

ЗАТВЕРДЖЕНО  
Наказ Міністерства освіти і науки,  
молоді та спорту України  
29 березня 2012 року № 384

Форма № Н-9.02

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

**Пояснювальна записка**

до роботи

Магістр

(освітній рівень)

на тему Дослідження роботи екструдера з модернізацією головки в технологічній лінії для виготовлення вуглепластикових труб

Виконав: студент VI курсу,  
групи 602-МММ  
спеціальності 133 – Галузеве машинобудування  
(шифр і назва  
напряму підготовки, спеціальності)

Остапенко Б.О.  
(прізвище та ініціали)

Керівник Шаповал М.В.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент Ксьонз В.Г.  
(прізвище та ініціали)

Полтава - 2023 року

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Навчально-науковий інституту інформаційних технологій та робототехніки  
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

**Дослідження роботи екструдера з модернізацією головки в  
технологічній лінії для виготовлення вуглепластикових  
труб**

**Кваліфікаційна магістерська робота**

**Лист затвердження**

**ГММ 602-мММ.014-00.00.000 ДП - ЛУ**

Розробив магістрант групи 602-мММ

 Б.О. Остапенко  
„29” 12 2023р.

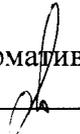
Керівник к.т.н., доцент

 М.В. Шаповал  
„29” 12 2023р.

Технологічний контроль к.т.н., доцент

 О.С. Васильєв  
„29” 12 2023р.

Нормативний контроль к.т.н., доцент

 О.С. Васильєв  
„29” 12 2023р.

**ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедрою  
галузевого машинобудування та  
мехатроніки  
к.т.н., доцент



О.В. Орисенко

№ лістки	Формат	Позначення	Найменування	Кіл. листів	№ екз.	Примітки
1						
2			<u>Документація загальна</u>			
3						
4			<i>Вперше розроблена</i>			
5						
6	A4	ГММ 602-МММ.014-00.00.000ТЗ	Технічне завдання	1	-	
7	A4	ГММ 602-МММ.014-00.00.000А	Анотація	4	-	
8	A4	ГММ 602-МММ.014-00.00.000ПЗ	Пояснювальна записка	78		
9						
10			<u>Документація наукова</u>			
11						
12			<i>Вперше розроблена</i>			
13						
14	A4	ГММ 602-МММ.014-00.00.000ПЗ	Технічні характеристики екструдера		-	
15						
16						
17			<i>Розділ науковий</i>			
18						
19	A4	ГММ 602-МММ.014-00.00.000ПЗ	Вибір технічного рішення та обґрунтування запропонованої модернізації		-	
20						
21						
22						
23			<i>Розділ науковий</i>			
-						

				<b>ГММ 602-МММ.014-00.00.000 ВР</b>			
Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Дослідження роботи екструдера з модернізацією головки в технологічній лінії для виготовлення вуглепластикових труб	Літ.	Лист	Листів
Зроб.	Остапенко	Б.С.	29.12.		Н		1
Зрев.	Шоповал	С.С.	29.12.	Відомість кваліфікаційної роботи	Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІТР, 2023р.		
Знтр.	Васильєв		29.12.				
Згв.	Орисенко		29.12.				

№ строки	Формат	Позначення	Найменування	Кіл. листів	№ екз.	Примітки
1						
2	A4	ГММ.602МММ.014-00.00.000ПЗ	Визначення, що підтверджують		-	
3			працездатність та надійність			
4			екструдера			
5						
6			Розділ науковий			
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
33						
34						
35						
36						
37						
38						
39						
40						
41						
42						
43						
44						
45						
46						
47						
48						
49						
50						
51						
52						
53						
54						
55						
56						
57						
58						
59						
60						
61						
62						
63						
64						
65						
66						
67						
68						
69						
70						
71						
72						
73						
74						
75						
76						
77						
78						
79						
80						
81						
82						
83						
84						
85						
86						
87						
88						
89						
90						
91						
92						
93						
94						
95						
96						
97						
98						
99						
100						

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра, циклова комісія Галузевого машинобудування та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри галузевого  
машинобудування та мехатроніки  
О.В. Орисенко  
"04" 09 2023 року

## **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

**Остапенку Богдану Олександровичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

. Тема проекту (роботи) Дослідження роботи екструдера з модернізацією оловки в технологічній лінії для виготовлення вуглепластикових труб

рівник проекту (роботи) Шаповал Микола Віталійович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом вищого навчального закладу від 04.09.2023 року № 986-ф.а.

. Строк подання студентом роботи " 20 " грудня 2023 року.

Вихідні дані до проекту (роботи) Технічні параметри екструдера з модернізацією оловки.

Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно зробити) Вступ. Розділ 1. Технічні характеристики екструдера. Розділ 2. Вибір технічного рішення та обґрунтування запропонованої модернізації. Розділ 3. Визначення, що підтверджують працездатність та надійність екструдера. Загальні висновки. Список використаних джерел.

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) резюме для наочного представлення результатів досліджень (19 листів А4).

### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 04.09.2023 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Літературний огляд	09.10.2023 р.	
2	Обґрунтування вибраної теми	23.10.2023 р.	
3	Наукові дослідження за вказаною темою, розробка наукових плакатів	10.11.2023 р.	
4	Представлення готової роботи на кафедрі	20.12.2023 р.	

Здобувач вищої освіти Б. Ону  
(підпис) Остапенко Б.О.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи Ш. Шаповал  
(підпис) Шаповал М.В.  
(прізвище та ініціали)

дата  
завдання  
прийняв

## АНОТАЦІЯ

Остапенко Б.О. Дослідження роботи екструдера з модернізацією головки в технологічній лінії для виготовлення вуглепластикових труб. – Рукопис.

Кваліфікаційна магістерська робота на здобуття ступеня вищої освіти за спеціальністю 133 – "Галузеве машинобудування" – Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", Полтава, 2023.

Примітка

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є дослідження конструкції, призначення та принципів роботи екструдерної головки для здійснення її модернізації. Принцип роботи екструзійної машини розглянуто на прикладі його застосування в технологічній лінії виготовлення труб. Проведено аналіз технічних характеристик і параметрів роботи основних деталей та вузлів екструдера. Поставлено задачу щодо збільшення міцності композитних полімерних труб шляхом додавання композитних волокон при формуванні труби в головці екструдера. Розроблено дві нові конструкції екструзійних головок, що дають можливість виготовлення полімерних труб, армованих поздовжніми неперервними елементами для підвищення їх фізико-механічних властивостей, зокрема міцності.

енко Б.О.  
а ініціали)

вал М.В.  
та ініціали)

Проаналізовано механіко-економічні показники для підтвердження ефективності та доцільності обраної модернізації, зокрема, підвищення міцності композитних труб. З метою підтвердження працездатності обраної модернізації формуючої головки (фільтри) проведено низку розрахунків полімерної щогли, армованої композитним волокном. За допомогою задачі статичної пружності в системі ANSYS виконано розрахунок напружено-деформованого стану опори.

Для ілюстрації доцільності модернізації проведено розрахунок базової алюмінієвої опори та порівняння аналітичних результатів модернізованих та металевих моделей. Результати показали, що композитні щогли мають більший коефіцієнт запасу міцності та менші деформації. Зроблені розрахунки для різних

					<b>ГММ 602-МММ.014-00.00.000 А</b>			
Зм	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>АНОТАЦІЯ</b>	Лім.	Лист	Листів
Зроб.		Остапенко	<i>Б.О.</i>	29.12				
Реєвір.		Шаповал	<i>М.В.</i>	29.12				
Реєвник		Шаповал	<i>М.В.</i>	29.12				
Контр.		Васильєв	<i>В.В.</i>	29.12				
Зав.		Орисенко	<i>О.О.</i>	29.12				
						Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІІТМ 2023р.		

змуючих матеріалів та проведено аналіз для різного відсоткового вмісту композиту з шоглі.

При цьому запас міцності конструкції забезпечує надійну експлуатацію опори і дозволяє застосовувати обрані конструкційні матеріали в різних галузях промисловості.

**Ключові слова:** екструдер, формуюча головка, композитні труби, метод екструзії, вуглепластикове волокно, скловолокно, коефіцієнт запасу міцності.

				ГММ 602-МММ.014-00.00.000 А	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

## ABSTRACT

Ostapenko B.O. Study of the work of the extruder with the modernization of the head in the technological line for the production of carbon-plastic pipes. - Manuscript.

Qualifying master's thesis for obtaining a degree of higher education in specialty 133 - "Industrial mechanical engineering" - National University "Poltava Polytechnic named after Yury Kondratyuk", Poltava, 2023.

The purpose of the qualifying master's thesis is to study the design, purpose and principles of operation of the extruder head for its modernization. The principle of operation of the extrusion machine is considered on the example of its application in the technological line for the production of pipes. An analysis of the technical characteristics and operating parameters of the main parts and assemblies of the extruder was carried out. The task was set to increase the strength of composite polymer pipes by adding composite fibers when forming the pipe in the extruder head. Two new designs of extrusion heads have been developed, which make it possible to manufacture polymer pipes reinforced with longitudinal continuous elements to increase their physical and mechanical properties, in particular strength.

Mechanical and economic indicators were analyzed to confirm the effectiveness and feasibility of the chosen modernization, in particular, increasing the strength of composite pipes. In order to confirm the operability of the chosen modernization of the forming head (spindle), a number of calculations of a polymer mast reinforced with composite fiber were carried out. Using the problem of static elasticity in the ANSYS system, the stress-strain state of the support was calculated.

To illustrate the feasibility of modernization, the calculation of the basic aluminum support and the comparison of the analytical results of the modernized and metal models were carried out. The results showed that the composite masts have a higher safety factor and smaller deformations. Calculations were made for different reinforcing materials and analysis was carried out for different percentages of composite in the mast.

At the same time, the safety margin of the structure ensures reliable operation of the support and allows the use of selected structural materials in various industries.

				<b>ГММ 602-МММ.014-00.00.000 А</b>	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

**Key words:** extruder, molding head, composite pipes, extrusion method, carbon fiber, glass fiber, safety factor.

				<b>ГММ 602-МММ.014-00.00.000 А</b>	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Навчально-науковий інституту інформаційних технологій та робототехніки  
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

**Дослідження роботи екструдера з модернізацією головки в  
технологічній лінії для виготовлення вуглепластикових  
труб**

**Пояснювальна записка**

**до кваліфікаційної магістерської роботи**

**ГММ 602-мММ.014-00.00.000 ПЗ**

Полтава – 2023 рік

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕКСТРУДЕРА.....	6
1.1. Принцип роботи та загальний вигляд екструдера.....	6
1.2. Геометричні параметри черв'яка екструдера.....	10
1.3 Види та призначення формуючих головок екструдера.....	12
1.4 Аналіз процесу підготовки розплаву на двочерв'ячних екструдерах.....	14
1.5 Висновки до розділу.....	16
РОЗДІЛ 2 ВИБІР ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ.....	18
2.1 Технологічна лінія з використанням екструдера.....	18
2.2 Літературний аналіз за темою, що розглядається.....	19
2.3 Обґрунтування запропонованої модернізації екструдерних головок.....	26
2.4 Конструктивне виконання модернізованої головки екструдера.....	30
2.5 Підготовка продукту виробництва до визначення на міцність.....	34
2.6 Визначення на міцність композитної труби, армованої скловолокном.....	37
2.7 Визначення на міцність композитної труби, армованої вуглепластиковим волокном.....	41
2.8 Підтвердження актуальності запропонованих модернізацій.....	44
2.8.1 Визначення базової металевої труби на міцність.....	44
2.8.2 Обґрунтування запропонованих модернізацій.....	46
2.9 Висновки до розділу 2.....	48
РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ ЕКСТРУДЕРА.....	52
3.1 Визначення продуктивності двочерв'ячного екструдера.....	52
3.2 Визначення коефіцієнта геометричної форми формуючої головки екструдера.....	55

				<b>ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ</b>		
	<b>Лист</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Підпис</b>	<b>Дата</b>		
роб.	Остапенко		<i>Остапенко</i>	29.12		
ревір.	Шаповал		<i>Шаповал</i>	29.12		
зник	Шаповал		<i>Шаповал</i>	29.12		
контр.	Васильєв		<i>Васильєв</i>	29.12		
гв.	Орисенко		<i>Орисенко</i>	29.12		
<b>ЗМІСТ</b>					<b>Лім.</b>	<b>Лист</b>
					Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІТР 2023 р.	

3.3	Визначення перепаду тиску в екструзійній головці екструдера.....	59
3.4	Визначення потужності привода двочерв'ячного екструдера.....	63
3.5	Визначення на міцність шпильок, що кріплять головку до екструдера.....	72
3.6	Визначення гвинтів, що кріплять фільтрну плиту до корпусу головки екструдера.....	73
3.7	Висновки до розділу 3.....	74
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	76
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77
	Додатки.....	79

				<b>ГММ 602-мММ 014-00.00.000 ПЗ</b>	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Виробництво трубопроводів з композитних матеріалів здійснюється в усьому світі вже більше півстоліття. Композитні матеріали дозволили вирішити серйозну проблему корозії, яка призводить до значних втрат при експлуатації металевих труб.

Переваги таких композитних виробів зумовили їх широке застосування в різних галузях помисловості, зокрема в:

1) нафтовидобувній промисловості. Завдяки здатності зберігати високу корозійну стійкість під дією агресивних середовищ (нафти, розчинів, пластових вод) і високій питомій міцності композитним виробам віддають перевагу перед сталевими та полімерними виробами;

2) вугільній промисловості. Велику роль тут відіграє невелика вага і простота монтажу, низька горючість, нетоксичність продуктів горіння, корозійна стійкість і відсутність вражаючих осколків під час вибуху метану.

3) енергетиці. Скловолокно стійке до високого тиску, що робить цей виріб придатним для використання при прокладанні трубопроводів.

4) Житлово-комунальному господарстві. Каналізаційні та меліоративні системи, інженерні комунікації обладнані вуглепластиковими виробами.

Тому тема вдосконалення та модернізації виробництва композитних труб є надзвичайно актуальною. Дана робота зосереджена на розробці та проектуванні формуючої головки двочерв'ячного екструдера для виробництва опорних щогл із композитних матеріалів.

На відміну від металевих, залізобетонних або дерев'яних опор, композитні світлові опори та щогли електромереж виготовлені з армованих вуглепластиком полімерів, які зберігають свою міцність і зовнішній вигляд навіть при тривалій експлуатації та потребують мінімального технічного обслуговування. Світлові опори з полівінілхлориду з карбованим волокном легкі, міцні, мають низьку

№	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ			
Зроб.		Остапенко	<i>Б.О.</i>	29.12	ВСТУП	Лім.	Лист	Листів
Звер.		Шаповал	<i>Ш.О.</i>	29.12				
Зенч.		Шаповал	<i>Ш.О.</i>	29.12				
Зстпр.		Васильев	<i>В.О.</i>	29.12				
Зге		Орисенко	<i>О.О.</i>	29.12				
						Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІТР 2023 р.		

електропровідність, стійкі до корозії, ультрафіолетового випромінювання та водопоглинання. Вуглепластикові та полівінілхлоридні волокна не проводять електрику, тому під час ударів блискавки щогла не пошкодиться.

Навіть при пошкодженні зовнішнього шару полімерно-композитна опора стійка до корозії та зберігає свої властивості навіть в умовах підвищеної вологості та сольового туману.

**Об'єкт дослідження** є виробництво композитних труб методом екструзії.

**Предметом дослідження** є вдосконалення формувального обладнання для виготовлення композитних труб.

**Науково-практичне значення** даної роботи полягає в удосконаленні конструкції формуючої головки двочерв'ячного екструдера, що забезпечить покращення механічних властивостей, особливо міцності, композитних полімерних труб за рахунок додавання армуючих волокон в процесі екструзії.

				ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

# РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕКСТРУДЕРА

## 1.1 Принцип роботи та загальний вигляд екструдера

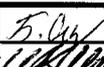
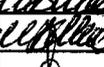
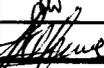
Екструзія – це технологічний процес, при якому виріб отримують шляхом продавлювання розплаву високов'язкого матеріалу в рідкому стані через формувальний отвір (екструзійну головку або фільтеру) з метою одержання виробу з поперечним перерізом необхідної форми.

У промисловості з переробки полімерів методом екструзії виготовляють різні вироби, такі як труби, плівки, листи, оболонки кабелів, елементи лампової електрики, розсіювачі та ін. Основним технологічним обладнанням для екструзії є одночерв'ячні, багаточерв'ячні, поршневі та дискові екструдери.

Екструдер – це машина для надання форми пластичним матеріалам і для формування їх за допомогою видавлювання через головку, що є профільним інструментом (рис. 1.1).

До складу агрегату входять: корпус з нагрівальними елементами; робочий орган – шнек, черв'як або гвинт Архімеда, поршень, диск, розташовані в корпусі; вузол завантаження сировини, що переробляється; силовий привід; системи контролю та підтримки температури та інше контрольно-вимірвальне і регулююче обладнання.

Сутність процесу екструзії полягає в наступному. Гранули полімерного матеріалу потрапляють в зону подачі, захоплюються нарізкою черв'яків і починають переміщуватися по циліндру. Різниця крутних моментів, що виникають в результаті сил тертя між поверхнею черв'яків і полімером та між поверхнею циліндра і полімером, визначає рух полімеру в твердому стані. Черв'яки надають поступальний рух уздовж осі циліндра нагрітій або

				ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ			
№	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Лім.	Лист	Листів
Зроб.	Остапенко			29.12			
Звер.	Шаповал			29.12			
Зв'язник	Шаповал			29.12			
Зонтр.	Васильєв			29.12			
Зв.	Орисенко			29.12			

ТЕХНІЧНІ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ЕКСТРУДЕРА

Національний університет  
імені Юрія Кондратюка  
ННІІТР 2023 р.

схолодженій суміші, яка надходить у циліндр через завантажувальний пристрій, і видавлюють її через вихідний отвір головки.

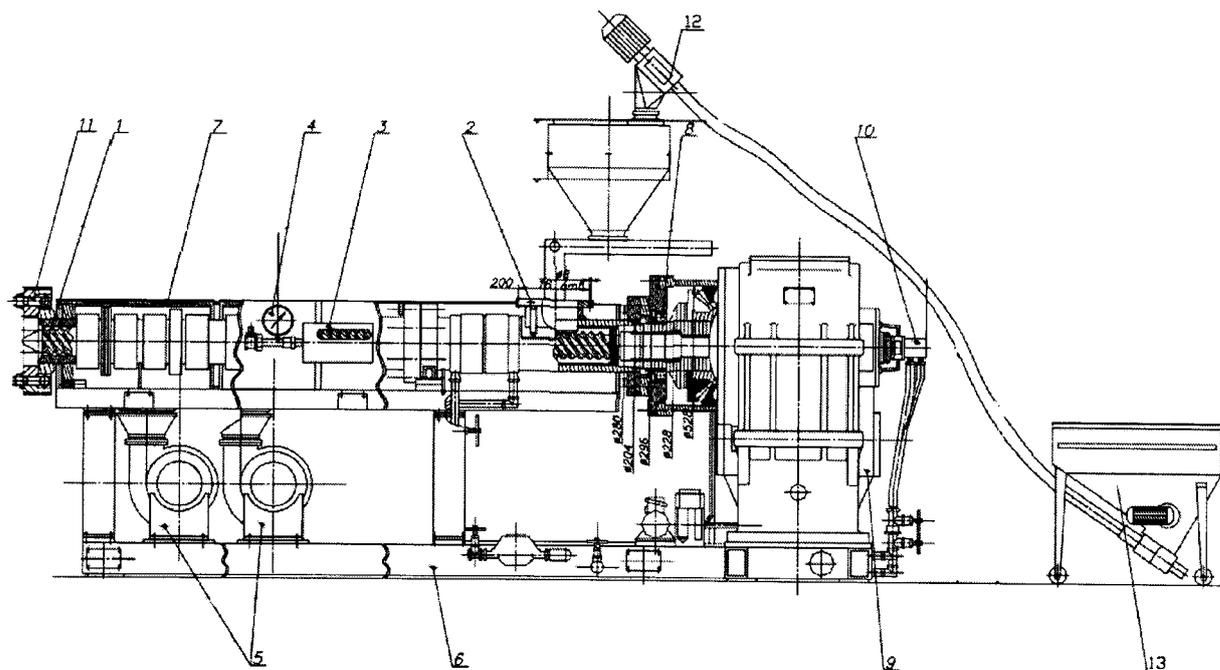


Рисунок 1.1 – Схема екструдера: 1 - черв'як; 2 - живильник; 3 - дегазатор; 4 - пристрій вимірювання тиску; 5 - вентилятор; 6 - станина; 7 - кожух; 8 - вузол опорного підшипника; 9 - привід; 10 - система охолодження; 11 - фланець; 12 - завантажувач; 13 - бункер

В результаті тертя між матеріалом, що переробляється, і поверхнями черв'яка і циліндра оброблювана суміш зазнає постійних змінних деформацій стиснення та зсуву.

Для забезпечення руху полімеру вздовж циліндра, обертальний момент від дії сили тертя на поверхні циліндра повинен бути більшим за силу тертя на поверхні шнеків. Ця умова виконується, наприклад, при зміні температури циліндра або шнека, внаслідок чого змінюється коефіцієнт тертя. Спочатку з підвищенням температури коефіцієнт тертя зростає, а вище температури плавлення полімеру коефіцієнт тертя зменшується. Це можна пояснити появою пристінної в'язкої течії розплаву та зменшенням сил тертя. Тому, щоб максимізувати різницю крутних моментів сил тертя, температура поверхні

				<b>ГММ 602-мММ 014-00.00.000 ПЗ</b>	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

циліндра повинна бути близькою до температури плавлення полімеру, а температура шнека має бути на 30-40 °С нижчою за температуру поверхні циліндра. З цією метою циліндр нагрівається, а всередину шнека подається охолоджуюча рідина.

Виникає також відносний рух окремих суміжних ділянок суміші, створюючи завихрення та зворотні потоки. В результаті суміш нагрівається і по сфері просування головки суміш стає пластичною, стискається та гомогенізується. Ступінь нагріву суміші та ущільнення залежать від довжини черв'яка і ступеня стиснення, яке він створює. Для уникнення вулканізації під час сильного нагрівання суміші черв'яки і циліндр машини охолоджують водою.

Надання пластичності формуючій масі є одним з головних завдань екструдера. Для ПЕ подача формуючої маси здійснюється завдяки наявності черв'яка, що обертається, а для ПВХ – за допомогою двох зчеплених черв'яків. Двочерв'ячні екструдери працюють як насоси примусового накопичення (незалежно від зворотного тиску), і тому мають перевагу під час обробки порошкоподібних формуючих мас.

Розплавлений матеріал продовжує ущільнюватися всередині головки. Виступи та канали забезпечують рівномірний розподіл суміші по довжині профільюючого зазору. За рахунок дії осьового тиску, що створюється черв'яками, сильно стиснений розплав вичавлюється через профільний отвір головки. Чим менший профільний зазор або отвір, тим більшим є тиск суміші. Матеріал переміщується через головку з різною швидкістю: поблизу стінки швидкість вижча, ніж у середині зазору чи отвору.

По довжині шнека виділяють три зони з різним станом суміші [3].

- зона завантаження (живлення);
- зона стиснення, нагріву та пластикації;
- зона дозування та формування.

У зоні живлення суміш, що переробляється, надходить у простір між зятками шнека і стискається.

				ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

У зоні пластикації відбувається надання сировині, що переробляється, еластичності, що забезпечує ефект змішування. Зростання рівня тиску здебільшого відбувається в суміжному просторі між зоною живлення та зоною пластикації. Тут стиснутий матеріал утворює пробку і ковзає вздовж шнека. Дана пробка і являється причиною підвищення рівня тиску, який використовується на подолання опору сіток та формування профілю.

У зоні дозування відбувається гомогенізація пластифікованого полімеру. До кінця зони сировина стає повністю гомогенною масою і видавлюється через формуючу головку.

Поділ на зони є умовним і вказує на певні особливості кожної ділянки шнека.

До основних параметрів процесу екструзії відносять температуру зон агрегату, рівень тиску оброблюваного матеріалу, температуру зон головки, режим охолодження екструдованого профілю. До основних технологічних параметрів екструдера відносяться характеристики шнеків, якими він оснащений, зокрема:

- довжина;
- діаметр;
- співвідношення довжини шнека до його діаметра.
- швидкість обертання;
- профіль шнека.

Основним параметром формуючого інструменту, до складу якого входять головка та калібрувальний вузол, є коефіцієнт опору течії розплаву полімеру.

До загальних показників роботи екструдера відносять ефективність роботи, яка розраховується як співвідношення продуктивності до споживаної електроенергії [3].

Складність теоретичного розрахунку продуктивності машини та її основних параметрів призвела до застосування на практиці емпіричних формул, і навіть до використання методу моделювання черв'ячних машин.

				<b>ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ</b>	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

## 1.2 Геометричні параметри черв'яка екструдера

Черв'як є основним робочим органом екструдера, від його геометрії та конструкції залежить продуктивність машини та її здатність обробляти різні конструктивні матеріали. Черв'як, як правило, складається з двох частин: робочої (нарізної) і хвостової (опорної) [3].

У нарізній частині черв'яка виділяють три робочі зони: завантаження, пластикації та дозування (рис. 1.2). Під час правильного поєднання розмірів зон залежно від призначення машини та під час відповідного нарізування черв'яка забезпечується рівномірна (безпульсаційна) видача матеріалу і нормальна робота екструдера.

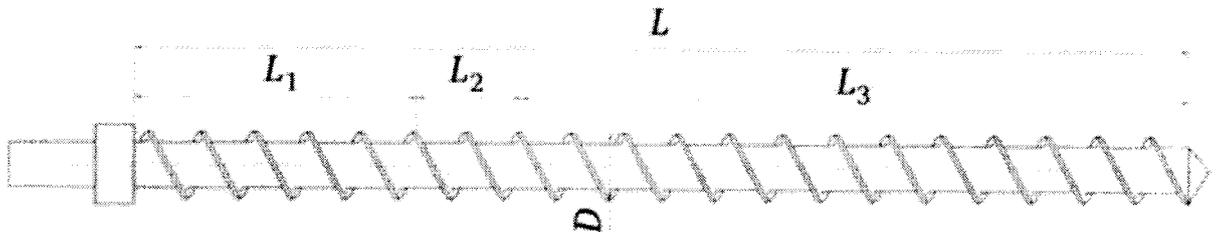


Рисунок 1.2 – Схема загального вигляду шнека екструдера:  $L_1$  – зона завантаження;  $L_2$  – зона пластикації;  $L_3$  – зона дозування

Зона завантаження, яка виконує функцію захоплення матеріалу із завантажувальної воронки, повинна мати достатні для цього довжину, глибину нарізки та відстань між витками. Як правило, довжина зони завантаження становить від 1,2-1,5  $D$  черв'яка в залежності від призначення машини і характеру матеріалу, що обробляється.

У зоні пластикації матеріал розігрівається, пластикується і гомогенізується. Тут відбувається перехід матеріалу з твердого стану у в'язкопластичний. Довжина зони, як правило, становить від 1,5-2  $D$ .

У зоні дозування матеріал рівномірно розподіляється, що забезпечує нормальну подачу матеріалу до головки машини (при постійному тиску й

об'ємній швидкості). Від правильного визначення розмірів нарізки цієї зони залежить продуктивність екструдера.

Робоча (нарізна) частина черв'яка характеризується діаметром, довжиною і характером нарізання. Діаметр шнека є основним параметром, що визначає продуктивність екструдера [3], яка теж залежить від характеру нарізки (рис. 1.3).

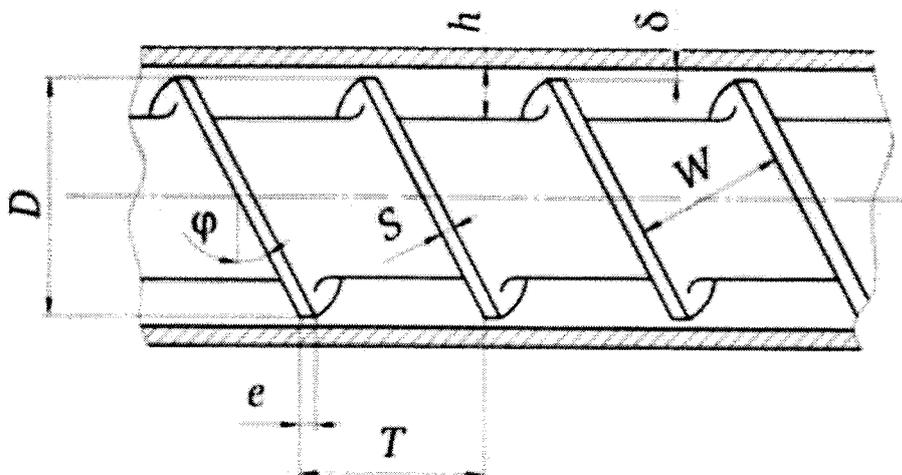


Рисунок 1.3 – Геометричні параметри шнека екструдера:  $D$  - діаметр шнека;  $T$  - крок нарізки;  $W$  - відстань між витками;  $S$  - товщина витка;  $e$  - ширина витка;  $h$  - глибина нарізки;  $\delta$  - висота зазору між витком та циліндром;  $\varphi$  - кут нахилу нарізки

Шнеки розрізняють наступним чином:

- з одно-, дво-, тризаднім різьбленням і з комбінованим різьбленням;
- циліндричні, конусні, комбіновані з постійним кроком і однаковою глибиною різьблення по всій робочій довжині;
- зі змінним кроком або різною глибиною різьблення.

Тип використовуваного шнека залежить від матеріалу, що обробляється, параметрів процесу, конструкції машини та виду отриманого виробу.

### 1.3 Види та призначення формуючих головок екструдера

Екструзійна головка (фільера) розташована на вихідному кінці екструдера. Функція екструзійної головки полягає у формуванні потоку оброблюваного матеріалу в пресований виріб необхідної форми [4]. Фільери можна класифікувати за формою виробу, який з них виходить. Кільцеві фільери застосовуються для виготовлення шлангів, труб і трубок. Кутова формуюча головка часто використовується при нанесенні ізоляції на дроти (рис. 1.4). Плоскощілинні фільери застосовуються для виробництва плівок і листів. Круглі фільери використовуються для виготовлення волокон і прутків. Профільні фільери застосовуються для створення форм, відмінних від кільцевих, круглих та прямокутних.

Більша частина екструзійних головок мають канали, які складається із зхідних, розподільних та формувальних зон. Остаточна форма та розміри профілю екструзійних виробів формуються за допомогою мундштука, що складається з матриці, яка утворює зовнішню поверхню виробу, та дорна, що утворює внутрішню поверхню. Схема типової прямої головки для виробництва труб зображена на рис. 1.5.

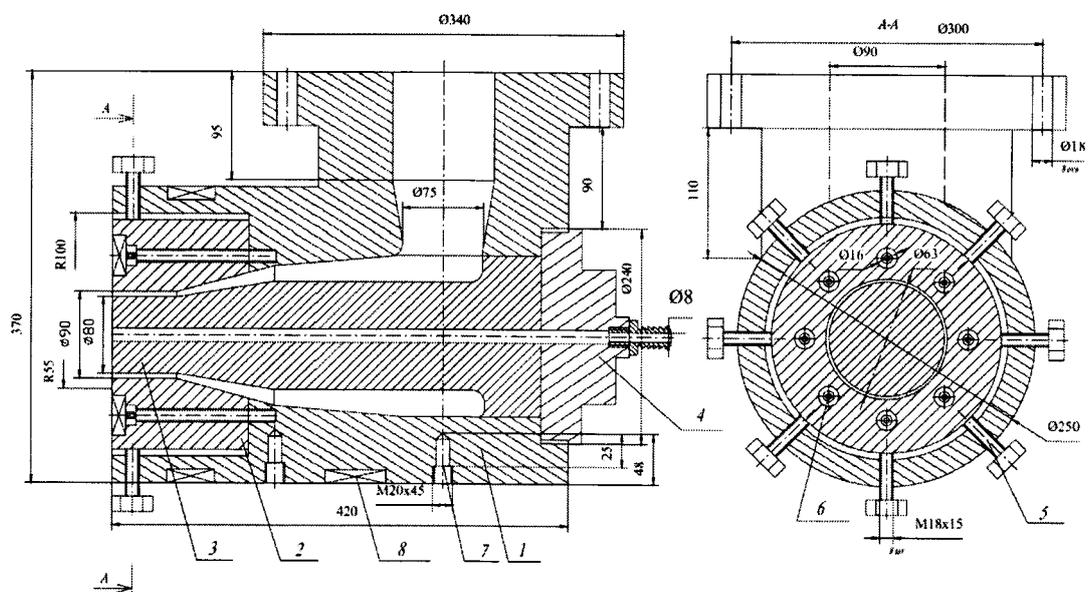


Рисунок 1.4 – Кутова екструзійна головка для нанесення ізоляції на дроти:  
1 - корпус; 2 - мундштук; 3 - дорн; 4 - дорнотримач; 5, 6, 7 - гвинти; 8 - нагрівники

Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ

Лист

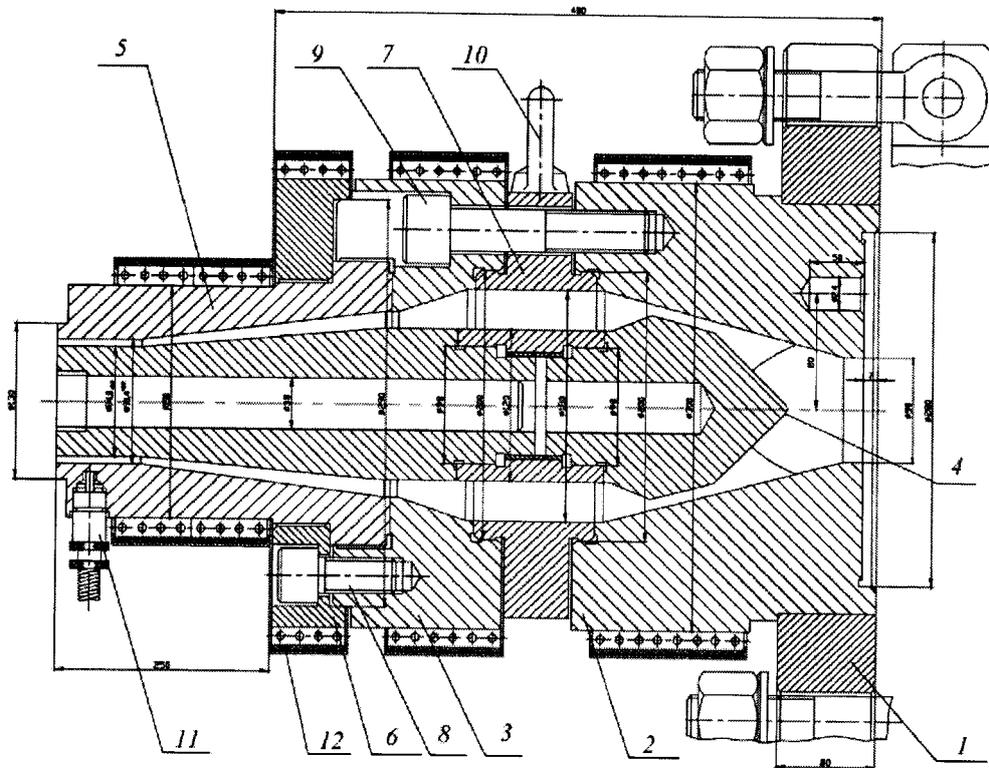


Рисунок 1.5 – Екструзійна головка для виготовлення труб: 1 - фланець; 2 і 3 - частини роз'ємного корпусу; 4 - дорн; 5 - мундштук; 6 - кільце; 7 - дорнотримач; 8, 9 - кріпильний болт; 10 - рим-болт; 11 - термопара; 12 - нагрівники

Зазвичай мундштуки виготовляють швидкозмінними для скорочення часу переходу на продукцію інших розмірів. Кріплення дорну здійснюється на дорнотримачах різної конструкції. Як правило, є можливість регулювати товщину профілю в різних перерізах. На вході в головку часто встановлюють решітку з талетом сіток для фільтрації розплаву та створення необхідного перепаду тиску. При виготовленні замкнутих профілів (труб, шлангів і т.д.) повітря подається всередину дорну під надлишковим тиском для збереження порожнини і калібрування розмірів. Мундштук повинен мати канал постійної геометрії на виході для стабілізації потоку розплаву полімеру.

## 1.4 Аналіз процесу підготовки розплаву на двочерв'ячних екструдерах

Процес приготування розплаву в двочерв'ячних пресах аналогічний такому ж процесу в одночерв'ячних екструдерах: вихідна полімерна композиція через завантажувальну воронку подається до черв'яків, сировина захоплюється черв'яками і транспортується вперед у напрямку головки під час стиснення матеріалу, його нагріванні зовнішніми та внутрішніми джерелами тепла [5]. Потім композицію розплавляють і розплав пресують з подальшим паралельним змішуванням і гомогенізацією компонентів. Останні канали черв'яків також є дозувальними і визначають продуктивність всього процесу приготування розплаву. Величина тиску, створюваного всередині екструдера, залежить від ступеня стиснення черв'яка та опору формуючої головки.

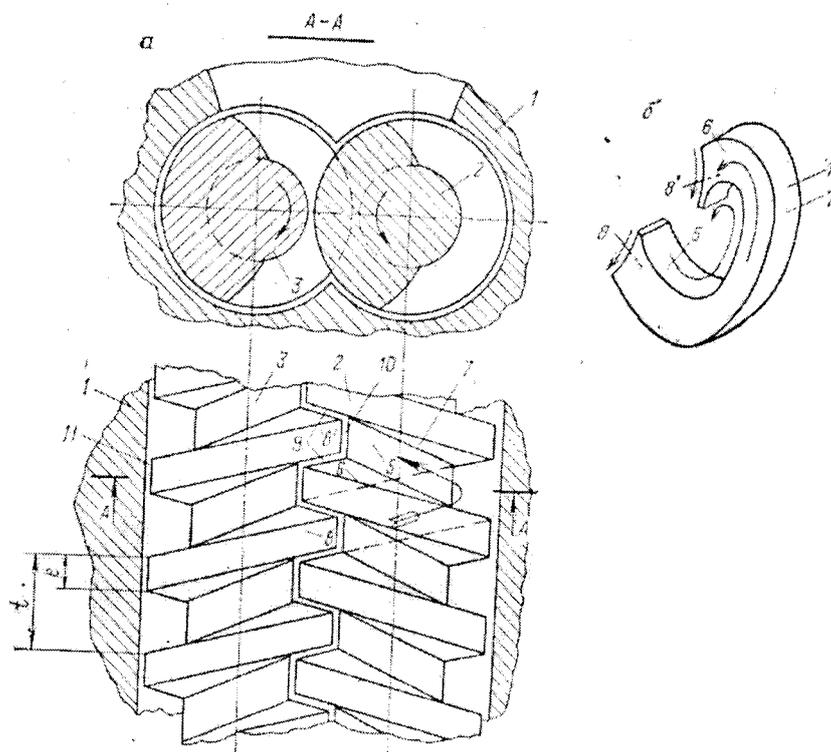


Рисунок 1.6 – Схема робочих органів двочерв'ячних пресів (а) та ізолювана С-подібна камера (б): 1 – циліндр; 2,3 – черв'яки; 4 – ізолювана С-подібна камера; 5, 6, 7, 8, 8' – поверхні, що обмежують С-подібну камеру; 9 – бокові зазори; 10 – радіальний зазор; 11 – зазор між гребнем черв'яка і циліндром

Двочерв'ячні преси будь-якого типу є ефективними змішувачами сипучих порошкоподібних композицій. Крім того, екструдери з гвинтовим зачепленням, що обертаються протилежно зустрічному напрямку, є найефективнішими насосами для екструзії розплаву. На рис.1.6 наведена схема черв'яків таких екструдерів, С-подібні міжвиткові камери двох черв'яків по мірі руху заповнюються (частково або повністю) насамперед порцією сипучого порошку композиції, потім стисненого і, нарешті, – у вигляді розплаву.

Схема даного екструдера та С-подібні камери черв'яків зображені на рис. 1.6 і 1.7.

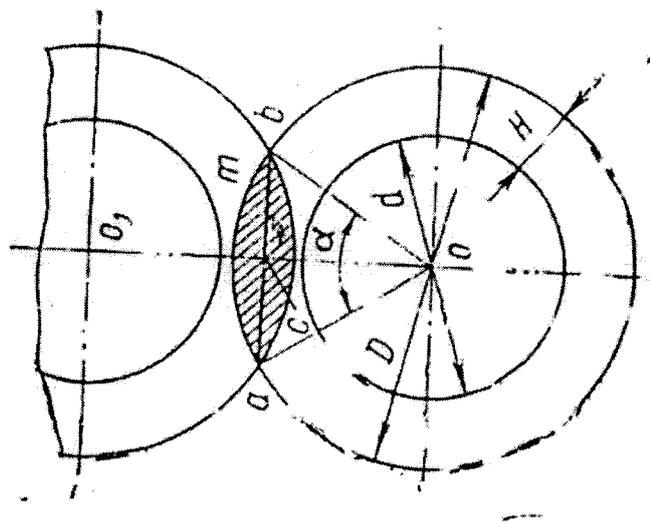


Рисунок 1.7 – Розрахунок об'єму С-подібних камер каналів черв'яків

Дані порції композиції не піддаються масообміну між собою по довжині черв'яків, а їх стиснення відбувається за рахунок зменшення об'єму камер. У двочерв'ячних екструдерах це досягається шляхом зменшення кроку черв'яків, а не його глибини, як це характерно для одночерв'ячних екструдерів. На відміну від одночерв'ячних екструдерів, гвинтовий канал кожного з черв'яків розділений на ланцюг відокремлених один від одного С-подібних об'ємів композиції.

## 1.5 Висновки до розділу 1

1. У промисловості з переробки полімерів методом екструзії виготовляють різні вироби, такі як труби, плівки, листи, оболонки кабелів, елементи лампової електрики, розсіювачі та ін. Основним технологічним обладнанням для екструзії є одночерв'ячні, багаточерв'ячні, поршневі та дискові екструдери.

Екструдер – це машина для надання форми пластичним матеріалам і для формування їх за допомогою видавлювання через головку, що є профільним інструментом. У головці відбувається подальше ущільнення розплаву матеріалу.

Пластикація формуючої маси є одним з головних завдань екструдера. Для ПЕ подача формуючої маси здійснюється завдяки наявності черв'яка, що обертається, а для ПВХ – за допомогою двох зчеплених черв'яків.

По довжині шнека виділяють три зони з різним станом суміші [3].

- зона завантаження (живлення);
- зона стиснення, нагріву та пластикації;
- зона дозування та формування.

Поділ на зони є умовним і вказує на певні особливості кожної ділянки шнека.

До основних параметрів процесу екструзії відносять температуру зон агрегату, рівень тиску оброблюваного матеріалу, температуру зон головки, режим охолодження екструдованого профілю.

Складність теоретичного розрахунку продуктивності машини та її основних параметрів призвела до застосування на практиці емпіричних формул, і навіть до використання методу моделювання черв'ячних машин.

2. Черв'як є основним робочим органом екструдера, від його геометрії та конструкції залежить продуктивність машини та її здатність обробляти різні конструктивні матеріали. Черв'як, як правило, складається з двох частин: робочої (варіантної) і хвостової (опорної).



## РОЗДІЛ 2 ВИБІР ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ

### 2.1 Технологічна лінія із застосуванням екструдера

У даній роботі розглянуто лінію для виготовлення композитних труб методом екструзії. Труби виконані з полівінілхлориду (ПВХ) і вуглецевого пластику, які мають діаметр 90 мм і товщину стінки 5 мм.

Представлена лінія для виготовлення композитних труб (рис. 2.1) використовується на різних підприємствах, що спеціалізуються на переробці полімерних і будівельних матеріалів, тобто для постачання питної води та господарських потреб, для транспортування рідких продуктів харчування, у нафтовій промисловості, для транспортування агресивних хімічних речовин, вентиляції для агресивних парів, а також в якості систем для хімічної очистки води.

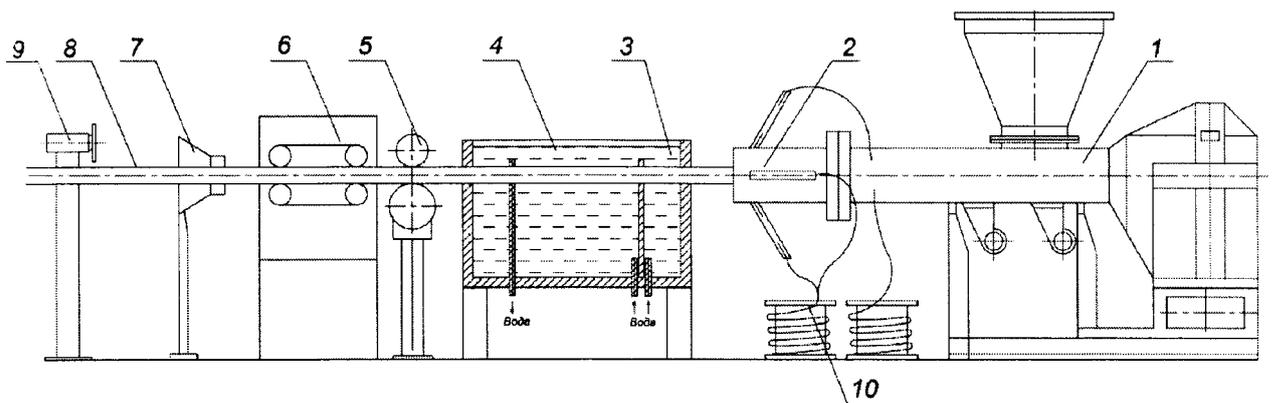


Рисунок 2.1 – Лінія виготовлення композитних труб методом екструзії:  
1 - екструдер; 2 - головка екструзійна; 3, 4 - зони охолодження; 5 - вимірювально-маркувальний пристрій; 6 - тягучий пристрій для виробу; 7 - пристрій для натягу композитних ниток; 8 - труба; 9 - відрізний пристрій; 10 - котушки із композитними волокнами

					ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ			
№	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	ВИБІР ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ	Лім.	Лист	Листів
Зроб.	Остапенко	5.01	<i>[Signature]</i>	29.12				
Звер.	Шаповал		<i>[Signature]</i>	29.12				
Зачин.	Шаповал		<i>[Signature]</i>	29.12				
Зчтр.	Васильєв		<i>[Signature]</i>	29.12				
Зчз	Орисенко		<i>[Signature]</i>	29.12				
						Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІТР 2023 р.		

За допомогою пневматичного завантажувача або вакуумного завантажувача гранули полівінілхлориду надходять у бункер екструдера. Потім за допомогою черв'яка суміш пересувається вздовж корпусу. Композитні волокна з котушок 10 подаються в формувальну головку 2 до готового розплаву полімеру. Ці волокна попередньо натягуються і відцентровуються за допомогою решіток, таким чином, що полімер обтікає композитні нитки зсередини і зовні, утворюючи для них захисний шар. Рух волокон забезпечує пристрій 7. Готовий розплав, що містить армуючі волокна, екструдується через формувальну головку 2. Трубчастий профіль 8 направляють до ванни з двома температурними зонами 3, 4. композитну трубу охолоджують і потім маркують за допомогою маркувального пристрою 5.

Переміщення труби по лінії забезпечується тягнучим пристроєм 6, а розрізання труби на відрізки заданої довжини здійснюється автоматично за допомогою диску, фрези або циркулярної пилки 9.

## 2.2 Літературний аналіз за темою, що розглядається

Метою проведення літературно-патентного пошуку є вибір технічного рішення та обґрунтування обраної модернізації, які забезпечать більш ефективне виготовлення композитних труб.

Існують агрегати, які наносять полімерне покриття на проводи і кабелі, причому зовнішній діаметр нанесеного на кабель полімеру формується внутрішнім діаметром мундштука [3].

Головка дорна має наскрізний отвір для проходження проводу, на який наноситься полімерне покриття, також в дорні розташований легкозмінний наконечник, який виконує роль направляючого для дроту. Розплав полімеру потрапляє у конічний зазор, утворений дорном і корпусом, а звідти проходить через звужений конічний канал між внутрішньою стінкою циліндричного отвору мундштука і зовнішньою поверхнею дроту і потрапляє в кільцевий зазор. Готова



Однією з проблем екструзійних головок є пульсації розплаву в формуючому каналі. Для усунення цього автор [4] запропонував виконати дорнотримач 4 з двох частин, забезпечивши можливість зворотно-поступального руху його частин відносно одна одної, як наведено на рис. 2.3. Матрицю 1 і західну частину дорну 3 закріплюють таким чином, щоб була можливість зміни довжини каналу. В результаті усунення пульсацій, забезпечується більш висока якість поверхні.

Автор патенту [5] вирішив проблеми виготовлення безшовних двостінних пластикових гофрованих труб, зокрема: неконтрольованість товщини зовнішньої стінки виробу, не можливість змінювати товщину трубки. Тому була створена модель з подовженим носієм, розміщеним усередині направляючої. Даний носій містить другу направляючу та гайку, що утворює внутрішнє кільце, розміщене на носії, і зовнішнє кільце, прикріплене до внутрішнього кільця павутинними лапками. Також у складі є верхній розподільник і нижнє сопло, при чому розподільник має форму кільця, що звужується у верхній частині та розподіляє екструдат для формування двошарової безшовної труби. А друге сопло та направляюча формують відповідно перше та друге кільцеві екструзійні отвори, які зменшуються за внутрішніми розмірами через які протікає екструдат безперервно, утворюючи зовнішню та внутрішню поверхню двошарової труби всередині сопел та навкруги направляючих.

З'єднувальний засіб, такий як шпонка, шліц тощо, що сполучає вищезазначений носій і першу направляючу і дозволяє тільки осьове, без обертання, переміщення водила. Другий центруючий засіб встановлює розподільник на рівномірній відстані навколо ковзанки за допомогою гвинтів, радіально розміщених всередині розподільника, і взаємодіє з бічною поверхнею ковзанки, щоб забезпечити радіальне регулювання розподільника відносно ковзанки.

Дана конструкція також дозволяє легко замінювати насадки та направляючі для очищення різних розмірів виготовлених труб (рис. 2.4).

У звичайній головці екструдера серцевина зовнішньої стінки прес-форми для двостінної труби сполучена шляхом обертання внутрішньої різьби кінця над



Для забезпечення необхідної температури поверхні дорна 3 та досягнення високої якості виробу автором [6] запропоновано сформувати корпус 1 з немагнітного матеріалу та встановити на зовнішньому боці корпусу 1 котушку індуктивності 5. Дорн 3 також виконаний з немагнітного матеріалу з точкою Кюрі, що відповідає температурі формування виробу. Після підключення котушки індуктивності 5 до електричного струму за рахунок того, що корпус 1 виготовлений з немагнітного матеріалу та функціонує як екран для змінного магнітного поля, дорн 3 нагрівається внаслідок індукції. Як тільки дорн досягає точки Кюрі матеріалу, з якого він виготовлений, його магнітні властивості зтрачаються і припиняється його нагрівання. Поздовжній розріз головки екструдера з такими вдосконаленнями зображено на рис. 2.5.

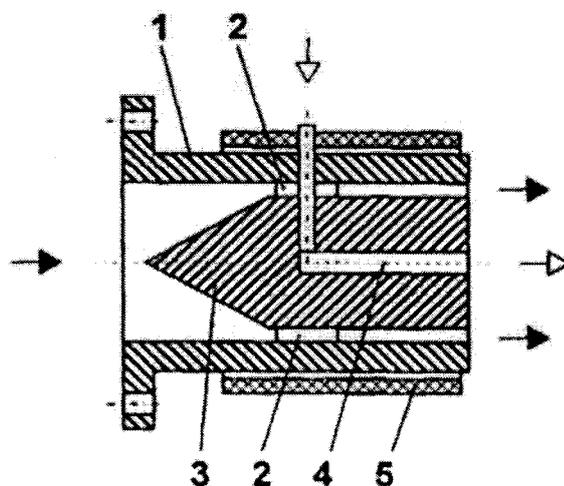


Рисунок 2.5 – Поздовжній розріз екструдерної головки: 1 - корпус, 2 - тримачі, 3 - дорн, 4 - канал для подачі повітря всередину формованого порожнистого виробу, 5 - котушка індуктивності

Винахід [7] спрямований на створення багатошарового трубного елемента (рис. 2.6), який має високу міцність, високу стабільність розмірів і відмінну оброблюваність.

Відповідно до основної ідеї винаходу, трубчастий перший шар містить поліолефінову смолу, трубчастий другий шар містить поліолефінову смолу, скловолокно та домішки, і трубчастий третій шар з поліолефінової смоли. Другий шар розміщений поза першим шаром, а третій шар розміщений поза другим





Головка екструдера може складатися з трьох або більше формуючих каналів 8, з'єднаних з каналом подачі формування суміші 7, для отримання трьох або більше труб, розміщених труба в трубі і з'єднаних одна з одною поздовжніми гранями. Для цього між дорном 3 і мундштуком 5 розміщені щонайменше дві розділові втулки 6, які утворюють формуючі канали 8 між собою та мундштуком 5, та за допомогою наскрізних прорізів 9 з боку вихідної ділянки головки з'єднують ці канали в місцях утворення поздовжніх граней, які, в свою чергу, забезпечують сполучення отриманих труб між собою, утворюючи єдину конструкцію труба в трубі.

Частий монтаж і розбирання конструкції для зміни кількості шарів в трубі погіршує стан елементів через активний знос деталей, тобто скорочує термін служби головки, що є недоліком даної конструкції.

### **2.3 Обґрунтування запропонованої модернізації екструдерних головок**

У даній роботі поставлено завдання щодо підвищення міцності композитних полімерних труб шляхом додавання композитних волокон під час формування труби в головці екструдера.

Жоден із зазначених вище патентів не передбачає можливості виготовлення полімерних труб, армованих поздовжніми неперервними елементами для підвищення їх фізико-механічних властивостей, зокрема міцності.

Для вирішення даної проблеми запропоновано дві унікальні модернізації екструдерної головки для виготовлення труб [8-9].

Перша модернізація – це додавання композитних волокон під час формування труби в головці екструдера.

Це досягається слідуючим чином. Дорнотримач прямої головки двочерв'ячного екструдера оснащують чотирма трубами-каналами в кожній з умовних чвертей площини. По цих трубах композиційні нитки подаються в головку, їх подача і безперервний рух забезпечується тягнучим пристроєм. При









Розташування композитних волокон для прямої головки показано на рис. 2.12. Права частина дорнотримача виконана без змін у вигляді підсилюючих елементів, які тримають дорн 4. Модернізована конструкція головки також обладнана додатковим решітчастим кільцем 14 між дорном 4 і мундштуком 5 на кінці формування труби для забезпечення «центрального положення» армуючих ґиток в полімерній трубі.

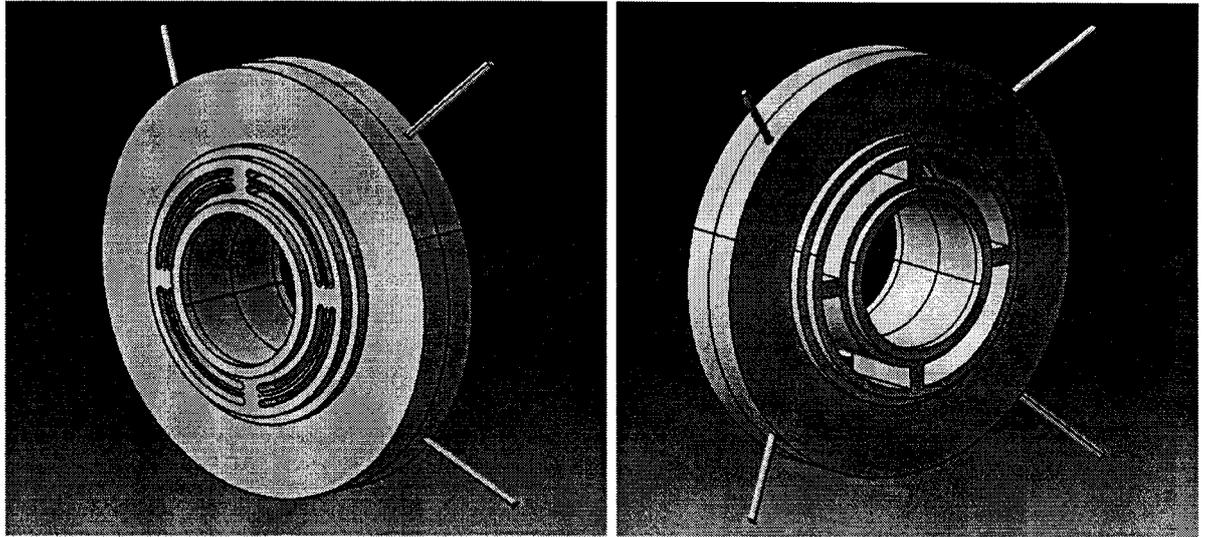


Рисунок 2.11 – Модернізований дорнотримач прямої головки, побудований в САD системі Catia V5: а - вид зліва; б - вид справа

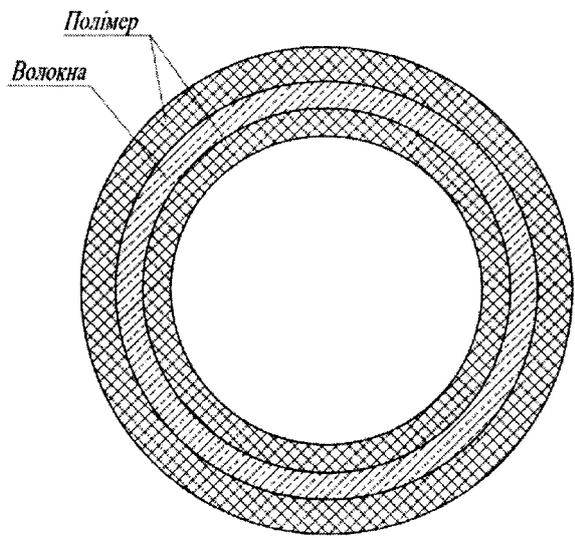


Рисунок 2.12 – Положення волокон вуглепластику в перерізі полімерної труби

					ГММ 602-мММ 014-00.00.000 ПЗ	Лист
№	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Решітчасте кільце розміщене на виході з прямої екструзійної головки з метою відцентрування та позиціонування армуючих волокон в трубі (рис. 2.13, 2.14) [11]. У даній деталі є спеціальні напівотвори невеликого діаметру, через які проходять карбонові нитки. Ці напівотвори розміщені на центральній перегородці решітки з установленим та розрахованим кроком. Товщина стінки між отворами на центральній перегородці також розраховується з урахуванням тиску полімеру в формуючій головці. Діаметр отворів мінімально збільшено у порівнянні з діаметром пучків вуглецевого волокна, щоб забезпечити вільне проходження композиту через решітку. Центральна перегородка сполучена з кільцем чотирма підсилюючими елементами. Отвори в полімері проходять між стінкою решітчастого кільця і перегородкою.

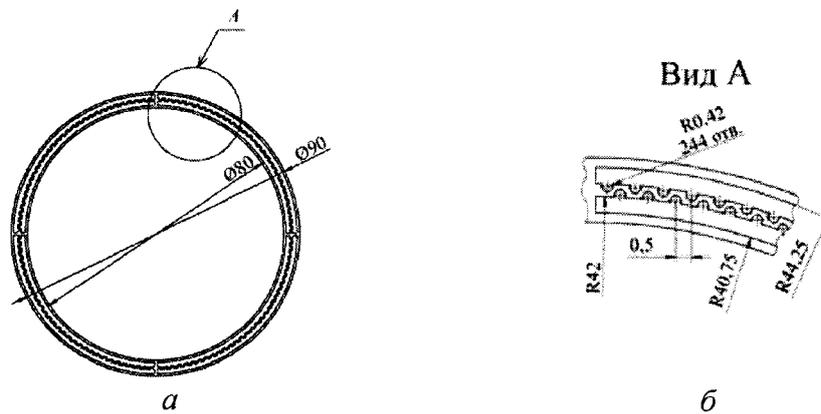


Рисунок 2.13 – Решітчасте кільце формуючої екструзійної головки: *а* – загальний вигляд; *б* - вид А

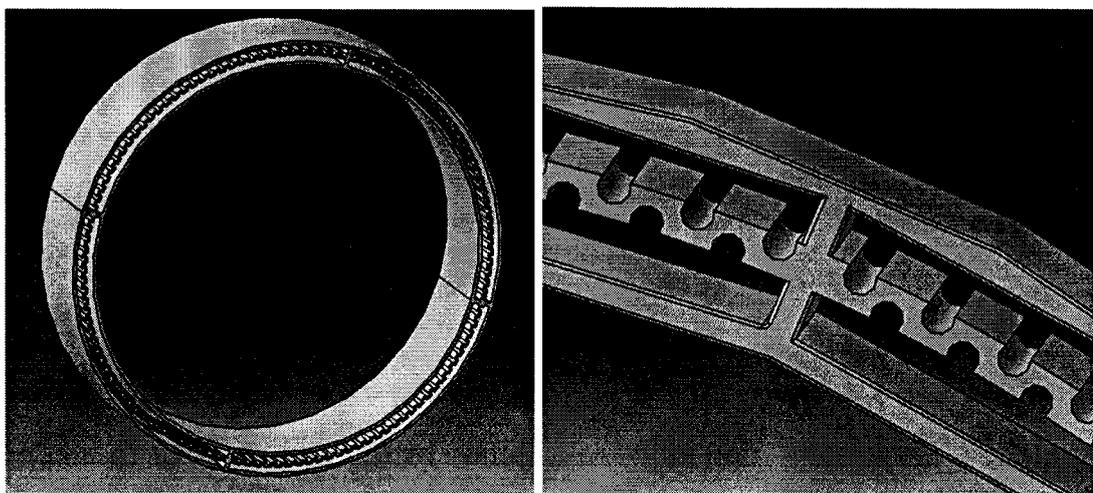


Рисунок 2.14 – 3Д модель решітчастого кільця виконана за допомогою CAD системи Catia V5

Визначаємо відсоток вмісту композиту відносно полімеру для заданих розмірів нашої труби та решітчастого кільця. В таблиці 2.1 наведено вхідні дані для розрахунку.

Розрахуємо площу поперечного перерізу труби

$$S_{\text{тр}} = \pi \cdot R_1^2 - \pi \cdot R_2^2 = \pi(R_1 - R_2)(R_1 + R_2) = 218,75\pi \quad (2.1)$$

Таблиця 2.1 – Дані для розрахунку

Зовнішній радіус труби	$R_1 = 45 \text{ мм}$
Внутрішній радіус труби	$R_2 = 43,75 \text{ мм}$
Зовнішній радіус композитної зони в трубі	$R_3 = 43,2 \text{ мм}$
Внутрішній радіус композитної зони в трубі	$R_4 = 41,7 \text{ мм}$
Кількість отворів	$N = 244$
Діаметр пучка волокна	$r = 0,4 \text{ мм}$

Розрахуємо площу поперечного перерізу центральної частини труби, де проходять композитні волокна:

$$S_{\text{ц}} = \pi \cdot R_3^2 - \pi \cdot R_4^2 = \pi(R_3 - R_4)(R_3 + R_4) = 127,35\pi \quad (2.2)$$

Обчислимо загальну площу вуглепластику в перерізі труби

$$S_{\text{в}} = N \cdot \pi \cdot r^2 = 244 \cdot 0,16 \cdot \pi = 39,04\pi \quad (2.3)$$

Визначимо вміст армуючого волокна в полімерній трубі

$$\omega_1 = \frac{S_{\text{в}}}{S_{\text{тр}}} \cdot 100\% = \frac{39,04\pi}{218,75\pi} \cdot 100\% \approx 18\% \quad (2.4)$$

Визначимо вміст армуючого волокна в композитній зоні труби

$$\omega_1 = \frac{S_{\text{в}}}{S_{\text{ц}}} \cdot 100\% = \frac{39,04\pi}{127,35\pi} \cdot 100\% \approx 31\% \quad (2.5)$$

Модернізована кутова головка (рис. 2.15) відрізняється від базової моделі (рис. 1.4) тим, що має поздовжні канали-отвори, які проходять уздовж всього дорна та через які будуть проходити армуючі волокна композитного матеріалу.

Дані канали розташовано так, щоб карбовані нитки проходили ближче до центру полімерної труби (рис. 2.16).

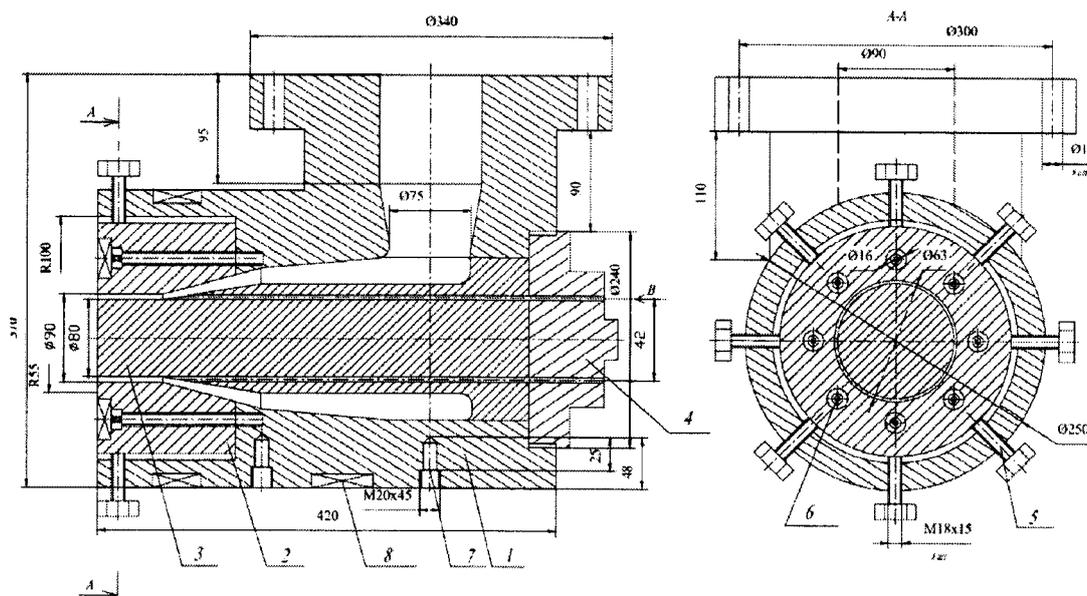


Рисунок 2.15 – Модернізована кутова головка екструдера: 1 - корпус; 2 - мундштук; 3 - дорн; 4 - дорнотримач; 5, 6, 7 - гвинти; 8 - нагрівники

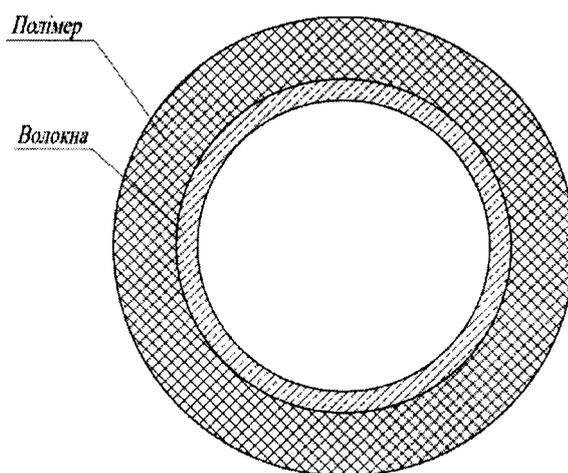


Рисунок 2.16 – Положення композитних ниток в полімерній трубі

## 2.5 Підготовка продукту виробництва до визначення на міцність

Визначимо вагу освітлювальних приладів, що діють на щоглу. Відомо, що на такі опори висотою 4-5 м установлюють консолі для кріплення ламп до 10 кг.

Тому вагу даних конструкцій розрахуємо за формулою:

$$P = m \cdot g \approx 100 \text{ Н}, \quad (2.6)$$

де  $g$  - прискорення вільного падіння,  $g = 9,98 \text{ м/с}^2$ .

Вітрове навантаження розраховане для штормового вітру зі швидкістю, що досягає 10-15 м/с [12] і дорівнює  $Q = 500 \text{ МПа}$ . Хоча такі сильні вітри зазвичай не характерні для території України, проте обрано максимально «небезпечні» умови для розрахунку міцності.

Перед розрахунком в системі ANSYS [13] схематично зобразимо закріплення труби та навантаження, що діють на неї (рис. 2.17).

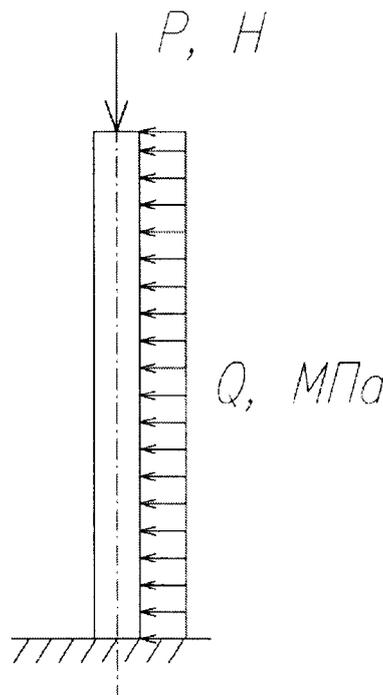


Рисунок 2.17 – Схема закріплення труби та навантаження, що діють на неї:

$P, \text{ Н}$  - навантаження від ваги освітлювальних приладів;  $Q, \text{ МПа}$  - тиск від дії силу вітру

Для проведення розрахунку необхідно у вкладці Mechanical закріпити один кінець труби - жорстке консольне закріплення, на інший додати вагу від консолі освітлювальних приладів та прикласти тиск від сили вітру до однієї з поздовжньої поверхонь моделі, попередньо розділивши трубу на частини у вкладці Design Modeler (рис. 2.18).

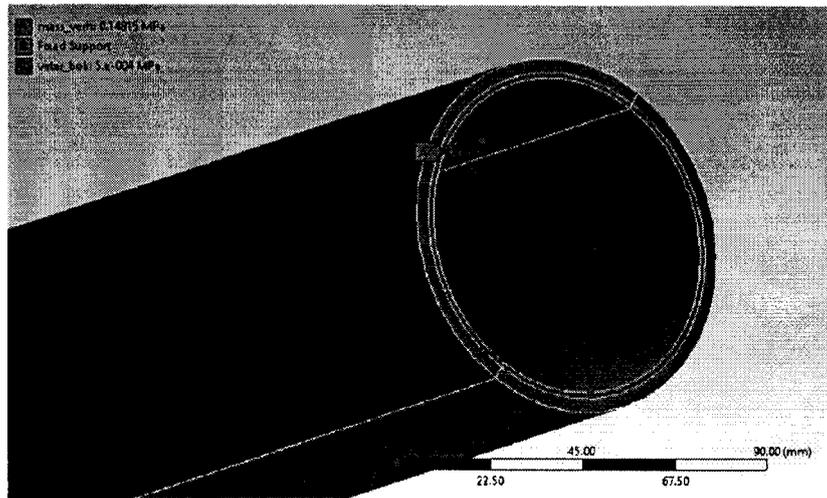
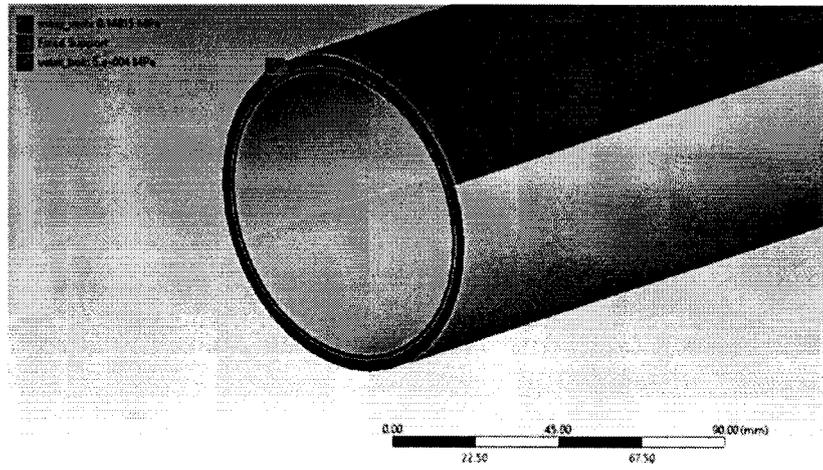


Рисунок 2.18 – Закріплення та навантаження труби: А - площина прикладання ваги освітлювальних приладів; В - площина закріплення труби; С - поверхня тиску вітру

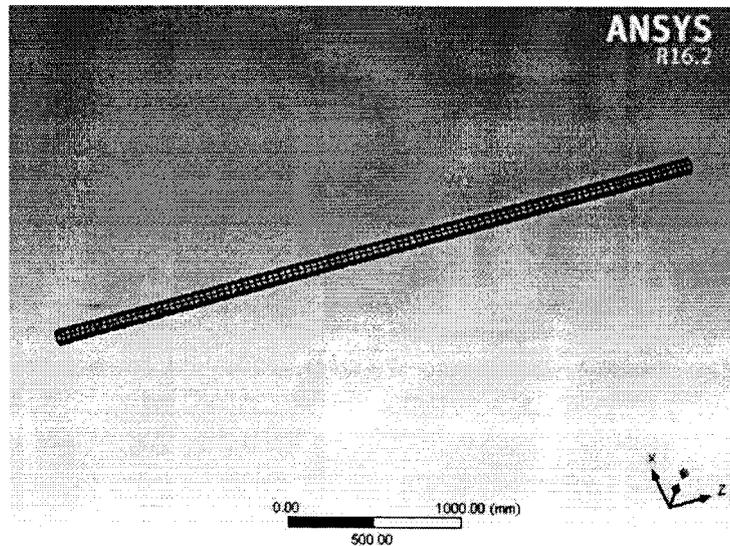


Рисунок 2.19 – Скінчено-елементна модель труби

					ГММ 602-ммМ 014-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Вітрові навантаження визначалися для штормових вітрів зі швидкістю вітру 10–15 м/с [14], що відповідає 500 МПа. Хоча такі сильні вітри зазвичай не характерні для території України, однак було обрано максимальні навантаження для визначення міцності.

У даній роботі вирішено провести перевірку труби на міцність залежно від зиду та відсотку вмісту використаних армуючих волокон (скловолокна та зуглепластика). Розрахунки проводили для 31%, 70% і 80% вмісту композитного матеріалу в полімерній трубі. Щоб порівняти отримані результати для композитних щогл та металевої, було проведено аналіз для алюмінієвої труби.

## 2.6 Визначення на міцність композитної труби, армованої скловолокном

Спочатку визначимо трубу, яка містить 69% ПВХ і 31% скловолокна. Кріплення і навантаження головки здійснюється за схемою (рис. 2.17 і 2.18).

Залежно від вмісту компонентів для даної труби визначено та задано модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, модуль зсуву та густину матеріалу.

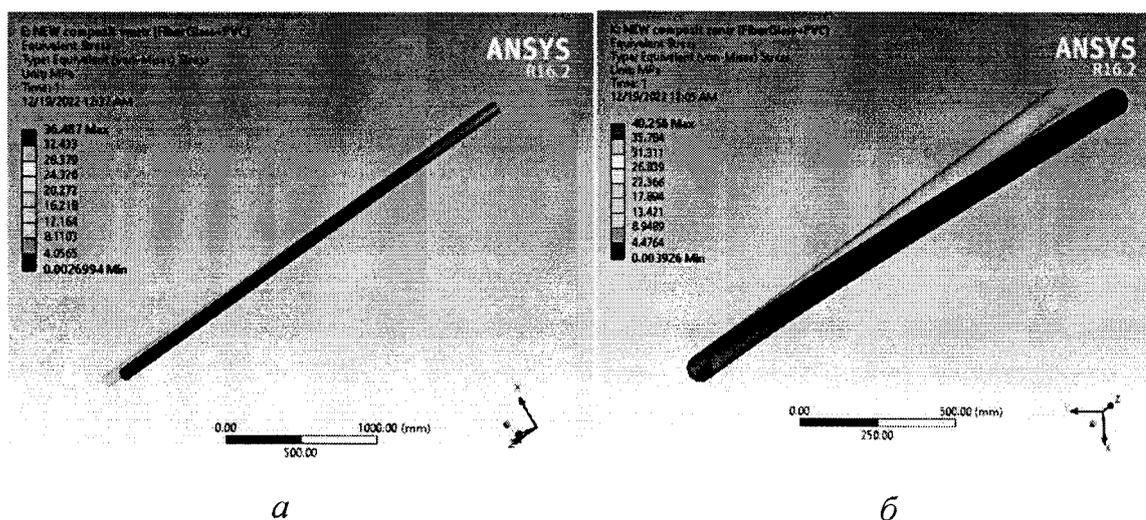
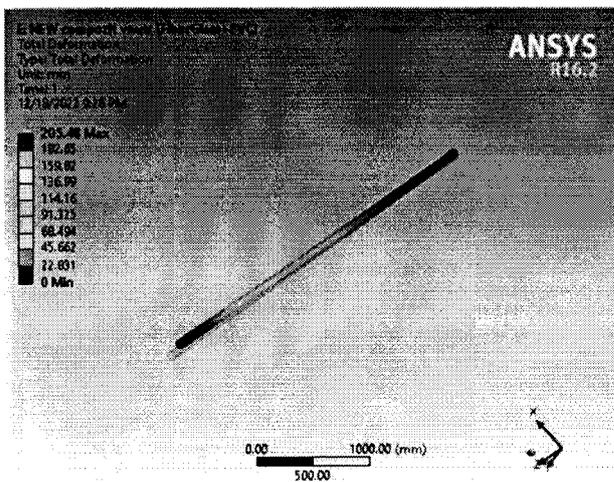
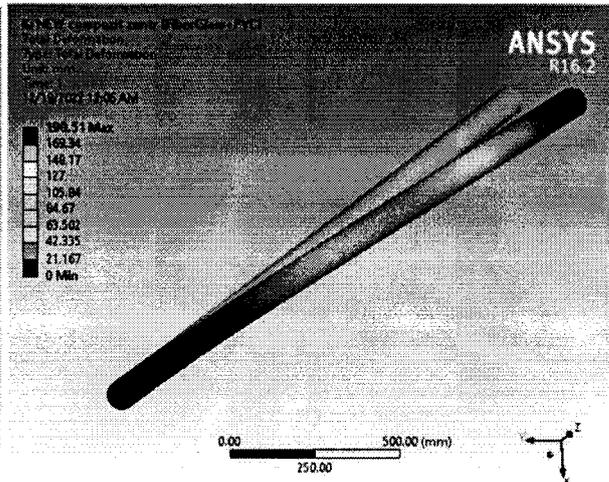


Рисунок 2.20 – Еквівалентні напруження за Мізесом, МПа для труби, що містить 31% скловолокна: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби



а



б

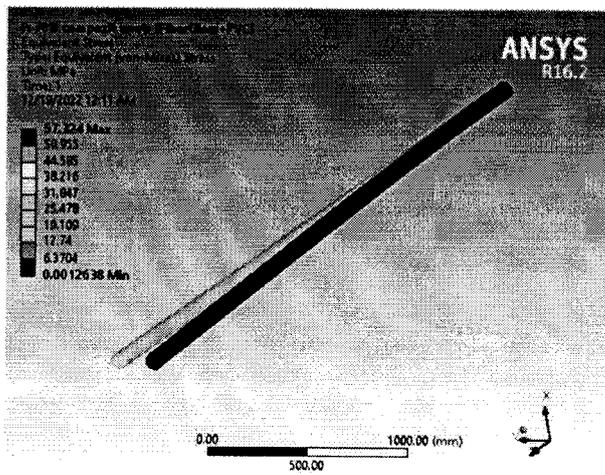
Рисунок 2.21 – Деформації від заданих навантажень в композитній трубі, що містить 31% скловолокна: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби

Порівнюючи розташування волокон однакового складу в двох трубах, приходимо до висновку, що чим ближче волокна розміщені до внутрішньої стінки труби, тим менші напруження, але більші деформації.

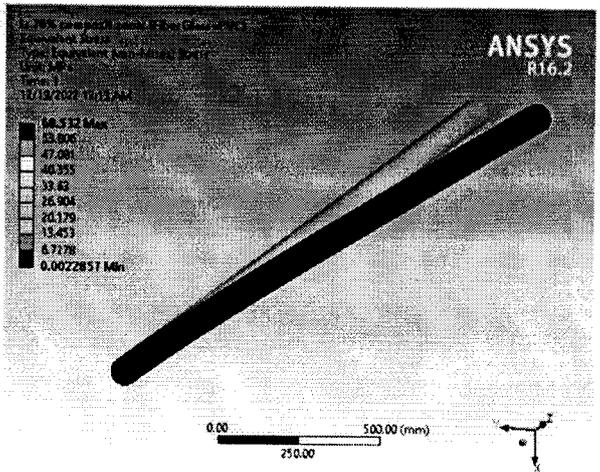
Для повного аналізу модернізованого виробу вирішено провести додаткові розрахунки для більшого вмісту композитних матеріалів і перевірити, які навантаження та деформації з'являються у таких моделях.

Тому розглянуто полімерну трубу, що містить 70% скловолокна. Дану трубу закріплюють і навантажують таким же чином, як і в попередніх розрахунках (рис. 2.17 і 2.18).

Для труб, що містять 70% скловолокна, розташування волокон має такий же ефект, як і для 31% вмісту композитів: чим ближче волокна до внутрішньої стінки, тим менші напруження, але більші деформації (рис. 2.22, 2.23).

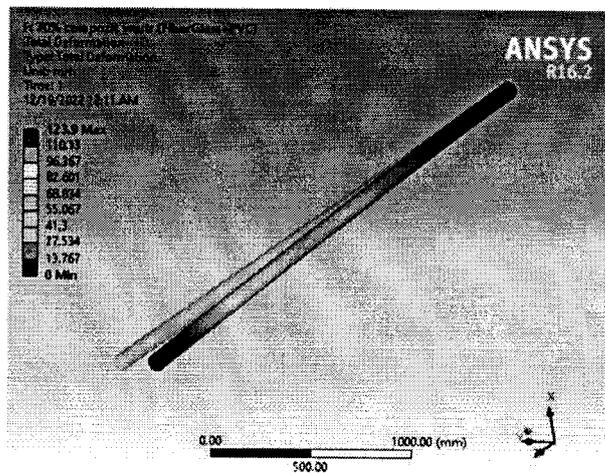


а

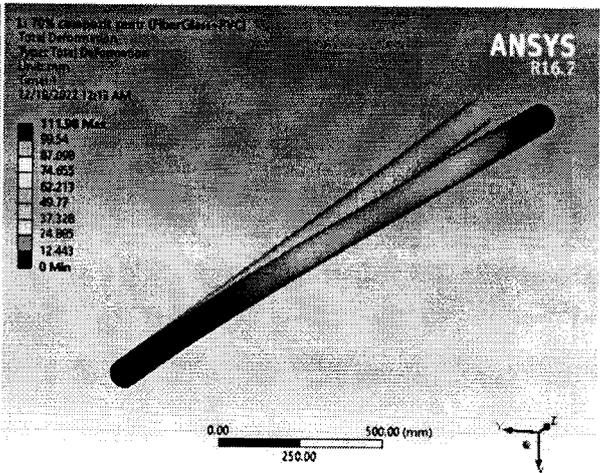


б

Рисунок 2.22 – Еквівалентні напруження за Мізесом, МПа для труби, що містить 70% скловолокна : а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби



а



б

Рисунок 2.23 – Деформації від заданих навантажень в трубі, що містить 70% скловолокна: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби

Проведено розрахунок на міцність полімерної труби, що містить 80% композиту – скловолокна. Цю модель закріплюють і навантажують, як і попередні моделі (рис. 2.17 і 2.18).

Результати аналізу надано для двох різних положень композитних ниток в поперечному перерізі розрахункової моделі.

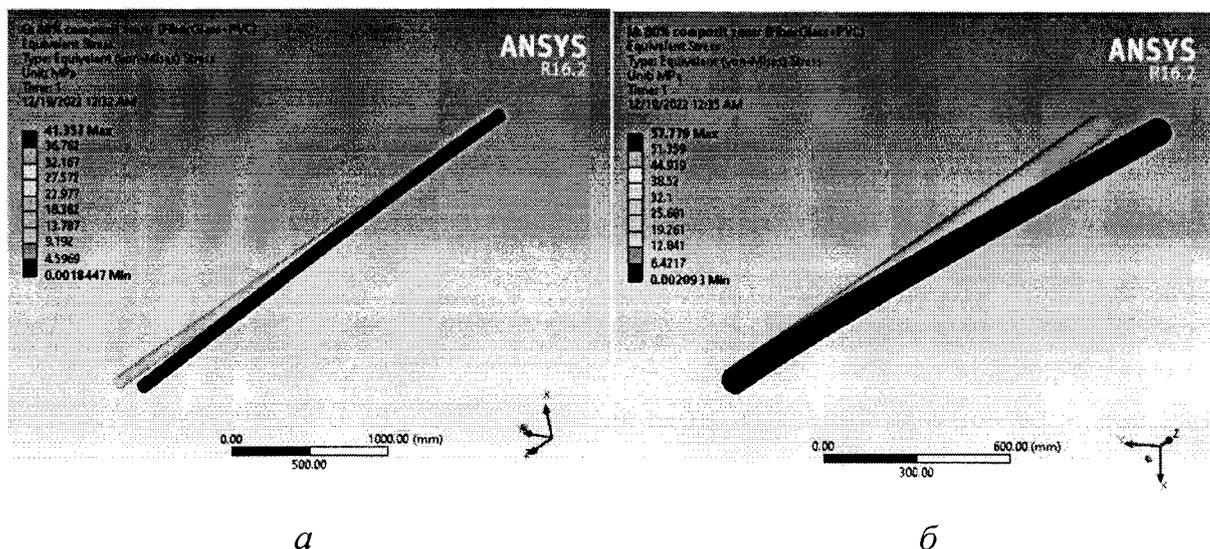


Рисунок 2.24 – Еквівалентні напруження за Мізесом, МПа для труби, що містить 80% скловолокна : а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби

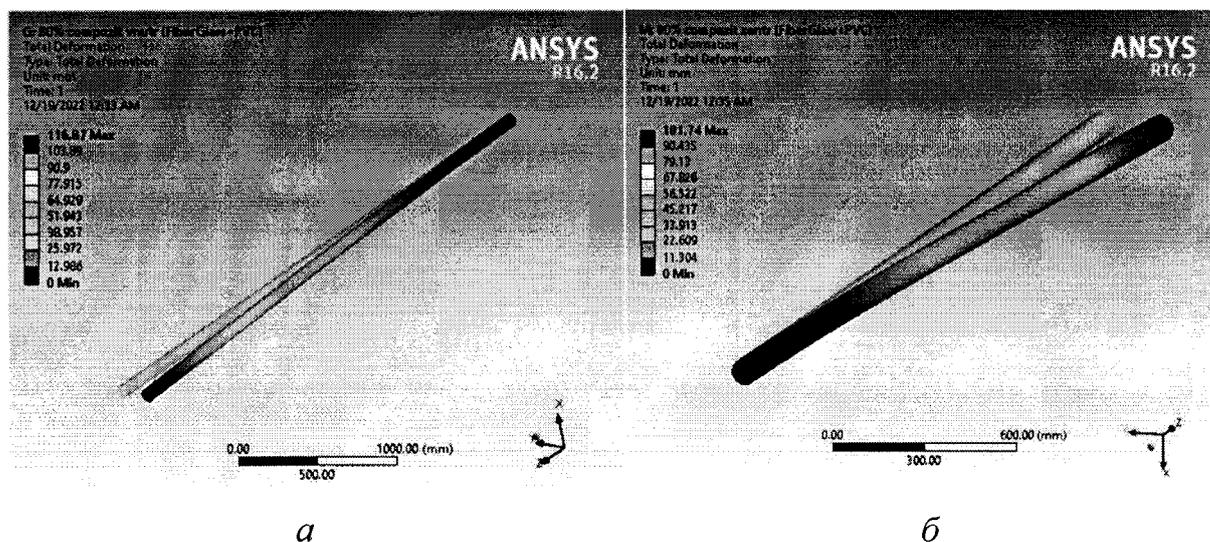


Рисунок 2.25 – Деформації від заданих навантажень в трубі, що містить 80% скловолокна: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби

Таким чином, якщо вміст скловолокна в трубі становить 80%, напруження, що виникають, будуть меншими, коли волокна розташовані ближче до внутрішньої стінки труби, але в цьому положенні композитного матеріалу деформації будуть більшими, порівняно з розміщенням скловолокна по центру.

## 2.7 Визначення на міцність композитної труби, армованої вуглепластиковим волокном

Щоб визначити міцність труби, спочатку необхідно виконати розрахунок моделі, яка містить 31% вуглепластикових волокон. Дану трубу закріплюють і навантажують аналогічно попереднім розрахункам (рис. 2.17 і 2.18). Усі характеристики визначено та задано відповідно до вмісту та розташування ПВХ та карбонового волокна в конструкції труби.

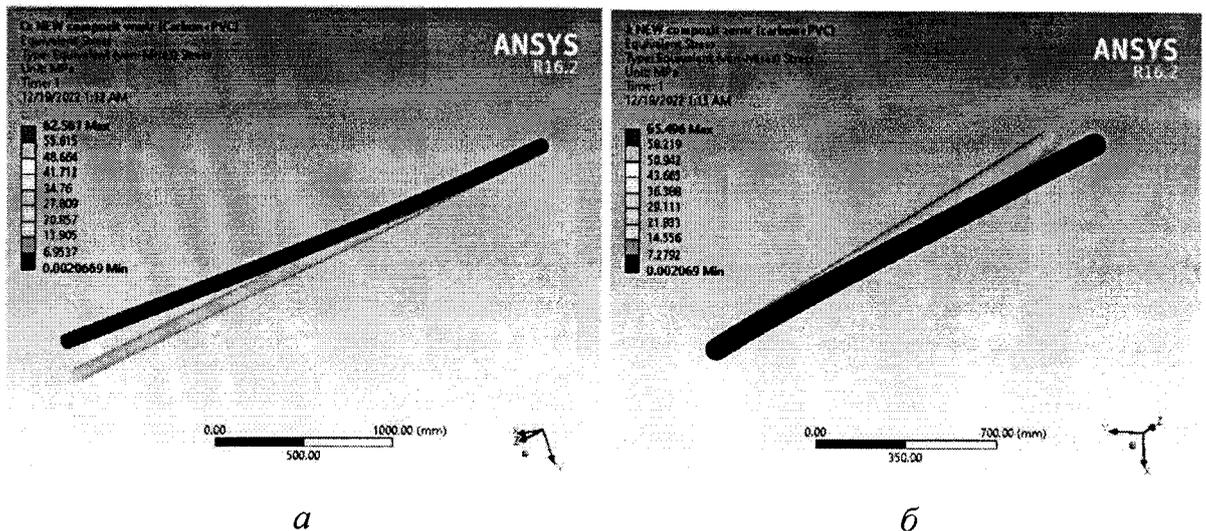


Рисунок 2.26 – Еквівалентні напруження за Мізесом, МПа для труби, що містить 31% вуглепластика: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби

Порівнюючи розташування волокон однакового складу в двох трубах, приходимо до висновку, що чим ближче волокна розміщені до внутрішньої стінки труби, тим виникають менші напруження, але більші деформації (рис. 2.26, 2.27).

Щоб повністю проаналізувати модернізований продукт, необхідно провести визначення на міцність моделі з більшим вмістом композиту, для перевірки навантаження та деформації, що виникають.

З цієї метою розглянуто полімерну трубу, що містить 70% вуглепластикового волокна. Цю трубу закріплюють і навантажують таким же чином, як і в попередніх розрахунках (рис. 2.17 і 2.18).

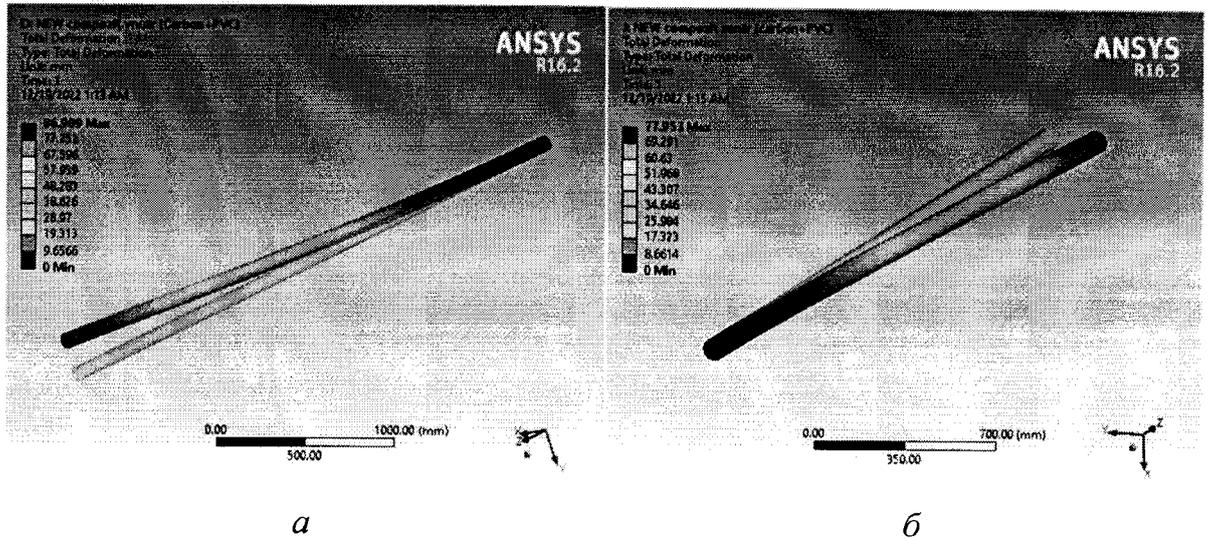


Рисунок 2.27 – Деформації від заданих навантажень в трубі, що містить 31% вуглепластика: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби

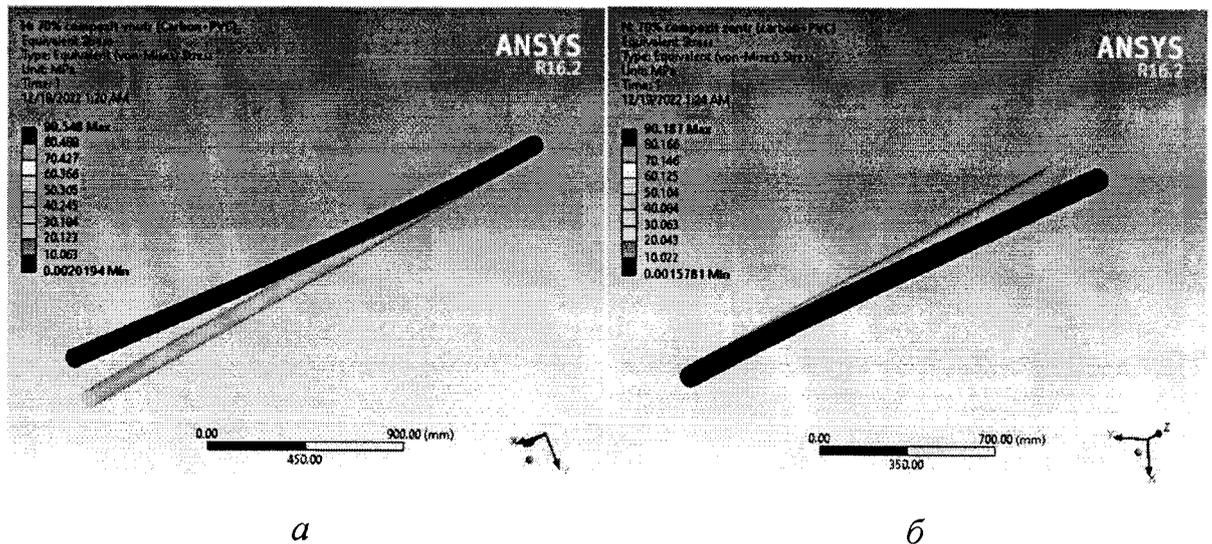


Рисунок 2.28 – Еквівалентні напруження за Мізесом, МПа для труби, що містить 70% вуглепластика: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби

Для труби, що містить 70% вуглепластикового волокна, розташування волокон має такий же ефект, як і для 31% композиту: чим ближче волокна до внутрішньої стінки, тим менші напруження, але більші деформації (рис. 2.28, 2.29).

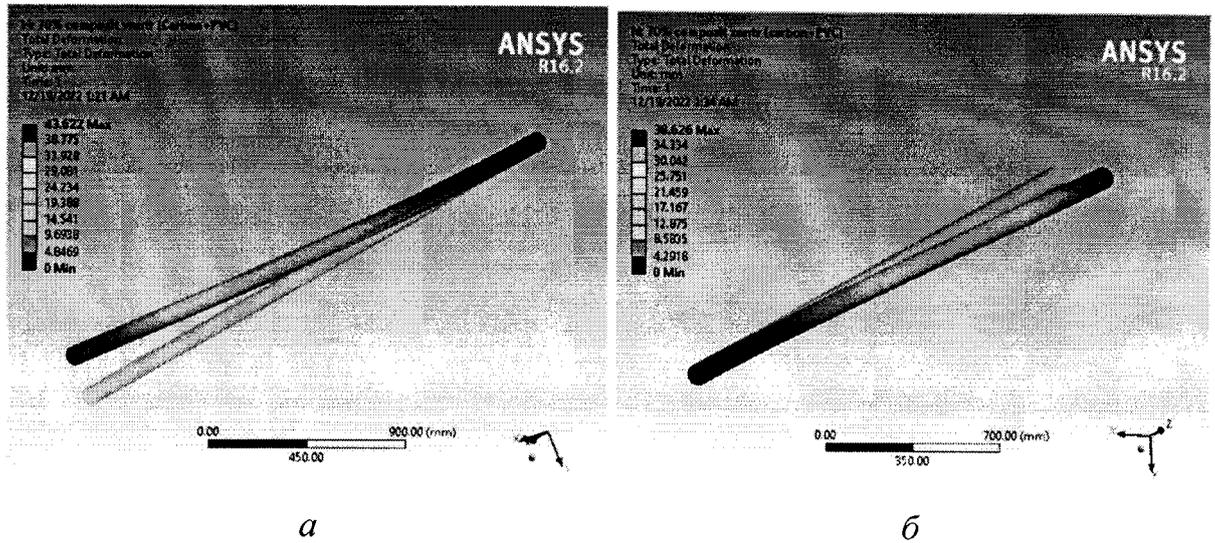


Рисунок 2.29 – Деформації від заданих навантажень в трубі, що містить 70% вуглепластика: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби

Виконано розрахунок на міцність полімерної труби, що містить 80% композиту - вуглепластик. Дану модель закріплено та навантажено як і попередні (рис. 2.17 і 2.18).

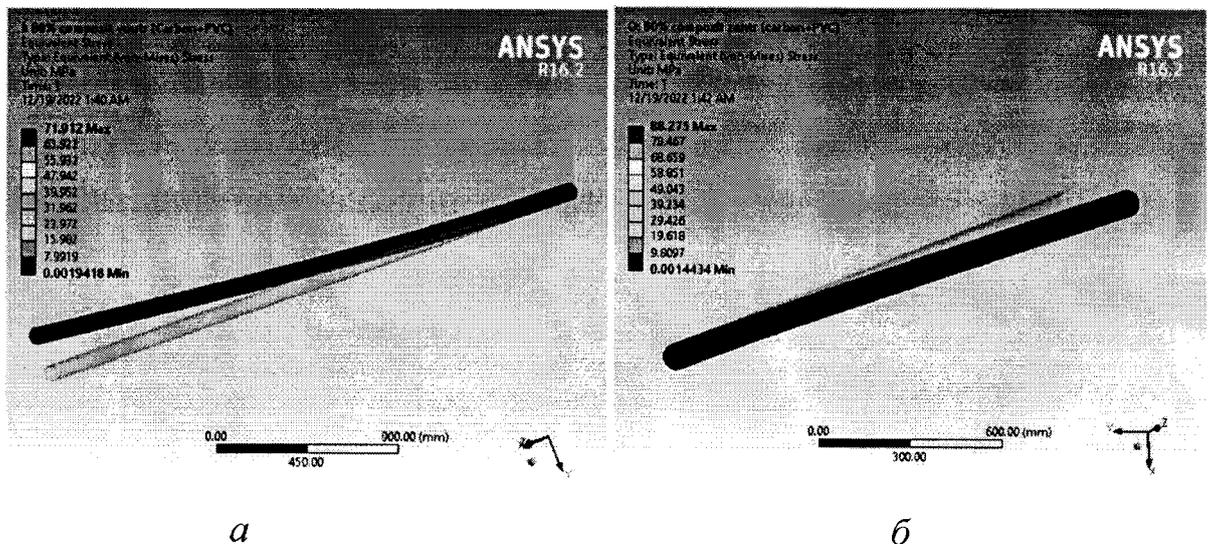
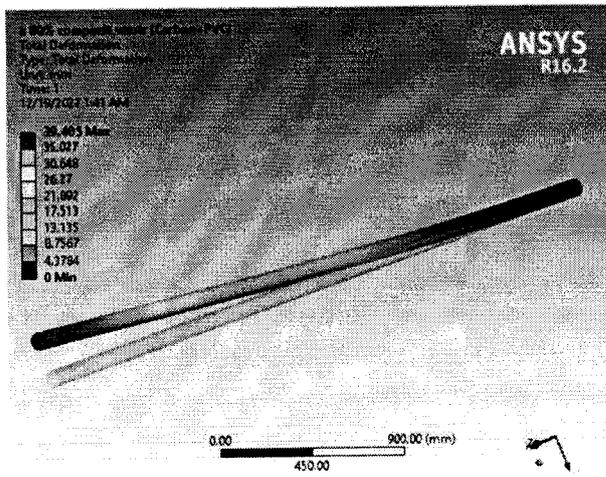
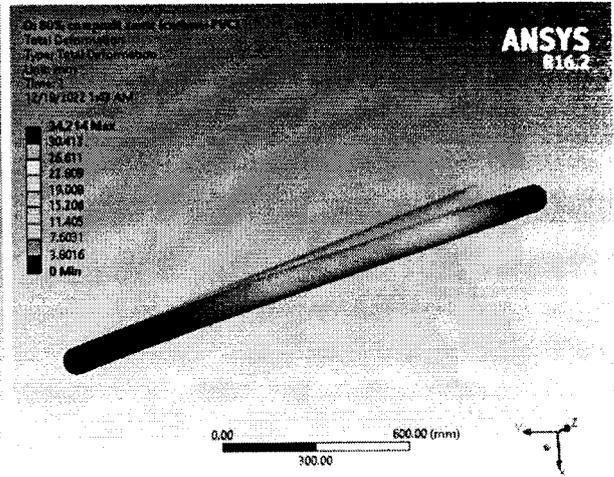


Рисунок 2.30 – Еквівалентні напруження за Мізесом, МПа для труби, що містить 80% вуглепластика: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби



*a*



*б*

Рисунок 2.31 – Деформації від заданих навантажень в трубі, що містить 50% вуглепластика: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби

Таким чином, якщо вміст вуглепластикового волокна в трубі становить 50 відсотків, напруження, що виникають, будуть меншими, коли волокна розташовані ближче до внутрішньої стінки труби, але в такому положенні композиту деформації будуть більшими, порівняно з розміщенням скловолокна по центру (рис. 2.30, 2.31).

## 2.8 Підтвердження актуальності запропонованих модернізацій

### 2.8.1 Визначення базової металевої труби на міцність

З метою підтвердження правильності обраних технологій виготовлення композитних труб, які можуть використовуватись в якості опор та щогл, завдяки їх високій міцності та стійкості до деформацій від навантажень, було проведено визначення алюмінієвої труби щогли (рис. 2.32, 2.33).

Металеву деталь було закріплено та навантажено таким чином, як і композитні (рис. 2.17 і 2.18).

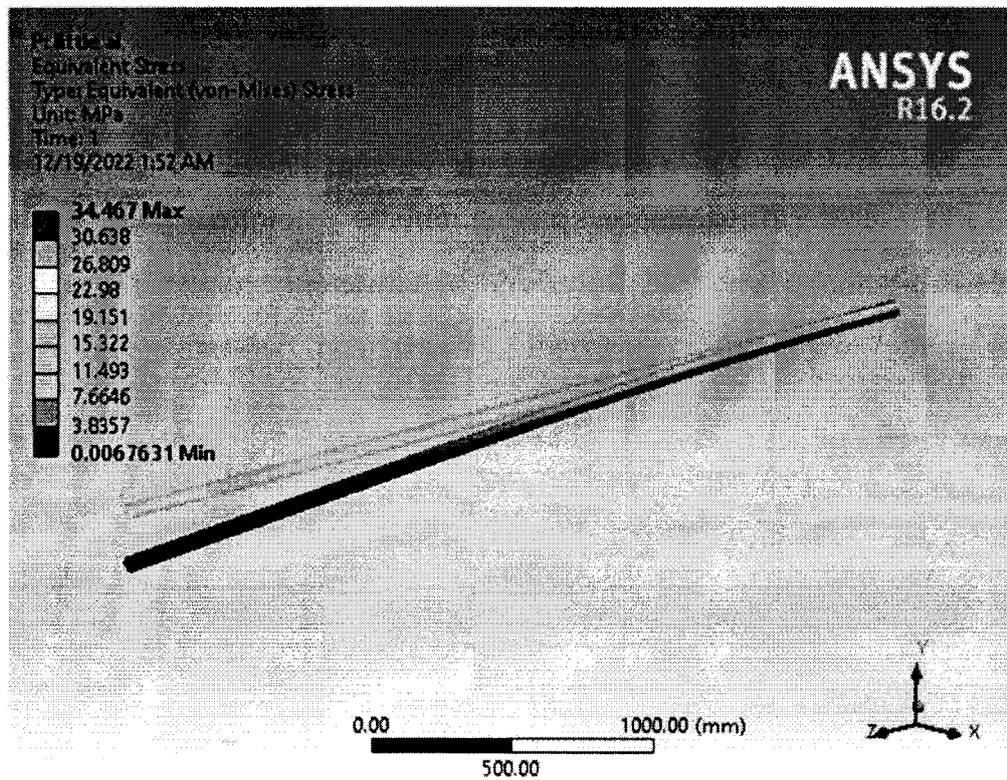


Рисунок 2.32 – Еквівалентні напруження за Мізесом, МПа для алюмінієвої труби

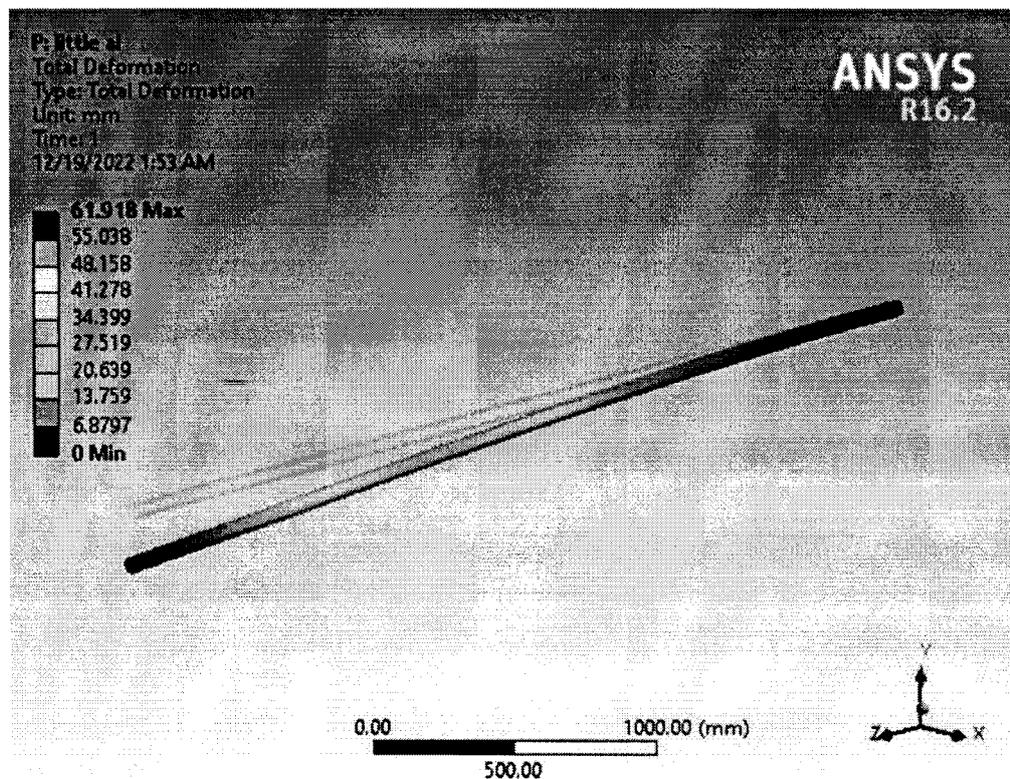


Рисунок 2.33 – Деформації від заданих навантажень в алюмінієвій трубі





## 2.9 Висновки до розділу 2

1. У даній роботі розглянуто лінію для виготовлення композитних труб методом екструзії. Труби виконані з полівінілхлориду (ПВХ) і вуглецевого пластику, які мають діаметр 90 мм і товщину стінки 5 мм.

Представлена лінія для виготовлення композитних труб використовується на різних підприємствах, що спеціалізуються на переробці полімерних і будівельних матеріалів, тобто для постачання питної води та господарських потреб, для транспортування рідких продуктів харчування, у нафтовій промисловості, для транспортування агресивних хімічних речовин, вентиляції для агресивних парів, а також в якості систем для хімічної очистки води.

2. Метою проведення літературно-патентного пошуку є вибір технічного рішення та обґрунтування обраної модернізації, які забезпечать більш ефективне виготовлення композитних труб.

Однією з проблем екструзійних головок є пульсації розплаву в формуючому каналі. Для усунення цього автор [4] запропонував виконати дорнотримач 4 з двох частин, забезпечивши можливість зворотно-поступального руху його частин відносно одна одної, як наведено на рис. 2.3. Матрицю 1 і вихідну частину дорну 3 закріплюють таким чином, щоб була можливість зміни довжини каналу. В результаті усунення пульсацій, забезпечується більш висока якість поверхні.

Автор патенту [5] вирішив проблеми виготовлення безшовних двостінних пластикових гофрованих труб, зокрема: неконтрольованість товщини зовнішньої стінки виробу, неможливість змінювати товщину трубки. Тому була створена модель з подовженим носієм, розміщеним усередині направляючої. Даний носій містить другу направляючу та гайку, що утворює внутрішнє кільце, розміщене на носії, і зовнішнє кільце, прикріплене до внутрішнього кільця павутинними лапками.

Дана конструкція також дозволяє легко замінювати насадки та направляючі для очищення різних розмірів виготовлених труб.





Коефіцієнт запасу міцності для армованих скловолокном труб більший, ніж коефіцієнт міцності, розрахований для вуглепластикових конструкцій. Результати аналізу в системі нескінченних елементів показали, що модель, яка містить вуглепластикові волокна менше деформується, ніж модель, яка складається з такого ж відсотку іншого композитного матеріалу – скловолокна.

					ГММ 602-мММ 014-00.00.000 ПЗ	Лист
Єм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

# РОЗДІЛ 3      ВИЗНАЧЕННЯ,      ЩО      ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ ЕКСТРУДЕРА

## 3.1 Визначення продуктивності двочерв'ячного екструдера

В даному пункті представлено визначення для продуктивності двочерв'ячного екструдера для виготовлення багат шарових полімерних труб:

- Вид екструдера - з зачепленням;
- Напрямок обертання черв'яків - протилежний зворотний напрямком;
- Геометрія каналів черв'яків - прямокутна;
- Діаметр черв'яків  $D$ , мм - 90;
- Діаметр сердечників черв'яків  $d$ , мм - 64;
- Західність черв'яків  $i$  - 2;
- Шаг гвинтового каналу  $t$ , мм - 80;
- Ширина гребню витків по вісі черв'яків  $e$ , мм - 13,8
- Ширина (товщина) гребню  $s$ , мм - 13,3;
- Зазор між стінками витків черв'яків  $\epsilon$ , мм - 3;
- Зазор зачеплення  $\delta$ , мм - 1;
- Боковий зазор між поверхнями гребенів витків і циліндром  $\delta_b$ , мм - 2;
- Глибина каналу  $H$ , мм - 13;
- Частота обертання черв'яків  $n$ ,  $s^{-1}$  - 600;
- Густина жорсткого полівінілхлориду  $\rho$ ,  $kg/m^3$  - 1400;
- Середня температура розплаву в зоні дозування  $T$ ,  $^{\circ}C$  - 177;
- Ефективна в'язкість розплаву,  $MPa \cdot s$ ;
- Середній тиск у зоні дозування  $\Delta P_c$ ,  $MPa$  - 10.

Насамперед визначимо продуктивність  $G_0$  (без урахування потоків перетоку),

ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ				
<b>Зм</b>	<b>Лист.</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Підпис</b>	<b>Дата</b>
Зроб.		Остапенко	<i>Б. Оч</i>	29.12
Реєвір.		Шаповал	<i>М. Шаповал</i>	29.12
Реєвник		Шаповал	<i>М. Шаповал</i>	29.12
Контр.		Васильєв	<i>В. Васильєв</i>	29.12
З'яв.		Орисенко	<i>О. Орисенко</i>	29.12
ВИЗНАЧЕННЯ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ ЕКСТРУДЕРА				
		<b>Лім.</b>	<b>Лист</b>	<b>Листів</b>
Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІІТР 2023 р.				

Для цього розрахуємо наступні величини.

Розрахуємо значення кута  $\alpha$  (рис. 1.5):

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= 1 - \frac{4H}{D} + \frac{2H^2}{D^2} = 1 - 4 \cdot \frac{13}{90} + 2 \cdot \frac{13^2}{90^2} = 1 - 0,5776 + 0,0418 \\ &= 0,4639; \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\alpha = 62^\circ 39';$$

Визначимо значення кута  $\varphi$ :

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{t}{\pi D} = \frac{80}{3,14 \cdot 90} = 0,2831; \quad (3.2)$$

$$\varphi = 15^\circ 48';$$

Знайдемо відстань  $B$ :

$$B = \left(\frac{t}{i} - e\right) \cos\varphi = \left(\frac{80}{2} - 13,8\right) \cos 15^\circ 48' = 26,2 - 0,9647 = 25,3 \text{ мм}; \quad (3.3)$$

Розрахуємо довжини відрізків  $ab$  та  $oc$ :

$$ab = D \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 90 \cdot \sin\left(\frac{62^\circ 39'}{2}\right) = 90 \cdot 0,5200 = 46,8 \text{ мм}; \quad (3.4)$$

$$oc = \frac{D}{2} - \frac{H}{2} = \frac{90}{2} - \frac{13}{2} = 38,5 \text{ мм};$$

Виконаємо розрахунок площ трикутника та чотирикутника:

$$S_{oab} = 0,5 oc \cdot ab = 0,5 \cdot 38,5 \cdot 46,8 = 901 \text{ мм}^2; \quad (3.5)$$

$$S_{oamb} = \frac{D^2 \alpha}{8} = 90^2 \cdot \frac{1,0932}{8} = 1107 \text{ мм}^2$$

Примітка: перевід  $\alpha$  із градусної міри в радіанну –  $\alpha = 62^\circ 39'$ .

$$1) 62 \cdot \pi/180 = = 62 \cdot 0,01745 = 1,0819;$$

$$2) 39 \cdot \pi/(180 \cdot 60) = 39 \cdot 0,000291 = 0,0113. \quad (3.6)$$

$$3) \alpha = 1,0819 + 0,0113 = 1,0932;$$

$$S_c = 2(S_{oamb} - S_{oab}) = 2(1107 - 901) = 412 \text{ мм}^2; \quad (3.7)$$

$$S_k = \pi H(D - H) = 3,14 \cdot 13 \cdot (90 - 13) = 3143 \text{ мм}^2;$$

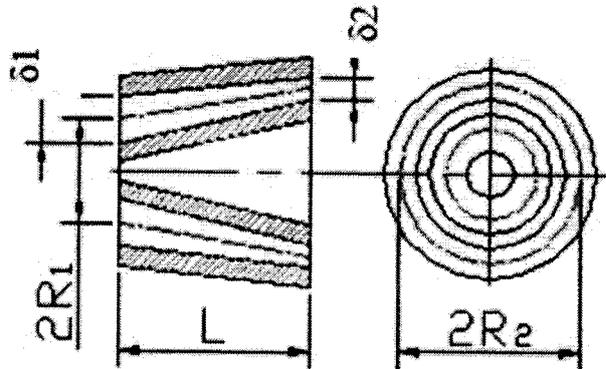




$$K_2 = \frac{3\pi \times D^3 \times d^3}{128L(D^2 \times Dd \times d^2)} = \frac{3\pi \times 128^3 \times 90^3}{128 \times 40 \times (128^2 + 128 \times 90 + 90^2)} \quad (3.17)$$

$$= 26041.5 \text{ мм}^3 = 0.000026 \text{ м}^3;$$

3) Конічний кільцевий з конічної щілиною:  $R_1 = 65 \text{ мм}$ ,  $R_2 = 68.5 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = 20 \text{ мм}$ ,  $\delta_2 = 14 \text{ мм}$ ,  $L = 90 \text{ мм}$ .



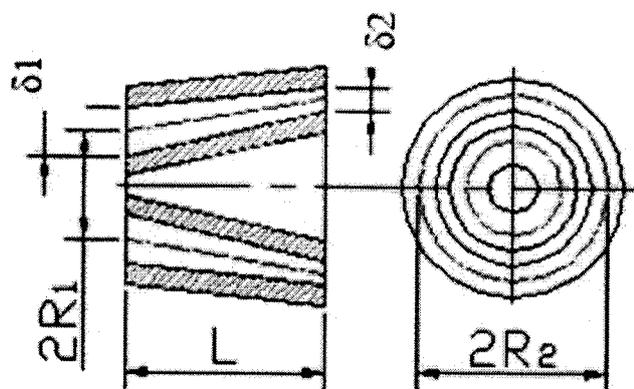
$$\omega_3 = \frac{2.3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \cdot \lg \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2) \cdot (\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1) \cdot \delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 \cdot \delta_1^2 \cdot \delta_2^2} \quad (3.18)$$

$$= -0.00147;$$

$$K_3 = \frac{\pi \cdot (R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6 \times L \times \omega_3} = \frac{\pi \cdot (65 \cdot 14 - 68.5 \cdot 20)}{6 \times 90 \times (-0.00147)} = 1819.6 \text{ мм}^3 \quad (3.19)$$

$$= 0.00000182 \text{ м}^3;$$

4) Конічний кільцевий з конічної щілиною:  $R_1 = 68.5 \text{ мм}$ ,  $R_2 = 70 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = 14 \text{ мм}$ ,  $\delta_2 = 30 \text{ мм}$ ,  $L = 28 \text{ мм}$ .



$$\omega_4 = \frac{2.3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \cdot \lg \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2) \cdot (\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1) \cdot \delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 \cdot \delta_1^2 \cdot \delta_2^2} \quad (3.20)$$

$$= 0.00195;$$

Лист	№ докум.	Підп.	Дата

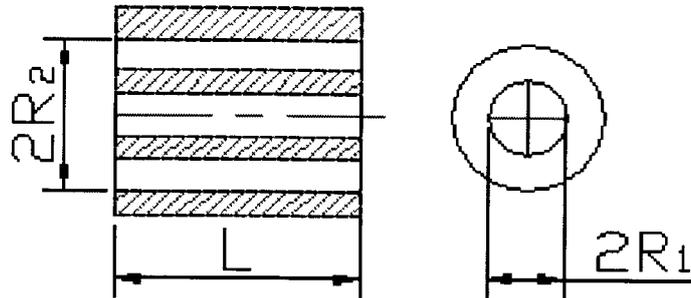
ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ

Лист

$$K_4 = \frac{\pi \cdot (R_1 \delta_2 - R_2 \delta_1)}{6 \times L \times \omega_4} = \frac{\pi \cdot (68.5 \cdot 130 - 70 \cdot 14)}{6 \times 28 \times 0.00195} = 10303 \text{ мм}^3$$

$$= 0.0000103 \text{ м}^3; \quad (3.21)$$

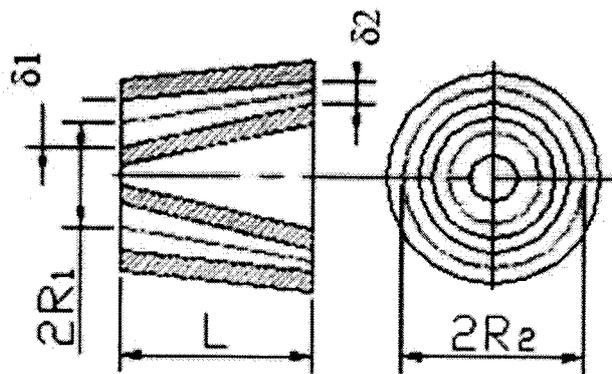
5) Кільцева зона:  $R_1 = 55 \text{ мм}$ ,  $R_2 = 85 \text{ мм}$ ,  $L = 96 \text{ мм}$ .



$$K_5 = \frac{\pi \cdot (R_2 + R_1)(R_2 - R_1)^3}{12 \times L} = \frac{\pi \cdot (85 + 55)(85 - 55)^3}{12 \times 96} = 10303 \text{ мм}^3$$

$$= 0.0000103 \text{ м}^3; \quad (3.22)$$

6) Конічний кільцевий з конічною щілиною:  $R_1 = 61.25 \text{ мм}$ ,  $R_2 = 70 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = 12.5 \text{ мм}$ ,  $\delta_2 = 30 \text{ мм}$ ,  $L = 49 \text{ мм}$ .



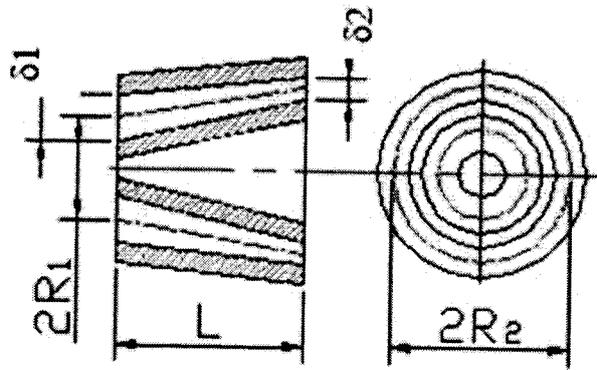
$$\omega_6 = \frac{2.3(R_1 - R_2)^2}{(R_1 \delta_2 - R_2 \delta_1)^2} \cdot \lg \frac{R_1 \delta_2}{R_2 \delta_1} - \frac{(R_1 - R_2) \cdot (\delta_1 - \delta_2)}{(R_1 \delta_2 - R_2 \delta_1) \cdot \delta_1 \delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 \cdot \delta_1^2 \cdot \delta_2^2}$$

$$= 0.0022;$$

$$K_6 = \frac{\pi \cdot (R_1 \delta_2 - R_2 \delta_1)}{6 \times L \times \omega_3} = \frac{\pi \cdot (61.25 \cdot 30 - 70 \cdot 12.5)}{6 \times 49 \times 0.0022} = 4672.6 \text{ мм}^3$$

$$= 0.0000047 \text{ м}^3; \quad (3.24)$$

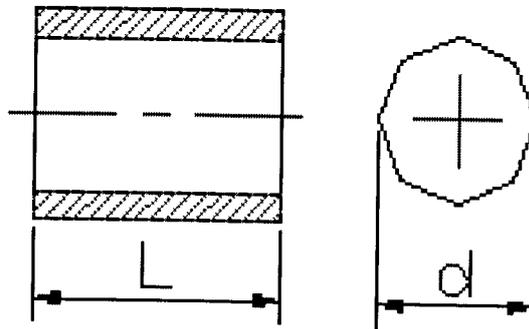
7) Конічний кільцевий з конічною щілиною:  $R_1 = 42.5 \text{ мм}$ ,  $R_2 = 61.25 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = 5 \text{ мм}$ ,  $\delta_2 = 12.5 \text{ мм}$ ,  $L = 180 \text{ мм}$



$$\omega_7 = \frac{2.3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \cdot \lg \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2) \cdot (\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1) \cdot \delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 \cdot \delta_1^2 \cdot \delta_2^2} \quad (3.25)$$

$$= 0.0106;$$

8) Циліндрична кругла зона:  $D = 85$  мм,  $L = 60$  мм.



$$K_8 = \frac{\pi \times D^4}{128 \times L} = \frac{\pi \times 85^4}{128 \times 60} = 21342 \text{ мм}^3 = 0.0000213 \text{ м}^3; \quad (3.26)$$

Загальний коефіцієнт геометричної форми:

$$K_{\text{заг}} = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{1}{K_5} + \frac{1}{K_6} + \frac{1}{K_7} + \frac{1}{K_8} + \frac{1}{K_9}} \quad (3.27)$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{114964} + \frac{1}{26041.5} + \frac{1}{1819.6} + \frac{1}{10303} + \frac{1}{10303} + \frac{1}{4672.6} + \frac{1}{61.71} + \frac{1}{21342}}$$

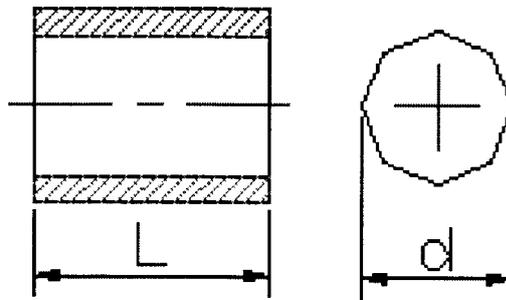
$$= \frac{1}{0.016528} = 58.62 \text{ мм}^3 = 5.862 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3.$$

### 3.3 Визначення перепаду тиску в екструзійній головці екструдера

Обчислимо швидкість зсуву  $\gamma_i$  для кожної ділянки постійної геометрії екструзійної головки (рис 2.2). Для розрахунку застосуємо значення продуктивності екструдера:

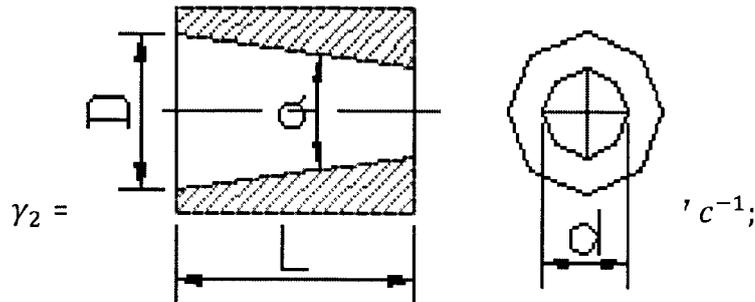
$$Q = 47748 \text{ мм}^3/\text{с} = 0.0000478 \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.28)$$

1) Циліндрична кругла зона:  $D = 0.09 \text{ м}$ ,  $L = 0.014 \text{ м}$ .

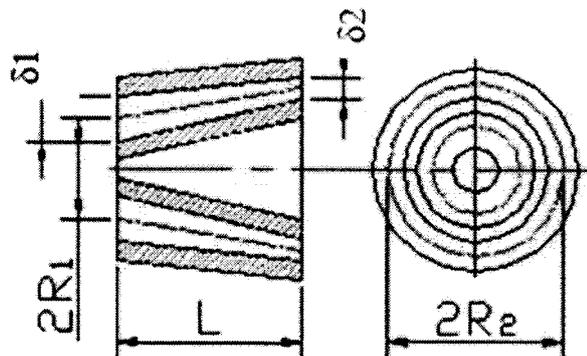


$$\gamma_1 = \frac{32 \cdot Q}{\pi \cdot D^3} = \frac{32 \cdot 0.0000478}{\pi \cdot 0.09^3} = 0.667 \text{ с}^{-1}; \quad (3.29)$$

2) Круглий конічний з великим діаметром на вході:  $L = 0.04 \text{ м}$ ,  $D = 0.0128 \text{ м}$ ,  $d = 0.09 \text{ м}$ .

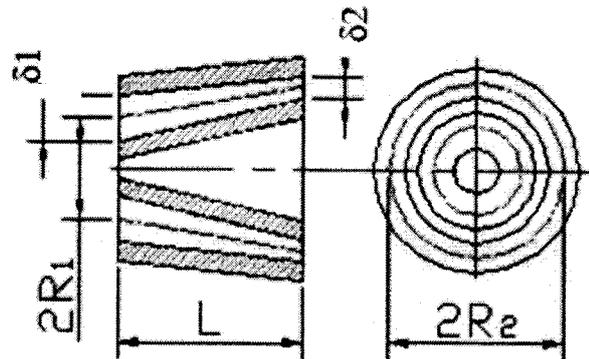


3) Конічний кільцевий з конічної щілиною:  $R1 = 0.065 \text{ м}$ ,  $R2 = 0.0685 \text{ м}$ ,  $\delta1 = 0.020 \text{ м}$ ,  $\delta2 = 0.014 \text{ м}$ ,  $L = 0.09 \text{ м}$



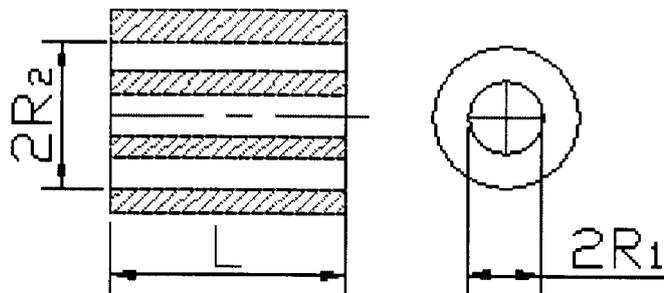
$$\gamma_3 = \frac{22.32 \cdot Q}{\pi(R_1 + R_2)(\delta_1 + \delta_2)^2} = \frac{22.32 \cdot 0.0000478}{\pi(0.065 + 0.0685)(0.020 + 0.014)^2} = 0.22 \text{ c}^{-1}; \quad (3.30)$$

4) Конічний кільцевий з конічної щілиною:  $R_1 = 0.0685 \text{ м}$ ,  $R_2 = 0.07 \text{ м}$ ,  $\delta_1 = 0.014 \text{ м}$ ,  $\delta_2 = 0.03 \text{ м}$ ,  $L = 0.028 \text{ м}$ .



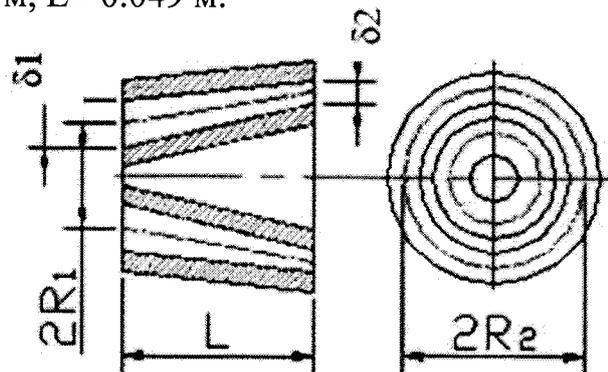
$$\gamma_4 = \frac{22.32 \cdot Q}{\pi(R_1 + R_2)(\delta_1 + \delta_2)^2} = \frac{22.32 \cdot 0.0000478}{\pi(0.0685 + 0.070)(0.014 + 0.030)^2} = 1.268 \text{ c}^{-1}; \quad (3.31)$$

5) Кільцева зона:  $R_1 = 0.055 \text{ м}$ ,  $R_2 = 0.085 \text{ м}$ ,  $L = 0.096 \text{ м}$ .



$$\gamma_5 = \frac{5.58 \cdot Q}{\pi(R_1 + R_2)(R_2 - R_1)^2} = \frac{266434}{\pi(0.055 + 0.085)(0.085 - 0.055)^2} = 0.673 \text{ c}^{-1}; \quad (3.32)$$

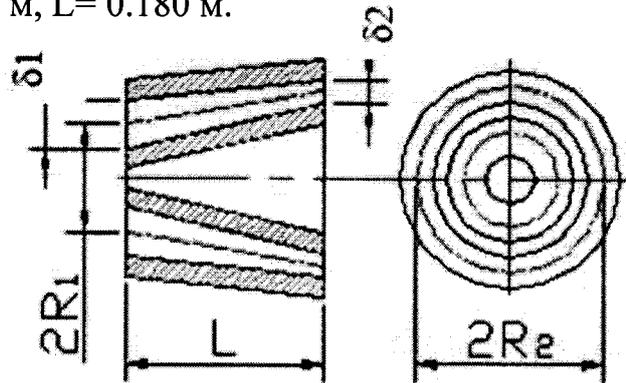
6) Конічний кільцевий з конічної щілиною:  $R_1 = 0.06125 \text{ м}$ ,  $R_2 = 0.070 \text{ м}$ ,  $\delta_1 = 0.0125 \text{ м}$ ,  $\delta_2 = 0.030 \text{ м}$ ,  $L = 0.049 \text{ м}$ .



$$\gamma_6 = \frac{22.32 \cdot Q}{\pi(R_1 + R_2)(\delta_1 + \delta_2)^2} = \frac{22.32 \cdot 0.0000478}{\pi(0.06125 + 0.070)(0.0125 + 0.030)^2} \quad (3.33)$$

$$= 1.431 \text{ c}^{-1};$$

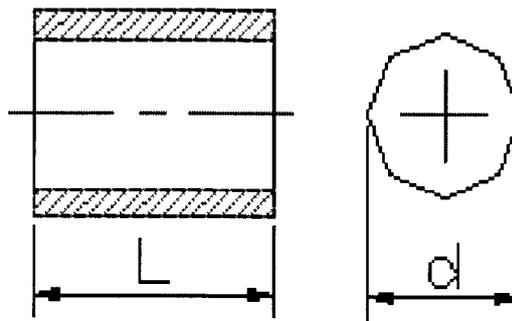
7) Конічний кільцевий з конічної щілиною:  $R_1 = 0.0425 \text{ м}$ ,  $R_2 = 0.06125 \text{ м}$ ,  
 $\delta_1 = 0.005 \text{ м}$ ,  $\delta_2 = 0.0125 \text{ м}$ ,  $L = 0.180 \text{ м}$ .



$$\gamma_7 = \frac{22.32 \cdot Q}{\pi(R_1 + R_2)(\delta_1 + \delta_2)^2} = \frac{22.32 \cdot 0.0000478}{\pi(0.0425 + 0.06125)(0.005 + 0.0125)^2} \quad (3.34)$$

$$= 10.682 \text{ c}^{-1};$$

8) Циліндрична кругла зона:  $D = 0.085 \text{ м}$ ,  $L = 0.060 \text{ м}$ .



$$\gamma_8 = \frac{32 \cdot Q}{\pi \cdot D^3} = \frac{32 \cdot 0.0000478}{\pi \cdot 0.085^3} = 0.792 \text{ c}^{-1}; \quad (3.35)$$

Далі проводимо розрахунок для кожної ділянки постійної геометрії головки - визначаємо в'язкість при заданій температурі, враховуючи що використовується полімер - ПВХ.

$$\mu_i = m \cdot \gamma_i^{n-1};$$

$$m = 29526 \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad n = 0.248; \quad (3.36)$$

1) Для першої ділянки:

$$\mu_1 = m \cdot \gamma_1^{n-1} = 29526 \cdot 0.667^{0.248-1} = 40041 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

2) Для другої ділянки:

$$\mu_2 = m \cdot \gamma_1^{n-1} = 29526 \cdot 1.377^{0.248-1} = 23215 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

3) Для третьої ділянки:

$$\mu_3 = m \cdot \gamma_1^{n-1} = 29526 \cdot 0.22^{0.248-1} = 92203 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

4) Для четвертої ділянки:

$$\mu_4 = m \cdot \gamma_1^{n-1} = 29526 \cdot 1.268^{0.248-1} = 24700 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

5) Для п'ятої ділянки:

$$\mu_5 = m \cdot \gamma_1^{n-1} = 29526 \cdot 0.673^{0.248-1} = 39772 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

6) Для шостої ділянки:

$$\mu_6 = m \cdot \gamma_1^{n-1} = 29526 \cdot 1.431^{0.248-1} = 22553 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

7) Для сьомої ділянки:

$$\mu_7 = m \cdot \gamma_1^{n-1} = 29526 \cdot 10.682^{0.248-1} = 4974 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

8) Для восьмої ділянки:

$$\mu_7 = m \cdot \gamma_1^{n-1} = 29526 \cdot 0.792^{0.248-1} = 35189 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

Розрахуємо перепад тиску на кожній ділянці формуючої головки екструдера:

1) Для першої ділянки:

$$\Delta P_1 = \frac{\mu_1 \cdot Q}{K_1} = \frac{40041 \cdot 0.0000478}{0.000115} = 16643 \text{ Па};$$

2) Для другої ділянки:

$$\Delta P_2 = \frac{\mu_2 \cdot Q}{K_2} = \frac{23215 \cdot 0.0000478}{0.000026} = 42680 \text{ Па};$$

3) Для третьої ділянки:

$$\Delta P_3 = \frac{\mu_3 \cdot Q}{K_3} = \frac{92203 \cdot 0.0000478}{0.00000182} = 2421595 \text{ Па} = 2.42 \text{ МПа};$$

4) Для четвертої ділянки:

$$\Delta P_4 = \frac{\mu_4 \cdot Q}{K_4} = \frac{24700 \cdot 0.0000478}{0.0000103} = 114627 \text{ Па};$$



Приймаємо наступну геометрію основних секцій черв'яків:

1. Хід гвинтової нарізки черв'яків  $t = 3,2; 3,6; 4,4; 5,2; 5,6; 6,4; 7,2; 8,0; 9,6$  і  $11,2$  см.

2. Число заходів гвинтової нарізки  $m = 2$

3. Максимальна частота обертання черв'яків  $n_{ч\max} = 5 \text{ с}^{-1}$

Робоча частота обертання черв'яків, з урахуванням коефіцієнта запасу по частоті обертання черв'яків  $k = 1,2$ :

$$n_{ч} = \frac{n_{ч\max}}{k \cdot 1,2} = \frac{5}{1,2} \text{ с}^{-1} \quad (3.38)$$

Об'ємна подача:

$$Q = \frac{G}{3,6 \times \rho} = \frac{150}{3,6 \times 0,793} = 52,7 \text{ см}^3/\text{с} \quad (3.39)$$

Об'ємна подача через кожний канал, утворений черв'яками та циліндром:

$$Q_c = \frac{Q}{z \times m} = \frac{52,7}{2 \times 2} = 13,2 \text{ см}^3/\text{с}, \text{ де} \quad (3.40)$$

$z$  – число черв'яків,  $z=2$ ;

$m$  – число заходів гвинтової нарізки секції черв'яка,  $m=2$ .

Середня висота ділянки каналу:

$$H_{cp} = \frac{h}{2} = \frac{0,9}{2} = 0,45 \text{ см}, \quad (3.41)$$

$h = 0,9$  см – висота каналу

Середній діаметр каналу змішувальних елементів:

$$D_{cp} = \frac{d + D_c}{2} = \frac{6,3 + 4,5}{2} = 5,4 \text{ см}, \quad (3.42)$$

$D_c = 4,5$  см – діаметр валу черв'яка.

Середня ширина каналу змішувальних елементів:

$$B_{cp} = \frac{\pi \times D_{cp}}{m} = \frac{3,14 \times 5,4}{2} = 8,5 \text{ см} \quad (3.43)$$

Окружна швидкість поверхні зсуву матеріалу:

$$V_c = \pi \times D_{cp} \times n_{ч} = 3,14 \times 5,4 \times 4,17 = 70,7 \text{ см/с} \quad (3.44)$$

Градiєнт швидкостi на дiлянках каналу блока кулачкiв, обумовлений iх обертанням:

$$\dot{\gamma}_v = \frac{V_c}{H_{cp}} = \frac{70,7}{0,45} = 157,2 \text{ c}^{-1} \quad (3.45)$$

Градiєнт швидкостi, обумовлений прямим потоком:

$$\dot{\gamma}_p = \frac{6,46 \times Q_c}{V_{cp} \times H_{cp}^2} = \frac{6,46 \times 13,2}{8,5 \times 0,45^2} = 49,5 \text{ c}^{-1} \quad (3.46)$$

Сумарний ефективний градiєнт швидкостi:

$$\dot{\gamma}_c = \sqrt{\dot{\gamma}_v^2 + \dot{\gamma}_p^2} = \sqrt{157,2^2 + 49,5^2} = 164,8 \text{ c}^{-1} \quad (3.47)$$

Ефективна динамiчна в'язкiсть:

$$\mu_c = \eta \left( \frac{\dot{\gamma}_c}{\dot{\gamma}_0} \right)^{n-1} = 1,90 \times 10^{-2} \left( \frac{164,8}{1,0} \right)^{0,39-1} = 8,8 \times 10^{-4} \text{ МПа} \cdot \text{с, де} \quad (3.48)$$

$\dot{\gamma}_0 = 1,0 \text{ c}^{-1}$  – нормуючий градiєнт швидкостi;

$n = 0,36$  – iндекс течiї;

$\eta$  – в'язкiсть розплаву

$$\eta = m_o \times \exp[E/(RT)] \times (V_c/H)^{n-1} = \quad (3.49)$$

$$= 5,55 \times 10^{-8} \exp[47300/8,31 \times 483] \times (70,7/0,45)^{0,39-1} = 0,0190 \text{ МПа} \cdot \text{с,}$$

де  $E$  – 47,3 кДж/моль – енергiя дисипацiї матерiалу;

$R = 8,3145 \text{ Дж/ (моль} \times K)$  – унiверсальна газова стала;

$T$  – температура переробки матерiалу в  $K$

$$T = 210 + 273 = 483 \text{ K} \quad (3.50)$$

Гiдравлiчний опiр дiлянки каналу восьмого по ходу екструзiї блока кулачкiв:

$$P_{c8} = \frac{12 \times \mu_c \times l_c \times Q_c}{V_{cp} \times H_{cp}^3} = \frac{12 \times 8,8 \times 10^{-4} \times 4,7 \times 13,2}{8,5 \times 0,45^3} = 0,85 \text{ МПа, де} \quad (3.51)$$

$l_c = 4,7 \text{ см}$  – довжина дiлянки каналу блока кулачкiв, восьмого по ходу екструзiї.

Гідравлічний опір сьомого, шостого, п'ятого, четвертого, третього та другого блоків кулачків розраховується аналогічно восьмому блоку та відповідно дорівнює:

$$P_{c7} = 0,76 \text{ МПа};$$

$$P_{c6} = 1,83 \text{ МПа};$$

$$P_{c5} = 1,12 \text{ МПа};$$

$$P_{c4} = 0,85 \text{ МПа};$$

$$P_{c3} = 1,83 \text{ МПа};$$

$$P_{c2} = 0,92 \text{ МПа}.$$

Середня напруга зсуву, що діє на поверхні блока кулачків:

$$T_c = \eta \times \dot{\gamma}_c^n = 0,019 \times 157,2^{0,39} = 0,14 \text{ МПа} \quad (3.52)$$

Площа поверхні зсуву восьмого по ходу екструзії блока кулачків:

$$F_{c8} = B_{cp} \times l_c = 8,5 \times 4,7 = 39,9 \text{ см}^2 \quad (3.53)$$

Потужність, споживана восьмим по ходу екструзії блоком кулачків:

$$N_{c8} = \frac{T_c \times F_c \times V_c \times t}{10^3} = \frac{0,14 \times 39,9 \times 70,7 \times 2}{10^3} = 0,79 \text{ кВт} \quad (3.54)$$

Аналогічно отримаємо потужності, споживані іншими блоками кулачків, і зведемо отримані результати в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Потужності споживані блоками кулачків

Блок кулачків	Довжина ділянки блока кулачків, $l_c$ , см	Площа поверхні зсуву, $F$ , $\text{см}^2$	Потужності, кВт
2	5,1	43,4	0,86
3	10	85,3	1,69
4	4,7	39,9	0,79
5	6,17	52,5	1,04
6	10	85,3	1,69
7	4,2	35,8	0,71

Сумарна потужність, споживана блоками кулачків кожного із черв'яків:

$$N_c = \sum_{i=2}^8 N_{ci} = 0,86 + 1,69 + 0,79 + 1,04 + 1,69 + 0,71 + 0,79 = 7,5 \text{ кВт} \quad (3.55)$$

Потужність, що витрачається на подачу полімеру в стренгову головку, споживана черв'яками в зоні пластифікації:

$$N_n = k_1 \frac{G \Delta i}{3600} = 1,6 \frac{150 \times 482}{3600} = 32,18 \text{ кВт, де} \quad (3.56)$$

$\Delta i$  – ентальпія,  $\Delta i = 482 \text{ кДж/кг}$ ;

$G$  – масова подача,  $G = 150 \text{ кг/год}$ ;

$k_1$  – коефіцієнт, що враховує потужність, споживану ділянками каналу черв'яка, повністю заповнену розплавом (експериментальний, по даним укрдїпластмаш),  $k_1 = 1,6$ .

Повна потужність двочерв'ячного преса складається із:

$$N_q = k_2(N_c + N_n) = 1,5(7,5 + 32,18) = 61 \text{ кВт, де} \quad (3.57)$$

$k_2$  – коефіцієнт, що характеризує потужність споживану окремими секціями черв'яка (експериментальний, по даним укрдїпластмаш),  $k_2 = 1,5$ .

В таблиці 3.3 наведено вхідні дані для розрахунку ванни охолодження.

Таблиця 3.3 – Вхідні дані для розрахунку ванни охолодження

Пропускна спроможність по матеріалу	$\zeta_m = 150 \text{ м/ч} = 0,042 \text{ м/с}$
Матеріал переробки	полівінілхлорид
Питома теплоємність	$C_p = 2,9 \text{ кДж/м} \times \text{°C}$
Теплопровідність	$\lambda_m = 0,219 \text{ Вт/м} \times \text{°C}$
Температуропровідність	$a = 0,989 \text{ м}^2/\text{с}$
Зовнішній діаметр стренг	$d = 5 \text{ мм}$
Кількість стренг	$z = 18 \text{ шт.}$
Лінійна швидкість руху стренг в ванній	$V_{стр} = 0,25 \text{ м/с}$
Початкова температура охолоджуючого конденсату	$t_{кн} = 30 \text{ °C}$
Розміри ванної:	
довжина	$l = 4 \text{ м}$
ширина	$b = 0,49 \text{ м}$
висота	$h = 0,25 \text{ м}$

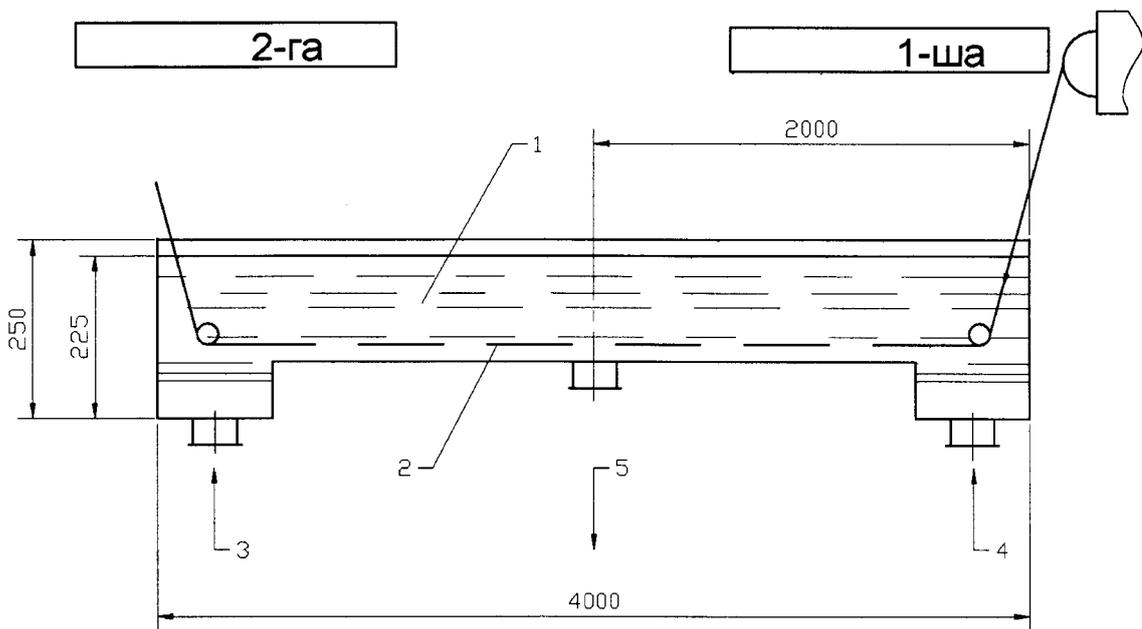


Рисунок 3.2 – Схема охолодження стренг у ванній: 1 – ванна; 2 – стренги; 3 і 4 – подача охолоджуючої води; 5 – злив води із ванної

Приймаємо середню температуру стренг при їх охолодженні під зливною воронкою  $t = 170^{\circ}\text{C}$  (далі – середня температура).

Температура зовнішньої поверхні стренг на виході із ванної  $t_{\text{пов}} = 60^{\circ}\text{C}$ .

Довжину першої ділянки приймаємо  $l_1 = 2$  м.

Об'ємна витрата води, що проходить через першу ділянку приймаємо  $G = 0,5$  м<sup>3</sup>/год.

Площа поперечного перерізу ділянки для проходження води:

$$f_1 = b \times h_1 = 0,49 \times 0,225 = 0,1102 \text{ м}^2, \text{ де} \quad (3.58)$$

$h_1 = 0,225$  м – висота рівня води в ванній;

Тепловий потік від стренг до води:

$$Q_1 = \zeta_m \times C_p (t_{\text{вх}} - t_1) = 0,042 \times 29(240 - 170) = 8,5 \text{ кВт} \quad (3.59)$$

Температура води конденсату в кінці першої ділянки:

$$t_{\text{кк}_1} = t_{\text{кн}} + 0,86 \frac{Q_1}{G_1} = 30 + 0,86 \frac{8,5}{0,5} = 45^{\circ}\text{C}, \text{ де} \quad (3.60)$$

$t_{\text{кн}}$  – початкова температура конденсату;

0,86 – коефіцієнт перерахунку.

Середня температура конденсату на першій ділянці:

$$t_k = \frac{t_{кк1} + t_{кн}}{2} = \frac{45 + 30}{2} = 37,5^\circ\text{C} \quad (3.61)$$

Швидкість руху конденсату на першій ділянці:

$$V_1 = \frac{G_1}{3600 \times f_1} = \frac{0,5}{3600 \times 0,1102} = 0,0013 \text{ м/с} \quad (3.62)$$

Швидкість руху конденсату незначна відносно швидкості руху стренг  $V_{стр} = 0,25 \text{ м/с}$ .

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_{стр} \times d_{стр}}{\nu_k} = \frac{0,25 \times 0,005}{0,6 \times 10^{-6}} = 208,3, \text{ де} \quad (3.63)$$

$\nu_k$  – кінематична в'язкість води при температурі  $t_k = 37,5^\circ\text{C}$ ,  $[\text{м}^2/\text{с}]$ .

В області значень  $2 \times 10^3 \leq Re \leq 1 \times 10^4$  – перехідний режим.

Число Нуссельта із виразу:

$$K_o = Nu Pr_{ж}^{-0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{-0,25}, \text{ де} \quad (3.64)$$

$K_o$  – значення комплексу в залежності від критерія Рейнольдса,  $K_o = 1,9$ .

$Pr_{ж}$  – критерій Прандтля при середній температурі рідини  $t_k = 37,5^\circ\text{C}$ ,  $Pr_{ж} = 4,5$ ;

$Pr_{ст}$  – критерій Прандтля при середній температурі поверхні стренг  $t_{св.стр.} = 160^\circ\text{C}$ ,  $Pr_{ст} = 1,1$ ;

$$Nu_1 = \frac{1,9}{4,5^{-0,43} \left( \frac{4,5}{1,1} \right)^{-0,25}} = 5,16 \quad (3.65)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стренг до води:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \times \lambda_k}{d_{стр}} = \frac{5,16 \times 62,99 \times 10^{-2}}{0,005} = 650 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times ^\circ\text{C}}, \text{ де} \quad (3.66)$$

$\lambda_k$  – теплопровідність води при  $t_k = 37,5^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_k = 62,99 \times 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times ^\circ\text{C}}$ .

Критерій Біо:

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 \times d_{стр}}{2\lambda_m} = \frac{650 \times 0,005}{2 \times 0,219} = 7,42; \quad \frac{1}{Bi} = 0,13. \quad (3.67)$$

Час проходження стренгами першої ділянки:

$$T_1 = \frac{l_1}{V_{стр}} = \frac{2}{0,25} = 8 \text{ с.} \quad (3.68)$$

Критерій Фур'є:

$$Fo_1 = \frac{4a \times T_1}{d_{стр}^2} = \frac{4 \times 0,989 \times 10^{-7} \times 8}{0,005^2} = 0,13, \text{ де} \quad (3.69)$$

$a$  – температуропровідність матеріалу,  $a = 0,989 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Середня температура стренг вкінці першої ділянки

$$\bar{t}_1 = \bar{t}_к + \bar{Q}_1(\bar{t}_{вк} - \bar{t}_к) = 37,5 + 0,6(240 - 37,5) = 159^\circ\text{C}, \text{ де} \quad (3.70)$$

$\bar{Q}_1$  – середня безрозмірна температура стренг, визначається за графіком [3].

Температура поверхні стренг вкінці першої ділянки:

$$t_{пов_1} = \bar{t}_к + Q_1(\bar{t}_{вк} - \bar{t}_к) = 37,5 + 0,1(240 - 37,5) = 58^\circ\text{C} \quad (3.71)$$

Друга ділянка:

Час проходження стренга другої ділянки:

$$T_1 = \frac{l_2}{V_{стр}} = \frac{2}{0,25} = 8 \text{ с.} \quad (3.72)$$

Критерій Фур'є:

$$Fo_2 = \frac{4a \times T_2}{d_{стр}^2} = \frac{4 \times 0,989 \times 10^{-7} \times 8}{0,005^2} = 0,13 \quad (3.73)$$

Тепловий потік від стренг до води:

$$Q_2 = \zeta_m \times C_p(\bar{t}_1 - \bar{t}_{вих}) = 0,042 \times 2,9(159 - 80) = 9,6 \text{ кВт}, \text{ де:} \quad (3.74)$$

$t_{вих}$  – середня температура стренг на виході із ванни, приймаємо  $t_{вих} = 80^\circ\text{C}$ .

Об'ємна витрата води, що проходить через другу ділянку, приймаємо  $G_2 = 0,5 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Площа поперечного перерізу ділянки для проходу води:

$$f_2 = b \times h_2 = 0,49 \times 0,225 = 0,1102 \text{ м}^2, \text{ де} \quad (3.75)$$

$h_2$  – висота рівня води на другій ділянці.

Швидкість руху води втором на другій ділянці ванни:

$$V_2 = \frac{C_2}{3600 \times f_2} = \frac{0,5}{3600 \times 0,1102} = 1,2 \times 10^{-3} \text{ м/с} \quad (3.76)$$

Швидкість руху води не значна в порівнянні зі швидкістю руху стренг  $v_{стр} = 0,25 \text{ м/с}$  і не враховується в розрахунках.

$$t_{ср} = \frac{t_{в1} + t_{в2}}{2} = \frac{20 + 60}{2} = 40^\circ\text{C}, \text{ де} \quad (3.77)$$

$t_{в1}$  – початкова температура води,  $t_{в1} = 20^\circ\text{C}$ ;

$t_{в2}$  – кінцева температура води, приймаємо  $t_{в2} = 60^\circ\text{C}$ .

Критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{v_{стр} \times d_{стр}}{\nu_{ср}} = \frac{0,25 \times 0,005}{0,659 \times 10^{-6}} = 1896, \text{ де} \quad (3.78)$$

$\nu_{ср}$  – кінетична в'язкість води при температурі  $t_{ср} = 40^\circ\text{C}$ ,  $[\text{м}^2/\text{с}]$ .

Критерій Нусельта:

$$Nu_2 = \frac{K_{O_2}}{Pr_{ср}^{-0,43} \left( \frac{Pr_{ст2}}{Pr_{ср}} \right)^{-0,25}}, \text{ де} \quad (3.79)$$

$K_{O_2}$  – комплекс чисел,  $K_{O_2} = 1,9$ ;

$Pr_{ср}$  – критерій Прандтля для середньої температури води  $t_{в} = 40^\circ\text{C}$ ,  $Pr_{ср} = 4,31$ ;

$Pr_{ст2}$  – число Прандтля для середньої ділянки температури стінки  $t_{ст} = 45^\circ\text{C}$ ,  $Pr_{ст2} = 4,0$ .

$$Nu_2 = \frac{1,9}{4,31^{-0,43} \left( \frac{4,31}{4,0} \right)^{-0,25}} = 3,6$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стренг до води:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \times \lambda_{в}}{d_{стр}} = \frac{3,6 \times 0,635}{0,005} = 457 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times ^\circ\text{C}}, \text{ де} \quad (3.80)$$

$$\lambda_{в} = 0,635 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times ^\circ\text{C}}$$

$\lambda_{в}$  – теплопровідність води при  $t_{в} = 40^\circ\text{C}$ ,

Критерій Біо:

$$Bi_2 = \frac{\alpha_2 \times d_{стр}}{2\lambda_{м}} = \frac{457,2 \times 0,005}{2 \times 0,219} = 5,2; \quad \frac{1}{Bi_2} = 0,19. \quad (3.81)$$

Середня температура стренг на виході із ванни:

$$\bar{t}_{\text{внх}} = \bar{t}_e + \bar{Q}_2(\bar{t}_1 - \bar{t}_e) = 40 + 0,18(159 - 40) = 61 \text{ } ^\circ\text{C, де} \quad (3.82)$$

$\bar{Q}_2$  – середня безрозмірна температура стренг, визначається за графіком 57-4 [13],  $\bar{Q}_2 = 0,18$ .

Температура поверхні стренг на виході із ванни:

$$t_{\text{пов}} = \bar{t}_e + \bar{Q}_2(\bar{t}_1 - \bar{t}_e) = 40 + 0,08(159 - 40) = 50 \text{ } ^\circ\text{C, де} \quad (3.83)$$

$\bar{Q}_2$  – безрозмірна температура поверхні стренг, визначається за графіком 2-9 [13],  $\bar{Q}_2 = 0,08$ .

### 3.5 Визначення на міцність шпильок, що кріплять головку до екструдера

В таблиці 3.4 наведено вхідні дані для визначення шпильок, що кріплять головку до екструдера

Таблиця 3.4 – Дані для визначення нку шпильок, що кріплять головку до преса

Тиск в екструзійній головці	$P_r = 1,9 \text{ МПа}$
Кількість кріпильних шпильок	$z = 4 \text{ шт.}$
Матеріал шпильок М20	сталь 45
Границя текучості сталі 45	$\sigma_T = 320 \text{ МПа}$
Внутрішній діаметр перехідної втулки в місці з'єднання головки з перехідником з урахуванням можливого розушільнення стику	$P_B = 0,055 \text{ м}$
Площа поперечного перерізу шпильок М20	$F = 2,203 \times 10^{-4} \text{ м}^2$
Коефіцієнт запасу міцності по границі текучості	$[n_T] = 1,5$
Коефіцієнт затяжки при постійній зовнішній силі	$K = 3$
Коефіцієнт податливості шпильок та елементів головки для металевих деталей	$\chi = 0,2$

Розрахунок на міцність виконуємо із умов максимального навантаження головки, яке існує під час переробки розплаву.

Сила, що відриває головку від преса:

$$P = P_r \frac{\pi}{4} D_e^2 = 1,9 \times 10^6 \frac{3,14}{4} \times 0,055^2 = 4512 \text{ Н} \quad (3.84)$$

				ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Сила, що діє на одну шпильку:

$$\rho_{\phi} = \frac{\rho}{z} = \frac{4512}{4} = 1128 \text{ Н} \quad (3.85)$$

Сила, що припадає на одну шпильку:

$$\rho_{\text{рш}} = [1,3K(1 - \chi) + \chi] \rho_{\phi} = [1,3 \times 3 (1 - 0,2) + 0,2] \times 1128 = 3745 \text{ Н} \quad (3.86)$$

Напряга розтягування, що виникає в шпильці:

$$\sigma_p = \frac{\rho_{\text{рш}}}{F} = \frac{3745}{2,203 \times 10^{-4}} = 17 \text{ МПа} \quad (3.87)$$

Коефіцієнт запасу міцності по границі текучості:

$$n = \frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{320}{17} = 18,8 > 1,5 \quad (3.88)$$

Умова міцності  $n > [n_T]$ ,  $18,8 > 1,5$  – тобто, умова міцності виконується.

### 3.6 Визначення гвинтів, що кріплять фільтрну плиту до корпусу головки екструдера

В таблиці 3.5 наведено вхідні дані для визначення гвинтів, що кріплять фільтрну плиту до корпусу головки

Таблиця 3.5 – Дані для визначення гвинтів, що кріплять фільтрну плиту до корпусу головки

Кріпильний елемент, що кріпить фільтрну плиту до корпусу головки	гвинт М12
Кількість гвинтів М12	$z = 12$
Матеріал гвинтів М12	сталь 40Х13
Границя текучості сталі 40Х13	$\sigma_T = 500 \text{ МПа}$
Висота каналу фільтри разом в місці з'єднання корпусу до головки	$H_{\phi} = 0,04 \text{ м}$
Ширина каналу фільтри в місці з'єднання її до корпусу головки з урахуванням можливого розуцільнення стику	$B_{\phi} = 0,31 \text{ м}$
Площа поперечного перерізу гвинта М12	$F = 0,743 \times 10^{-4} \text{ м}^2$
Коефіцієнт запасу міцності по границі текучості	$[n_T] = 1,5$

Коефіцієнт затяжки при постійній зовнішній силі	$K = 3$
Коефіцієнт податливості гвинтів та елементів головки для металевих деталей	$\chi = 0,2$

Сила, що відриває фільтрну плиту від корпусу головки:

$$\rho_z = \sum_{i=1}^n \Delta P_i (B_\phi \times H_\phi) = (1,02 + 0,077 + 0,0079) \times 10^6 \times 0,31 \times 0,04 = 13700 \text{ Н, де} \quad (3.89)$$

$\sum_{i=1}^n \Delta P_i$  – тиск розплаву полімеру в фільтрній плиті та суміжним до неї каналі, Па.

Сила, що діє на один гвинт:

$$\rho_g = \frac{\rho_z}{z} = \frac{13700}{12} = 1142 \text{ Н} \quad (3.90)$$

Розрахункова сила, що припадає на один гвинт:

$$\rho_p = [1,3K(1 - \chi) + \chi] \rho_g = [1,3 \times 3 (1 - 0,2) + 0,2] \times 1142 = 3791 \text{ Н} \quad (3.91)$$

Напруга розтягу, що виникає у гвинті:

$$\sigma_p = \frac{\rho_p}{F} = \frac{3791}{0,743 \times 10^{-4}} = 51 \text{ МПа} \quad (3.91)$$

Коефіцієнт запасу міцності по границі текучості:

$$n_p = \frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{500}{51} = 9,8 > 1,5 \quad (3.92)$$

Умова міцності  $n_p > [n_T]$ ,  $9,8 > 1,5$  – тобто, умова міцності виконується.

### 3.7 Висновки до розділу 3

1. Визначено продуктивність та потужність приводу двочерв'ячного екструдера для виробництва багат шарових полімерних труб.
2. Проведено розрахунок коефіцієнта геометричної форми формуючої головки екструдера при різних діаметрах, радіусах, довжинах та зазорах зачеплення черв'яків.

3. Обчислено швидкість зсуву  $\dot{\gamma}$  для кожної ділянки постійної геометрії екструзійної головки, з урахуванням значення продуктивності екструдера.

4. Здійснено розрахунок для кожної ділянки постійної геометрії головки та визначено в'язкість при заданій температурі, враховуючи використання полімеру ПВХ.

5. Визначено перепад тиску на кожній ділянці формуючої головки екструдера та загальний тиск в формуючій головці екструдера.

6. Проведені розрахунок потужності привода двочерв'ячного екструдера, розрахунки на міцність шпильок, що кріплять головку до екструдера, та гвинтів, що кріплять фільтрну плиту до корпусу головки, шляхом визначення коефіцієнтів запасу міцності по границі текучості, при яких умови міцності  $n > [n_T]$ ,  $18,8 > 1,5$  та  $n > [n_T]$ ,  $9,8 > 1,5$  виконуються.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Метою магістерської роботи було дослідження конструкції, призначення та принципів роботи екструдерної головки для здійснення її модернізації. Принцип роботи екструзійної машини розглянуто на прикладі його застосування в технологічній лінії виготовлення труб. Проведено аналіз технічних характеристик і параметрів роботи основних деталей та вузлів екструдера. Поставлено задачу щодо збільшення міцності композитних полімерних труб шляхом додавання композитних волокон при формуванні труби в головці екструдера. Розроблено дві нові конструкції екструзійних головок, що дають можливість виготовлення полімерних труб, армованих поздовжніми неперервними елементами для підвищення їх фізико-механічних властивостей, зокрема міцності.

Проаналізовано механіко-економічні показники для підтвердження ефективності та доцільності обраної модернізації, зокрема, підвищення міцності композитних труб. З метою підтвердження працездатності обраної модернізації формуючої головки (фільтри) проведено низку розрахунків полімерної щогли, армованої композитним волокном. За допомогою задачі статичної пружності в системі ANSYS виконано розрахунок напружено-деформованого стану опори.

Для ілюстрації доцільності модернізації проведено розрахунок базової алюмінієвої опори та порівняння аналітичних результатів модернізованих та металевих моделей. Результати показали, що композитні щогли мають більший коефіцієнт запасу міцності та менші деформації. Зроблені розрахунки для різних армуючих матеріалів та проведено аналіз для різного відсоткового вмісту композиту в щоглі.

При цьому запас міцності конструкції забезпечує надійну експлуатацію опори і дозволяє застосовувати обрані конструкційні матеріали в різних галузях промисловості.

<b>ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ</b>				
	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
Зроб.	Остапенко		<i>Б.О.</i>	29.12
Звер.	Шаповал		<i>Шаповал</i>	29.12
Зв'яз.	Шаповал		<i>Шаповал</i>	29.12
Контр.	Васильев		<i>Васильев</i>	29.12
Зв'яз.	Орисенко		<i>Орисенко</i>	29.12
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b>				
			Літ.	Лист
			Листів	
Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІІТМ 2023 р.				

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грудовий Р. С. Шляхи підвищення зносостійкості шнекових робочих органів / В. І. Оробінський, С. М. Герук, Р. С. Грудовий // Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. - Львів: Львівський національний аграрний університет, 2010. - №. 14. - С. 282-291.
2. В.В. Ковалів, А.Т. Гордієнко, І.Е. Шевченко. Організація ремонту устаткування на підприємстві будівельних матеріалів. – Київ: УМК В, 1991 р. – 314 с.
3. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 293 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084>.
4. Пат. 82205 Україна. Головка екструзійна / Сівецький В.І. Сокольський О.Л. - u201301458; заява 07.02.2013р., опубл. 25.07.2013р. бюл. № 14 - 4 с.
5. Пат. US4770618А Сполучені штати Америки. Екструзійна головка для двошарових пластикових труб/ Манфред А. А. Лупке.
6. Пат. 128757 Україна. Формуюча головка екструдера / Сацердотов А.О. Двойнос А.Г. u20180856; заява 21.03.2018 р., опубл. 10.10.2018 р. бюл.№ 19 - 4 с.
7. Пат. JP6510885B2 Японія. Багатошарова труба/三二 敏文敏文 三二寺地 信治 信治 寺地雄亮 星野雄亮 星野伸太郎 梅山伸太郎 梅山.
8. Заявка на корисну модель, МПК В29С 48/03, В29С 48/32 (2022.01). Екструзійна головка / В. М. Витвицький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок, В. М. Витвицький; заявл. 28.11.2022.
9. Заявка на корисну модель, МПК В29С 48/03, В29С 48/32 (2022.01). Күтова головка / В. М. Витвицький, І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. М. Витвицький; заявл. 28.11.2022.
10. Щербина В.Ю., Конструкторське проектування обладнання. Конспект лекцій [Електронний ресурс] / Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2018. - 83 с.

<b>ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ</b>								
	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
зсоб.	Остапенко		<i>Б.О.</i>	29.12	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	Літ.	Лист	Листів
тевір.	Шаповал		<i>С.М.</i>	29.12				
зник	Шаповал		<i>С.М.</i>	29.12		Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІТМ 2023 р.		
контр.	Васильєв		<i>В.</i>	29.12				
те	Орбисенко		<i>О.</i>	29.12				

URL:<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25669>.

11. Shape the world we live in | CATIA – Dassault Systèmes: URL : <https://www.3ds.com/products-services/catia/> (дата звернення: 11.11.2022)

12. Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites/ M. S. EL- Wazerya, M. I. EL-Elamya, and S. H. Zoalfakarb. International Journal of Applied Science and Engineering 2017. 14, 3: 121-131 с.

13. ANSYS Workbench. URL: <https://www.ansys.com/> (дата звернення: 10.09.2022)

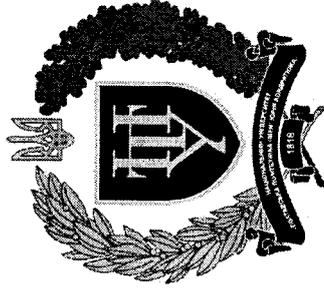
14. ДБН В 1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проектування. К., Мінрегіон України, 2006. - 78 с.

				ГММ 602-мММ 014-00.00.000 ПЗ	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

ДОДАТКИ

				ГММ 602-МММ 014-00.00.000 ПЗ	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

ІМЕНІ ГОРЯ КОНДРАТЮКА»  
КАФЕДРА ГАЛУЗЕВОГО МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МЕХАТРОНИКИ



## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕКСТРУДЕРА З МОДЕРНІЗАЦІЄЮ ГОЛОВКИ В ТЕХНОЛОГІЧНІЙ ЛІНІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКОВИХ ТРУБ

133 – Галузеве машинобудування

Здобувач вищої освіти  
602-мММ групи: Остапенко Б.О.

Керівник: к.т.н., доцент Шаповал М.В.

Полтава - 2023

**Мета кваліфікаційної магістерської роботи** полягає в удосконаленні конструкції формуючої головки двочерв'ячного екструдера, що забезпечить покращення механічних властивостей, особливо міцності, композитних полімерних труб за рахунок додавання армуючих волокон в процесі екструзії.

## **ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ**

**Об'єкт дослідження** є виробництво композитних труб методом екструзії.

**Предметом дослідження** є вдосконалення формувального обладнання для виготовлення композитних труб.

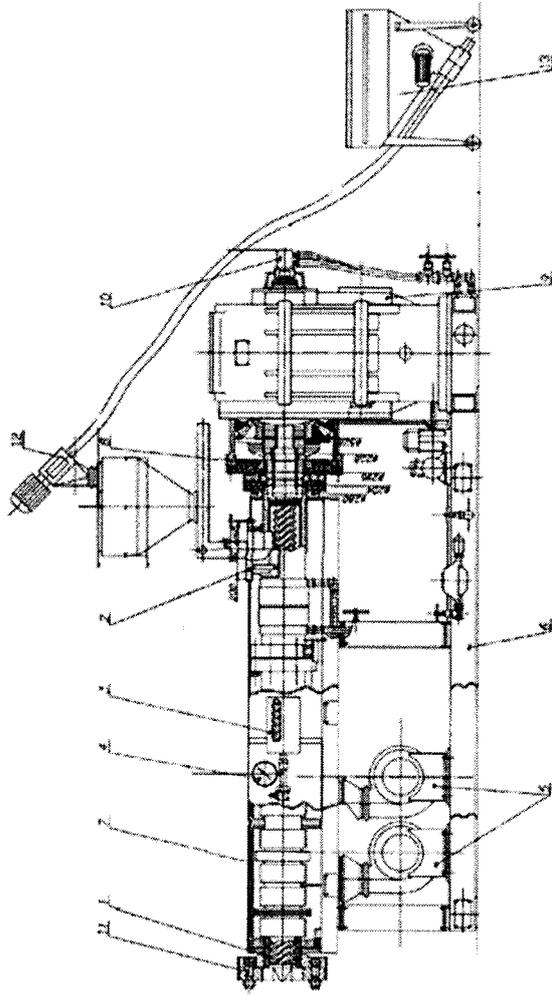


Схема екструдера: 1 - черв'як; 2 - живильник; 3 - дегазатор; 4 - пристрій вимірювання тиску; 5 - вентилятор; 6 - станина; 7 - кожух; 8 - вузол опорного підшипника; 9 - привід; 10 - система охолодження; 11 - фланець; 12 - завантажувач; 13 - бункер

По довжині шнека виділяють три зони з різним станом суміші:

- зона завантаження (живлення);
- зона стиснення, нагріву та пластикації;
- зона дозування та формування.

До основних параметрів процесу екструзії відносять температуру зон агрегату, рівень тиску оброблюваного матеріалу, температуру зон головки, режим охолодження екструдованого профілю. До основних технологічних параметрів екструдера відносяться характеристики шнеків, якими він оснащений, зокрема:

- довжина;
- діаметр;
- співвідношення довжини шнека до його діаметра.
- швидкість обертання;
- профіль шнека.

### Геометричні параметри черв'яка екструдера

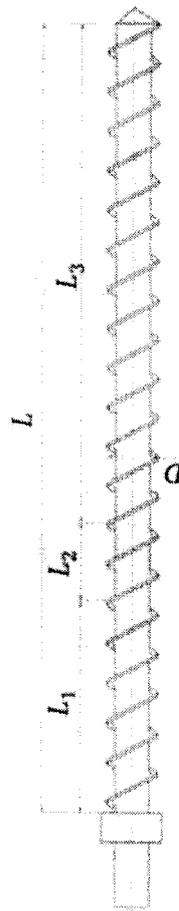
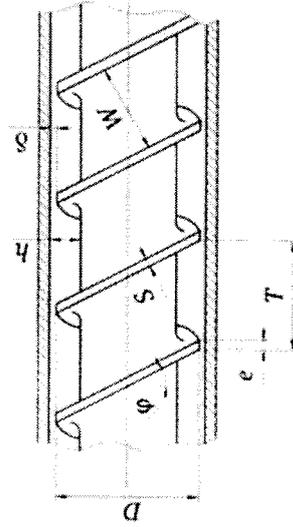


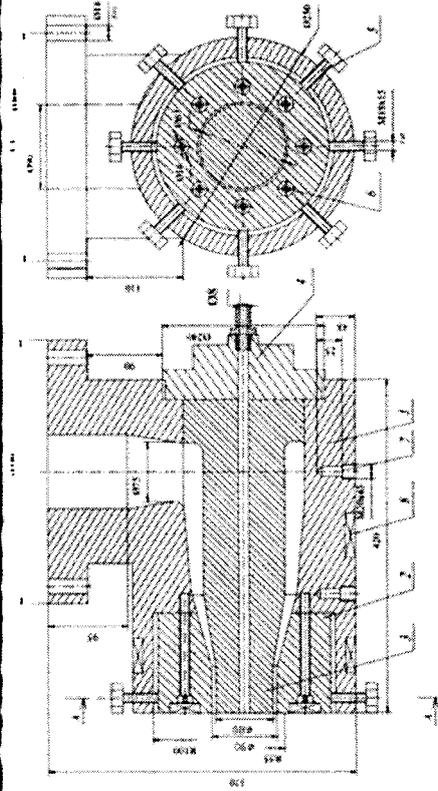
Схема загального вигляду шнека екструдера:  $L_1$  - зона завантаження;  $L_2$  - зона пластикації;  $L_3$  - зона дозування

Шнеки розрізняють наступним чином:

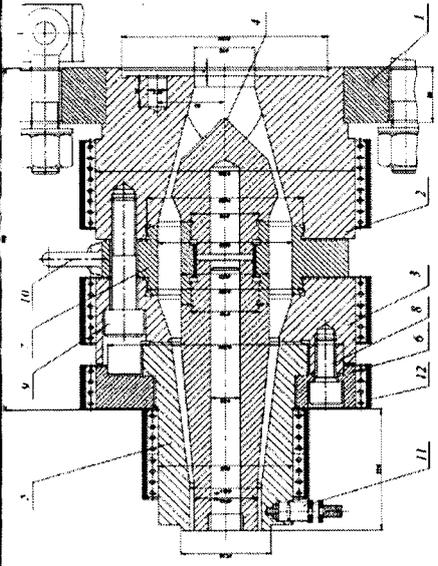
- з одно-, дво-, тризаднім різьбленням і з комбінованим різьбленням;
- циліндричні, конусні, комбіновані з постійним кроком і однаковою глибиною різьблення по всій робочій довжині;
- зі змінним кроком або різною глибиною різьблення.



Геометричні параметри шнека екструдера:  $D$  - діаметр шнека;  $T$  - крок нарізки;  $W$  - відстань між витками;  $S$  - товщина витка;  $e$  - ширина витка;  $h$  - глибина нарізки;  $\delta$  - висота зазору між витком та циліндром;  $\phi$  - кут нахилу нарізки



Кутова екструзійна головка для нанесення ізоляції на дроти:  
1 – корпус; 2 – мундштук; 3 – дорн; 4 – дорнотримач; 5, 6, 7 – гвинти; 8 – нагрівники



Екструзійна головка для виготовлення труб: 1 – фланець; 2 і 3 – частини роз'ємного корпусу; 4 – дорн; 5 – мундштук; 6 – кільце; 7 – дорнотримач; 8, 9 – кріпильний болт; 10 – рим-болт; 11 – термолара; 12 – нагрівники

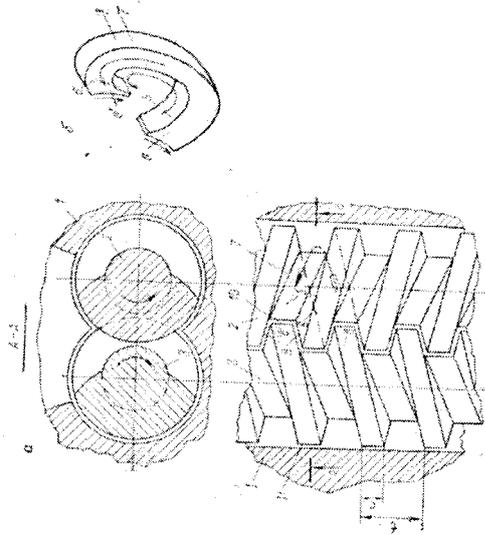
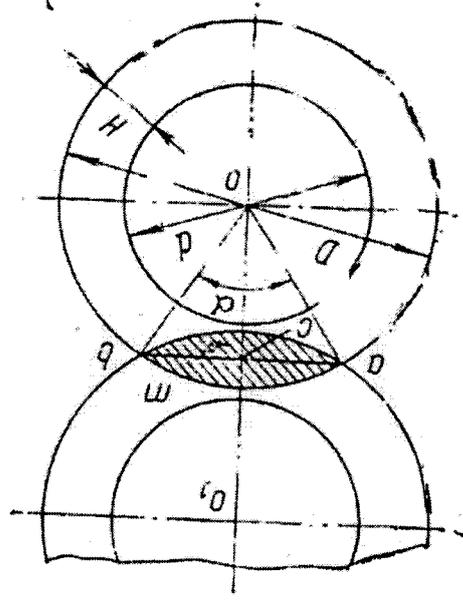
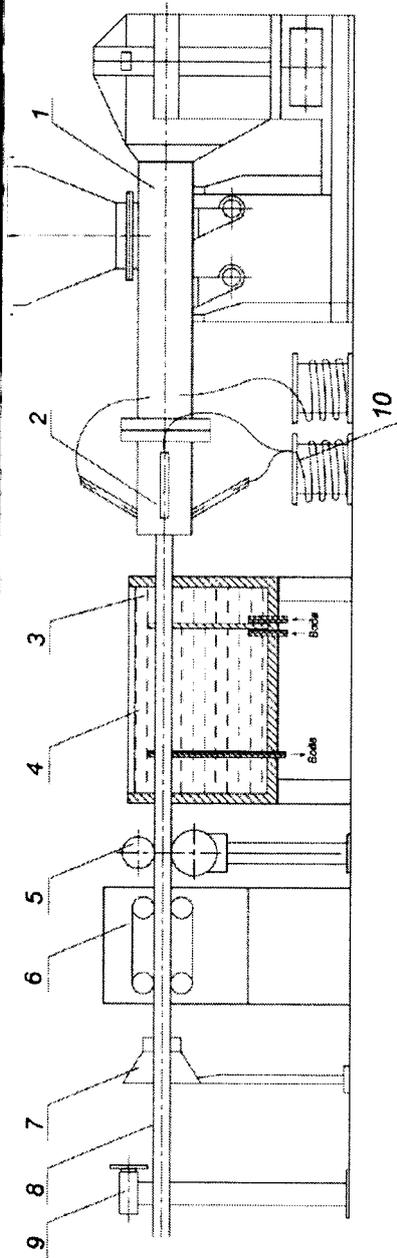


Схема робочих органів двочерв'ячних пресів (а) та ізольована С-подібна камера (б): 1 – циліндр; 2, 3 – черв'яки; 4 – ізольована С-подібна камера; 5, 6, 7, 8, 8' – поверхні, що обмежують С-подібну камеру; 9 – бокові зазори; 10 – радіальний зазор; 11 – зазор між гребнем черв'яка і циліндром

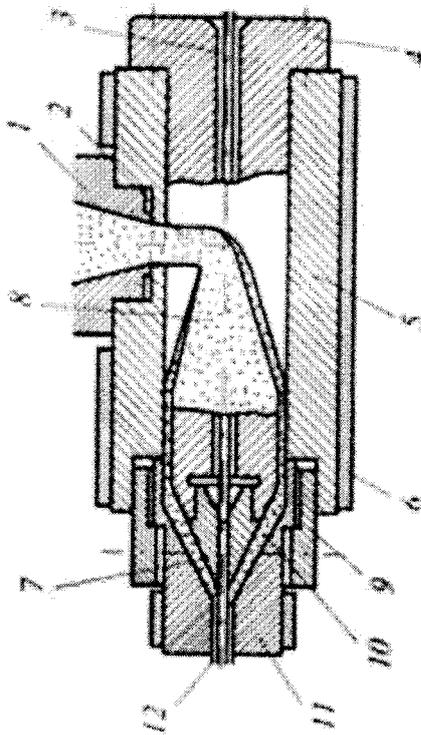


Розрахунок об'єму С-подібних камер каналів черв'яків

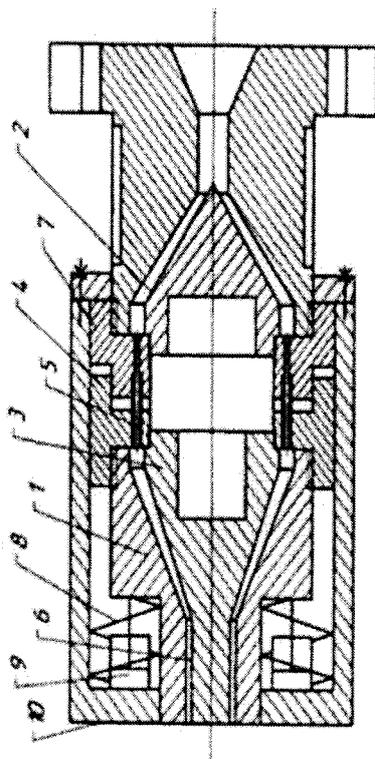


Лінія виготовлення композитних труб методом екструзії: 1 – екструдер; 2 – головка екструзійна; 3, 4 – зони охолодження; 5 – вимірювально-маркувальний пристрій; 6 – тягнучий пристрій для виробу; 7 – пристрій для натягу композитних ниток; 8 – труба; 9 – відрізний пристрій; 10 – котушки із композитними волокнами

## ФОРМУЮЧІ ГОЛОВКИ ЕКСТРУДЕРІВ

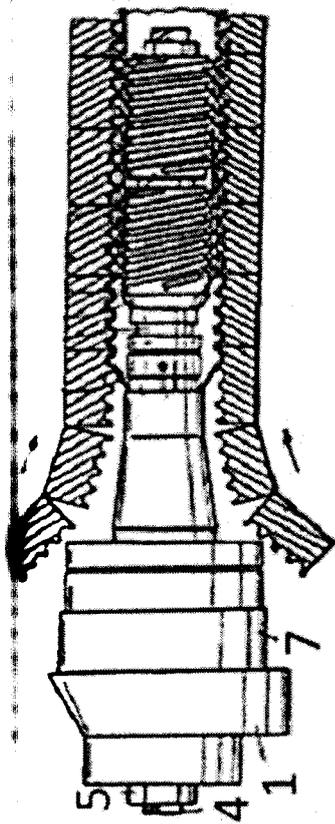


Головка екструдера для виготовлення труб

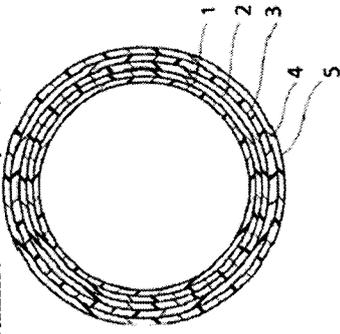


Приклад конструкційного виконання екструдерної головки:

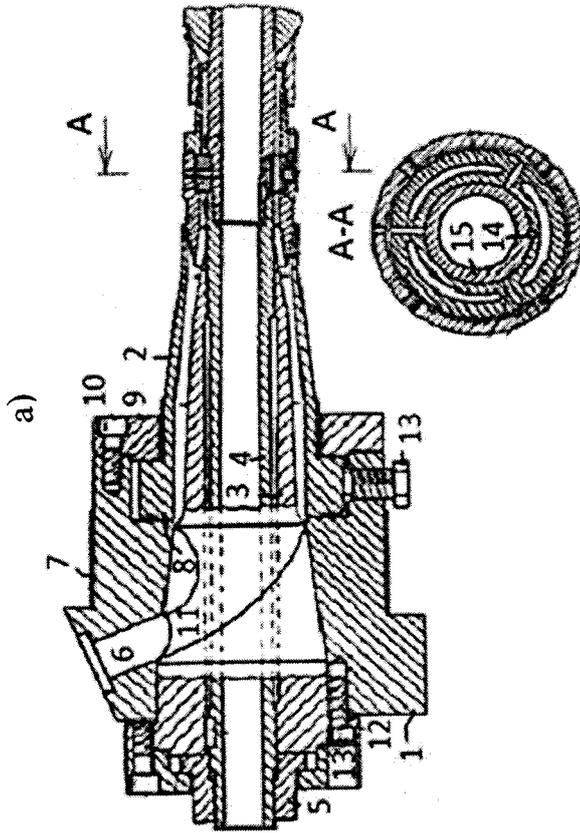
1 – матриця, 2 – вхідна частина дорну, 3 – вихідна частина дорну, 4 – дорнотримач, 5 – канал для протікання розплаву, 6 – вихідна ділянка каналу для протікання розплаву, 7 – нерухома частина дорнотримача, 8 – пружина, 9 – демпфер, 10 – кришка



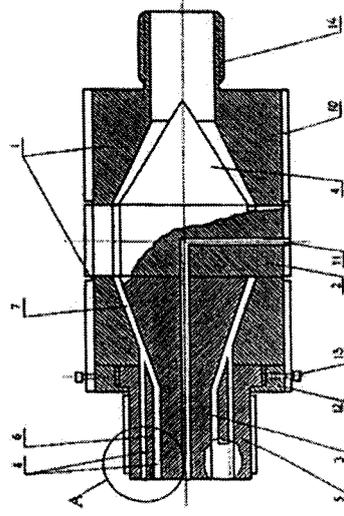
Поздовжній розріз екструдерної головки: 1 – корпус, 2 – тримачі, 3 – дорн, 4 – канал для подачі повітря всередину формованого порожнистого виробу, 5 – котушка індуктивності



Вид у поперечному перерізі багатослової труби: 1 – перший шар, 2 – другий шар, 3 – третій шар, 4 – клейовий шар, 5 – газозахисний шар

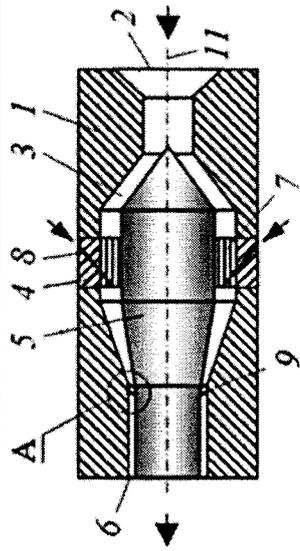


Формуюча головка для виготовлення гофрованих труб:  
 а) загальний вид екструзійної головки; б) переріз формуючої головки.  
 1 – екструзійна головка; 2 – подовжене сопло; 3 – порожниста направляюча; 4 – нагрівач; 5 – порожнистий носій; 6 – бічний отвір; 7 – нагрівач; 8 – фланець; 9 – кільце; 10 – гвинт; 11 – вигнутий проріз; 12 – фланець; 13 – гвинт; 14 – шпонка; 15 – різьбова трубка.



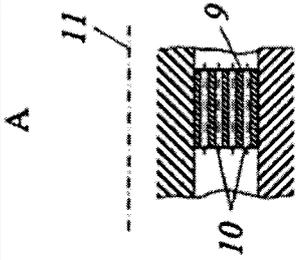
Головка екструдера для виготовлення труб з кількох шарів полімеру

# ГОЛОВКИ

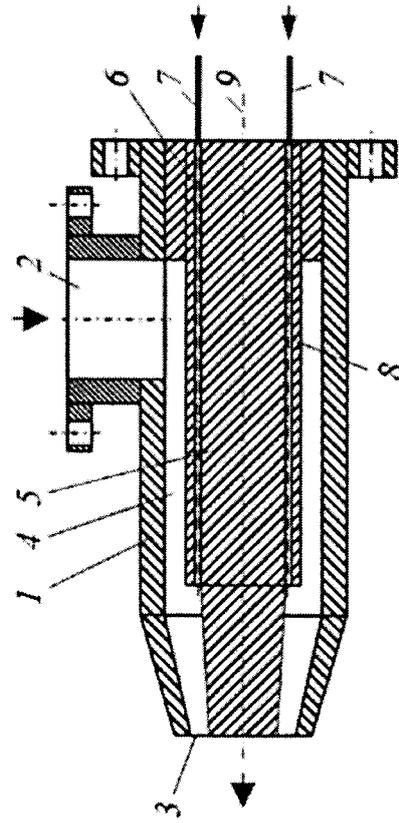


*a*

Прямоточна головка екструдера: а – розріз головки, б – вид А

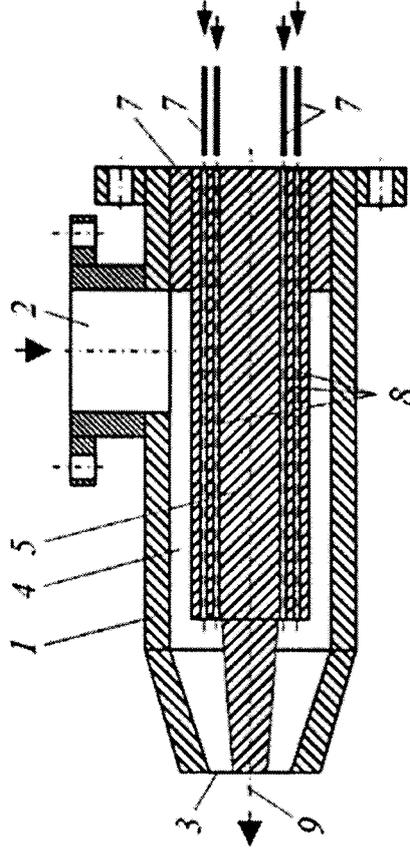


*б*

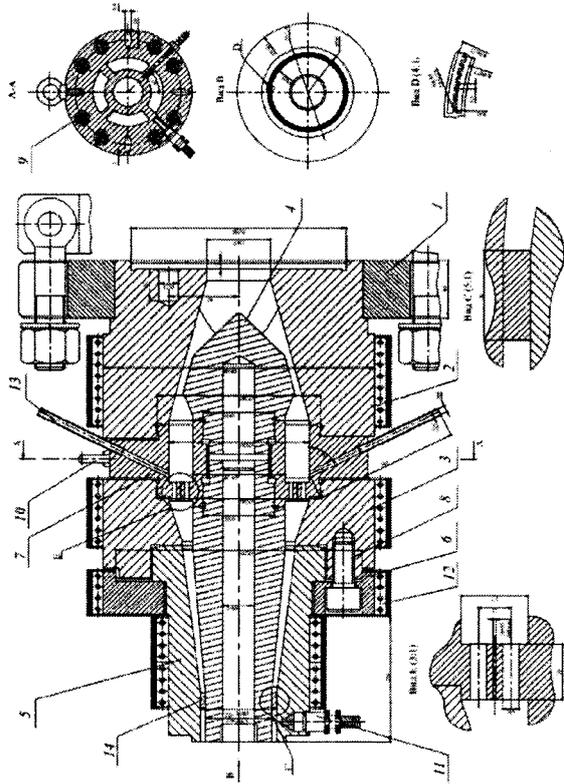


*a*

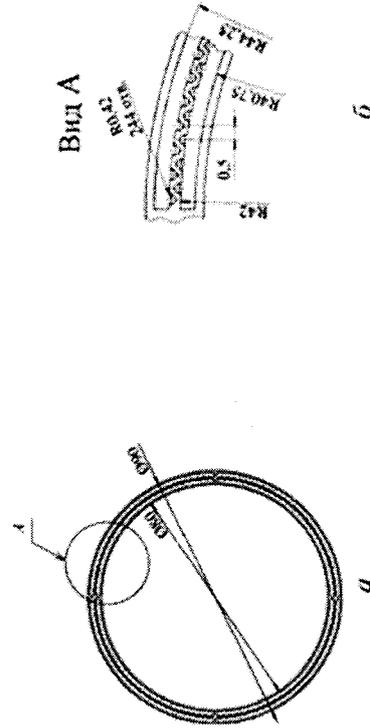
Поздовжній розріз запропонованої кутової головки: а – перший варіант виконання, б – другий варіант виконання



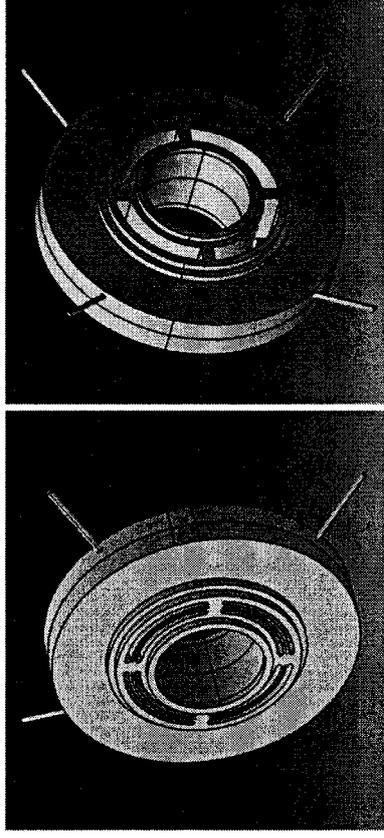
*б*



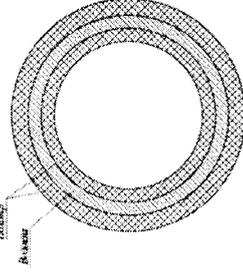
Модернізована головка екструдера: 1 – фланець; 2 і 3 – частини роз'ємного корпусу; 4 – дорн; 5 – мундштук; 6 – кільце; 7 – дорноотримач; 8, 9 – кріпильний болт; 10 – рим-болт; 11 – термопара; 12 – нагрівники; 13 – труби-канали; 14 – решітчасте кільце



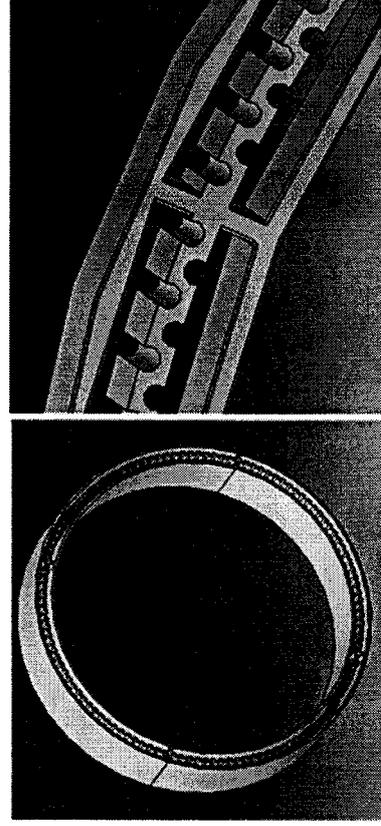
Решітчасте кільце формуючої екструзійної головки: а – загальний вигляд; б – вид А



Модернізований дорноотримач прямооточної головки, побудований в САD системі Catia V5: а – вид зліва; б – вид справа



Положення волокон вуглепластику в перерізі полімерної труби



– 3Д модель решітчастого кільця виконана за допомогою САD системи Catia V5



## ХАРАКТЕРИСТИК НА МІЦНІСТЬ

Вітрове навантаження розраховане для штормового вітру зі швидкістю, що досягає 10-15 м/с і дорівнює  $Q = 500$  МПа.

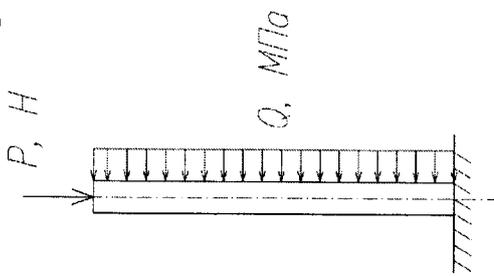
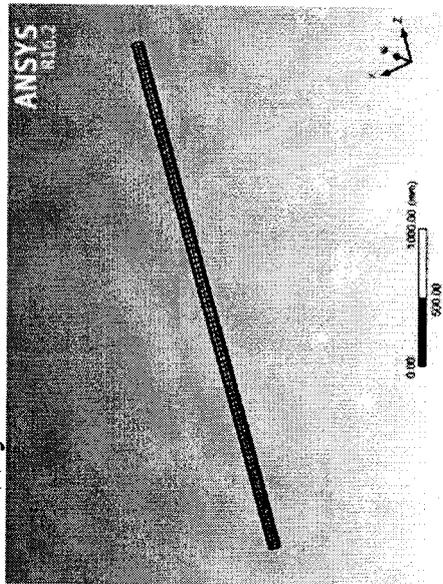
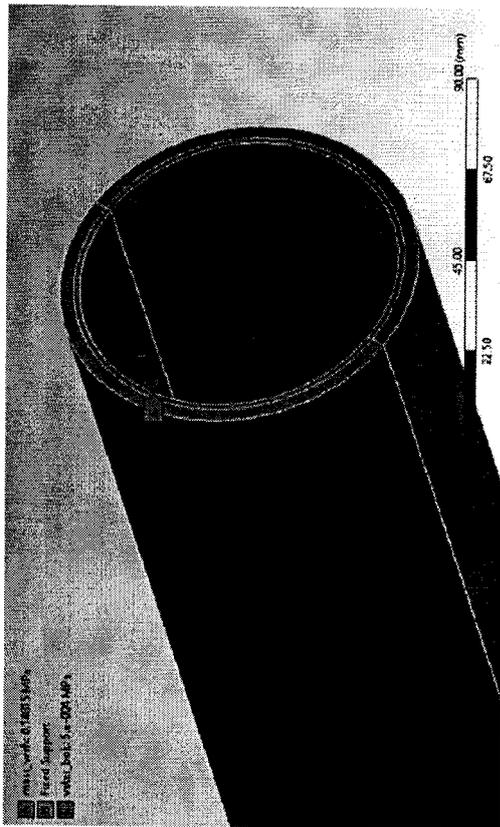
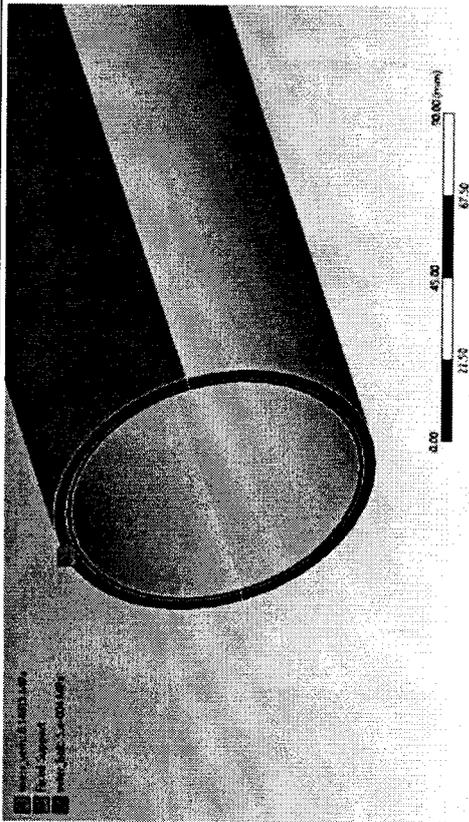


Схема закріплення труби та навантаження, що діють на неї:  $P, Н$  – навантаження від ваги освітлювальних приладів;  $Q, МПа$  – тиск від дії сил вітру. Визначення характеристик міцності відбувалося в системі ANSYS

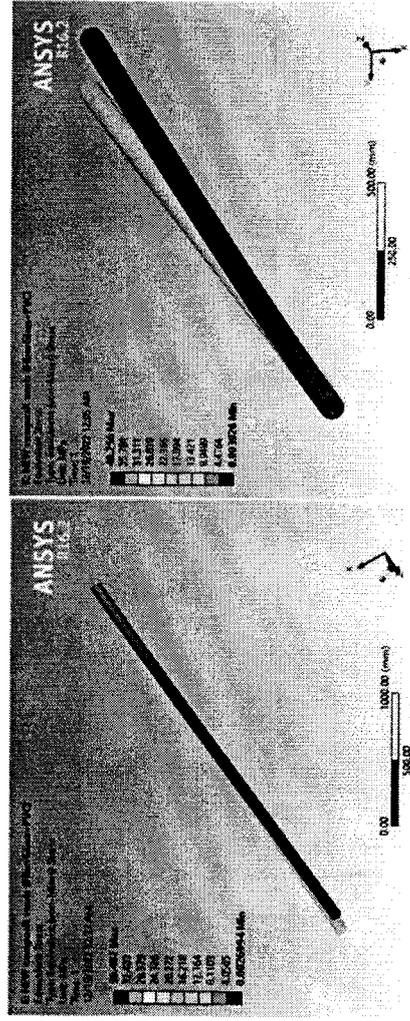


Скінчено-елементна модель труби

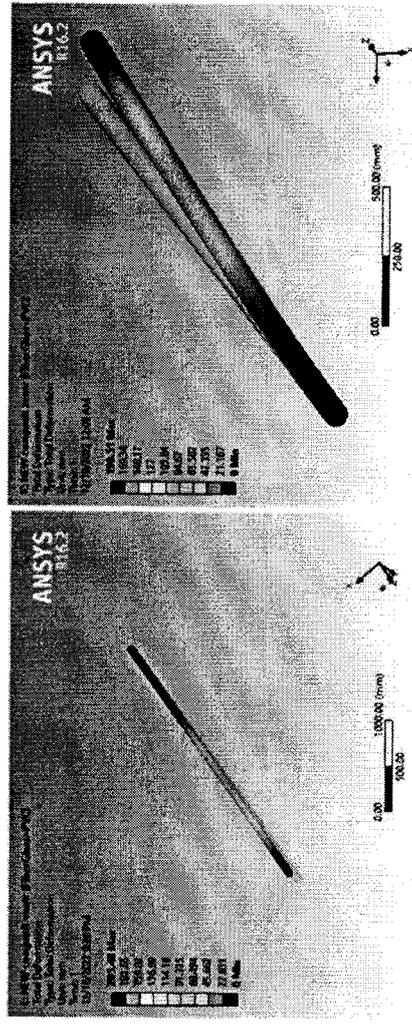


Закріплення та навантаження труби: А – площина прикладання ваги освітлювальних приладів; В – площина закріплення труби; С – поверхня тиску вітру

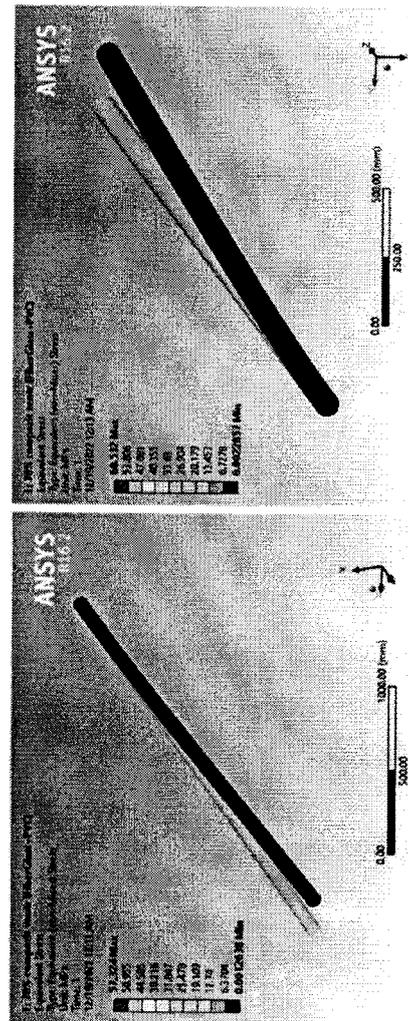
Спочатку розрахуємо трубу, яка містить 69% ПВХ і 31% скловолокна. Кривлення і навантаження головки здійснюється за схемою. Залежно від вмісту компонентів для даної труби розраховано та задано модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, модуль зсуву та густину матеріалу.



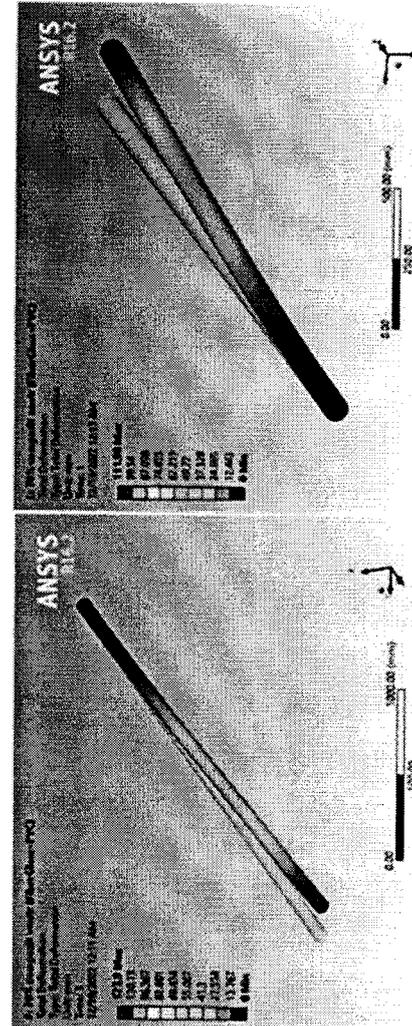
1. Еквівалентні напруження за Мізесом, МПа для труби, що містить 31% скловолокна: а – волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б – волокна композиту у центральному шарі труби



2. Деформації від заданих навантажень в композитній трубі, що містить 31% скловолокна: а – волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б – волокна композиту у центральному шарі труби



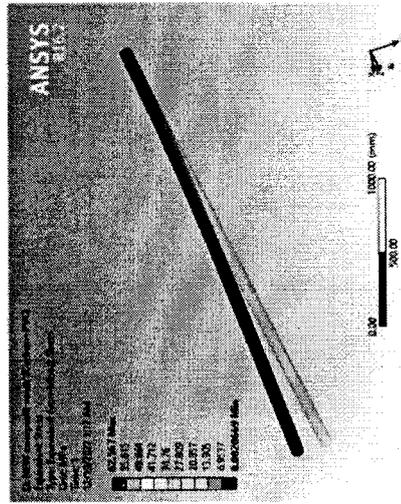
3. Еквівалентні напруження за Мізесом, МПа для труби, що містить 70% скловолокна : а – волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б – волокна композиту у центральному шарі труби



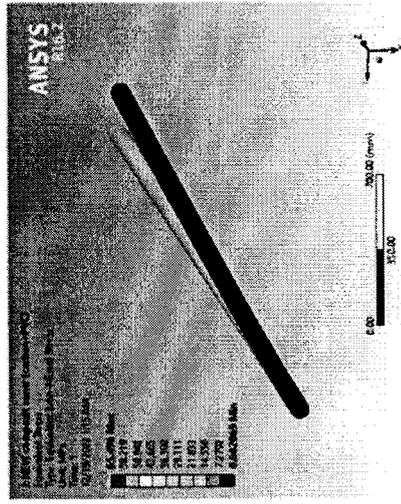
4. Деформації від заданих навантажень в трубі, що містить 70% скловолокна: а – волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б – волокна композиту у центральному шарі труби

## ВУГЛЕПЛАСТИКОВИМ ВОЛОКНОМ

Спочатку розрахуємо трубу, яка містить 69% ПВХ і 31% вуглепластиковим волокном. Кріплення і навантаження головки здійснюється за схемою. Залежно від вмісту компонентів для даної труби розраховано та задано модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, модуль зсуву та густину матеріалу.

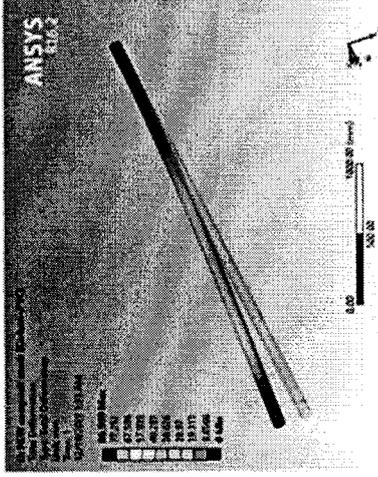


а

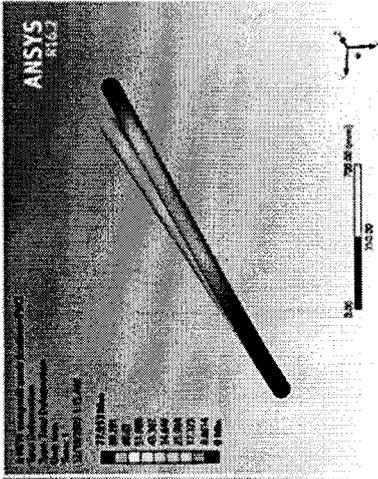


б

1. Еквівалентні напруження за Мізесом, МПа для труби, що містить 31% вуглепластика: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби

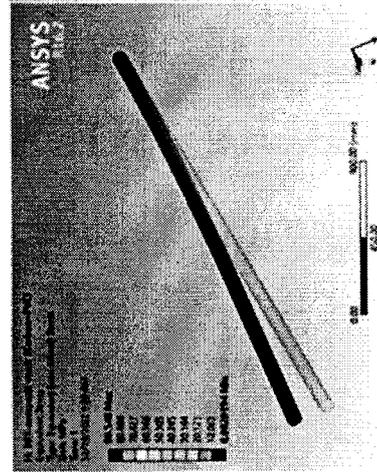


а

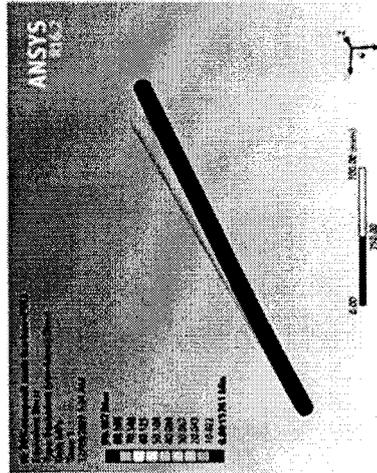


б

2. Деформації від заданих навантажень в трубі, що містить 31% вуглепластика: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби

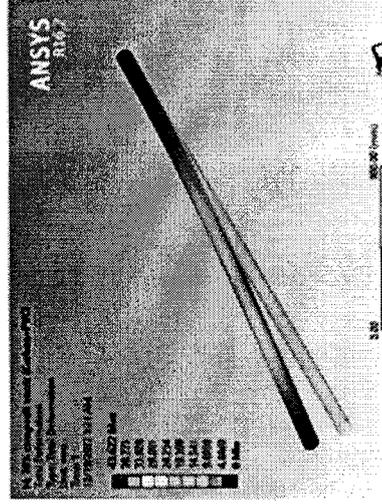


а

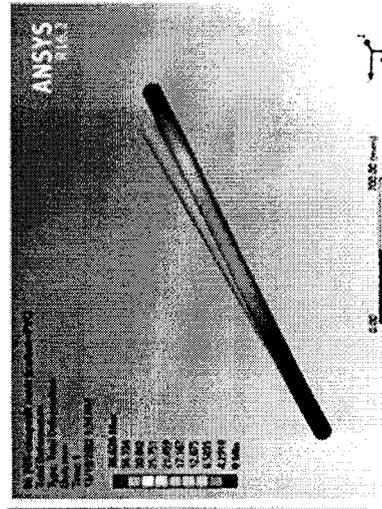


б

3. Еквівалентні напруження за Мізесом, МПа для труби, що містить 70% вуглепластика: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби



а

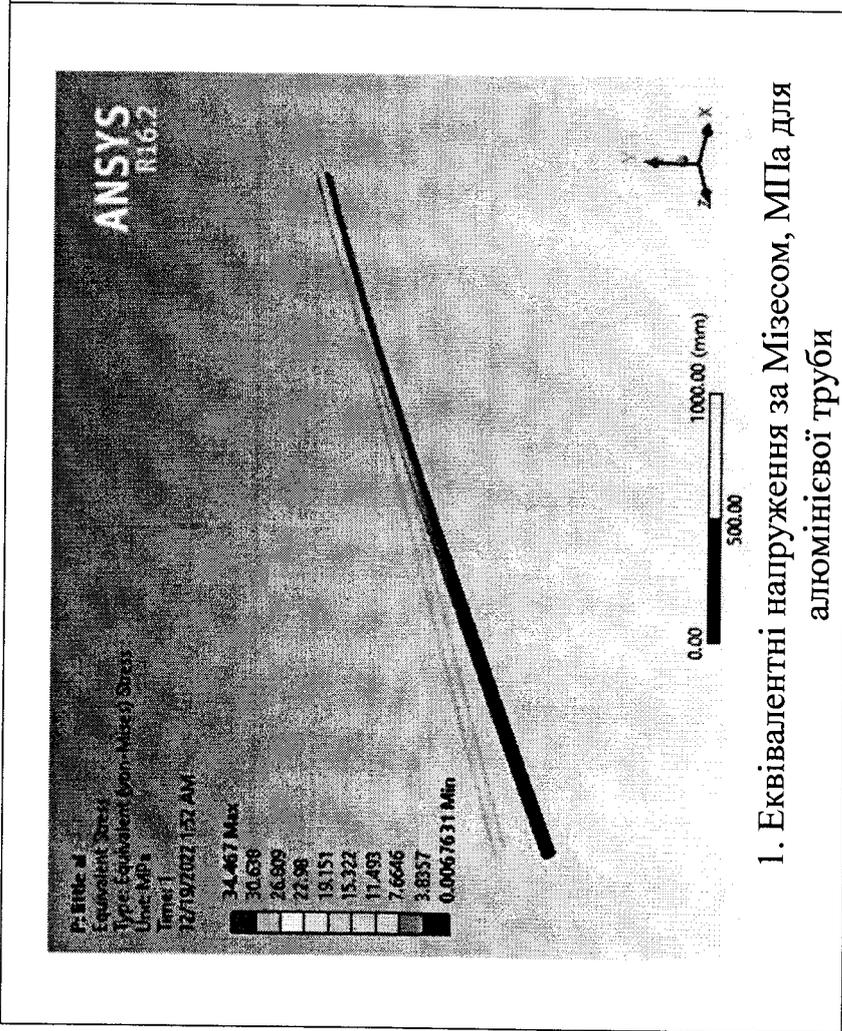


б

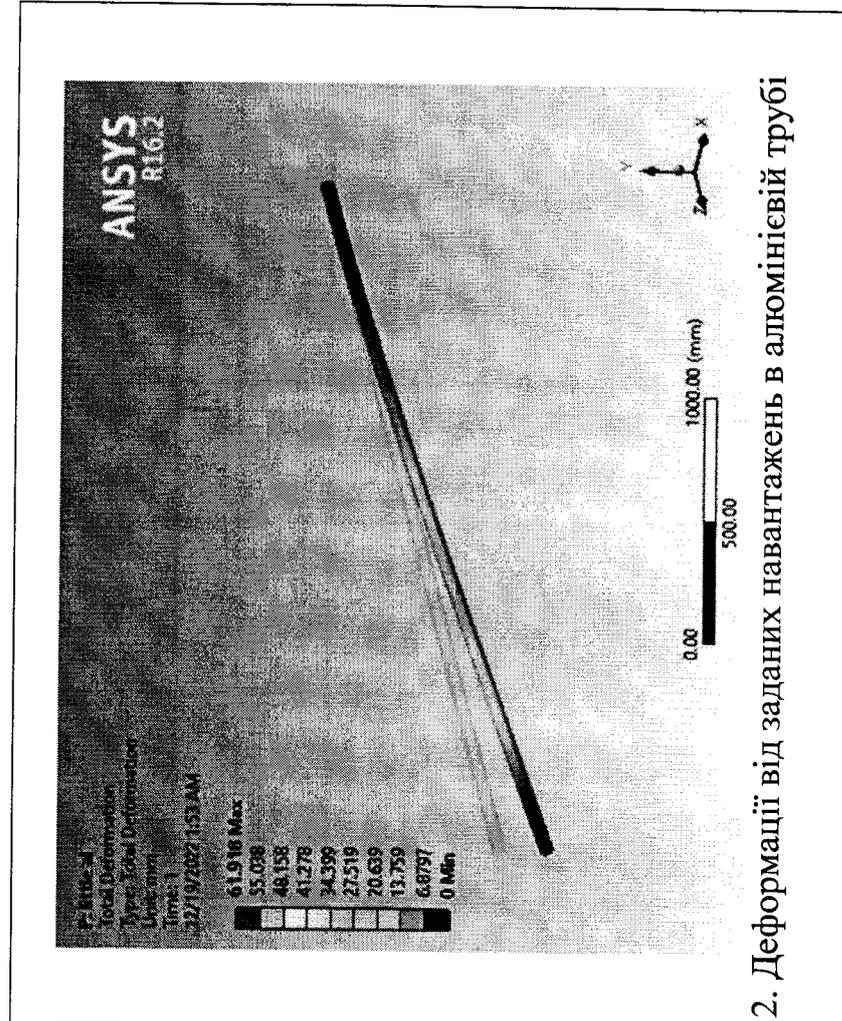
4. Деформації від заданих навантажень в трубі, що містить 70% скловолокна: а - волокна композиту у внутрішньому шарі труби; б - волокна композиту у центральному шарі труби

# ВИЗНАЧЕННЯ БАЗОВОЇ МЕТАЛЕВОЇ ТРУБИ НА МІЦНІСТЬ

З метою підтвердження правильності обраних технологій виготовлення композитних труб, які можуть використовуватись в якості опор та щогл, завдяки їх високій міцності та стійкості до деформацій від навантажень, було проведено розрахунок алюмінієвої труби щогли. Металева (з алюмінієвого сплаву) деталь було закріплено та навантажено таким чином, як і композитні.



1. Еквівалентні напруження за Мізесом, МПа для алюмінієвої труби



2. Деформації від заданих навантажень в алюмінієвій трубі

# НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ГРЬОХ МАТЕРІАЛІВ ЩОГІЛІ (СКЛОВОЛОКНО, ВУГЛЕПЛАСТИК ТА АЛЮМІНІЙ)

Границі міцності матеріалів на розрив

Матеріал	Границя міцності, МПа*
Вуглепластик	3500
Скловолокно	3050
ПВХ	52
Алюміній	90

Результати розрахунку в системі ANSYS

№ п/п	Матеріал та відсотковий вміст композиції (положення)	Результат аналізу – максимальні напруження, МПа	Визначена границя міцності, МПа	Коефіцієнт запасу міцності	Деформації
1.	Вуглепластик 31% (центральне)	62,57	667,44	10,67	86,91
2.	Вуглепластик 31% (внутрішнє)	65,50	667,44	10,19	77,95
3.	Скловолокно 31% (центральне)	40,26	586,44	14,57	190,51
4.	Скловолокно 31% (внутрішнє)	36,49	586,44	16,07	205,48
5.	Вуглепластик 70% (центральне)	90,19	776,08	8,61	38,63
6.	Вуглепластик 70% (внутрішнє)	90,55	776,08	8,57	43,62
7.	Скловолокно 70% (центральне)	60,53	676,38	11,17	111,98
8.	Скловолокно 70% (внутрішнє)	57,32	676,38	11,80	123,9
9.	Вуглепластик 80% (центральне)	88,28	879,52	9,96	34,21
10.	Вуглепластик 80% (внутрішнє)	71,91	879,52	12,23	39,40
11.	Скловолокно 80% (центральне)	57,78	771,52	13,35	101,74
12.	Скловолокно 80% (внутрішнє)	41,36	771,52	18,66	116,87
13.	Алюміній	34,47	90	2,61	61,92

- Вид екструдера — з зачепленням;
  - Напрямок обертання черв'яків — протилежний зворотний напрямком;
  - Геометрія каналів черв'яків - прямокутна;
  - Діаметр черв'яків  $D$ , мм — 90;
  - Діаметр сердечників черв'яків  $d$ , мм — 64;
  - Західність черв'яків  $i$  — 2;
  - Шаг гвинтового каналу  $t$ , мм — 80;
  - Ширина гребню витків по вісі черв'яків  $e$ , мм — 13,8
  - Ширина (товщина) гребню  $s$ , мм — 13,3;
  - Зазор між стінками витків черв'яків  $\varepsilon$ , мм — 3;
  - Зазор зачеплення  $\delta$ , мм — 1;
  - Боковий зазор між поверхнями гребенів витків і циліндром  $\delta_b$ , мм — 2;
  - Глибина каналу  $H$ , мм — 13;
  - Частота обертання черв'яків  $n$ , с<sup>-1</sup> — 600;
  - Густина жорсткого полінілхлориду  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> — 1400;
  - Середня температура розплаву в зоні дозування  $T$ , °С — 177;
  - Ефективна в'язкість розплаву, МПа·с;
  - Середній тиск у зоні дозування  $\Delta P_c$ , МПа — 10.
- Насамперед визначимо продуктивність  $G_0$  (без урахування потоків перетоку),

Визначимо об'єм  $v_e$ :

$$v_b = \frac{(S_k - S_c)B}{\cos\varphi} = (3143 - 412) \cdot 25,3 / 0,9647 = 71622 \text{ мм}^3;$$

$$G_o = 2iv_b n = 2 \cdot 2 \cdot 71622 \cdot 10 = 2864880 \frac{\text{мм}^3}{\text{XB}} = 47748 \frac{\text{мм}^3}{\text{с}};$$

$$G_M = G_o \cdot \rho = 0,00286 \cdot 1400 = 240,6 \frac{\text{кг}}{\text{ГОД}};$$

Далі знайдемо продуктивність  $G'_0$  (з урахуванням потоків перетоку):

$$G_3 = \frac{\left[ 2\pi - \arccos\left(1 - \frac{4H}{D} + \frac{2H^2}{D^2}\right) \right] D \delta_b^3 \Delta P_c t g \varphi}{12 \mu B}$$

$$= [2 \cdot 3,14 - (1,0932)] 90 \cdot 2^3 \cdot 10 \cdot \frac{0,2831}{12 \cdot 0,01 \cdot 25,3} = 3482 \frac{\text{мм}^3}{\text{с}};$$

$$G_T = i \left[ \frac{B \delta^3}{0,1 \pi D} + \frac{\varepsilon^3}{6 \sqrt{\frac{0,5D}{H - \delta}}} \right] \frac{\Delta P_c}{\mu}$$

$$= 2 [0,8 + 2,3] \cdot 454 = 2814 \frac{\text{мм}^3}{\text{с}};$$

$$G_n = \pi i n (D - H) [B \delta + 2 \varepsilon (H - \delta)]$$

$$= 3,14 \cdot 2 \cdot \frac{10}{60} (90 - 13) [25,3 \cdot 1 + 2 \cdot 3(13 - 1)] = 7841 \frac{\text{мм}^3}{\text{с}};$$

$$G_o = G_o - G_T - G_3 = 4774 - 7841 + 2814 + 3482 = 3229 \frac{\text{мм}^3}{\text{с}};$$

$$G_M = G_o \cdot \rho = 0,00003229 \cdot 1400 = 0,045 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 162,8 \frac{\text{кг}}{\text{ГОД}};$$

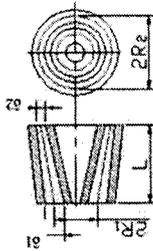
Потужність приводу  $N$ :

$$N = K_N D^{0,8} G_M^{1,84} = 0,35 \text{ кВт}$$

де  $K_N = 5,25 \cdot 10^{-3}$ ;  $D$  — діаметр черв'яків, мм;  $c_N = 1,84$ .

# ГОЛОВКИ ЕКСТРУДЕРА

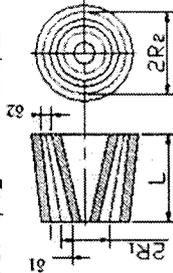
3) Конічний кільцевий з конічної щілиною:  $R_1 = 65$  мм,  $R_2 = 68.5$  мм,  $\delta_1 = 20$  мм,  $\delta_2 = 14$  мм,  $L = 90$  мм.



$$\omega_3 = \frac{2.3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \cdot l g \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} \frac{(R_1 - R_2) \cdot (\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1) \cdot \delta_1\delta_2} \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 \cdot \delta_1^2 \cdot \delta_2^2} = -0.00147;$$

$$K_3 = \frac{\pi \cdot (R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6 \times L \times \omega_3} = \frac{\pi \cdot (65 \cdot 14 - 68.5 \cdot 20)}{6 \times 90 \times (-0.00147)} = 1819.6 \text{ мм}^3 = 0.00000182 \text{ м}^3;$$

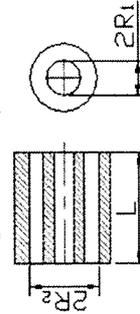
4) Конічний кільцевий з конічної щілиною:  $R_1 = 68.5$  мм,  $R_2 = 70$  мм,  $\delta_1 = 14$  мм,  $\delta_2 = 30$  мм,  $L = 28$  мм.



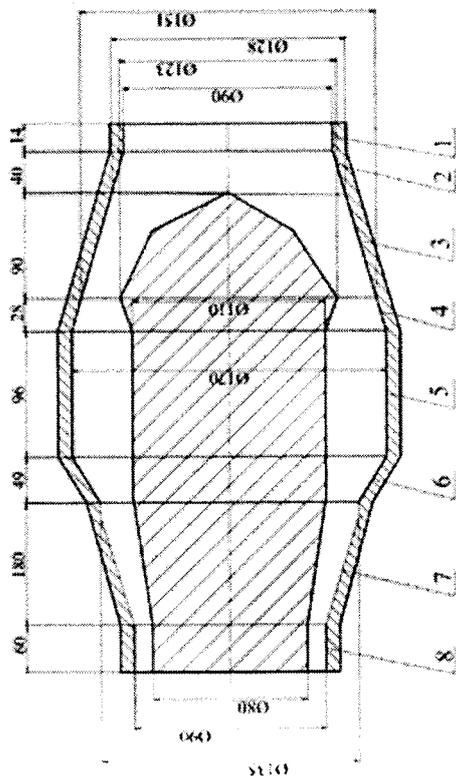
$$\omega_4 = \frac{2.3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \cdot l g \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} \frac{(R_1 - R_2) \cdot (\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1) \cdot \delta_1\delta_2} \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 \cdot \delta_1^2 \cdot \delta_2^2} = 0.00195;$$

$$K_4 = \frac{\pi \cdot (R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6 \times L \times \omega_4} = \frac{\pi \cdot (68.5 \cdot 30 - 70 \cdot 14)}{6 \times 28 \times 0.00195} = 10303 \text{ мм}^3 = 0.0000103 \text{ м}^3;$$

5) Кільцева зона:  $R_1 = 55$  мм,  $R_2 = 85$  мм,  $L = 96$  мм.

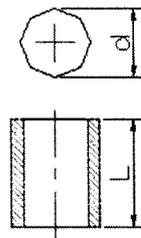


$$K_5 = \frac{\pi \cdot (R_2 + R_1)(R_2 - R_1)^3}{12 \times L} = \frac{\pi \cdot (85 + 55)(85 - 55)^3}{12 \times 96} = 10303 \text{ мм}^3 = 0.0000103 \text{ м}^3;$$



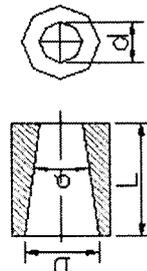
Спрощена розрахункова схема формуючої головки

1) Циліндрична кругла зона:  $D = 90$  мм,  $L = 14$  мм



$$K_1 = \frac{\pi \times D^4}{128 \times L} = \frac{\pi \times 90^4}{128 \times 14} = 114964 \text{ мм}^3 = 0.0000115 \text{ м}^3;$$

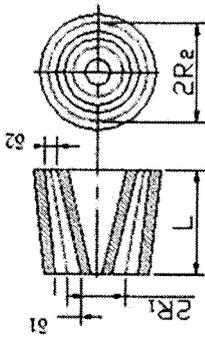
2) Круглий конічний з великим діаметром на вході:  $L = 40$  мм,  $D = 128$  мм,  $d = 90$  мм.



$$K_2 = \frac{3\pi \times D^3 \times d^3}{128 \times L \times (D^2 \times d^2 + Dd \times d^2)} = \frac{3\pi \times 128^3 \times 90^3}{128 \times 40 \times (128^2 + 128 \times 90 + 90^2)} = 26041 \text{ мм}^3 = 0.000026 \text{ м}^3;$$

# ГОЛОВКИ ЕКСТРУДЕРА

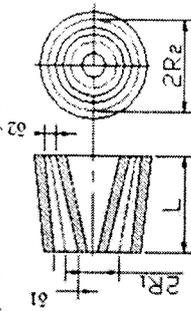
- 6) Конічний кільцевий з конічної щілиною:  $R_1 = 61.25$  мм,  $R_2 = 70$  мм,  $\delta_1 = 12.5$  мм,  $\delta_2 = 30$  мм,  $L = 49$  мм.



$$\omega_6 = \frac{2.3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \cdot l g \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} \frac{(R_1 - R_2) \cdot (\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1) \cdot \delta_1\delta_2} \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 \cdot \delta_1^2 \cdot \delta_2} = 0.0022;$$

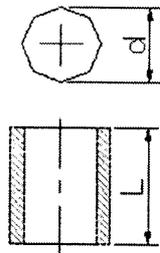
$$K_6 = \frac{\pi \cdot (R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6 \times L \times \omega_3} = \frac{\pi \cdot (61.25 \cdot 30 - 70 \cdot 12.5)}{6 \times 49 \times 0.0022} = 4672.6 \text{ мм}^3 = 0.0000047 \text{ м}^3;$$

- 7) Конічний кільцевий з конічної щілиною:  $R_1 = 42.5$  мм,  $R_2 = 61.25$  мм,  $\delta_1 = 5$  мм,  $\delta_2 = 12.5$  мм,  $L = 180$  мм



$$\omega_7 = \frac{2.3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \cdot l g \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} \frac{(R_1 - R_2) \cdot (\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1) \cdot \delta_1\delta_2} \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 \cdot \delta_1^2 \cdot \delta_2} = 0.0106;$$

- 8) Циліндрична кругла зона:  $D = 85$  мм,  $L = 60$  мм.



$$K_8 = \frac{\pi \times D^4}{128 \times L} = \frac{\pi \times 85^4}{128 \times 60} = 21342 \text{ мм}^3 = 0.0000213 \text{ м}^3;$$

Загальний коефіцієнт геометричної форми

$$K_{\text{заг}} = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{1}{K_5} + \frac{1}{K_6} + \frac{1}{K_7} + \frac{1}{K_8} + \frac{1}{K_9}} = \frac{1}{\frac{1}{114964} + \frac{1}{26041.5} + \frac{1}{18196} + \frac{1}{10303} + \frac{1}{10303} + \frac{1}{4672.6} + \frac{1}{61.71} + \frac{1}{21342}} = \frac{1}{0.016528} = 58.62 \text{ мм}^3 = 5.862 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3.$$

# ТИСКУ НА КОЖНІ ДІЛЯНЦІ ФОРМУЮЧОЇ ГОЛОВКИ ЕКСТРУДЕРА

Визначення в'язкості матеріалу для кожної ділянки постійної геометрії головки – при заданій температурі, враховуючи що використовується полімер – ПВХ.

$$\mu_i = m \cdot \gamma_i^{n-1};$$

$$m = 29526 \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad n = 0.248;$$

- 1) Для першої ділянки:  

$$\mu_1 = m \cdot \gamma_1^{n-1} = 29526 \cdot 0.667^{0.248-1} = 40041 \text{ Па} \cdot \text{с};$$
- 2) Для другої ділянки:  

$$\mu_2 = m \cdot \gamma_2^{n-1} = 29526 \cdot 1.377^{0.248-1} = 23215 \text{ Па} \cdot \text{с};$$
- 3) Для третьої ділянки:  

$$\mu_3 = m \cdot \gamma_3^{n-1} = 29526 \cdot 0.22^{0.248-1} = 92203 \text{ Па} \cdot \text{с};$$
- 4) Для четвертої ділянки:  

$$\mu_4 = m \cdot \gamma_4^{n-1} = 29526 \cdot 1.268^{0.248-1} = 24700 \text{ Па} \cdot \text{с};$$
- 5) Для п'ятої ділянки:  

$$\mu_5 = m \cdot \gamma_5^{n-1} = 29526 \cdot 0.673^{0.248-1} = 39772 \text{ Па} \cdot \text{с};$$
- 6) Для шостої ділянки:  

$$\mu_6 = m \cdot \gamma_6^{n-1} = 29526 \cdot 1.431^{0.248-1} = 22553 \text{ Па} \cdot \text{с};$$
- 7) Для сьомої ділянки:  

$$\mu_7 = m \cdot \gamma_7^{n-1} = 29526 \cdot 10.682^{0.248-1} = 4974 \text{ Па} \cdot \text{с};$$
- 8) Для восьмої ділянки:  

$$\mu_8 = m \cdot \gamma_8^{n-1} = 29526 \cdot 0.792^{0.248-1} = 35189 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

Перепад тиску на кожній ділянці формуючої головки екструдера

1) Для першої ділянки:

$$\Delta P_1 = \frac{\mu_1 \cdot Q}{K_1} = \frac{40041 \cdot 0.00000478}{0.000115} = 16643 \text{ Па};$$

2) Для другої ділянки:

$$\Delta P_2 = \frac{\mu_2 \cdot Q}{K_2} = \frac{23215 \cdot 0.00000478}{0.000026} = 42680 \text{ Па};$$

3) Для третьої ділянки:

$$\Delta P_3 = \frac{\mu_3 \cdot Q}{K_3} = \frac{92203 \cdot 0.00000478}{0.00000182} = 2421595 \text{ Па} = 2.42 \text{ МПа};$$

4) Для четвертої ділянки:

$$\Delta P_4 = \frac{\mu_4 \cdot Q}{K_4} = \frac{24700 \cdot 0.00000478}{0.0000103} = 114627 \text{ Па};$$

5) Для п'ятої ділянки:

$$\Delta P_5 = \frac{\mu_5 \cdot Q}{K_5} = \frac{39772 \cdot 0.00000478}{0.0000103} = 184573 \text{ Па};$$

6) Для шостої ділянки:

$$\Delta P_6 = \frac{\mu_6 \cdot Q}{K_6} = \frac{22553 \cdot 0.00000478}{0.0000047} = 229369 \text{ Па};$$

7) Для сьомої ділянки:

$$\Delta P_7 = \frac{\mu_7 \cdot Q}{K_7} = \frac{4974 \cdot 0.00000478}{0.000000062} = 3962620 \text{ Па} = 3.96 \text{ МПа};$$

8) Для восьмої ділянки:

$$\Delta P_8 = \frac{\mu_8 \cdot Q}{K_8} = \frac{35189 \cdot 0.00000478}{0.00000213} = 78969 \text{ Па};$$

Визначимо загальний тиск в формуючій головці екструдера

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{заг}} &= \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 + \Delta P_6 + \Delta P_7 + \Delta P_8 = \\ &= 16643 + 42680 + 2421595 + 114627 + 184573 + 229369 \\ &\quad + 3962620 + 78969 = 7051076 \text{ Па} = 7.05 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Метою кваліфікаційної магістерської роботи було дослідження конструкції, призначення та принципів роботи екструдерної головки для здійснення її модернізації.

1. Розглянуто принцип роботи екструзійної машини на прикладі його застосування в технологічній лінії виготовлення труб.
2. Проведено аналіз технічних характеристик і параметрів роботи основних деталей та вузлів екструдера. Поставлено задачу щодо збільшення міцності композитних полімерних труб шляхом додавання композитних волокон при формуванні труби в головці екструдера.
3. Розроблено дві нові конструкції екструзійних головок, що дають можливість виготовлення полімерних труб, армованих поздовжніми неперервними елементами для підвищення їх фізико-механічних властивостей, зокрема міцності.
4. Проаналізовано механіко-економічні показники для підтвердження ефективності та доцільності обраної модернізації, зокрема, підвищення міцності композитних труб. З метою підтвердження працездатності обраної модернізації формуючої головки (фільери) проведено низку розрахунків полімерної щогли, армованої композитним волокном. За допомогою задачі статичної пружності в системі ANSYS виконано розрахунок напружено-деформованого стану опори.
5. Для ілюстрації доцільності модернізації проведено розрахунок базової алюмінієвої опори та порівняння аналітичних результатів модернізованих та металевих моделей. Результати показали, що композитні щогли мають більший коефіцієнт запасу міцності та менші деформації.
6. Зроблені розрахунки для різних армуючих матеріалів та проведено аналіз для різного відсоткового вмісту композиту в щоглі. При цьому запас міцності конструкції забезпечує надійну експлуатацію опори і дозволяє застосовувати обрані конструкційні матеріали в різних галузях промисловості.