



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТА РЕГЛАМЕНТІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ: КУРСОВА РОБОТА

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»,  
спеціалізацією «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування  
інноваційного галузевого обладнання»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2023

Моделювання процесів та регламентів промислового обладнання: курсова робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», освітньої програми «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.В. Гулієнко, Г.С. Подиман – Електронні текстові данні (1 файл: 2,7 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 80с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 4 від 19.01.2023 р.)  
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету  
(протокол № 12 від 26.12.2022 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

# **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТА РЕГЛАМЕНТІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ: КУРСОВА РОБОТА**

Укладачі: *Гулієнко Сергій*, канд.тех.наук., доцент; *Подиман Григорій*, асистент

Відповідальний редактор *Корнієнко Ярослав*, докт. тех. наук, професор

Рецензенти: *Чемерис Андрій*, канд. тех. наук, доц.

У вимогах до виконання курсової роботи наведено мету та завдання роботи. Сформульовано завдання на курсову роботу, її склад, обсяг і структура. Наведено вказівки до виконання розділів курсової роботи та рекомендації до виконання пояснювальної записки: структура, вимоги до форматування, викладення її тексту, оформлення розрахунків та оформлення додатків. Сформульовано рекомендації до виконання графічної частини роботи. Викладено вказівки щодо порядку захисту роботи та список рекомендованої літератури. У додатках наведено приклади виконання титульних аркушів курсової роботи, приклади параметричних розрахунків, креслення апарата і специфікацій до креслення апарата.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	5
2 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ .....	6
3 СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	7
4 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОЇ РОБОТИ .....	8
5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ .....	12
5.1 Структура пояснювальної записки.....	12
5.2 Вимоги до оформлення пояснювальної записки .....	12
6 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ АНАЛІЗУ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	17
6.1 Знаходження науково-дослідницької літератури .....	17
6.2 Знаходження новітніх розробок досліджуваного апарату .....	23
7 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПОРЯДКУ ЗАХИСТУ РОБОТИ.....	28
8 КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ТА СИСТЕМА РЕЙТИНГОВИХ БАЛІВ КУРСОВОЇ РОБОТИ .....	30
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	32
ДОДАТОК А. ЗРАЗОК ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	35
ДОДАТОК Б. ЗРАЗОК ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ КУРСОВОЇ РОБОТИ .....	36
ДОДАТОК В. ЗРАЗОК ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ .....	37
ДОДАТОК Г. ЗРАЗОК ЗМІСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	38
ДОДАТОК Д . ЗРАЗОК ЗАПИСКИ КУРСОВОЇ РОБОТИ. ....	39
ДОДАТОК Е. ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ ЛІТЕРАТУРИ .....	79

## **ВСТУП**

Шлях до вирішення наукових проблем лежить через уміння аналізувати сучасні досягнення провідних науковців України та світу. Створення аналітичних оглядів – це творчий процес, який потребує від науковця не лише глибини знань дисциплін, що викладаються у ВНЗ, але і уміння знаходити та аналізувати наукову та науково-технічну інформацію в джерелах літератури, періодичних виданнях, патентах тощо. Від якості визначення стану наукової проблеми та грамотного формулювання мети та задач досліджень суттєво залежить кінцевий результат науково-дослідної роботи (НДР).

Методичні вказівки складено у відповідності до ДСТУ 3008-95

## 1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Метою курсової роботи є набуття практичних умінь при пошуку та аналізі науково-технічної інформації.

Завданнями курсової роботи є уміння:

- визначати наукову проблему;
- проводити пошук необхідних джерел літератури;
- аналізувати знайдену науково-технічну інформацію;
- визначати не вирішені та дискусійні питання розглядуваної проблеми;
- формулювати мету та завдання, предмет та об'єкт досліджень;
- вибирати методи дослідження;

## **2 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ**

Завдання на курсову роботу вибирається відповідно до тематики майбутньої магістерської дисертації і повинно відповідати основним напрямкам наукової роботи кафедри, а у разі виконання магістерської дисертації на базі науково дослідних інститутів, з якими діють договори про співпрацю, діючим угодам.

Зразок титульного аркуша курсової роботи наведений в додатку А, титульної сторінки пояснювальної записки наведений в додатку Б, зразок бланку завдання до курсової роботи в додатку В.

### **З СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА КУРСОВОЇ РОБОТИ**

Курсова робота передбачає розробку документації у вигляді пояснювальної записки, яка включає аналітичний огляд джерел літератури, що стосуються досліджуваної наукової проблеми, а також обґрунтування вибору, опис та методику розв'язання математичної моделі процесу.

Пояснювальна записка складається з розділів і підрозділів. Приблизний зміст пояснювальної записки наведений у додатку Г. Враховуючи специфіку об'єкта досліджень допускається вводити в перший розділ записки додаткові розділи. Орієнтовний обсяг пояснювальної записки 25-35 аркушів формату А4.

## **4 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОЇ РОБОТИ**

Пояснювальна записка формується у відповідності до рекомендованого кафедрою змісту.

Матеріал у розділах пояснювальної записки викладається згідно таких вимог:

### **Реферат**

Обсягом 0,5...1 сторінка державною та іноземною мовами повинен стисло відобразити загальну характеристику та основний зміст роботи і містити:

- відомості про обсяг пояснювальної записки, кількість ілюстрації, таблиць, креслень, додатків і бібліографічних найменувань та переліком посилань;

- об'єкт та предмет досліджень;

- мету роботи, використані методи та отримані результати;

- рекомендації щодо використання або (та) результати впровадження розробок та досліджень (отримані патенти, прийняті заявки на патент, публікація в наукових журналах, акти про впровадження);

- перелік ключових слів (не більше 20).

### **Вступ**

Розкриває сутність і стан наукової проблеми (задачі) та її значущість, підстави і вихідні дані для розробки теми, обґрунтування необхідності проведення дослідження.

Далі подають загальну характеристику курсової роботи в рекомендованій нижче послідовності.

### **Актуальність теми**

Шляхом критичного аналізу та порівняння з відомими розв'язаннями проблеми (наукової задачі) обґрунтовують актуальність та доцільність



роботи для розвитку відповідної галузі науки чи виробництва, особливо на користь України.

Висвітлення актуальності не повинно бути багатослівним. Досить кількома реченнями висловити головне - сутність проблеми або наукового завдання.

### **Мета і задачі дослідження**

Формулюють мету роботи і задачі, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети. Не слід формулювати мету як «Дослідження...», «Вивчення...», тому що ці слова вказують на засіб досягнення мети, а не на саму мету.

*Об'єкт дослідження* - це процес або явище, що породжує проблемну ситуацію і обране для вивчення.

*Предмет дослідження* міститься в межах об'єкта.

Об'єкт і предмет дослідження як категорії наукового процесу співвідносяться між собою як загальне і часткове. В об'єкті виділяється та його частина, яка є предметом дослідження. Саме на нього спрямована основна увага дисертанта, оскільки предмет дослідження визначає тему дисертаційної праці, яка визначається на титульному аркуші як її назва.

*Методи дослідження.* Подають перелік використаних методів дослідження для досягнення поставленої в роботі мети. Перераховувати їх треба не відірвано від змісту роботи, а коротко та змістовно визначаючи, що саме досліджувалось тим чи тим методом. Це дасть змогу пересвідчитися в логічності та прийнятності вибору саме цих методів.

## **1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Відповідно до поставленої теми, розкрити проблематику процесу можна за такими параграфами:

### **1.1 Загальні відомості про проблему**

Наводяться інформації про походження розглядуваної науково-технічної проблеми, та існуючі методи її вирішення. Обґрунтовується вибір шляху вирішення проблеми в даному дослідженні.

### **1.2 Теоретичні дослідження проблеми**

Наводяться основні результати провідних дослідників теоретичного вирішення проблеми. Вказуються основні підходи до моделювання процесу, та основні підходи до моделювання процесу. Вказуються основні методи розв'язання відомих моделей процесу.

### **1.3 Експериментальні дослідження проблеми**

Наводяться основні факти з даної проблеми виявлені експериментальним шляхом.. Проводиться аналіз методик експериментальних досліджень.

### **1.4 Висновки**

У висновку переходяться виявлені ключові шляхи й проблеми дослідження, пояснення важливості дослідження, тощо. Вказуються всі авторські модифікації та модернізації.

### **1.5 Мета та задачі досліджень**

Згідно з отриманих висновків формулюють мету роботи і задачі, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети.

## **2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ**

### **2.1 Фізична модель процесу**

Наводиться опис фізичної моделі процесу.

### **2.2. Математична модель процесу**

Наводяться рівняння, що описують процес. У разі крайової задачі вказуються початкові і граничні умови. Вказуються методики розв'язання моделі.

Кількість параграфів й назви пунктів можуть відрізнятись.

## **5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ**

### **5.1 Структура пояснювальної записки**

Пояснювальна записка виконується згідно вказівок:

– Вимог ГОСТ 2.105-95.

– Вимоги до виконання магістерської дисертації: навч. посібн. для студ. спеціальності 133 «галузеве машинобудування», освітньо-професійна програма магістерської підготовки (спеціалізація) обладнання хімічних, нафтопереробних та целюлозно-паперових виробництв/ кпі ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: А.Р. Степанюк, Гулієнко С.В.– електронні текстові данні (1 файл: 3,452 мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 94с..

Пояснювальна записка для курсової роботи розпочинається титульним листом з надписом „Пояснювальна записка” (додаток Б), наступним аркушем є „Завдання на проектування” (додаток В). Далі „Зміст” (додаток Г).

### **5.2 Вимоги до оформлення пояснювальної записки**

Текстові документи виконуються за допомогою комп’ютерної техніки на листах формату А4, в разі потреби (для схем, таблиць) допускається формат А3. Текст друкується на одному боці аркуша через півтора інтервали, шрифт – Times New Roman 14 пт.

Рамки та основний напис в звітах з НДР – відсутні.

Для НДР відстань від границь аркушу до границь тексту потрібно залишати: на початку та наприкінці рядків не менш 3 мм. Відстань від верхнього або нижнього рядка тексту до верхньої та границі аркуша повинне бути не менш 10 мм.

Абзаци в тексті починають відступом, рівним 15...17 мм.

Помилки, описки і графічні неточності, виявлені в процесі виконання текстового документа, допускається виправляти підчищенням або

зафарбовуванням білою фарбою і нанесенням на це ж місце виправленого тексту (графіки) чорною ручкою або вклеюванням роздрукованих фрагментів тексту.

Ушкодження аркушів текстових документів, помарки і сліди не цілком вилюченого тексту (графіки) не допускаються.

При аналізі стану наукової проблеми необхідно проаналізувати результати, отримані іншими дослідниками. При цьому необхідно давати посилання на джерело, з якого взято інформацію. Посилання потрібно давати перед використанням запозиченого матеріалу або в кінці цитати у квадратних дужках.

*Приклад:* Питання моделювання процесу забруднення поверхні мембран викладено в роботі [12].

Усі формули, нумерують арабськими цифрами в межах розділу. Номер формули складається з номера розділу і порядкового номера формули в даному розділі, розділених крапкою. Номер вказують із правої сторони листа на рівні формули в круглих дужках. Формула знаходиться посередині рядка. Міжстрочний відступ перед формулою та після неї робиться у розмірі одного рядка.

*Приклад:*

Фактор розподілення рідини по поверхні частинки можна визначити за формулою [20]:

$$\eta' = \frac{6(V_1 + V_2)}{k \left[ (d'_v)^3 - (d'_v - 2l_{\min})^3 \right]} \quad (1.5)$$

де  $k$  – експериментальний коефіцієнт;  $d'_v$  – діаметр зволоженої частинки;  $l_{\min}$  – мінімальна товщина шару рідини на поверхні частинки.

У випадку, коли у формулу підставляється значення, вона не нумерується.

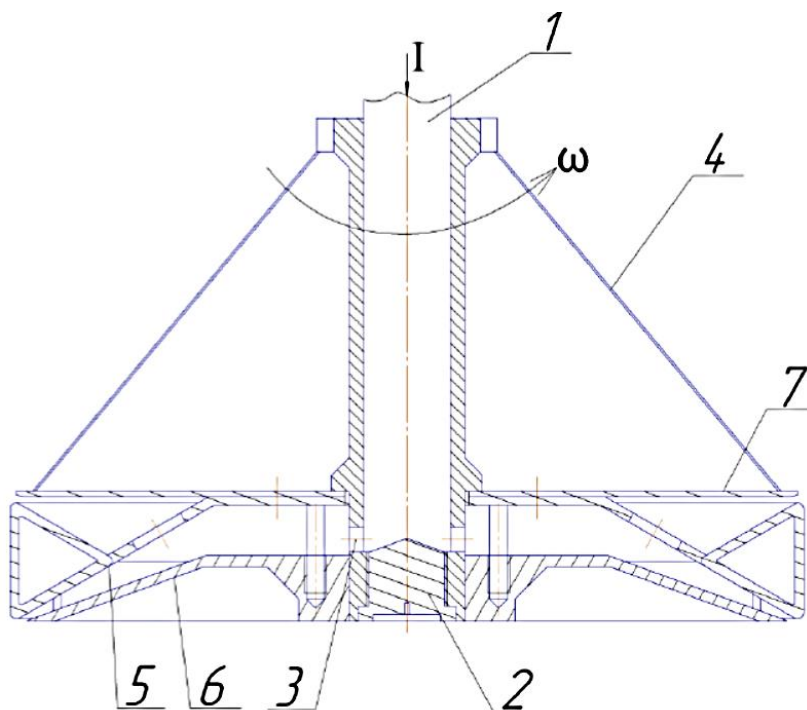
Ілюстрації повинні розташовуватися по тексту пояснювальної записки якнайближче до відповідних частин тексту. Всі ілюстрації нумерують у межах розділу арабськими цифрами. Номер ілюстрації складається з номера розділу і порядкового номера ілюстрації, розділених крапкою, після номеру крапка не ставиться.

Перед ілюстрацією в тексті повинне бути послання на цю ілюстрацію.

Ілюстрації мають найменування і, при необхідності, пояснюючі дані (текст під малюнками). Пояснюючі дані поміщають під ілюстрацією. З наступного рядка розміщується номер рисунку та його найменування.

*Приклад:*

Варіант дискового диспергатора зображено на рисунку 1.11 [18].



1 – патрубок; 2 – кришка; 3 – отвори; 4 – ребра жорсткості; 5 – конічний диск; 6 – нижній диск; 7 – верхній диск

I – Подача рідкої фази

Рисунок 1.11 – Дисковий розпилювач [18]

Масиви цифрових даних (експериментальні дані, результати багатоваріантних розрахунків, порівняльні характеристики інших досліджень тощо), як правило представляють у вигляді таблиць. Усі таблиці нумерують у межах розділу арабськими цифрами. Номер таблиці складається з розділу і порядкового номера таблиці, розділених крапкою. Над лівим верхнім кутом таблиці поміщають напис "Таблиця" із вказівкою номера таблиці, наприклад : "Таблиця 4.1". Таблиці повинні мати заголовки, які розміщується після номера таблиці через тире. На всі таблиці повинні бути посилання в тексті, причому посилання повинні зустрічатися раніше, ніж сама таблиця. Графу „Номер по порядку ” включати до таблиці заборонено.

*Приклад:*

Результати дослідів запишемо до таблиці 4.1.

Таблиця 4.2– Результати експериментів

Густина, кг/м <sup>3</sup>	Час, с	Маса, кг
1025	35	180
1035	45	195
1045	55	200
1055	65	205
1065	75	210

Якщо таблиця не поміщається на одній сторінці, її можна продовжити на наступній, продублювавши заголовки стовпчиків таблиці або використавши нумерацію стовпчиків. При цьому потрібно над лівим кутом вказати «Продовження таблиці ...».

При наявності в пояснювальній записці додатків їх виконують на аркушах формату А4. Додаток нумерують українськими літерами на першому аркуші додатку, за винятком літер Є, З, І, Ї, Й, О, Ч, Ь. Кожний додаток розпочинається з нової сторінки посередині тексту словом додаток з

вказівкою номера додатку. В наступній строчці розташовується заголовок додатку.

*Приклад:*

**Додаток А**  
**Результати експериментальних досліджень**

Текст кожного додатку при необхідності розділяють на розділи, підрозділи, які нумеруються окремо по кожному додатку. Додаток може мати свій зміст та перелік посилань. Ілюстрації і таблиці в додатках нумерують у межах кожного додатка.

Для всієї роботи повинна бути наскрізна нумерація аркушів.

*Приклад:*

„Рисунок А.2.12”

„Таблиця Б.4.2– Результати експериментів”

Готова записка односторонньо роздруковується й зшивається по правій стороні листа.



## 6 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ АНАЛІЗУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Одним з основних в наш час методів знаходження будь-якої інформації є мережа інтернет, яка дозволяє не виходячи з дому знайти величезну кількість необхідної для нас інформації.

### 6.1 Знаходження науково-дослідницької літератури

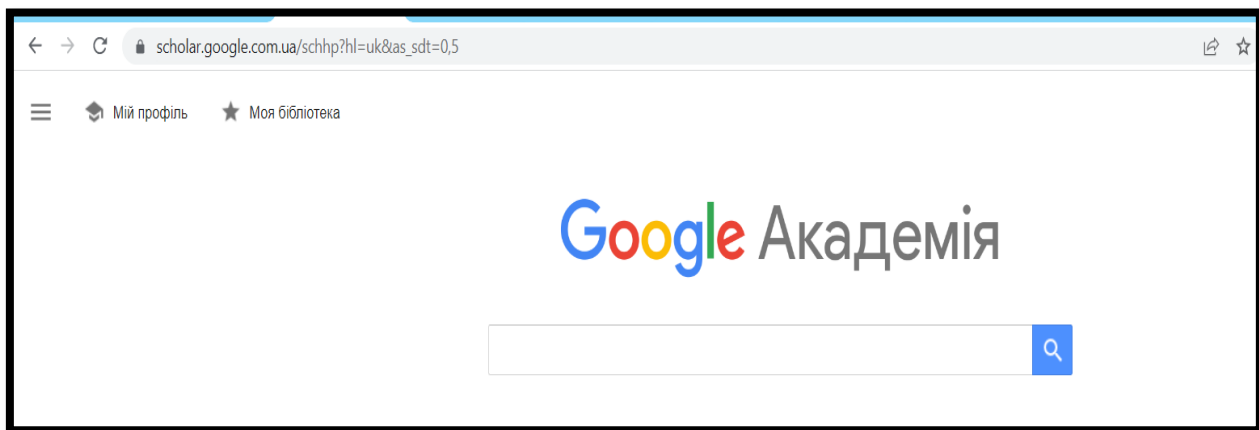
Першим кроком для проведення пошуку буде знаходження наукової літератури.

Взагалі сервісів для пошуку необхідної літератури існує велика кількість, проте розглянемо, самі найпоширеніші й, найпростіші.

- Першим таким сервісом можна назвати Google Академію.  
(Посилання: [https://scholar.google.com.ua/schhp?hl=uk&as\\_sdt=0,5](https://scholar.google.com.ua/schhp?hl=uk&as_sdt=0,5) )

Це один з додатків Google спеціально розроблений для пошуку наукових статей, книг, монографій, тощо.

Має він такий ось вигляд



В полі для пошуку вписуєте ключові слова за вашою темою курсової роботи.

Наприклад, впишемо туди фразу «калібратор полімерних труб», й натиснемо значок «пошуку» й вже через секунду (якщо інтернет не швидкісний то трохи довше) у вас на екрані з'явиться величезний список наукових робіт, що пов'язані з даним словосполученням.

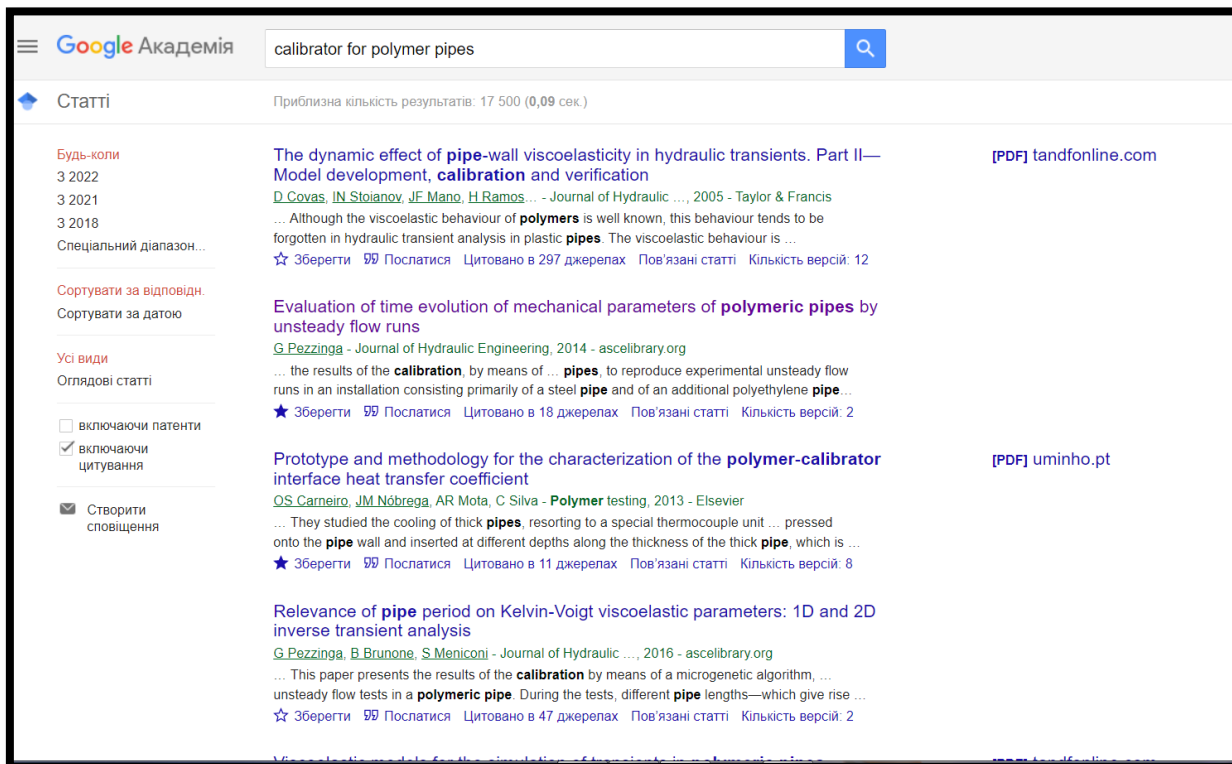
The screenshot shows a Google Scholar search results page. At the top, the search bar contains the text 'калібратор полімерних труб'. Below the search bar, the page displays a list of search results. On the left side, there are filters for 'Статті' (Articles), 'Будь-коли' (Any time), 'Сортувати за відповідн.' (Sort by relevance), 'Сортувати за датою' (Sort by date), 'Усі види' (All types), and 'Оглядові статті' (Review articles). There are also checkboxes for 'включаючи патенти' (include patents), 'включаючи цитування' (include citations), and 'Створити сповіщення' (Create alert). The search results list includes titles, authors, publication years, and links to PDF files. The titles are: 'Калібрування труб з поліпропілену', 'Обґрунтування методики експериментальних досліджень процесу калібрування труб з полімерних матеріалів', 'Модернізація лінії виробництва труб з поліетилену', 'Охолодження екструдованих профільних виробів з термопластичних матеріалів', and 'АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ТРУБНОЇ ЗАГОТОВКИ З РОЗПЛАВУ ПОЛІМЕРУ'.

При бажанні можна додати критеріїв пошуку й сортування. Наприклад, можна обрати нові, що були опубліковані в цей же рік, в рік раніше, або ж ті, що були опубліковані 5 років назад (на скріншоті вище це «З 2018»), а також можете обрати «Спеціальний діапазон» де впишете необхідні вам роки. Ну й про вибір «Будь-коли» забувати не варто, це дасть вам список усіх робіт, що пов'язані з вашим словосполученням. Можна обрати «Оглядові статті» чи «Усі види» (в даному виборі будуть показуватись не лише статі, а й тези, монографії, підручники тощо). Також можна поставити галочку напроти «включаючи патенти», що також допоможе з пошуком патентів (про що буде описано пізніше).

Так маючи список публікацій, натискаючи на потрібні вам, можете знайти необхідні, або ж отримаєте посилання на сторінку зі статтею, де її можна придбати (якщо вона не у відкритому доступі).

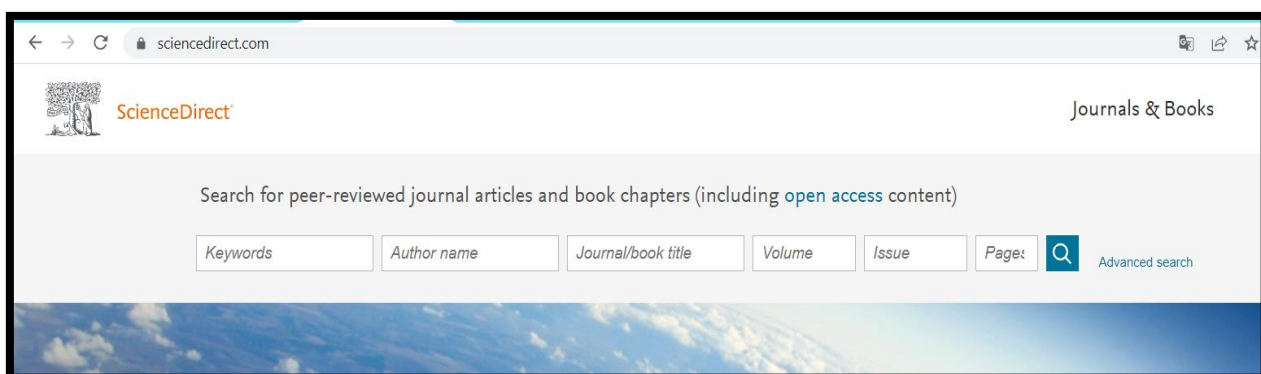
Таким само чином можна знайти англійські статті, чи написані будь-якою іншою мовою (якщо вам відома інша). Для цього в полі пошуку вписуєте вашу фразу англійською, наприклад, «*calibrator for polymer pipes*».

Як видно зі скріншоту знизу, працює за тим само алгоритмом, але показує лише



- ScienceDirect <https://www.sciencedirect.com/>

Це англomовний ресурс, що дозволяє знайти велику кількість англomовних наукових робіт по ряду можливих критеріїв (див. скріншот нище).



На даному зображенні, можна помітити 6 полів для введення інформації пошуку.

Першим полем є «Keywords» - ключові слова, Самий простий і поширений метод пошуку, ви набираєте необхідне слово, наприклад, «calibration», (ВАЖЛИВО! Вводити необхідно слова англійською мовою) й

отримуєте в результат список з робіт, що мають в своїй назві, чи «ключових словах» шукане вами.

The screenshot shows a search results interface with a left sidebar for filtering and a main content area for results. The sidebar includes sections for 'Refine by', 'Years', 'Article type', 'Publication title', 'Subject areas', and 'Access type'. The main area displays a list of search results, each with a checkbox, a numbered title, a snippet, authors, and a date. The word 'calibration' is highlighted in yellow in several titles. Action buttons like 'Abstract', 'Extracts', 'Figures', and 'Export' are visible for each result.

**Refine by:**

**Years**

- 2023 (3,526)
- 2022 (64,910)
- 2021 (63,601)

Show more ▾

**Article type** ⓘ

- Review articles (25,048)
- Research articles (943,065)
- Encyclopedia (4,750)
- Book chapters (36,534)

Show more ▾

**Publication title**

- Analytica Chimica Acta (20,237)
- Journal of Chromatography A (20,199)
- Talanta (16,103)

Show more ▾

**Subject areas**

- Chemistry (255,267)
- Biochemistry, Genetics and Molecular Biology (190,680)
- Engineering (157,076)

Show more ▾

**Access type**

- Open access & Open archive (111,622)

**Results:**

icarus, 27 July 2022, ...  
Qing Zhang, Dawei Liu, ... Xin Ren  
Abstract ▾ Extracts ▾ Figures ▾ Export ▾

Research article  
2 A sparse piecewise calibration method for potentiometric Measurement, 11 October 2022, ...  
Hongliang Hua, Zhenqiang Liao, ... Yuhang Liu  
Abstract ▾ Extracts ▾ Figures ▾ Export ▾

Get a personalized search experience  
Recommendations, reading history, search & journals alerts, and more  
[Personalize >](#)

Research article  
3 A multiple test arbors-based calibration method for a hy Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27 October 2022  
Mengyu Li, Liping Wang, ... Xiangyu Kong  
Abstract ▾ Graphical Abstract ▾ Extracts ▾ Figures ▾

Research article ● Open access  
4 Use of polymers as wavenumber calibration standards in Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy  
Aikaterini Pistiki, Oleg Ryabchykov, ... Jürgen Popp  
[Download PDF](#) Abstract ▾ Graphical Abstract ▾ Ex

Research article  
5 An adaptive parameter optimization algorithm for simul Engineering Structures, 29 October 2022, ...  
Yuqing Qiu, Hongli Ji, ... Jinhao Qiu  
Abstract ▾ Extracts ▾ Figures ▾ Export ▾

Research article  
6 Reinforcement learning-based calibration method for ca

Як й випадку з Гугл.Академією у вас з'явиться додаткові критерії пошуку, такі як «Рік публікації», «Тип статті», «Назва журналу», «Тематика», «Тип доступу». Коли з першим все й так зрозуміло, то для інших потрібно приділити більше часу. «Article type» - дозволяє звузити ваші пошуки, оскільки ви можете обрати «Оглядову статтю», «Дослідницьку», «Книги» та їх «глави» на необхідну тематику тощо. «Publication title» - дозволить вам обрати статті на потрібну вам тематику в конкретному журналі, наприклад, вам відомо, що в журналі «Харчової промисловості» (журнал вигаданий) були публікації необхідного вам змісту, чи зустрічаються на подібну

тематику, обравши журнал, отримаємо всі статті даного журналу з вказаними ключовими словами.

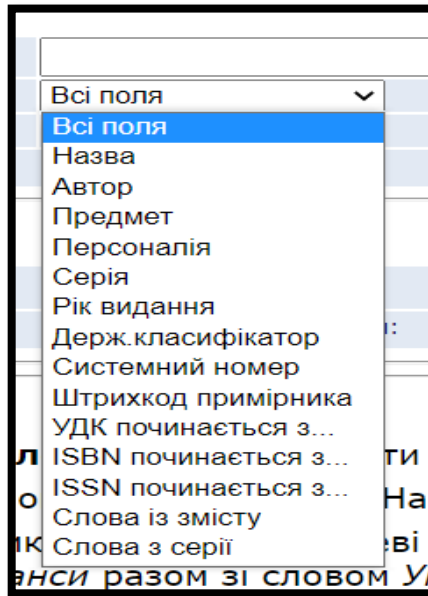
- Електронний каталог НТБ КПІ ім. Ігоря Сікорського  
<https://opac.kpi.ua/F>

Для студентів й викладачів, використовуючи IP-адресу підрозділів Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського» є доступ до пошуку публікацій. Заходите на сайт й побачите ось такого вигляду вікно пошуку (скріншот).

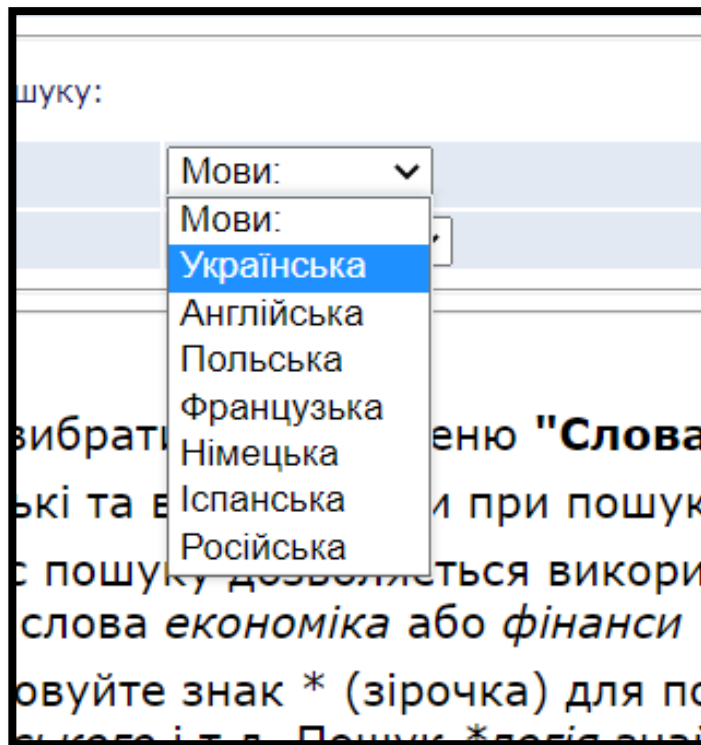
The screenshot shows the search interface of the OPAC system. At the top, there is a navigation bar with the title 'Електронний каталог НТБ КПІ ім. Ігоря Сікорського' and several menu items: '[ Загальний каталог ]', 'Нові надходження', 'Рідкісні видання', 'Матеріали до курсів', and 'інші колекції'. Below this, there are tabs for 'Перегляд', 'Пошук', 'Результат пошуку', and 'Попередні пошуки'. The main search area includes a search box with the placeholder 'Введіть слово чи фразу', a dropdown menu for 'Пошук у полі' (set to 'Всі поля'), and radio buttons for 'Слова поруч?' (set to 'Ні'). There are 'Далі' and 'Очистити' buttons. Below the search area, there are filters for 'Мова:' (set to 'Мови:'), 'Рік:' (with a note 'Використовуйте повний рік (rrrr) та "?" для скорочення'), 'Типи:' (set to 'Типи'), and 'Місце знаходження:' (set to 'всі'). At the bottom, there is a section titled 'Підказки до пошуку:' with four numbered tips:

- 1 Якщо вибрати "Так" в меню "Слова поруч" і ввести *Історія України*, то система знайде лише ті записи, де наступним після слова *Істор*
- 2 Маленькі та великі літери при пошуку рівнозначні. Наприклад, шукаючи *computer*, система також знайде записи, які містять *Computer* чи
- 3 Під час пошуку дозволяється використовувати Булеві оператори **AND, OR, NOT** та дужки. Наприклад, ввівши (економіка OR фінанси) AND мають слова *економіка* або *фінанси* разом зі словом *Україна*.
- 4 Застосовуйте знак \* (зірочка) для пошуку слів, що частково збігаються. Наприклад, в результаті пошуку *україн\** буде знайдено *Україна українського* і т.д. Пошук *\*логія* знайде слова *філологія, екологія* і т. д. Знак \* можна використовувати і в середині пошукового терміну. записи із словами *історія* та *історіографія*.

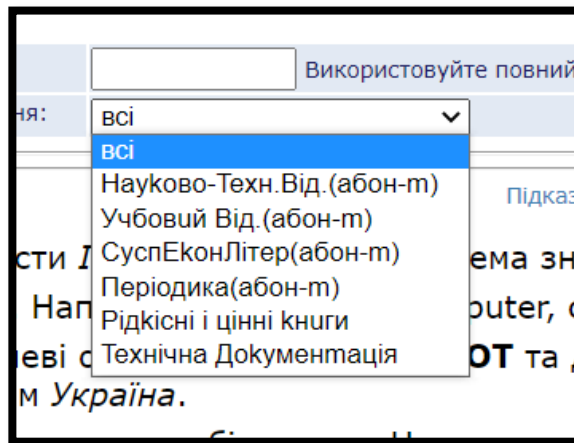
Як й в прикладах вище, дана пошукова система працює за подібною системою. Вводиться пошукове слово чи фраза. Обирається «поле пошуку» (скріншот нижче), тобто місце в якому має знаходитись ключове слово/словосполучення.



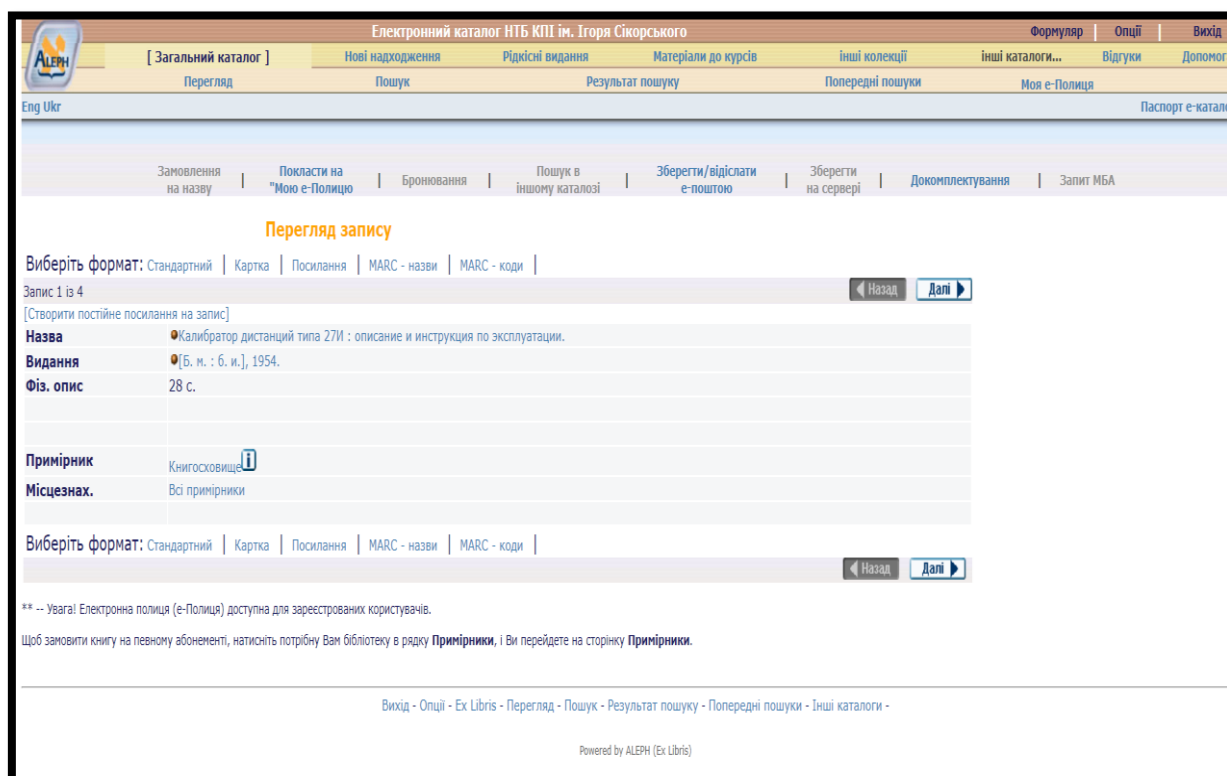
Обирається мова пошуку. В наявності 7 мов пошуку (перелік мов див. на скріншоті).



Вписується рік публікації, вказується її тип (Книги, Періодика), а також вказується «місце знаходження» (скріншот).



Закінчивши з обмеженнями і вписавши все необхідне, натискаємо «Далі», й отримуємо вікно з результатами пошуку. В нашому випадку бачимо, що є 4 записи, що підходять по ключовому слову.



Натискаючи «Далі», чи за необхідності «Назад», ми переходимо до наступної публікації, що була знайдена системою, й таким чином в результаті знаходимо необхідну літературу.

## 6.2 Знаходження новітніх розробок досліджуваного апарату

Дослідження тематики не можливе без глибокого й конструктивного аналізу розробок, які проводились в тематиці вашого процесу, або з іншими словами без аналізу конструкцій, що створювались для вирішення певної

проблеми, пов'язаної з процесом, що досліджується. Тому потрібно знайти патенти на винаходи, або на корисні моделі, в яких протікає об'єкт дослідження.

Самими простими й корисними для знаходження патентів будуть такі ресурси:

- Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності» («УКРПАТЕНТ») <https://base.uipv.org/searchBul/>

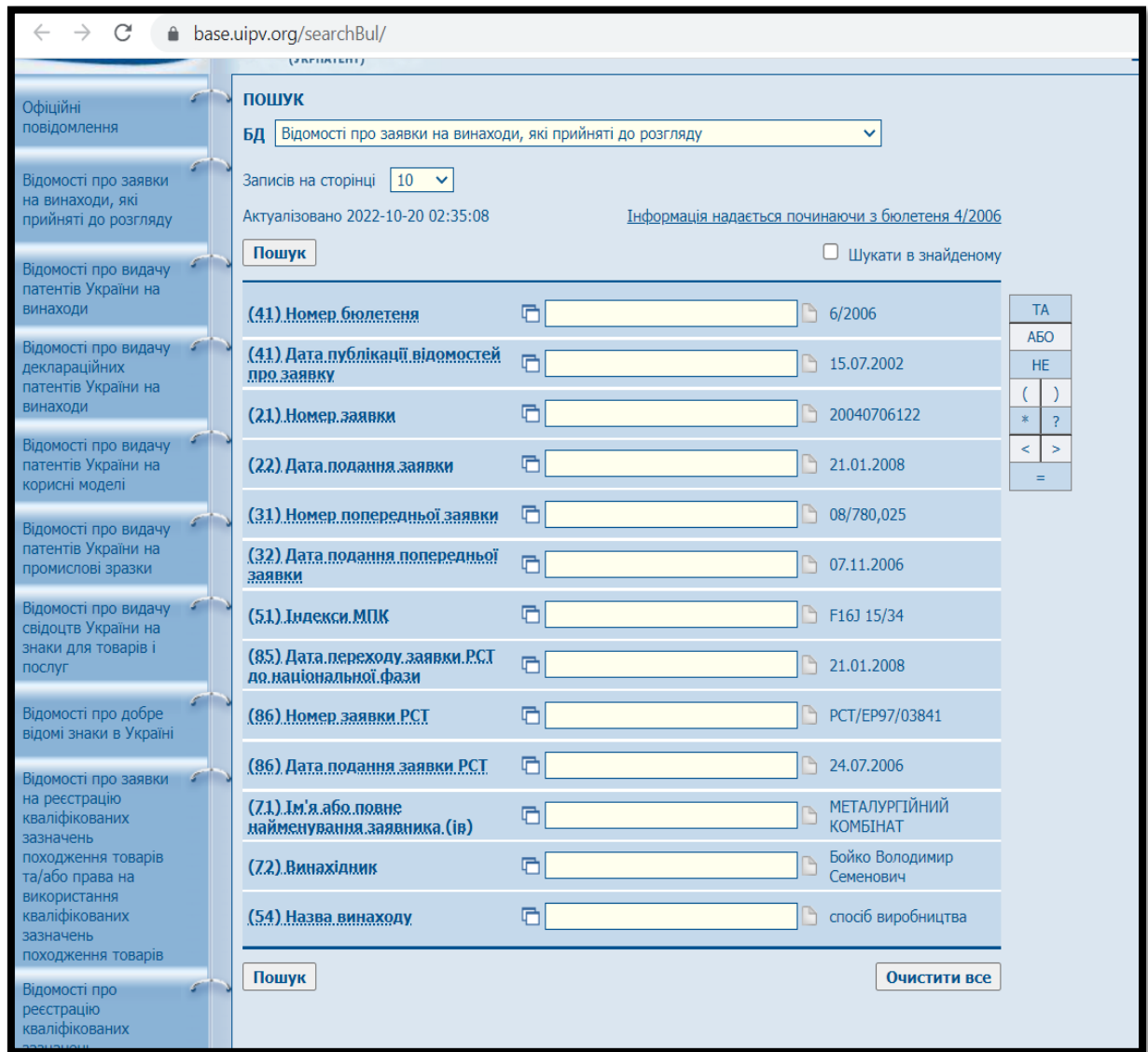
Українська система електронного доступу до пошуку та перевірки «етапів реєстрації» патентів. Як видно з скріншоту для пошуку необхідного патенту є велика кількість методів пошуку.

Проте для знаходження конкретно необхідних апаратів чи його модернізацій вам будуть в нагоді лише декілька.

Перший – індекс МПК (Міжнародна патентна класифікація). Він складається з індексу підкласу, за яким слідує два числа, розділені похилою рисою. Текст основної групи визначає область техніки, яка вважається доцільною для проведення пошуку. За цим індексом вам покажуть всі патенти, що включають в собі даний індекс.

Другий – за «Іменем або повним найменуванням заявника(ів)». В деяких випадках, наприклад, коли були знайдені тези, статті, монографії чи будь-які інші наукові публікації за даною тематикою, є невелика ймовірність, що в цього автора також є опублікований патент.





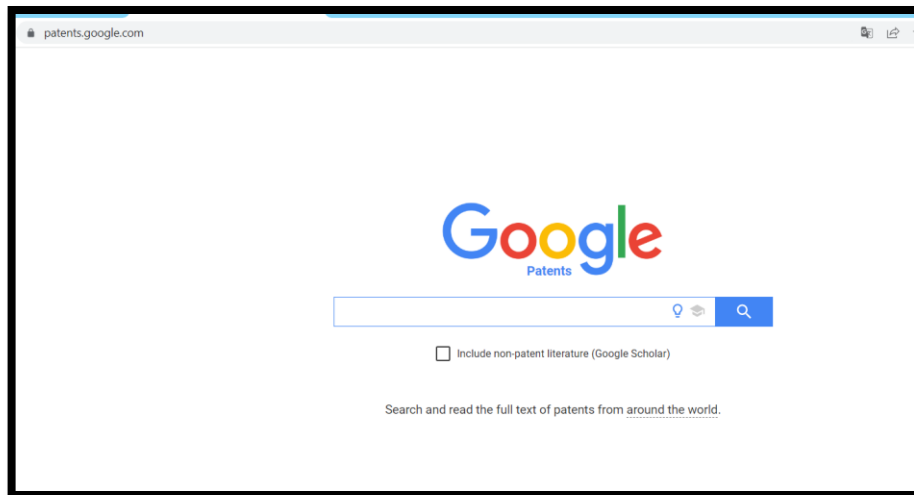
Третій, й найчастіше використовуваний, - за «Назвою винаходу». Просто вписуєте назву апарату (наприклад, «Калібратор») й у вас з'явиться список патентів, що містяться в базі УКРПАТЕНТУ, які включають в собі дане слово (словосполучення).

- GooglePatents <https://patents.google.com/>

Другим же методом, але більш масштабним (оскільки охоплює патенти не лише України), є пошук через спеціальну утиліту GooglePatents. На перший погляд вона виглядає як звичайна пошукова система (скріншот).

Але варто лише вписати в ній назву апарату, що шукається, (в прикладі буде «Калібратор») так відразу з'являться додаткові поля пошуку (посилання матиме такий вигляд:

<https://patents.google.com/?q=Калібратор&oq=Калібратор> )

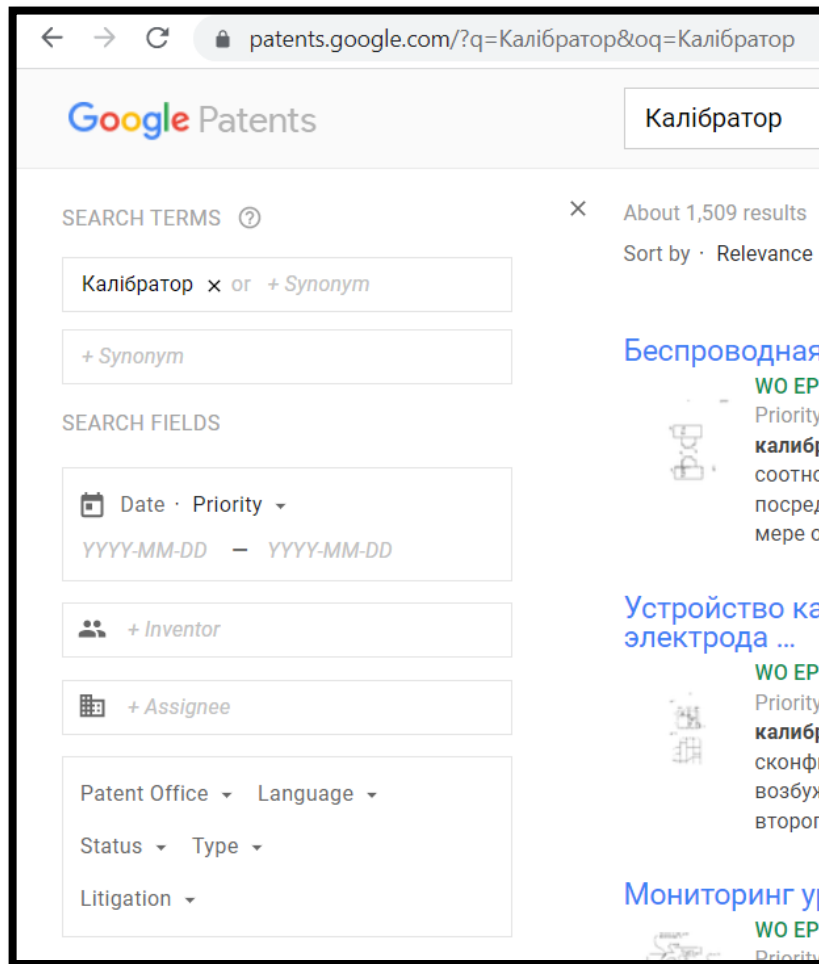


Першим важливим полем буде – поле «Синонімів», або ж додаткових ключових слів (словосполучень).

Другим – обираючи період публікації патенту (зазвичай в наукових роботах, таких як Магістерська дисертація, однією з вимог є використання джерел старістю не більше 5-10 років, тому дане поле буде в нагоді).

Третій, якщо ж ви знаходили вже патенти й, відповідно, вам відомий один або декілька авторів, - «Inventor», або ж поле «Винахідник». За даним полем буде зручно знайти патенти одного якогось винахідника, який працював й досліджував необхідний вам процес, або ж апарат, в якому протікає необхідний вам процес.

Також можна обрати «Мову патенту», «Статус патенту» (діючий, чи ні), «Тип патенту» (?).



Таким чином у вас вийде певний список з патентів на необхідну вам тематику, що дозволить вам проаналізувати «проблематику» процесу, яку хотіли вирішити винахідники.

## 7 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПОРЯДКУ ЗАХИСТУ РОБОТИ

Зброшурована пояснювальна записка та креслення вкладаються до папки на титульну сторінку якої наклеюється аркуш з заголовком „Курсова робота” (додаток А).

На внутрішній стороні папки розміщують „Опис вкладень” (додаток Д).

Курсова робота захищається після перевірки на керівником курсової роботи всіх розділів та креслень, про що свідчать підписи керівника та студента у штампах пояснювальної записки і креслень та на титульних аркушах записки.

У разі невиконання студентом своєчасно ухваленого календарного плану (без поважної причини) на може прийматись рішення про недопуск студента до захисту курсової роботи та його подальше відрахування з університету.

Студент, відсторонений від захисту, або робота якого визнана незадовільною, вважається таким, що не виконав індивідуальний навчальний план і згідно Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах), затвердженого Постановою Кабінету міністрів від 23 березня 2016 р. підлягає відрахуванню.

### **Політика дедлайнів та перескладань**

Особлива увага приділяється своєчасному наданню документів з курсової роботи та виконання календарного плану.

Студенти мають право оскаржити бали за завдання, але обов'язково аргументовано, пояснивши, із яким критерієм вони не погоджуються відповідно до оціночного листа та/або зауважень.

Деталізовані критерії оцінювання результатів навчання здобувача визначені у положенні про РСО з курсу, що є додатком до навчальної програми навчальної дисципліни та у Додатку А до силабусу.

## **Політика університету**

### **Академічна доброчесність**

Політика та принципи академічної доброчесності визначені у розділі 3 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

### **Норми етичної поведінки**

Норми етичної поведінки аспірантів і працівників визначені у розділі 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

## 8 КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ТА СИСТЕМА РЕЙТИНГОВИХ БАЛІВ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Рейтингова оцінка з курсової роботи має дві складові. Перша (стартова) характеризує роботу студента з курсові роботи та її результат – якість пояснювальної записки та графічного матеріалу. Друга складова характеризує якість захисту студентом курсової роботи. Розмір шкали стартової складової дорівнює 40 балів, а складової захисту –60 балів.

*1 Стартова складова оцінюється за такими критеріями-вимогами (де максимальний бал – ідеальне виконання вимоги):*

- своєчасність виконання графіка роботи з курсової роботи – 5-3 балів;
- сучасність та обґрунтування прийнятих рішень – 12-7 балів;
- правильність застосування методів аналізу – 10-6 балів;
- якість оформлення, виконання вимог нормативних документів – 6-4 балів;
- використання нових (не старіше 5 років) джерел інформації – 7-4 балів.

*2. Складова захисту курсової роботи оцінюється за такими критеріями-вимогами (де максимальний бал – ідеальне виконання вимоги):*

- якість доповіді – 10-6 балів;
- ступінь володіння матеріалом – 15-9 балів;
- ступінь обґрунтування прийнятих рішень – 15-9 балів;
- вміння захищати свою думку – 20-12 балів.

Таким чином рейтингова семестрова шкала з кредитного модуля складає:

$$R = 40 + 60 = 100 \text{ балів}$$

Максимальна сума балів складає 100. Для отримання заліку з кредитного модуля «автоматом» потрібно мати рейтинг не менше 60 балів.

Для отримання залікової оцінки, сума всіх отриманих протягом семестру рейтингових балів **R** переводиться згідно з таблицею:

<b>Кількість балів</b>	<b>Оцінка</b>
95...100	відмінно
85...94	дуже добре
75...84	добре
65...74	задовільно
60...64	достатньо
$RD < 60$	незадовільно
Не виконані умови допуску	не допущено

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Корнієнко Я.М. Процеси та обладнання хімічної технології [Текст]: підруч. / Я.М. Корнієнко, Ю.Ю. Лукач, І.О. Мікульонок та ін. - К.: НТУУ "КПІ", 2011. - Ч. 2. - 416 с.
2. Дубинін А.І. Процеси та апарати хімічної технології: навч. Посібник з курсового проектування / А.І. Дубинін, Р.І. Гаврилів, І.О. Гузьова; за ред. А.І. Дубиніна. Львів. Видавництво Львівської політехніки, 2012, - 360с.
3. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії: Наук. посібник . – К.: ІЗМН, 1999. – 220 с.
4. Мікульонок І. О. Механічні, гідромеханічні й масообмінні процеси та обладнання хімічної технології: Навч. посіб. – 2-ге вид., перероб. і допов. – К.: ІВЦ „Політехніка”, 2002. – 304 с.
5. Ekborg, M., Ottander, C., Silfver, E. et al. Teachers' Experience of Working with Socio-scientific Issues: A Large Scale and in Depth Study. Res Sci Educ 43, 599–617 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11165-011-9279-5>
6. Lewis, J., & Leach, J. (2006). Discussion of Socio-scientific Issues: The role of science knowledge. International Journal of Science Education, 28(11), 1267–1287. doi:10.1080/09500690500439348 .
7. Ke, L., Sadler, T.D., Zangori, L. et al. Developing and Using Multiple Models to Promote Scientific Literacy in the Context of Socio-Scientific Issues. Sci & Educ 30, 589–607 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00206-1> .
8. WEN HanJie, ZHOU ZhengBing, ZHU ChuanWei, LUO ChongGuang, WANG DaZhao, DU ShengJiang, LI XiaoFeng, CHEN MaoHong, LI HongYi. 2019. Critical scientific issues of super-enrichment of dispersed metals. Acta Petrologica Sinica, 35(11): 3271-3291. doi: 10.18654/1000-0569/2019.11.01 .
9. Юринець В.Є. Методологія наукових досліджень: навчальний посібник/ В.Є. Юринець. - Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2011. – 178 с.
10. Шлихтинг Г. Теорія граничного шару. – М.: Наука, 1974. – 712.



11. Романков П. Г., Фролов В. П. Массобмінні процеси хімічної технології. –Л.: Хімія, 1990. – 384 с.
12. Касаткін А.Г. Основні процеси та апарати хімічної технології. – М.: Хімія, 1973. – 752 с.
13. Оформлення графічної документації. Методичні вказівки для виконання курсових та дипломних проєктів / Склав В.Н. Марчевский. – 1989.
14. Основні процеси та апарати хімічної технології: Посібник по проєктуванню / Під ред. Ю.І. Дитнерського. – М.: Хімія, 1982. – 772 с.
15. Промислова технологія ліків / Під ред. проф. В.І Нускова, Вид. УкрФА, Харків, - 1999, - 559 стр.
16. Проєктування процесів та апаратів харчових виробництв / Під ред. Проф. Стабникова В.Н., Вища школа., К.: - 1982, - 199 с.
17. Машина та апарати хімічних виробництв. – вид. 3-є. перероб. і доп. / І. І. Чорнобильський, А. Г. Бондарь, Б. А. Гаєвский та ін.; Під ред. І. І. Чорнобильського. – М. : Машинобудування, 1975. – 455 с.
18. Дитнерський Ю.І. Основні процеси та апарати хімічної технології. Посібник по курсовому проєктуванню. М.: Хімія, - 1983, - 272с.
19. Charles H. Forsberg. Heat Transfer Principles and Applications / Charles H. Forsberg. –Academic Press, 2020. – 545 p. – ISBN: 978-0-12-802296-2..
20. Greg F. Naterer. Advanced Heat Transfer. Second Edition / Greg F. Naterer. – CRC Press, 2018. – 514 p. – ISBN 9781138579323..
21. Наукометричні бази даних / Електронний архів наукових та освітніх матеріалів КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронний ресурс. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/> .
22. Наукометричні бази даних / Електронна версія акумулятивного офіційного бюлетеня "Промислова власність". – Електронний ресурс. Режим доступу: <https://base.uipv.org/searchBul/>
23. Наукометричні бази даних / Електронна версія пошукової системи патентів "GooglePatents". – Електронний ресурс. Режим доступу: <HTTPS://PATENTS.GOOGLE.COM/>

24 Історія науки і техніки України : підруч. для студентів вищ. навч. закл. / Л. Є. Дещинський та ін. ; за наук. ред. Л. Є. Дещинського. – Львів : Растр-7, 2011. – 327 с

25. Основи наукових досліджень: Організація наукових досліджень : конспект лекцій / уклад. Н. І. Бурау. – Київ : НТУУ «КПІ», 2007. – 33 с.

26. Про затвердження Вимог до оформлення дисертації [Електронний ресурс] : наказ МОН України від 20.10.2022 №40. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0155-17#Text>

27. Наукометричні бази даних / Електронна версія пошукової системи публікацій "Google-Академія". – Електронний ресурс. Режим доступу: [HTTPS://SCHOLAR.GOOGLE.COM.UA/SCHHP?HL=UK&AS\\_SDT=0,5](HTTPS://SCHOLAR.GOOGLE.COM.UA/SCHHP?HL=UK&AS_SDT=0,5)

**ДОДАТОК А. ЗРАЗОК ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА КУРСОВОЇ  
РОБОТИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО ”  
Інженерно-хімічний факультет  
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

**КУРСОВА РОБОТА**

**з дисципліни:**

Моделювання процесів та регламентів промислового обладнання

на тему: **ПРОЦЕС ЗНЕВОДНЕННЯ І ГРАНУЛЮВАННЯ  
КОМПЛЕКСНИХ РІДКИХ СИСТЕМ**

Студента IV курсу, групи ЛН-91

\_\_\_\_\_ Юрій Миколайович Магдич  
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»,  
спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне  
моделювання та проектування обладнання хімічних  
і нафтопереробних виробництв»

Керівник доцент, к.т.н., \_\_\_\_\_ Андрій СТЕПАНЮК

Національна оцінка \_\_\_\_\_

Кількість балів: \_\_\_\_\_ оцінка: ECTS \_\_\_\_\_

Члени комісії:

\_\_\_\_\_  
(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій курсовій роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_ Дмитро ЗАЇКА

Київ 2021

**ДОДАТОК Б. ЗРАЗОК ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА  
ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ КУРСОВОЇ РОБОТИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**

**“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**

**ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**Інженерно-хімічний факультет**

**Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до курсової роботи на тему:

**ПРОЦЕС ЗНЕВОДНЕННЯ І ГРАНУЛЮВАННЯ**

**КОМПЛЕКСНИХ РІДКИХ СИСТЕМ**

спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації  
«Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання  
хімічних і нафтопереробних виробництв»

з дисципліни:

Моделювання процесів та регламентів промислового обладнання

Виконав студент групи ЛН-91 \_\_\_\_\_

(підпис, дата)

Дмитро ЗАЇКА

Керівник проекту, к.т.н., доц. \_\_\_\_\_

(підпис, дата)

Андрій СТЕПАНЮК

Київ 2021

## ДОДАТОК В. ЗРАЗОК ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО ”

ІНЖЕНЕРНО-ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

### ЗАВДАННЯ

до курсової роботи

студентові \_\_\_\_\_

1. **Тема проекту:** Процес зневоднення і гранулювання комплексних рідких систем

2. **Термін здачі** студентом закінченого проекту: 30 \_\_\_\_\_ 202\_\_р.

3. **Вихідні дані до проекту:** проаналізувати стан питання та сформулювати мету та задачі дослідження. Підготувати підґрунтя для розробки фізичної та математичної моделей процесу зневоднення і гранулювання комплексних рідких систем.

4. **Перелік питань, які мають бути розроблені:** 1) Вступ, 2) Загальні відомості про проблему, 3) Теоретичне дослідження проблеми, 4) Експериментальне вирішення проблеми, 5) Мета та задачі дослідження, 6) Висновки

Дата видачі завдання: „\_\_\_” \_\_\_\_\_ 202\_\_р.

Завдання прийняв до виконання студент ЛН-91 \_\_\_\_\_ Дмитро ЗАЇКА

(підпис, дата)

Керівник, доцент

\_\_\_\_\_ Андрій СТЕПАНЮК

(підпис, дата)

# ДОДАТОК Г. ЗРАЗОК ЗМІСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ

## Зміст

Перелік основних умовних позначень, символів, скорочень і термінів

	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
ВСТУП	40
1.СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	42
1.1 Основні засади сталого розвитку	8
1.2 Теоретичні дослідження проблеми формування в калібрі	15
1.3 Сучасне конструкторське рішення	19
1.4 Області застосування калібруючого інструменту	21
1.5 Розрахунок калібруючого інструменту	23
1.6 Теплофізичні та механічні властивості поліпропілену	27
1.7 Критерії якості труб з поліпропілену	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.8 Висновки	30
1.9 Мета та задачі дослідження	31
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ	32
2.1 Фізична модель процесу	32
2.2. Математична модель процесу	33
2.2.1 Напруженість заготовки під час процесу калібрування труби	33
2.2.2 Визначення мінімального необхідного вакууму	73
2.3 Висновки	77
Перелік посилань	<b>Ошибка!</b>
	<b>Закладка не определена.</b>

## ДОДАТОК Д . ЗРАЗОК ЗАПИСКИ КУРСОВОЇ РОБОТИ.

### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ

$Q$  –теплота, що підводиться до калібратора та виводиться водою, Дж;

$G$  –масова продуктивність розплаву, кг /с;

$D$  – зовнішній діаметр, м;

$d$  – внутрішній діаметр, м;

$\gamma$  – усадка, %;

$F$  – критерій Фішера;

$L$  – довжина, м;

$x$  – поточна довжина калібратора, м;

$m$  – маса, кг;

$P$  – тиск, Па;

$T$  – абсолютна температура, К;

$t$  – середня температура розплаву, °С;

$V$  – об'єм, м<sup>3</sup>;

$W$  – швидкість течії розплаву, кг/кг;

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі, м<sup>2</sup>/с;

$\gamma$  - лінійна усадка

$E$  – модуль пружності

$\delta$  – товщина затверділого шару, м;

$P_{\text{атм}}$  - атмосферний тиск в середині труби, Па;

$P_{\text{калібр}}$  - тиск в калібратор, Па;

$F_{\text{тертя}}$  - сила тертя труби по калібраторі, Н;

$F_{\text{тяги}}$  - сила, з якою тянуть трубу по калібраторі, Н;

$\mu$  – коефіцієнт тертя

$\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;

$C_p$  – питома теплоємність, кДж/(кг·град);

$\lambda$  – теплопровідність, Вт/(м·град)

## ВСТУП

Труби з поліпропілену широко використовуються у будівництві інженерних мереж, а саме – систем гарячого та холодного водопостачання, опалення, каналізації, систем кондиціонування та очистки повітря.

Геометричні параметри труби визначає процес калібрування, конструкції калібруючих пристроїв різноманітні і сам процес є лімітуючим у виробництві труб малого діаметру. Традиційно швидкість виробництва труб з поліпропілену становить 4-5 м/хв. Відомі закордонні фірми [1] виготовляють калібруючі пристрої, які дозволяють калібрувати труби з поліпропілену при продуктивності до 12 м/хв.

Калібрування – процес охолодження та твердіння розплаву в результаті контакту з стінкою калібру до товщини, достатньої для передачі тягового зусилля і збереження заданих форми та розмірів виробу. Кругла форма труби забезпечується вакуумом назовні ще гарячої труби.

Державний стандарт України [2] регламентує граничні показники овальності, а саме до діаметра 25 мм він становить 1,2 мм. Для забезпечення такої вимоги необхідне значення вакууму складає 0,2-0,4 бар, однак при потраплянні у калібруючий пристрій розплав полімеру не має механічної міцності, через що значні сили тертя труби о поверхню калібратора спричиняють її розрив.

### **Актуальність проблеми**

Труби з поліпропілену мають переваги:

- Термостійкість – робоча температура до +85°C;
- Зручність монтажу нагрітими елементами;
- Висока стійкість до агресивних середовищ.

Продуктивність трубної лінії лімітується процесом калібрування, тому створення нових конструкцій калібратору є важливим, а вдосконалення методики їх розрахунку – актуальним.

### **Мета і задачі досліджень.**

Об'єкт дослідження – теплові та механічні процеси калібрування труб з поліпропілену



Предмет дослідження – процес калібрування труб з поліпропілену..

Методи дослідження: теоретичний аналіз процесу калібрування, математичне моделювання процесу, експериментальні дослідження процесу калібрування, визначення достовірності результатів моделювання.

Метою даної роботи є встановлення залежностей визначальних параметрів процесу калібрування труб на продуктивність екструзії. Для досягнення цієї мети сформульовано наступні задачі:

- Сформулювати фізичну модель процесу калібрування труби з поліпропілену у калібраторі;
- Вдосконалити математичну модель процесу охолодження труби з поліпропілену у калібраторі;
- Вирішити математичну модель, вивести характерні залежності температурного поля в трубі від часу та умов охолодження, з врахуванням зміни агрегатного стану матеріалу;
- Провести експериментальні дослідження процесу охолодження труби з зміною агрегатного стану
- Перевірити адекватність математичної моделі та алгоритму її рішення
- Скорегувати отримані залежності, впровадити результати роботи.

# 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1 Основні засади сталого розвитку

В силу об'єктивних причин багато видів труб сьогодні прокладають саме з полімеру, а не з металу. Полімерна труба з ПП за рахунок своєї стійкості до агресивних дій речовин, що знаходяться в стічних водах, давно закріпила за собою лідерські позиції в цьому напрямку. Крім іншого, каналізація з цих труб легка в експлуатації, її запросто можна розібрати і прочистити засмічення трубу.

Труба поліпропіленова DN 20 PN 20 останнім часом набула особливого місця в водопостачальних системах для гарячої та холодної води.

Перевага труб з PPR [3]:

1. Витримують тиск 2 МПа;
2. Не вступають в електрохімічні реакції, що виключає внутрішню і зовнішню корозію труб. Завдяки цьому збільшується термін експлуатації самого трубопроводу і пов'язаних з ними сантехнічних приладів;
3. Внутрішні стінки труб і фітингів гладкі, тому вони не обростають відкладеннями і, як наслідок, не знижується витрати рідини, що транспортуються. Це дозволяє використовувати труби меншого діаметру;
4. Мають низьку теплопровідність, що перешкоджає втратами тепла;
5. Екологічно чисті: матеріал не виділяє шкідливих речовин ні при монтажі трубопроводу, ні при його експлуатації;
6. Трубопровід дозволений до застосування в харчовій промисловості та для транспортування питної води;
7. Мала вага труб і фітингів істотно полегшує транспортування і монтаж;
8. Еластичність матеріалу запобігає руйнуванню системи при замерзанні та зменшує рівень шумів у поліпропіленових трубопроводах;
9. Висока якість з'єднання - при полідифузійному зварюванні труба і фітинги утворюють однорідне з'єднання.

Якість, міцність і відсутність дефектів основні проблеми пов'язані з процесом формування. Сам же процес на пряму залежить від калібратора. Від якості даного приладу залежить якість виробу.

Калібратор використовують при виготовленні труб і кабелів, над вирішенням задач проектування проведено багато досліджень [4].

Оскільки нормованим розміром полімерних труб є зовнішній діаметр, а також геометричне співвідношення SDR (відношення номінального зовнішнього діаметру до номінальної товщини стінки), то у виробництві труб застосовують переважно зовнішнє вакуумне калібрування.

Під час проектування формуючих пристроїв екструдерів потрібно враховувати, що їхні робочі канали можуть мати найрізноманітнішу геометрію, а перероблюваний в обладнанні матеріал – потребувати різних гідродинамічних і теплових режимів. Дефекти у виробках можуть бути пов'язані зі зміною реологічних властивостей перероблюваного матеріалу на стадіях пластикації та формування [4].

Після вакуумного калібрування профіль потрапляє до охолоджувальної ванни для остаточного охолодження. Розглянемо основні проблеми процесу та дефекти, що можуть при цьому виникати. Перш за все, це виникнення «хвилі» на крайці профілю (рисунок 1.1) [4].

Зазначений дефект може виникати внаслідок недостатнього «наповнення» профілю (нестачі матеріалу на торцях профілю для утворення повноцінного профільованого виробу). Це може призвести до утворення «хвилі» на кромці профілю. До виникнення цього дефекту також може призвести недостатнє охолодження першого калібратора (або його частини). У цьому разі в багатьох випадках можна спостерігати зворотно-поступальні рухи крайки або іншої частини профілю на вході в перший калібратор. При цьому інші крайки і частини профілю виглядають «не наповненими». Подібний дефект також може виникати і через надлишок матеріалу, тоді потоншення «хвилі» крайки відсутнє [4].

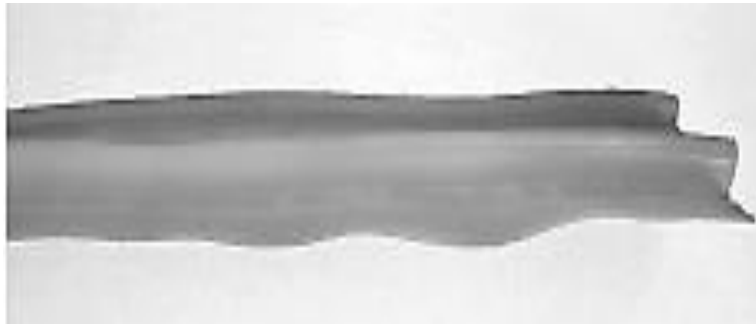


Рисунок 1.1 - Дефект типу «хвиля» на двошаровому П-подібному профілі з вільною крайкою

Розглянемо такі дефекти як утяжки, полоси, подряпини (рисунок 1.2) та вм'ятини. Досить часто на поверхні готового профілю можна бачити (і відчутти пальцем на дотик) місцевий провал поверхні у вигляді смуги в напрямку екструдуювання. У разі, якщо цей дефект починається в фільтері (потрібно відсунути калібратор і оглянути джгут матеріалу, що виходить з фільтери) і не розгладжується при проходженні крізь формуючі пристрої, подібний дефект поверхні називається «утяжкою» [4].

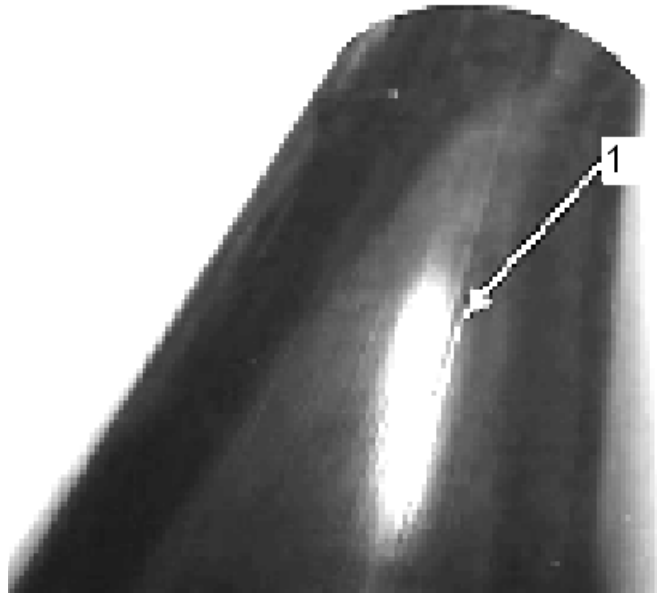
Дуже часто утяжка утворюється над внутрішніми перегородками профілю [4].

Якщо на джгуті матеріалу перед калібратором дефекту немає, значить смугу на поверхні (вм'ятину) залишає чужорідна частинка, що потрапила до калібратора. При цьому можна зазначити таке:

– смуга на поверхні має гладкі краї без гострих крайок. Швидше за все стороння частка потрапила в перший калібратор (передкалібратор, якщо він є). У цьому разі частинка проминає ще м'який чи не стверділий матеріал. Для усунення дефекту достатньо видалити сторонні частинки з калібраторів;

– смуга на поверхні має гострі крайки. Стороння частинка (тверда, можливо металева) може знаходитися в будь-якому місці калібратора або кондуктора ванни і дряпати гострими крайками поверхню профілю.

У таких випадках йдеться про «подряпини» профілю [4].



1 - подряпина

Рисунок 1.2 - Дефекти типу «полоси» (вказано стрілкою)

Особливу увагу потрібно приділити викривленню відрізків профілю по довжині (утворення так званої «шаблі») [4].

Такий дефект в умовах виробництва іноді називається «шабля». Причиною його появи можна вважати нерівномірне охолодження профілю в калібраторах і ванні. Такий дефект здебільшого виникає через не співвісність установки інструменту [4].

Окремо можна виділити дефекти, що стосуються соекструзійного формування полімерних виробів, оскільки соекструзією формуються багат шарові вироби. Перед соекструзією постають питання адгезійної взаємодії між шарами та достатньої адгезійної міцності. При прикладенні навантаження на композиційний матеріал з низькою адгезією між фазами руйнування буде проходити на межі поділу фаз (розшарування виробу, зміщення шарів) (рисунок 1.3). За високої швидкості екструзії можуть створитися умови досягнення граничної адгезійної міцності та внаслідок високоеластичної турбулентності виникати дефекти поверхні виробів. Це явище прогнозується за досягненням теоретичної або експериментально визначеної критичної швидкості зсуву [4].



Рисунок 1.3 - Порушення адгезійної взаємодії шарів на межі поділу фаз

Прогнозування появи та шляхи усунення систематичних дефектів, таких як нерівномірність швидкостей та товщин екструдату, надмірна температура та час перебування розплаву в головці, які спричиняють деструкцію полімеру, можна здійснювати за допомогою комп'ютерного моделювання, що дає змогу істотно скоротити час, а також матеріальні та енергетичні ресурси на про ведення натурних експериментів і конструктивних доопрацювань обладнання [4].

Дефекти профілів можна поділити на загальні, тобто ті, які характерні для будь-якого виду профілю, та індивідуальні, що притаманні тільки певному профілю. Окрім того, фахівці рекомендують відслідковувати появу дефектів у ретроспективі для розуміння, чи є вони наслідком якоїсь події, що сталася напередодні (наприклад, аварійна ситуація, яка потягла за собою псування конструктивного елемента, або перехід на нову сировину), чи їхня частота збільшилася з часом і більш за все є наслідком зносу обладнання. Зазвичай відновлення покриття контактних з полімером поверхонь допомагає усунути небажані явища [4].

Зазначені дефекти пов'язані з процесом формування виробів в калібраторі.

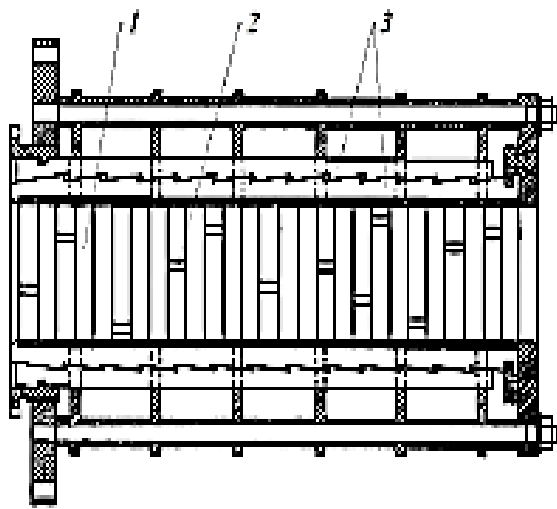
## 1.2 Теоретичні дослідження проблеми формування в калібрі

Під час виробництва виникає потреба корегувати діаметр калібрувальної поверхні так, щоб відхилення діаметра труби не перевищувало нормованого значення. Якщо застосовувати для цього типові конструкції калібрувальних пристроїв, слід зупинити технологічний процес і замінити калібрувальну поверхню, що призводить до значних втрат полімерного матеріалу і часу. У роботі [5] проблему вирішено шляхом застосування ряду кільцевих елементів 1, стики 2 яких рознесено таким чином, що в осьовому напрямку калібрувальна поверхня має замкнену кільцеву форму (рисунок 1.4). За довжиною калібрувального пристрою розташовано елементи 3, якими можна керувати, стискаючи чи розширюючи кільцеві елементи 1 [6].

Значно збільшити діапазон регулювання діаметра калібрувальної поверхні вдалося, застосовуючи конструкцію, запропоновану в роботі [7]. За такого виконання калібрувальної поверхні змінення діаметра здійснюють, змінюючи довжину калібрувальної поверхні (рисунок 1.5). Така конструкція дозволяє не купувати калібрувальний інструмент для кожного типорозміру труб і робить можливим перехід на випуск труб іншого типорозміру, не зупиняючи виробництво.

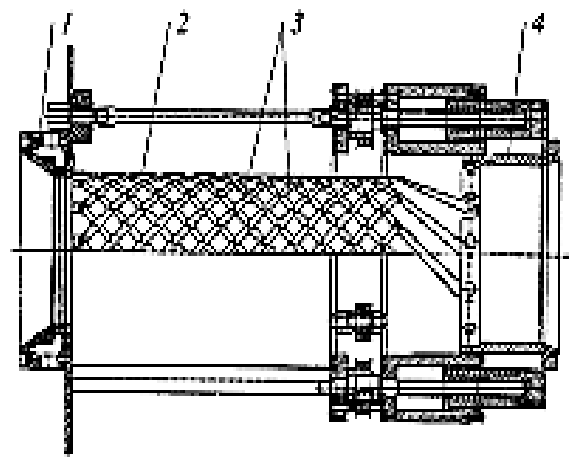
Подальше охолодження труби може бути одностороннім зовнішнім або із застосування внутрішнього охолодження.

Прогрес в проектуванні екструзійного обладнання дає змогу підвищити продуктивність одночерв'ячних екструдерів із приготуванням розплаву полімеру високої якості. Однак наступне охолодження трубної заготовки не дає можливості повністю реалізувати потенціал екструзійного обладнання. Тому слід підвищувати ефективність роботи системи охолодження й зосередити подальші дослідження на розробленні ефективних засобів охолодження трубної заготовки [7].



1 – кільцевий елемент; 2 – штифт;  
3 – елемент керування

Рисунок 1.4 – Калібрувальний пристрій [6]



1 – підшипний отвір; 2 – калібрувальний циліндр;  
3 – спіральні епруvette; 4 – поліфінний отвір

Рисунок 1.5 - Калібрувальний пристрій [7]

З конструктивних параметрів основну увагу потрібно звернути на формуючий інструмент, оскільки передусім за його допомогою продукція набуває своїх остаточних параметрів (форма, розміри, фізико-механічні властивості). Часто дефекти профілів зумовлені конструктивними вадами формуючого інструменту ще на стадіях його проектування та виробництва, і усунути їх можливо лише шляхом конструктивних доопрацювань. В безперервному технологічному процесі, яким є екструзія, важливо мати засоби швидкої та ефективної діагностики стану й можливих дефектів обладнання, які можуть спричиняти дефекти у виробах [7].

У зв'язку зі збільшенням швидкості процесу екструзії все більше уваги приділяють дефектам поверхні виробів, які виникають внаслідок періодичного проковзування розплаву по контактних з ним поверхнях обладнання [7].

Встановлення взаємозв'язку між сукупністю перелічених факторів та якісними характеристиками полімерних виробів розглядалося низкою авторів як окремі наукові задачі й не втілено у формалізовані методики діагностики та усунення проблем [7].

Після виходу екструдованого профілю з головки він потрапляє до вакуумного калібратора (рисунок 1.6), де відбувається остаточне



формування необхідної геометрії профілю з його частковим охолодженням та одночасним витягуванням тягнучим пристроєм [7].

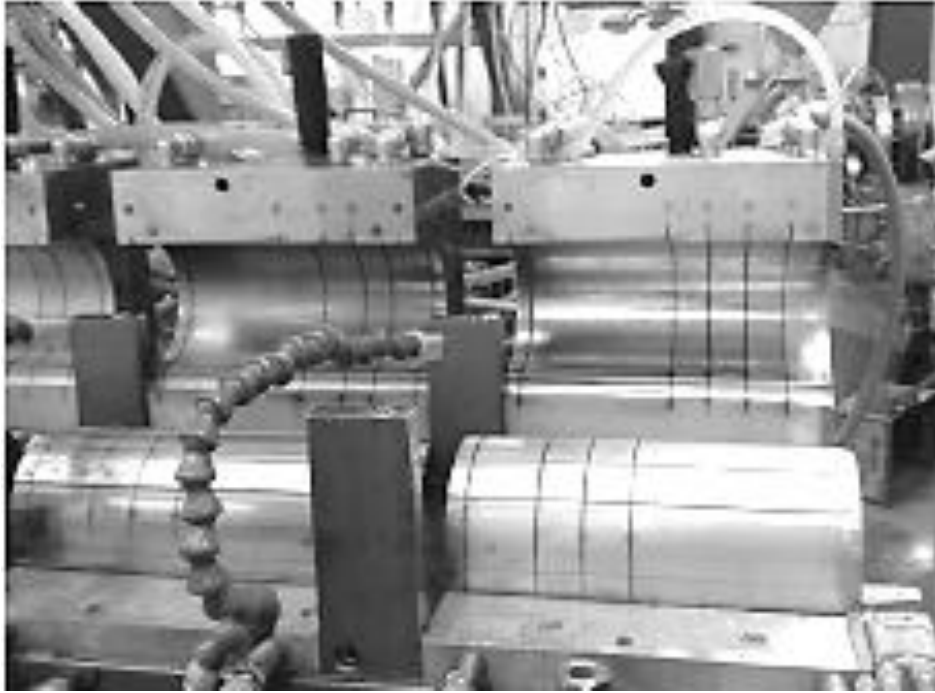


Рисунок 1.6. Загальний вигляд калібратора

Проблему калібрування також досліджено в роботах [8-13].

Термопласти мають дуже низьку теплопровідність, порядку  $10^{-1}$  Вт/(м·К), який може принести деякі переваги в конкретних випадках, але робить всі етапи обробки за участю теплообміну з полімером (нагрівання або плавлення і, особливо, охолодження) критичним. Справді, в безперервних процесах, таких як екструзія, стадії охолодження, як правило, відповідають за обмеження максимальної швидкості виробництва. Низька теплопровідність також відповідає за розвиток значних температурних градієнтів під час стадії охолодження і, отже, для розвитку напружень, які можуть бути заморожені в продукти (як правило, називають в якості залишкових термічних напружень), що буде негативно позначатися на механічних характеристиках продукту при використанні [8].

Калібратор для лінії екструзії містить формуючу порожнину, систему охолодження і вакуумної систему, як можна бачити на рисунку 1.7 [8].

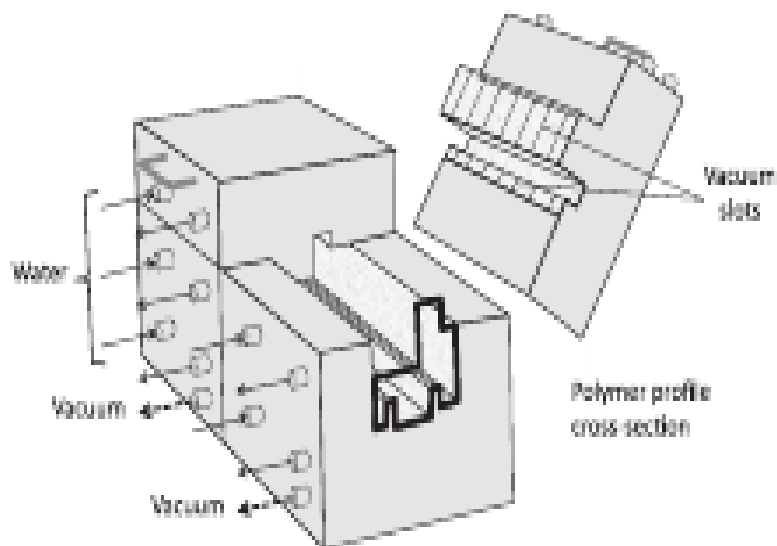


Рисунок 1.7 - Типовий термопластичний профіль калібратора [8]

Вибір найбільш гідного значення є досі невирішеною проблемою, так як вона залежить від багатьох факторів (поверхні калібруючої порожнини, рівень вакууму, різниці температур між поверхнями полімеру і порожнини калібру, довжини калібратора, охолодження текучого середовища, який використовується і т.п.) [9].

Якщо контакт між двома тілами не є достатнім, може статися стрибок температури на межі розділу (рисунок 1.8 (а)), його величина пропорційна контактної теплостійкості, що характеризує їх поверхню поділу [9].

Цей метод описує нову систему калібрування, розроблену для визначення коефіцієнта теплопередачі на межі розділу полімер-калібратор ( $h_{\text{interface}}$ ). Запропонована методика для визначення  $h_{\text{interface}}$  передбачає використання розробленої експериментальної системи та чисельного моделювання, де використовуються пробні значення  $h_{\text{interface}}$ , в ітераційному процесі, поки чисельні пророкування не відповідатимуть експериментальним вимірюванням [9].

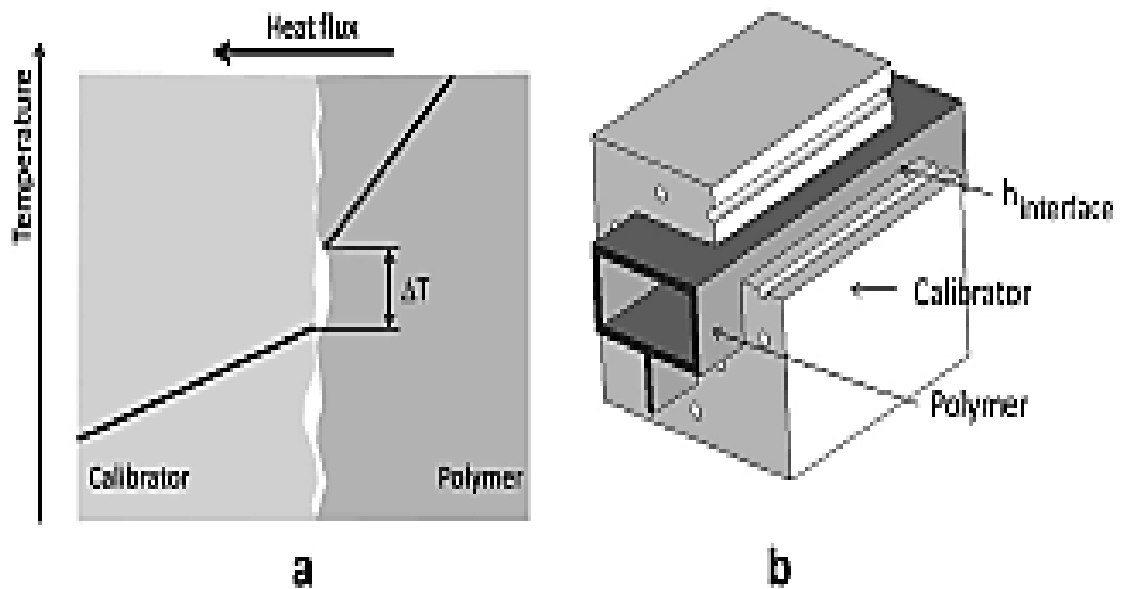


Рисунок 1.8 - Передача тепла між двома поверхнями, які не в ідеальному контакті: (а) схема; (Б) екструзійне калібрування [9]

Була прийнята модульна конструкція і розроблена система, яка дозволяє легко вивчати вплив декількох параметрів процесу, а саме: калібратора матеріалу, довжини калібрування, швидкості екструзії, якість межі полімер-калібратор, температури і швидкості потоку охолоджуючого засобу, типу холодоагенту, та інших [9].

В наступній роботі дослідили важливість калібратора при виготовленні кабельного покриття [9].

Екструзія полімерних покриттів, які включає в себе використання піноутворювачів, а також призводить до отримання нових, модифікованих фізичних і технологічних властивостей екструдованого продукту (екструдант). Перевірка вибраних фізичних, механічних і придатних для використання властивостей верхніх покриттів, виготовлених в процесі екструзійного покриття з пористої пластмаси, складає більшу частину великого науково-дослідного проекту [10].

При складанні пристрою калібрування, слід враховувати необхідність одночасного охолодження і фіксації форми виробу. Під час процесу склування, зовнішні контури і розміри ідентичні між етапами виходу з

головки екструдера і вході в блок калібрування. Інтенсивність охолодження під час калібрування визначає товщину компактного твердого верхнього покриття, яке утворюються в ході цього при склуванні [10].

На основі теорії вакуумного калібрування було встановлено, що найбільший вплив мають характеристики термопластичного матеріалу конструкція калібру та умови його охолодження [10].

В обох частинах калібратора існують контури розташовані паралельно кожному каналу підключений на одній стороні прямокутної призми з перпендикулярний канал подачі охолоджуючої рідини під тиском, і з'єднаний з іншого боку з перпендикулярним канал, який несе рідина, після отримання тепла [10].

Виявилось, що аналітично розроблений, конструктивно розроблений і побудований калібратор правильно працював під час процесу виготовлення стільникових покриттів кабелів [10].

### **1.3 Сучасне конструкторське рішення**

Пристрій і спосіб для калібрування екструдованих труб

Патент EP 2226178 A2 [11]. В основу корисної моделі поставлено рішення наступної технічної задачі: підвищення якості охолодження трубної заготовки за рахунок стабілізації та підтримання оптимального тиску в калібраторі.

Технічна задача вирішується зміною корпусу калібрування, що включає в себе елементи, вироблені із спеченого матеріалу, інжекційні отвори утворено в пустотах, включених в пористості зазначеного спеченого матеріалу та встановленням даного корпусу з можливістю обертання навколо своєї поздовжньої осі і засобом для повороту охолоджуючої текучого середовища навколо трубчастого елемента

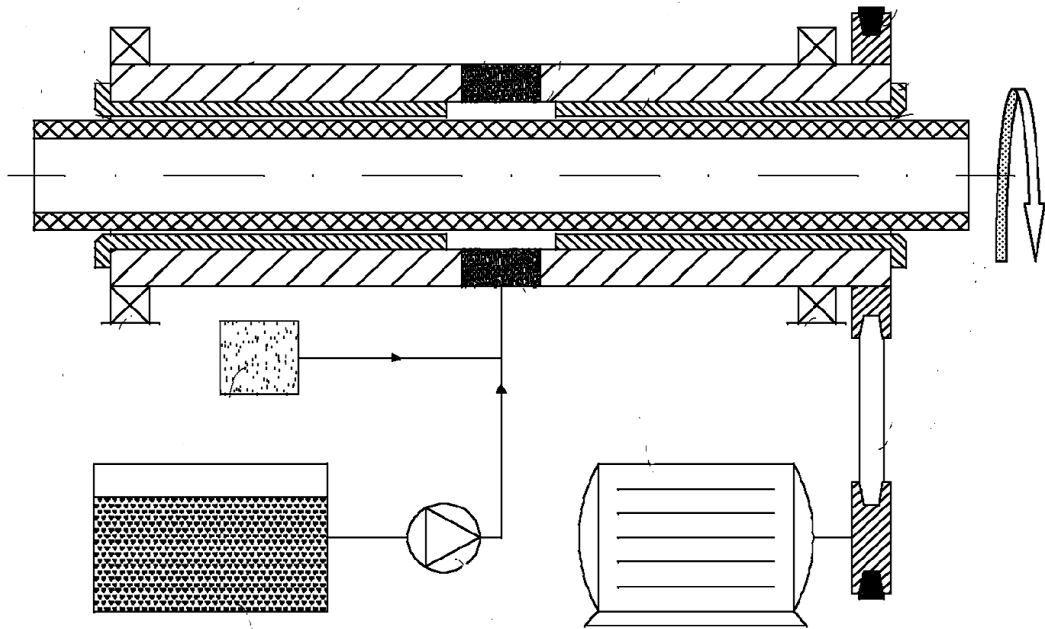


Рисунок 1.10 – Схема конструкції калібратора [11]

Недоліками є складність конструкції і висока енерговитрата.

Пристрій і спосіб для виготовлення пластикових труб

Патент CN 1272160 С [12]. Метою даного винаходу є створення пристрою і способу для виробництва труби під час виробничого циклу, не перериваючи перетворення може досягти повністю автоматизований контроль між безліччю пластикових труб розміром в процесі безперервної екструзії, в якому зовнішній діаметр і стінки товщина калібрування відповідно до вимог замовника або стандартами разом.

Технічна задача вирішується спеціальною конструкцією кінцевої головки екструдера, формуючого інструменту та калібратора, в одному складному пристрої, та спеціальних валиків, що змінюють зовнішній діаметр трубної заготовки не зупиняючи самого процесу екструзії.

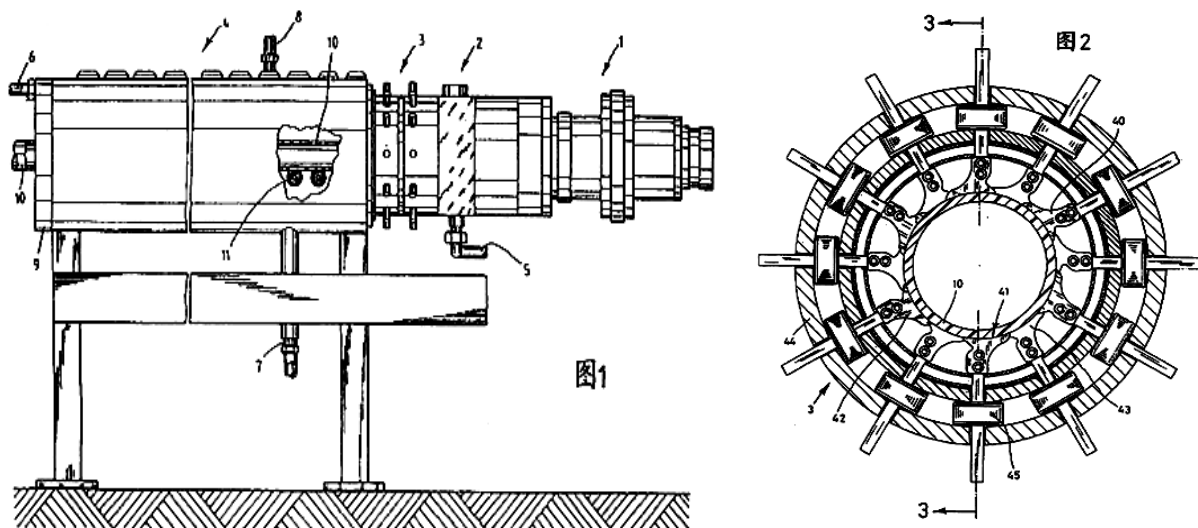


Рисунок 1.12 – Схема конструкції калібратора [12]

Недоліками є складність конструкції, можлива поява дефектів при формуванні, слабкий термічний контакт трубної заготовки з формуючим інструментом.

Екструзійний калібратор з модульними калібрувальними касетами  
Патент US 6200119 B1 [13].

В основу корисної моделі поставлено рішення наступної технічної задачі: підтримання якості продукції та добре відведення пари від води для охолодження заготовки.

Технічна задача вирішується спеціальною будовою калібратора, що складається з пластин з отворами для тиску и для охолоджувального агенту.

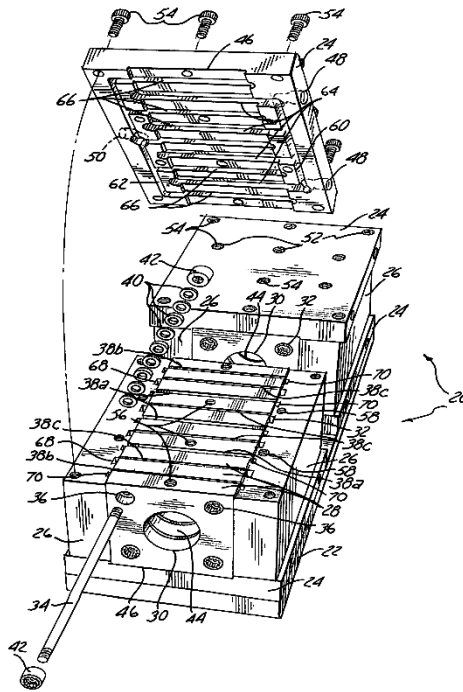


Рисунок 1.13 – Схема конструкції калібратора [13]

Недоліками є складність конструкції та ремонту, слабкий теплообмін та неможливість працювати з великими діаметрами.

Сучасні конструкторські рішення спрямовані на інтенсифікацію охолодження в калібраторі та покращення якості виробу.

#### **1.4 Області застосування калібруючого інструменту**

Виробництво полімерних виробів в хімічній та будівельній промисловості збільшується в геометричній прогресії. Така потреба створює завдання поліпшувати якість і швидкість екструзійного обладнання, що в свою чергу створює проблеми в покращенні калібруючого обладнання.

Головне призначення калібраторів складається в охолодженні і склування розплаву в результаті контакту з стінкою калібратора до товщини, достатньої для передачі тягового зусилля пристрою, що тягне, і збереження необхідних розмірів екструданта [14- 17]. При проходженні через калібратор середня температура профіля повинна знизитись нижче температури склування полімеру, щоб запобігти повторного нагріву і плавлення вже затверділого шару. Температура профілю при досягненні пилки або рухомого ножа повинна бути нижчою ніж температура плавлення. Тобто калібруючий

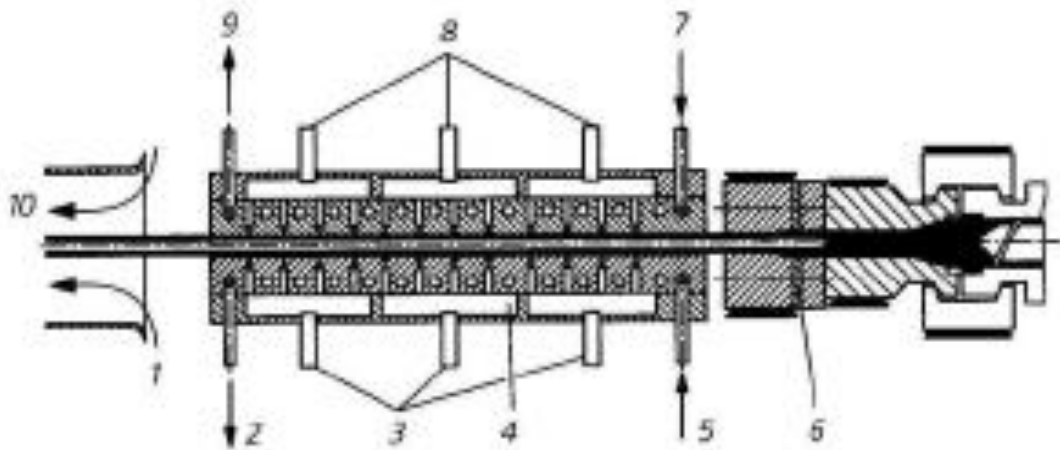
пристрій служить для фіксації розмірів екструданта і, відповідно, являється складовою частиною технологічного оснащення.

На сьогоднішній день жорсткі полімерні профілі при екструзії майже завжди калібруються. Калібрування майже завжди передбачає протяжку екструданта через один або декілька блоків, так званих калібраторів, що виготовлені з металу( за часту з латуні, сталі або алюмінію). Поверхня калібратора, що контактує з екструдантом, відповідає формі виробу [14].

В залежності від виробу з полімеру використовують різні види калібрування.

### **Зовнішнє калібрування за допомогою вакууму**

При зовнішньому калібруванні за допомогою вакууму необхідний для охолодження і калібрування контакт між еструдованим профілем і поверхнею калібратора відбувається за рахунок використання вакууму, що створюється вакуум-насосом. При такому калібруванні профіль прижимається до охолоджувальної поверхні калібратора по контуру ( закриті зовнішнє калібрування по контурі), при цьому вакуум створюється шляхом відкачування повітря через невеликі отвори або щілини в стінці калібратора, до яких прикріплюється профіль (рисунок 1.16) [14].



- 1 – жолоб для повітряного охолодження; 2 – вихід води; 3 – вакуум;
- 4 – довгомірний вакуумний калібратор; 5 – вхід води;
- 6 – головка профілю; 7 – вхід води; 8 – вакуум; 9 – вихід води;
- 10 – охолоджуюче повітря.



Рисунок 1.16 – Вакуумне зовнішнє калібрування( закритий вакуумний калібратор з подальшим повітряним охолодженням профілю) [14].

Зовнішнє калібрування по контурі застосовується при виробництві порожніх профілів і труб невеликих діаметрів. Для калібрування профілів зазвичай використовують декілька блоків калібрування, між якими розташовані ділянки охолодження[14].

Перевагою є якісний термічний контакт.

Недоліком конструкції є слабка інтенсифікація теплообміну.

### **Внутрішнє калібрування**

Як видно з назви, при внутрішньому калібруванні фіксується внутрішні розміри екструзійних порожніх профілів простого поперечного перерізу ( рисунок 1.18). Цей процес рідко використовується при екструзії труб, оскільки в якості основи для класифікації і стандартизації труб використовується зовнішній діаметр. Виключенням є труби, що призначені для трубних пневмо-конвеєрів, що мають жорсткі стандарти на допуски для внутрішнього діаметру[15].

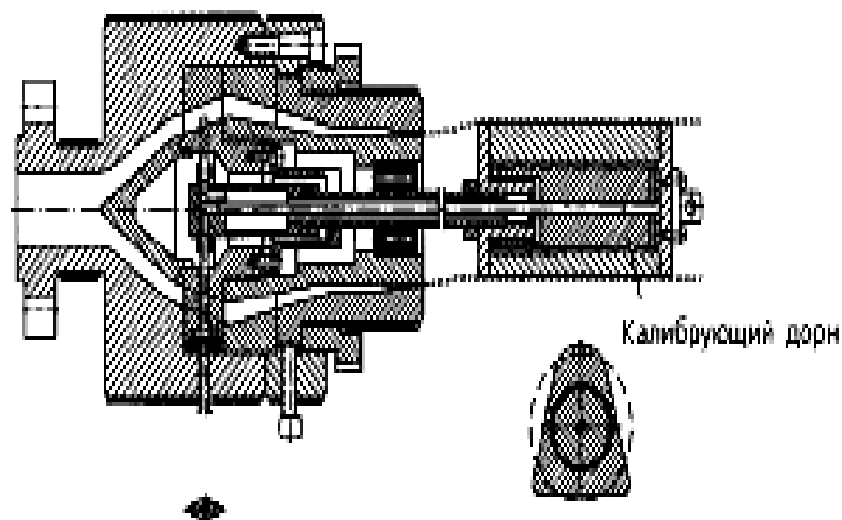


Рисунок 1.18 – Внутрішнє калібрування [15].

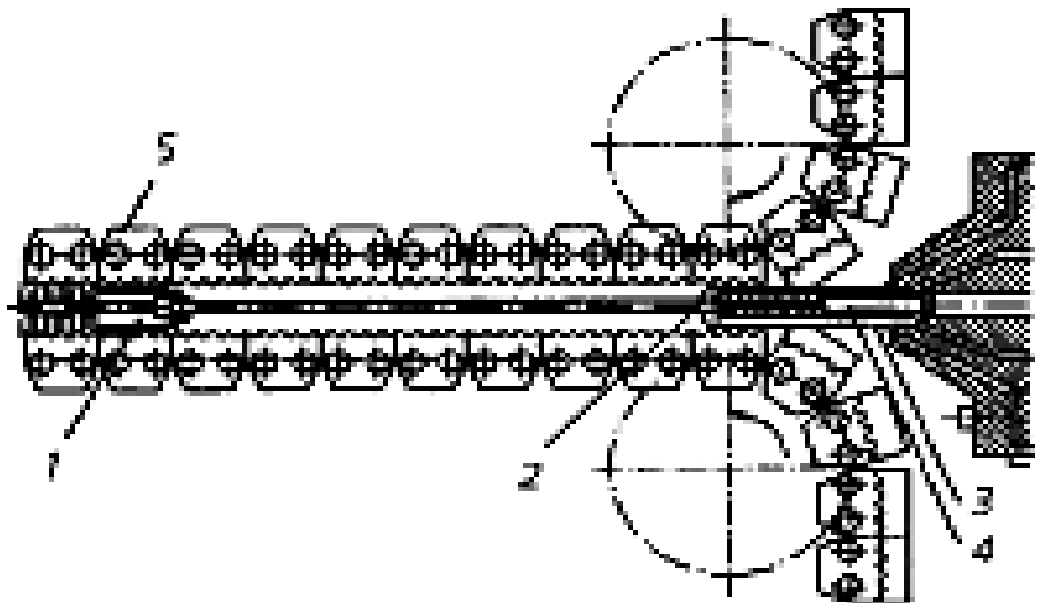
При цьому методі калібрування дорн екструзійної головки з'єднується з охолоджувальним калібруючим дорном. По ньому протягується і водночас

оохолоджується пластична трубна заготовка, що виходить із формуючого отвору екструзійної головки [15].

Недоліком є складність будови калібруючого дорну та необхідність постійного контролю процесу із-за наявності сил утяжки.

### **Спеціальні методи калібрування з рухомими калібраторами.**

Якщо калібратор неперервно рухається разом з екструдантом, то це дозволяє виготовляти профілі змінного( у напрямку екструзії) перерізу. Даний метод використовується при виготовленні гофрованих труб( рис. 1.19). Для цього використовуються гусеничні пристрої( гофратори) з спеціальними металевими півформами, я яких гладка пластична трубна заготовка під дією стиснутого повітря або вакууму перетворюється в гофровану трубу [16].



- 1 – плаваюча пробка; 2 – вихід повітря; 3 – дорн; 4 – мундштук;  
5 – цепок з гофрованою півформою

Рисунок 1.19 – Виробництво гофрованих труб [16].

Недоліком є енерговитрата і специфіка виробництва.

Найбільш сучасним методом калібрування є вакуумне калібрування по зовнішній поверхні виробу

## 1.5 Розрахунок калібруючого інструменту

Відома методики [18, 19] розрахунку пристрою калібруючого.

Метою розрахунку є визначення мінімальної необхідної довжини калібруючої гільзи.

Вхідні дані:

$d_e$  - товщина затверділого шару, до моменту часу  $t_1$ , м;

$T_M$  – температура розплаву в початковий момент часу ( $t_0=0$ ) °С;

$T_F$  – температура охолоджувача, °С;

$T_E$  – температура кристалізації, °С;

$\rho$  – густина матеріалу заготовки, кг/м<sup>3</sup>;

$C_p$  – питома теплоємність, Дж/(кг· °С);

$\lambda$  – теплопровідність, Вт/(м· °С);

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$q''$  - тепловий потік через поверхню, Вт.

Одновимірною теплопередачею в плоскому тілі описується рівнянням нестационарної теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1.1)$$

Опір теплопередачі через охолоджувальну поверхню вказаного тіла визначається рівнянням:

$$q'' = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=D} = \alpha (T_0 - T_F) \quad (1.2)$$

При цьому приймаються такі припущення:

- температура не залежить від теплофізичних властивостей матеріалу ( $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $C_p$ );
- геометрія профілю і його розміри постійні (усадка не враховується);
- граничні умови постійні ( $\alpha$ ,  $T_F$ );
- рівномірний розподіл початкової температури (в момент часу  $t=0$  температура в будь-якій точці рівна  $T_M$ ).

Аналитичне рішення рівняння (1.1) зображено в праці [20]:

$$\frac{T(x,t) - T_F}{T_M - T_F} = \frac{2 \sin \delta}{\delta + \sin \delta \cos \delta} \cdot e^{-\delta^2 \frac{\alpha t}{D^2}} \quad (1.3)$$

При цьому  $\delta$  можна визначити методом ітерацій із наступного виразу:

$$\delta = \frac{\alpha D}{\lambda} \operatorname{ctg}(\delta); \quad 0 < \delta < \frac{\pi}{2} \quad (1.4)$$

Безрозмірний комплекс в рівнянні(1.4) представляє собою критерій Біо, який може інтерпретуватися як відношення між внутрішнім діаметром ( $D / \lambda$ ) і зовнішнім( $1 / \alpha$ ) опором тепловіддачі.

$$\frac{\alpha D}{\lambda} = Bi \quad (1.5)$$

Безрозмірний комплекс в рівнянні (1.3) представляє собою критерій Фур'є, яке може інтерпретуватись як безрозмірний час охолодження.

$$\frac{\alpha t}{D^2} = \frac{\lambda \cdot t}{\rho \cdot C_p \cdot D^2} = F_0 \quad (1.6)$$

Безрозмірний комплекс в рівнянні (1.3) називається степінь охолодження.

$$\frac{T(x,t) - T_F}{T_M - T_F} = \Theta(x,t) \quad (1.7)$$

Аналізуючи зміну степені охолодження в часі для будь-якої точки плоского тіла, можна замітити, що в початковий момент( $t_0=0$ )  $T=T_M$  і, відповідно,  $\Theta = 1$ ; для тривалого часу охолодження ( $T=T_F$ )  $\Theta \rightarrow 0$ .

Задаючи бажану степінь охолодження затверділого шару

$$\Theta_E = \frac{T(x,t) - T_F}{T_M - T_F} \quad (1.8)$$

і ймовірну товщину затверділого шару рівнянням

$$d_E = D - x_E \quad (1.9)$$

можна використати рівняння (1.5) і (1.7) для рівняння (1.3) відносно безрозмірного часу охолодження:

$$Fo_E = -\ln \left[ \Theta_E \cdot \frac{\delta + \sin(\delta) \cos(\delta)}{2 \sin(\delta) \cos(\delta \frac{D-d_E}{D})} \right] \cdot \frac{1}{\delta^2} \quad (1.10a)$$

При цьому

$$\delta = Bi \cdot \text{ctg}(\delta), \quad 0 < \delta < \frac{\pi}{2} \quad (1.10b)$$

В роботах [21, 22] використовуються різні методи спрощення рівняння (1.10), а також дається їх порівняльний аналіз. Ці методи основані на експериментальних даних.

Процедура описана в роботі [22], дає найкращі результати для розрахунку системи охолодження екструдованих труб. Безрозмірний час охолодження  $Fo_E$  можна отримати із попередньо визначеної товщини затверділого шару і степені охолодження.

Далі отримані значення можна використати для визначення довжини калібруючої зони при відомій швидкості відводу профілю  $v_{ab}$  і коефіцієнта температуропровідності матеріалу екструданта  $\alpha$ :

$$L_E = Fo_E \frac{D^2}{\alpha} v_{ab} \quad (1.11)$$

Даний розрахунок ведеться без урахування зміни агрегатного стану трубної заготовки.

## 1.6 Теплофізичні та механічні властивості поліпропілену

Поліпропілен –  $[\text{CH}_2\text{—CH}(\text{CH}_3)\text{—}]_n$  одержують шляхом каталітичної полімеризації мономера в розчині або масі (блоці) у присутності комплексного каталізатора Циглера–Натта. По своїй структурі поліпропілен відноситься до вінілових полімерів і схожий на поліетилен, з тією різницею,

що до кожного другого атома в його основному ланцюзі приєднана метильна група[23].

Поліпропілен являє собою термопластичний лінійний полімер, що має аморфну й стереорегулярну структуру. Стереорегулярний поліпропілен – твердий кристалічний полімер з високими фізико-хімічними, механічними й діелектричними властивостями [26, 27].

Полімер із пропілену має високу термостійкість. Термічна деструкція полімеру при нагріванні під час відсутності повітря стає помітною при 300°C, що значно вище області температур експлуатації виробів. Для поліпшення окремих показників матеріалу при збереженні основного комплексу властивостей полімеру проводять модифікування поліпропілену шляхом спрямованої зміни його структури або сполуки. Модифікацію здійснюють такими способами: сополімеризацією пропілену з іншими мономерами, введенням у макромолекули полімеру функціональних груп, впливом на надмолекулярну структуру полімеру, а також створенням композицій за допомогою різних добавок органічного й неорганічного походження.

Фізико-механічні властивості поліпропілену [26]:

Густина, кг/м <sup>3</sup>	900
Границя міцності:, МПа:	
при розтягуванні	30-35
при стисненні	60
при згинанні	70-80
Морозостійкість, °С	від -5 до -15
Зольність, %,	не більше 0,1
Температура плавлення, °С	не нижче 170
Вологість, %	не більше 0,1

На рисунках 1.20-1.23 зображено залежності теплофізичних властивостей поліпропілену густини 865кг/м<sup>3</sup> від температури при тиску 0,1 МН/м<sup>2</sup> [27].

Для підвищення ударної в'язкості будівельних виробів слід застосовувати поліпропілен з потрібним індексом розплаву і поєднувати його з синтетичними каучуку мі, поліізобутиленом і бутил-каучуком[28].

З поліпропілену виготовляють такі види виробів для будівельної техніки: труби, плівки, листи, вентиляційні решітки та санітарно-технічне обладнання. Для виготовлення труб методом екструзії найбільш придатні поліпропілени з високим і середнім ступенем кристалічності, індекс розплаву яких лежить в межах від 0,5 до 3,0. Поліпропіленові труби випускають діаметром 25-150 мм Вони більш міцні, ніж труби з поліетилену, значно більш теплостійкі, але по морозостійкості поступаються поліетиленовим трубах [29].

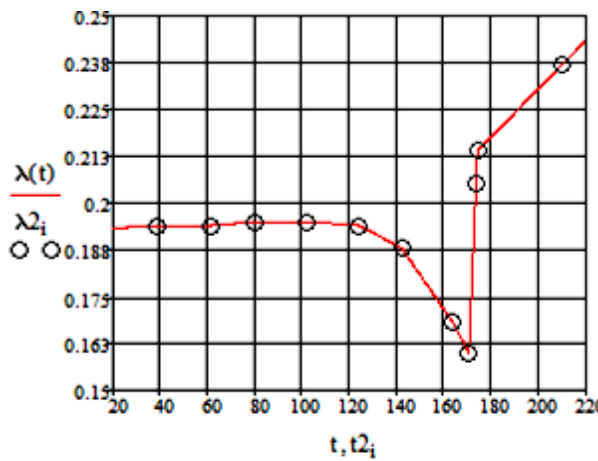


Рисунок 1.20 – Залежність теплопровідності поліпропілену від температури

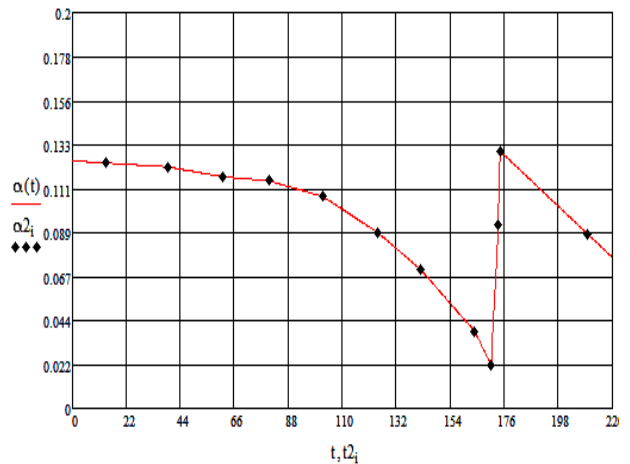


Рисунок 1.21 – Залежність тепловіддачі поліпропілену від температури

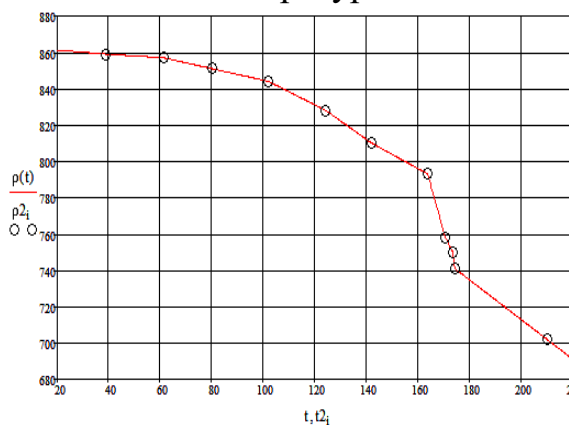


Рисунок 1.22 – Залежність густини поліпропілену від температури

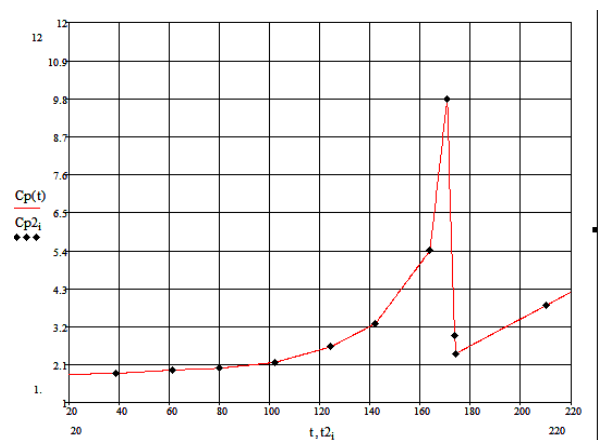


Рисунок 1.23 – Залежність теплоємності поліпропілену від температури

## 1.7 Критерії якості труб з поліпропілену

Основною проблемою при виготовленні труб з полімеру є овальність. Саме за нею регламентується придатна труба чи ні. За ДСТУ труби малого діаметра являються нормальними при овальності  $\leq 3\%$ .

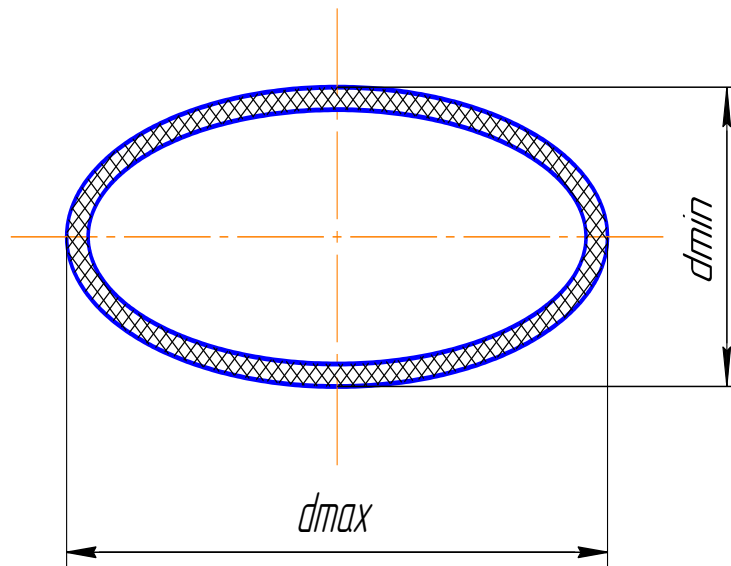
Овальність визначається експериментально, після чого розраховується за формулою:

$$\text{Овальність} = \frac{d_{\max} - d_{cp}}{d_{cp}} \times 100\%$$

Де  $d_{cp}$  - середній діаметр труби, який визначається за формулою:

$$d_{cp} = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2}$$

Де  $d_{\max}$  - максимальний діаметр труби,  $d_{\min}$  - мінімальний діаметр. Дані діаметри зображені на рисунку 1.20.



$d_{\min}$  - мінімальний зовнішній діаметр трубної заготовки;

$d_{\max}$  - максимальний зовнішній діаметр трубної заготовки.

Рисунок 1.24 – Визначення овальності за ДСТУ [2].

Також окрім овальності трубні зразки перевіряються за рядом інших критеріїв. Перевіряють також зміну розмірів труб після прогрівання в повітряному середовищі.



Зміна розмірів зразків після прогрівання  $\Delta$  в процентах обчислюють за формулою:

$$\Delta = \frac{L + L_0}{L_0} 100$$

де  $L_0$  і  $L$  середнє арифметичне значення довжин між позначками відповідно до і після прогрівання за результатами вимірювання трьох зразків, мм

Середній коефіцієнт лінійного теплового розширення в установленому інтервалі температур, виражений в  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ , визначають за формулою:

$$\alpha = \frac{(l/l_0)(l - l_0)}{T_2 - T_1}$$

де  $T_1$  і  $T_2$ — нижня і верхня межі інтервалу температур,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $l_0$  і  $l$ — відповідно довжина зразка при нижній і верхній межі температурного інтервалу, мм.

Також визначають межу текучості при розтягу і відносне подовження труб при розриві. Значення межі текучості при розтягу  $\sigma_{pt}$ , виражене в Мпа, обчислюють за формулою:

$$\sigma_{pt} = \frac{F_{pt}}{A_0}$$

де  $F_{pt}$  — розтягувальне навантаження при досягненні межі текучості, Н;

$A_0$ — початковий поперечний переріз зразка,  $\text{мм}^2$ .

Значення відносного подовження при розриві  $\varepsilon_p$  у відсотках обчислюють за формулою, %:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta L_{op}}{L_0} 100\%$$

де  $\Delta L_{op}$  — зміна розрахованої довжини зразка в момент розриву, мм;

$L_0$ — початкова довжина зразка, мм.

Також визначення стійкості при постійному внутрішньому тиску проводять не менше ніж на трьох зразках. Розрахунок випробувального тиску проводять за формулою:

$$P_{\text{вип}} = \frac{e_{y \text{ min}}}{d_{em \text{ max}} - e_{y \text{ min}}} 2\sigma_0$$

де  $\sigma_0$  – початкове напруження в стінці труб, МПа;  $d_{em \text{ max}}$  – максимальний середній зовнішній діаметр зразків, мм;  $e_{y \text{ min}}$  – мінімальна товщина стінки трубного зразка, мм.

Результати випробувань вважаються позитивними, якщо:

- всі зразки, що випробовуються, не зруйнувалися до закінчення контрольного часу випробування;
- в ході випробувань зруйнувався один зразок, але при повторних випробуваннях жоден зі зразків, що випробовувались, не зруйнувався.

## 1.8 Висновки

На даний час відсутня інженерна методика розрахунку швидкості калібрування труб з поліпропілену від режимів охолодження калібратору.

Проведено літературний аналіз досліджень процесу формування труб з поліпропілену, конструкцій калібруючих інструментів, дослідження властивостей поліпропілену та методів визначення якості поліпропіленової труби.

В ході проведення літературного огляду було обрано необхідну конструкцію калібруючого інструменту для виробництва труб з поліпропілену – вакуумний калібратор.

Процес склування поліпропілену відбувається в діапазоні температур 156-170°C та супроводжується різкими змінами теплофізичних та механічних властивостей, що вимагає врахування цих змін у математичній моделі.

## 1.9 Мета та задачі дослідження

Процес формування труб з поліпропілену у калібраторі супроводжується теплообміном між полімером і стінкою калібратору, зміною агрегатного стану та усадкою. Для забезпечення стабільного процесу механічні властивості полімеру в зоні дії вакууму мають досягти мінімально-необхідних параметрів (тверда плівка), а значення вакууму забезпечити

термічний контакт та стабільність форми , відповідно до утяжки при склуванні поліпропілену.

**Метою даної роботи є** встановлення залежності процесу теплообміну при калібруванні труб з поліпропілену від режимів охолодження та конструктивних параметрів калібратору для підвищення продуктивності екструзійного обладнання.

Для досягнення цієї мети сформульовано **наступні задачі:**

- визначити параметри якості та конструкції виробів, на які впливає процес формування;
- сформулювати фізичну модель процесу теплообміну труби з поліпропілену;
- сформулювати математичну модель процесу теплообміну труби з поліпропілену, зробити необхідні припущення;
- розробити алгоритм та програму розрахунку процесу теплообміну труби з поліпропілену;
- розробити методику досліджень, провести експерименти в достатній кількості з необхідною точністю;
- перевірити адекватність математичної моделі;
- отримати залежності тиску калібрування від параметрів охолодження, швидкості екструзії;
- розробити рекомендації для проектування нової конструкції калібруючого пристрою.

## 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ

### 2.1 Фізична модель процесу

Фізична модель описує процес калібрування труби.

В основу фізичної моделі покладені граничні умови першого і четвертого роду, початкова умова – температура розплаву. Розв'язання моделі, рисунок 13, дозволяє отримати товщину плівки, затверділого розплаву, як функцію довжини калібру.

Кристалізація полімеру викликає усадку  $\gamma$  і плівка зменшується в розмірі. Для компенсації деформації існує тиск,  $P_\gamma(x)$ , який запобігає деформації плівки, рисунок 14.

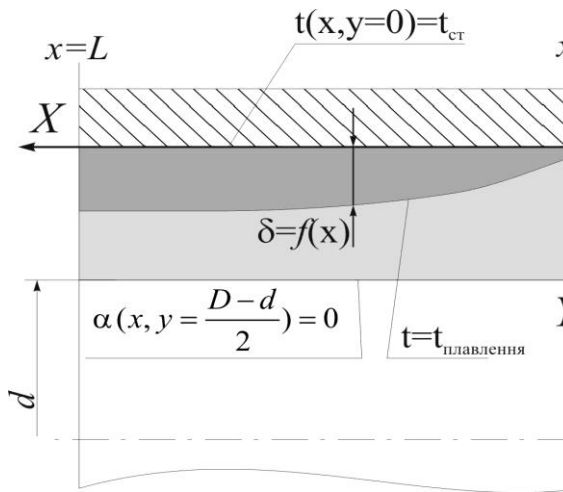


Рисунок 13 – фізична модель процесу охолодження трубної заготовки

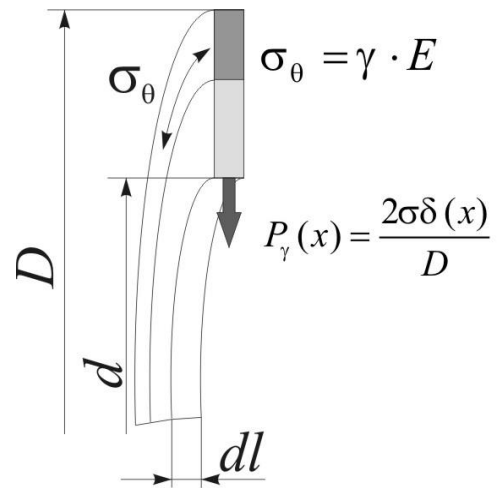


Рисунок 14 – фізична модель процесу усадки трубної заготовки при кристалізації

На трубну заготовку діє: атмосферний тиск з середини труби, зовнішній тиск зі сторони калібруатора, тиск викликаний усадкою полімеру, що кристалізується, рисунок 15. Результуюча тисків притискає трубну заготовку до стінки калібру, що викликає силу тертя, рисунок 16. Якщо перевищення тиску зі сторони калібру (малий вакуум), викличе відрив трубної заготовки від стінки калібру, розплавлення плівки та обрив.

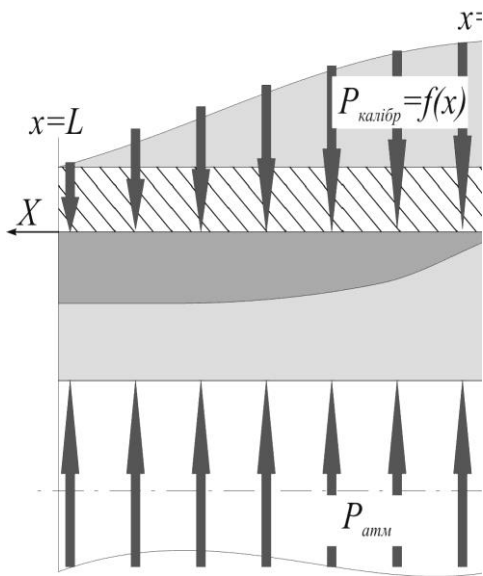


Рисунок 15 – схема дії тиску на трубну заготовку

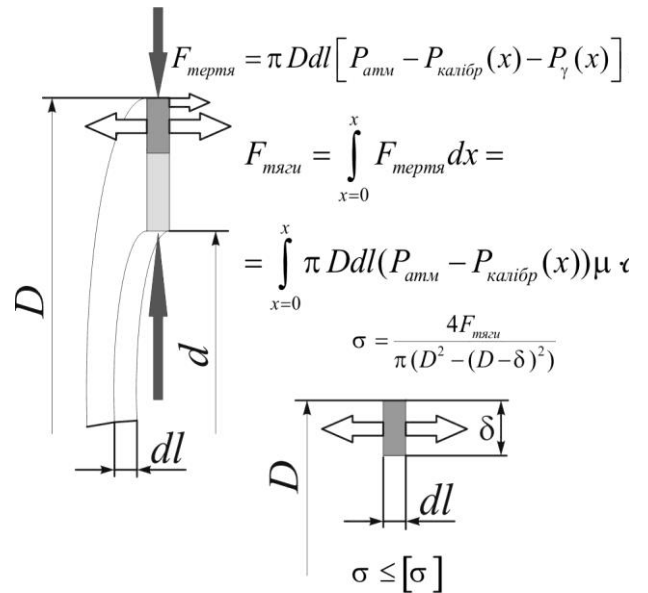


Рисунок 16– схема дії сил тертя на трубну заготовку та напруження, які виникають у матеріалі від сил тертя та діють у закристалізованій частині трубної заготовки

Зменшення тиску зі сторони калібру (великий вакуум) збільшить силу тертя і закристалізованої плівка порветься, якщо вона не достатньо груба.

## 2.2. Математична модель процесу

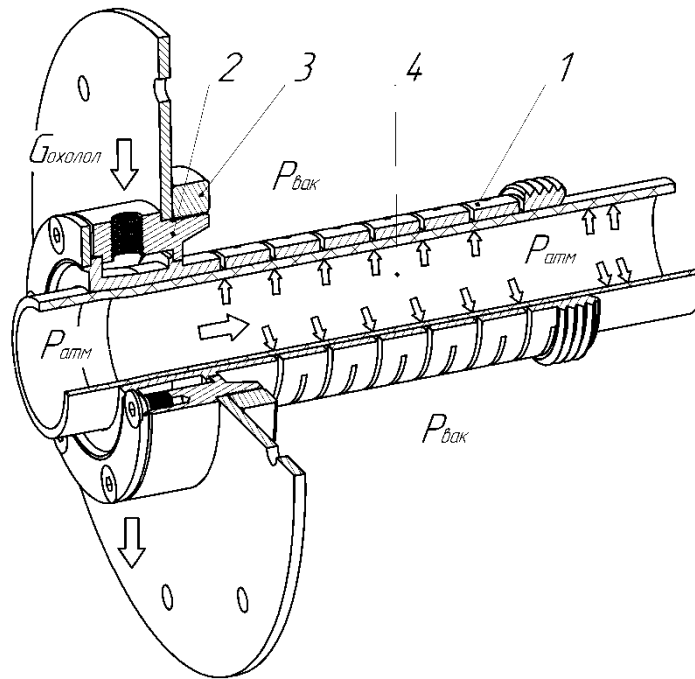
### 2.2.1 Напруженість заготовки під час процесу калібрування труби

Метою роботи є визначення максимально критичного значення вакууму при калібруванні труб з поліетилену, за якого процес є стабільним.

Конструкцію сучасного калібруючого пристрою для труб з поліетилену наведено на рис. 17.

Найбільш поширеним поліетиленом у виробництві труб є поліетилен низького тиску (поліетилен високої густини) [11].

Критичною стадією процесу є процес утворення плівки поліетилену, що кристалізувався, та витримує механічне розтягуюче напруження, яке викликане тертям поверхні труби по внутрішній поверхні втулки, рис. 18.



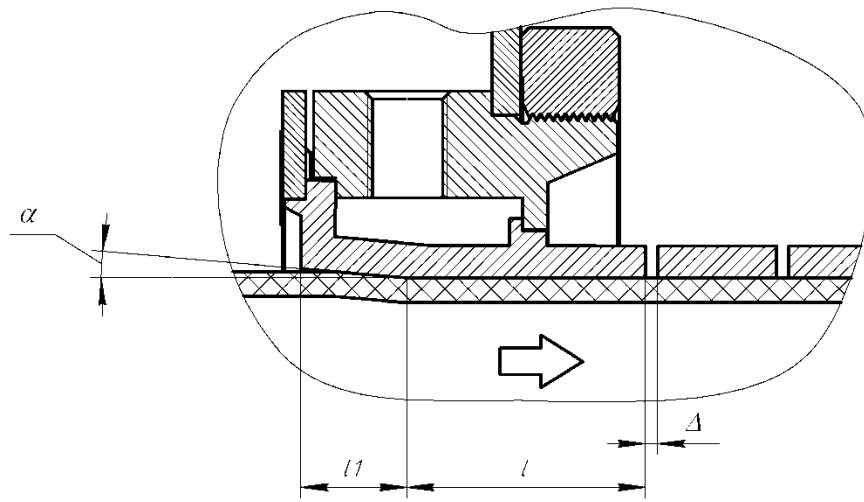
1 – калібруюча гільза з прорізами для вакууму; 2 – корпус, що містить сорочку для інтенсивного охолодження західної частини гільзи; 3 – гайка для герметизації вакуумного простору; 4 – труба з поліетилену, що калібрується та охолоджується;  $G_{охол}$  – витрата охолоджуючої рідини, кг/с

Рисунок 17 – Конструкція вакуумного калібруючого пристрою

У розплаві поліетилену відбувається перенос тепла до стінки втулки, рис. 19, за рахунок чого тонкий шар біля стінки охолоджується, кристалізується, зміцнюється. З закону збереження енергії [12, 13]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{нол}}{\rho C_p} \nabla^2 t \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial t}{\partial x} U_x = \frac{\lambda_{нол}}{\rho C_p} \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}, \quad (1)$$

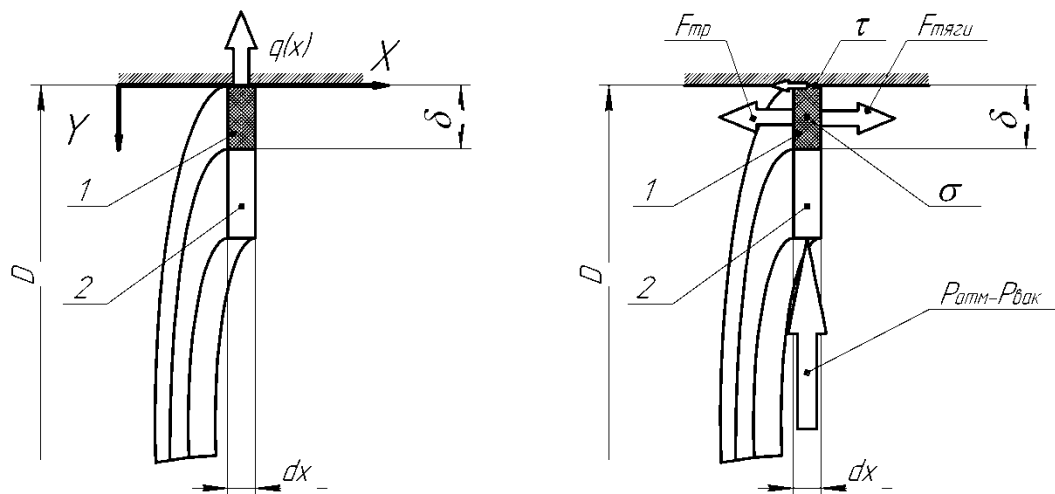
де  $U_x$  – швидкість руху труби у калібруючій втулці, м/с;  $\lambda_{нол} = 0,39$  – теплопровідність поліетилену, Вт/(м·К);  $\rho = 951$  – густина поліетилену, що кристалізувався, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p = 2500$  – питома теплоємність поліетилену Дж/(кг·К).



$\alpha$  – кут, необхідний для забезпечення надійного термічного контакту між трубою та стінкою втулки, та згладжування пульсацій екструдера;

$l_1$  – довжина конічної частини втулки;  $l$  – відстань до першої вакуумної прорізи;  $\Delta$  – ширина прорізи

Рисунок 18 – Визначальні розміри західної частини калібруючої втулки



1 – поліетилен у кристалічній фазі; 2 – поліетилен у розплаві

Рисунок –19 Фізична модель переносу тепла у трубі, що калібрується, та напружень у трубі від сил тертя

Процес кристалізації поліетилену відбувається у діапазоні температур склування, від  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При цьому ряд авторів, що досліджували процес [14] пропонують наступну залежність питомої теплоємності від температури, які враховує фізичний процес утворення кристалічної фази:

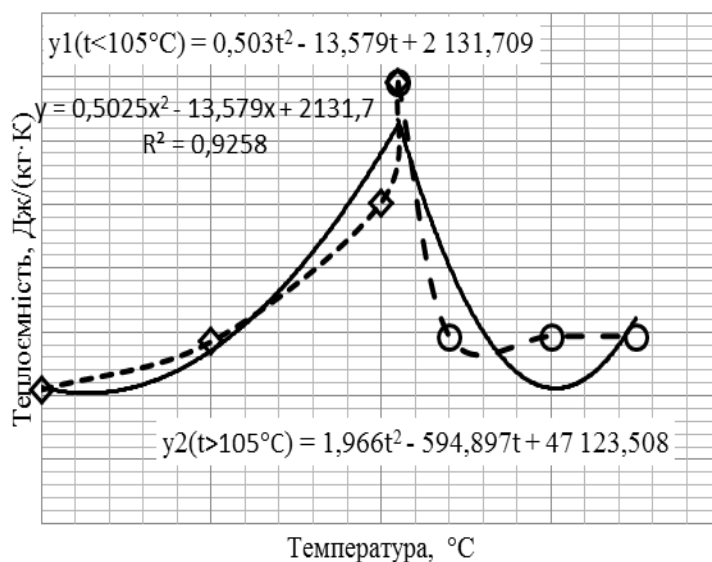
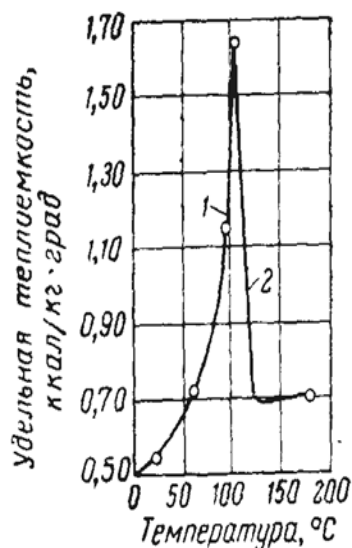


Рисунок 20 – Залежність теплоємності поліетилену від температури :  
зліва [14], справа – оброблені дані

Рівняння (1) з врахуванням залежності теплоємності від температури:

$$\frac{\partial t}{\partial x} U_x = \frac{\lambda_{\text{пол}}}{\rho C_p(t)} \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}$$

Граничні та початкові умови, враховуючи незначну порівняно з матеріалом калібруючої втулки теплопровідність поліетилену:

$$t(y=0) = t_{\text{стінка втулки}} \quad t(x=0) = t_{\text{початкова}}$$

Розв'язання (1) дозволяє отримати товщину плавки:

$$\delta(x) = f_1(x)$$

Напруження розриву в матеріалі труби, що калібрується:

$$\sigma(x) = \frac{4F_{\text{тертя}}(x)}{\pi(D^2 - (D - 2\delta(x))^2)} = \frac{4 \int_{x=0}^{x=x} \pi D \varphi (P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}}) dx}{\pi(D^2 - (D - 2\delta(x))^2)} = \frac{4\pi D \varphi (P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}}) x}{\pi(D^2 - (D - 2\delta(x))^2)} \leq [\sigma]$$

де  $F_{\text{тертя}}(x) = \int_{x=0}^{x=x} \pi D \varphi (P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}}) dx$  – сила тертя, що діє на трубу при її

руху відносно втулки, Н;  $P_{\text{атм}}$  – атмосферний тиск, що діє зсередини труби,



Па;  $P_{\text{вак}}$  – тиск, що діє на трубу зовні (зі сторони втулки) у вакуумній ванні, Па;  $[\sigma]$  – допустиме напруження на розрив для поліетилену, що кристалізувався, Па;  $\varphi = 0,15$  – коефіцієнт тертя поліетилену по матеріалу втулки [15].

Висновок: існує мінімально критичний тиск у вакуумній ванні, за якого відбувається обрив труби; при збільшенні швидкості калібрування труби необхідно або зменшувати значення вакууму, або інтенсифікувати охолодження труби, або збільшувати довжину зони охолодження труби без її притискання вакуумом до стінки втулки калібратора (відстань до першої прорізи). Важливим є розв'язання сформульованої математичної моделі для забезпечення практичних розрахунків калібруючого пристрою та чисельного моделювання процесу.

### **2.2.2 Визначення мінімального необхідного вакууму**

Метою роботи є створення математичної моделі процесу калібрування труб з поліпропілену для визначення мінімально необхідного значення вакууму у калібраторі для забезпечення повного контакту труби, що калібрується з поверхнею калібратора.

Державний стандарт України [16] регламентує граничні показники овальності труб з поліпропілену, табл. 2.

Для забезпечення такої вимоги необхідне значення вакууму у ванні з калібратором, рис. 21, складає 0,02-0,04 МПа, однак при потраплянні у калібратор розплав полімеру не має механічної міцності, через що значні сили тертя труби о поверхню калібратора спричиняють її розрив. Таким чином, робота актуальна і результат може бути використано для оптимізації конструкції калібратора з метою підвищення продуктивності лінії.

Схему калібрування труб на промислових лініях наведено на рис. 21.

Пропонується фізична модель, що описує процес калібрування труби, рис. 22.

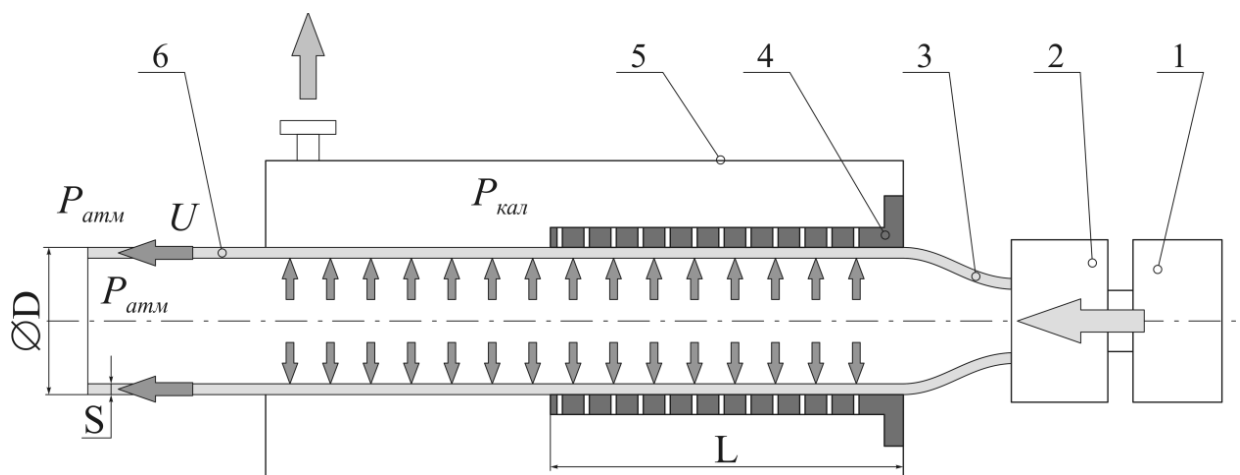
Таблиця 2. Граничні відхилення зовнішнього діаметру і граничні показники овальності

Номінальний зовнішній діаметр, D, мм	Номінальна товщина стінки, S, мм	Граничні відхилення зовнішнього діаметра, мм	Граничні показники овальності, мм	
			Труб у відрізках	Труб у бухтах
20	2,8	+0,3	1,2	1,2
25	3,5	+0,3	1,2	1,5
32	4,4	+0,3	1,3	2,0

В основу фізичної моделі покладені граничні умови першого і четвертого роду, початкова умова – температура розплаву:

$$\begin{aligned}
 -\lambda_{\text{пол}} \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \alpha (t(x, y=0) - t_{\text{пов}}) , \\
 \lambda_{\text{пол}} \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=S} &= -\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=S} , \\
 t(x=0, y=0 \dots S) &= t_0 ,
 \end{aligned} \tag{2}$$

де  $\lambda_{\text{пол}} = 0,2$  - теплопровідність розплаву, Вт/(м·К);  $\lambda_{\text{ст}} = 58$  - теплопровідність матеріалу стінки калібратора (Бронза БрАЖ9 [17]), Вт/(м·К);  $\delta_{\text{ст}}$  - товщина стінки труби, що калібрується, м;  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої стінки труби до повітря всередині труби, Вт/(м<sup>2</sup>К),  $t_{\text{пов}}$  – температура повітря всередині труби, °С.



1 – екструдер; 2 – формуюча головка; 3 – заготовка розплаву кільцевого перетину; 4 – калібруючий пристрій; 5 – вакуумна ванна; 6 – калібрована труба

Рисунок 21 – схема калібрування труб з поліпропілену

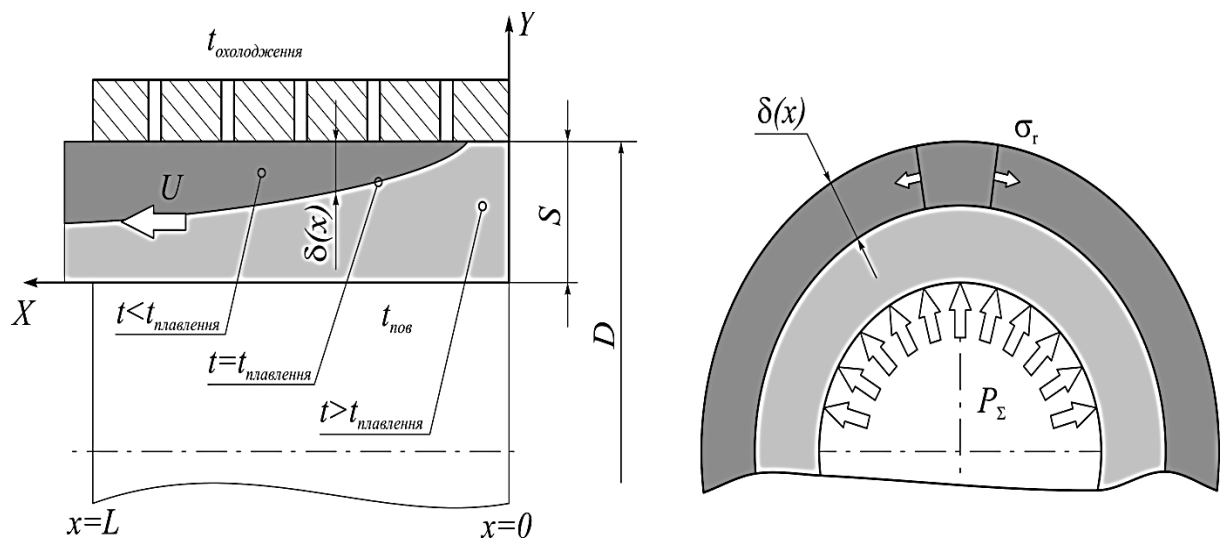


Рисунок 22 – Фізична модель переносу тепла від труби, що охолоджується до стінки калібру, та сил, що діють на матеріал стінки, який кристалізувався від результуючого внутрішнього тиску

Прийmemo наступні припущення.

1. Температура повітря всередині труби дорівнює температурі внутрішньої стінки труби, і теплообмін внутрішньої стінки труби відсутній:

$$\lambda_{\text{пол}} \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=0} = 0.$$

2. Теплопровідність матеріалу калібру (бронза) значно більше за теплопровідність розплаву поліпропілену [15], тому температура зовнішньої стінки труби дорівнює температурі стінки калібру:

$$\frac{\lambda_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{пол}}} = \frac{58}{0,2} = 290 \Rightarrow \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right)_{\text{полімер}} ? \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right)_{\text{калібр}} \Rightarrow t(x, y = S) = T_{\text{охолодження}}.$$

3. Теплота кристалізації поліпропілену [18] пов'язана з перебудовою надмолекулярної структури і відбувається протягом переходу полімеру з кристалічного стану у аморфний. Для поліпропілену цей перехід відбувається у діапазоні температур від  $t_{\text{п}}=160$  °C до  $t_{\text{к}}=165$  °C, а теплота, яка при цьому поглинається [19],  $Q_{\text{плавлення}} = 184000$  Дж/кг.

Обравши модель квазістаціонарного процесу (система координат нерухома), рівняння збереження енергії [17]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{пол}}}{\rho C_p} \nabla^2 t - \frac{q_v(t)}{\rho C_p},$$

$$\text{де } q_v\left(t, \frac{dt}{d\tau}\right) = \begin{cases} q_v = \frac{Q_{\text{плавлення}} \rho}{t_k - t_n} \frac{dt}{d\tau} & \text{при } t_n \leq t \leq t_k \\ q_v = 0 & \text{при } t < t_n \\ q_v = 0 & \text{при } t > t_k \end{cases}, \text{ Вт/м}^3 \text{ - поглинання}$$

тепла при переході поліпропілену у кристалічний стан.

Взявши до уваги  $\delta = D$  обираємо ортогональну систему координат, та знехтуємо переносом тепла за рахунок теплопровідності по координатах  $X$  та  $Z$ :

$$\frac{\partial^2 t}{dy^2} - \frac{\partial^2 t}{dx^2} - \frac{\partial^2 t}{dz^2} = 0$$

Остаточно:

$$\frac{\partial t}{dx} U \rho C_p = \lambda_{\text{пол}} \frac{\partial^2 t}{dy^2} - Q_{\text{плавлення}} \rho, \quad (3)$$

де  $U$  – швидкість руху труби, м/с;  $C_p = 1930$  Дж/(кг·К), теплоємність поліпропілену [20];  $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup> – густина поліпропілену після кристалізації;  $\lambda_{\text{пол}} = 0,2$  Вт/(м·К) - теплопровідність поліпропілену.

Розв'язання (3) у граничних та початкових умовах (2), при відомій швидкості труби дозволяє отримати температурне поле у стінці, та визначити товщину плівки затверділого розплаву  $t(x, y) \leq t_{\text{плавлення}} = t_k \Rightarrow \delta = f(x)$ , та температурне поле у плівці  $t(x, y = (S - \delta) \dots S) = f_1(x, y)$  як функцію довжини калібру.

Кристалізація полімеру викликає об'ємну усадку по діаметру:

$$\gamma_V = \left[ \frac{V_{\text{аморфн}} - V_{\text{кристал}}}{V_{\text{аморфн}}} - 1 \right] 100\% = \left[ \frac{\frac{1}{\rho_{\text{аморфн}}} - \frac{1}{\rho_{\text{кристал}}}}{\frac{1}{\rho_{\text{аморфн}}}} - 1 \right] 100\% = 5,39\% ,$$

де  $V_{\text{аморфн}}$  – об'єм 1 кг поліпропілену у аморфній фазі (розплав), м<sup>3</sup>;

$V_{\text{кристал}}$  – об'єм 1 кг поліпропілену у кристалічній фазі (твердий, після

охолодження),  $\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{аморфн}} = 851,5 \text{ кг/м}^3$  – густина поліпропілену у аморфній фазі (розплав);  $\rho_{\text{кристал}} = 900 \text{ кг/м}^3$  – густина поліпропілену у кристалічній фазі (розплав) [20].

$$\text{Лінійна усадка визначається: } \gamma_l = \sqrt[3]{\gamma_v + 1} - 1 = \sqrt[3]{1,0539} - 1 = 1,765\%$$

Для компенсації усадки і запобігання відриву поліпропілену від стінки калібратора необхідний тиск,  $P_\Sigma(x)$ , який запобігає усадці, рис. 6. Кільцеве напруження в поліпропілені, викликане усадкою розраховується, Па:

$$\sigma_r = \gamma_l E \quad ,$$

де  $E = -0,07250t^2 + 6,32563t + 978,21106$ , Па – модуль пружності поліпропілену в залежності від температури [13] в діапазоні температур від  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $165 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Оскільки температура плівки поліпропілену, що кристалізувався по товщині труби різна, кільцеві напруження в цій плівці різні:

$$\sigma_r(t) = \gamma_l E(t) \quad |t = f_1(x, y)| \Rightarrow \sigma_r(x, y = (S - \delta) \dots S) = \gamma_l E(f_1(x, y))$$

Внутрішній, результуючий тиск, який необхідний для утримання контакту поліпропілену з стінкою калібратора визначається:

$$P_\Sigma(x) = P_{\text{атм}} - P_{\text{кал}}(x) \geq \frac{2\overline{\sigma_r}\delta(x)}{D} = \frac{2\gamma_l}{D} \int_{y=S-\delta}^{y=S} E(f_1(x, y))dy$$

Висновок: запропонована математична модель при її розв'язанні дозволяє визначити мінімальний тиск вздовж калібратора, за якого труба, що калібрується не буде втрачати контакт з стінкою калібратора, та визначити необхідну довжину калібратора, за якої при заданому тиску у калібруючій ванні труба що калібрується буде контактувати з матеріалом калібратора по всьому периметру.

### 2.3 Висновки

Впровадження запропонованого методу розрахунку ізотермічної ламінарної усталеної течії нестисливої ньютонівської рідини дозволяє оцінити різноманітні гідродинамічні процеси у кільцевих збіжних каналах при низьких значеннях числа Рейнольдса, коли не виникають так звані

«повзучі течії». Це якраз відбувається при плинні фібробетонної суміші в каналах віброекструдера при виготовленні круглих труб

## ДОДАТОК Е. ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ ЛІТЕРАТУРИ

### Перелік посилань:

- 1 . Опис товару ConPro / Електронний ресурс:  
[http://www.conpro.de/www/index.php?article\\_id=82&clang=02](http://www.conpro.de/www/index.php?article_id=82&clang=02) (за 13.11.2015)
2. ДСТУ Б В.2.7-144:2007 Труби для мереж холодного та гарячого водопостачання із поліпропілену.
3. Застосування й види пластикових труб/ Електронний ресурс:  
<http://prooneday.xyz/trubi/plastikovi-2/21922-zastosuvannja-i-vidi-plastikovih-trub.html> (за 13.11.2015)
4. «Основні шляхи підвищення ефективності виготовлення полімерних труб» Вознюк В. Т., Мікульонок І. О., Виноградов Є. Ю
5. Пат. 2165355 РФ, МПК7 В 29 С 47/90. Трубный калибровочный блок для машин, предназначенных для экструзии пластмассовых изделий, таких как труб / К. К. Педерсен. — № 97120557/12 ; заявл. 17.05.96 ; опубл. 20.04.01.
6. Pat. 102005062138 (DE), Int. C18 В 29 С 47/90. Kalibrierhülse für extrudierte Kunststoffrohre / J. Schmuhl,, R. Michels, J. Müller. — № 102005062138.4 ; appl. 22.12.05 ; publ. 05.07.07.
7. «Характерні дефекти одержуваних екструзією полімерних профілів та шляхи їх усунення» М. А. Романченко, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок, І. А. Горбань. Восточно-Европейский журнал передовых технологий ISSN 1729-3774 6/11 ( 72 ) 2014.
8. «Prototype and methodology for the characterization of the polymer-calibrator interface heat transfer coefficient» O.S. Carneiro\*, J.M. Nybrega, A.R. Mota, C. Silva, Polymer Testing 32 (2013) 1154–1161.
9. De Gruyter Open, «Calibrator device for the extrusion of cable coatings», Tomasz Garbacz, Ludmila Dulebovб\*, Emil Spišбk, and Martina Dulebovб, Open Eng. 2016; 6:120–124.
10. Journal of Engineering Applied Sciences 10 (8-12); «Installation for Calibration of Thin-Walled Precision Pipes» M.A. Vasechik, S.V. Shackov, I.N. Maslov and S.V. Egorov; 208-213, 2015.

11. Полиэтилен низкого давления. Технические условия: ГОСТ 16338-85.– Введ. 1987-01-01. – М. : ИПК, Изд.–во стандартов, 2000, – II, 27 с.
12. Кристаллические полиолефины / Под ред. Р. А. Раффа и К. В. Дока. Пер. с англ. М. "Химия", 1970, т. I, 360 с.; т. II, 470 с.
13. Переработка термопластичных материалов / Э. Бернхард. – М. Госхимиздат. 1962. – 747 с.
14. Технические свойства полимерных материалов: Учеб. – справ. пособие / Крыжановский В. К., Бурлов В. В. [и др.]. – 2-е изд., доп. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 с.
15. Труби для мереж холодного та гарячого водопостачання із поліпропілену (EN ISO 15874-2: 2003) : ДСТУ Б В.2.7-144:2007. – [Чинний від 2008-07-01]. – Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2008, 33 с. – (Національний стандарт України).
16. Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением. Марки : ГОСТ 18175 – 78.– Введ. 1991-01-04. – М. : Изд.–во стандартов, 1991, – II, 8 с.
17. Полипропилен и сополимеры полипропилена. Технические условия: ГОСТ 26996-86.– Введ. 1988-01-01. – М. : Изд.–во стандартов, 2002, – II, 36 с.
18. Кристаллические полиолефины / Под ред. Р. А. Раффа и К. В. Дока. Пер. с англ. М. "Химия", 1970, т. I, 360 с.; т. II, 470 с.
19. Радченко Л. Б. Основи моделювання і конструювання черв'ячних екструдерів : Навч. посіб. для студ. техн. спец. вищ. навч. закл. / Л. Б. Радченко, В. І. Сівецький. - К. : Політехніка, 2002. - 152 с. - Бібліогр.: с. 146-147. - укр.
20. Технические свойства полимерных материалов: Учеб. – справ. пособие / Крыжановский В. К., Бурлов В. В. [и др.]. – 2-е изд., доп. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 с.