

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

Я.М. Корнієнко, Г.С. Подиман, Я.Г. Двойнос

Калібрування труб з поліпропілену

Монографія

Київ 2018

Калібрування труб з поліпропілену: Монографія. [Електронний ресурс]: монографія для студентів, які навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»/ КПІ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО; уклад. Я.М. Корнієнко, Г.С. Подиман, Я.Г. Двойнос. – Київ: КПІ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО, 2018 – 101с.

*Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(Протокол № 7 від 25 червня 2018 р.)*

Для студентів інженерно-хімічного факультету.

Табл. 6. Рисунки 63. Бібліограф. назв. 50

Відповідальний редактор: Степанюк Андрій Романович, доц., к.т.н.

Рецензенти: Коптюх Леонід Андрійович, професор, д.т.н.

Собченко Віктор Васильович, старший науковий співробітник, к.т.н.

Навчальне видання

Корнієнко Ярослав Микитович

Подиман Григорій Сергійович

Двойнос Ярослав Григорович

**КАЛІБРУВАННЯ ТРУБ З ПОЛІПРОПІЛЕНУ
МОНОГРАФІЯ**

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ _____	5
Вступ _____	7
1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ _____	8
1.1 Вироби з полімерних матеріалів в контексті сталого розвитку _____	8
1.2 Обґрунтування застосування полімерів для виготовлення труб _____	9
1.3 Параметри якості калібратору _____	10
1.4 Технології калібрування труб та профільно–погонажних виробів з полімерних матеріалів _____	17
1.5 Сучасні конструкторські концепції калібраторів _____	20
1.6 Процес та технології вакуумного калібрування _____	23
1.7 Огляд конструкцій вакуумних калібраторів _____	23
1.8 Відома методика розрахунку калібруючого інструменту _____	31
1.9 Теплофізичні та механічні властивості поліпропілену _____	34
1.10 Черв'ячні екструдери для переробки полімерів _____	38
1.11 Гідравлічний розрахунок формуючого інструменту _____	39
1.11.1 Визначення перепаду тиску в формуючому інструменті _____	39
1.11.2 Визначення коефіцієнту опору в формуючому інструменті _____	42
1.12 Критерії якості труб з поліпропілену _____	45
2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КАЛІБРУВАННЯ ТРУБ З ПОЛІПРОПІЛЕНУ МЕТОДОМ ЕКСТРУЗІЇ _____	48
2.1 Фізична модель переносу теплоти від трубної заготовки через стінку калібруючої гільзи _____	48
2.2 Математична модель перенесення теплоти від рухомої трубної заготовки до охолоджуючої рідини через стінку калібруючої гільзи _____	51
2.3 Числовий розв'язок математичної моделі методом кінцевих різниць за явною схемою _____	53
2.4 Математична модель напруженого стану у матеріалі трубної заготовки _____	57
2.5 Методика розв'язання математичної моделі переносу теплоти та	

умови збереження термічного контакту _____	61
2.6 Обґрунтування початкових параметрів для дослідження. Результати чисельного експерименту _____	62
3. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ _____	66
3.1 Опис експериментальної установки _____	66
3.2 Методика проведення експериментальних досліджень _____	68
3.3 Результати експериментальних досліджень _____	70
3.4 Симуляційне дослідження конвективного теплообміну зовнішньої поверхні калібратору з охолоджуючим середовищем _____	72
3.5 Симуляційне дослідження характеру зміни температурних полів _____	74
3.6 Перевірка адекватності математичної моделі _____	78
3.6.1 Перевірка адекватності математичної моделі температурних полів у заготовці _____	78
3.6.2 Перевірка адекватності математичної моделі температур на поверхні калібратору _____	82
4 ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ _____	85
4.1 Рекомендації щодо проектування калібруючого пристрою для труб з поліпропілену _____	85
4.2 Технічне рішення нової конструкції калібру для формування труб з поліпропілену _____	85
4.3 Програма розрахунку _____	87
4.4. Розрахунок визначальних геометричних параметрів _____	94
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ _____	97

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ

Q – теплота, що підводиться до калібратору та відводиться водою, Дж;

G – масова продуктивність розплаву, кг /с;

D – зовнішній діаметр, м;

d – внутрішній діаметр, м;

γ – об'ємна усадка при склуванні поліпропілену, %;

F – критерій Фішера;

L – довжина калібратору, м;

x – поточна довжина калібратору, м;

m – маса, кг;

P – тиск, Па;

T – абсолютна температура, К;

t – середня температура розплаву, °С;

V – об'єм, м³;

W – швидкість течії розплаву, кг/кг;

α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С);

γ - лінійна усадка при склуванні поліпропілену, %;

E – модуль пружності поліпропілену;

δ – товщина затверділого шару трубної заготовки з поліпропілену, м;

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

$P_{\text{калібр}}$ - тиск в калібруючій ванні, МПа;

$F_{\text{тертя}}$ - сила тертя труби на стінках калібратору, Н;

$F_{\text{тяги}}$ - повздовжна сила протягування труби у калібраторі, Н;

μ – коефіцієнт тертя між трубною заготовкою з поліпропілену та стінкою калібратору

ρ – густина, кг/м^3 ;

C_p – питома теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$;

λ – теплопровідність, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$

σ – напруження в матеріалі труби, $\text{Н}/\text{м}^2$;

τ – час, с;

Bi – критерій Біо.

Перелік скорочень:

ПП, PPR – поліпропілен

ДР – Диференційне рівняння

ПК – персональний комп'ютер

ЧП – черв'ячний прес

SDR – стандартне розмірне відношення [1]

Вступ

В останні десятиліття суттєво збільшилось виробництво труб з поліпропілену в Україні та світі.

До базових параметрів якості таких виробів відносять збереження геометричної форми та товщини стінок. Ці характеристики регламентуються в Україні державними стандартами [2].

Зокрема, граничне значення овальності для труб діаметром 25 мм становить 1,2 мм.

Виконання цієї вимоги залежить від конструкції калібру та технологічних параметрів калібрування, в той-же час процес калібрування є лімітуючим у виробництві труб малого діаметру, наприклад, при швидкості калібрування труби з поліпропілену діаметром 20 мм, SDR6 5 м/хвилину (0,083 м/с) продуктивність екструдера становить 52 кг/год (0,014 кг/с) і зростають питомі енерговитрати (втрати теплоти у навколишнє середовище постійні) і нераціонально використовується обладнання продуктивність складає 30% від робочої. Відомі закордонні фірми [7-14] досягли швидкості труб з поліпропілену до 12 м/хв (0,2 м/с).

Тому створення нового, більш продуктивного обладнання для калібрування труб з поліпропілену є актуальним.

Робота відповідає "Пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки на період до 2020 року" відповідно до Закону України – "Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки" № 2623-III, редакція станом на 16.01.2016 р., а саме: "Створення та застосування технологій отримання, зварювання, з'єднання, діагностики та оброблення конструкційних, функціональних і композиційних матеріалів".

1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Вироби з полімерних матеріалів в контексті сталого розвитку

Труби з полімерних матеріалів використовуються вже більше 60 років. Європейські країни на даний час займають лідируючі позиції у виробництві труб з поліпропілену. Як приклад, у Німеччині, Італії, Франції і Великобританії споживається близько 80% всього їх виробництва.

Поступово розширюється регіон застосування цієї технології, завойовується ринок України, витісняються труби, що виготовляються зі звичних традиційних матеріалів (чавуну, сталі, міді). Але, незважаючи на ряд їх переваг, у труб з полімерних матеріалів є один великий недолік. Цим недоліком є те, що на відміну від виробів з природних матеріалів, виконавши свої функції, вони не швидко знищуються під дією агресивних чинників довкілля – світла, тепла, атмосферних газів, мікроорганізмів, а продовжують багато років існувати у виді полімерних відходів, завдаючи шкоду живій природі [1].

Полімерні матеріали, залежно від сфер застосування, мають різні терміни використання. Як приклад, можна розглянути дані, приведені для країн ЄС на 2010 р.: з 25 млн. тон спожитих пластиків 9 млн. тон (36 %) використовувались менше одного року - це, передусім, тара і упаковка; 7 млн. тон (28 %) – вироби з терміном служби від 1 до 10 років – побутова електротехніка, посуд, інші споживчі товари; 9 млн. тон (36 %) експлуатується понад 10 років – полімерні матеріали будівельного призначення, деталі, що використовуються у автомобіле-, судно-, літакобудуванні (рисунок 1.1). Щороку до 75 % матеріалів потрапляють у відходи з загального об'єму полімерів [1].

Зростання обсягів виробництва полімерів, призводить, відповідно до зростання їх частки у відходах. За даними Союзу європейських виробників пластмас за останні 15 років частка полімерних матеріалів у відходах виросла з 2% до 8 – 11 %.

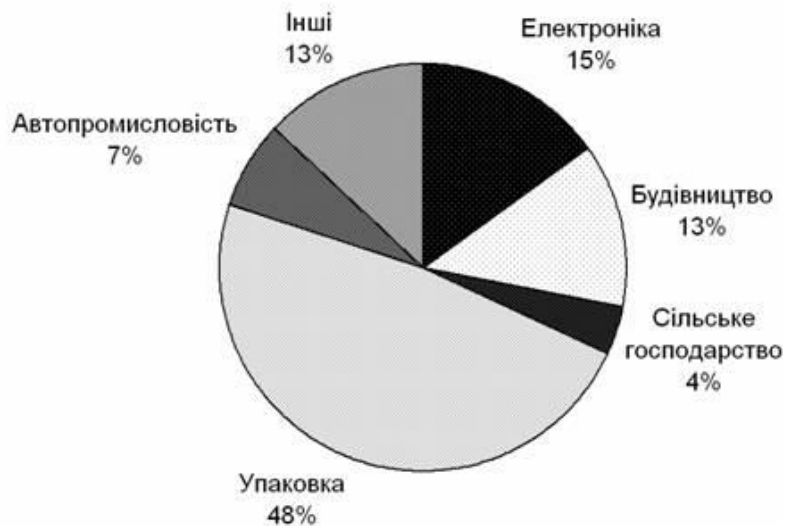


Рисунок 1.1 – Утворення полімерних відходів (%) по галузях народного господарства (ЄС, 2010 р.), [4]

В той же час переробка і утилізація полімерних відходів (ПВ) дозволяє економити цінну первинну сировину і енергію. Так, утилізація 38 тис. тон відходів пластмасової упаковки дозволить заощадити 34 тис. тон первинних пластмас і 38 млн. барелів нафти, а також понизити викиди CO₂ на 23800 тон. Термічна переробка ще 20,15 тис. тон відходів упаковки дала можливість заощадити 15,7 млн. барелів нафти.

1.2 Обґрунтування застосування полімерів для виготовлення труб

Особливі властивості полімерних труб широко застосовуються в промислових технологіях. Труба з ПП за рахунок своєї стійкості до агресивних дій речовин, що знаходяться в стічних водах, давно закріпила за собою лідерські позиції в системах каналізації. Крім іншого, каналізація з цих труб легка в експлуатації і є технологічною при ремонті.

Труба з PPR DN20PN20 найбільш поширена в системах водопостачання гарячої та холодної води.

Перевага труб з PPR [3]:

1. Робочий тиск до 2 МПа;
2. Матеріал не вступає в електрохімічні реакції, що виключає

внутрішню і зовнішню корозію труб. Завдяки цьому збільшується термін експлуатації самого трубопроводу і пов'язаних з ними сантехнічних приладів до 50 років;

3. Внутрішні стінки труб і фітингів гладкі, тому вони не обростають відкладеннями і, як наслідок, не знижується витрата рідини, що транспортується. Це дозволяє використовувати труби меншого діаметру;

4. Мають низьку теплопровідність, що перешкоджає втратами теплоти;

5. Екологічно чисті: матеріал не виділяє шкідливих речовин ні при монтажі трубопроводу, ні при його експлуатації;

6. Трубопровід з поліпропілену 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.

Відсутність дефектів в матеріалі стінки труби, стабільність розмірів та форми – основні проблеми, пов'язані з процесом формування. Сам же процес залежить від конструкції та технології калібрування.

1.3 Параметри якості калібратору

Калібратори використовують при виготовленні труб, кабелів, та профільно-погонажних виробів, конструктивне оформлення та параметричні розрахунки стали темою багатьох досліджень [4].

Технологія вакуумного калібрування настільки поширена, що у більшості нормативних документів нормованим та номінальним розміром труб з полімерних матеріалів є зовнішній діаметр. Також важливим геометричним параметром є співвідношення SDR (відношення номінального

зовнішнього діаметру до номінальної товщини стінки).

Найбільш поширеним обладнанням для підготовки розплаву поліпропілену для виробництва труб є екструдер.

Поліпропілен – термопластичний полімер, макромолекули якого мають переважно лінійну форму, тому при течії розплаву поліпропілену у робочих каналах виникає їх орієнтація (макромолекули витягуються) вздовж напрямку руху, а після виходу з робочого каналу формуючого інструменту виникає ефект "набухання" заготовки розплаву через зникнення напружень, та згортання макромолекул у їх природню форму.

Дефекти у виробках можуть бути пов'язані зі зміною реологічних властивостей перероблюваного матеріалу на стадіях пластикації та формування [4], тому традиційно, на виробництві використовуються різні калібратори для різних марок полімеру.

Дефекти погонажних виробів з полімерних матеріалів можна поділити на загальні, тобто ті, які характерні для будь-якого виду профілю, та індивідуальні, що притаманні тільки певному профілю. Крім того, фахівці [4] рекомендують відслідковувати появу дефектів у ретроспективі для розуміння, чи є вони наслідком якоїсь події, що сталася напередодні (наприклад, аварійна ситуація, яка спричиняє псування конструктивного елемента, або перехід на нову сировину), і якщо частота появи цих дефектів збільшилась то необхідно провести відновлення покриття контактних з полімером поверхонь [4].

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 виробках [4].

У зв'язку зі збільшенням швидкості процесу екструзії все більше уваги приділяють дефектам поверхні виробів, які виникають внаслідок періодичного проковзування або налипання розплаву на контактних з ним поверхнях обладнання [4].

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 [4].

Після виходу екструдованої труби з головки вона потрапляє до вакуумного калібратору, де відбувається остаточне формування з частковим охолодженням та одночасним витягуванням тягнучим пристроєм [4].

Після вакуумного калібрування труба потрапляє до охолоджувальної ванни для остаточного охолодження.

Основні дефекти, що можуть виникати при калібруванні пов'язані з його конструкцією, шорсткістю робочих поверхонь, відповідністю геометричних розмірів та дотриманням технологічних режимів.

Основні дефекти, пов'язані з відповідністю геометричних розмірів калібратора: "хвилі" на ділянках труби або профілю – відхилення форми (рисунок 1.2) [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 крайці профілю. Дане відхилення може бути спричинене невідповідністю форми та розмірів заготовки розплаву формі та розмірам робочих поверхонь калібратору.

Даний дефект також може бути пов'язаний з порушенням режиму охолодження калібратору (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 1.2 – Дефект типу «хвиля» на двошаровому П-подібному профілі з вільною крайкою

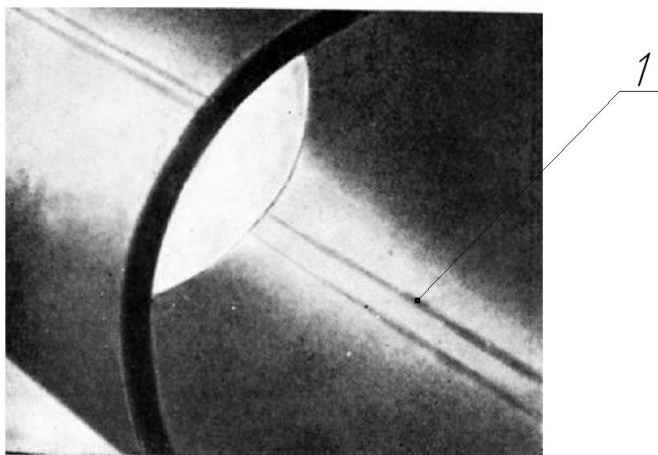
Досить часто на поверхні труби можна бачити такі дефекти, як "утяжки", полоси, подряпини (рисунок 1.3) та вм'ятини (і відчуті пальцем на дотик), – місцевий провал поверхні у вигляді смуги в напрямку екструдювання. У разі, якщо цей дефект починається з філь'єри (формуючий інструмент) потрібно відсунути калібратор і оглянути поверхню матеріалу, що виходить з філь'єри і не розгладжується при проходженні крізь калібруючі пристрої, подібний дефект поверхні називається "утяжкою" [4].

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

Якщо на поверхні матеріалу перед калібратором дефекту немає, тоді смугу на поверхні (вм'ятину) залишає чужорідна частинка, що потрапила до калібратору, або дефект робочої поверхні калібратору. При цьому можна зазначити таке:

– смуга на поверхні має гладкі краї без гострих країв. Швидше за все стороння частка потрапила в формуючий інструмент і не загладилась у калібраторі. У разі гострих країв дефекту, він пов'язаний з шорсткістю

робочих поверхонь, або потраплянням на них інохідних тїл (пїсок та їнше).



1 – подряпина

Рисунок 1.3 – Дефекти типу "борозда"

У цьому разї частинка проминає ще м'який чи не ствердїлий матерїал. Для усунення дефекту достатньо видалити стороннї частинки з калїбраторїв;

– смуга на поверхнї має гострї крайки. Стороння частинка (тверда, можливо металева) може знаходитися в будь-якому мїсцї калїбратору або кондуктора ванни і дряпати гострими крайками поверхню профїлю.

У таких випадках їдеться про «подряпини» на поверхнї труби, спричиненї калїбратором [4].

Особливу увагу потрібно придїлити викривленню вїдрїзків профїлю по довжинї (утворення так званої "шаблї") [4].

Такий дефект в умовах виробництва їнодї називається "шабля". Причиною його появи можна вважати нерївномїрне охолодження труби в калїбраторї і ваннї. Такий дефект також виникає через не спїввїснїсть установки їнструменту [4].

Окремо можна видїлити дефекти, що стосуються спївекструзїйного формування полїмерних виробїв (рисунок 1.4), оскїльки спївекструзїєю формуються багатошаровї виробї. При спївекструзїї постають питання адгезїйної взаємодїї мїж шарами та достатньої адгезїйної мїцностї. При прикладеннї навантаження на композицїйний матерїал з низькою адгезїєю мїж шарами руйнування буде проходити на межї подїлу шарїв

(розшарування виробу, зміщення шарів).



Рисунок 1.4 – Порухення адгезійної взаємодії шарів на межі поділу шарів полімеру

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].

Даний дефект також може бути спричинений порушенням технологічних режимів калібрування багат шарових виробів.

Прогнозування появи та способи усунення систематичних дефектів, таких як нерівномірність швидкостей та товщини екструдату, надмірна температура та час перебування розплаву в головці, які спричинюють 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 проведення системного аналізу, щоб визначити основні причини. Зазвичай відновлення покриття контактних з полімером поверхонь допомагає усунути небажані явища [4].

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

Якість калібратору може бути визначена для його робочої швидкості статистичним методом, або методом порівняння з іншим калібратором шляхом розрахунку середньої тривалості роботи лінії на обрив, або появу дефектів, спричинених калібратором.

Статистичний метод полягає у визначенні кількості обривів або дефектів, спричинених калібратором труби на 100 000 метрів виготовленої труби.

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 в охолодженні і склуванні розплаву полімеру в результаті контакту з стінкою калібратору до товщини, достатньої для передачі тягового зусилля пристрою, що тягне, і збереження необхідних розмірів екструдату [21 – 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 екструдату і, відповідно, являється складовою частиною технологічного оснащення.

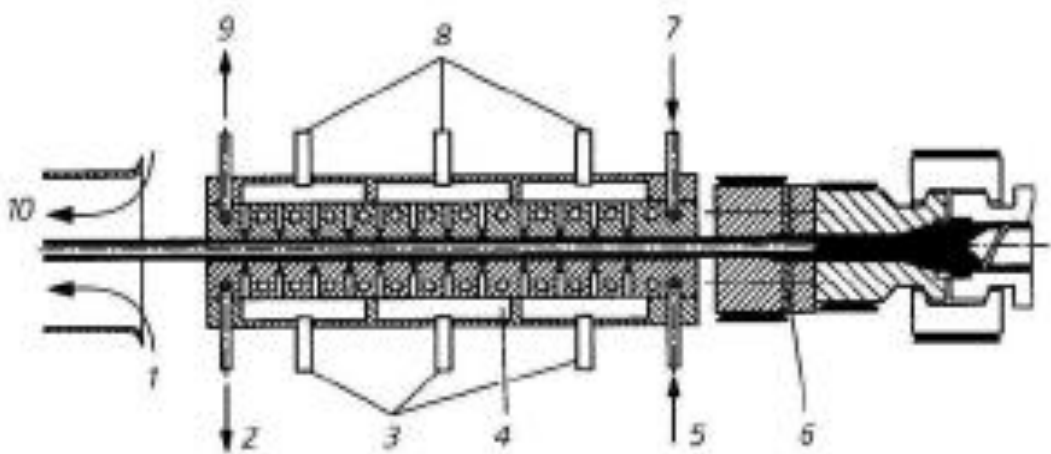
На сьогоднішній день жорсткі полімерні профілі при екструзії майже завжди калібруються. Калібрування передбачає протяжку екструдату через один або декілька блоків, так званих калібраторів, що виготовлені з металу

(інколи з латуні, сталі або алюмінію). Поверхня калібратору, що контактує з екструдатом, відповідає формі виробу [21].

В залежності від виробу з полімеру використовують різні види калібрування.

1.4 Технології калібрування труб та профільно-погонажних виробів з полімерних матеріалів

При зовнішньому калібруванні за допомогою вакууму необхідний для охолодження і калібрування контакт між екструдованим профілем і поверхнею калібратору відбувається за рахунок використання вакууму, що створюється вакуумним насосом. При такому калібруванні профіль прижмається до охолоджувальної поверхні калібратору по контуру (закрите зовнішнє калібрування по контуру), при цьому вакуум створюється шляхом відкачування повітря через невеликі отвори або щілини в стінці калібратору, до яких прикріплюється профіль (рисунок 1.5) [21].



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 1.5 – Вакуумне зовнішнє калібрування (закритий вакуумний калібратор з подальшим повітряним охолодженням профілю) [21].

Зовнішнє калібрування по контуру застосовується при виробництві порожніх профілів і труб невеликих діаметрів. Для калібрування профілів зазвичай використовують декілька блоків калібрування, між якими розташовані ділянки охолодження [21].

Перевагою є якісний термічний контакт.

Недоліком конструкції є слабка інтенсифікація теплообміну.

Внутрішнє калібрування. Як видно з назви, при внутрішньому калібруванні фіксується внутрішні розміри порожніх профілів які екструдуються простого поперечного перерізу (рисунок 1.6). 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 [22].

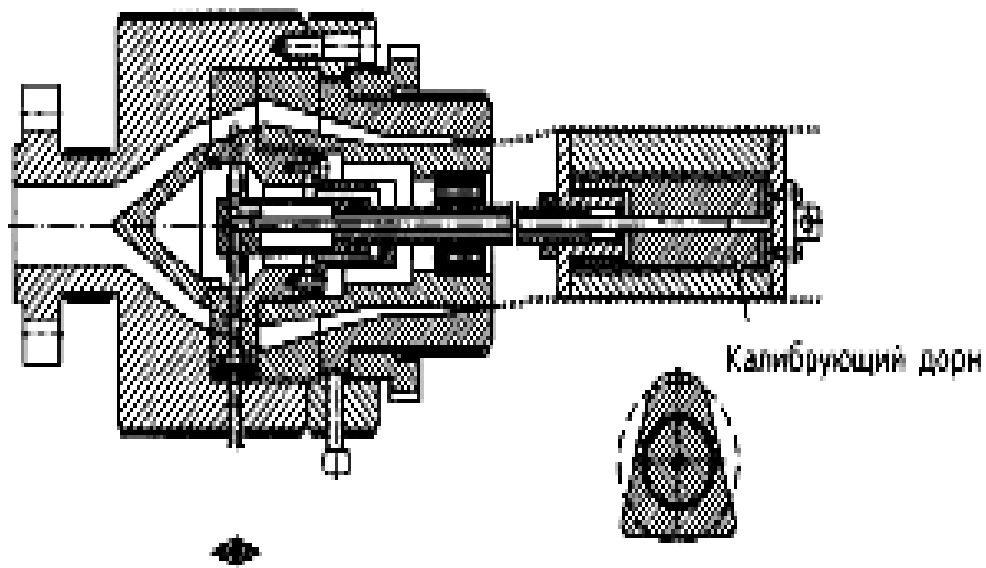
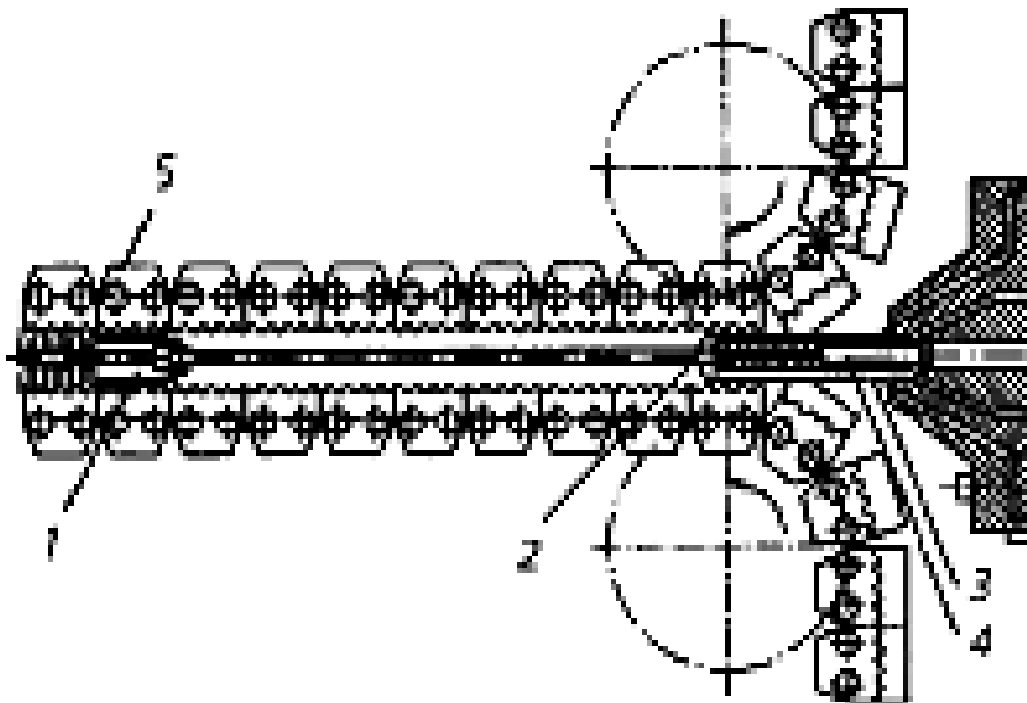


Рисунок 1.6 – Внутрішнє калібрування [22].

При цьому методі калібрування дорн екструзійної головки з'єднується з охолоджувальним калібруючим дорном. По ньому протягується і водночас охолоджується пластична трубна заготовка, що виходить із формуючого отвору екструзійної головки [22].

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

Спеціальні методи калібрування з рухомими калібраторами. Якщо калібратор безперервно рухається разом з екструдатом, то це дозволяє виготовляти профілі змінного (у напрямку екструзії) перерізу. Даний метод використовується при виготовленні гофрованих труб (рис. 1.7). Для цього використовуються гусеничні пристрої (гофратори) з спеціальними металевими півформами, у яких гладка пластична трубна заготовка під дією стиснутого повітря або вакууму формується в гофровану трубу [23].



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

Рисунок 1.7 – Виробництво гофрованих труб [23].

Недоліком є підвищена питома енерговитрата і специфіка виробництва.

Найбільш сучасним методом калібрування є вакуумне калібрування по зовнішній поверхні виробу

1.5 Сучасні конструкторські концепції калібраторів

Розглянемо пристрій і спосіб для калібрування екструдованих труб, що представлені у патенті EP 2226178 A2 [18], рисунок 1.8. Підвищення якості охолодження трубної заготовки за рахунок стабілізації та підтримання оптимального тиску в калібраторі були покладені в основу даної корисної моделі.

Така технічна проблема вирішується заміною корпусу калібрування, який має елементи, вироблені зі спеченого матеріалу, що має в пустотах інжекційні отвори. Також даний корпус має можливість обертатися навколо своєї осі, що є додатковим засобом для повороту охолоджуючого текучого середовища навколо трубної заготовки.

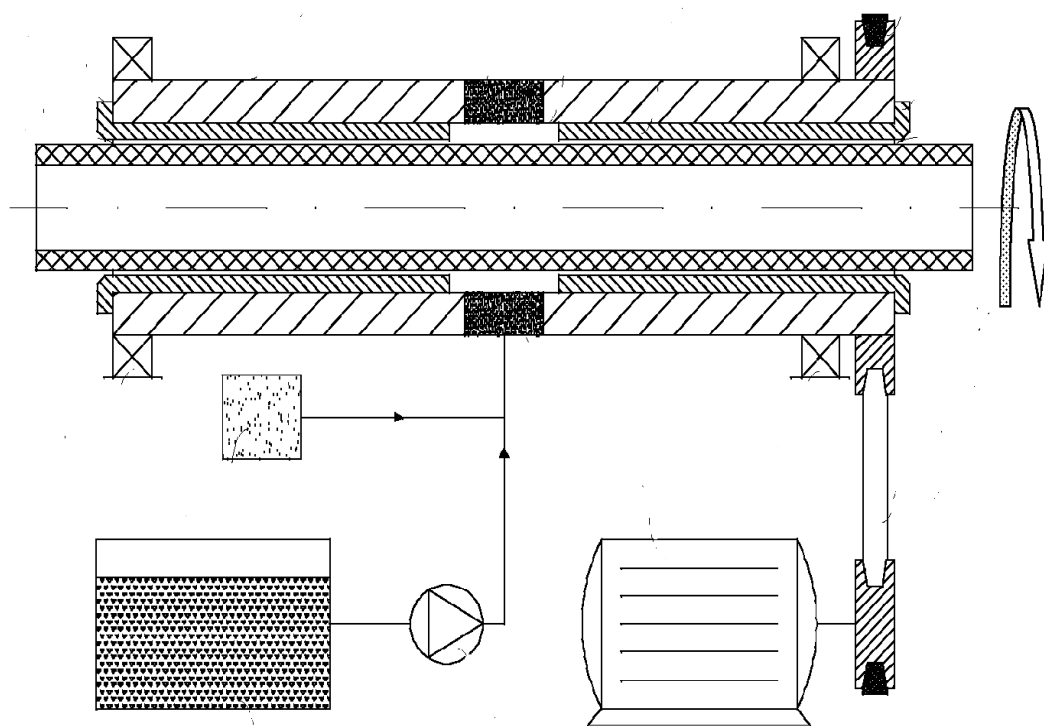


Рисунок 1.8 – Схема конструкції калібратора [18]

Недоліками є складність конструкції і висока енерговитрата.

В патенті CN 1272160 C [19], рисунок 1.9 також розглядається пристрій і спосіб для виготовлення пластикових труб. Метою даного винаходу є створення пристрою і способу для виробництва труби різного

діаметру під час виробничого циклу, не перериваючи його. Перетворення (зміна зовнішнього діаметру та товщини стінки трубної заготовки) можна досягти повністю автоматизованим контролем розмірів між безліччю пластикових труб в процесі безперервної екструзії, при якому зовнішній діаметр і товщина стінки, згідно з замовленням або стандартами, будуть змінними.

Для вирішення цієї проблеми автори пропонують спеціальну конструкцію кінцевої головки екструдера, формуючого інструменту та калібратору, в одному складному пристрої, та конструкцію спеціальних валиків, що змінюють зовнішній діаметр трубної заготовки не зупиняючи процес виробництва екструдованої продукції.

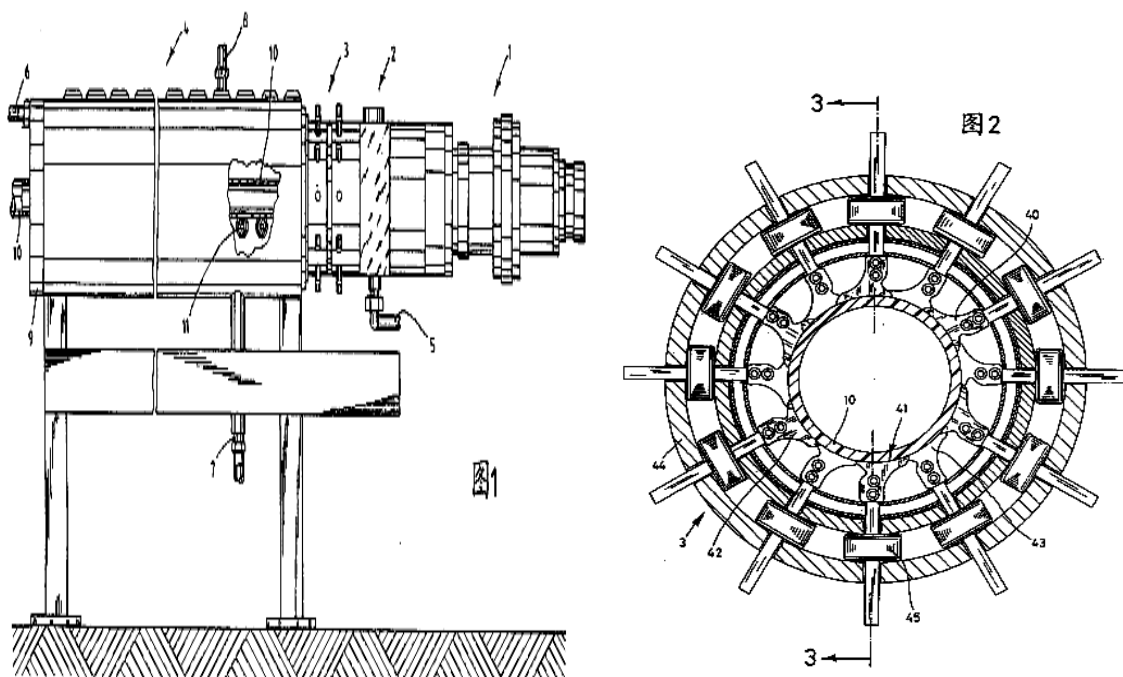


Рисунок 1.9 – Схема конструкції калібратору [19]

Недоліками є складність конструкції, можлива поява дефектів при формуванні, слабкий термічний контакт трубної заготовки з формуючим інструментом (розриви між вставками поз. 42, 43).

В патенті US 6200119 B1 [20], рисунок 1.10 запропоновано калібратор екструдованих виробів з модульними калібрувальними касетами.

Підтримання якості продукції та добре відведення теплоти від заготовки, для її формування, є основними проблемами при виготовленні полімерної продукції шляхом екструзії. Саме ці проблеми були покладені в мету даної корисної моделі.

Для вирішення даних проблем, автори пропонують спеціальну будову калібратору, що складається з пластин, які мають отвори для тиску и для охолоджувального агенту.

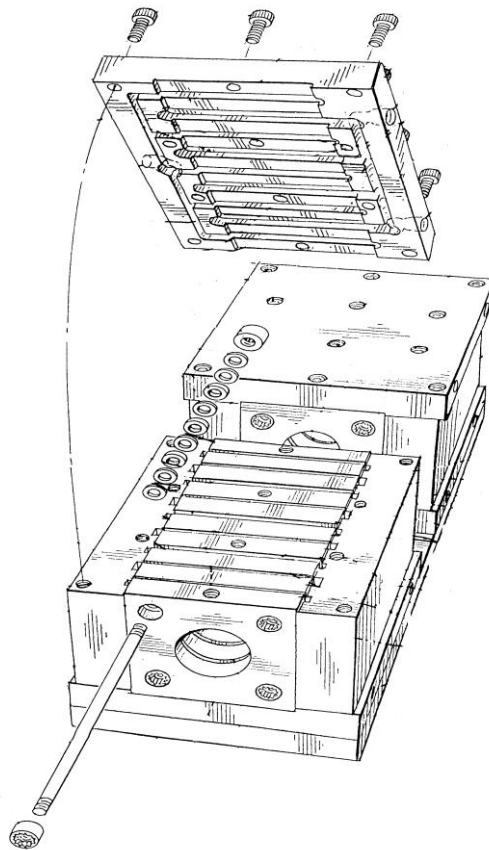


Рисунок 1.10 – Схема конструкції калібратору [20]

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.

1.6 Процес та технології вакуумного калібрування

Охолодження труби у калібраторі супроводжується утворенням твердої плівки кристалічного поліпропілену на поверхні трубної заготовки. Поліпропілен має значний коефіцієнт усадки $\gamma=1,5...2\%$ (лінійна усадка при склуванні поліпропілену, %) і при відсутності розрідження у калібрі (або його малому значенні) трубна заготовка починає зменшуватись у діаметрі, що призводить до втрати термічного контакту між гільзою калібратору та трубною заготовкою. Втрата термічного контакту призводить до прогріву твердої плівки кристалічного поліпропілену на поверхні трубної заготовки внутрішніми шарами трубної заготовки, та переходу її у аморфний стан (розтоплюванню) і втрати міцності. Наступне потрапляння трубної заготовки до зони з розрідженням призводить до її розриву (або надриву з утворенням браку) з зупинкою лінії.

1.7 Огляд конструкцій вакуумних калібраторів

Сучасні конструкції калібраторів труб з поліпропілену – вакуумні

У зв'язку зі збільшенням швидкості процесу екструзії все більше уваги приділяють дефектам поверхні виробів, які виникають внаслідок періодичного проковзування розплаву по контактним поверхням обладнання [4].

Встановлення взаємозв'язку між сукупністю перелічених факторів та якісними характеристиками полімерних виробів розглядалося авторами, як окремі наукові задачі, але не втілено у розрахункові методики діагностики та усунення проблем [4].

Екструдований профіль після виходу з головки потрапляє до вакуумного калібратору (рисунок 1.11), де відбувається остаточне формування необхідної геометрії профілю з його частковим охолодженням та одночасним витягуванням тягнучим пристроєм [4].

Особливо це важливо для термопластів, які мають дуже низьку

теплопровідність (порядку 10^{-1} Вт/(м·К)), який визначає інтенсивність теплообміну і є критичним при формуванні виробів. Низька теплопровідність полімеру також впливає створення значних температурних градієнтів при охолодженні [4].



Рисунок 1.11 Загальний вигляд калібратору

Проблему калібрування також досліджено в роботах [15–20].

Калібратор для лінії екструзії містить формуючу порожнину, систему охолодження і вакуумної систему, як можна бачити на рисунку 1.12 [15].

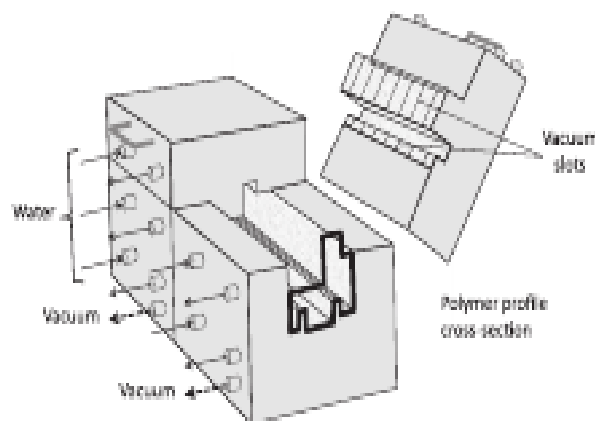


Рисунок 1.12 - Типовий термопластичний профіль калібратору [15]

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 калібратору, охолодження текучого середовища, який використовується і т.п.) [16].

Якщо контакт між двома тілами не є достатнім, може статися стрибок температури на межі розділу (рисунок 1.13 (а)), його величина пропорційна контактної теплостійкості, що характеризує їх поверхню поділу [16].

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 [16].

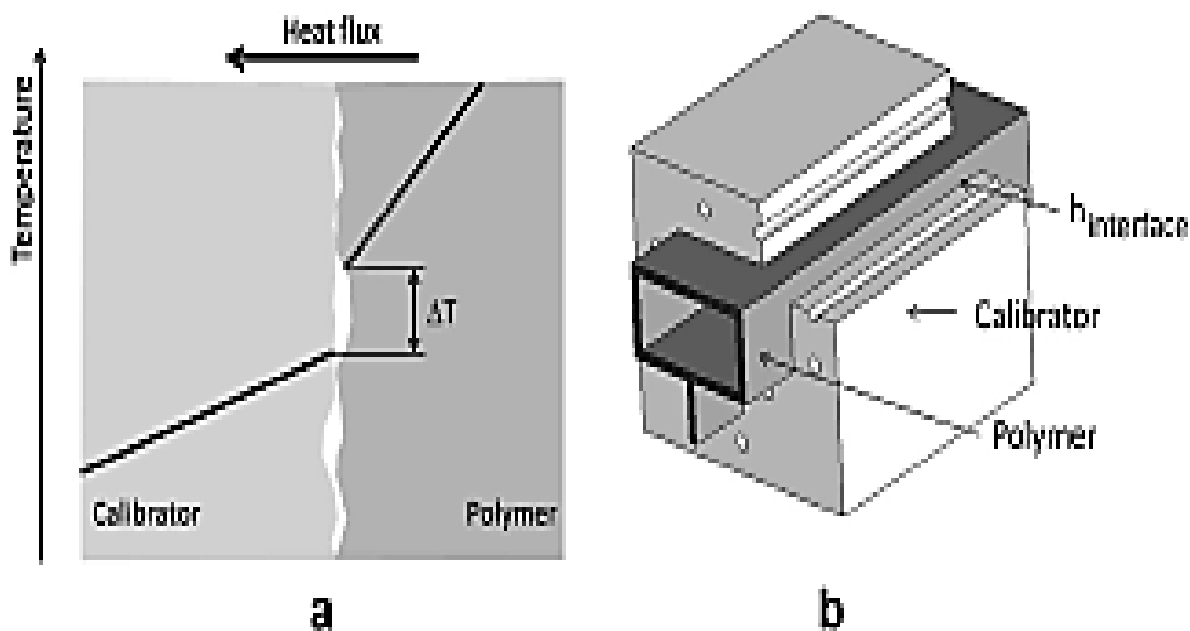


Рисунок 1.13 – Передача теплоти між двома поверхнями, які не в ідеальному контакті: (а) схема; (Б) екструзійне калібрування [16]

Була прийнята модульна конструкція і розроблена система, яка дозволяє легко вивчати вплив декількох параметрів процесу, а саме: природи матеріалу калібратору, довжину калібрування, швидкість екструзії, якість

межі полімер-калібратор, температури і швидкості потоку охолоджуючого засобу, типу холодоагенту, та інших [16].

В наступній роботі дослідили важливість калібратору при виготовленні кабельного покриття [16].

Екструзія полімерних покриттів, які включають піноутворювачі, а також призводить до отримання нових, модифікованих фізичних і технологічних властивостей екструдованого продукту (екструдату). 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 [17].

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 при склуванні [17].

На основі теорії вакуумного калібрування було встановлено, що найбільший вплив мають характеристики термопластичного матеріалу конструкція калібру та умови його охолодження [17].

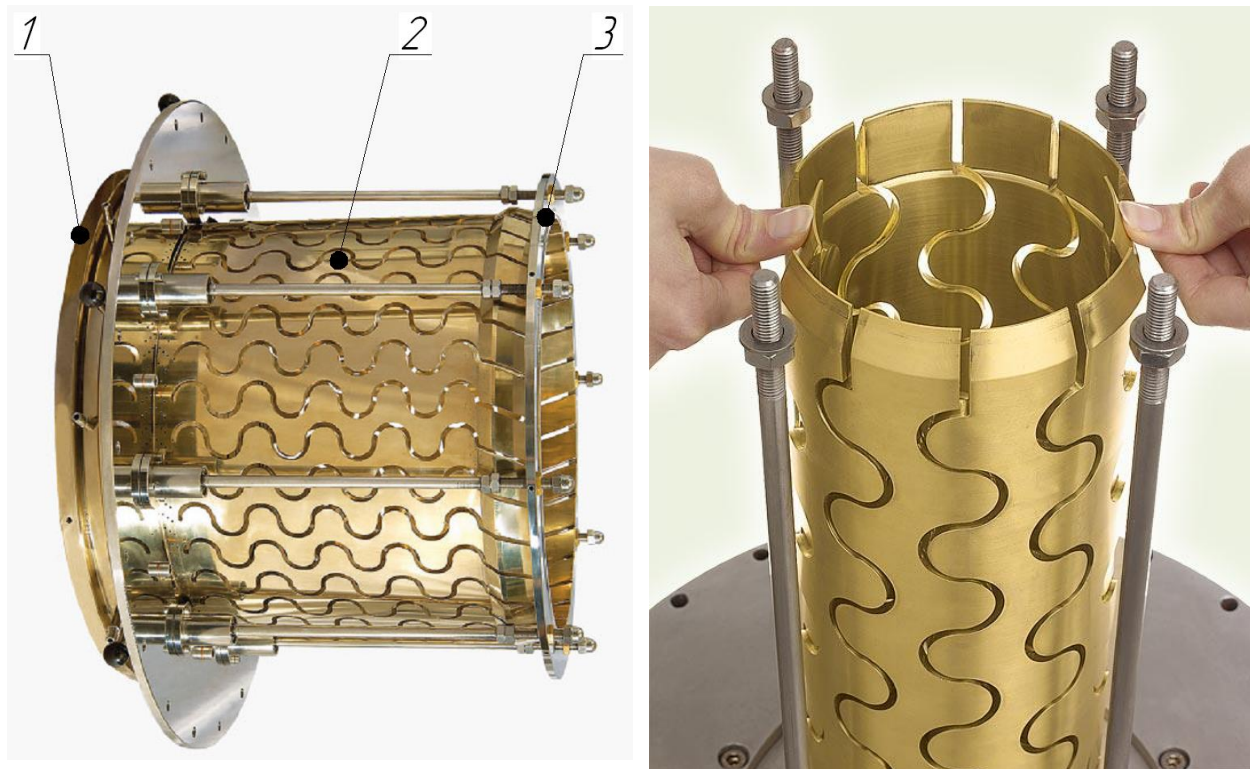
В обох частинах калібратору існують контури (порожнини, канали), розташовані паралельно кожному каналу (руху розплаву полімеру), та підключені через перпендикулярний канал подачі охолоджуючої рідини під тиском, і з'єднаний з іншого боку з перпендикулярним каналом, через який охолоджуюча рідина виходить назовні, після отримання теплоти [17].

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

Під час виробництва необхідно корегувати діаметр калібрувальної поверхні так, щоб відхилення діаметра труби не перевищувало нормованого

значення. В протилежному випадку слід зупинити технологічний процес і замінити калібрувальну поверхню, що призводить до значних втрат полімерного матеріалу і часу.

Найбільш поширеним технічним рішенням є використання прорезів хвилястої форми на калібруючій гільзі [10–12] (рисунок 1.14 – 1.19). Кінець гільзи та фланець задній мають конус, і при притисканні фланця заднього калібруюча гільза "складається", зменшуючи свій внутрішній діаметр.



1 – фланець передній; 2 – гільза калібратору з хвилястими прорізами;
3 – фланець задній

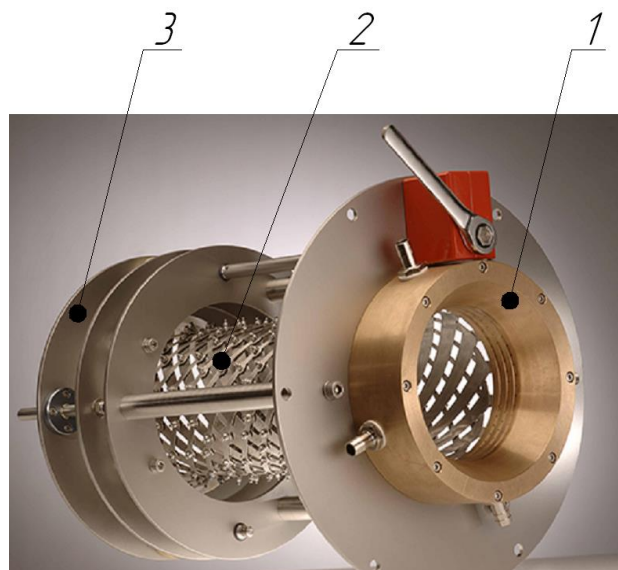
Рисунок 1.14 – Калібратор [10, 12]

Значно збільшити діапазон регулювання діаметра калібрувальної поверхні вдалося, застосовуючи конструкцію, запропоновану в роботі [8, 9]. За такого виконання калібрувальної поверхні змінення діаметра здійснюють, змінюючи довжину калібрувальної поверхні (рисунок 1.10). Така конструкція дозволяє не застосовувати новий калібрувальний інструмент для кожного типорозміру труб і робить можливим перехід на випуск труб іншого типорозміру, без зупинки виробництва.



1 – фланець передній; 2 – гільза калібратору з хвилястими прорізами;
3 – фланець задній

Рисунок 1.15 - Калібратор [13]

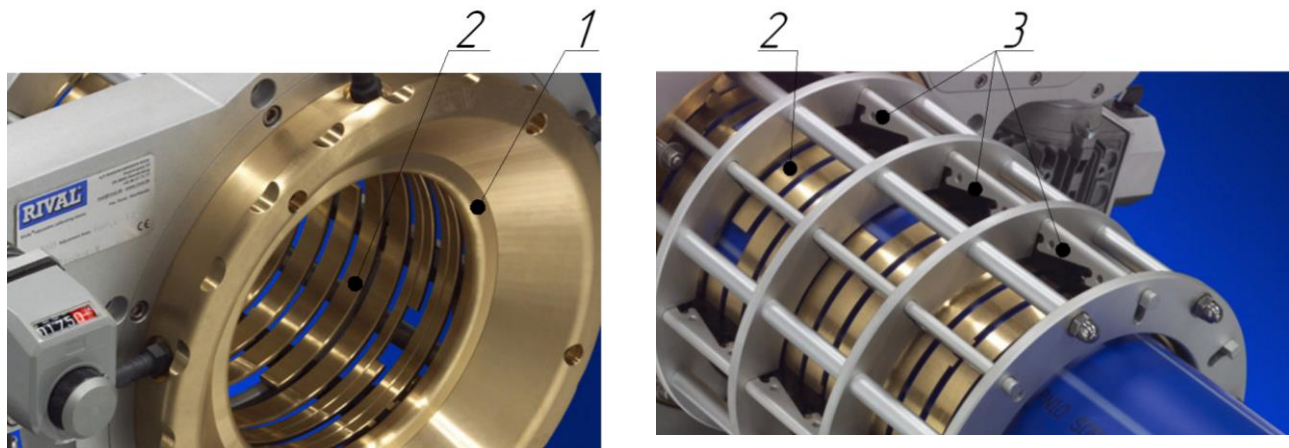


1 – фланець передній; 2 – гільза калібратору з хвилястими прорізами;
3 – фланець задній

Рисунок 1.16 - Калібратор [8, 9]

У роботі [6] проблему вирішено шляхом застосування ряду кільцевих елементів 2, стики яких рознесено таким чином, що в осьовому напрямку калібрувальна поверхня має замкнену кільцеву форму (рисунок 1.11). За довжиною калібрувального пристрою розташовано елементи 3,

якими можна керувати, стискаючи чи розширюючи кільцеві елементи 1 [6, 7]. Але такий спосіб має такі недоліки: складність в збиранні даного калібратору, що збільшує вартість апарату в декілька разів; обмежене зменшення зовнішнього діаметру трубного виробу.



1 – фланець передній; 2 – розрізне кільце (зібрані по парам, та місця розрізів рознесено на 180 град);

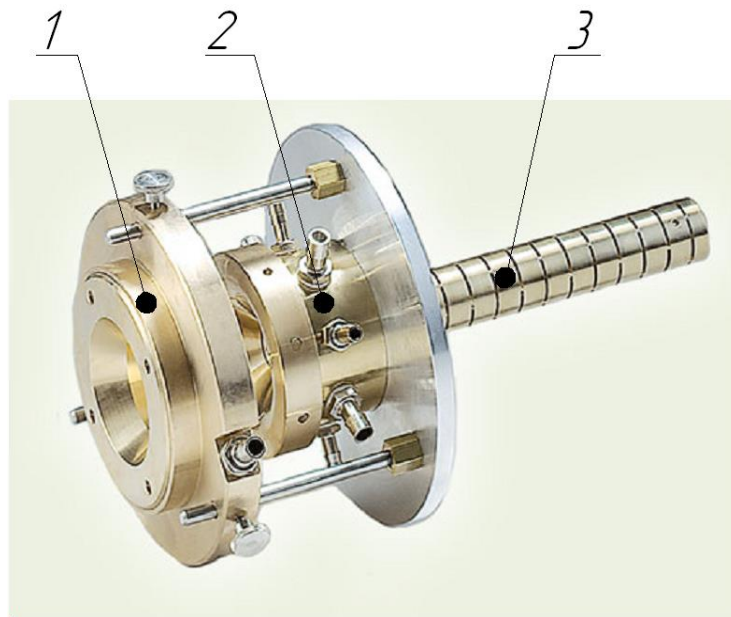
3 – конічні вставки, що тиснуть на розрізні кільця зовні

Рисунок 1.17 – Калібратор [6, 7]

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

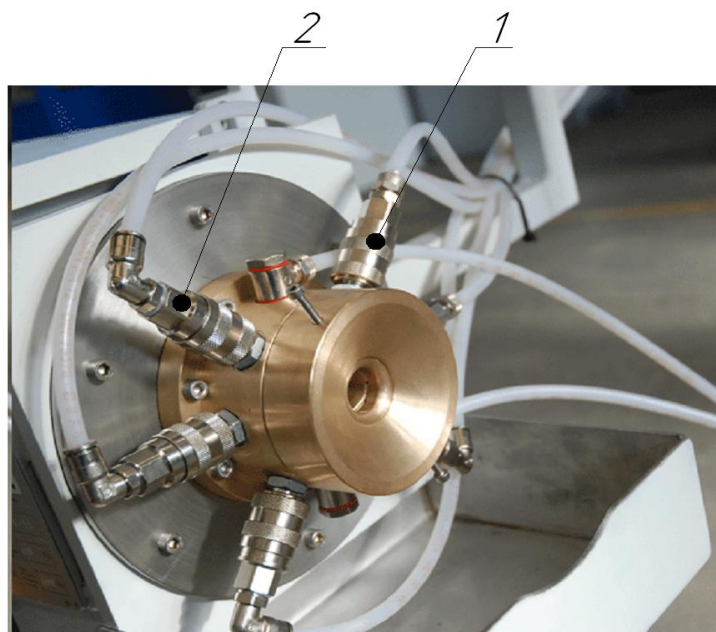
Прогрес в проектуванні екструзійного обладнання дає змогу підвищити продуктивність одночерв'ячних екструдерів із приготуванням розплаву полімеру високої якості. Однак наступне охолодження трубної заготовки не дає можливості повністю реалізувати потенціал екструзійного обладнання. Тому слід підвищувати ефективність роботи системи охолодження й зосередити подальші дослідження на розробленні ефективних засобів охолодження трубної заготовки [5]. Найбільш суттєвим впливом процесу калібрування на продуктивність екструзійної лінії є екструзія труб з поліпропілену діаметром 12÷25 мм (найбільш поширені типорозміри для систем гарячого водопостачання). Ці типорозміри (перший типорозмірний ряд) калібруються на швидкостях від 5 до 12 м/хв (0,083÷0,2 м/с), і навіть більше, тому конструкції калібраторів значно змінились, а саме: з'явилося

кільце поливу [13] (рисунок 1.12), функція якого полягає у рівномірному зрошуванні заготовки труби перед калібратором.



1 – кільце зрошуюче; 2 – рубашка калібру (інтенсивне водяне охолодження, на мале значення вакууму); 3 – гільза калібратору

Рисунок 1.18 – Калібратор [13]



1 – штуцера підводу–відводу води охолоджуючої для першої зони рубашки калібратору (зона без вакууму); 2 – штуцера підводу–відводу води охолоджуючої для другої зони рубашки калібратору (зона з малим значенням вакууму)

Рисунок 1.19 – Калібратор [14]

Попереднє зрошування дозволяє отримати на поверхні заготовки тонку тверду плівку кристалічного поліпропілену, та зменшити сили тертя трубної заготовки по стінках калібратору.

Найбільш сучасні конструкції калібрів містять дві зони рубашки калібру, для поступового нарощування вакууму по довжині калібру, [14] (рисунок 1.13).

Додатково, з'явився конструктивний елемент – "рубашка калібру", функція якої – забезпечити подальше охолодження трубної заготовки до отримання на її поверхні твердої плівки кристалічного поліпропілену. У рубашці значення вакууму не більше 0,005 МПа, що достатньо для утримання форми заготовки труби, але не достатньо для створення сили тертя, здатної розірвати тверду плівку кристалічного поліпропілену на поверхні трубної заготовки.

1.8 Відома методика розрахунку калібруючого інструменту

Відома методики [25, 26] розрахунку пристрою калібруючого.

Метою розрахунку є визначення мінімальної необхідної довжини калібруючої гільзи (рисунок 1.20).

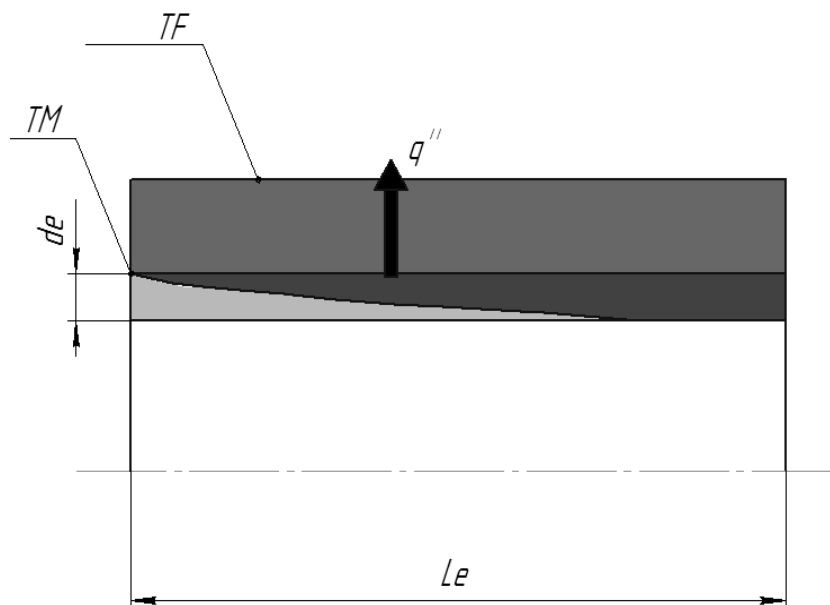


Рисунок 1.20 – Схема охолодження заготовки в середині калібруючої гільзи

Вхідні дані:

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

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

T_F – температура охолоджувача, °C;

T_E – температура кристалізації, °C;

ρ – густина матеріалу заготовки, кг/м³;

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

λ – теплопровідність, Вт/(м·°C);

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°C);

q'' - тепловий потік через поверхню, Вт.

Одновимірною теплопередачею в плоскому тілі описується рівнянням нестационарної теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1.1)$$

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 (λ , ρ , C_p);
- геометрія профілю і його розміри постійні (усадка не враховується);
- граничні умови постійні (α , T_F);
- рівномірний розподіл початкової температури (в момент часу $t=0$ температура в будь-якій точці рівна T_M).

Аналітичне рішення рівняння (1.1) наведено в [27]:

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

При цьому δ 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 / λ) 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 ступеня охолодження в часі для будь-якої точки плоского тіла, можна помітити, 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

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

В роботах [28, 29] використовуються різні методи спрощення рівняння (1.10), а також дається їх порівняльний аналіз. Ці методи основані на експериментальних даних.

Процедура описана в роботі [29], 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 екструдату α :

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

Даний розрахунок ведеться без урахування зміни агрегатного стану трубної заготовки.

1.9 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 [30].

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 [33, 34].

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 за нормальних умов [33]:

Густина, кг/м ³	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 1.21 – 1.24 зображено залежності теплофізичних властивостей поліпропілену густини 865 кг/м³ за нормальних умов від температури при тиску 0,1 МПа, побудованих за даними [34].

Для підвищення ударної в'язкості будівельних виробів слід застосовувати поліпропілен з потрібним індексом розплаву і поєднувати його з синтетичними каучуком, поліізобутиленом і бутил-каучуком [35].

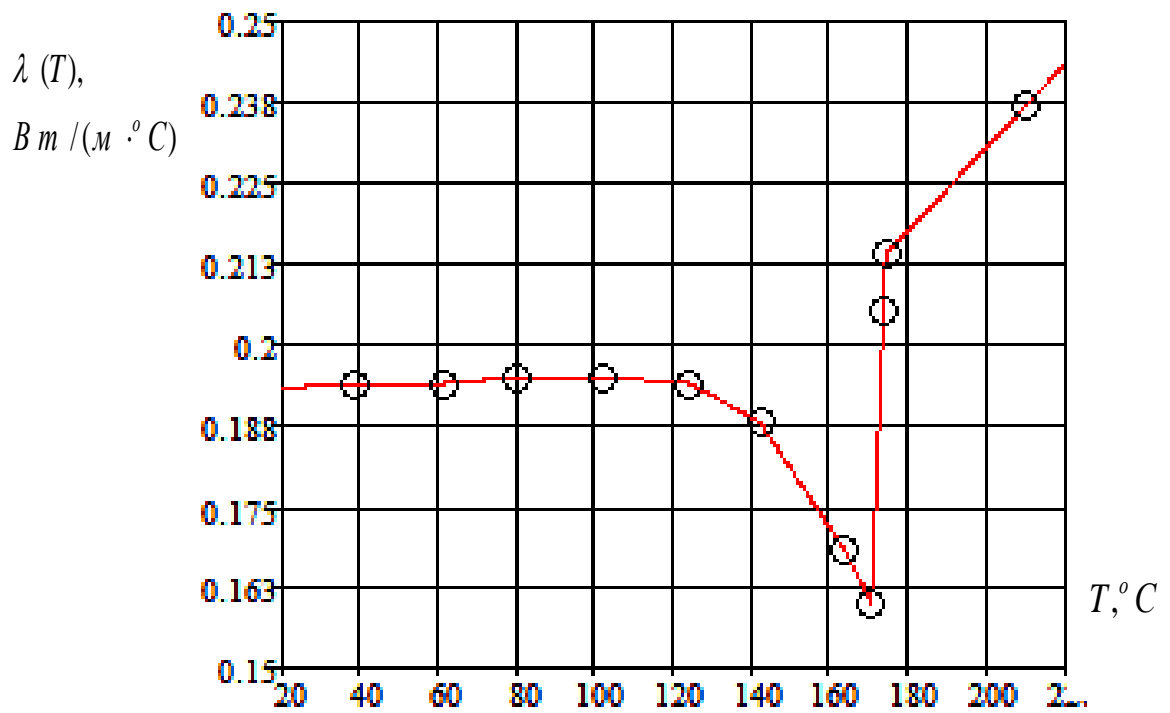


Рисунок 1.21 – Залежність теплопровідності поліпропілену від температури

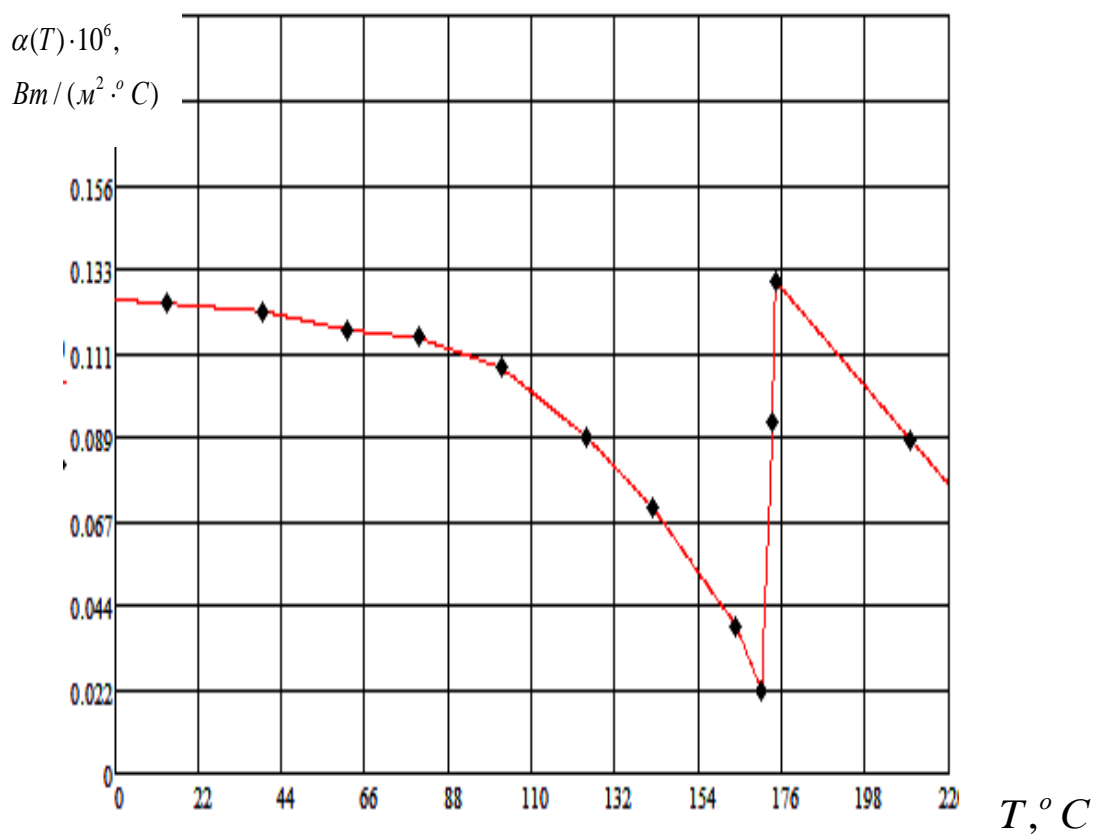


Рисунок 1.22 – Залежність температуропровідності поліпропілену від температури

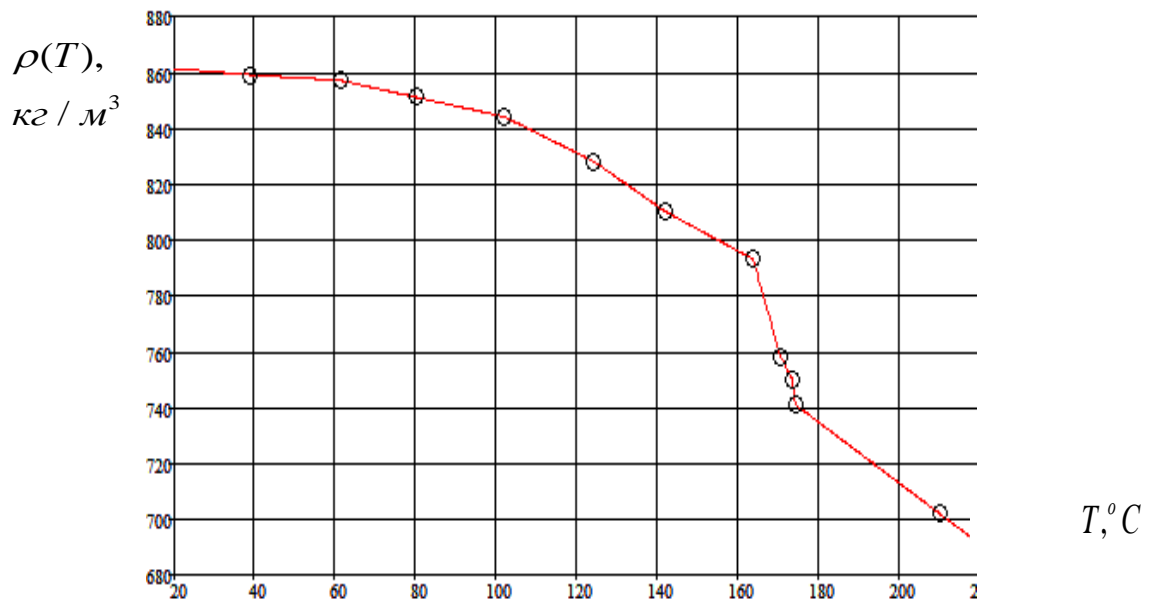


Рисунок 1.23 – Залежність густини поліпропілену від температури

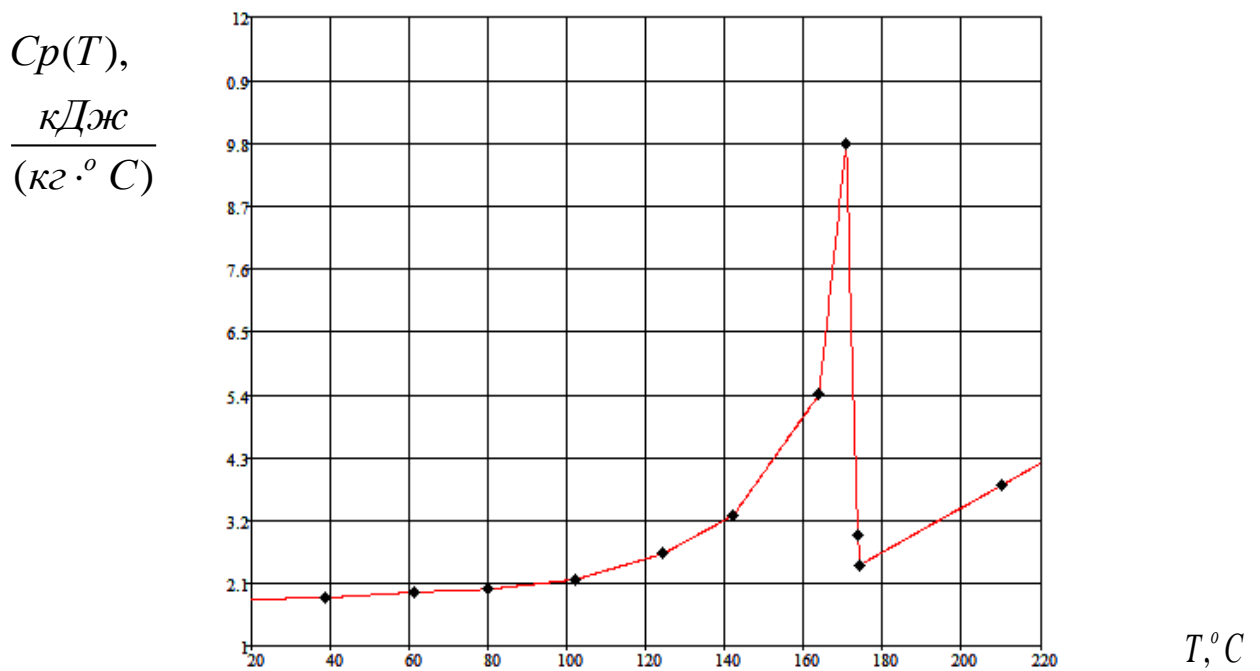


Рисунок 1.24 – Залежність теплоємності поліпропілену від температури

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 для зовнішньої каналізації випускають діаметром 100, 150, 200, 250 мм, для гарячого

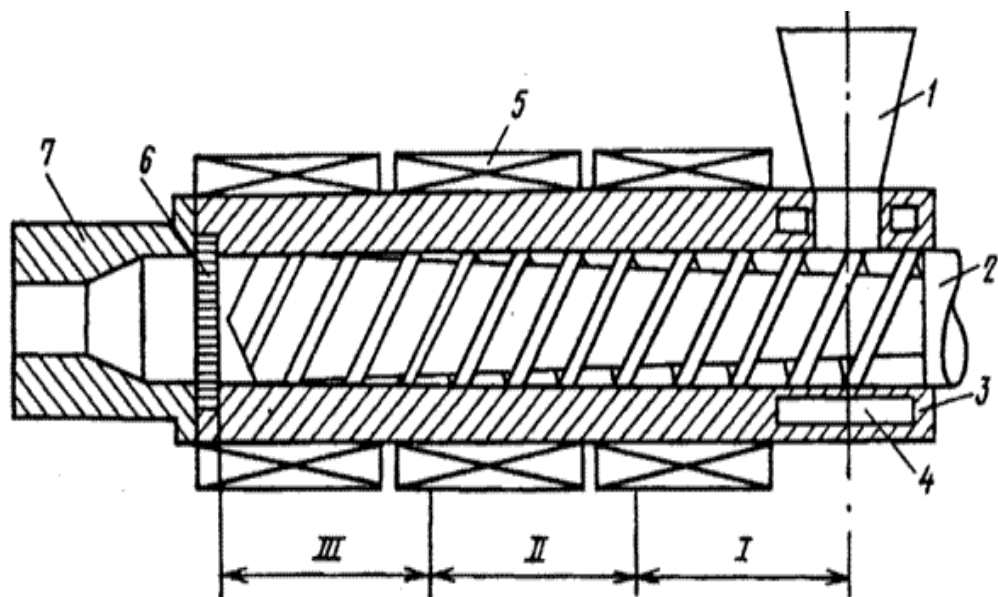
водопостачання діаметром 10, 12, 16, 20, 25, 32 ... 110 мм. Вони більш міцні, ніж труби з поліетилену, значно більш теплостійкі, але по морозостійкості поступаються поліетиленовим трубам [36].

1.10 Черв'ячні екструдери для переробки полімерів

Перед потраплянням до калібруючого обладнання, полімер, що знаходиться ще в гранулах, проходить через спеціальний пристрій, що носить назву екструдер.

Екструдери мають широке застосування для підготовки розплавів полімеру в екструзійних лініях, ливарних машинах, при роздувному формуванні та інших випадках. Найбільш розповсюдженими є одночерв'ячні екструдери, завдяки відносній простоті конструкції, і, незважаючи на їх досить вузьку спеціалізацію, прогнозується їх подальше широке застосування [37].

Конструкція одночерв'ячного екструдера представлена на рисунку 1.25 [38].



- 1 – бункер; 2 – шнек; 3 – циліндр, 4 – порожнина для циркуляції води;
5 – нагрівач; 6 – решітка з сітками; 7 – формуюча голівка;
I, II, III – технологічні зони.

Рисунок 1.25 – Схема одночерв'ячного екструдера [38]

Основними елементами екструдера є циліндр 3, що обігривається 5, шнек 2, сітки, що розміщуються на решітці 6, і формуюча голівка 7. Залежно від природи полімеру, технологічних режимів переробки застосовуються шнеки різного профілю, зокрема з різним характером зміни глибини нарізки по довжині шнека.

Матеріал, що перероблюється, подається з бункера 1 у канал шнека 2. Шнек обертається у середині корпусу. Нагрівання циліндра 3 до температури переробки здійснюється зовнішніми нагрівниками 5. Матеріал, що перероблюється, при русі по гвинтовому каналу шнека нагрівається, пластифікується і у вигляді розплаву продавлюється через голівку 7, у якій в окремих випадках встановлюється пакет сіток 6. Для запобігання налипання полімеру до шнека в зоні воронки 1 матеріальний циліндр 3 охолоджується холодною водою, яка подається в сорочку обігріву 4.

1.11 Гідравлічний розрахунок формуючого інструменту

1.11.1 Визначення перепаду тиску в формуючому інструменті

Метою гідравлічного розрахунку є визначення залежності між перепадом тиску по довжині каналу, продуктивністю та геометричними розмірами каналу [38]. Оскільки розміри перерізу каналу визначаються формою виробу і, очевидно, в розрахунку приймаються незмінними, гідравлічним розрахунком визначається для конкретного мундштука зв'язок перепаду тиску, продуктивності та довжини формуючого каналу. Ці величини для ньютонівської рідини зв'язані простим співвідношенням:

$$Q = \frac{K_f \cdot \Delta p}{\mu}, \quad (1.12)$$

де Q – об'ємна витрата м³/с; Δp – перепад тиску по довжині каналу, МПа; μ – в'язкість, Па·с; K_f – коефіцієнт геометричної форми каналу.

Для розплавів полімерів можна застосовувати «удавану», або «ефективну», в'язкість, визначену для каналу тієї ж форми, що й форма каналу, який необхідно розрахувати. Так як для перерізу відмінної форми різним буде значення реологічної константи.

Розрахунок швидкості зсуву для циліндричного каналу ньютонівської рідини:

$$\gamma = \frac{32 \cdot Q}{\pi \cdot D^3}, \quad (1.13)$$

де D – діаметр каналу.

Розрахунок швидкості зсуву для циліндричного каналу степеневі рідини:

$$\gamma = \frac{8 \cdot Q \cdot (k + 3)}{\pi \cdot D^3}, \quad (1.14)$$

де k – ступінь нен'ютонівської рідини.

Розрахунок коефіцієнта геометричної форми для циліндричного каналу ньютонівської рідини:

$$K_f = \frac{128 \cdot L}{\pi \cdot D^4}, \quad (1.15)$$

де L – довжина каналу.

Розрахунок коефіцієнта геометричної форми для циліндричного каналу степеневі рідини:

$$K_f = \frac{2^{2 \cdot k + 3} \cdot (k + 3) \cdot L}{\pi \cdot D^{k + 3}}. \quad (1.16)$$

Розрахунок перепаду тиску для циліндричного каналу ньютонівської рідини:

$$\Delta p = \frac{128 \cdot Q \cdot L \cdot \mu}{\pi \cdot D^4}. \quad (1.17)$$

Розрахунок перепаду тиску для циліндричного каналу степеневі рідини:

$$\Delta p = \frac{L}{D \cdot \frac{(k+3)}{k}} \cdot \left[\frac{2^{2 \cdot k + 3} \cdot (k+3) \cdot Q}{\pi \cdot a} \right]^{\frac{1}{k}}, \quad (1.18)$$

де a – дослідний коефіцієнт.

Розрахунок швидкості зсуву для циліндричного кільцевого каналу ньютонівської рідини:

$$\gamma = \frac{6 \cdot Q}{\pi \cdot D_m \cdot H^2}, \quad (1.19)$$

де D_m – середній діаметр; H – висота полімеру.

Розрахунок швидкості зсуву для циліндричного кільцевого каналу ступеневої рідини:

$$\gamma = \frac{8 \cdot Q \cdot (k+2)}{\pi \cdot (D_1^2 - D_2^2) \cdot H}, \quad (1.20)$$

де D_2 – внутрішній діаметр каналу; D_1 – зовнішній діаметр каналу.

Розрахунок коефіцієнта геометричної форми для циліндричного кільцевого каналу ньютонівської рідини:

$$K_f = \frac{12 \cdot L}{\pi \cdot D_m \cdot H^3}. \quad (1.21)$$

Розрахунок коефіцієнта геометричної форми для циліндричного кільцевого каналу ступеневої рідини:

$$K_f = \frac{(k+2) \cdot 2^{k+1} \cdot L^k}{\pi \cdot D_m \cdot H^{k+2}}. \quad (1.22)$$

Розрахунок перепаду тиску для циліндричного кільцевого каналу ньютонівської рідини:

$$\Delta p = \frac{12 \cdot \mu \cdot Q \cdot L}{\pi \cdot D_m \cdot H^3}. \quad (1.23)$$

Розрахунок перепаду тиску для циліндричного кільцевого каналу ступеневої рідини:

$$\Delta p = L \cdot \left[\frac{2^{k+1} \cdot Q \cdot (k+2)}{\pi \cdot D_m \cdot H^{k+2} \cdot a} \right]^{\frac{1}{k}}. \quad (1.24)$$

1.11.2 Визначення коефіцієнту опору в формуючому інструменті

Головка екструдера – це профілюючий інструмент, що надає необхідну форму струменю полімеру, що видавлюється з екструдера. Від ступеня досконалості конструкції головки в значній мірі залежить точність поперечних розмірів виробу що екструдується та якості його поверхні.

Одна з основних проблем, які потрібно вирішувати при конструюванні головок, - визначення коефіцієнта опору, що дозволяє розраховувати тиск екструзії та визначати фактичну продуктивність екструзійного апарата [37].

Об'ємна продуктивність визначається як рішення системи двох рівностей: описуючого зовнішню характеристику екструдера $Q = Q(P)_N$ при заданих умовах (N, T_{bt}) і описуючого зовнішню характеристику головки $Q = Q(P_r)_T$. Рішення цих рівнянь можна знаходити як числовим так і графічним методом, наносячи на один графік обидві характеристики.

При розрахунку сумарного коефіцієнту опору повний перепад тиску в головці P_r , що відповідає певній заданій величині об'ємної витрати, складається з перепаду тисків, необхідних для подолання опору кожної ділянки каналу окремо:

$$P_r = \sum_{i=1}^m \Delta P_i, \quad (1.25)$$

де m – число окремих ділянок.

В загальному випадку об'ємна витрата через канал з нероз'ємною геометрією залежить від перепаду тиску наступним чином:

– у випадку моделювання властивостей середовища ньютонівської рідини

$$Q = \frac{K_r \cdot P_r}{\eta}. \quad (1.26)$$

– у випадку моделювання властивостей середовища аномального в'язкого середовища

$$Q = K_r' \cdot \left(\frac{P}{\mu} \right)^n, \quad (1.27)$$

де K_r , K_r' – відповідно коефіцієнти опору при течії ньютонівської та псевдопластичної рідини.

Маючи значення коефіцієнта опору для кожної з елементарних ділянок по окремої, можна записати в разі моделювання розплаву ньютонівської рідини:

$$\Delta P_i = \frac{Q \cdot \eta_i}{K_{ri}}. \quad (1.28)$$

Розрахувавши значення ефективної в'язкості та коефіцієнта опору для кожного елемента каналу, можна визначити сумарний коефіцієнт опору по формулі:

$$K_{r\Sigma} = \left[\sum_{i=1}^m \frac{\eta_i}{\eta_1} \cdot \frac{1}{K_i} \right]^{-1}. \quad (1.29)$$

Знаючи $K_{r\Sigma}$, можна визначити тиск в головці:

$$P_r = \frac{Q \cdot \eta_1}{K_{r\Sigma}}, \quad (1.30)$$

де η_1 – ефективна в'язкість в каналі профілюючої матриці.

З урахуванням аномалії в'язкості добувається не введенням ефективної в'язкості, а безпосередньо інтегруванням рівняння руху ступеневої рідини, то сумарний коефіцієнт опору визначається рівнянням:

$$K_{r\Sigma}' = \left\{ \sum_{i=1}^m \left[\frac{\mu_i}{\mu_1} \cdot \left(\frac{1}{K_{ri}'} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^{-n}. \quad (1.31)$$

Визначимо коефіцієнт опору і значення пристінної швидкості зсуву γ_{ω} для елементарних випадків течії.

Використовуючи метод ефективної в'язкості, можна записати для циліндричного каналу, рисунок 1.26:

$$K_r = \frac{\pi \cdot R^4}{8 \cdot L}. \quad (1.32)$$

$$\gamma_{\omega} = \frac{Q \cdot (n+3)}{\pi \cdot R^3}. \quad (1.33)$$

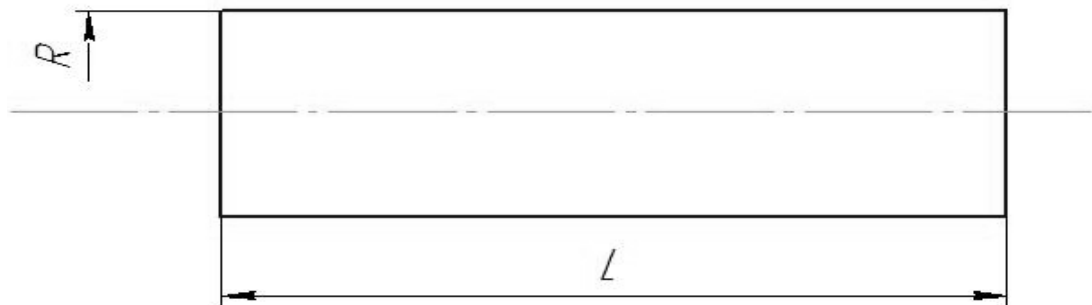


Рисунок 1.26 – Циліндричний канал

Використання степеневого закону дає:

$$K_r' = \frac{\pi \cdot R^{n+3}}{[2^n \cdot (n+3) \cdot L^n]}. \quad (1.34)$$

Кільцевий канал зображено на рисунку 1.27

Використовуючи метод ефективної в'язкості маємо:

$$K_r = \frac{\pi \cdot (R_0 + R_i) \cdot (R_0 + R_i)^3}{12 \cdot L}. \quad (1.35)$$

$$\gamma_{\omega} = \frac{6 \cdot Q}{[\pi \cdot (R_0^2 - R_i^2) \cdot (R_0 - R_i)]}. \quad (1.36)$$

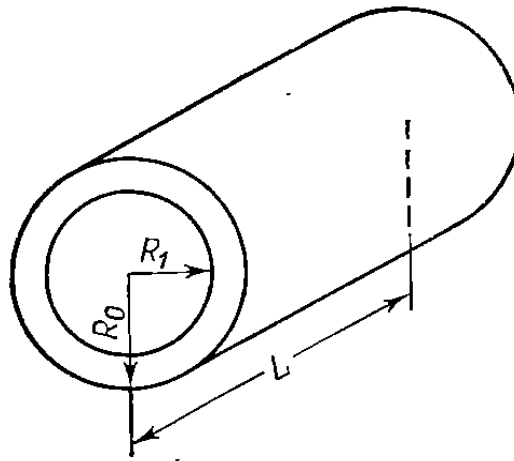


Рисунок 1.27 – Кільцевий канал

Використовуючи степеневий закон отримуємо:

$$K_r' = \frac{\pi \cdot (R_o - R_i)^{n+2} \cdot (R_o + R_i)}{[(n+2) \cdot 2^{n+1} \cdot L^n]} \quad (1.37)$$

1.12 Критерії якості труб з поліпропілену

Основною проблемою при виготовленні труб з полімеру є овальність. Саме за нею регламентується придатна труба чи ні. За ДСТУ [34] труби малого діаметра являються нормальними при овальності $\leq 3\%$.

Спочатку, після експериментів, розраховується середній діаметр труби, який визначається за формулою:

$$d_{cp} = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} \quad (1.38)$$

де d_{\max} - максимальний діаметр труби, d_{\min} - мінімальний діаметр.

Овальність визначається експериментально, після чого розраховується за формулою:

$$\text{Овальність} = \frac{d_{\max} - d_{cp}}{d_{cp}} \times 100\% \quad (1.39)$$

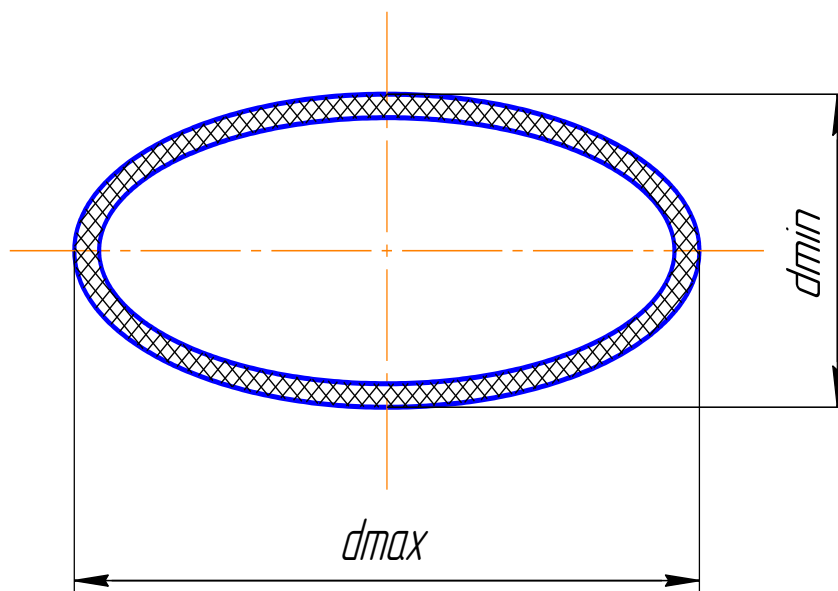
Дані діаметри зображені на рисунку 1.28.

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 Δ в процентах обчислюють за формулою:

$$\Delta = \frac{L + L_0}{L_0} 100 \quad (1.40)$$

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



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

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

Рисунок 1.28 – Визначення овальності [34].

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

$$\alpha = \frac{(l / l_0)(l - l_0)}{T_2 - T_1} \quad (1.41)$$

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 σ_{pt} , виражене в МПа, обчислюють за формулою:

$$\sigma_{pm} = \frac{F_{pm}}{A_0} \quad (1.42)$$

де F_{pt} – розтягувальне навантаження при досягненні межі текучості, Н;
 A_0 – початковий поперечний переріз зразка, мм².

Значення відносного подовження при розриві ε_p у відсотках обчислюють за формулою, %:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta L_{op}}{L_0} 100\% \quad (1.43)$$

де ΔL_{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:

$$P_{вип} = \frac{e_{ymin}}{d_{emmax} - e_{ymin}} 2\sigma_0 \quad (1.44)$$

де σ_0 – початкове напруження в стінці труб, МПа; d_{emmax} – максимальний середній зовнішній діаметр зразків, мм; e_{ymin} – мінімальна товщина стінки трубного зразка, мм.

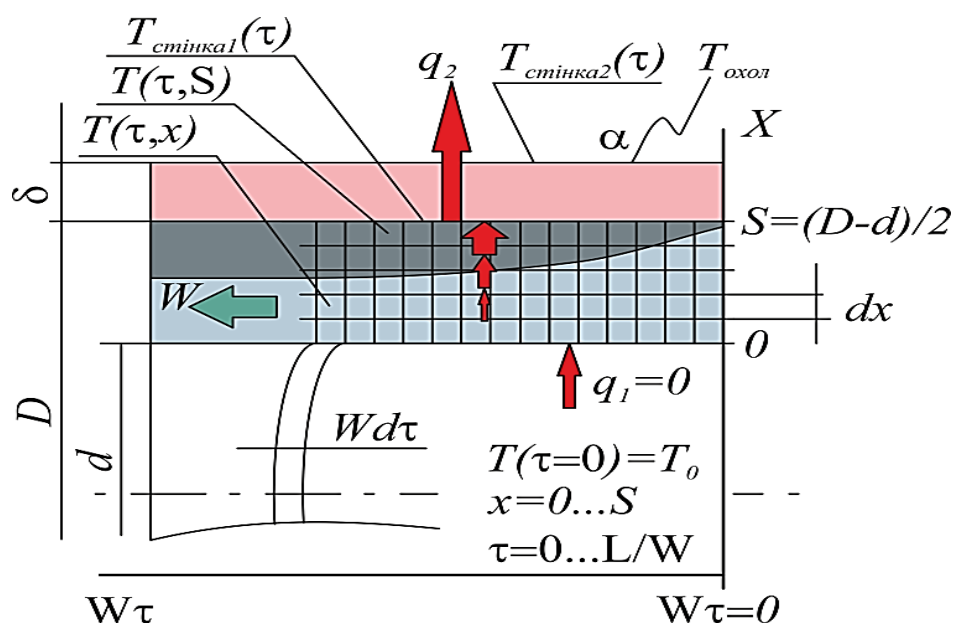
Результати випробувань вважаються позитивними, якщо:

- 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.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КАЛІБРУВАННЯ ТРУБ З ПОЛІПРОПІЛЕНУ МЕТОДОМ ЕКСТРУЗІЇ

2.1 Фізична модель переносу теплоти від трубної заготовки через стінку калібруючої гільзи

До калібруючого пристрою надходить трубна заготовка з поліпропілену. Проходячи вздовж отвору калібратору екструдат торкається до його стінки, та відбувається склування труби. Фізична модель процесу калібрування труби зображено на рисунку 2.1.



q_1, q_2 - тепло, що надходить до заготовки та виходить з калібратору;
 D – зовнішній діаметр заготовки; d – внутрішній діаметр заготовки; W – швидкість, з якою трубна заготовка рухається вздовж калібратору; δ – товщина стінки калібратору; dx – поділ заготовки по висоті; $Wd\tau$ – поділ шару по довжині; S – товщина трубної заготовки; $T(\tau, x)$ – температура певної точки заготовки; $T(\tau, S)$ – температура заготовки в точці контакту з калібратором; $T_{\text{стінка1}}(\tau)$ – температура внутрішньої стінки калібратора; $T_{\text{стінка2}}(\tau)$ – температура зовнішньої стінки калібратора; $T_{\text{охол}}$ – температура води, що охолоджує калібратор;

Рисунок 2.1 – Фізична модель процесу калібрування труб з поліпропілену

Через калібратор трубна заготовка протягується з заданою швидкістю, яка визначається продуктивністю екструдера та типорозміром труби.

Мале значення теплопровідності поліпропілену (0,3 Вт/(м·К)) лімітує процес переносу теплоти. Для охолодження калібруючої гільзи, по її зовнішній частині протікає вода, що охолоджує матеріал гільзи, та відводить теплоту.

Однією із проблем під час склування заготовки є утяжка, яка дорівнює відносному зменшенню питомого об'єму при склуванні поліпропілену. Зменшення питомого об'єму, в свою чергу дорівнює різниці густин поліпропілену у вигляді розплаву (аморфна фаза), та поліпропілену після склування (містить сфероліти – кристали з впорядкованою макромолекулярною структурою). На рисунку 1.21 представлено залежність густини поліпропілену від температури.

$$\gamma = \frac{\rho(t_1) - \rho(t_2)}{\rho(t_1)} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

де $\rho(t_1)$ – густина поліпропілену після охолодження; $\rho(t_2)$ – густина поліпропілену на початку процесу охолодження;

Зробимо припущення – розплав після екструдера має температуру 200°C (473К), температура в ванні складає 20°C (293К), тоді об'ємна усадка з [36, 37] складатиме: $\gamma = 16\%$, лінійна усадка, відповідно: 5,2%.

Таким, чином, діаметр калібруючої гільзи необхідно виготовити більшим за зовнішній діаметр труби, що виготовляється.

Певний вплив на процес усадки в калібраторі має значення вакууму, який забезпечує внутрішній надлишковий тиск (атмосферний тиск мінус тиск у ванні) на трубу і зменшує ефект усадки.

Тиск утворюється за допомогою спеціального насосу, що утворює вакуум в так званій «вакуумній ванні». Коли тиск достатній, заготовка труби з поліпропілену "присмоктується" до внутрішньої поверхні калібруючої гільзи через щілини в ній, і утримується в контакті з нею до тих пір, поки

затверділа плівка на її поверхні не збільшиться настільки, що сили усадки подолають вакуум. Тоді поверхня труби відривається від внутрішньої поверхні калібруючої гільзи, через що втрачається термічний контакт між ними.

На початку калібратору поверхня трубної заготовки не має твердої (охолодженої) плівки, через що сама трубна заготовка не має механічної міцності і може обірватись у калібраторі при виникненні сил тертя спричинених появою вакууму.

Саме тому сучасні конструкції трубних калібраторів для поліпропілену містять зрошуюче кільце (рисунок 1.8), а перша щілина у гільзі виконана на відстані від входу трубної заготовки. Таким чином, забезпечується потрапляння трубної заготовки до вакуумної зони калібратору з міцною плівкою на поверхні.

Слід зауважити, що існує мінімальне значення вакууму для забезпечення необхідної овальності труби, яка після калібратору ще не повністю охолоджена і рухається у ванні. Сили, які діють на ще не повністю охолоджену трубну заготовку – сили тяжіння (якщо охолодження зрошуванням), або архімедова сила (при охолодженні зануренням).

Практично, перша вакуумна щілина калібруючої гільза розташована на відстані 20÷37 мм від входу, а мінімальне значення вакууму для труби з поліпропілену $\varnothing 16 \times 2,7$ мм – 0,1 бар (0,01 МПа), і для $\varnothing 32 \times 5,4$ мм – 0,25 бар (0,025 МПа).

Основним дефектом, що виникає при недостатньому значенні вакууму є повздожжня усадочна канавка.

Застосування нової методики розрахунку дозволить визначити мінімально необхідне значення вакууму вздовж калібруючої гільзи для утримання термічного контакту між трубною заготовкою та внутрішньою поверхнею калібруючої гільзи.

2.2 Математична модель перенесення теплоти від рухомої трубної заготовки до охолоджуючої рідини через стінку калібруючої гільзи

Диференційне рівняння нестационарного теплообміну представлено, як квазістационарний процес конвективного переносу теплоти.

Відповідно до наведеної фізичної моделі створено схему розрахунку (рисунок 2.2).

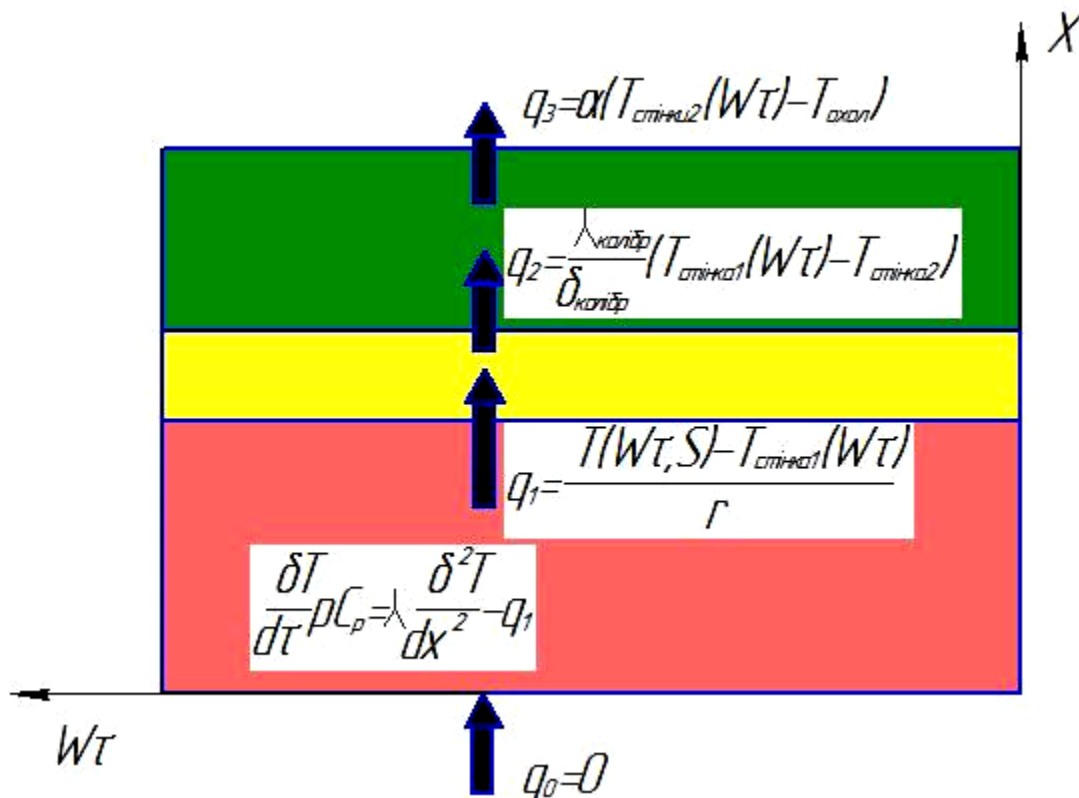


Рисунок 2.2 – Схема розрахунку процесу конвективного переносу теплоти

Прийmemo такі 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. Механічні властивості полімеру залежать лише від температури та не залежать від часу.

3. Перенесення теплоти в матеріалі гільзи калібратору відбувається тільки в радіальному напрямку.

4. Модель є пласкою використовуються залежності в декартових системах координат.

Для коректного запису розділяємо в перерізі заготовку на три різні шари, як зображено на рисунку 2.1.

Перший шар це внутрішня стінка заготовки, де екструдат контактує з повітрям($x=0$). В даному випадку відбувається віддача теплоти від гарячого повітря в середині трубної заготовки та власне стінкою труби і шаром заготовки, що тільки зайшов до калібруючої гільзи, з тим, що деякий час перебуває в ній.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \rho C_p = \lambda \frac{\partial^2 T}{dx^2} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial \tau} W \rho C_p = \lambda \frac{\partial^2 T}{dx^2} \Rightarrow \left. \frac{\partial T}{\partial \tau} \right|_{x=0} = \frac{\lambda \cdot d\tau}{\rho \cdot C_p} \frac{\partial^2 T}{dx^2} \quad (2.1)$$

У внутрішньому шарі заготовки відбувається теплообмінний процес між шаром заготовки, що в калібраторі, та шаром, що тільки зайшов до калібруючої гільзи.($0 < x < S$)

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{dx^2} \Rightarrow \left. \frac{\partial T}{\partial \tau} \right|_{0 < x < S} = \frac{\lambda d\tau}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{dx^2} \quad (2.2)$$

Для точки з'єднання заготовки з внутрішньою стінкою калібруючої гільзи $x=S$, додається додаткова умова – теплопередачі через стінку калібратора:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial \tau} \rho C_p = \lambda \frac{\partial^2 T}{dx^2} - q_1 \\ q_1 = \frac{T(W\tau, S) - T_{стінка1}(W\tau)}{r} \\ q_2 = \frac{\lambda_{калібр}}{\delta_{калібр}} [T_{стінка1}(W\tau) - T_{стінка2}(W\tau)] \\ q_3 = \alpha [T_{стінка2}(W\tau) - T_{охол}] \\ q_1 = q_2 = q_3 \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Представивши 3-тю складову ($x=S$) у термічних опорах, знайдемо лінійну залежність питомого теплового потоку від температури зовнішньої поверхні полімерної заготовки труби:

$$q = \frac{T(\tau, S) - T_{охол}}{r_{\Sigma}} \Rightarrow \left| r_{\Sigma} = r + \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{калібр}}{\lambda_{калібр}} \right| \Rightarrow q(T(\tau, S)) = \frac{T(\tau, S) - T_{охол}}{r + \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{калібр}}{\lambda_{калібр}}}$$

Відповідно підставивши все в перше рівняння системи (2.3), отримаємо:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} W \rho C_p = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_1 \Rightarrow \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=S} = \frac{\lambda \cdot d\tau}{\rho \cdot C_p} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{q_1}{\lambda} \right] \quad (2.4)$$

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

$$\begin{aligned} -\lambda_{нол} \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=0} &= \alpha (t(x, y=0) - t_{нов}) , \\ \lambda_{нол} \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=S} &= -\lambda_{см} \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=S} , \\ t(x=0, y=0 \dots S) &= t_0 , \end{aligned}$$

де $\lambda_{нол}$ - теплопровідність розплаву, Вт/(м·К); $\lambda_{см}$ - теплопровідність матеріалу стінки калібратора (Бронза БрАЖ9 [33]), Вт/(м·К); $\delta_{см}$ - товщина стінки труби, що калібрується, м; α - коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої стінки труби до повітря всередині труби, Вт/(м²К), $t_{нов}$ – температура повітря всередині труби, °С.

2.3 Числовий розв'язок математичної моделі методом кінцевих різниць за явною схемою

Розв'язок даної математичної моделі здійснюється за допомогою середовища MathLAB та методу кінцевих різниць за явною схемою.

Використовуючи різницеві рівняння знаходимо найближчий розв'язок диференціального рівняння [34].

Етапи чисельного розв'язування диференційних рівнянь (ДР) у частинних похідних на ПК [35]:

1. У область розв'язування рівняння, яке розглядається, вводять рівномірну сітку $N \cdot M$ вузлових точок відповідно до характеру задачі і граничних умов.

2. Диференціальне рівняння, що розв'язується, записують у найзручнішій системі координат, замінюючи похідні кінцевими різницями, приводять його до вигляду різницевого рівняння. Отримане різницеве рівняння використовують далі для описування функціонального зв'язку між сусідніми вузлами сітки. Тобто різницеве рівняння записують для усіх вузлів сітки і отримують внаслідок цього систему $(N-1) \cdot (M-1)$ рівнянь з $(N-1) \cdot (M-1)$ невідомими.

3. Систему $(N-1) \cdot (M-1)$ рівнянь з $(N-1) \cdot (M-1)$ невідомими розв'язують одним із відомих швидких і ефективних чисельних методів, вибір яких визначається деякими властивостями системи рівнянь.

Схема за якою ведеться розрахунок зображена на рисунку 2.3, де для певного шару відбувається свій розрахунок.

Першу похідну $\frac{\partial T}{\partial t}$ замінимо центральною апроксимацією у вигляді наступного рівняння:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{t} \quad (2.5)$$

Результати програми представлені у вигляді наступних залежностей, представлених на рисунках 2.4, 2.5.

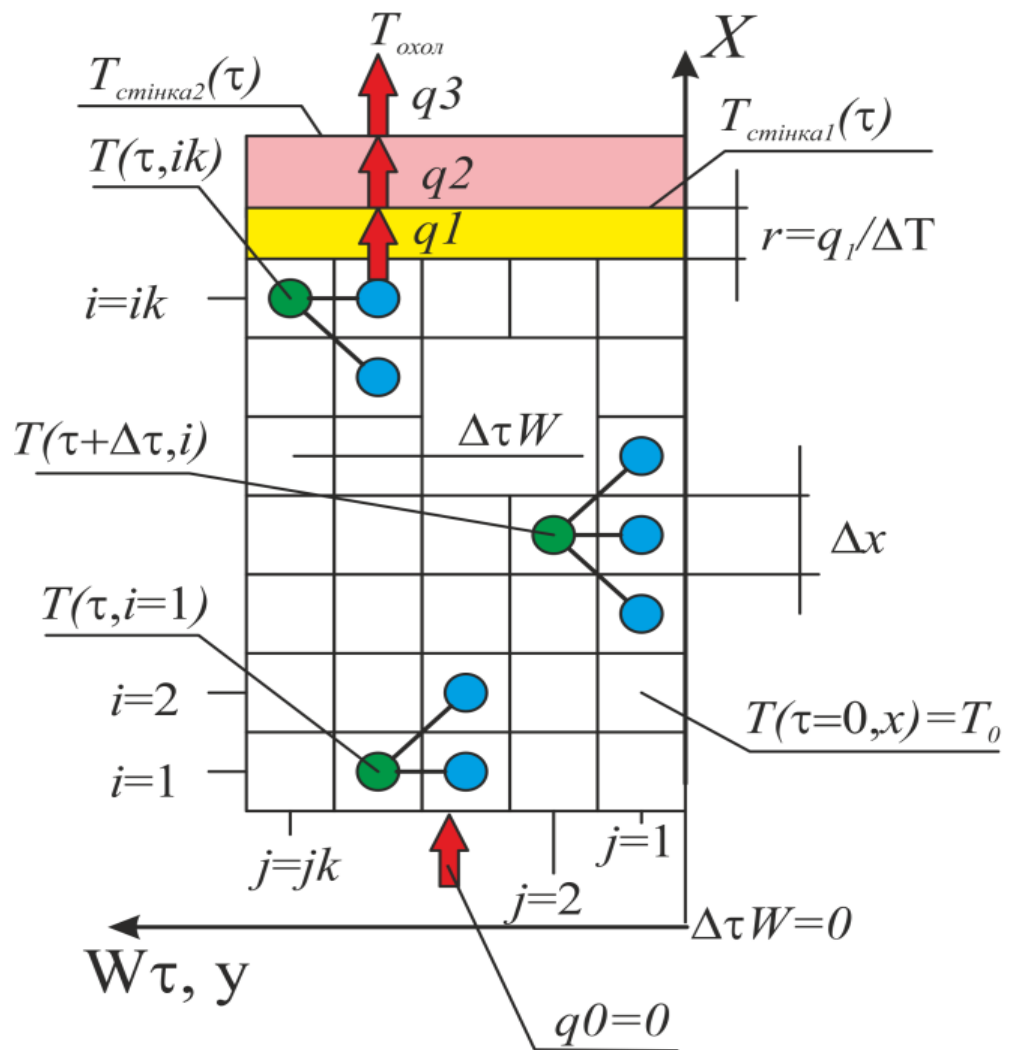


Рисунок 2.3 – Кінцево-різницева схема

Другу похідну $\frac{\partial^2 T}{dx^2}$ замінимо центральною апроксимацією у вигляді

наступного рівняння:

$$\frac{\partial^2 T}{dx^2} = \frac{T_{i+1}^n - 2 \cdot T_i^n + T_{i-1}^n}{h^2} \quad (2.6)$$

Розв'язок даного диференціального рівняння наведено в розділі 4.3.

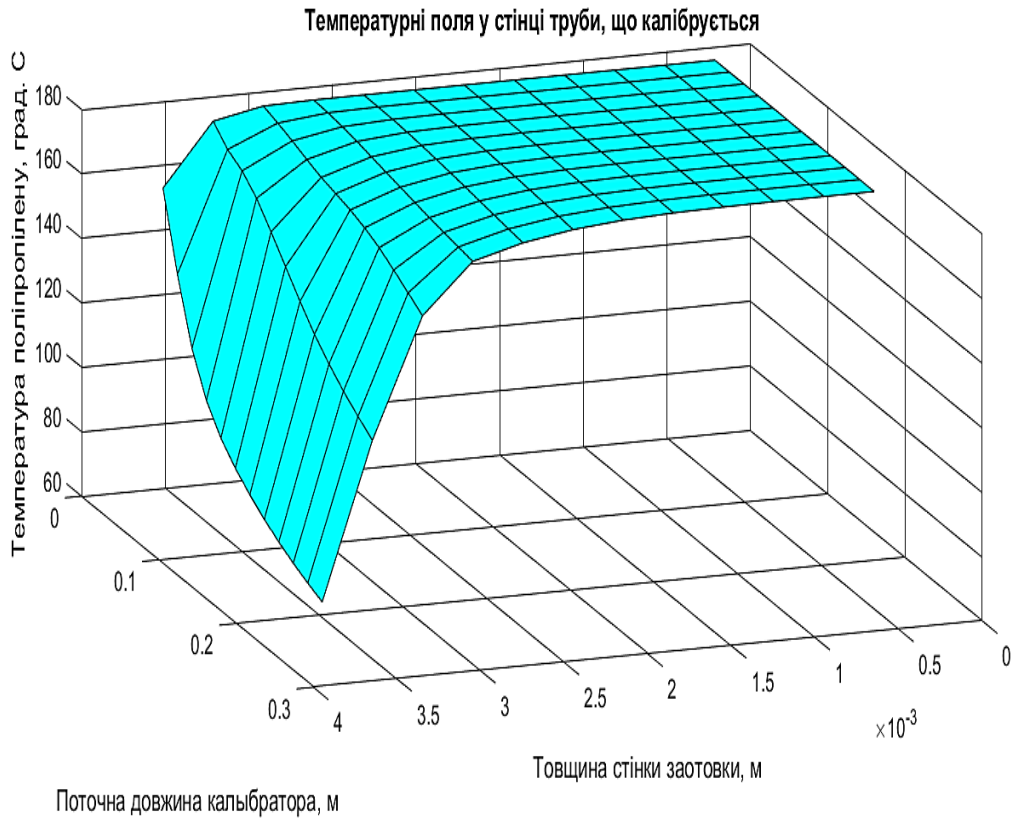


Рисунок 2.4 – Залежність температури поліпропілену від товщини стінки трубної заготовки та поточної довжини калібратора, отримана в результаті чисельного експерименту

Для задовільної збіжності результатів шаг по часу для явної схеми:

$$\Delta\tau < \frac{\rho \cdot C_p \cdot \Delta x^2}{2 \cdot \lambda} \Rightarrow \frac{\Delta y}{W} = \frac{L}{K \cdot W} < \frac{\rho \cdot C_p \cdot S^2}{2 \cdot \lambda \cdot N^2} \Rightarrow K > \frac{2 \cdot \lambda \cdot N^2 \cdot L}{\rho \cdot C_p \cdot S^2 \cdot W} \quad (2.7)$$

де N – кількість розбивок по товщині; K – кількість розбивок по довжині калібру.

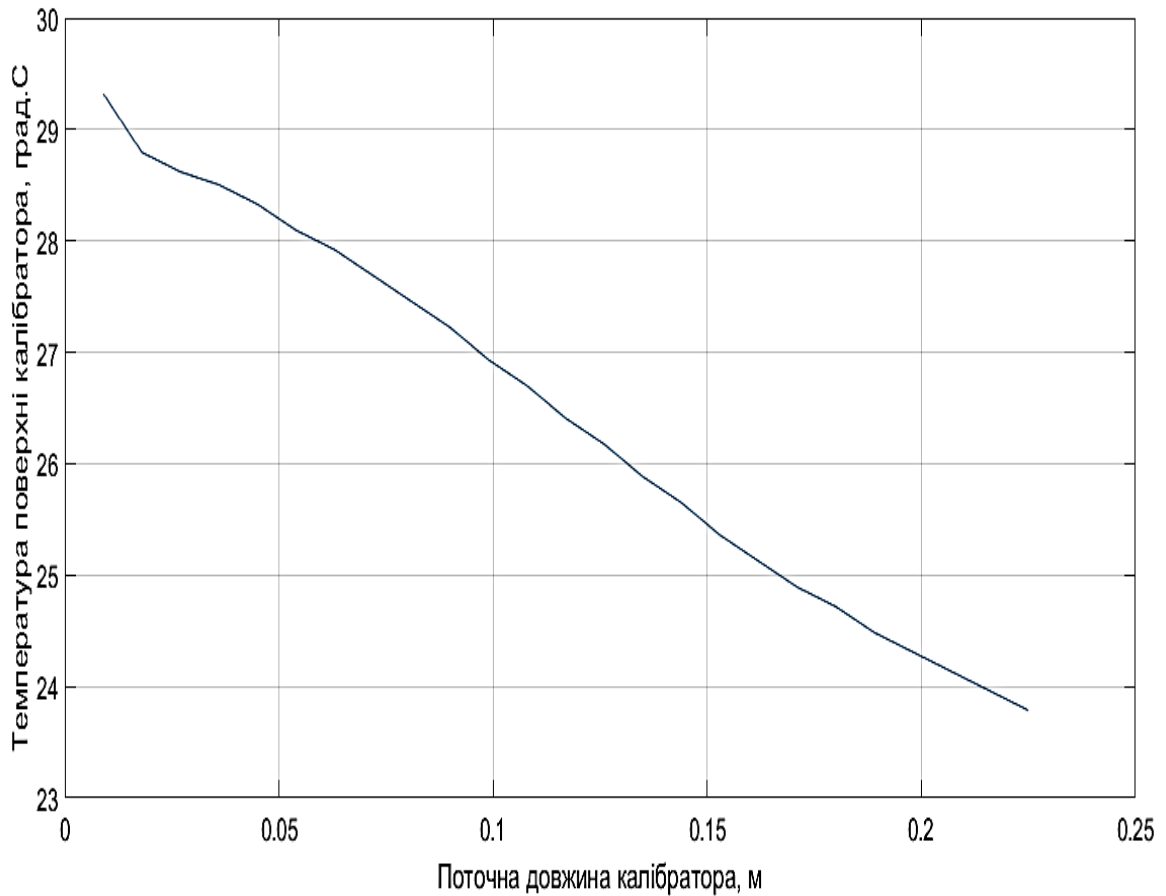


Рисунок 2.5 – Залежність температури поверхні калібратору від його довжини

2.4 Математична модель напруженого стану у матеріалі трубної заготовки

Державний стандарт України [2] регламентує граничні показники овальності труб з поліпропілену (таблиця 2.1).

Для забезпечення такої вимоги необхідне значення вакууму у ванні з калібратором (рисунок 2.6), 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 калібратору спричиняють її розрив. Таким чином, робота актуальна і результат може бути використано для оптимізації конструкції калібратору з метою підвищення продуктивності лінії.

Таблиця 2.1. 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

Схему калібрування труб з поліпропілену на промислових лініях наведено на рисунку 2.6.

Обравши модель квазістаціонарного процесу (система координат нерухома), рівняння збереження енергії [40]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{пол}}{\rho C_p} \nabla^2 t - \frac{q_v(t)}{\rho C_p} \quad (2.8),$$

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

поглинання теплоти при переході поліпропілену у кристалічний стан.

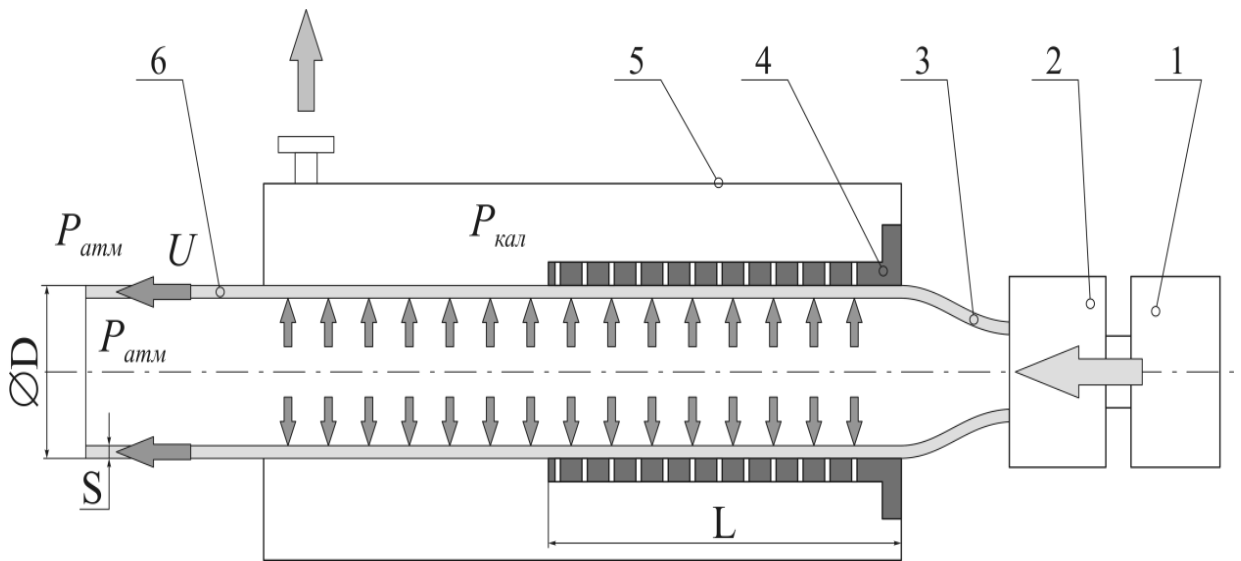
Розв'язання (3) у граничних та початкових умовах (2), при відомій швидкості труби дозволяє отримати температурне поле у стінці, та визначити товщину плівки затверділого розплаву $t(x, y) \leq t_{плавлення} = t_k \Rightarrow \delta = f(x)$, та температурне поле у плівці $t(x, y = (S - \delta) \dots S)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

Кристалізація полімеру викликає об'ємну усадку по діаметру:

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

$$= \left[\frac{\frac{1}{713} - \frac{1}{862}}{\frac{1}{713}} \right] \cdot 100\% = 17,26\%$$

де $V_{\text{аморфн}}$ – об'єм 1 кг поліпропілену у аморфній фазі (розплав), м³;
 $V_{\text{кристал}}$ – об'єм 1 кг поліпропілену у кристалічній фазі (твердий, після охолодження), м³; $\rho_{\text{аморфн}} = 713$ кг/м³ – густина поліпропілену у аморфній фазі (розплав); $\rho_{\text{кристал}} = 862$ кг/м³ – густина поліпропілену у аморфній фазі (розплав) [37,38].



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

Рисунок 2.6 – Схема калібрування труб з поліпропілену

Лінійна усадка визначається: $\gamma_l = \sqrt[3]{\gamma_V + 1} - 1 = \sqrt[3]{1,1726} - 1 = 5,39\%$

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:

$$\sigma_r = \gamma_1 E \quad ,$$

де $E = -0,07250t^2 + 6,32563t + 978,21106$, Па – модуль пружності поліпропілену в залежності від температури [41] в діапазоні температур від 65 °С до 165 °С.

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

$$\sigma_r(t) = \gamma_1 E(t) \quad |t = f_1(x, y)| \Rightarrow \sigma_r(x, y = (S - \delta) \dots S) = \gamma_1 E(f_1(x, y))$$

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

$$P_{\Sigma}(x) = P_{атм} - P_{кал}(x) \geq \frac{2\overline{\sigma}_r \delta(x)}{D} = \frac{2\gamma_1}{D} \int_{y=S-\delta}^{y=S} E(f_1(x, y)) dy$$

Розв'язок даного диференціального рівняння наведено в розділі 4.3.

Результати програми можна представити у вигляді наступного графіку, представленого на рисунку 2.7.

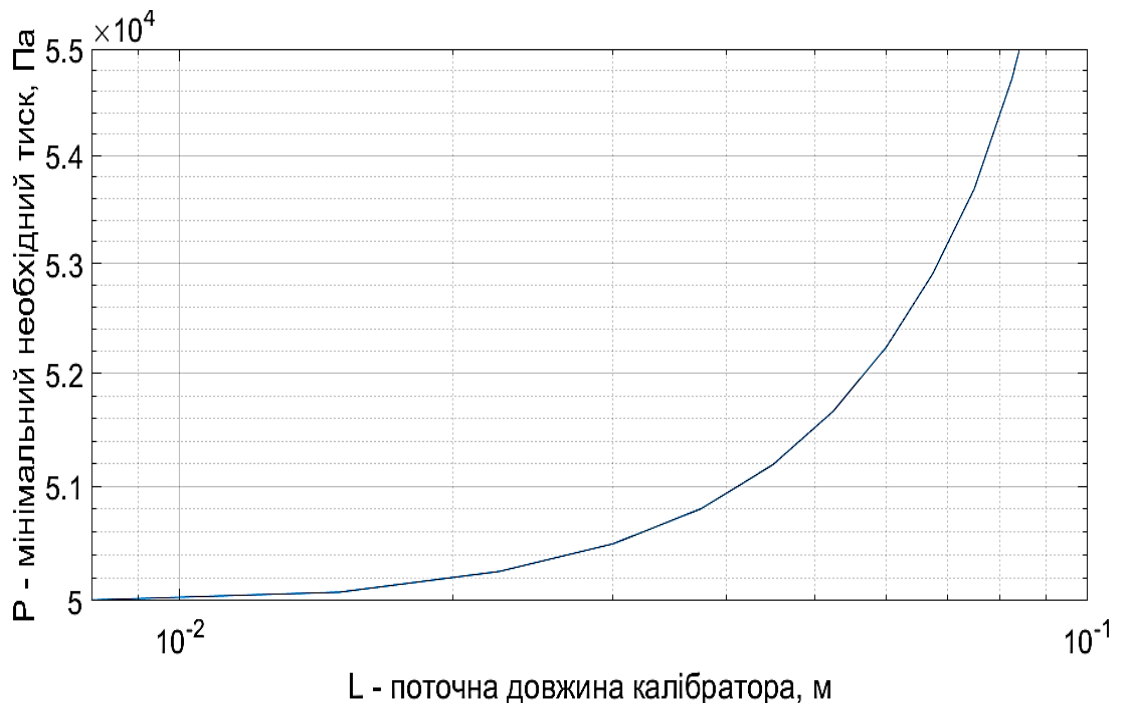


Рисунок 2.7 - Залежність мінімального значення вакууму від поточної довжини калібру для утримання термічного контакту

Для спрощення перепишемо рівняння результуючого тиску:

$$P(x_i) = \frac{2\sigma(T)dx}{D - 2x_i} \quad (2.9)$$

де $\sigma(T)$ – напруження поліпропілену, що змінюється за різної температури; D – зовнішній діаметр трубної заготовки; x_i – товщина шару і-того шару заготовки ($0 < x_i < S$); dx – товщина шару в заготовці.

2.5 Методика розв'язання математичної моделі переносу теплоти та умови збереження термічного контакту

Для розв'язання математичної моделі переносу теплоти та умови збереження термічного контакту необхідно слідувати за даною методикою:

1. Вибираємо кількість розбиття трубної заготовки по товщині та по часу (n та m).

2. Знаючи швидкість калібрування, довжину калібратора і товщину стінки трубної заготовки розраховуються кроки по часу і по довжині.

$$dx = \frac{S}{n}; \quad (2.10)$$

$$d\tau = \frac{L}{W \cdot m} \quad (2.11)$$

3. Для першого моменту часу визначаємо температуру всіх шарів ($i = 1 \dots n$)

$$T(i,1) = T_0 \quad (2.12)$$

4. Далі, починаючи з другого моменту часу, також визначаються температурні поля для граничних шарів (для першого і останнього) для першого шару ($j = 2 \dots m$)

$$T(1, j) = T(1, j-1) - \frac{\lambda \cdot d\tau}{\rho \cdot C_p \cdot dx} \left(\frac{T(1, j-1) - T(2, j-1)}{dx} \right) \quad (2.13)$$

$$T(n, j) = T(n, j-1) + \frac{\lambda \cdot d\tau}{\rho \cdot C_p \cdot dx} \left(\frac{T(n-1, j-1) - T(n, j-1)}{dx} - \frac{\left(\frac{T(n, j-1) - T_{nc}}{r + \frac{1}{\alpha} + \frac{S_{kall}}{\lambda_{kall}}} \right)}{\lambda} \right) \quad (2.14)$$

5. Після визначення температур останнього шару, послідовно, ідучи з кінця, визначаємо температури в середині трубної заготовки ($i = n-1 \dots 2$; $j = 2 \dots m$)

$$T(i, j) = T(i, j-1) + \frac{\lambda \cdot d\tau}{\rho \cdot C_p} \left(\frac{T(i+1, j-1) - 2 \cdot T(i, j-1) + T(i-1, j-1)}{dx^2} \right) \quad (2.15)$$

Визначивши температури починаємо визначати необхідний тиск для кожного шару окремо ($i = 2 \dots n$; $j = 2 \dots m$). Також враховуємо початковий необхідний тиск [40] ($P_y(1, 1) = 5 \cdot 10^4$).

$$P_y(i, j) = \frac{2\sigma dx}{D - 2 \cdot dx \cdot (i) - dx} \quad (2.16)$$

6. Знайшовши всі необхідні тиски для всіх моментів часу, знаходимо результуючі тиски (для всіх моментів часу) ($j = 1 \dots m$):

$$P_{ys}(j) = \sum_{i=1}^n P_y(i, j) \quad (2.17)$$

7. Далі знаходимо сумарний тиск, який необхідний для подолання сил утяжки:

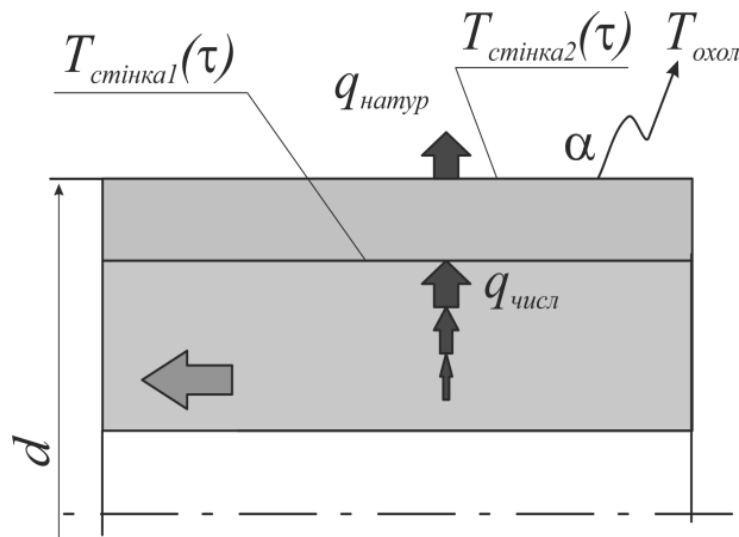
$$P_{\Sigma} = \sum_{j=1}^m P_{ys}(j) \quad (2.18)$$

2.6 Обґрунтування початкових параметрів для дослідження. Результати чисельного експерименту

Адекватність математичної моделі перевіряється експериментом. Чисельне рішення моделі (чисельний експеримент) має бути достовірним (значущим) у порівнянні з натуральним експериментом, постановка якого

вимагає доцільно вибраних та штучно створених умов, що забезпечує спостереження, яке необхідне для встановлення закономірних зв'язків між явищами. Метою чисельного експерименту у моделюванні нестационарного теплообміну з граничними умовами 4-ого роду є визначення температурних полів в матеріалі, що охолоджується (рисунок 2.8), але натуральний експеримент не дозволяє їх виміряти, через що з'явилась потреба у такій постановці експерименту, де вимірюється температура на стінці одного з тіл, та температура охолоджуючої рідини, що дозволяє розрахувати питомий тепловий потік. Відповідно чисельна модель вдосконалена з метою визначення того самого питомого теплового потоку.

Конструкцію калібруючого пристрою для труби з поліпропілену діаметр 20 мм наведено на рисунку 2.9.



$q_{числ}$, $q_{натур}$ - теплота, що передається до втулки та відводиться від втулки до води; d – зовнішній діаметр втулки; $T_{стінка1}(\tau)$ – температура внутрішньої стінки калібратора; $T_{стінка2}(\tau)$ – температура зовнішньої стінки калібратора; $T_{охол}$ – температура води, що охолоджує калібратор;

Рисунок 2.8 – Нестационарний теплообмін з граничними умовами 4-ого роду

В натуральному експерименті вимірювалась температура стінки втулки зі сторони води, та визначався питомий тепловий потік до води.

У чисельному експерименті розраховувались температурні поля матеріалу, що нестационарно охолоджується, після чого питомий тепловий потік до поверхні.

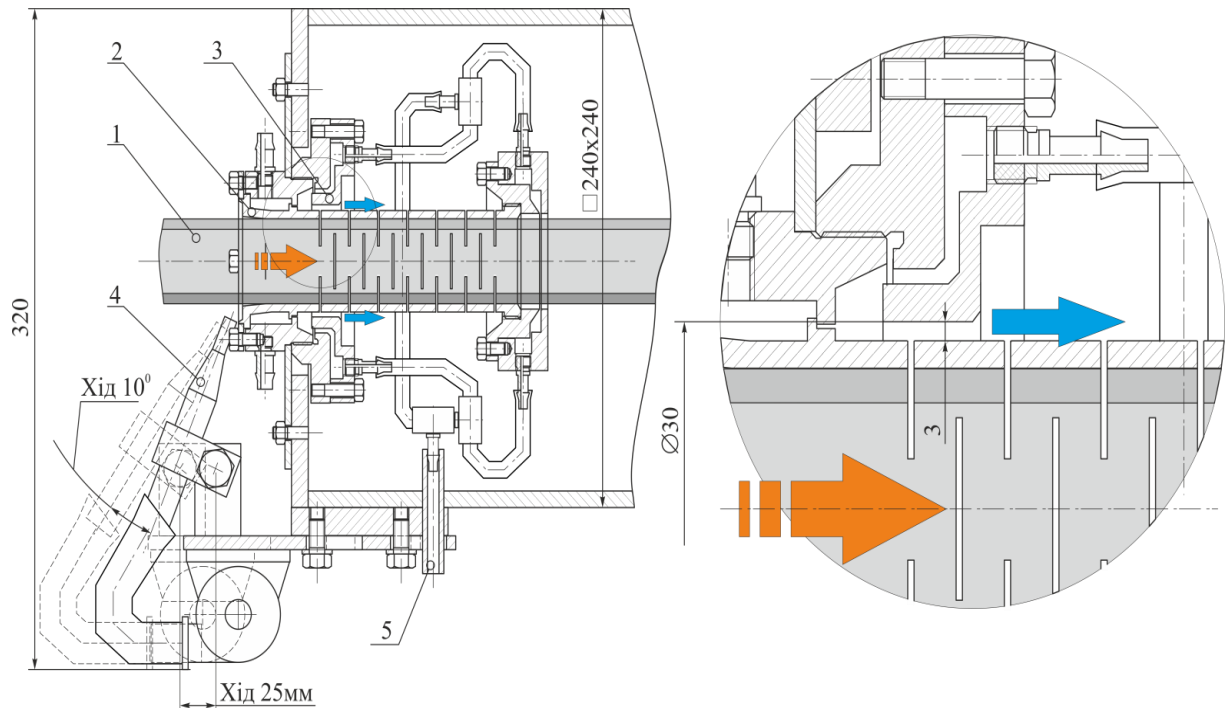


Рисунок 2.9 – Конструкція калібруючого пристрою

Тіло, що охолоджує матеріал (бронзова втулка) зовні охолоджується водою з відомими гідродинамічними параметрами (повздожнє обтікання з швидкістю $W=3,54$ м/с відповідає турбулентному режиму):

$$Re = \frac{Wd}{\nu} = \frac{3,54 \cdot 0,03}{1,005 \cdot 10^{-6}} = 105670$$

Критерій Нусельта:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{стінки}} \right)^{0,25} \varepsilon_L = 0,021 \cdot 105670^{0,8} \cdot 7,01^{0,43} \cdot 1 \cdot \left[1 + \frac{2}{l/D} \right] = 608$$

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} = \frac{608 \cdot 0,599}{0,03} = 12140 \frac{Вт}{м^2 K}$$

Матеріал гільзи калібру – БрАЖ9–4 ГОСТ 18175–78 з теплопровідністю $\lambda_{\text{калібр}} = 61 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ [39].

Даний матеріал має добру теплопровідність, що забезпечить охолодження трубної заготовки, завдяки чому є можливість зменшити довжину калібратору. Також можна було за матеріал взяти срібло, але це було б в рази дорожче.

Таким чином, бронзова втулка у стаціонарному режимі передає теплоту до води (визначається у натурному експерименті), матеріал, що нестационарно охолоджується передає теплоту до втулки (визначається у чисельному експерименті), обидва потоки однакові.

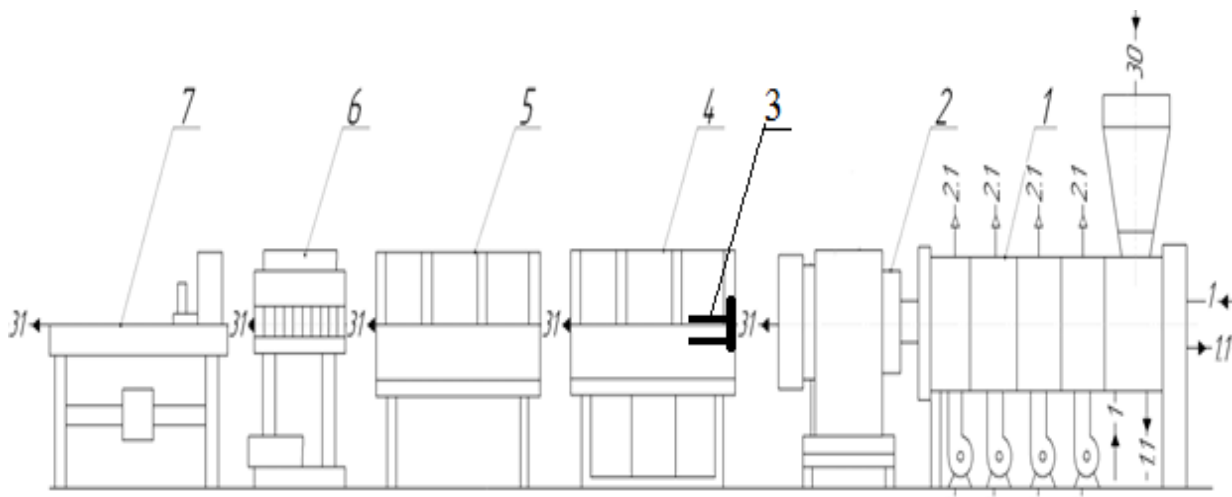
Термічний опір переносу теплоти від поліпропілену до внутрішньої стінки калібру $r = 12,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2 \text{К}}{\text{Вт}}$. Екструдується поліпропілен марки Н03ВРМ [33, 34, 35]. Початкова температура заготовки труби з розплаву після екструдера $T_0 = 220 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура охолоджуючої води $+20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вибираємо існуючу конструкцію з прорізю на відстані 35 мм. Внутрішній діаметр гільзи – 21,75 мм, товщина стінки гільзи – $\delta_{\text{калібр}} = 0,005 \text{ мм}$, довжина калібруючої гільзи $L=225 \text{ мм}$.

3. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Опис експериментальної установки

Лінія для виробництва полімерних труб представлена на рисунку 3.1.



1– прес ЧП 90x30; 2– формуюча головка; 3 – калібратор; 4– вакуумна ванна охолодження; 5– водяна ванна охолодження; 6– тягуча машина; 7– відрізна машина

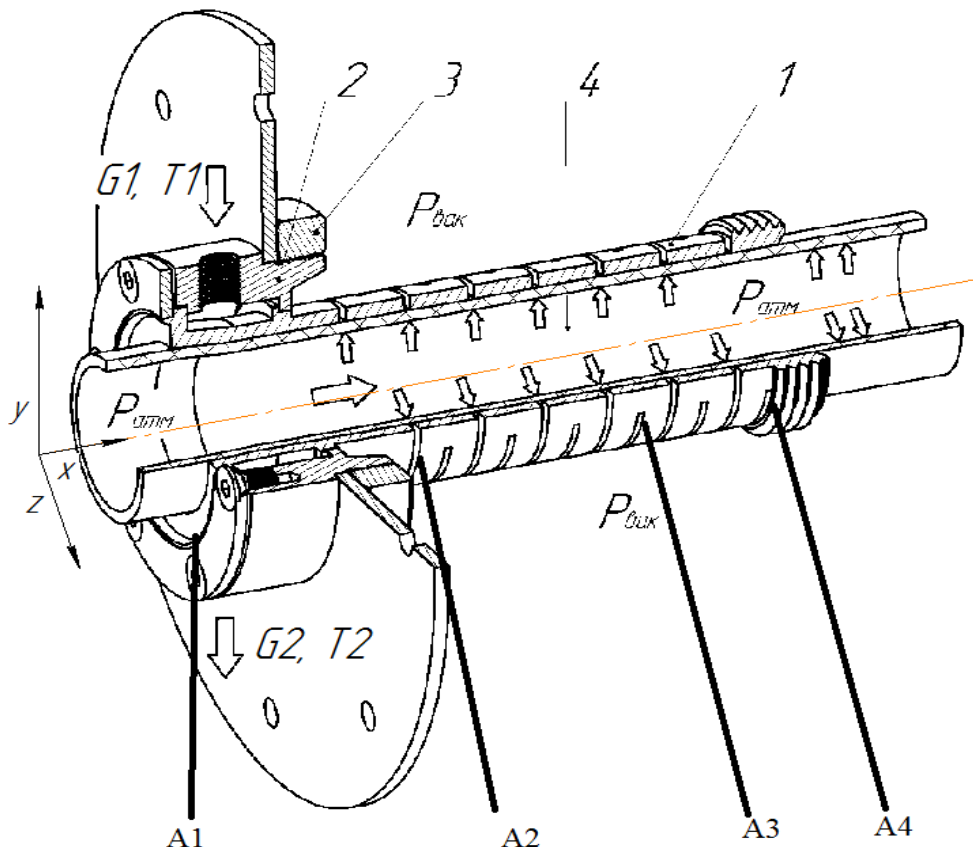
2.1- повітря для охолодження циліндру екструдера; 3.1 – труба поліпропіленова; 30 – поліпропілен гранульований, 1, 1.1 – вода охолодження черв'яка екструдера

Рисунок 3.1 – Схема лінії виробництва полімерних труб

Гранульований поліпропілен подається відповідними завантажувачами в черв'ячні преси ЧП 90×30. В прес 1 подається матеріал для труби. В циліндрах пресу матеріал розплавляється і через відповідні канали подається в трубну головку 2, звідки видавлюється через формуючі отвори в вигляді гладкої трубної заготовки зі смужками. З формуючої головки заготовка труби поступає в калібратор, де калібрується по зовнішньому діаметру завдяки створенню розрідження між калібруючою втулкою та трубою і попередньо охолоджується до утворення на зовнішній поверхні труби твердої кірки.

Схему апарату наведено на рисунку 3.2. Також на схемі зображено місця, де в ході експериментів знаходились термомпари.

На рисунку 3.3 показано зовнішній вид калібратора під час його роботи.

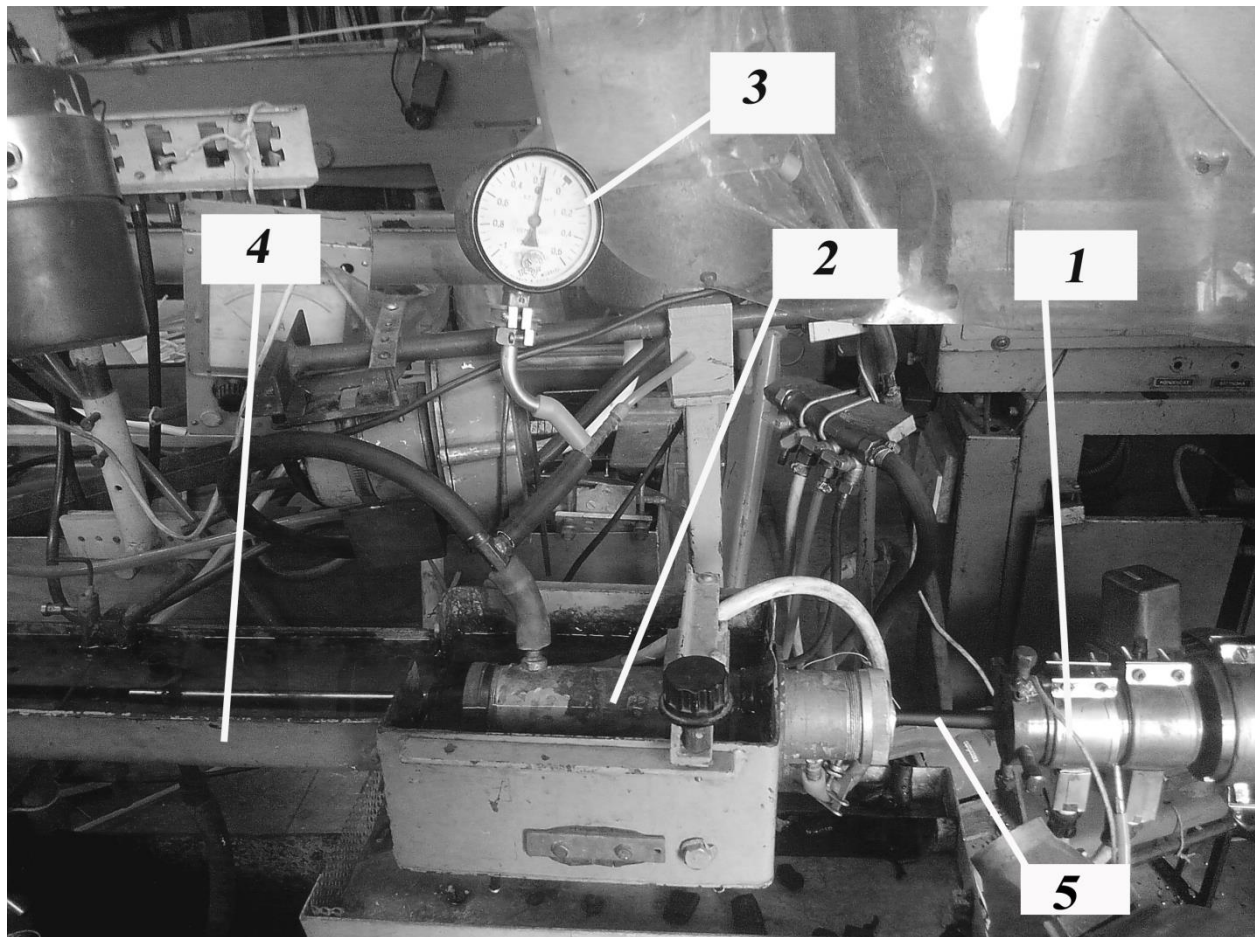


1 – калібруюча гільза з прорізами для вакууму; 2 – корпус, що містить сорочку для інтенсивного охолодження вхідної частини гільзи; 3 – гайка для герметизації вакуумного простору; 4 – труба з поліетилену, що калібрується та охолоджується; G_1, G_2 – вхід і вихід охолоджуючої рідини, кг/с;

T_1, T_2 – температура на вході та виході охолоджуючої рідини, К.

Термомпари розташовані симетрично на зовнішній поверхні калібруючої гільзи: A1 – термомпара, що розташована на початку калібруючої гільзи ($x=0,015$ м); A2 – термомпара, що розташована після першої прорізі на калібруючій гільзі ($x=0,035$ м); A3 – термомпара, що розташована по середині калібруючої гільзи ($x=0,1$ м); A4 – термомпара, що розташована на виході заготовки з калібруючої гільзи ($x=0,2$ м)

Рисунок 3.2 – Схема калібратора для труби 20PN20



1 – формуюча головка екструдера; 2 – калібратор; 3 – манометр; 4 – ванна охолодження; 5 – трубна заготовка

Рисунок 3.3 – Експериментальна установка

3.2 Методика проведення експериментальних досліджень

При виготовленні труб з полімерів малого діаметру після формуючої головки ставиться калібруючий пристрій, щоб забезпечити необхідну фіксацію потрібних форм та розмірів, винятком є виготовлення шлангів.

Для виготовлення гладких труб з поліпропілену найчастіше використовують зовнішнє калібрування з надлишковим тиском з водяним охолодженням.

В ході експерименту необхідно визначити залежності:

- зміна температури калібру під час охолодження заготовки;
- зміна вакууму в вакуумній ванні при різній швидкості процесу;

– підрахунки кількості обривів трубної заготовки при роботі за всю добу.

Проміжки часу відбору матеріалу відбувались електронним секундоміром типу ИВПР–203М, з базовою похибкою вимірюваних величин $\pm 0,01\% \pm 1\text{мс}$ та діапазоном робочих температур від $+5$ до $+35^\circ\text{C}$.

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

Температура розплаву полімеру в формуючій головці реєструється та записується за допомогою автоматичного самозаписуючого потенціометра типу 149-100R (клас точності 0,5; група ХК, шкала $0\text{--}200^\circ\text{C}$). В якості датчиків температури використовують гребінчасті термопари типу ХК, розташованих в тефлоновому кільці, що встановлено в матриці так, що приблизно половина гарячого спаю термопари омивається розплавом полімеру. Перед встановленням в головку, матриця разом з термопарами була проградуйована до 200°C в термостаті типу ТС–15М, заповненому маслом марки «циліндрове–6».

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

Потужність електродвигуна постійного струму приводу насоса визначалась непрямим методом шляхом вимірювання струму самозаписуючим амперметром типу Н–370 (межа вимірюваного струму до

5A при $V=50mV$, клас точності 1,5) та напруги – вольтметром типу Н-372 (межа вимірюваної напруги до 500V, клас точності 1,5).

Використовувана потужність визначалась шляхом перемножування показів вольтметра та амперметра.

Для заміру тиску розплаву полімеру використовується вакуумметр ДВ 05100-01М. Матеріал – сталь. Діапазон вимірювання від -100 до 0 кПа. Степінь захисту IP40. Клас точності 1,5. Штуцер розташовано знизу, різьба штуцера M20x1,5. Матеріал механізму – латунь. ТУ 25-05-1664-74.

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

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

3.3 Результати експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є вимірювання овальності трубної заготовки від тиску вакууму в калібруючій гільзі, а також вимірювання кількості обривів від зміни швидкості.

Експеримент проведено в два етапи, за методикою наведеною в розділі 3.2

Перший етап – розрахунок і перевірка кількості обривів за добу в залежності від швидкості. Другий етап – перевірка заготовок на овальність в залежності від робочого тиску.

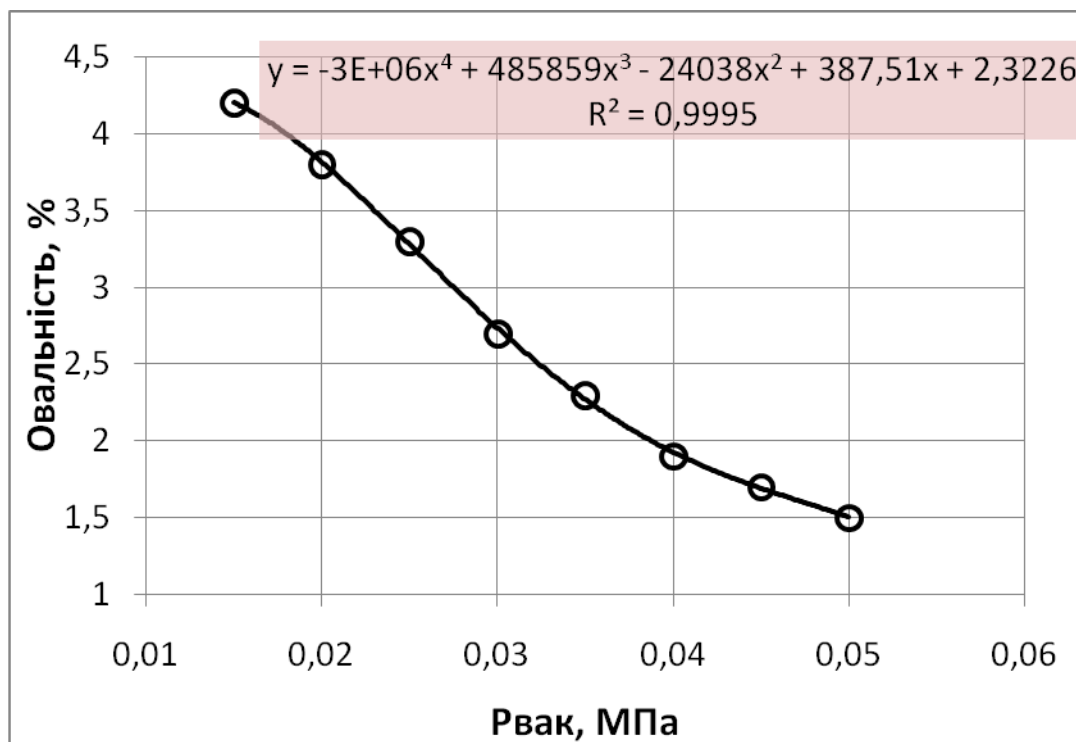
Дані першого етапу та другого етапів експерименту записані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Дані дослідження залежності вимірювальних параметрів від змінних параметрів.

Змінні параметри		Вимірювальні параметри	
$P_{\text{вак}}$, МПа	V , м/с*	Овальність, %	Обриви, раз в добу
0,015	0,098	4,2	5
0,02	0,090	3,8	4
0,025	0,082	3,3	3
0,03	0,072	2,7	2
0,035	0,065	2,3	0
0,04	0,058	1,9	0
0,045	0,048	1,7	0
0,05	0,042	1,5	0

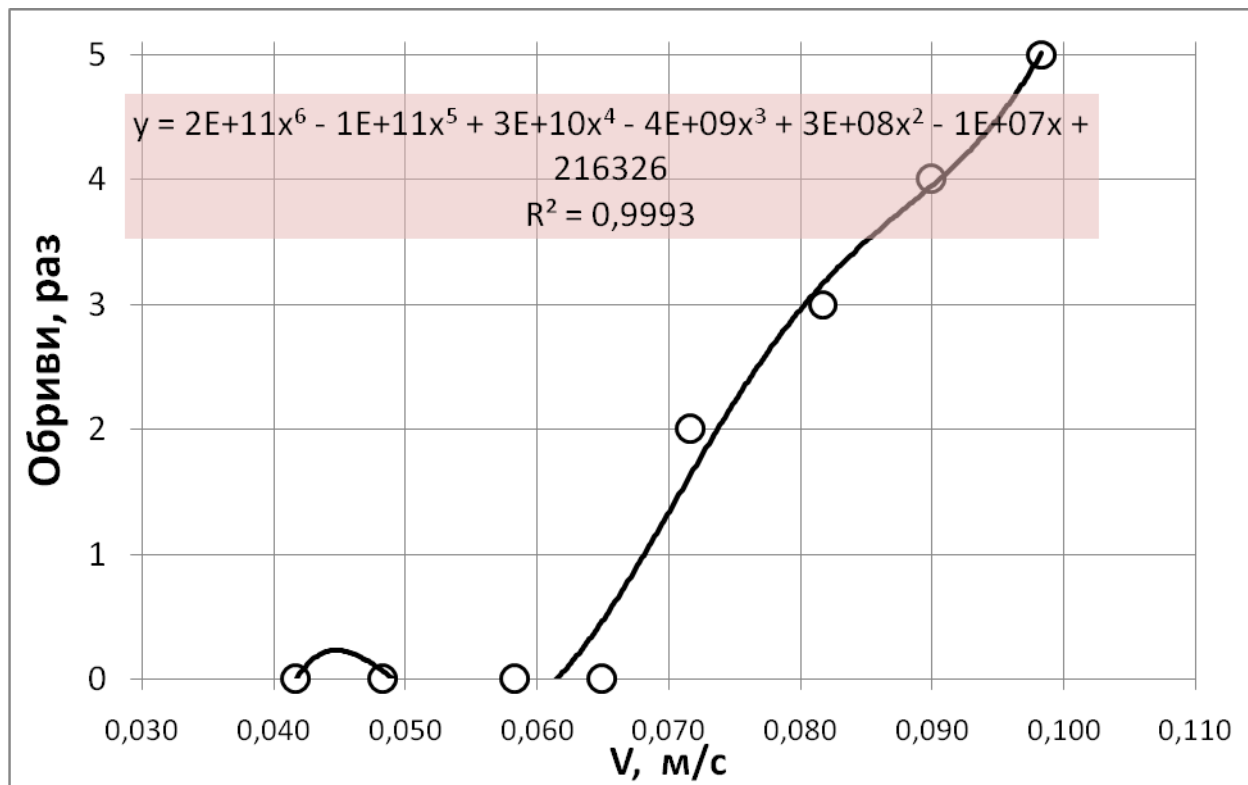
*Дослідження за добу

За результатами побудовано графіки рисунок 3.4, 3.5.



○ – експериментальні значення, — - розраховані значення

Рисунок 3.4 – Залежність овальності труби від зміни тиску



○ – експериментальні значення, — - розрахункові значення

Рисунок 3.5 – Залежність кількості обривів за добу від швидкості

Виходячи з вимог стандарту (овальність труби) мінімально необхідний тиск у калібраторі $P_{\text{вак}}=0,035$ МПа та економічно обґрунтованою швидкістю калібрування є $V=0,065$ м/с. Отриманні дані мають бути використанні в якості вхідних параметрів для віртуального та чисельного експериментів.

3.4 Симуляційне дослідження конвективного теплообміну зовнішньої поверхні калібратору з охолоджуючим середовищем

Вхідні дані віртуального експерименту відповідають вхідним даним чисельного експерименту (розділи 2.6 і 3.3).

Метою експерименту є перевірка відповідності розрахункового коефіцієнту тепловіддачі.

На рисунку 3.6 зображена створена віртуальна модель, з граничними умовами, що була створена у програмі SolidWorks.

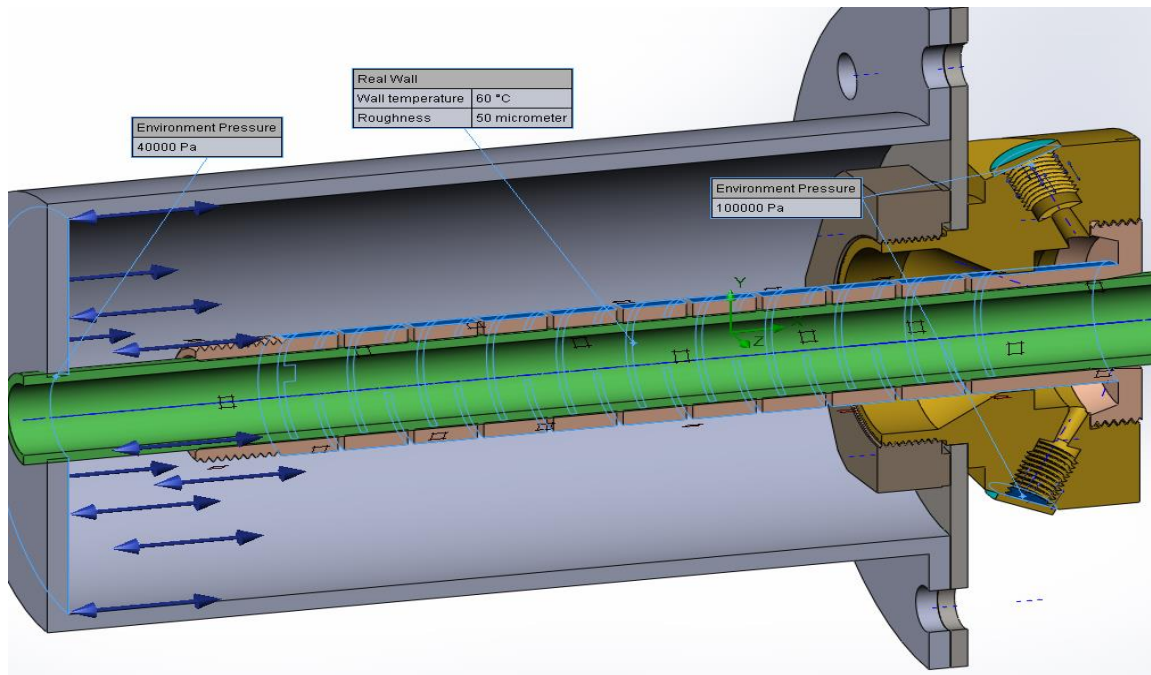


Рисунок 3.6 – Віртуальна модель формування труби в калібраторі
 Результатом програмного моделювання процесу теплообміну трубної заготовки через стінку калібратора з охолоджувальною рідиною, можна побачити на рисунках 3.7 – 3.8.

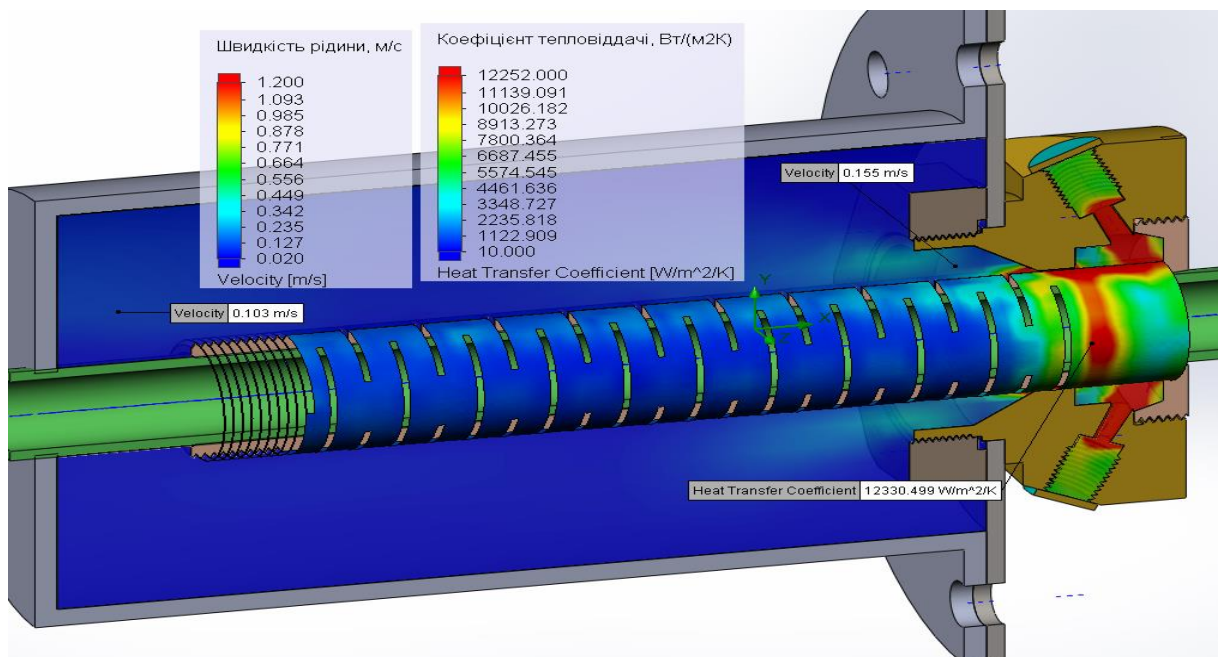


Рисунок 3.7 – Розподіл швидкостей в полості вакуумної ванни та значення коефіцієнта тепловіддачі в симуляційній моделі

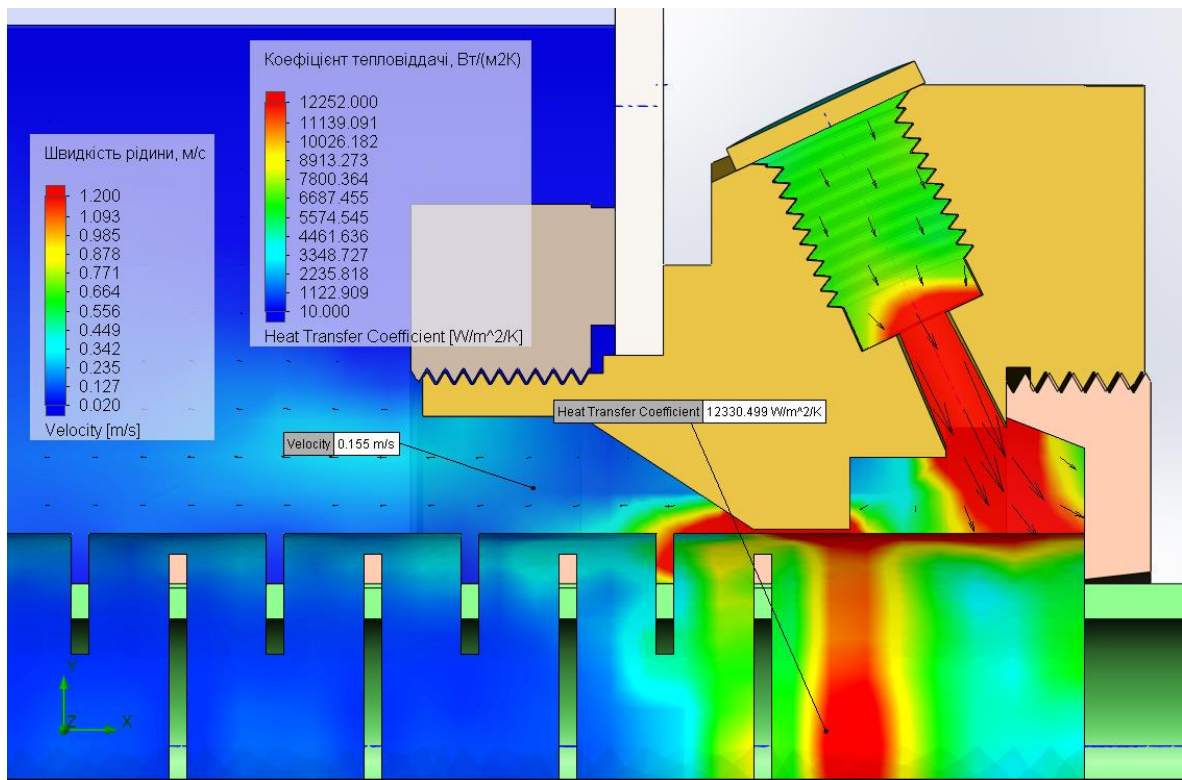


Рисунок 3.8 – Епюра швидкості охолоджуючої рідини в каналі

Як результат було визначено, що коефіцієнт віртуальної моделі дорівнює $12330 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, що на $190 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ (1,56%) більше ніж в числовому експерименті. Дане відхилення є несуттєве, тому дослідження є правдивим.

3.5 Симуляційне дослідження характеру зміни температурних полів

Вхідні дані віртуального експерименту відповідають вхідним даним чисельного експерименту процесу охолодження поліпропіленової трубної заготовки(розділ 3.3).

Метою експерименту є отримання температурних полів у трубній заготовці з врахуванням залежностей теплофізичних властивостей від температури. Використовується модель нестационарного теплообміну.

Теплофізичні характеристики поліпропілену у програмі SolidWorks задано таблично та представлено графічно (на рисунках 3.9-3.11).

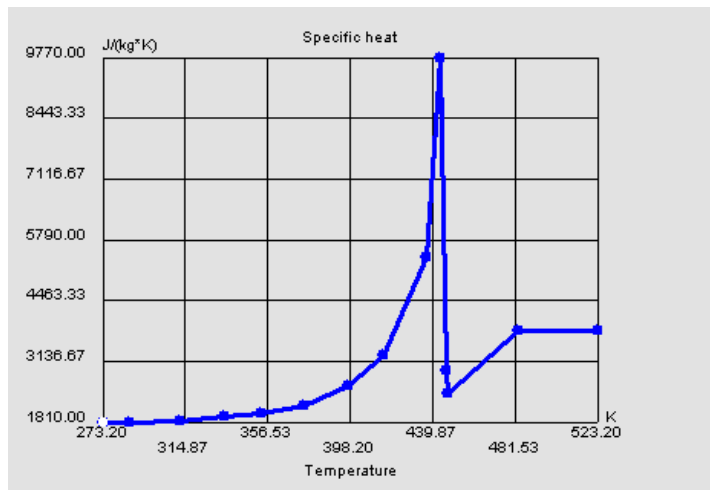


Рисунок 3.9 – Залежність теплоємності поліпропілену від температури

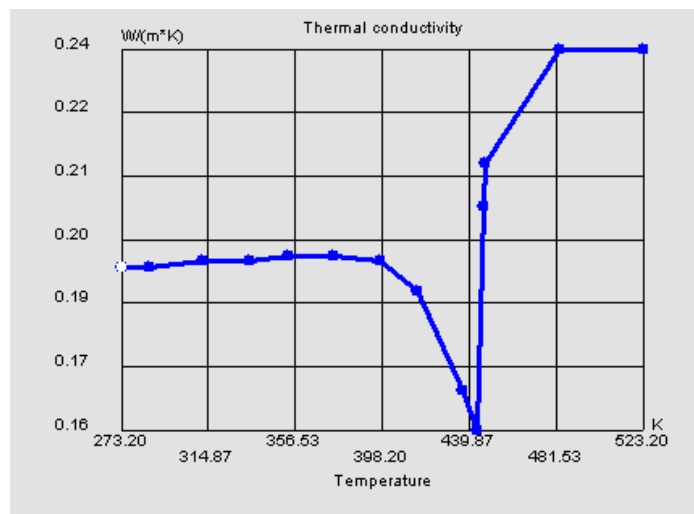


Рисунок 3.10 – Залежність теплопровідності поліпропілену від температури

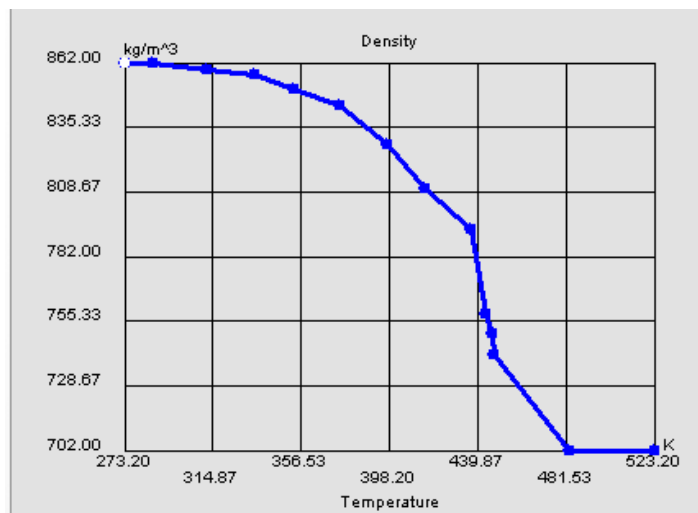


Рисунок 3.11 – Залежність густини поліпропілену від зміни температури

В ході віртуального дослідження було отримано ряд результатів (рисунки 3.12-3.14 та таблиця 3.2).

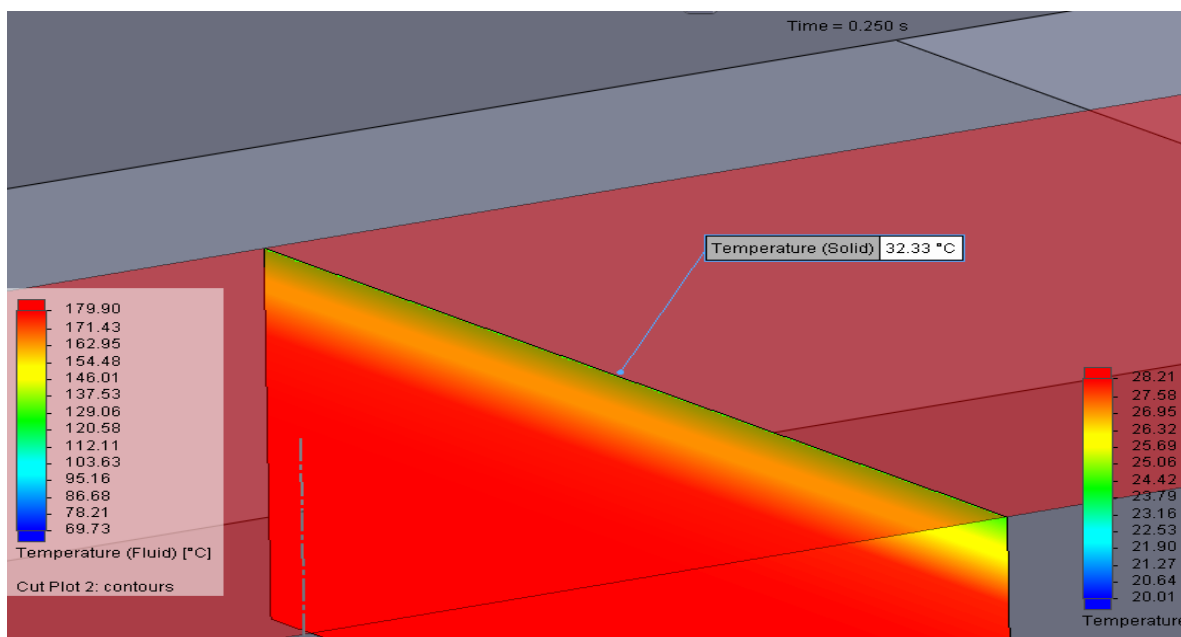


Рисунок 3.12 – Температура верхнього шару заготовки на 0,25 секунді досліді (32,33 °C)

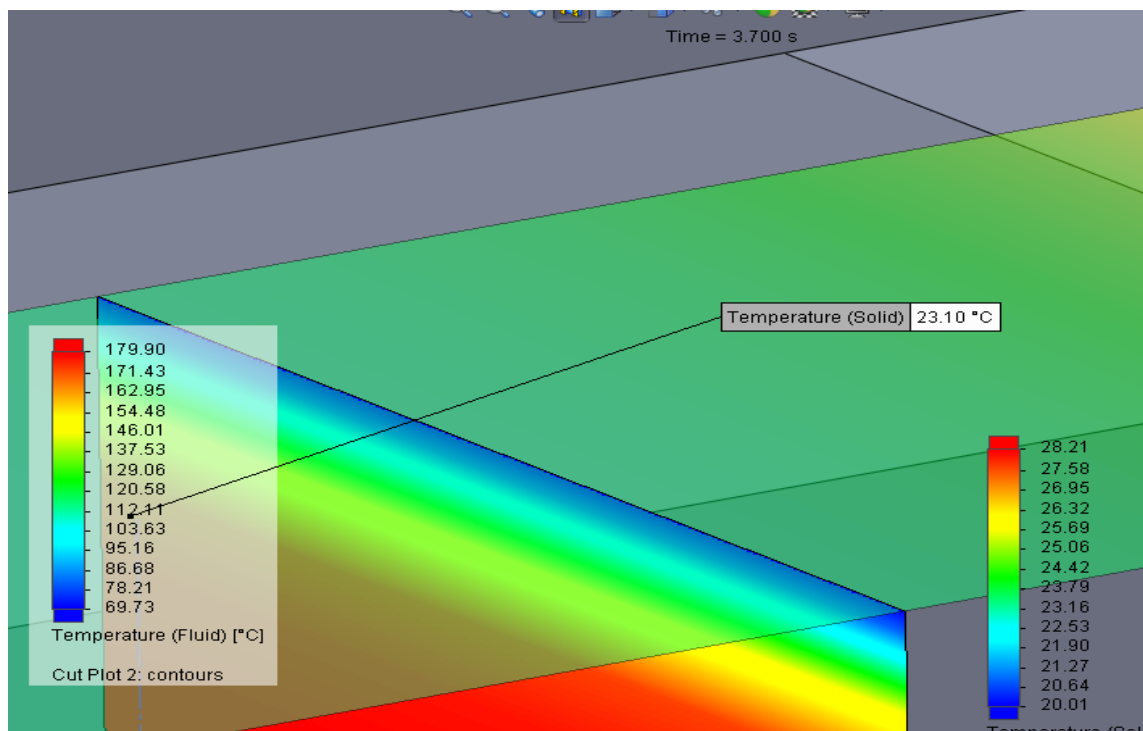


Рисунок 3.13 – Температура верхнього шару заготовки на 3,7 секунді досліді (23,10 °C)

Отримані дані дозволяють визначити закономірність температури верхнього шару заготовки від часу (τ) та від поточної координати (x) калібруючої гільзи для квазістаціонарного процесу: $x=V \cdot \tau$.

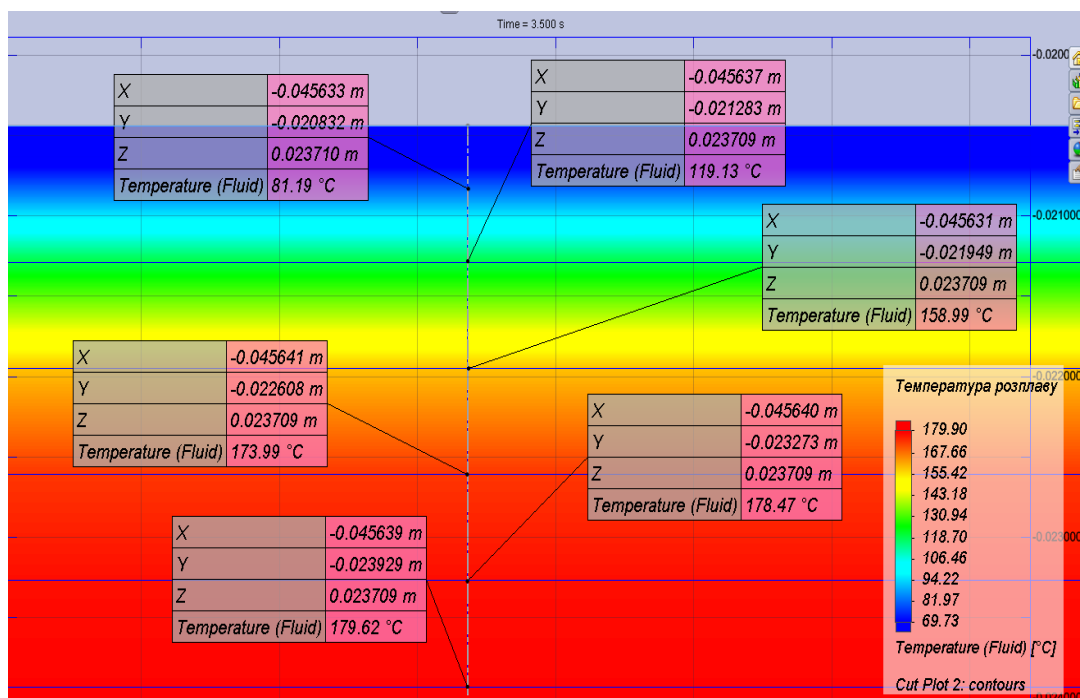


Рисунок 3.14 - Температури заготовки в перерізі на 3.5 секунді дослідю(відповідає поточній довжині калібру 0,2275 м)

Таблиця 3.2 Результати симуляційного експерименту, значення температур на поверхні трубної заготовки та координати поточної довжини калібруючої гільзи

x_i , М	T_i , °C
0,0001	35,58212952
0,0005	92,15118078
0,0012	147,5722776
0,0018	170,5870614
0,0025	177,4827054
0,0032	179,44234
0,003544	179,9309986

Характер температурних полів в поліпропілені не лінійний.

3.6 Перевірка адекватності математичної моделі

3.6.1 Перевірка адекватності математичної моделі температурних полів у заготовці

Перевірка адекватності математичної моделі полягає в порівнянні експериментальних і розрахункових результатів і полягає в розрахунку критерію Фішера [48-49]. F-критерій, або ж критерій Фішера розраховується за формулою:

$$F_{розр} = \frac{S_{ад}^2}{S_{общ}^2} \quad (3.1)$$

де $S_{ад}^2$ - остаточна дисперсія, або ж дисперсія адекватності;

$S_{общ}^2$ - загальна дисперсія.

Остаточна дисперсія характеризує величину середнього розкидування експериментальних точок відносно до лінії регресії. Загальна дисперсія характеризує випадкову похибку для усієї вибірки.

Для обрахунку цих обох видів дисперсії використовують наступні формули:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y^2}{f_1} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - \hat{y})^2}{n-2} \quad (3.2)$$

де \bar{y} - середнє значення експериментальних температур; \hat{y} - значення температур, отриманих в ході розрахунків; n - число дослідів.

$$S_{i ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{f_2} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1} \quad (3.3)$$

де y - значення температури, отримане в ході експерименту;

\hat{y} - значення температур, отриманих в ході розрахунків; n - число дослідів.

Розрахунок проводиться за допомогою програми Microsoft Excel.

Результати аналізу експериментальних і розрахункових даних зображено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 Аналіз результатів експерименту і розрахунку температурних полів

x_i	y_i	\hat{y}	$(\bar{y} - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
0,0001	35,58212952	70,4135	1567,616	1213,224
0,0005	92,15118078	128,0722	1565,328	1290,32
0,0012	147,5722776	165,1498	1557,323	308,9693
0,0018	170,5870614	173,1675	1533,696	6,658663
0,0025	177,4827054	176,9199	1472,351	0,31675
0,0032	179,44234	178,7639	1334,238	0,460281
0,003544	179,9309986	179,5551	1074,189	0,1413
	$\bar{y} = 140,3926705$		$\sum = 10104,74$	$\sum = 2820,09$

Відповідно до отриманих результатів маємо:

$$S_{ад}^2 = \frac{10104,74}{7-2} = 1684,124$$

$$S_{обц}^2 = \frac{2820,09}{7-1} = 564,0181$$

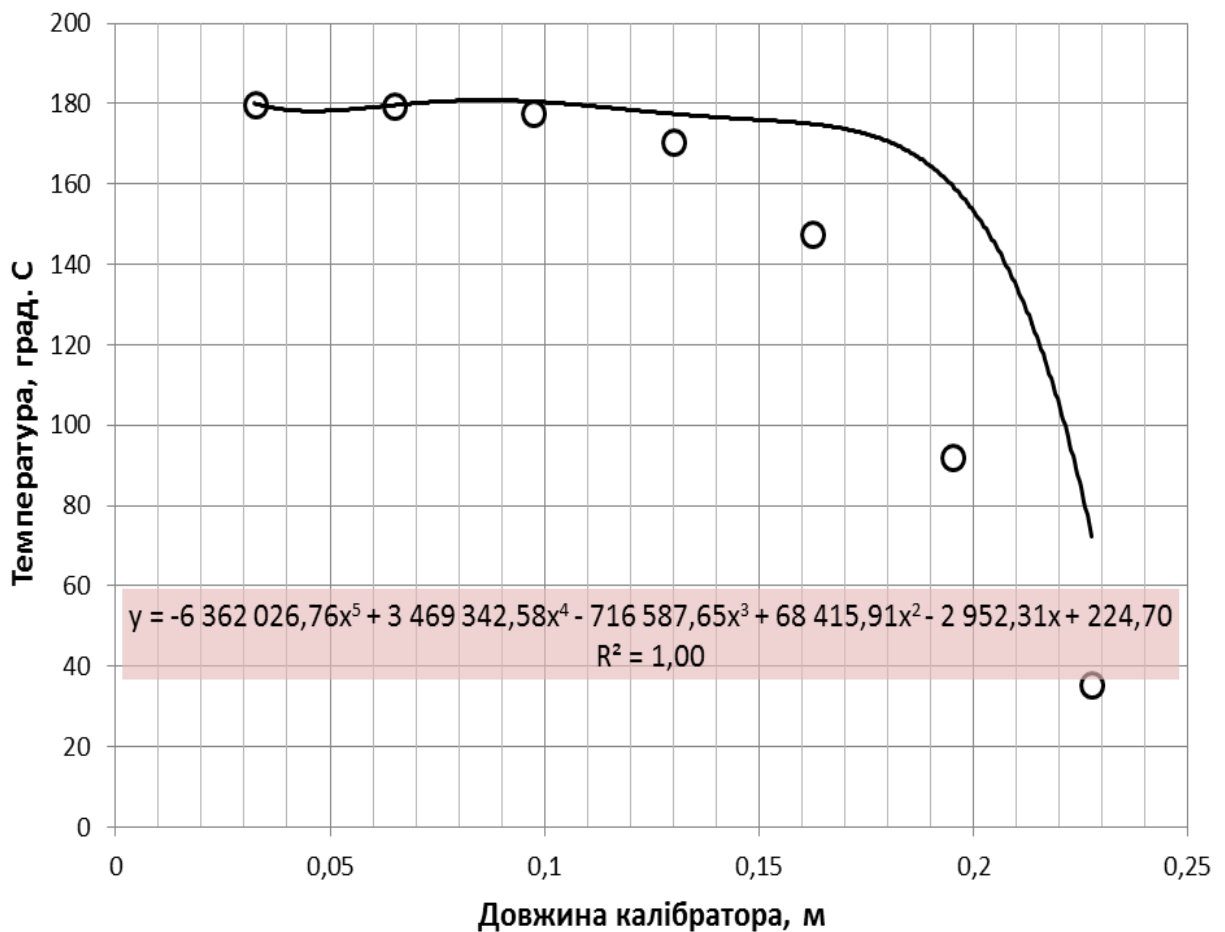
Далі підставивши результати розрахунків у формулу (3.1) отримано розрахунковий критерій Фішера:

$$F_{розр} = \frac{1684,124}{564,0181} = 2,985939$$

Табличне значення критерію Фішера для $\alpha = 0,05$, за наших $f_1 = 5$ і $f_2 = 6$, $F_{крит} = 4,95$.

Оскільки $2,99 < 4,95$, з ймовірністю 95%, що свідчить про адекватність математичної моделі, яка аналізувалась, і здатна з вказаною достовірністю спрогнозувати експериментальні результати та описати процес. Це підтверджено розрахунками.

На рисунку 3.15 зображено регресивну залежність температури верхнього шару заготовки від степені проходження заготовки в калібруючій гільзі.



○ – експериментальні значення, — - розрахункові значення

Рисунок 3.15 – Регресивна залежність температури заготовки від поточної довжини калібру

Отримана регресивна залежність описується таким рівнянням:

$$T = -6362026,76 \cdot x^5 + 3469342,58 \cdot x^4 - 716587,65 \cdot x^3 + 68415,91 \cdot x^2 - 2952,31 \cdot x + 224,7$$

де x – поточна довжина калібратору, м.

Покрокове виконання розрахунку критерію Фішера для температури заготовки описано на рисунках 3.16 – 3.22.

Після внесення даних у таблицю, в стовпчику під назвою «кв1» розраховуємо різницю $(\bar{y} - \hat{y}_i)^2$ (рисунок 3.17)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
20									
21									
22	Розрахунок коефіцієнта Фішера							кв1	qv2
23	35,58212952	0,0001	1		179,555	70,4135		4897,08	1213,22
24	92,15118078	0,0005	2		178,764	128,072		151,794	1290,32
25	147,5722776	0,0012	3		176,92	165,15		612,915	308,969
26	170,5870614	0,0018	4		173,168	173,168		1074,19	6,65866
27	177,4827054	0,0025	5		165,15	176,92		1334,24	0,31675
28	179,44234	0,0032	6		128,072	178,764		1472,35	0,46028
29	179,9309986	0,003544	7		70,4135	179,555		1533,7	0,1413
30	140,3926705							11076,3	2820,09
31								Fisher	tabl
32								3,27302	4,95
33									

Рисунок 3.16 – Загальний вид розрахункової таблиці

f_x	<code>=(F23-\$A\$30)^2</code>
-------	-------------------------------

Рисунок 3.17 – Формула, за якою отримуємо результати в стовпчик «кв1»

За аналогією, в стовпчику під назвою «qv2» розраховуємо різницю $(y_i - \hat{y}_i)^2$ (рисунок 3.18)

f_x	<code>=(F23-A23)^2</code>
-------	---------------------------

Рисунок 3.18 – Формула, за якою отримуємо результати в стовпчик «qv2»

Потім в комірках Н30 і І30 визначаємо суми отриманих різниць (рисунок 3.19, 3.20)

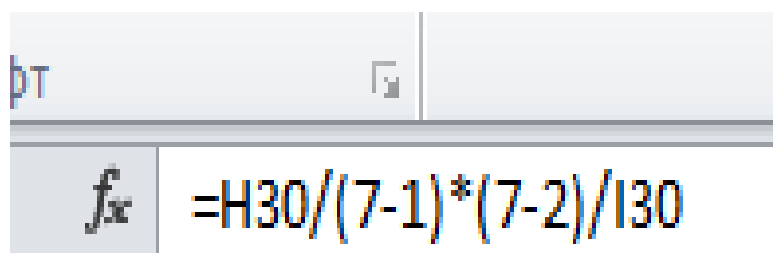
f_x	<code>=СУММ(H23:H29)</code>
-------	-----------------------------

f_x	<code>=СУММ(I23:I29)</code>
-------	-----------------------------

Рисунок 3.19 – Отримання

$$\sum (\bar{y} - \hat{y}_i)^2$$

За отриманими значеннями розраховуємо критерій Фішера (рисунок 3.20)



$$f_x = 130 / ((7-1) * (7-2) / 130)$$

Рисунок 3.20 – Формула для розрахунку критерія Фішера за проведеними дослідями.

3.6.2 Перевірка адекватності математичної моделі температур на поверхні калібратору

За алгоритмом наведеним в розділі 3.6.1, проведено аналіз значимості регресивної залежності температури поверхні калібратора від поточної довжини калібру(таблиця 3.9).

Згідно з цими результатами отримано значення дисперсії:

$$S_{ad}^2 = \frac{14,54344}{4-2} = 7,271719$$

$$S_{обц}^2 = \frac{1,495249}{4-1} = 0,498416$$

Таблиця 3.9 Аналіз результатів температури поверхні калібратора

x_i	y_i	\hat{y}	$(\bar{y} - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
0,015	28,27155438	29,07652	5,175741	0,210021
0,035	28,14851452	28,55988	3,091919	0,210021
0,1	26,72002867	26,8808	0,006289	0,210021
0,2	24,06588077	24,2976	6,269488	0,210021
0,215	28,27155438	29,07652	5,175741	0,210021
	$\bar{y} = 26,80149458$		$\sum = 14,54344$	$\sum = 1,495249$

Далі підставивши ці дані в формулу (3.1) отримано розрахунковий критерій Фішера:

$$F_{розр} = \frac{7,271719}{0,495249} = 6,48429$$

Табличне значення критерія Фішера для $\alpha = 0,05$, за наших $f_1 = 2$ і $f_2 = 3$, $F_{крит} = 9,55$.

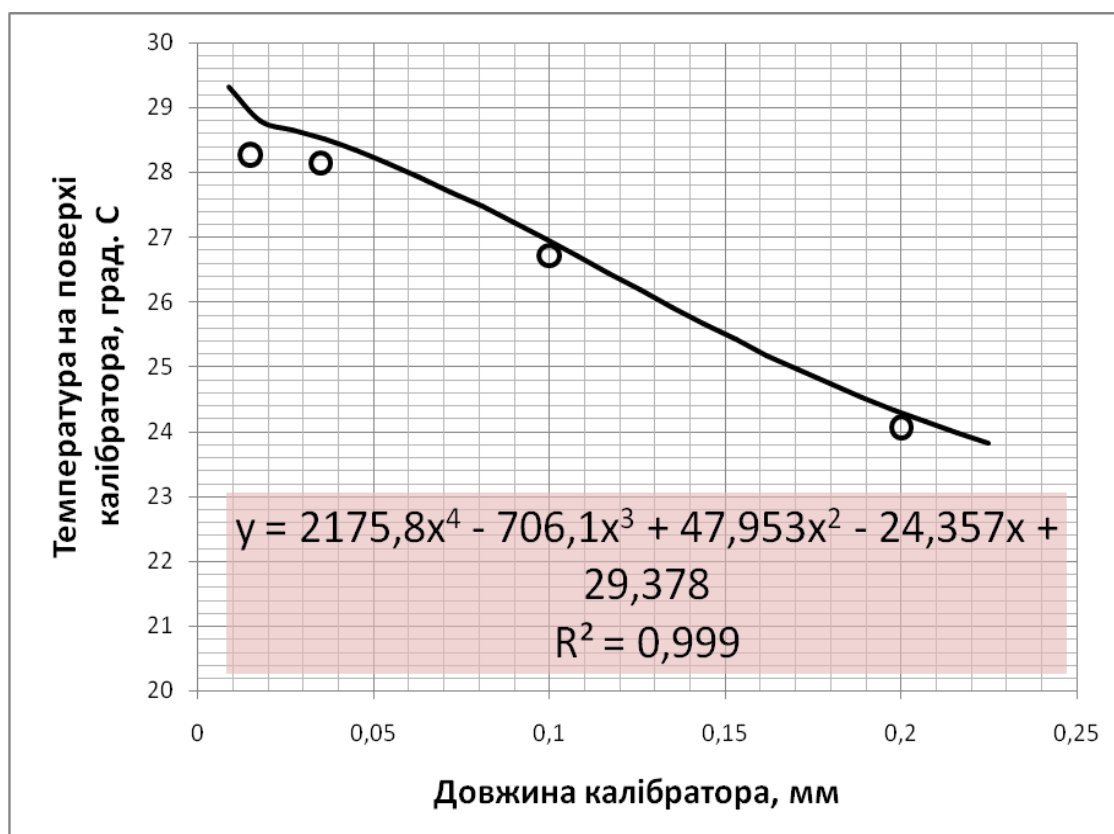
Оскільки $6,48429 < 9,55$, з імовірністю 95%, що свідчить про адекватність математичної моделі, яка аналізувалась, і здатна з вказаною достовірністю спрогнозувати експериментальні результати та описати процес. Це підтверджено розрахунків.

На рисунку 3.21 зображено регресивну залежність температури поверхні калібруючої гільзи від степені проходження заготовки.

Отримана регресивна залежність описується таким рівнянням:

$$T = 2175,8 \cdot x^4 - 706,1 \cdot x^3 + 47,953 \cdot x^2 - 24,357 \cdot x + 29,378$$

де x – поточна довжина калібратора, м.



○ – експериментальні значення, — - розрахункові значення

Рисунок 3.21 – Регресивна залежність температури поверхні калібруючої гільзи від довжини калібратору

Покрокове виконання розрахунку критерія Фішера для температури заготовки описано на рисунках 3.22 – 3.25.

Температура в стовпці «Температура» знімалась за допомогою термопар.

	K	L	M	N	O	P	Q
1		Рівняння	<i>mm</i>	<i>град. С</i>		кв1	кв2
2		$\epsilon-25,832 \cdot x+29,464$	<i>Калібратор</i>	<i>Температура</i>			
3		29,07652	0,015	28,3		5,18254	0,60298
4		28,55988	0,035	28,1		3,09718	0,29173
5		26,8808	0,1	26,7		0,00653	0,26957
6		24,2976	0,2	24,1		6,26201	0,24246
7				26,8		14,5483	1,40674
8							
9							
10				Fisher	6,8946		
11				FisherTabl	9,55		

Рисунок 3.22 – Загальний вид розрахункової таблиці

В комірках «кв1» і «кв2» за аналогією до попередньої програми знаходяться необхідні різниці, а також їх суми (комірки P7 і Q7). (рис. 3.25 - 3.27)

f_x $= (L3 - \$N\$7)^2$

Рисунок 3.23 – Формула, за якою отримуємо результати в стовпчик «кв1»

f_x $= (N3 - L3)^2$

Рисунок 3.24 – Формула, за якою отримуємо результати в стовпчик «кв2»

За отриманими значеннями розраховуємо критерій Фішера (рисунок 3.27)

f_x $= P7 / 3 * (4 - 2) / Q7$

Рисунок 3.25 – Формула для розрахунку критерія Фішера за проведеними дослідями.

4 ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Рекомендації щодо проектування калібруючого пристрою для труб з поліпропілену

Аналізуючи запропоновану математичну модель розроблено наступні рекомендації:

1. Інтенсифікувати процес теплообміну за рахунок використання матеріалів для гільзи калібратору з великим коефіцієнтом теплопровідності; зменшити товщину гільзи калібратору, виконати зовнішню стінку гільзи калібратору з ребрами для збільшення поверхні теплообміну, забезпечити турбулентний гідродинамічний режим зовнішньої стінки гільзи калібратору.

2. Розраховувати відстань до першої вакуумної прорізі такою, щоб вона відповідала зоні початку склування поліпропілену. Так як якщо вона мала то тверда плівка ще не утворилася і розплав затягне в прорізь, а якщо вона велика то втрачається термічний контакт.

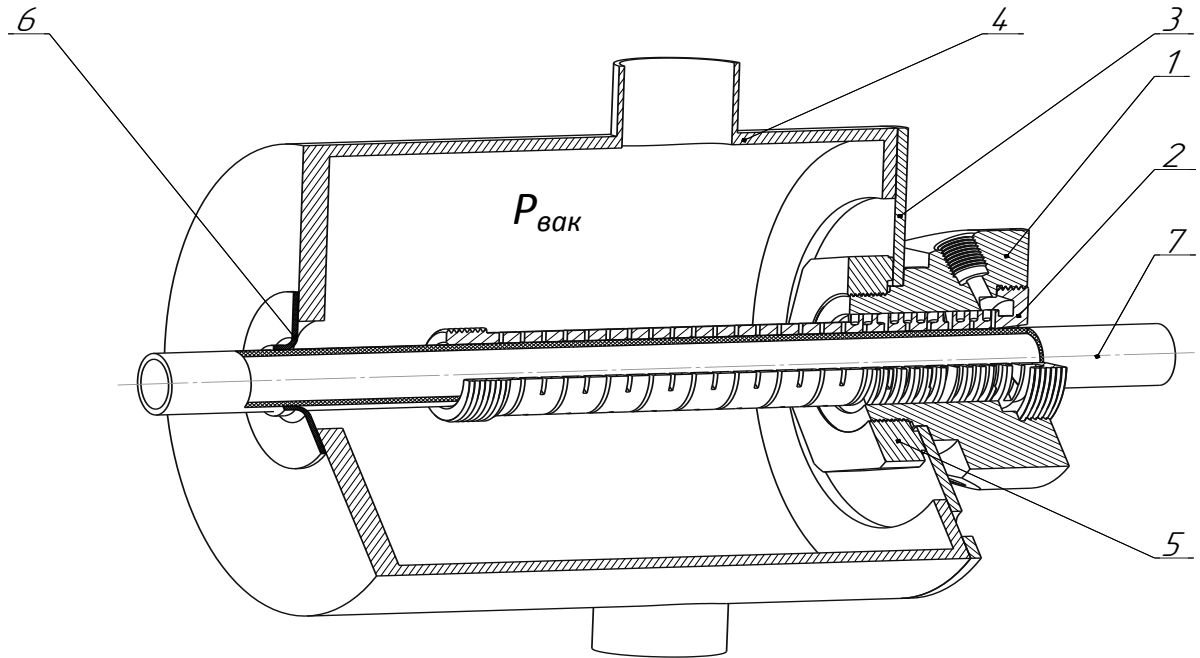
3. Конструкція калібруючого пристрою має забезпечити плавне підвищення вакууму вздовж калібру.

4.2 Технічне рішення нової конструкції калібру для формування труб з поліпропілену

За результатами досліджень запропонована нова конструкція калібратору (рисунок 4.1), що розміщується в трубній лінії (рисунок 4.2), та отримано позитивний висновок для отримання патенту України на корисну модель [42], яка відповідає рекомендаціям сформульованим у розділі 4.1.

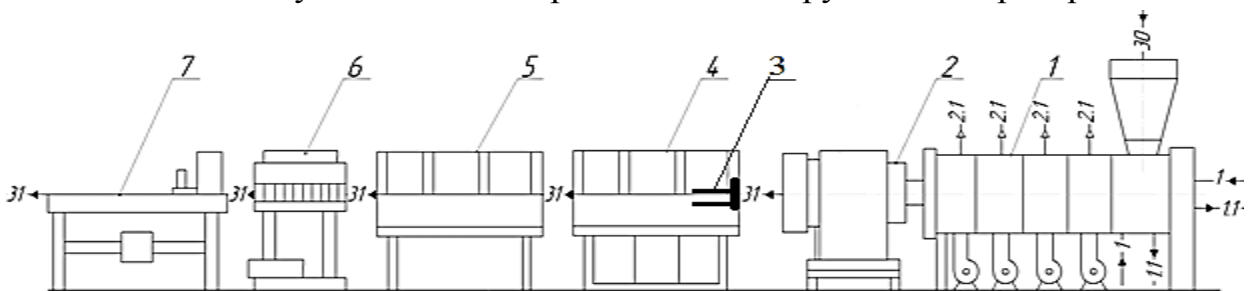
Модернізований калібратор працює наступним чином. Рідина подається у верхню частину корпусу і, проходячи по гвинтовій канавці між калібруючою гільзою та корпусом охолоджує поверхню калібруючої гільзи, та забезпечує плавне наростання вакууму. Збільшення поверхні контакту калібруючої гільзи з охолоджуючою рідиною дозволяє зменшити температуру стінки калібруючої гільзи, а великий гідравлічний опір каналу,

що утворюється між корпусом та калібруючою гільзою забезпечує плавне збільшення вакууму вздовж напрямку руху заготовки труби з розплаву полімеру. Покращення умов калібрування дозволяє збільшити швидкість руху заготовки труби з розплаву полімеру та продуктивність.



1 – корпус; 2 – калібруюча гільза; 3 – фланець; 4 – ємність з розрідженням; 5 – гайка прижиму корпусу до фланця для забезпечення герметичності з'єднання; 6 – гумова прокладка, для затримання вакууму в бакові; 7 – трубна заготовка

Рисунок 4.1 – Модернізована конструкція калібратора



1– прес ЧП 90х30; 2– формуюча головка; 3 – калібратор; 4– вакуумна ванна охолодження; 5– водяна ванна охолодження; 6– тягнуча машина; 7– відрізна машина; 2.1- повітря для охолодження циліндру екструдера; 31 – труба поліпропіленова; 30 – поліпропілен гранульований, 1,11 – вода охолодження черв'яка екструдера

Рисунок 4.2 – Схема лінії виробництва полімерних труб

Технічне рішення дозволяє інтенсифікувати процес теплообміну та підтримувати необхідний мінімальний тиск для утримання термічного контакту.

Нова конструкція вимагає апробації шляхом додаткових випробувань.

4.3 Програма розрахунку

В таблиці 4.1 наведені ідентифікатори, та їх значення, що необхідно мати для коректної роботи програми. На рисунку 4.3 наведено алгоритмічну схему програми.

Програма розрахунку наведена в програмному середовищі MathLab.

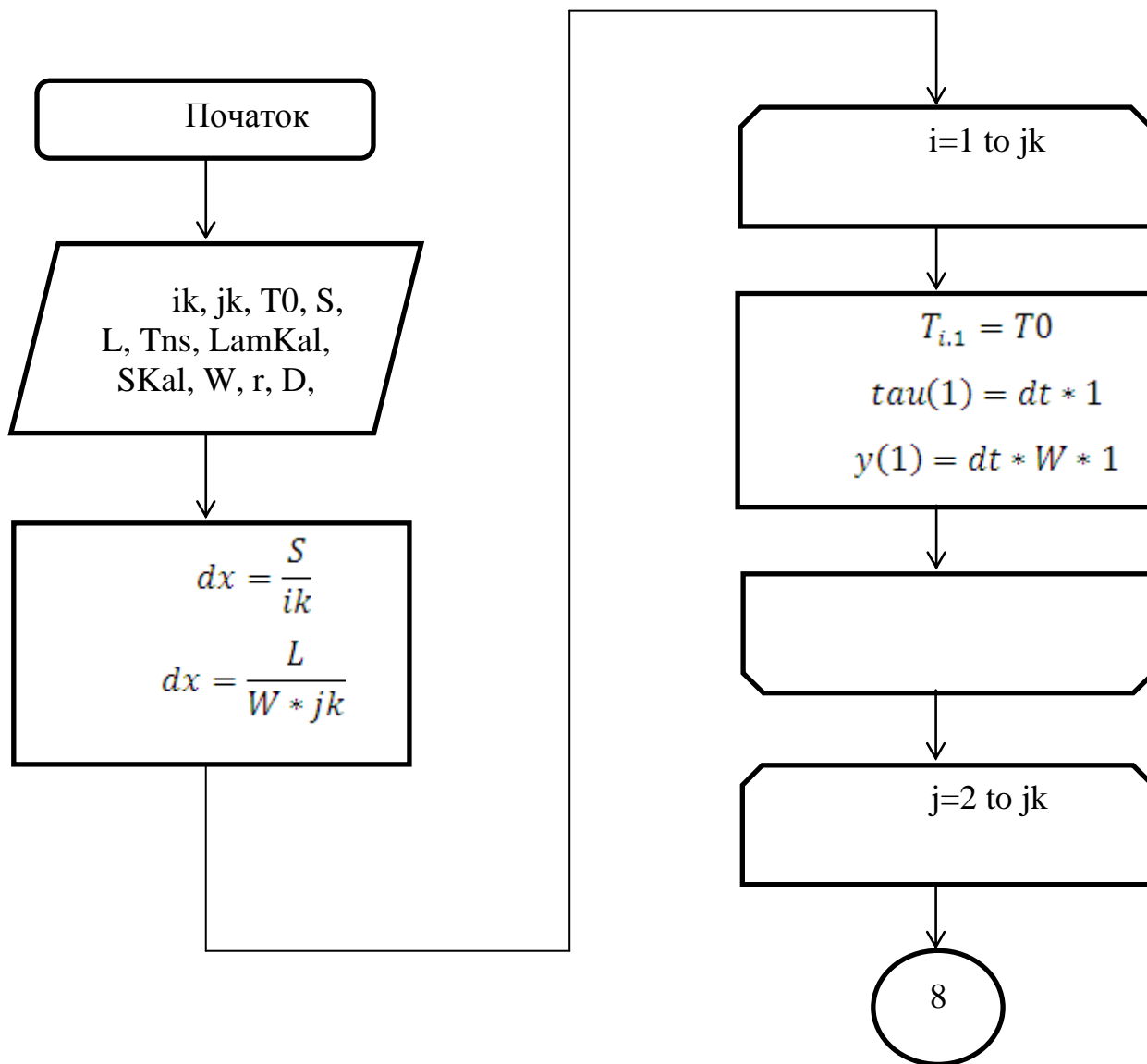


Рисунок 4.3 – Алгоритм розрахунку

8

$$\tau(j) = dt * 1$$

$$y(j) = dt * W * 1$$

$$T_{ij} = T_{ij-1} - \frac{Lam * dt}{Ro * Cp * dx} \left(\frac{T_{1,j-1} - T_{2,j-1}}{dx} \right)$$

$$T_{ik,j} = T_{ik,j-1} - \frac{Lam * dt}{Ro * Cp * dx} \times \left(\frac{T_{ik-1,j-1} - T_{ik,j-1}}{dx} \right) - \left(\frac{T_{ik,j-1} - Tns}{r + \frac{1}{alf} + SKal/LamKal} \right)$$

$$x(ik) = dx * ik$$

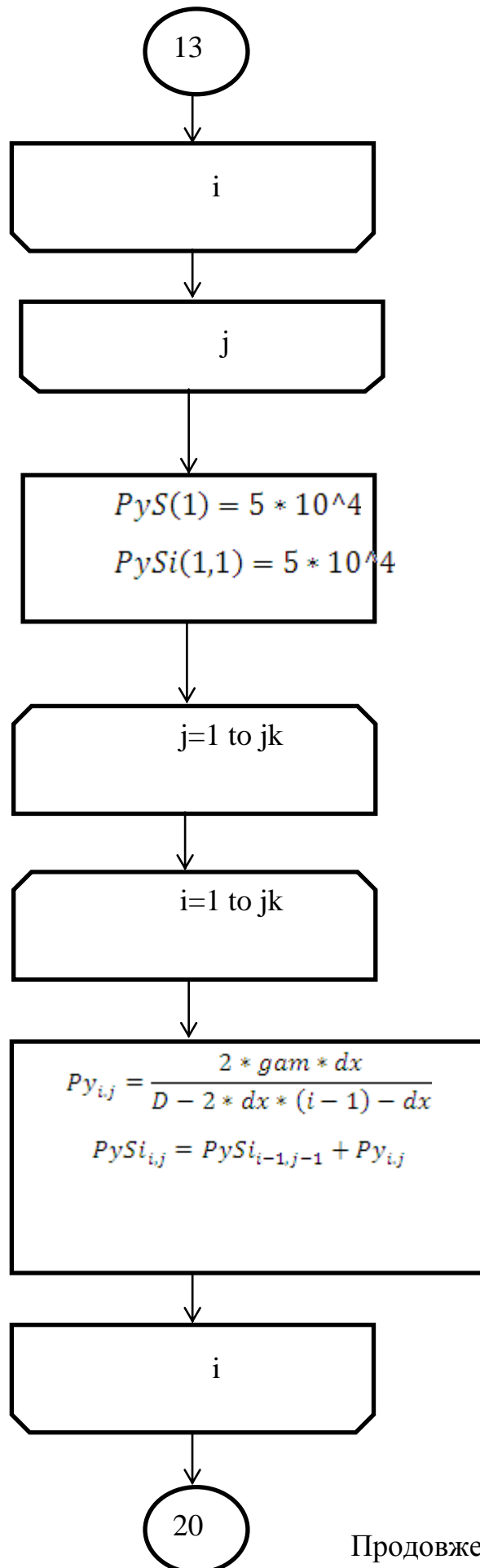
i=ik-1 to 2

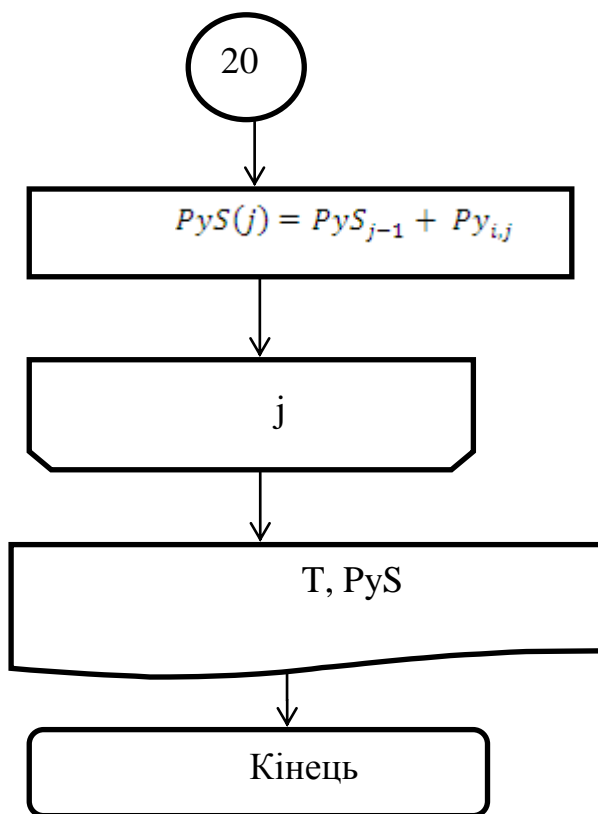
$$x(i) = dx * i$$

$$T_{ij} = T_{ij-1} - \frac{Lam * dt}{Ro * Cp} \times \left(\frac{T_{i+1,j-1} - 2 * T_{i,j-1} + T_{i-1,j-1}}{dx^2} \right)$$

13

Продовження рисунку





Продовження рисунку

Таблиця 4.1 Таблиця ідентифікаторів

Ідентифікатор	Значення ідентифікатора	Розмірність
T_0	Початкова температура трубної заготовки	град. С
L	Довжина калібратора	мм
S	Товщина стінки	мм
T_{ns}	Температура навкол. середовища	град. С
$LamKal$	Теплопровідність матеріалу калібратора	Вт/(м·К)
$SKal$	Товщина стінки калібратора	мм
r	Термічний опір границі метал/розплав	
Alf	Коеф. тепловіддачі	
D	Діаметр труби	м
W	Швидкість калібрування	м/хв
ik	Розбивок по товщині	
jk	Розбивок за часом	

Програма розрахунку температурного поля і необхідного напруження.

```
function[Lam,Ro,Cp]=tep(T)
Temp=[0 13.5 38.8 61.3 80 102 124.2 142 163.8 170.6 173.5 174.2 210 250]
Teplopr=[0.193 0.193 0.194 0.194 0.195 0.195 0.194 0.188 0.168 0.160
0.205 0.214 0.237 0.237]
Gustina=[862 862 859 857 851 844 828 810 793 758 750 741 702 702]
Teploemn=[1810 1810 1840 1940 1990 2160 2610 3280 5400 9770 2930
2420 3810 3810]
Lam=interp1(Temp,Teplopr,T)
Ro=interp1(Temp,Gustina,T)
Cp=interp1(Temp,Teploemn,T)
End
function[gam]=ter(T)
Temp=[0 25 50 75 100 125 150 175 190]
Naprujenya=[415 350 230 175 115 85 25 0 0]
gam=interp1(Temp,Naprujenya,T)
end
clearall
T0=180 % Початкова температура трубної заготовки, град. С
L=225 % Довжина калібратора, мм
L=L/1000
S=3.6 % Товщина стінки, мм
S=S/1000
Tns=20 % Температура навкол. середовища, град. С
LamKal=61 % Теплопровідність матеріалу калібратора
SKal=5 % Товщина стінки калібратора, мм
SKal=SKal/1000
r=12.5*10^(-4) % Термічний опір границі метал/розплав
Alf=12140 % Коеф. тепловіддачі
```

```

D=0.02      %Діаметр труби, м
W=3.9      % Швидкість калібрування, м/хв
W=W/60
[Lam,Ro,Cp]=tep(T0)
ik=4      % Розбивок по товщині
jk=30    % Розбивок за часом
dx=S/ik
dt=L/(W*jk)
for i=1:ik
    T(i,1)=T0
    tau(1)=dt*1
    y(1)=dt*W*1
end
for j=2:jk
    tau(j)=dt*j
    y(j)=dt*W*j
    [Lam,Ro,Cp]=tep(T(1,j-1))
    T(1,j)=T(1,j-1)-(Lam*dt)/(Ro*Cp*dx)*((T(1,j-1)-T(2,j-1))/(dx))
    x(1)=dx*1
    [Lam,Ro,Cp]=tep(T(ik,j-1))
    T(ik,j)=T(ik,j-1)+((Lam*dt)/(Ro*Cp*dx))*(((T(ik-1,j-1)-T(ik,j-1))/dx)-
((T(ik,j-1)-Tns)/(r+1/Alf+SKal/LamKal))/Lam)
    x(ik)=dx*ik
    for i=ik-1:-1:2
        x(i)=dx*i
        [Lam,Ro,Cp]=tep(T(i,j-1))
        T(i,j)=T(i,j-1)+(Lam*dt)/(Ro*Cp)*((T(i+1,j-1)-2*T(i,j-1)+T(i-1,j-
1)))/(dx*dx))
    end
end
end

```

```

for j=2:jk+1
PyS(1)=5*10^4
PySi(1,1)=5*10^4
for i=2:ik+1
    [gam]=ter(T(i-1,j-1))
Py(i,j)=2*gam/500*10^5*dx/(D-2*dx*(i-1)-dx)
PySi(i,j)=PySi(i-1,j-1)+Py(i,j)
end
PyS(j)= PyS(j-1)+Py(i,j)
end
for j=1:jk
    PR(j)=PyS(j+1)
end
plot(y,PR)
tnc=20; %температура навколишнього середовища, град.С
r=0.00125; %Термічний опір границі метал/розплав
Skal=0.005; %товщина калібратора, м
lam=61; % Теплопровідність матеріалу калібратора
alfa=12140; %Коеф. тепловіддачі
Rz=r+Skal/lam+1/alfa;
ik=25;
Tik=[180 171 168 166 163 159 156 152 148 144 139 135 130 126 121 117
112 108 104 101 97 94 91 88 85];
X=[0.009 0.018 0.027 0.036 0.045 0.054 0.063 0.072 0.081 0.09 0.099 0.108
0.117 0.126 0.135 0.144 0.153 0.162 0.171 0.18 0.189 0.198 0.207 0.216 0.225]
for i=1:ik
    z(i)=Tik(i)-tnc
    q(i)=z(i)/Rz
Tstkal(i)=tnc+q(i)/alfa
end

```

plot(X,Tstkal)

4.4. Розрахунок визначальних геометричних параметрів

Вхідні данні: матеріал гільзи калібру – БрАЖ9–4 ГОСТ 18175–78 з теплопровідністю $\lambda_{\text{калібр}} = 61 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; внутрішній діаметр гільзи – 21,75 мм, товщина стінки гільзи – $\delta_{\text{калібр}} = 0,005 \text{ мм}$, довжина $L=225 \text{ мм}$.

Метою розрахунку є визначення мінімального вакууму, необхідного для забезпечення термічного контакту трубної заготовки з стінкою калібру.

За методикою наведеною в розділі 2.6 для нової конструкції калібратору коефіцієнт тепловіддачі склав $\alpha = 16200 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, що в 1,25 раз більше ніж в існуючій моделі.

Результати розрахунку програми наведеної в розділі 4.3 зображені на рисунку 4.4.

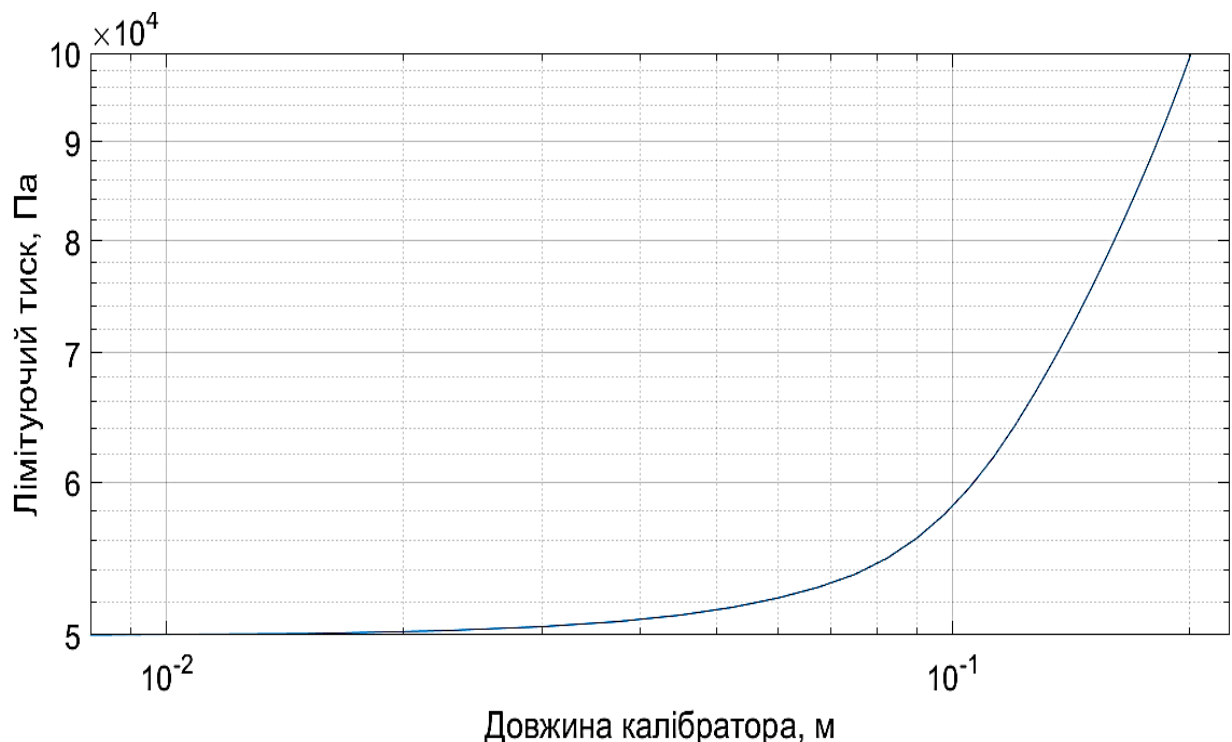


Рисунок 4.4 – Залежність напруженого стану у матеріалі трубної заготовки, що виникають при її склуванні, та умова збереження термічного контакту

Таким чином інтенсифіковано процес теплообміну в зоні калібрування та забезпечено контроль якості.

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано фізичну модель процесу теплообміну поліпропілену при формуванні в калібраторі з урахуванням зміни агрегатного стану;
2. Розроблено математичну модель процесу калібрування труб з поліпропілену з урахуванням зміни заготовкою агрегатного стану та розв'язано методом чисельного інтегрування за явною схемою в програмному середовищі MathLAB;
3. Проведено віртуальний експеримент у середовищі SolidWORKS процесу теплообміну трубної заготовки з урахуванням зміни агрегатного стану поліпропілену;
4. Розроблено рекомендації щодо проектування калібруючого пристрою формуючого інструменту;
5. Отримані в результаті досліджень процесу узагальнені залежності тиску калібрування від параметрів теплообміну та швидкості екструзії.

Результати роботи можуть бути використанні для розробки та перевірки нових калібруючих інструментів, з урахуванням теплофізичних властивостей відповідних марок поліпропілену.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Штарке Л. Использование промышленных и бытовых отходов пластмасс: Пер. с нем./Под ред. В. А. Брагинского. – Л.: Химия, 1987. – 176 с.
2. ДСТУ Б В.2.7-144:2007 Труби для мереж холодного та гарячого водопостачання із поліпропілену.
3. Характеристики поліпропілену Teldene H03BPM [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tana-td.prom.ua/p268701566-polipropilen-teldene-h03bpm.html> за 20.09.2017
4. «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; с. 30-34.
5. «Основні шляхи підвищення ефективності виготовлення полімерних труб» Вознюк В. Т., Мікульонок І. О., Виноградов Є. Ю. Вісник ІХФ, Видання № 2 (6) – 2010; с. 50-55.
6. 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.
7. RIVAL® [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.rival.dk/page1793.aspx?layout=2> за 15.01.2018
8. Pat. 102005062138 (DE), Int. C18 В 29 С 47/90. Kalibrier hylsefr extrudierte Kunststoffrohre / J. Schmuhl,, R. Michels, J. Müller. — № 102005062138.4 ; appl. 22.12.05 ; publ. 05.07.07.
9. iNOEX Headquarter [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.inoex.de/produkte-englisch/?L=3> за 13.11.2017
10. LIMA Extrusion [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://limaextrusion.com/en/projects/pipe-extrusion-calibration-system/> за 13.11.2017

11. ООО "ФОРМОТРОНИК" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://formotronik-nn.ru/hranenie_podgotovka_podacha_sirya/upravlenie_ekstruziej/kalibruyuvie_vtulki_i_prinadlezhnosti/seriya_aks/ за 13.11.2017
12. SCITEQ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sciteq.com/products/online-quality-control/sciteq-adjustable-calibrating-sleeves/> за 13.11.2017
13. ООО "ФОРМОТРОНИК" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://formotronik-nn.ru/hranenie_podgotovka_podacha_sirya/upravlenie_ekstruziej/kalibruyuvie_vtulki_i_prinadlezhnosti/seriya_aks/ за 13.11.2017
14. TECNOMATIC SRL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tecnomaticsrl.net/prodotto/en/121/Calibration-sleeves.aspx> за 13.11.2017
15. «Prototype and methodology for the characterization of the polymer-calibrator interface heat trans for coefficient» O.S. Carneiro*, J.M. Nybrega, A.R. Mota, C. Silva, Polymer Testing 32 (2013) 1154–1161.
16. De Gruyter Open, «Calibrator device for the extrusion of cable coatings», Tomasz Garbacz, Ludmila Dulebov*, Emil Spišak, and Martina Dulebova, OpenEng. 2016; 6:120–124.
17. 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.
18. Патент EP 2226178 A2/ B29C47/88, B29C47/90, B29C47/92 / «Device and method for the calibration of extruded pipes», Fausto Battaglia, 8 сен 2010.
19. Патент CN 1272160 C / B29C47/90 / «Device and method for producing plastic pipe», 乌尔里希·哈伯特, 约阿西姆·维尔纳, 30 авг 2006.

20. Патент US 6200119 B1 / B29C47/90 / «Extrusion calibrator with modular calibrating cassette», WalterPelto, DonaldZoubek, KevinBartness, 13 мар 2001.

21. Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины: Конструкции и технические расчеты / Пер. с англ.яз.; Под.ред. В.П. Володина. – СПб.: Профессия, 2007. – 472 стр.,ил.

22. Швайгер Майнхард. Машины и инструмент фирмы «Technoplast» для успешного производства профилей методом экструзии. Семинар «Технопласт – новые технологии в России». Москва, 31.01 – 01.02.2001.

23. Швабауэр В.В., Жилина Н.В., Кизнис П.А. Двухстороннее охлаждение труб из термопластов в процессе экструзии / Обз. инф. – М.: НИИТЭХИМ, 1985. – 19 с.

24. Швабауэр В.В. «Исследование и разработка методов расчета процессов калибрования и охлаждения при высокоскоростной экструзии труб из термопластов»/ Дис. канд. техн. наук. – М. МИХМ, 1981.

25. Крейнин Е.Б., Швабауэр В.В. Тепловой расчет калибрующих устройств для производства труб / Пластич. массы, 1975. № 10. – С. 67-70.

26. Володин В.П., Кучма О.С. Определение размеров формующего инструмента экструзионных головок для производства труб в зависимости от способа калибрования/ Сб. научн. трудов НП «Пластик» «Производство, свойства и применение пластмасс и изделий из них». – М.: НИИТЭХИМ, 1977. С. 20-34.

27. Крейнин Х.Б., Швабауэр В.В., Мошкович Л.С., Филатова Л.Б. / «Калибрование труб изполимерных материалов»/ Обз. инф. – М.: НИИТЭХИМ, 1978. – 20с.

28. Володин В.П. / «Программы компьютерного анализа процессов калибрования и охлаждения экструдированных изделий» / Пластикс, 2006, №6 – С. 57-62; №7,8 – С.68-71.

29. Володин В.П./ « Процессы постформинга при экструзии профилей»/ WorldPlastics. Мир пластмасс. Россия, 2006. Т.3, №4. – С. 26-36.

30. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Химия, 1974. – 392 с.+ 1 вкл. 16 с.
31. Манделькерн Л. Кристаллизация полимеров. – М. – Л.: Химия, 1966. – 334с.
32. Манделькерн Л. Кристаллизация полимеров. Москва-Ленинград, Химия, 1966. - 336 с.
33. Півень А.Н., Гречаная Н.А., Чорнобільський І.І., «Теплофизические свойства полимерных материалов. Справочник». Издательское объединение «Вища школа», 1976, 180с.
34. Новиченок Л.Н., Шульман З.П. Теплофизические свойства полимеров. – Минск: Наука и техника, 1971. – 117.
35. Полипропилен и сополимеры полипропилена. Технические условия: ГОСТ 26996-86.– Введ. 1988-01-01. – М. : Изд.–во стандартов, 2002, – II, 36 с.
36. 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.
37. Переработка пластмасс / Шварц О., Эбелинг Ф.В., Фурт Б.: под общ. ред. А.Д. Паниматченко. – СПб.: Профессия, 2005. – 320 стр., ил.
38. Polyplastic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://polyplastic.ua/ua/news/news-101.html> за 21.11.2017.
39. Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением. Марки : ГОСТ 18175 – 78.– Введ. 1991-01-04. – М. : Изд.–во стандартов, 1991, – II, 8 с.
40. «Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие» / Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172с.
41. <http://posibnyky.vntu.edu.ua/met/lek11.htm> 25.03.2017.
42. 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).

43. Технические свойства полимерных материалов: Учеб. – справ. пособие / Крыжановский В. К., Бурлов В. В. [и др.]. – 2-е изд., доп. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 с.

44. Молчанов Ю.М. Физические и механические свойства полиэтилена, полипропилена и полиизобутилена. – Рига: Зинатне, 1966. – 439с.

45. Переработка термопластичных материалов / Э. Бернхард. – М. Госхимиздат. 1962. – 747 с.

46. Карапатницкий А.М., Айзенштейн М.М., Володин В.П., Афанасьева Н.Б./ Повышение размерной точности труб изполиэтилена/ Пластич. Массы, 1977. - №7. – С.37-39.

47. Teplomatica.ru © [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.teplomatica.ru/radiatory/truby-dlya-sistem-otopleniya/polipropilenovye-truby/kalde-truba-polipropilenovaya-dn-20-pn-20.html> за 20.05.2017.

48. Использование MS Excel для анализа статистических данных: учебное пособие; В.Р. Бараз, В.Ф. Пегашкин; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУим. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нежнетагил. техн. Ин-т (филиал). – 2-е издание., перераб. и доп. – Нижний Тагил: НТИ(филиал) УрФУ, 2014. – 181 с.

49. Савчук В.П. Обработка результатов измерений. Физическая лаборатория. Ч1:Учеб. пособие для студентов вузов. — Одесса: ОНПУ, 2002 – 54 с. ил.

50. Заявка на корисну модель України № U201700298, МПК(2017) В29С 55/00, В29С 47/90 завл. 11.01.2017.

51. Штарке Л. Использование промышленных и бытовых отходов пластмасс: Пер. с нем./Под ред. В. А. Брагинского. – Л.: Химия, 1987. – 176 с.

52. ConPro GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.conpro.de/www/index.php?article_id=82&clang=02 за 13.11.2017.