукції. 2. Нижча вартість 3. Ресурсоенергозбереження

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту:

Першим конкурентом є патент № 1, №79184. Згідно з патентом на виході із розвантажувального отвору встановлено датчик тиску який з'єднаний через регулятор продуктивності з дозатором, що дозволяє відповідно до продуктивності корегувати подачу матеріалу. Недоліком такого винаходу важкість поєднати продуктивність дискового екструдера із продуктивністю шестеренного насосу.

Наступний патент № 105955. За цим патентом отримують можливість регулювати продуктивність шестеренного насосу відповідно до заданої. До недоліків такого винаходу є температурна та неоднорідність розплаву на

виході із шестеренного насосу, так як він і дисковий екструдер не може вмішати розплав.

Наш проект полягає у створенні патенту, сенс якого у вдосконаленні технологічної схеми, за рахунок встановлення на обертальному диску у впадинах гвинтової нарізки на виході з завантажувально-пластифікувальної зони чечевицеподібних пластин під кутами відмінними від кута нахилу гвинтової нарізки статичного змішувача за рахунок чого

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

Технологічний аудит ідеї проекту

1. Технологія виготовлення товару – згідно ідеї проекту.
2. Існування технології – необхідна розробка технології виготовлення.
3. Доступність такої технології авторам проекту – на даний час розробка такої технології авторам проекту недоступна.

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
Вартість екструдера, грн	70000	200000	66000	110000	–	–	+
Витрата електроенергії, кВт/год	20	17,5	21	23	–	+	–
Продуктивність, кг/год	120	120	100	140	–	+	–
Вихід бракованої продукції, кг/год	3	8	11	5	–	–	+
Індекс змішування	0,97	0,95	0,9	0,97	–	–	+

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів [48].

Спочатку проводимо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 5.3).

Таблиця 5.3. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	50 000 – 55 000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнує
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Фінансові, соціальні, цінові бар'єри
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Кількість стандартних деталей – 60 %
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	15 %

Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку) порівнюється із банківським відсотком на вкладення. За умови, що останній є вищим, можливо, має сенс вкласти кошти в інший проект.

За результатами аналізу таблиці можемо зробити висновок що ринок не є привабливим для входження за попереднім оцінюванням, тому що динаміка ринку стагнує.

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (таблиця 5.4)[49].

Таблиця 5.4. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Підвищення енергоефективності; Покращення якості продукції.	Харчова промисловість; Переробна промисловість; Фармацевтична промисловість; Хімічна промисловість.	ГОСТ; ДСТУ; ISO; HASS	- до продукції – ціна, якість; - до компанії-постачальника – економічна та екологічна ефективність.

Проводимо аналіз ринкового середовища, складаємо таблицю факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають.[50]

Таблиця 5.5. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Політико-правові «Закон України про підприємницьку діяльність». «Закони України про ліцензування певних видів господарської діяльності».	Може вплинути на працездатність проекту, купівлю/продаж товару, або ресурсу необхідного для товару Недостатня підтримка державою нових підприємців. Дорого вартісні ліцензії, заборона на діяльність без ліцензії.	Відповідність вимогам законодавства України та країн з якими ведеться співпраця. Зміна напрямків імпорту/експорту
2	Відмова від використання продукції виготовленої з полімерних матеріалів	Використання замість полімерів матеріалів, які не створюють навантаження на екологію	Перехід на новий полімер, який повторно переробляється.
3	Економічні Інфляція Підвищення цін на сировину	Впливає на купівлю/продаж товару, або ресурсу необхідного для товару	Підвищення/пониження ціни на продукт
4	Зростання попиту на модернізацію	Поява нового ресурсоенергозберігаючого	Вдосконалення існуючого процесу перероблення

	та проектування нового обладнання для переробки полімерних матеріалів	процесу переробки полімерів..	полімерів.
--	---	-------------------------------	------------

Таблиця 5.6 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Макроекономічне зростання України	Збільшення попиту і пропозицій на полімерну продукцію	Підвищення обсягів виробництва, що дасть можливість впровадити нову технологію більшої кількості клієнтів
Політика протекціонізму	Захист внутрішнього ринку, обмеження імпорتنих та експортних податків, субсидій	Розвиток полімерної галузі в Україні..

Проводимо аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (таблиця. 5.7).

Таблиця 5.7. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції олігополія	відносно мала кількість фірм; продукція диференційована; контроль над цінами.	Зниження ціни на продукцію
2. За рівнем конкурентної боротьби національний	Динамічна стійкість економічної системи щодо внутрішніх та зовнішніх потрясінь	Інноваційний шлях розвитку
3. За галузевою ознакою міжгалузева	утворення рівноважної (середньої) норми прибутку; формування оптимальної структури економіки; стимулювання розширення найбільш перспективних галузей.	Можливість застосування в різних галузях виробництва
4. Конкуренція за видами товарів:	конкуренція між різноманітними видами	Розширення галузі виробництва продукції

товарно-родова	товарів, що можуть виконувати схожі функції	
5. За характером конкурентних переваг: нецінова	Технічні переваги, впровадження нововведень, найефективніші методи збуту товару	Зосередження конкурентоспроможності на якості товару, наданні додаткових послуг та збільшення асортименту
6. За інтенсивністю не марочна	Відсутність торгової марки	Створення торгової марки

Після аналізу конкуренції проводимо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (таблиця 5.8)[51]

Таблиця 5.8 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
Вартість екструдера, грн	80000	100000	65000	120000	–	–	+
Витрата електроенергії, кВт/год	20	18,5	20	22	–	+	–
Продуктивність, кг/год	120	120	100	140	–	+	–
Вихід бракованої продукції, кг/год	2,4	6,8	10,5	4,5	–	–	+
Індекс змішування	0,97	0,95	0,9	0,97	–	–	+

З таблиці видно, що стартап є актуальним, конкуренція є, але вона не велика,

Після аналізу конкуренції проводимо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю 5 сил М. Портера. Згідно цієї моделі розглядаємо 5 основних сил, які необхідно врахувати перед виходом на ринок, опис наведено в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Підприємства що займаються переробкою полімерів: ТОВ «Помімерколог», «УКРПЛАСТИК» тощо.	Конкурентом може стати підприємство яке почне співпрацювати з технічними вузами.	Напрям по добутті сировини, (бажано купувати сировину в Українських виробників наприклад «Карпатнафтохім» та ін.)	- не конкурентоспроможне обладнання; - високі ціни на товари; - не якісні послуги; - без інноваційне.	Інші матеріали (метал, деревина, кераміка та інші композиційні матеріали)
Висновки:	На даний момент більшість конкурентів не створює нових полімерних матеріалів та модернізації обладнання для їх перероби.	- Вхід на ринок можливий, внаслідок того, що промисловість потребує велику кількість конструктивних матеріалів, якими є полімери та їх композиції. - нових конкурентів не знайдено.	Час, ціна та якість сировини для переробки і поставки комплексуючих та його мінімальна вартість.	Клієнту завжди не обхідне: Конкурентно спроможне обладнання за низькою ціною якісне та інноваційне	На даний момент полімери є найпоширенішими матеріалами тому замінники полімерів в більшості галузей промисловості відсутні.

На основі аналізу конкуренції, проведеного, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, вимог споживачів до товару та факторів маркетингового середовища визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Витрати перемикавання	Невелика вартість та вдосконалення установки
2	Інформованість покупця	Масштабне розповсюдження реклами, доведення ефективності технології
3	Патенти й ліцензії	Запатентовано технологію
4	Доступ до необхідних ресурсів	Вигоди покупця, зменшення витрат на процес

За визначеними факторами конкурентоспроможності проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Низька ціна	5			◇	△	□		
2.	Якість	10		◇	□		△		
3.	Асортимент	5	△	□				◇	
4.	Рівень концентрації	0			△	□, ◇			

* □ – ЗАТ «Полімеркolor»

△ – ЗАТ «Укрпластик»

◇ – завод «Полімер – Електрон»

Висновок з таблиці: наші сильні і слабкі сторони у порівнянні з конкурентами.

Оцінка здатності створити та реалізувати конкурентні переваги стартап-проекту вимагає проведення дослідження його потенціалу, зокрема, його сильних та слабких сторін

Складаємо SWOT-аналіз (матриці аналізу сильних (Strength), слабких (Weak) сторін, загроз та можливостей на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін.

Таблиця 5.12 – SWOT - аналіз стартап –проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Новизна проекту; 2. Пропонована технологія дозволить збільшити конкурентоспроможності споживачів підприємств полімерної промисловості; 3. Низька вартість впровадження проекту; 4. Енергозбереження. 5. Пропонована технологія зменшить необхідну кількість матеріалу для виготовлення продукції	1. Складність виходу на ринок; 2. Низьке забезпечення сировиною в Україні для переробки з іншими компонентами композиції (поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид тощо); 3. Складність знаходження організації, яка виконає модернізацію технологічної лінії
Можливості	Загрози
1. Поява нової технології змішування полімерних композицій 2. Підвищення галузі та економіки України; 3. Зростання попиту на модернізацію та проектування нового обладнання для переробки полімерних матеріалів.	1 Консервативність споживачів до запровадження інновацій. 2. Поява нового ресурсоенергозберігаючого процесу переробки полімерів.

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.13).

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Використання полімерів для виробництва товарів для машинобудівної промисловості	На даний момент недостатньо висока, внаслідок малої кількості клієнтів	2 роки
2.	Виробництво пластикових труб з полімерів	Достатньо висока	8 місяців
3.	Приладобудування та обслуговування техніки (полімерні композиції для даної галузі)	Достатня	1 рік

Після аналізу зазначити обираємо альтернативу виробництво нових технологій виробництва полімерних труб.

На даний момент в Україні йде перехід від металевих труб до пластикових, тому розробка альтернативного проекту в даній галузі є актуальним. Необхідна велика кількість труб для заміни старих по всій території України. Використання таких труб збільшить термін експлуатації каналізаційних мереж, зменшить втрати тепла. Недоліком старих технологій є завищені допуски на геометричні розміри, що веде до перевитрат сировини. Запропонований варіант перероблення полімерних матеріалів дозволить вести ресурсоенергоощадний процес. Після аналізу обираємо альтернативу диференціації, що передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів.

Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 5.14).

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
	Підприємства, що використовують продукції із термоеластопластів	Визначатиметься готовність підприємств піти на додаткові витрати пов'язані з переобладнанням лінії для виробництва виробів із термоеластопластів	Залежатиме від темпів розвитку економіки взагалі і галузі споживачів, зокрема, а також рівнем і характером підтримки інноваційного підприємництва з боку держави	Низька інтенсивність а концентрація висока	Високі бар'єри входу на ринок
Які цільові групи обрано: Компанія Винаходи України, Energomashkomplekt-Donbass, ООО, Донецьк					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів обираємо цільові групи, для яких пропонується стратегія диференційованого маркетингу. Для роботи в обраних сегментах ринку було обрано стратегію розвитку диференційованого маркетингу.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (таблиця 5.15).

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Стратегія	Диференційованій	По відношенню до прямих конкурентів диференціація знижує	Стратегія диференції

	диференціації за Ж.-Ж. Ламбеном	маркетинг	ступінь заміності товару, посилює прихильність марці, зменшує чутливість до ціни і тим самим підвищує рентабельність; прихильність клієнтів послаблює їх тиск на фірму і перешкоджає приходу на ринок нових конкурентів; підвищена рентабельність збільшує стійкість до можливого зростання витрат в результаті дій сильного постачальника; відмітні властивості товару і завойована прихильність клієнтів захищають фірму і від товарів-замінників.	ації
--	---------------------------------	-----------	--	------

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (таблиця 5.16).

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	Ні	Передбачається розвиток ринку	Ні	Стратегія наслідування лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляється стратегія позиціонування (таблиця 5.17). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувану комплексну позицію власного проекту (три ключових)
	Підвищення енергоефективності	Стратегія диференціації	Витрати перемикачів Інформованість покупця Патенти й ліцензії Доступ до ресурсів	Витрати перемикачів Інформованість покупця Патенти й ліцензії

Результатом виконання підрозділу є узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап компанії, яка визначає напрями роботи стартап компанії на ринку.

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 5.18 підсумовуються результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Підвищення енергоефективності	Підвищення якості вихідного продукту	Економічність, екологічність

При визначенні оптимальної системи збуту, було прийнято рішення, що збут в стартапі проводитиметься власними силами чи з залученням фахових посередників.

До основних техніко-економічних характеристик товару відносяться:

– Економічні – вартість обслуговування, експлуатації, утилізації, витратних матеріалів, ремонту, знижки;

- Призначення (технічні) – показники, що визначають головний напрямок використання товару та можливу сферу його застосування: класифікаційні показники, складу і структури, технічної досконалості;
- Надійності – здатність товару безвідмовно функціонувати: безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність;
- Технологічні – можливість оптимізації витрат матеріалів, праці, коштів, часу під час технологічної підготовки виробництва, виготовлення та використання товару;
- Ергономічні – показники ступеню адаптованості технічних та конструктивних рішень виробу до біологічних властивостей людини та середовища використання товару: гігієнічні, антропометричні, фізіологічні та психологічні;
- Органолептичні – визначають властивості товару, які людина може визначити за допомогою своїх органів чуття;
- Естетичні – оцінюють зовнішній вигляд товару;
- Транспортабельності – визначають пристосованість продукції до транспортування, підготовчих, початкових і кінцевих операцій перевезення;
- Екологічності – характеризують рівень негативного впливу на довкілля;
- Безпеки – безпечності та нешкідливості споживання товару.

Формулюємо три рівні товару: товар за задумом, товар у реальному виконанні та товар із підкріпленням. Далі розглядаємо техніко-економічні характеристики кожного рівню товару, отримані дані вносимо до таблиці 5.19.

Полімерні композиційні матеріали є неоднорідними сумішами декількох нерозчинних один в одному компонентів, тому важливими техніко-економічними параметрами є характеристики призначення (технічні), для забезпечення заданих експлуатаційних властивостей матеріалу. Полімерний композиційний матеріал повинен бути добре змішуваний, в його структурі не повинно бути розшарувань, порожнин та включень інших речовин, які не

передбачені в рецептурі. Також матеріал повинен відповідати вимогам по екологічності.

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди:		
	Економія ресурсів клієнтів шляхом вирішення проблем пов'язаних з виробництвом (випуск бракованої продукції, низька надійність обладнання тощо).		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Технічні: гранули композиції поліетилену діаметром 2 – 8 мм в упаковці від виробника з перевіреними характеристиками; 3. Економічності: зниження затрат на ремонт, зменшення бракованих виробів та зменшення простоїв виробництва; 4. Ергономічність: доступ до всіх елементів конструкції; 5. Безпека: відповідність нормативам; 6. Екологічність: вміст шкідливих домішок нижче допустимих.	+/+	-/+/+/-/-
	Якість: стандарти, нормативи, параметри тестування міжнародні та вітчизняні стандарти ДСТУ, ISO, DIN та інші.		
	Пакування– в поліетиленових мішках з логотипом підприємства.		
	Марка: назва організації-розробника + назва товару		
III. Товар із підкріпленням	До продажу : Роз'яснення клієнтові питань з технологією переробки		
	Після продажу: Гарантія якості продукції		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Використання власних запатентованих розробок та методів оптимізації, консультування та шляхів розв'язку проблеми.			

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити – чим саме проект буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної

власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (таблиця 5.20). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення ціни

п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	500-800 грн/1 упаковка	500-800 грн – ціни невисокі	Підприємства великі, середні та малі(цехи)	200-800 грн/1 консультація, в онлайні безкоштовно.
2.	Сама модернізація робиться коштом підприємства (клієнта) оплата йде тільки за обсяги роботи. 80 грн / година роботи	Розробка нового обладнання 120 грн/1 год	Дивлячись від розміру підприємства (клієнта) та обсягів виконання: 200 -6000 грн/1 год (для всього колективу)	200 грн/1год (для всього колективу)

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (таблиця 5.21):

- 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 5.21 – Формування системи збуту

п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Закупівля оптом	Якість товару, потрібні характеристик и, швидкість перевезення до клієнта	Нульового рівня - виробник сам продає товар кінцевому споживачеві, прямі канали розподілу	Через інтернет
2.	В роздріб	Швидкість перевезення на точку збуту	Дворівневий - між виробником і покупцем послідовно існують оптовий і роздрібний продавці	Через інтернет та безпосередньо на місці проведення продажу
3.	Консультування при виникненні питань та пропозицій	Виконання роботи та складання	Однорівневий	Через інтернет по телефону, відеоконференціях та на місці

Система збуту товарів - ключова ланка комерційної діяльності й свого роду фінішний комплекс у всій діяльності фірми по створенню, виробництву й доведенню товару до споживача. Власне, саме тут споживач або визнає, або не визнає всі зусилля підприємства корисними і потрібними для себе і, відповідно, купує або не купує її продукцію і послуги.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (таблиця 5.22).

Таблиця 5.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування
	Цільві клієнти орієнтовані на використання вузькоспеціалізованих комунікацій, що визначається галузевими особливостями їх приналежності	Інтернет, семінари, друкована продукція	Спеціалізовані виставки

5.2 Висновки

В процесі розроблення стартап-проекту, було зроблено висновок, про можливість ринкової комерціалізації проекту. На користь цього свідчить наявність попиту, що визначається потребою підвищення енергоефективності та покращення якості продукції.

Маркетингові дослідження обраного сегменту ринку, оцінки рівня та динаміки конкуренції в базовій та спорідненій галузях та обґрунтовані фактори конкурентоспроможності стартап-проекту дозволяє стверджувати про перспективи створення і розвитку стартап-проекту.

Ключовими конкурентоспроможними позиціями стартап – проекту є:

- витрати перемикання;
- інформованість покупця;
- патенти і ліцензія;
- вигоди покупця.

Обрана стратегія розвитку передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Реалізація цієї стратегії вимагає, як правило, більш високих витрат. Проте успішна диференціація дозволяє компанії домогтись більшої рентабельності за рахунок того, що ринок готовий прийняти більш високу ціну (цінову премію бренду).

ВИСНОВКИ

Головний результат дисертаційної роботи – створена система каскадної екструзії з обґрунтуванням використання шестеренного наосу в якості дозуючого пристрою.

7. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень каскадних дисково–червячного та дисково–шестеренного екструдерів обґрунтована доцільність використання каскадної системи дисково–шестеренної екструзії, особливістю якої є встановлення на першій стадії в якості розплавлювача–гомогенізатора дискового екструдера з дозованим живленням, а на другій стадії, для створення тиску та дозування, шестеренного насоса.

8. Розвинуто фізичну та математичну моделі процесів перенесення в дозуючих червячному та шестеренному насосах, які дозволяють визначати фактичну продуктивність та підвищення середньомасової температури розплаву в насосах.

9. Експериментально встановлено, що застосування шестеренного насосу при виробництві труб на пілотній установці з продуктивністю до 30 кг/год із ПВГ марки 27303-003 дозволило зменшити допуски на товщину стінки в 3 рази з економією сировини до 1,6 кг/год.

10. Експериментально встановлено, що розрахункові залежності для визначення продуктивності шестеренного та червячного насосів при значеннях тиску $\Delta P = 19$ МПа та температурі $T = 200$ °С адекватно описують експериментальні дані з розбіжністю, що не перевищує 12 %.

11. Експериментально встановлено, що при застосуванні шестеренного насосу при переробці поліетилену марки 27303-003 сталих обертів при зміні тиску від 14 до 26 МПа продуктивність знизилася на 10 %, а при використанні червячного насосу за тих же умов на 33 %.

12. Експериментально встановлено, що застосування шестеренного насосу для переробки поліетилену марки 27303-003 при робочому тиску $\Delta P = 19 \pm 1$ МПа забезпечується стабілізація продуктивності на рівні $28,75 \pm 0,25$

кг/год (відхилення 0,64 %), що в 3 рази менше ніж при використанні червячного насосу.

13. Дослідженнями встановлено, що застосування запропонованої схеми з використанням шестеренного насосу при переробці поліетилену марки 27303-003 при зміні тиску в діапазоні від 14 до 26 МПа призводить до збільшення середньомасової температури розплаву на 3 °С з 200 до 203 °С, що в 5 разів менше, ніж у випадку застосування черв'ячного насосу. Результати теоретичних та експериментальних досліджень покладено в методику розрахунку процесів каскадної дисково–шестеренної та дисково–червячної екструзії.

14. Результати дисертації можуть бути впроваджені в ВАТ «Більшовик», м. Київ, ПП «НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «Пластмодерн», м. Київ, а також в навчальному процесі на кафедрі Машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв КПІ ім. Ігоря Сікорського.

ВЫВОДЫ

Главный результат диссертационной работы – создана ресурсоэнергосберегающая система каскадной дисково-шестеренной экструзии для переработки полимерных материалов.

1. По результатам теоретических и экспериментальных исследований каскадных дисково–червячного и дисково–шестеренного экструдеров обоснована целесообразность использования каскадной системы дисково-шестеренной экструзии, особенностью которой является установление на первой стадии в качестве гомогенизатора дискового экструдера с дозированным питанием, а на второй стадии, для создания давления и дозирования, шестеренный насос.

2. Развинуто физическую и математическую модели процессов переноса в шестерённом насосе, которые позволяют определить фактическую производительность и повышение среднemasсовой температуры расплава в шестерённом насосе.

3. Экспериментально установлено, что применение каскадной дисково-шестерённой экструзии при производстве труб на пилотной установке с производительностью до 30 кг / ч из ПВХ марки 27303-003 позволило уменьшить допуски на толщину стенки в 3 раза с экономией сырья до 1,6 кг / ч .

4. Экспериментально установлено, что расчетные зависимости для определения производительности шестеренного насоса при значениях давления $P = 19$ МПа и температуре $T = 200$ ° С адекватно описывают экспериментальные данные с расхождением, не превышает 12%.

5. Экспериментально установлено, что при дисково-шестеренные экструзии при переработке полиэтилена марки 27303-003 за постоянных оборотов при изменении давления от 15 до 26 МПа производительность снизилась на 10 %, а при дисково-червячной экструзии при тех же условиях на 33%.

6. Экспериментально установлено, что применение дисково-шестерённой экструзии для переработки полиэтилена марки 27303-003 при рабочем давлении $\Delta P = 19 \pm 1$ МПа обеспечивается стабилизация производительности на уровне $28,75 \pm 0,25$ кг / ч (отклонение 0,64%), что в 3 раза меньше, чем при дисково-червячной экструзии.

7. Исследованиями установлено, что применение предложенной схемы экструзии при переработке полиэтилена марки 27303-003 при изменении давления в диапазоне от 15 до 26 МПа приводит к увеличению среднемассовой температуры расплава на 3°C с 200 до 203°C , что в 5 раз меньше, чем в случае применения дисково-червячной экструзии.

8. Результаты диссертации могут быть внедрены в ОАО «Большевик», г. Киев, ООО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА» Пластмодерн », г. Киев, а также в учебном процессе на кафедре Машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств КПИ им. Игоря Сикорского.

CONCLUSIONS

The main result of the thesis is the creation of cascade extrusion system and using gear pump as a pressure generator.

According to the results of the dissertation of the paper, the following conclusions can be formulated:

According to the results of theoretical and experimental studies of cascade disk-worm and disk-gear extruders the expediency of using a cascade system of disk-gear extrusion, the peculiarity of which is the installation in the first stage as a homogenizer fusion of a disk extruder with metered feed, and in the second stage, to create pressure and dosage, gear pump.

2. Physical and mathematical models of transfer processes in dosing worm and gear pumps are developed, which allow to determine the actual productivity and increase the average temperature of melt in pumps.

3. It has been experimentally established that the use of a gear pump in the production of pipes at a pilot plant with a productivity of up to 30 kg / h with PGG grade 27303-003 allowed to reduce the tolerance to the thickness of the wall by 3 times with an economy of raw material up to 1.6 kg / h.

4. It has been experimentally established that the calculated dependencies for the determination of the productivity of the gears and the seals for pressure values $\Delta P = 19$ MPa and temperatures $T = 200$ ° C adequately describe experimental data with a difference of not more than 12%.

5. It has been experimentally established that when using a gear pump in the processing of polyethylene of the brand 27303-003, constant revolutions at a change in pressure from 14 to 26 MPa, the productivity decreased by 10%, while using a worm pump under the same conditions by 33%.

6. It has been experimentally established that the use of a gear pump for the processing of polyethylene of grade 27303-003 at a working pressure $\Delta P = 19 \pm 1$ MPa ensures a stabilization of productivity at the level of 28.75 ± 0.25 kg / h (deviation 0.64%), which is 3 times less than using a worm pump.

7. Researches have established that the application of the proposed scheme using a gear pump in the processing of polyethylene grade 27303-003 with a change in pressure in the range of 14 to 26 MPa leads to an increase in the average temperature of the melt at 3 ° C from 200 to 203 ° C, which is 5 times less than in the case of a worm pump. The results of theoretical and experimental studies are put into the method of calculation of cascade disk-gear and disk-worm extrusion processes.

8. The results of the thesis can be implemented at OJSC "Bolshevik", Kyiv, PE "SCIENTIFIC-MANUFACTURING FIRM" Plastmodern ", Kiev, as well as in the educational process at the Department of Machines and apparatuses of chemical and petroleum refineries KPI them. Igor Sikorsky

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Pola Plastic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://polyplastic.ua/ua/news/news-101.html>
2. Раувендааль К. Экструзия полимеров / Пер. с англ, под ред. А. Я. Малкина – СПб.: Профессия, 2006. – 768 стр., ил.
3. W.H.Darnell and E.A.J. Mol, SPE J. 12,20 (1956)
4. Z. Tadmor and E. Broyer, Polym. Eng. Sci., 12, 378-386 (1972)
5. B.H. Maddok, SPE ANTEC, New York, 383 (1959)
6. Z. Tadmor, I. Duvdevani and I. Klein, Polym. Eng. Sci., 7, 198 (1967)
7. Z. Tadmor, Polym. Eng. Sci., 6, 185 (1966)
8. Радченко Л.Б. Переробка термопластів методом екструзії. Наук.посібник. – К.: ІЗМН, 1999. 220с.
9. Библиотека [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://bibliograph.com.ua/spravochnik-97-otdelka/105.htm>
10. ГОСТ 10354-82 Плівка поліетиленова. Технічні умови
11. ДСТУ Б В.2.7-144:2007 Труби для мереж холодного та гарячого водопостачання із поліпропілену. Технічні умови
12. Б В.2.7-151:2008 «Трубы полиэтиленовые для подачи холодной воды. Технические условия»
13. ДСТУ Б А.1.1-28-94. Вироби полімерні погонажні профільні та оздоблювальні стінові (рулонні і листові). Терміни та визначення
14. Сенатос В.А., Симоненко Н.А., Симоненко Г.Н. Оборудование для переработки пластмас и резины. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, ХМ-2, 1989. – 48 с.
15. Раувендааль К. Выявление и устранение проблем в экструзии / К. Раувендааль, М. д. Пилар Норьега Е., Х. Харрис; Пер. с англ, под ред. В. П. Володина – СПб.: Профессия, 2008. – 328 стр., ил
16. Мастерская своего дела [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://msd.com.ua/oborudovanie-zavodov-po-pererabotke->

17. Такиура Мамору. Высокоскоростной двухступенчатый экструдер со шнеками разного диаметра.- Пурасутиккусу, Пластмассы Японии, 1971, 22, №12, С. 36–38
18. Иноуэ Макото. Двухстадийный экструдер типа TS 80/90 - Jap. Plast. 1975, 21, №5, S.57-58
19. Плешко О.В. Тенденції розвитку екструзійного обладнання для переробки полімерів / М.П. Швед, Д.М. Швед, О.В. Плешко // Зб. тез доп. III Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». (12–13 грудня 2012).– К.: НТУУ «КПІ», 2012. – С. 29–31
20. Farrel-Pomini [Електронний ресурс] – Назва з екрану.– Режим доступу: <http://www.farrel-pomini.com/> Електронний ресурс
<http://plastmasstehno.ru/>
21. Мак-Келви, Д. М. Переработка полимеров [Текст] / Д. М. Мак-Келви, – М.: Химия, – 1965. – 442
22. Луценко І.В. Переваги використання каскадних схем та дозуючих шестеренних насосів при екструзії полімерів / І.В. Луценко, Д.М. Швед, М.П. Швед, А.С. Богатир // Міжнародний науковий журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва». – 2013. – №1/2(9). – С.21–25. ISSN 2226–3780
23. RETEC, COEX '89, Chicago, Illinois, October 23 - 25,1989
24. Новый ресурсоэнергоощадный процес экструзии полимерів Швед М.П. канд. техн. наук, доц., Швед Д.М., інж., Великоіваненко С.П. магістрант.// Науковий журнал «Молодий вчений», Україна, 2018 р., с. 772-774
25. Battenfeld [Електронний ресурс] – Назва з екрану.– Режим доступу: <http://www.battenfeld-cincinnati.com/nc/ru/nachalo/>
26. Раувендааль К. Экструзия полимеров / Пер. с англ, под ред. А. Я. Малкина – СПб.: Профессия, 2006. – 768 стр., ил.

27. Ким В. С. Оборудование подготовительного производства заводов пластмасс / В. С. Ким, В. В. Скачков / - М. : Машиностроение, 1977. – 182 с
28. Ким В. С. Теория и практика экструзии полимеров. – М.: Химия, КолосС, 2005. – 568 с
29. Лукач Ю. Е. К вопросу определения давления вдоль червяка пресса при переработке термопластов (сообщение 1) / Ю. Е. Лукач, А. Д. Петухов // Хим. машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. — 1968. — Вып. 8. — С. 14—16.
30. Обґрунтування використання шестеренного насосу при каскадній екструзії полімерів Швед М.П. канд. техн. наук, доц., Швед Д.М., Великоіваненко С.П. магістрант.// // Науковий журнал «Молодий вчений», Україна, 2018 р., с. 40-43
31. Савчук В.П. Обработка результатов измерений. Физическая лаборатория. Ч1: Учеб. пособие для студентов вузов. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 54 с. ил.
32. Мурдід Н.В. Каскадний дисково-шестеренний екструдер для переробки полімерних матеріалів. / Н.В. Мурдід, М.П. Швед, І.О. Мікульонок, Д.М. Швед // Наукові вісті НТУУ "КПІ" К., 2009. – №2. – С. 74–77.
33. Швед Д.М. Процес екструзії полімерів на каскадному дисково-шестеренному екструдері. / Д.М. Швед
34. ГОСТ 16337–85 Полиэтилен высокого давления. Технические условия.
35. Теплофизические и реологические характеристики полимеров : справочник / [А. И. Иванченко, В. А. Пахаренко, В. П. Привалко и др.]. — К. : Наук. думка, 1977. — 44 с.
36. Теплофизические и реологические характеристики и коэффициенты трения наполненных термопластов : справочник / под ред. Ю.С. Липатова. — К. : Наукова думка,
37. ГОСТ 12.1.030–82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.

38. ГОСТ 12.1.005—88/98. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
39. ДСН 3.3.6.042–99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
40. ДСН № 3.3.6.037–99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
41. ДСН 3.3.6.039–99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.
42. ГОСТ 16372–84. Машины электрические вращающиеся. Допустимые уровни шума.
43. СНиП 23-05-2010. Строительные нормы и правила. Естественное и искусственное освещение производственных помещений.
44. НАПБ Б 07.005–86. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности.
45. СНиП 2. 09. 02 – 85. Строительные нормы и правила. Производственные здания.
46. Рыбкин Е.А., Усов А.А. Шестеренчатые насосы для металорежущих станков, Машгиз, Москва, 1960. – 254с
47. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]:Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
48. Форсайт економіки України: середньостроковий (2015–2020 роки) і довгостроковий (2020–2030 роки) часові горизонти / наук. керівник проекту акад. НАН України М. З. Згуровський // Міжнародна рада з науки (ICSU); Комітет із системного аналізу при Президії НАН України; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; Інститут прикладного системного аналізу НАН України і МОН України; Світовий центр даних з геоінформатики та сталого розвитку. — Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — 136 с. ISBN 978-966-622-716-7.

49. 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 Access mode : <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2017/3/245-256>.
50. Юдіна Н.В. Міждисциплінарні платформи стартап-проектів [Електронний ресурс] // Міждисциплінарні дискусії : Матеріали науково-теоретичного семінару «Міждисциплінарні дослідження: теоретико-методологічні виміри», 5 грудня 2017 р. – Київ, Київський національний університет імені Тараса Шевченка Інститут міжнародних відносин Навчально-науковий центр «Синтез». – 2017. – С. 20-24. - Режим доступу [http://mail.iir.edu.ua/uploads/files/tezi%20ceminar%20synthesis%205%2012%202017%20final%20\(1\).pdf](http://mail.iir.edu.ua/uploads/files/tezi%20ceminar%20synthesis%205%2012%202017%20final%20(1).pdf).
51. Юдіна Н. В. Визначення циклічних залежностей в економіці України на основі аналізу окремих макроекономічних показників. Економічний Вісник НТУУ «КПІ». №13(2016). <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/80084/75643>
52. Методичні вказівки до виконання магістерських дисертацій для студентів спеціальності “Обладнання хіміч их виробництв і підприємств будівельних матеріалів: [Електронний ресурс]: / НТУУ „КПІ”; уклад. А.Р. Степанюк, С.В. Гулієнко– Київ: НТУУ „КПІ”, 2012. – 40 с.

Додаток А. Оцінка похибок вимірювання

Методика оцінювання похибок вимірювання описана в [31]

Для оцінки достовірності отриманих даних проаналізуємо похибки вимірювань. Граничні абсолютні та відносні помилки позначаємо відповідно через ε та δ .

Якщо непрямо вимірювана величина Y є функцією величин $x_1, x_2, \dots, x_n$ вимірюваних прямим способом, то згідно теорії похибок гранична абсолютна похибка при визначенні Y рівна.

$$\varepsilon_Y = \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2} \quad (\text{A.1})$$

де $D_1, D_2, \dots, D_n$ – часткові похибки непрямого вимірювання, що визначаються за формулами:

$$D_1 = \frac{\partial Y}{\partial x_1} \cdot \varepsilon_{x_1}; D_2 = \frac{\partial Y}{\partial x_2} \cdot \varepsilon_{x_2}; \dots; D_n = \frac{\partial Y}{\partial x_n} \cdot \varepsilon_{x_n} \quad (\text{A.2})$$

$\varepsilon_{x_1}, \varepsilon_{x_2}, \dots, \varepsilon_{x_n}$ – абсолютні похибки результатів прямих вимірювань величин $x_1, x_2, \dots, x_n$

Гранична відносна похибка при визначенні Y буде рівною:

$$\delta_Y = \frac{\sqrt{D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2}}{Y} \quad (\text{A.3})$$

А 1. Обробка прямих вимірювань

В таблиці А.1 наведені значення замірів часу та ваги.

Таблиця А.1 - Значення замірів тиску, часу та ваги в дисково–шестеренному екструдері.

τ , с	P , МПа	g , кг/хв
120	14	1
120	16	0,98
120	18	0,97
120	20	0,95
120	22	0,93
120	24	0,92
120	26	0,9

Таблиця А.2 - Значення замірів тиску, часу та ваги в дисково-червячному екструдері.

τ , с	P, МПа	g, кг/хв
120	14	1
120	16	0,93
120	18	0,88
120	20	0,82
120	22	0,78
120	24	0,72
120	26	0,67

Таблиця А.3 – Значення замірів температури та тиску в дисково–червячному екструдері

T, °C	P, МПа
200	14
201,8	16
203,5	18
205,5	20
207	22
210	24
215	26

Таблиця А.4 – Значення замірів температури та тиску в дисково–шестеренному екструдері

T, °C	P, МПа
200	14
200,5	16
200,9	18
201,1	20
201,5	22

202	24
203	26

На секундомірі нанесено значення інструментальної похибки і вони становлять:

$$\Delta_a = 0,01 \text{ с.}$$

Для оцінки достовірності отриманих даних проаналізуємо похибки вимірювань. Граничні абсолютні та відносні помилки позначимо відповідно через ε та δ . Якщо непрямо вимірювана величина Y являється функцією величин $x_1, x_2, \dots, x_n$ вимірюваних прямим способом, то згідно теорії похибок [21] гранична абсолютна похибка при визначенні Y рівна:

$$\varepsilon_Y = \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2}, \quad (1)$$

де $D_1, D_2, \dots, D_n$ – часткові похибки непрямого вимірювання, що визначаються за формулами:

$$D_1 = \frac{\partial Y}{\partial x_1} \cdot \varepsilon_{x_1}; \quad D_2 = \frac{\partial Y}{\partial x_2} \cdot \varepsilon_{x_2}; \quad \dots; \quad D_n = \frac{\partial Y}{\partial x_n} \cdot \varepsilon_{x_n}, \quad (2)$$

де $\varepsilon_{x_1}, \varepsilon_{x_2}, \dots, \varepsilon_{x_n}$ – абсолютні похибки результатів прямих вимірювань величин $x_1, x_2, \dots, x_n$.

Гранична відносна похибка при визначенні Y буде рівною:

$$\delta_Y = \frac{\sqrt{D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2}}{Y}. \quad (3)$$

Абсолютна похибка в замірах температури складається з похибки потенціометра типу ЕПВ2-11А або ЕПВ2-04 (клас точності приладів 0.5, шкала 0...300°C), тоді похибка показів температури приладом буде:

$$\frac{0,5 \cdot 300}{100} = 1,5^\circ\text{C},$$

та можливої похибки при градуюванні термопар, котру можна оцінити в 0,1 °C, так як градуювання термопар контролювали за лабораторним термометром з ціною поділки 0,1 °C.

Тоді гранична абсолютна похибка при вимірюванні температури розплаву складає:

$$\varepsilon_{t_p} = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} = \sqrt{1,5^2 + 0,1^2} = \sqrt{2,25 + 0,01} = 1,501 \approx 1,5^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Граничні відносні похибки при вимірюванні температури розплаву:

$$\delta_{t_p} = \frac{1,5}{t_p} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де t_p – температура розплаву поліетилену високого тиску коливається від 160°C до 250°C . візьмемо найменш сприятливий випадок 160°C , тоді:

$$\delta_{t_p} = \frac{1,5}{160} \cdot 100\% \approx 0,94\%. \quad (6)$$

Продуктивність установки по розплаву визначали:

$$G_p = \frac{g}{\tau}, \quad (7)$$

де g – маса розплаву, кг;

τ – тривалість відбору зразка, с.

Гранична відносна похибка вимірювання продуктивності дорівнює:

$$\delta_{G_p} = \frac{\sqrt{\left(\frac{g}{\tau} \cdot \varepsilon_g\right)^2 + (\varepsilon_\tau)^2}}{G_p}, \quad (8)$$

де $\varepsilon_\tau = 0,2$ с та $\varepsilon_g = 0,005$ кг.

Тоді для продуктивності в 40 кг/год:

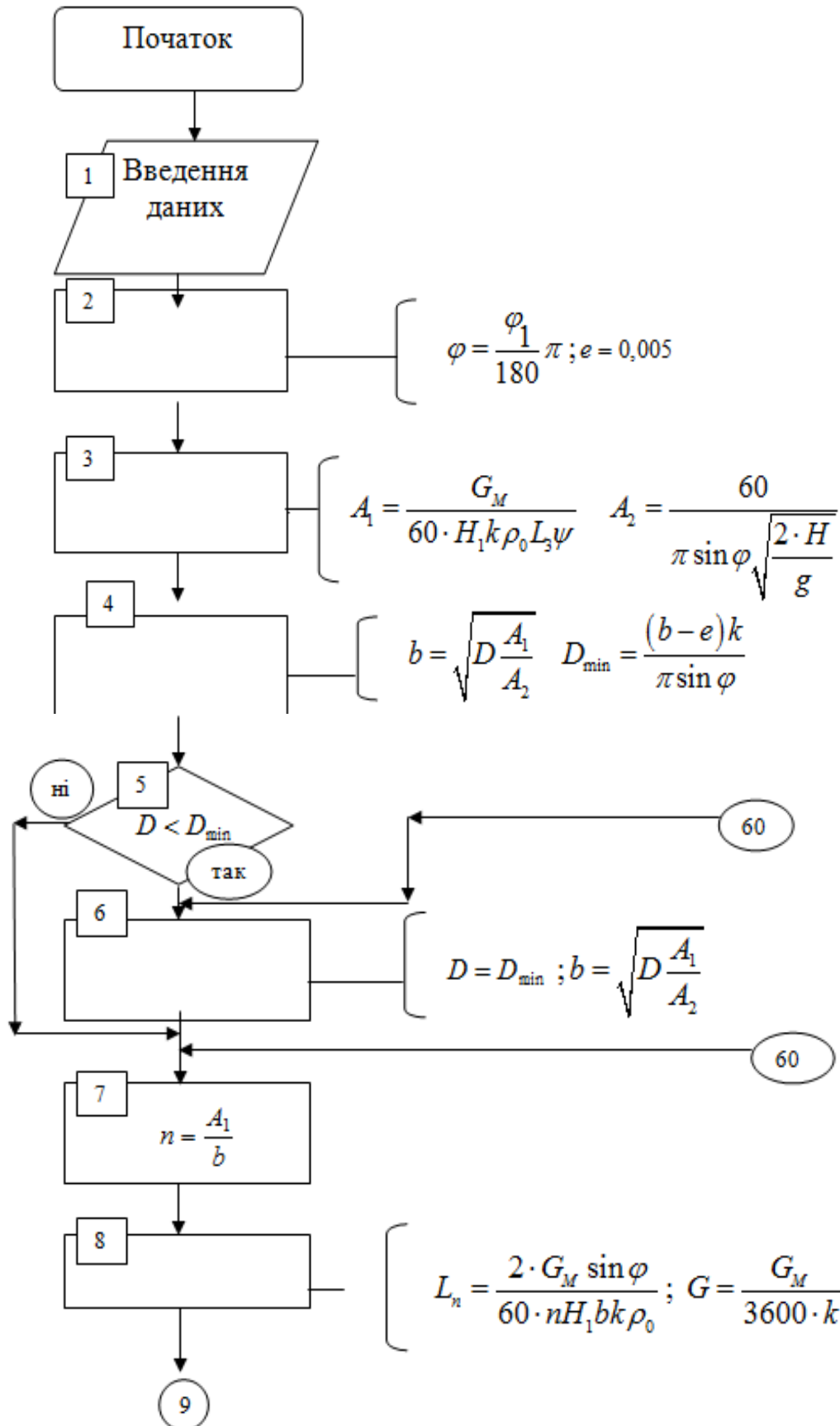
$$\delta_{G_p} = \frac{\sqrt{\left(\frac{g}{\tau} \cdot \varepsilon_g\right)^2 + (\varepsilon_\tau)^2}}{G_p} = \frac{\sqrt{\left(\frac{40}{1} \cdot 0,005\right)^2 + (0,2)^2}}{40} \cdot 100\% = 0,71\%. \quad (9)$$

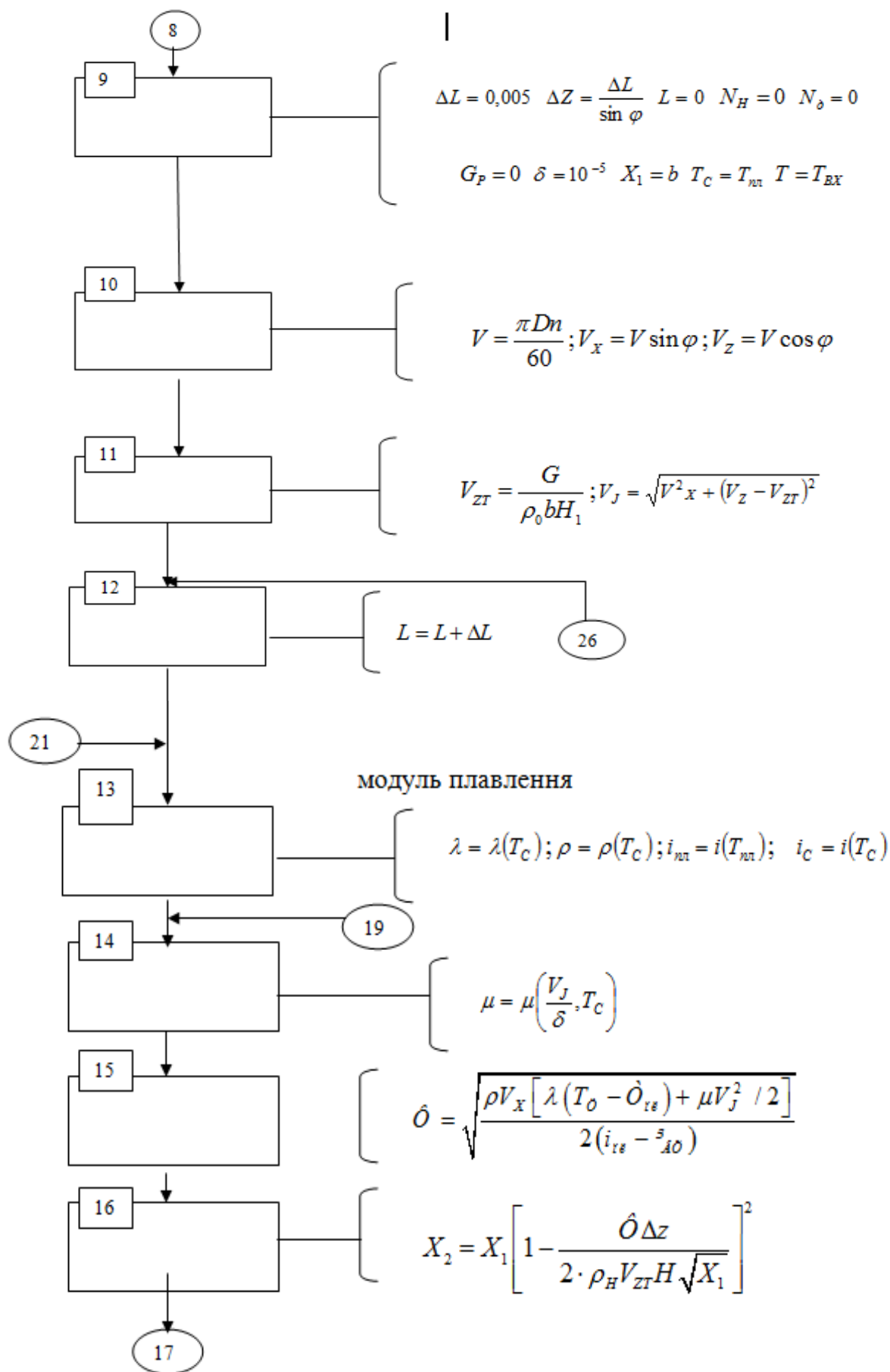
Всі проведені розрахунки відносяться до самих несприятливих режимів. Результати заносимо у таблицю Г.1.

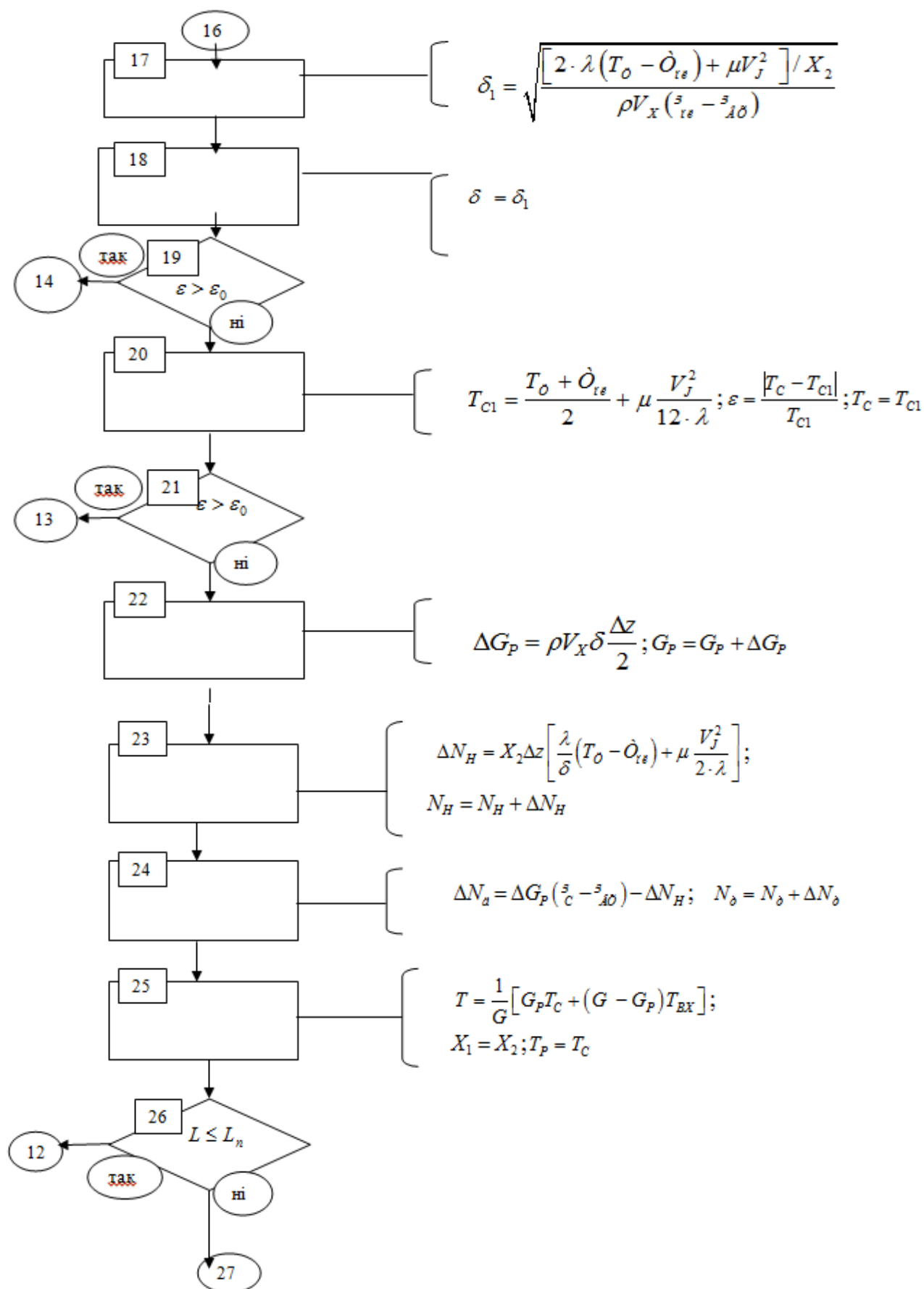
Таблиця А.5 – Значення граничних похибок

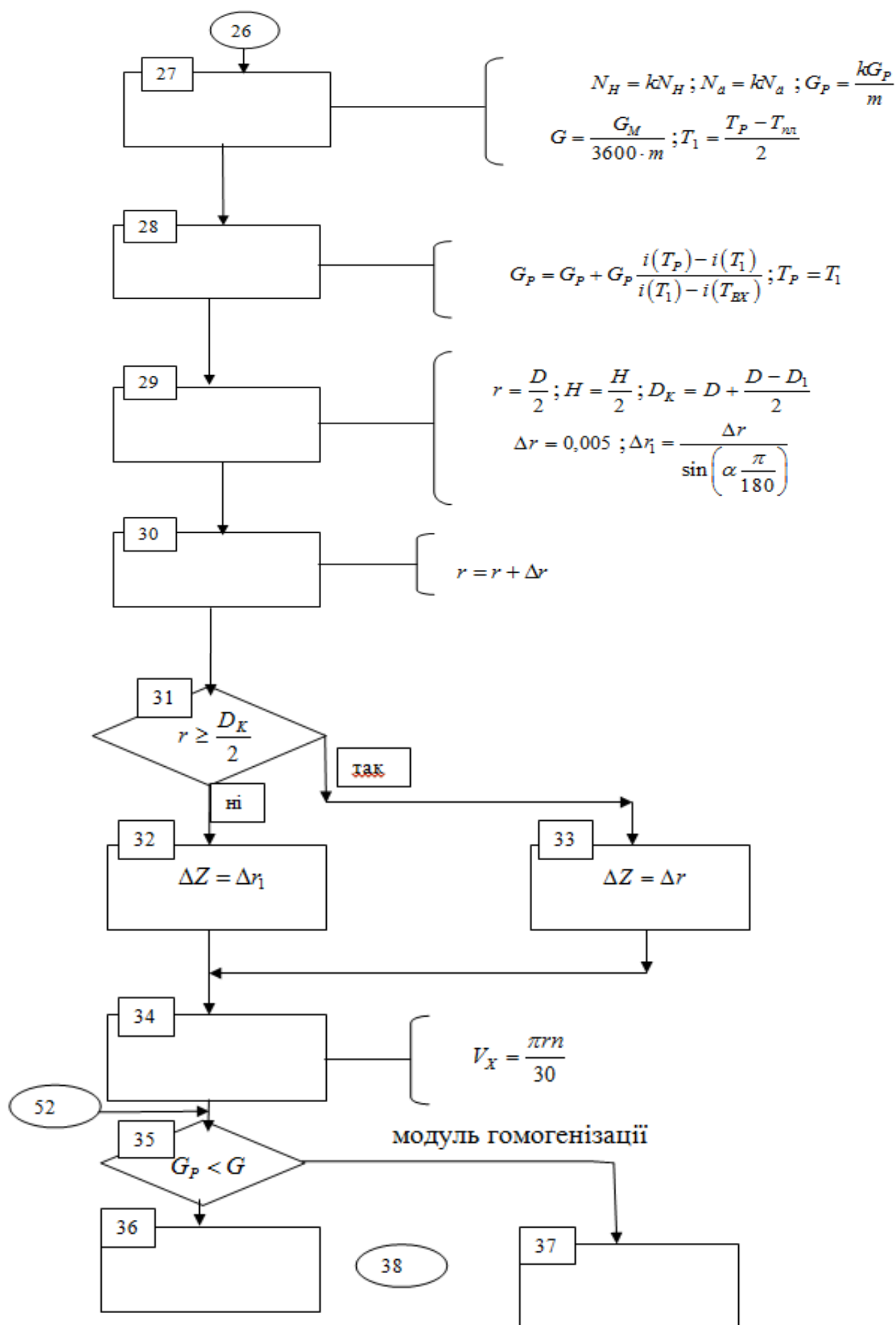
	Температура	Витрата
	розплаву	
Гранична відносна похибка	$\delta_{t_p} = 0,94\%$	$\delta_{G_p} = 0,71\%$

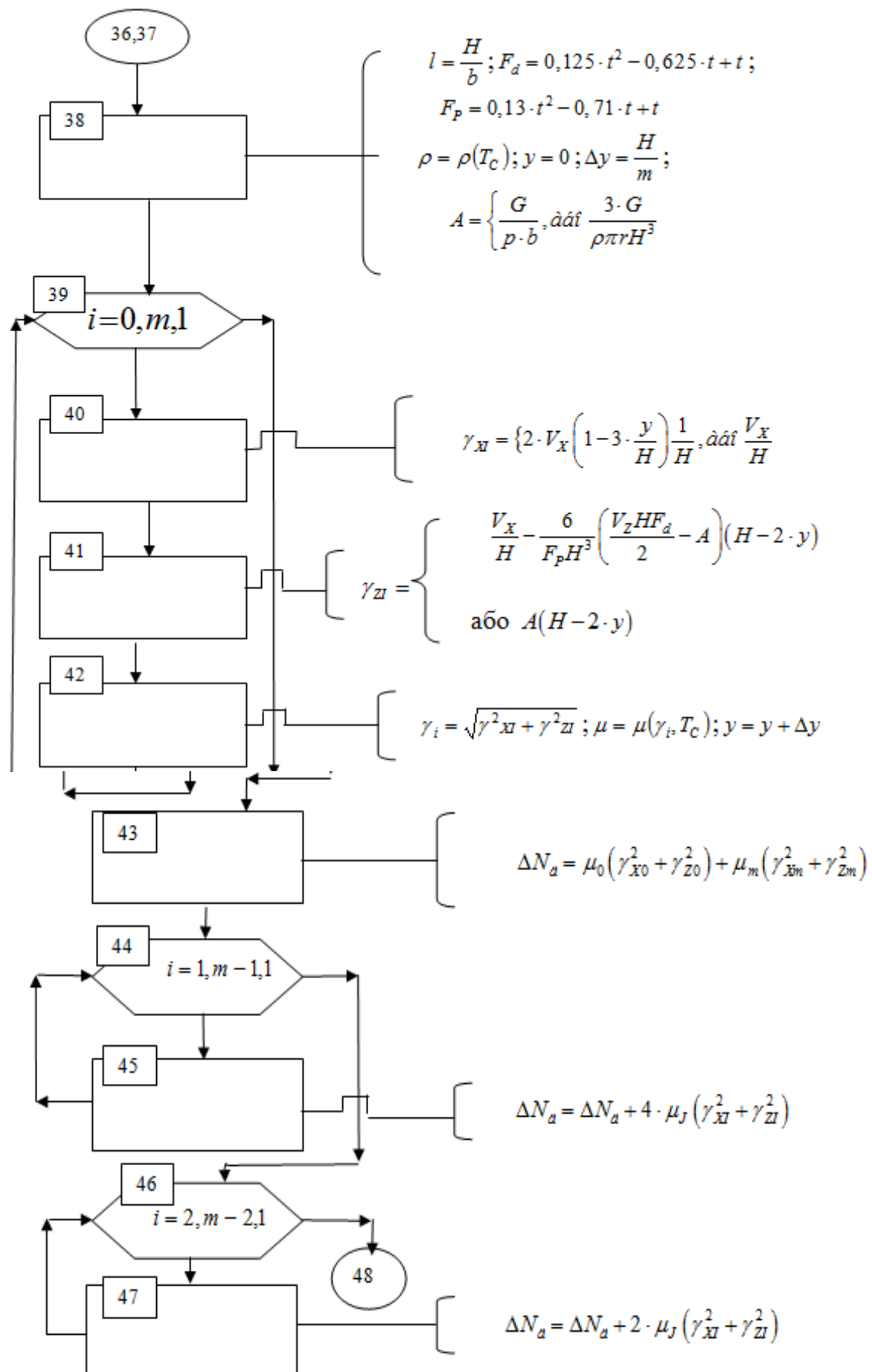
Додаток Б. Алгоритм та розрахунок дискового екструдера

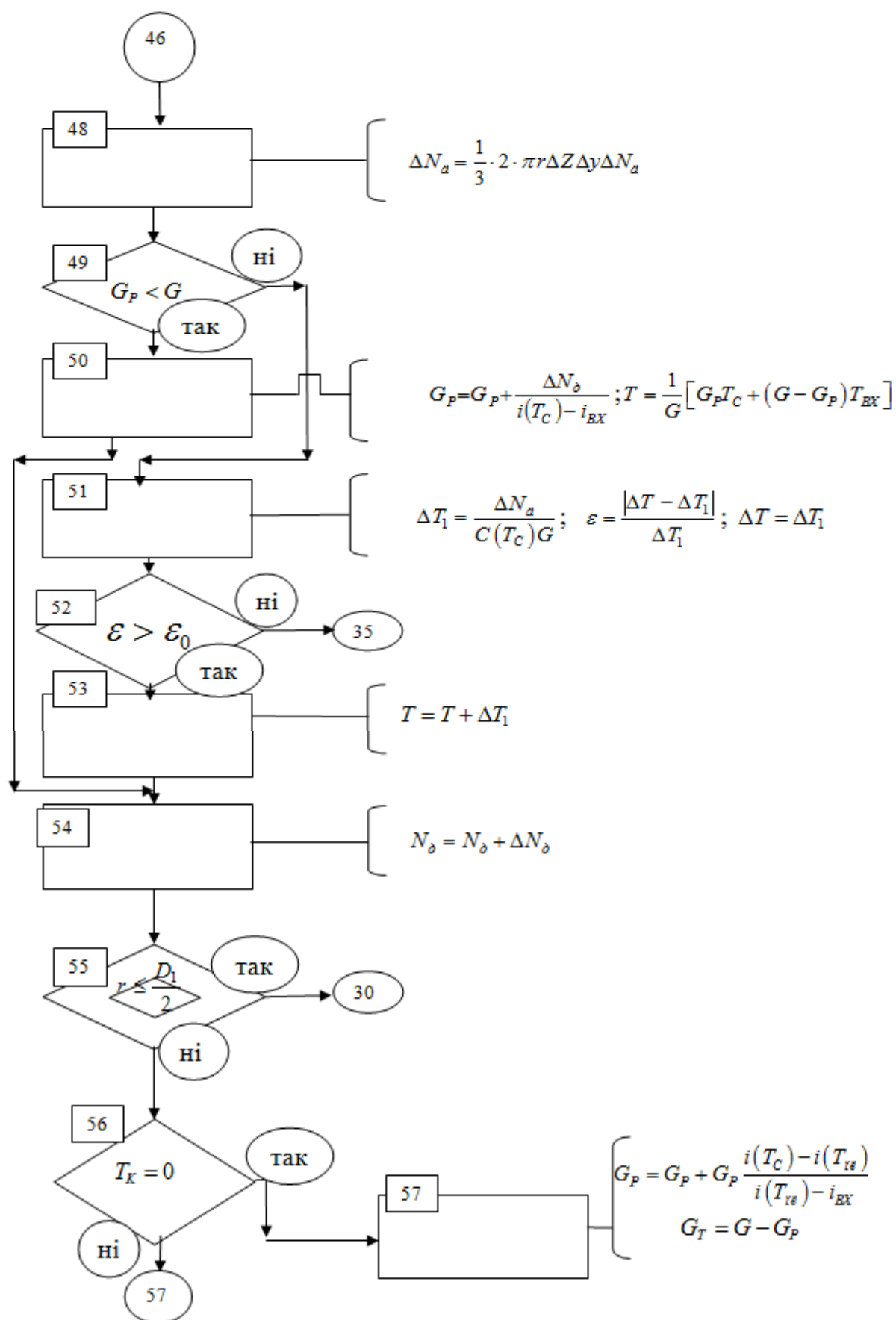


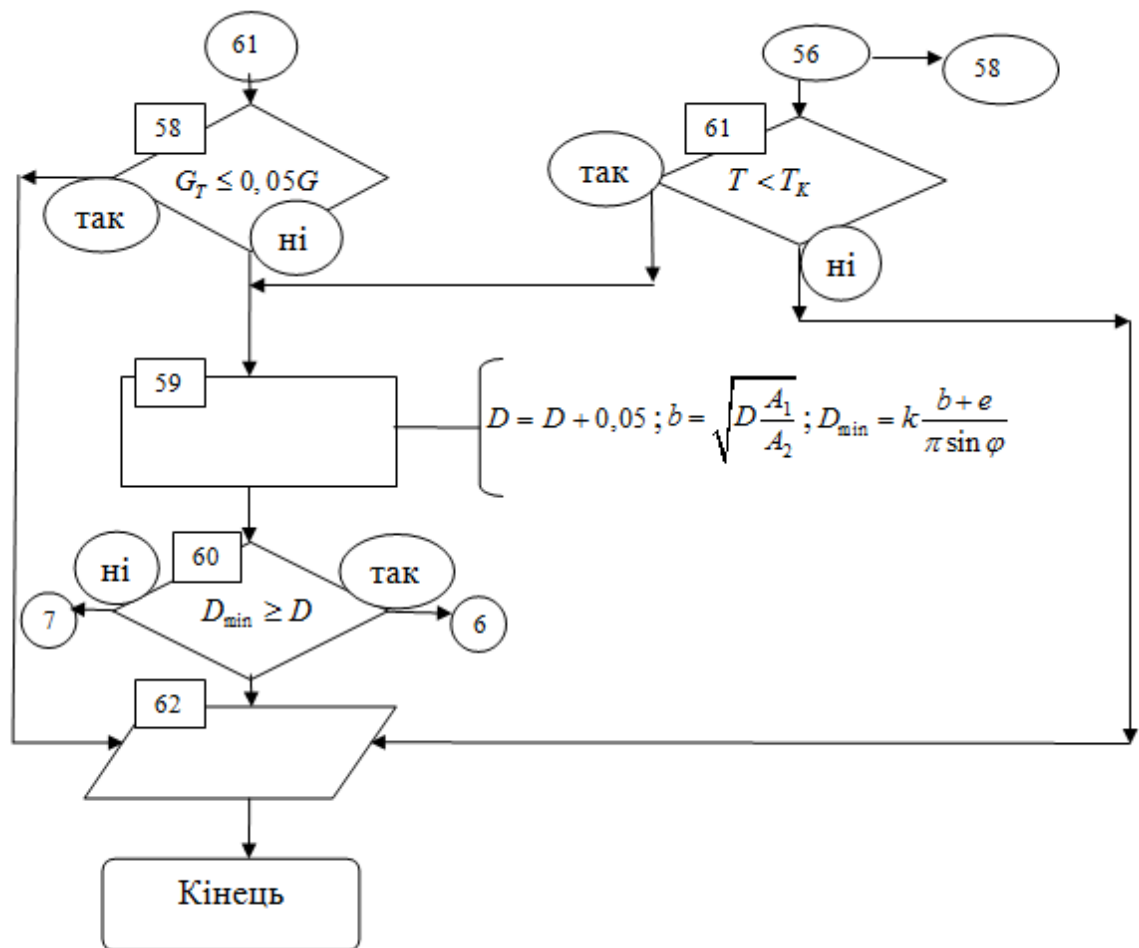












Опис алгоритму розрахунку дискового екструдера:

В блоці 1 вводяться початкові дані.

У блоках 2 і 3 визначаються геометричні параметри диска, а також коефі-цієнти A_1 і A_2 , а в блоці 4, відповідно, ширина каналу і мінімальне значення діа-метра 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 перерахову-ється, 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 обчис-люються 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 кое-фіцієнти 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 вуз-лових точках по координаті u (блоки 39 – 42), а потім в блоках 43 – 48 знаходяться 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 від-бувається перехід на блок 54.

Якщо процес плавлення закінчився, то уточнюється значення приросту тем-ператури 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 противному 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 прийма-ється 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 пере-хід 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 розра-хунок закінчується і виводяться його результати (блоки 61 і 62). В іншому випа-дку блок 61 здійснює перехід на блок 59 для продовження розрахунку при збіль-шеному діаметрі диска аналогічно тому, як це здійснюється при умові закінчення процесу плавлення.

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

Найменування	Позначення одиниці величини	Ідентифікатор
1	2	3
Перше наближення діаметра диска	м	d
Глибина каналу нарізки	м	hi
Ширина отвору подачі гранул	м	lb
Число заходів нарізки	-	zd
Діаметр вихідного отвору	м	d1
Число паралельних заходів	-	nz
Кут нахилу твірної диска	град	al
Кут гвинтової нарізки	град	f1
Зазор між дисками	м	h2
Продуктивність екструдера	кг/год	gm
Коефіцієнт заповнення каналів	-	fr
Ентальпія гранул	Дж/кг	ih
Температура гранул	°С	tb
Температура плавлення	°С	tp
Температура стінки циліндра	°С	tz
Температура розплаву на виході	°С	tk

Б.1 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 = .15: h1 = .008: lb = .09: zd = 4: d1 = .09: nz = 1: al = 60
 f1 = 17.7: h2 = .003: gm = 30: 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 плавления

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 " продуктивність масова     ###.# 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

```

Додаток В. Алгоритм та програма розрахунку шестеренного насосу

На рисунку В.1 приведено алгоритм розрахунку енергосилових параметрів (ЕСП) шестеренного насоса.

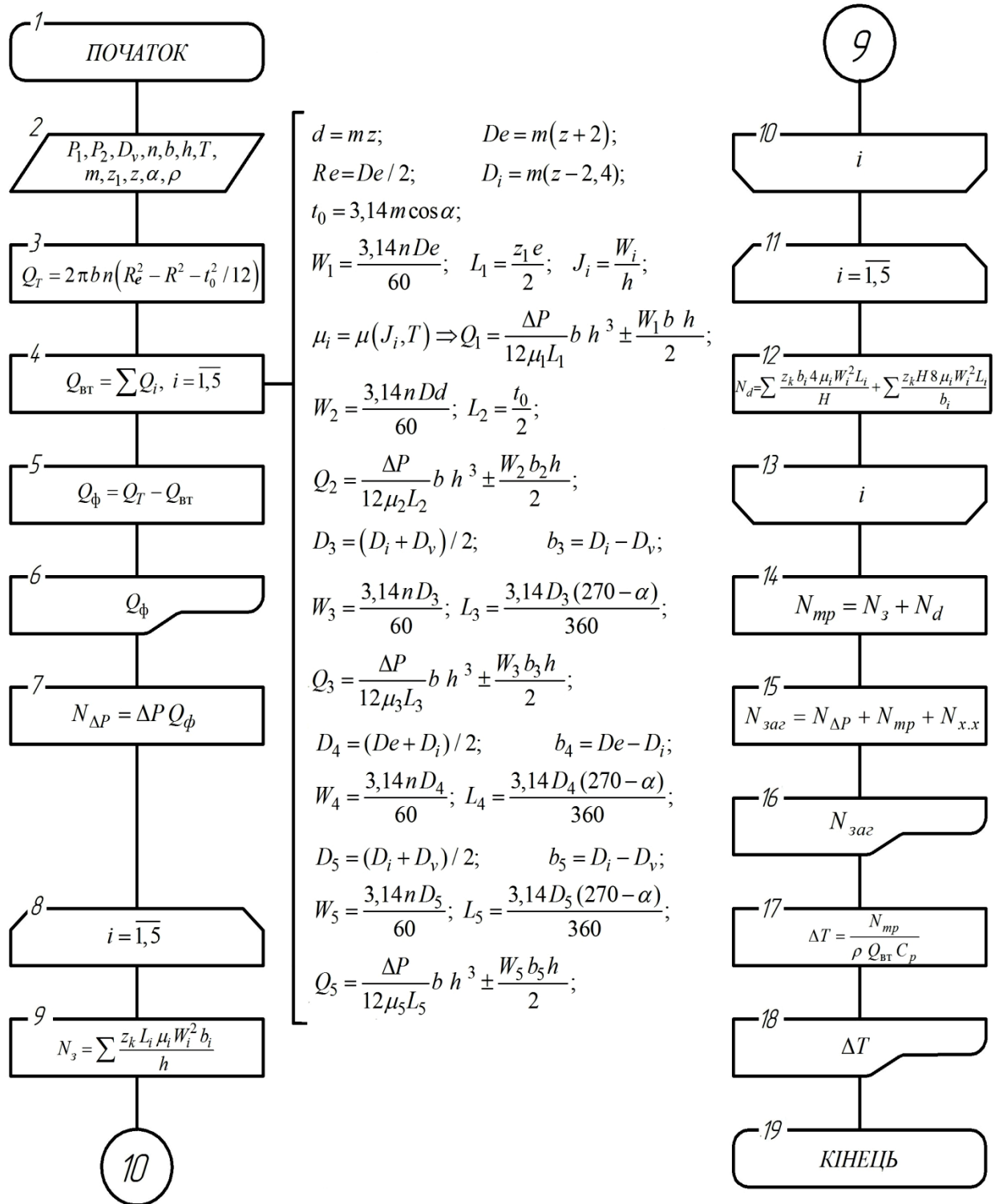


Рисунок В.1 – Алгоритмічна схема розрахунку ЕСП шестеренного насоса

Розглянемо алгоритм розрахунку докладніше. Згідно з розробленою математичною моделлю полімер, що надходить з дискового екструдера є повністю переробленим (розплавленим) та має потрібну температуру T . Так як швидкість насоса лежить в діапазоні, що не перевищує 50 об/хв, підбираємо насос, який забезпечить продуктивність – 40 кг/год. Насос може вибиратись як за модулем зачеплення так і за шириною зуба. Рационально збільшувати модуль зачеплення і зменшувати кількість зубів, що призведе до збільшення продуктивності майже пропорційно збільшенню модуля при тих самих габаритних значеннях насоса. Відношення ширини шестерні до її діаметра (b/d) лежить в межах 0,5 – 0,6. Підібравши насос маємо вихідні параметри: теплофізичні властивості полімеру, опір формувального інструменту, який необхідно подолати насосу та параметри шестеренного насоса (кількість зубів, ширину вінця шестерні, модуль зачеплення, кількість обертів).

Отже, у блоці 3 (рисунок В.1) обчислюється теоретична продуктивність Q_T , яка розраховується на основі теорії евольвентного зачеплення з урахуванням повного використання защемленого об'єму. В 4-му блоці розраховуються:

- Діаметри основного кола d , виступів зубів шестерень D_e та виступів зубів шестерень R_e , діаметр кола впадин зубів D_i , крок по основному колу t_0 , середній діаметр по третій групі зазорів D_3 ;

- швидкість обертання, градієнт швидкості зсуву, неньютонівська в'язкість полімеру μ та довжина першої групи зазорів, а також обчислюється втрата продуктивності Q_1 в першій групі зазорів;

- втрати продуктивності в другій, третій, четвертій та п'ятій групах зазорів відповідно. Визначається фактична продуктивність шестеренного насоса з урахуванням втрат по п'яти групам зазорів.

Далі у блоках 5 та 6 проводиться обчислення та виводиться значення фактичної продуктивності шестеренного насоса. Блок 7 розраховує гідравлічну потужність, яка витрачається на створення тиску та подолання

сил тертя в підшипниках. Циклічний блок 9 розраховує потужність, яка витрачається на зсув розплаву в зазорах (подолання сил тертя), 12-й блок розраховує потужність, що затрачається на циркуляцію розплаву в міжзубних впадинах шестерень. У блоці 15 розраховується сума попередньо визначених втрат потужності з урахуванням кількості робочих зубів що знаходяться в зачепленні z_k . Враховуючи втрати потужності на створення тиску та втрати на тертя в розплаві по всіх групах зазорів загальна потужність розраховується в блоці 15 та виводиться у блоці 16.

Блок 17 обчислює підвищення температури розплаву в НШ, 18 – виводить її значення.

В.1 Програма розрахунку енергосилових параметрів шестеренного насоса

CLS

FOR n = 10 TO 50 STEP 20

b = .025

m = .0035

z = 16

De = m * (z + 2)

Re = De / 2

d = m * z

r = d / 2

t = 8.85 * 10 ^ (-3)

Nh = 2

ro = 780

Cp = 2250

Qt = 2 * 3.14 * b * n / 60 * (Re ^ 2 - r ^ 2 - t ^ 2 / 12)

PRINT "Qt="; Qt

W1 = 3.14 * De * n / 60

h = 4 * 10 ^ (-6)

z1 = 11

```

e = .002
L1 = z1 * e / 2
P2 = 25 * 10 ^ 6
P1 = 5 * 10 ^ 6
tem = 180
j = 3.14 * De * n / 60 / h
mu1 = 40600 * j ^ (-7) * EXP(-.00998 * (tem - 120))
Q11 = ((P2 - P1) * b * h ^ 3) / (12 * mu1 * L) - W1 * b * h / 2
Q1 = Q11 * 2
PRINT "Q1="; Q1
Dd = .0509
W2 = 3.14 * Dd * n / 60
b2 = .0066
L2 = t / 2
j2 = 3.14 * Dd * n / 60 / h
mu2 = 40600 * j2 ^ (-7) * EXP(-.00998 * (tem - 120))
Q2 = ((P2 - P1) * b2 * h ^ 3) / (12 * mu2 * L2) + (W2 * b2 * h) / 2
PRINT "Q2="; Q2
Di = .047
Dval = .03
D3 = (Di + Dval) / 2
W3 = 3.14 * n * D3 / 60
b3 = Di - Dval
L3 = (3.14 * D3 * (360 - 90 - 15)) / 360
j3 = 3.14 * D3 * n / 60 / h
mu3 = 40600 * j3 ^ (-7) * EXP(-.00998 * (tem - 120))
Q33 = ((P2 - P1) * b3 * h ^ 3) / (12 * mu3 * L3) + (W3 * b3 * h) / 2
Q3 = Q33 * 2
PRINT "Q3="; Q3
D4 = (De + Di) / 2
W4 = 3.14 * n * D4 / 60

```

```

b4 = De - Di
L4 = (3.14 * D4 * (360 - 90 - 15)) / 360
j4 = 3.14 * D4 * n / h / 60
mu4 = 40600 * j4 ^ (-.7) * EXP(-.00998 * (tem - 120))
Q44 = ((P2 - P1) * b4 * h ^ 3) / (12 * mu4 * L4) - (W4 * b4 * h) / 2
Q4 = Q44 * 2
PRINT "Q4="; Q4
D5 = (Di + Dval) / 2
W5 = 3.14 * n * D5 / 60
b5 = Di - Dval
L5 = (3.14 * D5 * (360 - 90 - 15)) / 360 + Di / 2
j5 = 3.14 * D5 * n / h / 60
mu5 = 40600 * j5 ^ (-.7) * EXP(-.00998 * (tem - 120))
Q55 = ((P2 - P1) * b5 * h ^ 3) / (12 * mu5 * L5) - (W5 * b5 * h) / 2
Q5 = Q55 * 2
PRINT "Q5="; Q5
Qvt = Q1 + Q2 + Q3 + Q4 + Q5
Q = Qt - Qvt
PRINT "Q="; Q
Ndp = (P1-P2)*Q
FOR i=1 TO 5
Nz = (L(i) * mu(i) * W(i)^2 * b(i))/h
S = S + Nz
NEXT i
FOR i=1 TO 5
Nd = ((b(i) * 4 * mu(i) * W(i)^2 * L(i))/H) + ((H * 8 * mu(i) * W(i)^2 * L(i))/b(i))
S = S + Nd
NEXT i
Ntr = (Nz + Nd) * zk
Nzag = Ndp + Ntr + Nh
PRINT "Nzag="; Nzag

```

$\text{delT} = \text{Ntr} / (\text{ro} * \text{Qvt} * \text{Cp})$

PRINT "delT="; delT

NEXT n

END

Результати:

n=10

Qt= 0.0036487539

Q1=-2.486403E-04

Q2= 8.518337E-04

Q3= 8.109217E-04

Q4=-1.297889E-04

Q5=-7.919059E-05

Q= 0.00339264189

Nzag = 1,2143

delT = 0,2249

n=30

Qt= 0.0127458901

Q1=-7.650045E-04

Q2= 2.430331E-04

Q3= 2.423838E-04

Q4=-3.903665E-04

Q5=-2.382808E-04

Q= 0.01136565409

Nzag = 2,7321

delT = 0,4501

n=50

Qt= 0.0169448217

Q1=-1.286583E-03

Q2= 3.974626E-04

Q3= 4.034315E-04

Q4=-6.512171E-04

Q5=-3.975648E-04

Q= 0.01545775611

Nzag = 4,8571

delT = 0,6873

В таблиці В.1 наведені ідентифікатори до програма розрахунку енерго–силових параметрів шестеренного насоса

Таблиця В.1 – Ідентифікатори до програма розрахунку енерго–силових параметрів шестеренного насоса

Найменування	Позначення одиниці величини	Ідентифікатор	Одиниці виміру
Число обертів шестерень	n	n	об/с
Тиск на вході в насос	P_1	P1	МПа
Опір формуючого інструмента	P_2	P2	МПа
Модуль зачеплення зубів	m	m	м
Число зубів	z	z	
Продуктивність екструдера	Q	Q	кг/с
Кут зачеплення зубів	α	alfa	
Ширина вінця шестерні	b	b	м

Температура розплаву	T	t	$^{\circ}\text{C}$
Питома теплоємність розплаву	C_p	C_p	Дж/кг К
Швидкість зсуву	γ	j	с^{-1}
Діаметр основного кола	d	d	м
Діаметр виступів зубів	De	De	м
Діаметр впадин зубів	Di	Di	м
Діаметр вала	D_v	D_{val}	м
Висота зуба	h	h	м
Крок зубів	t_0	t_0	м
Довжина зазору	L	L	м
Продуктивність при повному використанні защемленого об'єму	Q_T	Q_t	кг/с
Густина полімеру	ρ	ρ_0	кг/м^3
В'язкість полімеру	μ	μ	Па с
Втрати продуктивності	Q_{BT}	Q_{vt}	кг/с
Гідравлічна потужність	$N_{\Delta P}$	N_{dp}	Вт
Швидкість розплаву в зазорі	W	W	м/с
Потужність, що витрачається на подолання сил тертя	N_3	N_z	Вт
Потужність, що витрачається на циркуляцію розплаву	N_d	N_d	Вт
Потужність холостого ходу	$N_{x.x.}$	N_h	Вт
Загальна потужність	N_{zag}	N_{zag}	Вт
Підвищення температури розплаву	ΔT	$\text{del}T$	$^{\circ}\text{C}$

Додаток Г. Алгоритм та програма розрахунку черв'ячного насосу

Алгоритм програми модуля гомогенізації

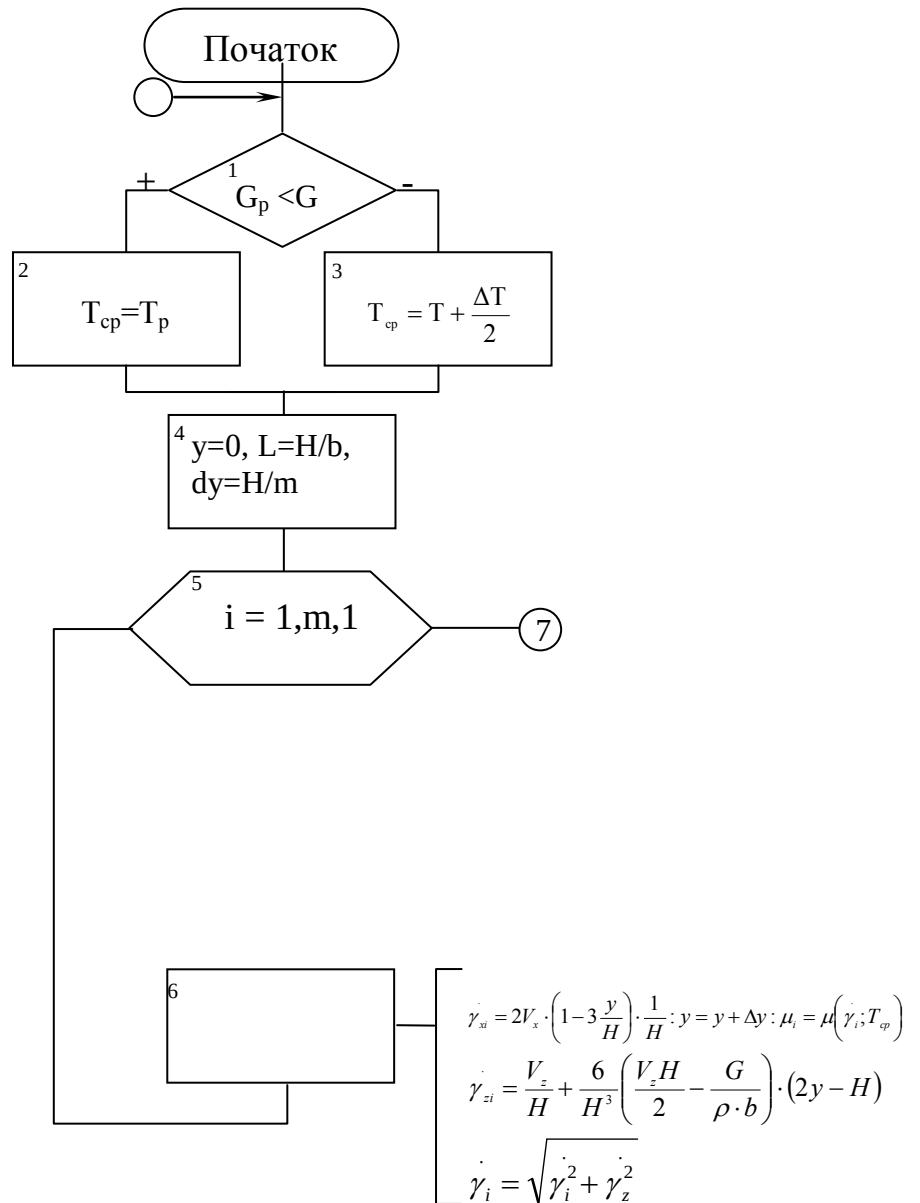


Рисунок Г.3 - Алгоритм програми модуля гомогенізації

Алгоритм програми модуля гомогенізації

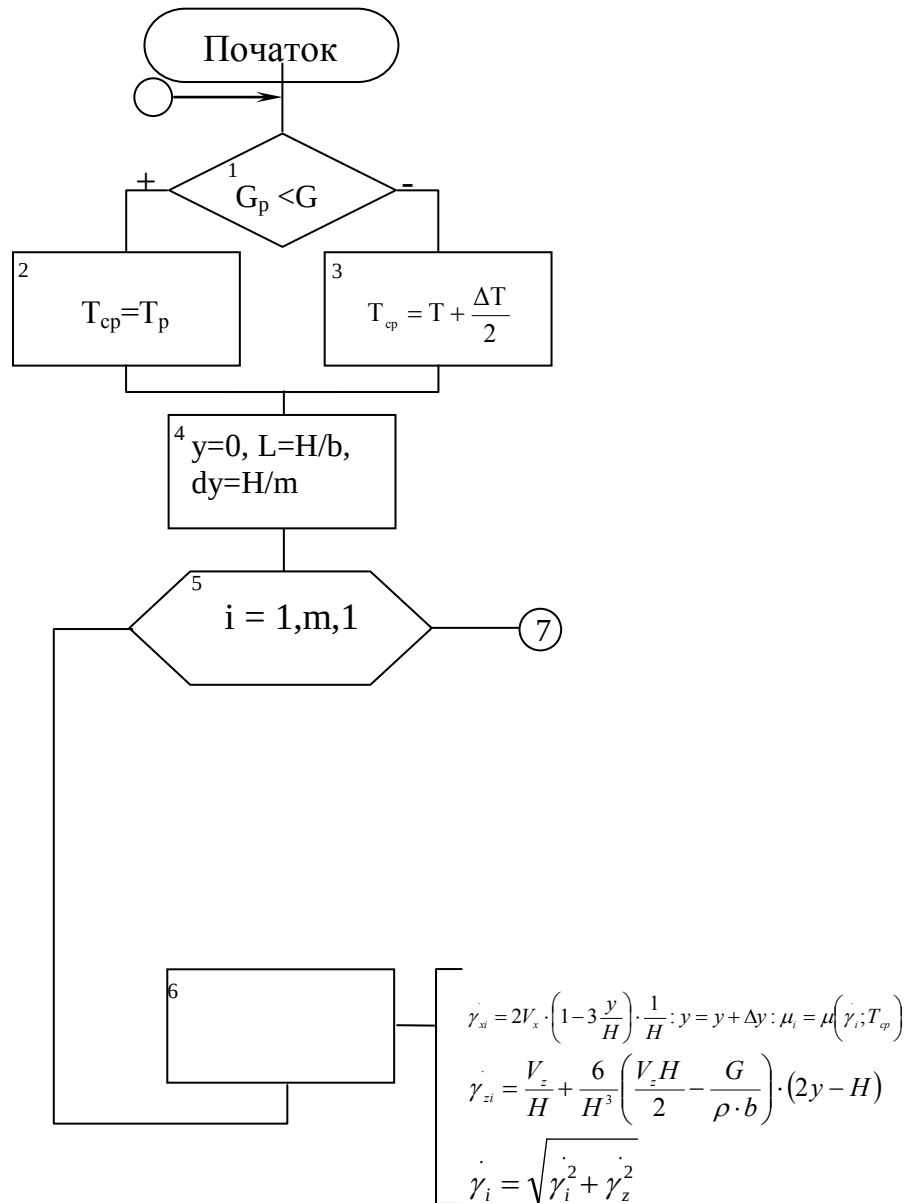


Рисунок Г.3 - Алгоритм програми модуля гомогенізації

Якщо в розплаві є тверді часточки, то середня його температура приймається рівній температурі розплаву на виході з зони плавлення (1 – 2), а в іншому випадку $T_{\text{ср}}$ розплаву приймають рівної значенню цієї температури на попередній ділянці, додаємо $\Delta T/2$, причому значення ΔT знаходиться методом послідовних наближень (1 – 3).

У блоках (4 – 6) знаходяться значення швидкості зсуву і в'язкості в умовних точках. У блоках (7 – 13) рахуємо ΔN_{θ} . Блок 14 визначає, чи маються в розплаві нерозплавлені часточки, якщо є, то в блоках (15 – 17) знаходиться витрата розплаву і його середньомасова температура. Якщо часточок нема, то в блоках (18 – 19) уточнюється значення ΔT . Якщо погрішність більше заданої, то блок 20 здійснює повернення на блок 1, для розрахунку наступного наближення. У іншому випадку в блоці 21 знаходиться температура розплаву на виході, а в 22 визначається сумарна потужність дисипації.

Таблиця ідентифікаторів програми розрахунку черв'ячного преса

№ п/ п	Найменування	Розмірн ість	Позначе ння	Ідентифі катор	Значен я
1	2	3	4	5	6
1	Діаметр черв'яка	м	D	D	0.063
2	Крок нарізки	м	S	S	0.063
3	Ширина гребеня	м	E	E	0.007
4	Координати кінця зони живлення	м	l_0	L0	0.635
5	Координати початку конуса черв'яка	м	l_1	L1	0.635
6	Глибина нарізки в зоні живлення	м	H1	H1	0.0065
7	Коефіцієнт тертя полімеру об стінку	—	f_r	FR	0.4
8	Відношення коефіцієнтів тертя	—	f	F	1.5
9	Насипна щільність гранул	кг/м ³	ρ_n	RON	520
10	Ентальпія гранул, що надходять, при T _{вх}	Дж/кг	ivx	IVX	41900
11	Масова продуктивність	кг/год	GM	GM	120
12	Початкове наближення числа оборотів	об/хв	n	n	120
13	Температура гранул, що надходять	°C	T _{вх}	T _{vx}	20
14	Температура плавлення	°C	T _{пл}	T _{пл}	120
15	Температура стінки мінімальна	°C	T _{ц min}	tc min	175
16	Температура стінки максимальна	°C	T _{ц max}	Tc max	180
17	Кінцева температура розплаву	°C	T _к	T _к	200
19	В'язкість, як $f\left(\dot{\gamma}, T\right)$	Па·с	$\mu\left(\dot{\gamma}, T\right)$	m	

Програма розрахунку черв'ячного екструдера

CONST pi = 3.141592653589793#

CLS

PRINT " Уведіть вихідні дані:"

PRINT #1, " Вихідні дані:"

INPUT "- діаметр черв'яка, м "; d

INPUT "- крок гвинтової нарізки, м"; s

INPUT "- ширина витка нарізки, м"; e

INPUT "- робоча довжина черв'яка, м"; l3

INPUT "- продуктивність насосу, кг/год"; gm

INPUT "- початкове наближення числа обертів. 1/хв"; n

INPUT "- найменша температура стінки циліндра, °C"; tmin

INPUT "- найбільша температура стінки циліндра, °C"; tmax

INPUT "- необхідна температура розплаву, °C"; tk

PRINT #1, "- діаметр черв'яка, м "; d

PRINT #1, "- крок гвинтової нарізки, м"; s

PRINT #1, "- ширина витка нарізки, м"; e

PRINT #1, "- робоча довжина черв'яка, м"; l3

PRINT #1, "- продуктивність насосу, кг/год"; gm

PRINT #1, "- початкове наближення числа обертів. 1/хв"; n

PRINT #1, "- найменша температура стінки циліндра, °C"; tmin

PRINT #1, "- найбільша температура стінки циліндра, °C"; tmax

PRINT #1, "- необхідна температура розплаву, °C"; tk

' ----- Теплофізичні властивості розплаву полімеру -----

DEF fnpo (T)

IF T<127 THEN fnpo = (-3E-09*T^6)+(1E-06*T^5)-
(0.0002*T^4)+(0.0123*T^3)-(0.4709*T^2)+(8.3756*T)+885.16

IF T>127 AND T<130 THEN fnpo = 11*T-547

IF T>130 AND T<135 THEN fnpo = ((-11.2)*T)+2339

IF T>135 THEN fnpo = (8E-06*T^5)-(0.0058*T^4)+(1.6783*T^3)-
(242,28*T^2)+(17445*T)-500329

END DEF

DEF fnlam (T)

IF T<127 THEN fnlam = (7E-14*T^6)-(7E-11*T^5)+(2E-0.8*T^4)-(2E-
06*T^3)+(9E-05*T^2)-(0,0024*T)+0,5239

IF T>127 AND T<130 THEN fnlam = -0.0093*T+1.5133

IF T>130 AND T<135 THEN fnlam = 0.0024*T-0.012

```

IF T>135 THEN fnlam = (2E-08*T^5)-(2E-05*T^4)+(0.0047*T^3)-
(0.6915*T^2)+(51.082*T)-1507.6
END DEF
DEF fncp (T)
IF T<125 THEN fncp =(3E-10*T^6)-(1E-07*T^5)+(2E-05*T^4)-
(0.0012*T^3)+(0.0417*T^2)-(0.7047*T)+6.6892
IF T>125 AND T<130 THEN fncp =(-0.1333*T^2)+39.1*T-2790.7
IF T>130 AND T<135 THEN fncp =(-7.22*T)+977.6
IF T>135 THEN fncp =(-3E-07*T^5)+(0.0002*T^4)-(0.0575*T^3)+(8.4337*T^2)-
(617.15*T)+18040
END DEF
DEF fni (T)
IF T<127 THEN fni =(5E-09*T^6)-(2E-06*T^5)+(0.0003*T^4)-
(0.0206*T^3)+(0.7793*T^2)-(11.847*T)+92.42
IF T>127 AND T<130 THEN fni =(52.9*T)-6178.8
IF T>130 THEN fni =(-2E-08*T^6)+(2E-05*T^5)-(0.0058*T^4)+(1.131*T^3)-
(124.03*T^2)+(7236.1*T)-174925
END DEF
DEF fnmi (ga, T) = 22539.76 * ABS(ga) ^ -.66 * EXP(-5.69 * (T - 160) / 433)

DIM gamx(11), gamz(11), mi(50), gam(50)
fi = ATN(s / (pi * d))
b = (s - e) * COS(fi)
g = gm / 3600
h11 = h1
dn = 5
j = 0
M3:
n = n + dn
gy = 60 * g / n
h = .004
dh = .0001

' -----Модуль гомогенізації -----
X1:
IF gp > .95 * g THEN tcp = Tt + dt / 2 ELSE tcp = tp
y = 0
m = 10
dy = h / 10
FOR i = 0 TO
gamx(i) = 2 * vx * (1 - 3 * y / h) / h
gamz(i) = vz / h + 6 * (vz * h / 2 - g / (pon * b)) * (2 * y - h) / h ^ 3
gam(i) = SQR(gamx(i) ^ 2 + gamz(i) ^ 2)
mi(i) = fnmi(gam(i), tcp)
y = y + dy
NEXT i

```

```

dng = mi(0) * gam(0) ^ 2 + mi(m) * gam(m) ^ 2
FOR i = 1 TO m - 1
  IF INT(i / 2) = i / 2 THEN aa = 4 ELSE aa = 2
  dng = dng + aa * mi(i) * gam(i) ^ 2
NEXT i
dng = b * dz * dy * dng / 3
IF gp < .95 * g THEN
  dgp = dng / (fni(tcp) - ibx)
  gp = gp + dgp
  Tt = (gp * tcp + (g - gp) * tbx) / g
ELSE
  dt1 = dng / (g * fncp(tcp))
  eps = ABS(dt - dt1) / dt1
  dt = dt1
  IF eps > .02 THEN GOTO X1

Tt = Tt + dt
END IF
ng = ng + dng
'-----

PRINT #1,
PRINT #1, USING " глибина каналу в зоні гомогенізації: ##.### мм"; h2 *
1000
PRINT #1, USING " число обертів черв'яка:      ###   1/хв"; n
PRINT #1, USING " потужність нагрівачів:      ##.### КВт"; nn / 1000
PRINT #1, USING " потужність дисипації:      ##.### КВт"; ng / 1000
PRINT #1, USING " температура розплаву полімеру:   ###.### °С"; Tt
CLOSE #1
END

```

Результати розрахунку черв'ячного екструдера

Вихідні дані:

діаметр черв'яка, м. .063

крок гвинтової нарізки, м. .063

ширина витка нарізки, м. .007

робоча довжина черв'яка, м. 0,45

продуктивність червячного насоса, кг/год 30

початкове наближення числа обертів. 1/хв 30

найменша температура стінки циліндра, °С 175

найбільша температура стінки циліндра, °С 180

необхідна температура розплаву, °С 200

Результати розрахунку екструдера:

глибина каналу в зоні гомогенізації: 3.217 мм

число обертів черв'яка:	45 1/хв
потужність нагрівачів:	3 Квт
потужність дисипації:	4 Квт
температура розплаву полімеру:	196 °С

Додаток Д. Перелік та копії опублікованих праць

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ



1. **Новий ресурсоенергоощадний процес екструзії полімерів**
Швед М.П. канд. техн. наук, доц., Швед Д.М., інж., Великоіваненко С.П. магістрант.// Науковий журнал «Молодий вчений», Україна, 2018 р., с. 772-774
2. **Обґрунтування використання шестеренного насосу при каскадній екструзії полімерів** Швед М.П. канд. техн. наук, доц., Швед Д.М., Великоіваненко С.П. магістрант.// // Науковий журнал «Молодий вчений», Україна, 2018 р., с. 40-43
IZlgIbgZdhjbkgfh^ełZ\bgZoh^b
3. **Патент №11285 Каскадний дисково-шестеренний** Швед М.П., Швед Д.М., Великоіваненко С.П., зареєстровано 20.11.2017
LabfZljZebgZmdh\bodhgnjgpc
4. **Процес дозування при каскадній екструзії полімерів** /доц., к.т.н. Швед М.П., Великоіваненко С.П // Збірник тез доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсозберігаючі технології та обладнання» - 2016 - с. 38-39.
5. **Обґрунтування застосування каскадної схеми екструзії полімерів.** /доц., к.т.н. Швед М.П., інж Швед Д. М., Великоіваненко С.П., // Збірник тез доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсозберігаючі технології та обладнання» - 2017 р., с. 15-16.
6. **Тиск та коливання продуктивності при каскадній екструзії полімерів** // /доц., к.т.н. Швед М.П., інж Швед Д. М., Великоіваненко С.П., // Збірник тез доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсозберігаючі технології та обладнання» - 2017 р. с. 11-12
7. **Обґрунтування використання шестеренного насосу при каскадній екструзії полімерів** // /доц., к.т.н. Швед М.П., інж Швед Д. М., Великоіваненко С.П.,// Збірник тез доповідей XIV міжнародної науково-

практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених
«Ресурсозберігаючі технології та обладнання» - 2018 р. с 29-30

УДК 66.045

ПРОЦЕС ДОЗУВАННЯ ПРИ КАСКАДНІЙ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ

магістрант Великоіваненко С.П., к.т.н., доц. Швед М.П.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

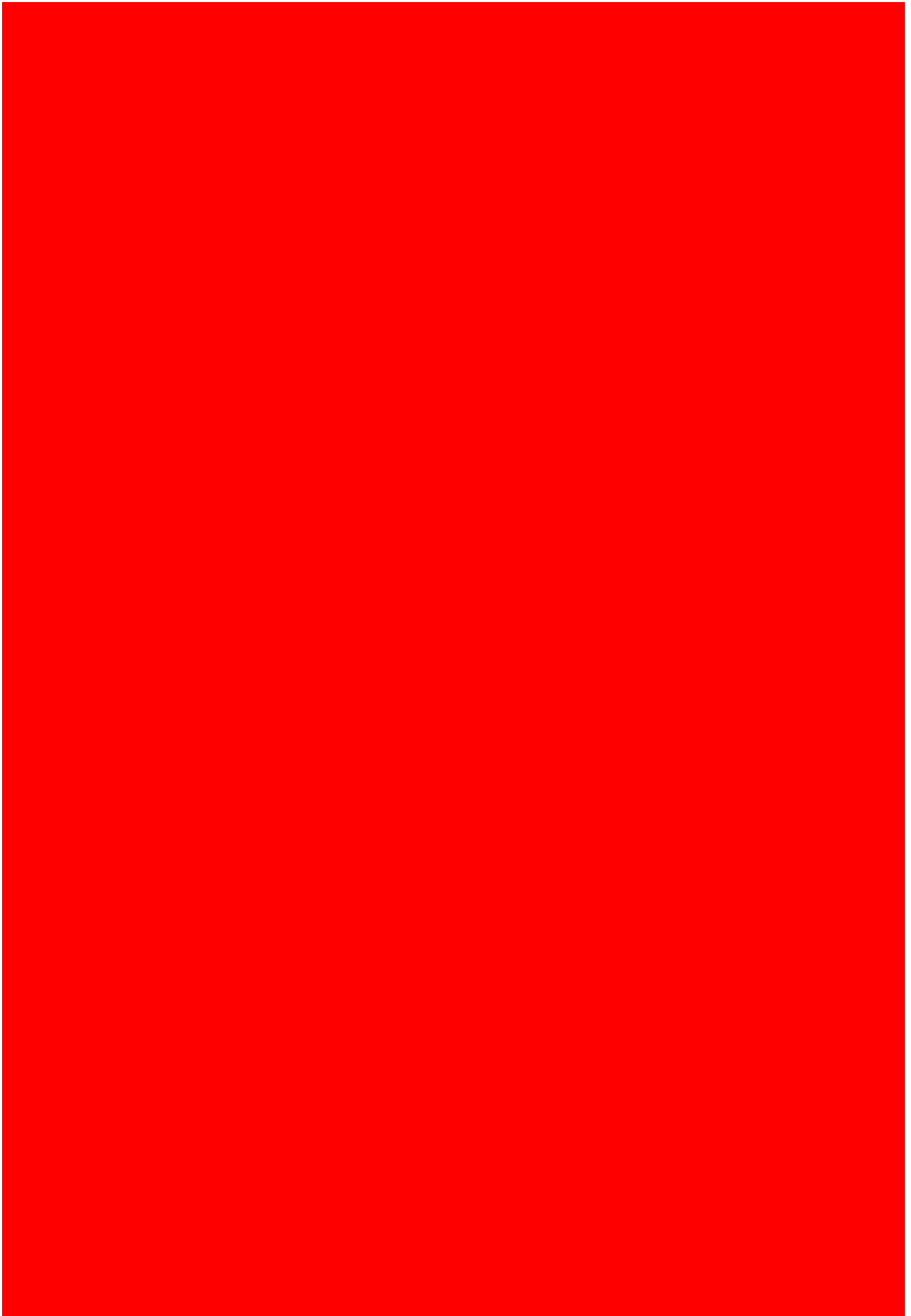
Екструзія — процес отримання виробів шляхом екструдювання матеріалу через формувальний отвір у матриці. Зазвичай використовується у виробництві будівельних матеріалів, виробів з полімерних матеріалів, конструкційних металевих профілів а також, в харчовій промисловості, шляхом протискування пластифікованого матеріалу через отвір екструзійної головки преса.

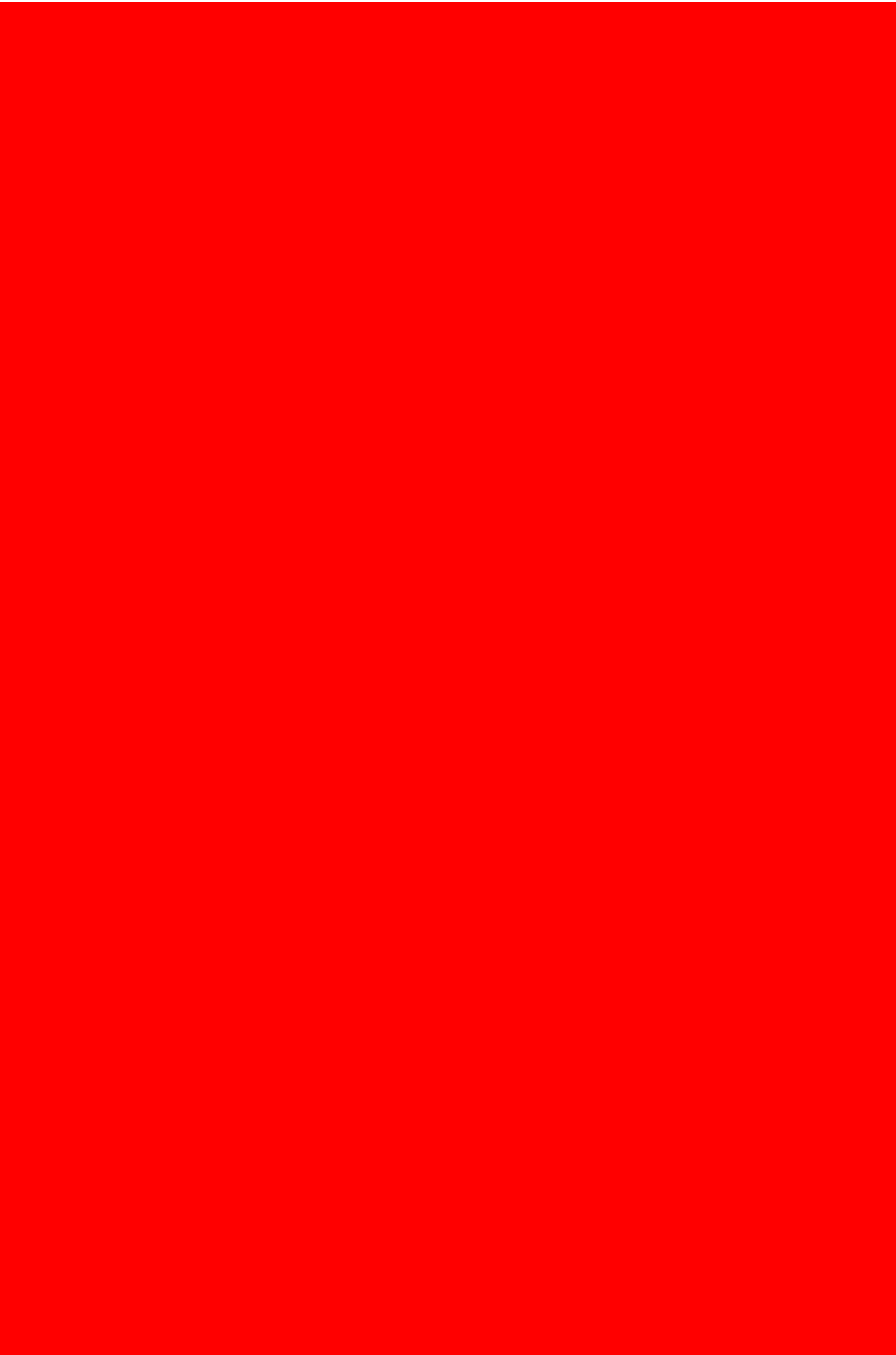
У промисловості переробки полімерів методом екструзії виготовляють різні погонні вироби, такі, як труби, листи, плівки, оболонки кабелів, профілі тощо. Основним технологічним устаткуванням для переробки сировини у вироби методом екструзії є шнекові та дискові екструдери.

На сьогоднішній день основною сировиною для виробництва полімерної плівки є поліолефіни (поліетилен і поліпропілен), які займають ключові позиції (63%) у загальному обсязі виробництв полімерів, який за 2014 р. становив майже 220 млн. т. При цьому доля поліетилену склала 70,1 млн. т, а поліпропілену 39,1 млн. т. [1]

Високі обсяги виробництва та переробки полімерних матеріалів вимагають від виробників створювати економічні високопродуктивні машини для переробки пластичних мас. Останніми роками основна увага при створенні екструзійних процесів приділялася підвищенню продуктивності на якій базуються основні показники. Одним із варіантів покращення цих показників є підвищення ресурсоенергозбереження.

Найбільшого поширення набули одно черв'ячні екструдери, в яких одночасно виконується наступні операції: живлення, стискання, плавлення твердого полімеру, змішування, створення тиску та дозування розплаву. Всі ці процеси пов'язані між собою і виконуються одним робочим органом — черв'яком, що ускладнює оптимізацію процесів, так як зміна параметрів в якійсь





**ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ЗАВАНТАЖУВАЛЬНО
ПЛАСТИКУВАЛЬНОЇ ЗОНИ ДИСКОВОГО ЕКСТРУДЕРА
ПРИ КАСКАДНІЙ ЕКСТРУЗІЇ**

студент Кеба О.В., к.т.н., доц. Швед М.П., інж. Швед Д.М.

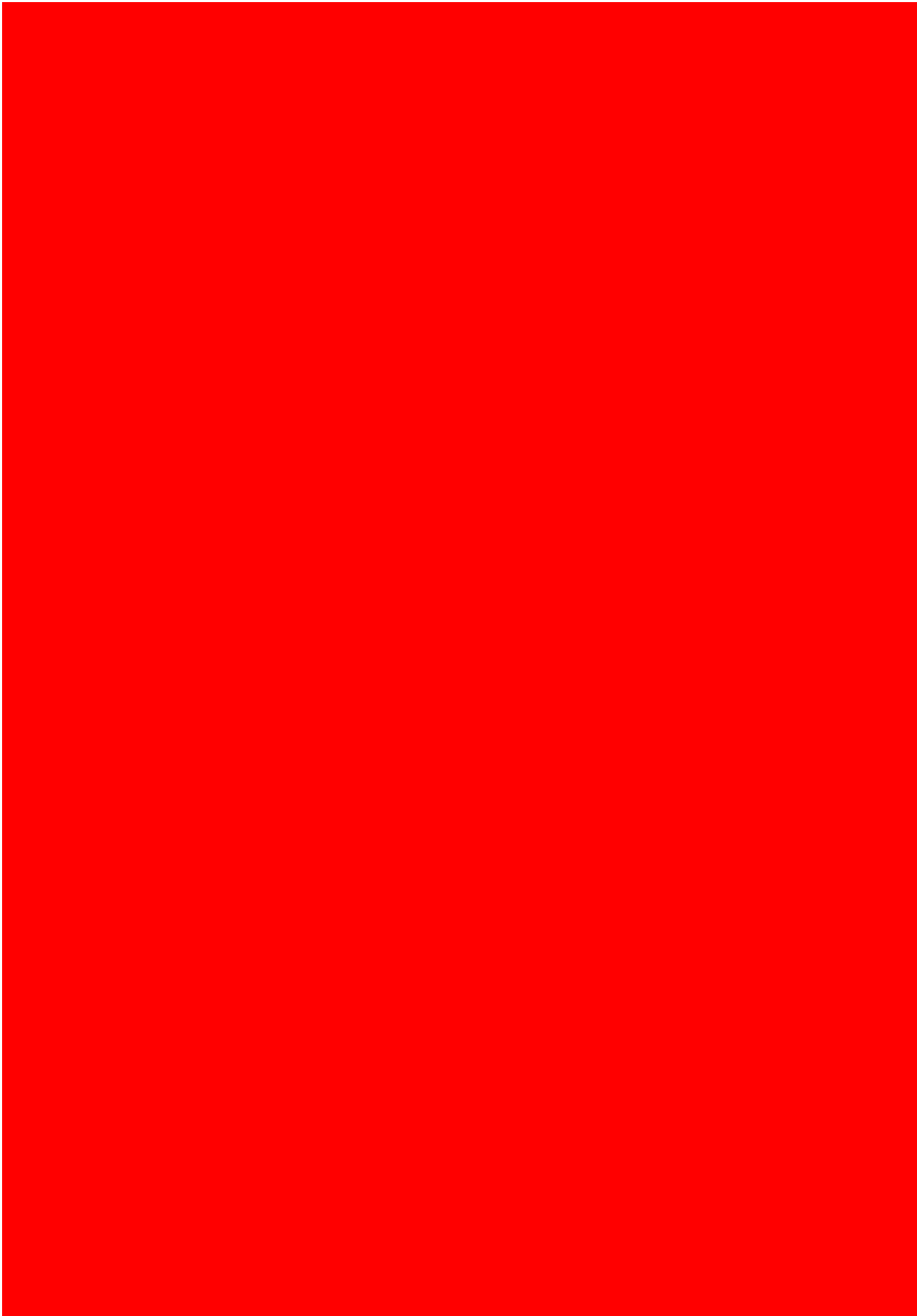
Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Каскадні дисково-шестеренні екструдери вирізняються високим змішувальним ефектом і відносно низькою енергоємністю. Вони також характеризуються незначним часом перебування матеріалу в зоні переробки, суттєвими регульованими швидкостями зсуву, легкістю забезпечення економічного, адіабатичного режиму процесу екструзії та ефективною переробкою вихідної сировини.

Основна ідея створення такого екструдера – це гнучке керування процесом та ресурсоенергозбереження. Однією з умов надійної роботи каскадних екструдерів є створення і підтримування тиску між шестеренним насосом і розплавлювачем гомогенізатором з метою повного заповнення міжзубних впадин шестерень та забезпечення надійних процесів плавлення та гомогенізації в розплавлювачі гомогенізаторі. Це значить, що завантажувально пластикувальна зона (ЗПЗ) дискового екструдера повинна створювати достатній надлишковий тиск. В практичних умовах, це досягається шляхом регулювання частоти обертання дискового екструдера. Розглянемо процес який відбувається в ЗПЗ дискових екструдерах. Гранули які надходять із дозатора рівномірно розподіляються між багато західною гвинтовою нарізкою в кінці якої змішуються з часткою розплаву і поступають на доплавлення в зону гомогенізації.

Дослідження процесів які відбуваються в ЗПЗ приводилися різними авторами [1,2]



ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСУ ПРИ КАСКАДНІЙ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ

Швед М.П., Швед Д.М., Великоіваненко С.П.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

В даній статті наведено аналіз процесу дозування при каскадній екструзії полімерів. Розглянуто основні параметри, які характеризують процес екструзії. Наведено рівняння продуктивності черв'ячного екструдера і екструдера з шестеренним насосом. Проаналізовано коливання тиску та продуктивності в класичному черв'ячному екструдері і в екструдері з шестеренним насосом.

Ключові слова: екструзія, полімер, гомогенізація, черв'ячний екструдер, шестеренний насос.

Постановка проблеми. Зростаючі обсяги виробництва та переробки пластичних мас вимагають від галузі полімерного машинобудування оптимізації процесів та ширшого використання ресурсоенергозберігаючих технологій.

Найбільш поширеною залишається одночерв'ячна екструзія. При цьому одночасно виконуються наступні операції: живлення, стискання, плавлення твердого полімеру, змішування, створення тиску та дозування розплаву. Всі названі процеси тісно пов'язані між собою і виконуються в черв'ячному екструдері одним робочим органом – черв'яком, що ускладнює можливість їх оптимізації. Така конструкція екструдера має суттєвий недолік, через наявність коливань тиску, а відповідно і продуктивності, які призводять до вимушеного встановлення завищених допусків на геометричні розміри виробів, що веде до перевитрати сировини та енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі математичні моделі, що описують процес екструзії, представляють собою моделі з підмоделями зон живлення, плавлення та гомогенізації. Розрахунок екструзійної машини ведеться по кожній зоні окремо, однак, це дуже приблизний розрахунок, так як в реальності процеси в цих зонах протікають як одна ціла недостатньо контрольована операція, що не дає можливості встановити чіткі граничні умови для кожної зони.

Якщо процес переробки розділити на незалежні операції та сконструювати машину таким чином, щоб кожна із них мала автономне керування то такий підхід дозволив би вирішити проблему, як точності розрахунку екструдера, так і гнучкого керування процесом екструзії.

Систематизованим дослідженням процесів екструзії полімерних матеріалів приділялась значна частина уваги зарубіжними та вітчизняними вченими, такими як: Д.М. Мак-Келві, З. Тадмор, К. Раувендааль, Р.В. Торнер, В.С. Ким, Ю.Ю. Лукач, Л.Б. Радченко, та інші [1-5]. В дослідженнях цих авторів основна увага була спрямована на розгляд фізичних та математичних моделей процесів черв'ячної екструзії з метою отримання залежностей для визначення продуктивності та енергосилових параметрів екструзійних машин і майже не приділялась увага вивченню проблеми коливання продуктивності на виході екструдера, економії сировини та енергії.

На сьогоднішній день питання мінімізації перевитрат ресурсів та енергії є актуальними, тому при дослідженні процесів черв'ячної екструзії,

пріоритетним є створення нових екструзійних процесів та обладнання при максимальному заощадженні матеріальних та енергетичних ресурсів [6, 7].

Аналіз існуючих технічних умов, регламентів та стандартів на виготовлення полімерних виробів, таких як труби, плівки, листи та інше, показав [8, 9], що допуски на їх основні геометричні розміри часто на 10-15% перевищують номінально необхідні. Одним із шляхів заощадження ресурсів та енергії при екструзії полімерів могло б бути зменшення допусків на геометричні розміри. Дослідження та аналіз процесів одночерв'ячної екструзії показали, що процеси дозування в таких екструдерах в значній мірі чутливі до коливань тиску, що призводить до коливання продуктивності, які і є основною причиною встановлення завищених допусків на геометричні розміри. Усунення коливань продуктивності дало б змогу зменшити такі допуски, що призвело б до суттєвої економії полімеру і енергії, а також знизило б навантаження на екологію, за рахунок зменшення кількості сировини яка потребує утилізації.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Невирішеною залишається проблема коливань тиску та продуктивності в черв'ячному екструдері, які викликані флуктуацією параметрів сировини на вході в екструдер, нестабільністю процесів в попередніх зонах живлення та плавлення, відносно нестабільністю температури та в'язкості в різних зонах екструдера та формуючого інструменту.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є визначення та аналіз продуктивності та її коливання в класичному черв'ячному екструдері та в тому ж екструдері, який оснащено дозуючим шестеренним насосом.

Виклад основного матеріалу дослідження. В черв'ячних екструдерах зона гомогенізації та дозування побудовані таким чином, що для створення тиску фактично використовується в'язкісний гвинтовий насос (черв'ячний насос).

Одними із найважливіших параметрів при екструзії полімерів є тиск та продуктивність на виході з екструдера для визначення яких приймаються відповідні припущення: плоско-щільовий канал, режим стаціонарний, ширина плоского каналу набагато більша його висоти. Тоді продуктивність зони дозування з таким в'язкісним насосом може бути визначена за формулою [1-5]

Додаток Ж. Специфікація до складального креслення