

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**ПОДИМАН ГРИГОРІЙ СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 678.05:66.021.4

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ТЕПЛООБМІН ПРИ КАЛІБРУВАННІ ТРУБ З ТЕРМОПЛАСТІВ**

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Г.С. Подиман

Науковий керівник Семінський Олександр Олегович, кандидат технічних наук,  
доцент

Київ – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Подиман Г.С.* Теплообмін при калібруванні труб з термопластів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2024.

Процес калібрування є одним з визначальних для якості труб з полімерних матеріалів, які виготовляються методом екструзії, від досконалості калібрувального пристрою залежить продуктивність і питомі енерговитрати при виробництві гладких труб з термопластів, особливо для труб малого діаметра (16...25 мм).

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню процесу калібрування труб з термопластів, а саме інтенсифікації процесу перенесення тепла та зменшенню напружень в матеріалі труби, яка калібрується для модернізації існуючих конструкцій калібрувальних пристроїв, що дозволить збільшити швидкість калібрування і продуктивність екструзійного обладнання для виробництва труб.

Проведено аналітичний огляд сучасного стану досліджень процесів калібрування при екструзії термопластів. Розглянуто основні сучасні технології калібрування та конструкції калібрувальних пристроїв, на основі патентного пошуку проаналізовано основні напрямки вдосконалення їх конструкції.

За результатами аналітичного огляду визначено шляхи модернізації калібрувальних пристроїв, сформульовано напрями інтенсифікації перенесення тепла та зменшення механічних навантажень в матеріалі стінки труби, яка калібрується, сформульовано обмеження технологічних параметрів і визначальних геометричних розмірів калібрувального пристрою.

При калібруванні труб з термопластів відбувається кілька пов'язаних між собою процесів: перенесення тепла через стінку калібрувальної гільзи, утворення надмолекулярних структур в матеріалі стінки труби, яка калібрується, зі зміною

його теплофізичних параметрів, також, виникають напруження від тертя зовнішньої стінки труби по поверхні калібрувальної гільзи.

В даній роботі результати сучасних досліджень вдосконалено та поєднано для вирішення наукової задачі підвищення ефективності процесів теплообміну в калібрувальному пристрої при одержанні труб з термопластів із заданими властивостями.

Для моделювання процесу перенесення тепла в роботі використано двовимірну математичну модель нестационарної теплопровідності з врахуванням теплоти фазового переходу при утворенні надмолекулярних структур. Обґрунтовано використання декартової системи координат для швидкоплинного охолодження при калібруванні, сформульовано граничні умови другого роду – питомий тепловий потік від матеріалу стінки труби яка калібрується до охолоджувальної рідини. Враховано термічний опір між стінкою труби яка калібрується до стінки калібрувальної гільзи. Розрахунок температурних полів в матеріалі стінки труби яка калібрується виконано для поліетилену високої густини: в обчислювальному експерименті з використанням методу скінченних різниць за явною схемою, програмне забезпечення Python 3.7; в симуляційному експерименті з використанням CFD систем. Розбіжність розрахунків оцінено за допомогою критерія Фішера, зроблено висновок щодо можливості використання CFD систем для розрахунку температурних полів при калібруванні труб з термопластів за умови врахування зміни теплофізичних параметрів в широкому діапазоні температур. Також, проведено обчислювальний експеримент для поліпропілену тип 1.

При охолодженні труби в розплаві термопласта утворюються надмолекулярні структури (протікає склування), при цьому зміни теплофізичних та механічних властивостей характеризуються ступенем кристалічності. При збільшенні ступеня кристалічності зменшується питомий об'єм матеріалу і виникає усадка. Для запобігання порушення термічного контакту труби, яка калібрується, зі стінкою калібрувальної гільзи необхідно підтримувати тиск у вакуумній ванні.

Процес усадки досліджено теоретично, що дозволило розробити модель та алгоритм для розрахунку значення тиску, необхідного для забезпечення термічного контакту.

Встановлено, що процес склування термопластів при охолодженні в калібрувальному пристрої відбувається в двох послідовно розташованих умовних зонах – зоні формування твердої плівки та зоні її росту, а процес перенесення тепла для зони формування лімітується зовнішньою задачею, тому інтенсифікація перенесення тепла від зовнішньої стінки калібрувальної гільзи до охолоджувальної рідини дозволяє покращити умови калібрування. В зоні росту охолодженої і механічно міцної плівки термопласту інтенсифікація охолодження калібрувальної гільзи мало впливає на процес калібрування.

Для перевірки положень фізичної та математичних моделей процесів перенесення тепла в калібраторі із застосуванням контрольованого розрідження проведено натурний експеримент з використанням промислового обладнання. Результати натурального експерименту узагальнено та порівняно з результатами, отриманими з серії обчислювальних експериментів, підтверджено адекватність моделі та коректність алгоритму і програми розрахунку.

За результатами натурних та обчислювальних експериментів запропоновано кореляційну залежність  $P_{\min} = k_1(\tau - \tau_0)^{k_2}$  для визначення мінімального тиску розрідження, який достатній для протидії ефекту усадки при склуванні розплаву термопласта і дозволяє зберегти термічний контакт труби, яка калібрується з поверхнею калібрувальної гільзи. Експериментально визначено коефіцієнти закономірності для калібрування труби діаметром 25 мм, з поліетилену високої густини та калібрувального пристрою з адаптивним розрідженням по зонам експериментально визначено коефіцієнти для розрахунку величини розрідження:  $k_1=6 \cdot 10^4 \text{ Па/с}^{1,25}$ ;  $k_2=1,25$ ; час формування міцної плівки з розплаву  $\tau_0=0,2 \text{ с}$ .

Розрідження вздовж калібрувальної гільзи має відповідати мінімальному тиску для забезпечення термічного контакту труби з поверхнею калібрувальної

гільзи, що дозволяє уникнути відриву труби від поверхні калібрувальної гільзи до завершення росту товщини твердого шару, та зменшити зусилля протягування, які викликають напруження в тонкому охолодженому шарі термопласту, який має механічну міцність. Забезпечення поставленої умови дозволяє збільшити швидкість калібрування та, відповідно, продуктивність виробництва без збільшення кількості обривів лінії і втрати якості труби.

Запропоновано нові, більш прогресивні відносно сучасних, конструкції вакуумних трубних калібрувальних пристроїв з двома зонами розрідження. Отримано два патенти на корисні моделі калібрувальних пристроїв з контрольованим розрідженням вздовж калібрувальної гільзи. Нові конструкції забезпечують збільшення площі теплообміну калібрувальної гільзи з охолоджувальною рідиною до 50 % та збільшення коефіцієнта тепловіддачі більш ніж вдвічі. Для модернізованих конструкцій калібрувального пристрою запропоновано алгоритм розрахунку визначальних геометричних розмірів елементів модернізації – гвинтового каналу на основі гідравлічного опору та обмежень пристроїв створення розрідження (вакуумного насосу) і складено програму в середовищі Python 3.7.

Для модернізованого калібрувального пристрою проведено серію обчислювальних експериментів з використанням циліндричної системи координат та граничних умов третього роду, отримано графіки для інженерного розрахунку довжини зони охолодження після калібрувального пристрою.

Наукова новизна одержаних результатів:

*Вперше:*

- обґрунтовано умови процесу теплообміну з контрольованим термічним опором при контакті труби та робочої поверхні калібруючої гільзи при заданій динаміці процесу кристалізації, що дозволить збільшити продуктивність лінії при збереженні якості виробу;
- експериментально визначено час формування твердого шару полімеру

на зовнішній поверхні труби при контакті з калібратором та визначено мінімальне значення та динаміку зміни розрідження в камері калібратора для забезпечення заданого термічного опору при охолодженні без механічного руйнування новоутвореного твердого шару на трубній заготовці;

- обґрунтовано умови мінімального розрідження в зоні калібрувального пристрою для термічного контакту рухомої труби зі стінкою калібрувальної гільзи, що дозволить підвищити якість виробів.

*Удосконалено:*

- математичну модель процесу теплообміну при калібруванні з урахуванням зміни фізичного стану та теплофізичних параметрів, термічного опору на межі метал–термопласт;

- експериментально визначено технологічні параметри роботи калібрувального пристрою для виробництва труб з поліетилену при різних режимах калібрування.

*Дістало подальший розвиток:*

- підходи до проектування інноваційних конструкцій калібрувальних пристроїв для виробництва труб з термопластів із застосуванням методів експериментально-чисельного моделювання.

Науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес на кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Розроблено алгоритм розрахунку модернізованої конструкції калібруючого пристрою, що дозволить збільшити продуктивність на 15% при виробництві труб діаметром 16, 20 та 25мм.

**Ключові слова:** МОДЕЛЮВАННЯ, ЕКСТРУЗИЯ, ЕКСТРУДЕР, КАЛІБРАТОР, ТЕПЛОПЕРЕДАЧА, НАГРІВАННЯ, ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ, ТЕМПЕРАТУРНІ ПОЛЯ, ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ТЕПЛОФІЗИЧНІ

ВЛАСТИВОСТІ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ПОЛІМЕР, ТЕРТЯ, ТЕРМІЧНИЙ  
ОПР, ФАЗОВИЙ ПЕРЕХІД.

## ABSTRACT

Podyman H. Heat exchange during calibration of thermoplastic pipes. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

PhD thesis in the field of knowledge 13 Mechanical engineering 133 Branch mechanical engineering. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2024.

The calibration process is one of the determinants of the quality of pipes made of polymeric materials, which are made by extrusion, from the perfection of the calibration device depends on the productivity and specific energy consumption in the production of small diameter pipes (16÷25 mm).

The dissertation is devoted to the investigation of the calibration process of thermoplastic pipes, namely, the intensification of the heat transfer process and the reduction of stresses in the material of the tube being calibrated for the modernization of existing designs of calibration devices, which will increase the speed of calibration and the productivity of extrusion equipment for the production of pipes.

An analytical review of the current state of research on calibration processes during the extrusion of thermoplastics was carried out. The leading modern technologies of calibration and the design of calibration devices are considered, based on a patent search, and the main areas of improvement of their design are analyzed.

Based on the results of the analytical review, the ways to modernize the calibration devices were determined, directions for heat transfer intensification and reduction of mechanical loads in the material of the pipe wall being calibrated were formulated, limitations of technological parameters and defining geometric dimensions of the calibration device were formulated.

When calibrating thermoplastic pipes, several interconnected processes occur: heat transfer through the wall of the calibration sleeve, the formation of supramolecular structures in the material of the pipe wall, which is calibrated with a change in its



thermophysical parameters, and stresses arise from the friction of the outer wall of the pipe on the surface of the calibration sleeve.

In the work, the results of modern research are improved and combined to solve the scientific problem - of modeling the heat exchange process during the calibration of thermoplastic pipes.

A two-dimensional mathematical model of non-stationary thermal conductivity, taking into account the heat of the phase transition during the formation of supramolecular structures, was used to simulate the process of heat transfer to work. The use of the Cartesian coordinate system for rapid cooling during calibration is substantiated, and the boundary conditions of the second kind are formulated - the specific heat flow from the material of the pipe wall, which is calibrated to the coolant. The thermal resistance between the pipe wall, which is calibrated to the wall of the calibration sleeve, is taken into account. Calculation of temperature fields in the material of the pipe wall to be calibrated, performed for high-density polyethylene: in a numerical experiment using the finite-difference method according to the explicit scheme, Python 3.7 software; in a simulation, experiment using a CFD system. The calculation discrepancy was assessed using Fisher's test, a conclusion was drawn regarding the possibility of using the CFD system to calculate temperature fields during the calibration of thermoplastic pipes, provided that changes in thermophysical parameters in a wide temperature range are taken into account. A numerical experiment was also carried out for polypropylene type 1.

When the pipe is cooled, supramolecular structures are formed in the thermoplastic melt, while changes in thermophysical and mechanical properties are characterized by the degree of crystallinity, and the process itself is called "vitrification". When the degree of crystallinity increases, the specific volume of the material decreases and shrinkage occurs. To preserve the thermal contact of the pipe being calibrated with the wall of the calibration sleeve, the minimum necessary pressure in the vacuum bath was analytically determined according to the calculated temperature fields. Models of elastic and plastic deformations were used.

The results of the natural experiment were summarized and compared with the results obtained from a series of numerical experiments, and the adequacy of the model and the correctness of the algorithm and the calculation program were confirmed.

It was established that the vitrification process of thermoplastics during cooling in the calibration device takes place in two sequentially located conditional zones - the zone of formation of a solid film and the zone of its growth, and the process of heat transfer for the zone of formation is limited by an external task, therefore, the intensification of heat transfer from the outer wall of the calibration sleeve to the cooling liquid allows to improve the calibration conditions. In the growth zone of the cooled and mechanically strong thermoplastic film, the intensification of the calibration sleeve cooling has little effect on the calibration process.

Based on a series of field and numerical experiments, the  $P_{\min} = k_1(\tau - \tau_0)^{k_2}$  regularity is proposed to determine the minimum vacuum pressure, which is sufficient to counteract the shrinkage effect during glazing of the thermoplastic melt and maintain thermal contact pipe being calibrated with the surface of the calibration sleeve. The coefficients of regularity for a pipe with a diameter of 25 mm, made of high-density polyethylene and the design of the calibration device which was used in the field experiment were determined:  $k_1=6E+4$  Pa/s;  $k_2=1,25$ ; the time of formation of a mechanically strong film from the melt  $\tau_0=0,2$  s.

The vacuum along the calibration sleeve must correspond to the minimum pressure to ensure thermal contact of the pipe with the surface of the calibration sleeve, which allows to avoid separation of the pipe from the surface of the calibration sleeve before its growth is complete and reduces the drawing forces that cause stress in the thin cooled layer of thermoplastic, which has a mechanical strength. Ensuring the given condition allows you to increase the speed of calibration and, accordingly, production productivity without increasing the number of line breaks and losing the pipe quality.

New designs are proposed that are more advanced than current vacuum tube calibration devices with two rarefaction zones. Two patents have been received for useful

models of calibration devices with controlled rarefaction along the calibration sleeve. The new designs provide an increase in the heat exchange area of the calibration sleeve with the coolant by up to 50% and an increase in the heat transfer coefficient by more than 2 times. pump), the program was compiled in the Python 3.7 environment.

For the modernized calibration device and the condition of increasing the calibration speed, a series of numerical experiments were conducted using a cylindrical coordinate system and boundary conditions of the third kind, graphs were obtained for the engineering calculation of the length of the cooling zone after the calibration device.

The scientific novelty of the obtained results.

*For the first time:*

- experimentally determined the time of the formation of the pipe blank and obtained regularities for determining the minimum rarefaction necessary to ensure the given thermal resistance when calibrating thermoplastic pipes, as well as substantiate the conditions of minimum rarefaction in the area of the calibration device for thermal contact of the moving pipe with the wall of the calibration sleeve, which will improve the quality products;

- the conditions of the heat exchange process with controlled thermal resistance at the contact of the pipe and the working surface of the calibrating sleeve with the specified vitrification dynamics of the thermoplastic are justified, which will allow for increased productivity while maintaining the quality of the product;

*Improved:*

- a mathematical model of the heat exchange process during calibration, taking into account phase transitions with changes in thermophysical parameters, thermal resistance at the metal–thermoplastic interface;

- the technological parameters of the calibration device for the production of polyethylene pipes under different rarefaction regimes were determined experimentally.

*Received further development:*

- approaches to the design of effective designs of calibration devices for the

production of thermoplastic pipes using experimental and numerical modeling methods.

The scientific and technical results of the dissertation work were implemented in the educational process of the Department of Machines and Apparatus of Chemical and Oil Refining Industries of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. An algorithm for calculating the modernized design of the calibration device has been developed, which will increase productivity by 15% in producing pipes with a diameter of 16, 20, and 25 mm.

**Keywords:** SIMULATION, EXTRUSION, EXTRUDER, CALIBRATOR, HEAT TRANSFER, HEATING, THERMAL PROCESSES, TEMPERATURE FIELDS, PHYSICAL PROPERTIES, THERMOPHYSICAL PROPERTIES, MECHANICAL PROPERTIES, POLYMER, FRICTION, THERMAL RESISTANCE, PHASE TRANSITION.

## Список публікацій здобувача за темою дисертації

### Монографії

1. Корнієнко, Я. М. Калібрування труб з поліпропілену [Електронний ресурс] : монографія / Я. М. Корнієнко, Г. С. Подиман, Я. Г. Двойнос ; КПІ імені Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,72 Мбайт). – Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2018 – 101 с. Назва з екрана. [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23759/1/Podyman\\_monograph.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23759/1/Podyman_monograph.pdf) (Монографія. Здобувачем виконано розділи 1 «Задачі досліджень» та 2 «Моделювання процесу калібрування труб»).

### Статті у наукових фахових виданнях

1. **Podyman H.S.**, Dvoinos Y.H., Novik V.A. (2021). Modeling the Homogenization Process of Polyethylene Compositions in a Single-Screw Extruder with a Maddock Mixing Element. *Mechanics of Composite Materials*. - 2021, - Vol. 57, No. 4, pp 517-526. ISSN: 0191-5665 eISSN: 1573-8922. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11029-021-09974-x> (здобувачем сформульовано математичну модель течії розплаву композиції у робочих зазорах елементу Меддока та оцінено вплив температурної неоднорідності на різнотовщинність труби, закордонна публікація, Латвія, WoS та Scopus (Q2)).

2. **Подиман Г.С.**, Двойнос Я.Г., Рудницький Б.А. (2020). Розрахунок теплообмінних процесів при каландруванні листів з поліетилену / Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження» – 2020. - №4. – с.9-16. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2020.219779> ISSN: 2617-9741 (Print) (здобувачем сформульовано математичну модель теплообміну для листів з поліетилену високої густини та валками каландру, категорія Б).

3. **Подиман, Г. С.**, Корнієнко, Я. М., & Семінський, О. О. (2024). Обґрунтування методики розрахунку калібрувальної гільзи для виробництва труб з термопластів. Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна

інженерія, екологія та ресурсозбереження, (2), 9–17. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2024.307351> (здобувачем сформульовано удосконалену методику розрахунку калібрувальних гільз для виробництва труб з термопластів, категорія Б).

### **Наукові праці апробаційного характеру:**

1. **Подиман Г.С., Двойнос Я.Г.** (2016). Обґрунтування методики експериментальних досліджень процесу калібрування труб з полімерних матеріалів. Збірник праць XVII міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв». – Одеса: 18.08.2016. – С. 139-142.

2. **Подиман Г.С., Двойнос Я.Г.** (2016). Критичні значення вакууму при калібруванні труб з поліетилену. Збірник праць XVII міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв». – Одеса: 18.08.2016. – С. 220-223.

3. **Подиман Г.С., Двойнос Я.Г.** (2015). Процес калібрування труб з поліпропілену. Збірник тез доповідей IX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 24.11.2015. – С. 58-59.

4. **Подиман Г.С., Двойнос Я.Г.** (2016). Процес калібрування труб з поліпропілену. Збірник тез доповідей X міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 18.04.2016. – С. 47-48.

5. **Подиман Г.С., Двойнос Я.Г.** (2016). Критичне значення вакууму при калібруванні труб з поліетилену. Збірник тез доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 06.12.2016. – С. 25-26.

6. **Подиман Г.С., Двойнос Я.Г.** (2017). Процес кристалізації розплаву поліпропілену. Збірник тез доповідей XII міжнародної науково-практичної

конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 26.04.2017. – С. 49-50

7. **Подиман Г.С., Двойнос Я.Г.** (2017). Постановка та організація експерименту. Збірник тез доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 29.11.2017. – С. 30-31

8. **Подиман Г.С., Двойнос Я.Г.** (2018). Експериментальна установка для дослідження теплопровідності. Збірник тез доповідей XIV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 23.04.2018. – С. 64-65

9. **Подиман Г.С., Двойнос Я.Г.** (2018). Сушіння для рециклінгу при виробництві труб і інших виробів з полімерів. Збірник тез доповідей XV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 28.11.2018. – С. 70-71

10. **Подиман Г.С., Двойнос Я.Г.** (2019). Модернізація конструкції калібратора. Збірник тез доповідей XVI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 22.04.2019. – С. 61-62

11. **Подиман Г.С., Двойнос Я.Г.** (2019). Обґрунтування методики експериментальних досліджень процесу калібрування труб з полімерних матеріалів. Збірник тез доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 25.11.2019. – С. 50-51

12. **Podiman G., Rudnytskyi Y., Dvoynos Y.** (2020). Process of cooling polyethylene pipes. Збірник тез доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 21.05.2020. – С. 78-81

13. **Podiman G.**, Rudnytskyi Y., Dvoinos Y. (2020). Numerical methods in thermal calculation of a calender for polyethylene processing. Збірник тез доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 25.11.2020. – С. 94-97

14. **Podiman H.**, Dvoinos Y. (2021). Broach effort of polymer pipes during calibration. Збірник тез доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 28.04.2021. – С. 174-177

15. **Podyman Hryhorii** (2022). Air circulation inside the pipe during calibration Збірник тез доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». – К.: 24-26.06.2022. – С. 75-77.

16. **Hryhorii PODYMAN** (2023). PROBLEMS OF POLLUTION WITH POLYMERS AND THEIR USE IN INDUSTRY // Збірник тез доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (15 грудня 2023 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. – 229 с. С.211-213

17. **Hryhorii PODYMAN**, Oleksandr SEMINSKYI (2024). MARKET OF THERMOPLASTIC PIPES IN UKRAINE // Збірник тез доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (16 травня 2024 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2024. – 184 с. С.16-20

### **Патенти України на корисні моделі**

1. Патент №98381 Україна МПК В29С 47/06 (2006.01), В29С 47/90 (2006.01). Калібрувальний пристрій для виробництва двошарової гофрованої труби / Двойнос Ярослав Григорович (UA ); **Подиман Григорій Сергійович** (UA ) – u201412216



заявл. 12.11.2014, опубл. 27.04.2015, бюл. № 8/2015.

2. Патент №120801 Україна МПК В29С 55/00, В29С 47/90 (2006.01).  
Калібратор / **Подиман Григорій Сергійович** (UA ); Двойнос Ярослав Григорович  
(UA ) – u201700298 заявл. 11.01.2017, опубл. 27.11.2017, бюл. № 22/2017.

### **Праці, які додатково відображають наукові результати**

1. . Сацедотов А.О., **Подиман Г.С.**, Носов О.П., Двойнос Я.Г. (2018).  
Технологии сушки вторичного измельченного полиэтилена / Энерготехнологии и  
ресурсосбережение. – 2018. - № 4. – с. 69-72. ISSN 2413-7723 (здобувачем  
сформульовано математичну модель теплообміну для поліетилену вторинного  
високої густини, категорія Б).

2. Гребелюк І. В., **Подиман Г. С.**, & Двойнос Я. Г. (2018). Оцінка впливу  
температурної неоднорідності розплаву на екструзію труб з ПЕТ. Вісник НТУУ  
“КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та  
ресурсозбереження. – 2018, - №1, - с. 11–17. <https://doi.org/10.20535/2306-1626.1.2018.143370>.

3. Крестошина О.П., Бишко М.А. , **Подиман Г. С.**, Двойнос Я.Г. (2019).  
Метод імітаційного моделювання для проектування апаратів з мішалкою. / Вісник  
Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження».  
– 2019, - №1, - с.31-35. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171026>

4. Dvoinos Y.H., **Podyman H.S.**, Rudnytskyi B.A. (2020). Calculation of the  
effective temperature difference during thermostabilization of calender shafts for  
formation sheets from thermoplastics / Modern engineering and innovative technologies,  
Issue 14 / Part 1, pp 23-27, 2020; DOI: 10.30890/2567-5273.2020-14-01-050. ISSN 2567-  
5273 (Online). Назва з екрана.

<https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit14-01/meit14-01>

5. Патент №125823 Україна МПК А23G 7/00, А23G 3/02 (2006.01). Вал для  
різання та формування карамелі з джгута / Двойнос Ярослав Григорович (UA );

**Подиман Григорій Сергійович** (UA ) – u201712662 заявл. 20.12.2017, опубл. 25.05.2018, бюл. № 10/2018.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ .....	22
ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	30
1.1 Світові тенденції виробництва виробів з термопластів .....	30
1.2 Обґрунтування застосування термопластів для виготовлення труб.....	31
1.3 Теплофізичні та фізико-механічні властивості термопластів .....	34
1.4 Критерії оцінки якості виробів з термопластів при калібруванні.....	43
1.5 Конструкції промислових калібраторів .....	46
1.6 Особливості теплообміну при охолодженні труби в калібраторі .....	53
1.7 Мета та задачі дослідження.....	58
Висновки по розділу 1 .....	59
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ В КАЛІБРАТОРІ.....	60
2.1. Фізична модель процесу калібрування труб з термопластів .....	60
2.2. Математична модель процесу калібрування труб з термопластів .....	67
2.2.1. Визначення температурного поля в стінці трубної заготовки при калібруванні .....	68
2.2.2. Теплопередача в зонах II і III калібратора.....	74
2.3. Умови збереження ефективного термічного контакту труби та поверхні калібратора.....	77
2.4. Процес охолодження труби після калібратора .....	80
2.5. Розрахунок зусилля протягування труби через калібратор .....	84
2.6. Обчислювальний експеримент щодо визначення локальних значень температури стінки труби з термопласту .....	86

2.7 Визначення температурного поля в стінці труби .....	91
2.8 Перевірка адекватності математичного опису .....	97
Висновки по розділу 2 .....	99
<b>РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КАЛІБРУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕПЛООБМІНУ .....</b>	<b>101</b>
3.1. Комплексна методика експериментальних досліджень .....	101
3.2. Основні характеристики полімерів .....	105
3.3. Опис експериментальної установки .....	106
3.3.1 Тепловий розрахунок калібратора .....	110
3.3.2 Розрахунок коефіцієнта перфорації .....	118
3.3.3 Продукт, отриманий з використанням експериментального калібратора .....	119
3.3.4 Гідравлічний розрахунок тиску в гвинтовому каналі калібрувальної гільзи .....	124
3.4 Особливості калібрування при виготовленні труб з термопластів .....	125
3.5. Вибір основних технологічних параметрів калібрування .....	127
3.6 Визначення зусилля протягування при застосуванні калібратора обраного типу .....	128
3.7 Процес охолодження труби у водяній ванні .....	133
Висновки до розділу 3 .....	138
<b>РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>	<b>140</b>
4.1 Опис технологічного процесу одержання гладких труб з термопластів .....	140
4.2 Конструктивно-технологічна концепція промислового калібратора .....	141
4.3. Базові вимоги до проведення процесу калібрування трубної заготовки із застосуванням розрідження .....	142
4.4. Методика розрахунку промислового калібратора .....	144

4.4.1 Розрахунок теплових полів трубної заготовки при калібруванні та розрідження.....	144
4.4.2 Методика аналітичного розрахунку довжини калібрувальної гільзи .....	146
4.4.3 Розрахунок площі перфорації .....	152
4.4.4 Визначення тягнучого зусилля в промисловому калібраторі .....	154
4.4.5 Уточнений розрахунок довжини .....	155
4.5. Ефективність від впровадження результатів дисертації .....	157
Висновки до розділу 4 .....	158
Висновки .....	159
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	162
Додатки.....	176
Додаток А. Оцінка похибок вимірювання .....	177
ДОДАТОК Б Програма розрахунку температурних полів та тиску розрідження	181
ДОДАТОК В Програма гідравлічного розрахунку тиску в гвинтовому каналі калібратора.....	199
ДОДАТОК Г Акти впровадження результатів роботи.....	209

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

$F$  – критерій Фішера;

$L$  – довжина калібратора, м;

$x$  – поточна довжина калібратора, м;

$m$  – маса, кг;

$V$  – об'єм, м<sup>3</sup>;

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

$a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;

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

$C_v$  – питома теплоємність при постійному об'ємі, кДж/(кг·град);

$D$  – діаметр труби з термопласту, м

$d$  – діаметр калібрувальної гільзи, м

$F$  – сила, Н

$G_m$  – масова витрата, кг/с

$G_v$  – об'ємна витрата, м<sup>3</sup>/с;

$P(p)$  – тиск, Па

$Q$  – тепловий потік, Дж/с;

$q$  – густина теплового потоку, Дж/(м<sup>2</sup>·с);

$\hat{R}$  – термічний опір;

$S$  – площа поверхні товщина стінки трубної заготовки;

$T$  – температура, К, °С;

$x, y, z$  – координати в декартовій системі координат;

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

$\chi_L$  – лінійна усадка полімеру при склуванні;

$\chi_v$  – об'ємна усадка полімеру при склуванні;

$\delta$  – ширина зазору між поверхнями калібратора та полімерної труби, м;

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

$\mu$  - динамічна в'язкість, Па·с;

$\nu$  - кінематична в'язкість

$\rho$  - густина, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  - час, с;

## Індекси

*air* – повітря;

*clb* – калібратор;

*cl-a* – на гранці калібратора з повітрям;

*cool* – охолодження;

*fld* – рідкий текучий;

*max* – максимальний;

*min* – мінімальний;

*melt* – розплав, плавлення;

*pol* полімер;

PE – поліетилен;

PP.-. поліпропілен:

*sld* – твердий, затвердіти;

*tb* – полімерна труба;

*t-cl* – на границі полімерної труби з калібратором;

*w* - вода

## Основні скорочення:

HDPE (ПЕВГ) – композиції поліетилену високої густини;

LDPE (ПЕВГ) – композиції поліетилену високого тиску;

PP – композиції поліпропілену;

PVC – композиції полівінілхлориду;

SDR – стандартне розмірне відношення труби

## ВСТУП

### Актуальність теми дослідження.

Завдяки своїм фізико-механічним властивостям полімерні труби широко застосовуються в інженерних мережах різного призначення, зокрема для водопостачання, газопостачання, опалення, водовідведення і виготовлення захисних каналів для прокладання електричних кабелів, кабелів зв'язку, оптоволоконного кабелю, тощо. За результатами експлуатації [1-2] кращі результати показали труби виготовлені з композиції поліетилену високої густини (HDPE, далі поліетилен); та поліпропілену (PP) тип 1, – для виготовлення труб безнапірної внутрішньої каналізації, PP тип 2, – труб зовнішньої каналізації, PP тип 3, – труби гарячого водопостачання (далі поліпропілен). А також композиції полівінілхлориду (PVC), – для труб, що працюють під тиском, захисних каналів прокладки електричних кабелів. В окремих випадках для спеціальних умов використовуються композиції полістиролу і поліаміду.

Здатність термопластів переходити при нагріванні в вискоеластичний, або в'язкотекучий стан зумовили найбільш поширене їх застосування при виробництві труб. Ця особливість також дозволяє здійснювати повторну переробку виробів з термопластів.

Драйверами зростання світового ринку труб з полімерних матеріалів є збільшення обсягів будівництва та реконструкція інженерних мереж із заміною металевих труб дешевшими функціональними аналогами.

Так, обсяги виробництва труб з термопластів в Україні, згідно з даними Державної служби статистики України (оцінка Pro-Consulting), з кожним півріччям зростає [1]. Так, зростання ринку труб в 2019/2020рр з полівінілхлориду змінювалось 5774,6 т, 7097,9 т, 2786 т кожне півріччя; з поліетилену – 46307,7 т, 50691,9 т, 38874,4 т; з поліпропілену – 3775,4 т, 5316 т, 4638,4 т. Відповідно зростання ринку полімерних труб з 2019/2020рр відбулось на 55857,7 т, 63105,8 т, 46298 т, що показує на стійкий й стабільний ріст попиту на продукцію. Проте через повномасштабну війну виробництво труб в 2022 р в Україні впало на 38% [3], й потім в 2023 році виробництво зросло на 10,2 % [4].



Це особливо важливо при виробництві труб малого діаметра (16...25 мм).

Водночас невирішеним залишається питання, пов'язане з процесом нестационарного теплообміну з фазовими переходом, під час якого утворюється твердий шар полімеру, міцність якого має бути достатньою для подолання сил тертя, а розрідження має бути достатнім для утримання термічного контакту між заготовкою та гільзою. Вирішення цього питання дозволить досягти підвищення ефективності процесу теплообміну в калібрувальному пристрої, а отже і підвищення продуктивності лінії, та забезпечити високу якість готових виробів, що робить тему дослідження актуальною.

Дослідження процесу теплообміну ґрунтується на роботах таких вчених, як Бернхард Е., Мак-Келві Д., Раувендааль К., Ферранте М., Мікаелі В., Карнейно О., Шварц О., Штегельман М. та вітчизняних вчених Лукача Ю. Ю., Петухова А. Д., Радченка Л. Б., Мікульонка І. О., Сокольського О.Л., Шведа М.П., Юдженка М.В.

**Зв'язок роботи з актуальними науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана відповідно напряму фундаментальних та прикладних наукових досліджень КПП ім. Ігоря Сікорського «Створення високоефективних, екологічно чистих, енерго- та ресурсозберігаючих технологій і обладнання у машинобудуванні, хімічній, легкій, нафтопереробній промисловості, промисловості будівельних матеріалів, розробки об'єктно-орієнтовних систем, конструкційно-технологічного моделювання та забезпечення якості й надійності прогресивної техніки».

Робота виконувалась відповідно до плану наукової роботи кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та ініціативної теми «Процес нестационарного теплообміну зі зміною агрегатного стану аморфних речовин» (державний обліковий №0220U100102, дата реєстрації 09-01-2020).

### **Мета і задачі дослідження.**

**Мета роботи:** підвищення ефективності процесу теплообміну при калібруванні труб з термопластів та розробка конструкції калібрувального пристрою для одержання продукції із заданими властивостями.

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

- обґрунтувати умови формування контрольованого термічного опору при калібруванні труб з термопластів в калібраторі між поверхнею трубної заготовки та стінкою калібрувальної гільзи;
- сформулювати фізичну модель процесу теплообміну між матеріалом стінки трубної заготовки та охолоджуючою рідиною через стінку калібруючої гільзи з врахуванням фазового переходу, що супроводжується усадкою заготовкою, при охолодженні розплаву термопласту та термічного опору на межі метал-зовнішня стінка труби;
- розвинути математичний опис процесу теплообміну з урахуванням особливостей теплообміну при калібруванні;
- розробити методику експериментальних досліджень та провести натурні експерименти, перевірити адекватність положень фізичної та математичної моделей;
- узагальнити результати експериментальних досліджень та встановити раціональні параметри процесу калібрування;
- розробити технічні пропозиції щодо створення іноваційної конструкції калібратора;
- розробити алгоритм та методику розрахунку ефективного калібратора.

**Об'єкт дослідження** – процеси теплообміну в калібраторі при одержанні труб з термопластів методом екструзії.

**Предмет дослідження** – термічний опір між трубною заготовкою та поверхнею гільзи калібратора при формуванні заданої товщини шару скловання.

### **Методи дослідження:**

- теоретичний аналіз процесу теплообміну;

- метод кінцевих елементів для математичного моделювання процесу нестационарного теплообміну, що дозволить визначити температурне поле й прогнозувати товщину твердого шару;
- обчислювальний експеримент методом скінченних різниць із застосуванням мови програмування Python 3.11;
- симуляційний експеримент у програмному пакеті SolidWorks з використанням модуля Flow Simulation за умовами обчислювального експерименту, для перевірки адекватності розробленої моделі та подальшої перевірки відповідності теоретичних результатів експериментальним;
- натурні дослідження в лабораторних та виробничих умовах;
- типові методики оцінки якості та властивостей продукції.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

#### *Вперше:*

- обґрунтовано умови процесу теплообміну з контрольованим термічним опором при контакті труби та робочої поверхні калібруючої гільзи при заданій динаміці процесу кристалізації, що дозволить збільшити продуктивність лінії при збереженні якості виробу;
- експериментально визначено час формування твердого шару полімеру на зовнішній поверхні труби при контакті з калібратором та визначено мінімальне значення та динаміку зміни розрідження в камері калібратора для забезпечення заданого термічного опору при охолодженні без механічного руйнування новоутвореного твердого шару на трубній заготовці;
- обґрунтовано умови мінімального розрідження в зоні калібрувального пристрою для термічного контакту рухомої труби зі стінкою калібрувальної гільзи, що дозволить підвищити якість виробів.

#### *Удосконалено:*

- математичну модель процесу теплообміну при калібруванні з урахуванням зміни фізичного стану та теплофізичних параметрів, термічного опору

на межі метал–термопласт;

- експериментально визначено технологічні параметри роботи калібрувального пристрою для виробництва труб з поліетилену при різних режимах калібрування.

*Дістало подальший розвиток:*

- підходи до проектування інноваційних конструкцій калібрувальних пристроїв для виробництва труб з термопластів із застосуванням методів експериментально-чисельного моделювання.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що:

1. Запропоновано дві модернізовані конструкції калібрувального пристрою для інтенсифікації регульованого теплообміну і зменшення зусилля протягування труби, що калібрується, на які отримано патенти України на корисну модель.

2. Розроблено алгоритм розрахунку модернізованої конструкції калібрувального пристрою для збільшення продуктивності на 15 % при виробництві труб діаметром 25 мм.

3. Результати дослідження використовуються у лекційних, практичних заняттях і лабораторних практикумах, а також при підготовці атестаційних робіт бакалаврів, магістрів та аспірантів за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» для освітніх програм «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії», «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання» та «Галузеве машинобудування». з дисциплін «Процеси та обладнання хімічної технології.-1. Теплові процеси», «Процеси вироблення високомолекулярних сполук», «Процеси переробки високомолекулярних сполук» та «Моделювання стану суцільного середовища», «Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання», «Глибока переробка високомолекулярних сполук».

**Особистий внесок здобувача** полягає в наступному:

- критичному аналізу джерел літератури;
- формулюванні мети та задач дослідження;
- формулюванні фізичної та математичної моделей процесів нестационарного

теплообміну в калібрувальному пристрої й контрольованого термічного опору з врахуванням процесів утворення надмолекулярних структур;

- розробленні методики та проведенні експериментальних досліджень;
- підтвердження достовірності встановлених закономірностей із зіставлення результатів теоретичних та практичних досліджень.

Узагальнення результатів досліджень здійснювалось разом з науковим керівництвом к.т.н., доцента Семінського О.О.

**Апробація результатів кандидатської дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися і отримали позитивні відгуки на:

- IX –XXVI науково-практичних конференціях студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання», м. Київ, Україна, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015-2024 рр;
- XVI – XVII міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв», м. Одеса, Україна, 2016р;

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 28 друкованих праць: 1 монографія, 6 статей, 3 з яких у наукових фахових виданнях України, 1 індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus й 1 іноземна, 3 патенти, 1 звіт з ініціативної теми, а також 17 тез-доповідей у міжнародних науково-практичних конференціях.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 211 сторінках машинописного тексту, складається із переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 161 сторінку друкованого тексту, 80 рисунків, 15 таблиць, списку літературних джерел із 120 найменувань, переліку умовних позначень на 2 сторінках, додатків на 35 сторінках.

## **РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

### **1.1 Світові тенденції виробництва виробів з термопластів**

Полімерні матеріали, залежно від сфер застосування, мають різні терміни використання. Як приклад, можна розглянути дані, що наведені в звіті «PVC Pipe Market, by Material, Type and Application: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2022–2031» на 2021 р. ринок труб з полівінілхлориду в США оцінюється в 6,3 мільярдів \$, й за прогнозами має вирости за 10 років (до 2031 р) до 12,1 мільярдів \$ [5]. Окрім цього для країн ЄС на 2020 р. з 25 млн. тон спожитих полімерів 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 (рис. 1.1). Щороку до 75 % матеріалів потрапляють у відходи з загального об'єму полімерів [6].

Зростання обсягів виробництва полімерних матеріалів призводить 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 % [7].

В той же час переробка і утилізація полімерних відходів 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 знизити викиди CO<sub>2</sub> на 23800 тон. Додавання вторинної сировини регламентується відповідними стандартами і вимагає суворого дотримання технологічних регламентів та використання якісного обладнання для переробки й виготовлення продукції з термопластів [7, 8].

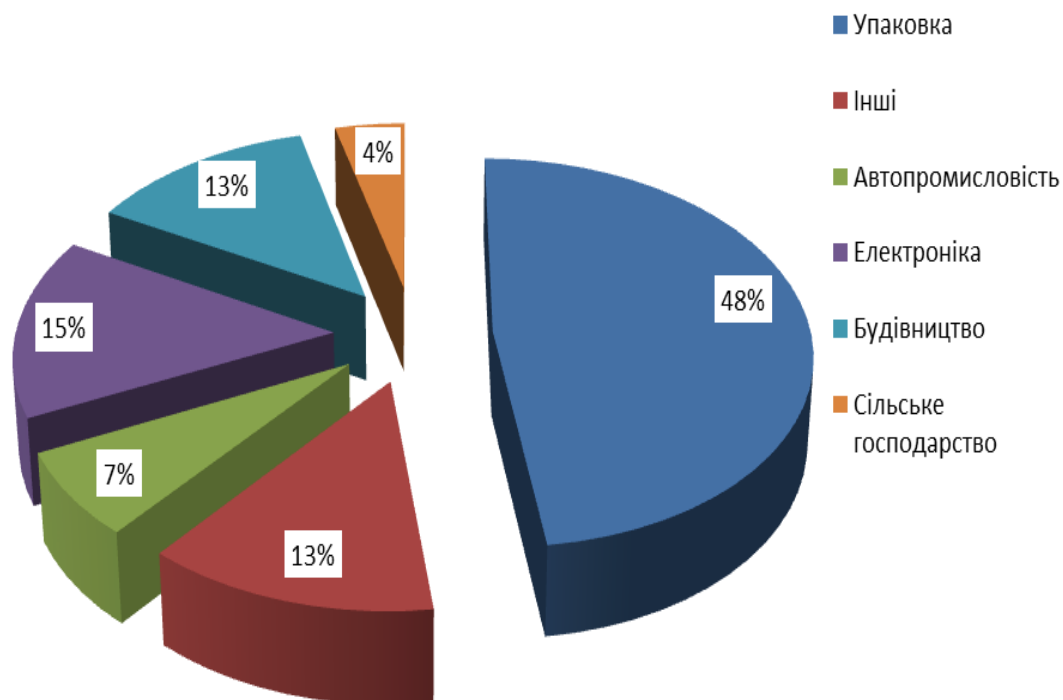


Рисунок 1.1 – Утворення полімерних відходів (%) в різних господарствах економік країн ЄС (2010 р.), [7]

## 1.2 Обґрунтування застосування термопластів для виготовлення труб

За останні 60 років біля 80 % високотехнологічного виробництва полімерних труб зосереджено у індустріально розвинутих країнах: Німеччині, Італії, Франції та Великобританії [7].

Найбільш поширеним способом переробки полімерів є метод безперервної екструзії, що характеризується високими продуктивністю та ефективністю.

Якісно нові технічні характеристики полімерних труб сприяли впровадженню цієї технології в Україні. Зокрема вони витісняють труби, які виготовляються із «традиційних» матеріалів (чавуну, сталі, міді). Значною перевагою труб з полімерних матеріалів є висока корозійна стійкість. Так, наприклад, термін служби труб з поліетилену для транспортування холодної води складає 50 років. Поліетилен показав високу стійкість до дії агресивних чинників

довкілля – світла, тепла, атмосферних газів, мікроорганізмів.

Разом з цим, для запобігання негативного впливу на довкілля виготовлення виробів з полімерів повинні відповідати чинним нормативним документам [8-16].

Попит на трубну продукцію з новими якостями, відповідно до звітів провідних світових фірм, які виробляють полімерні труби з термопластів буде динамічно збільшуватися (рис. 1.2) [3, 4, 17-19]. Згідно [4] якщо обсяг ринку труб з термопластів в доларовому еквіваленті в 2015 році становив 54460 мільйонів доларів США, то очікується що до 2022 року він зросте на 41,3% і досягне 85565 мільйонів доларів.

За результатами досліджень [20-22] встановлено, що хімічна і нафтохімічна галузі промисловості України мають привабливі показники для інвестицій щодо використання труб з термопластів. (Попит на ринку полімерних труб з 2014 до 2022 рік зріс на 41,3 % [5].)

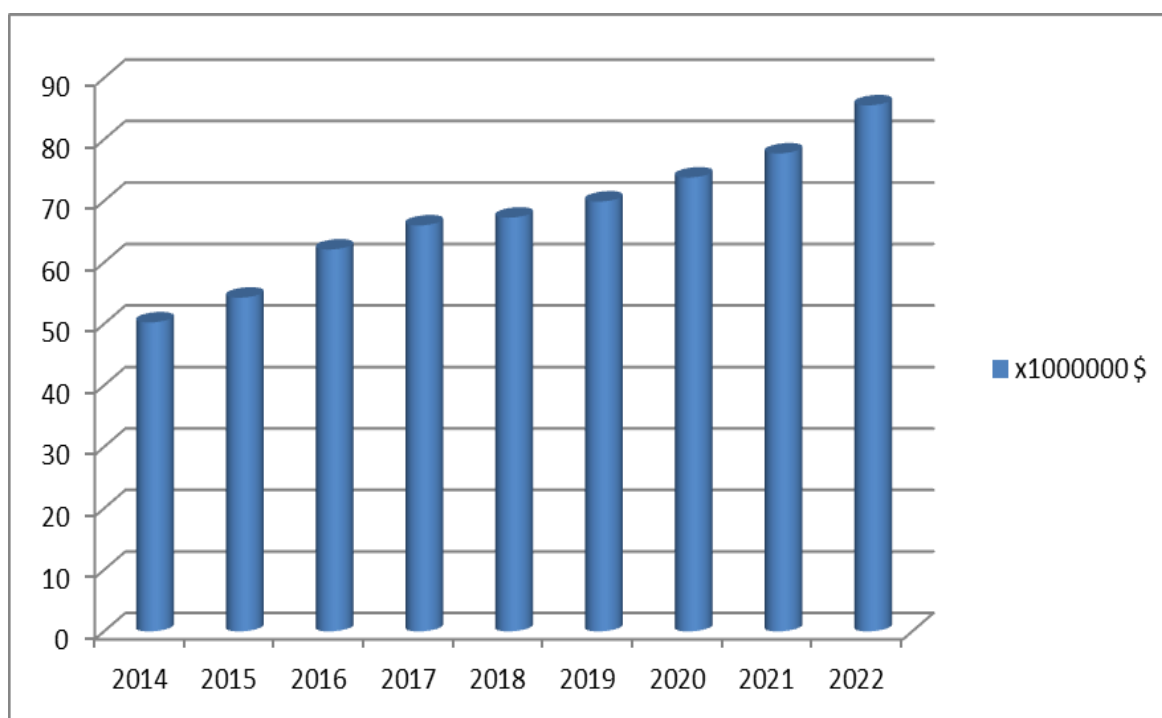


Рисунок 1.2 – Динаміка зростання попиту на ринку полімерних труб по роках [5]

Надзвичайні властивості труб з термопластів широко застосовуються в



промислових технологіях. Зокрема, висока корозійна стійкість зумовила широке застосування труб з полімерів для використання в системах каналізації при роботі з високо агресивними середовищами, які відрізняються простою технологічністю при експлуатації.

До переваг труб з термопластів відносяться:

1. Матеріал високостійкий до електрохімічних реакцій, що повністю виключає внутрішню і зовнішню корозію труб, а отже збільшує термін експлуатації трубопроводів та сантехнічних інженерних мереж до 50 років.
2. Внутрішні стінки труб і фітингів гідравлічно гладкі, що сприяє зменшенню гідравлічного опору в трубопроводах з вимушеним рухом суцільного середовища, а також знижує ризик утворення флори в безнапірних каналізаційних системах; не обростають відкладеннями і, як наслідок, не знижується витрата рідини, що транспортується. Це дозволяє використовувати у трубопроводах труби меншого діаметра.
3. Матеріал труб має низьку теплопровідність, порівняно з металевими аналогами, що зменшує питомі втрати в системах тепlopостачання.
4. Матеріал не виділяє шкідливих для довкілля речовин при монтажі трубопроводу та його експлуатації.
5. Трубопровід з поліпропілену дозволений до застосування в харчовій промисловості та для транспортування питної води.
6. Мала маса труб і фітингів істотно полегшує транспортування і монтаж.
7. Достатня еластичність матеріалу запобігає руйнуванню гідравлічних систем при замерзанні та зменшує рівень шумів у поліпропіленових трубопроводах.
8. Висока якість з'єднання - при полідифузійному зварюванні труба і фітинги утворюють однорідне з'єднання.

Все наведене вище є достатнім обґрунтуванням для створення нового високопродуктивного обладнання для виготовлення труб з термопластів. Інженерна практика показала, що поширеним термопластом при виготовленні труб

беззаперечно є ПЕВТ [6].

### 1.3 Теплофізичні та фізико-механічні властивості термопластів

Поліетилен стійкий до органічних і більшості неорганічних кислот, лугів, розчинів солей, спиртовмісних продуктів, мінеральних і органічних мастил, але в той же час не стійкий до контакту з сильними неорганічними окиснювачами ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), галогенами – в їх присутності навіть при незначних механічних навантаженнях відбувається розтріскування матеріалу [23-24]. При довгостроковому контакті з ароматичними з'єднаннями і сполуками галогенів з вуглеводами відбувається набрякання матеріалу [23].

Для підвищення характеристик ПЕВТ, таких як електропровідність, стійкість до ультрафіолетового випромінювання, до його складу додають спеціальні присадки (стабілізатори) [24]. Так, для підвищення стійкості до ультрафіолету використовуються світлостабілізатор (домішка-стабілізатор, що містить у своєму складі 20 % «просторово ускладнених» амінів HALS).

Ще одна відмінність поліетилену від інших термопластів полягає у їх здатності зберігати властивості при більших від'ємних температурах [23]. Наприклад, поліетилен марки Polystone M зберігає свої механічні властивості навіть при температурах до  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для моделювання процесів калібрування важливим є визначення властивостей термопластів для різних марок. Аналіз результатів сучасних досліджень дозволив зробити висновок про нелінійність теплофізичних та механічних властивостей термопластів в залежності від температури.

В [25] встановлено теплофізичні властивості поліпропілену, виготовленого за СТУ 36-13-925-63 (рис. 1.3-1.4) з густиною за нормальних умов  $868\text{ кг/м}^3$ .

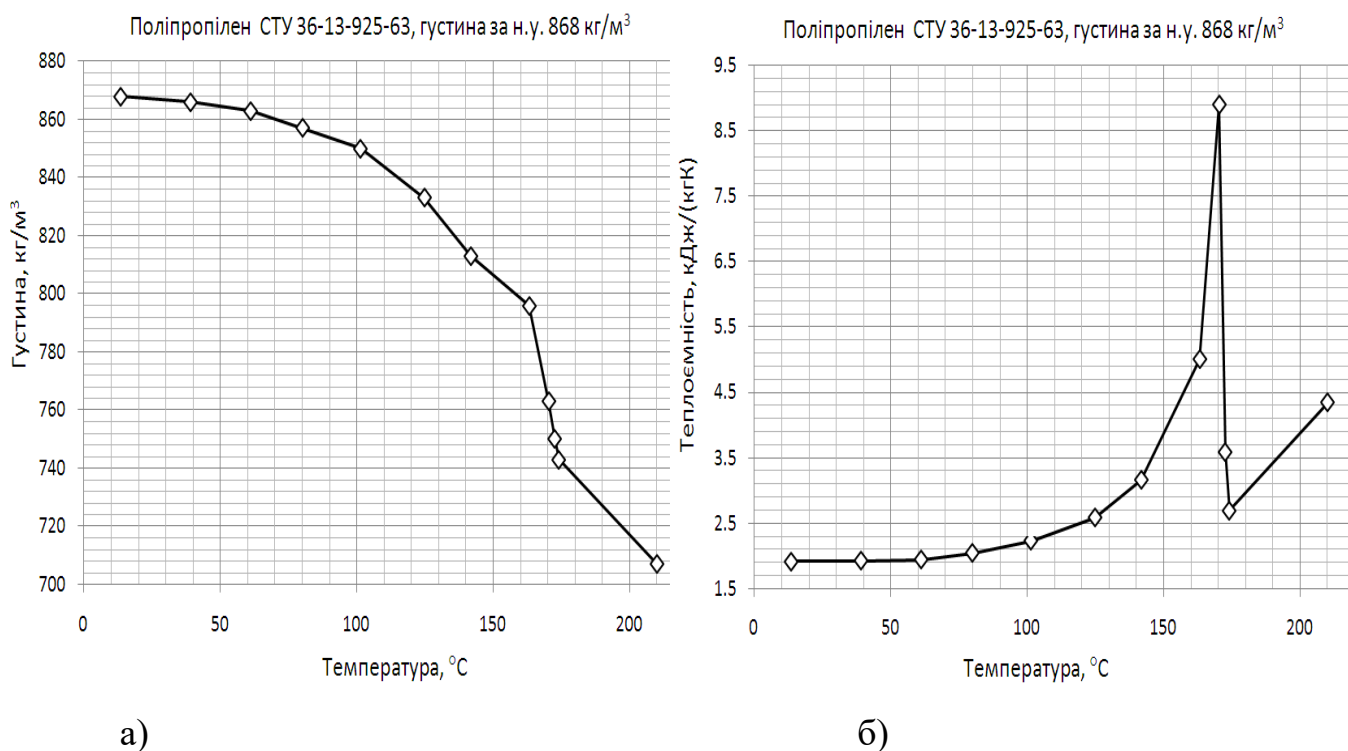


Рисунок 1.3 – Залежність від температури для поліпропілену [25-29]:

а) густини; б) теплоємності

Теплофізичні властивості ПЕВТ встановлено в роботах [25-29] марка 20706-016 [ГОСТ 16338-70], [28] (густина за нормальних умов 953,9 кг/м³):

- при температурі від 20°C до 134 °C густина розраховується:

$$\rho = 906,643 + 0,36521 \cdot 10^1 \cdot T - 0,658395 \cdot 10^{-1} \cdot T^2 - 0,5916 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,643968 \cdot 10^{-5} \cdot T^4 - 0,101654 \cdot 10^{-7} \cdot T^5 - 0,156423 \cdot 10^{-9} \cdot T^6 \quad (1.1)$$

Похибка розрахунку  $\Delta = 7,4555$  [28]

- при температурі від 134°C до 220 °C

$$\rho = 909,478 - 0,7455514 \cdot T. \quad (1.2)$$

Похибка розрахунку  $\Delta = 0,350354$  [28].

Для марки П4020 (МРТУ6-05-890-66) значення густини наведено в таблиці 1.1.

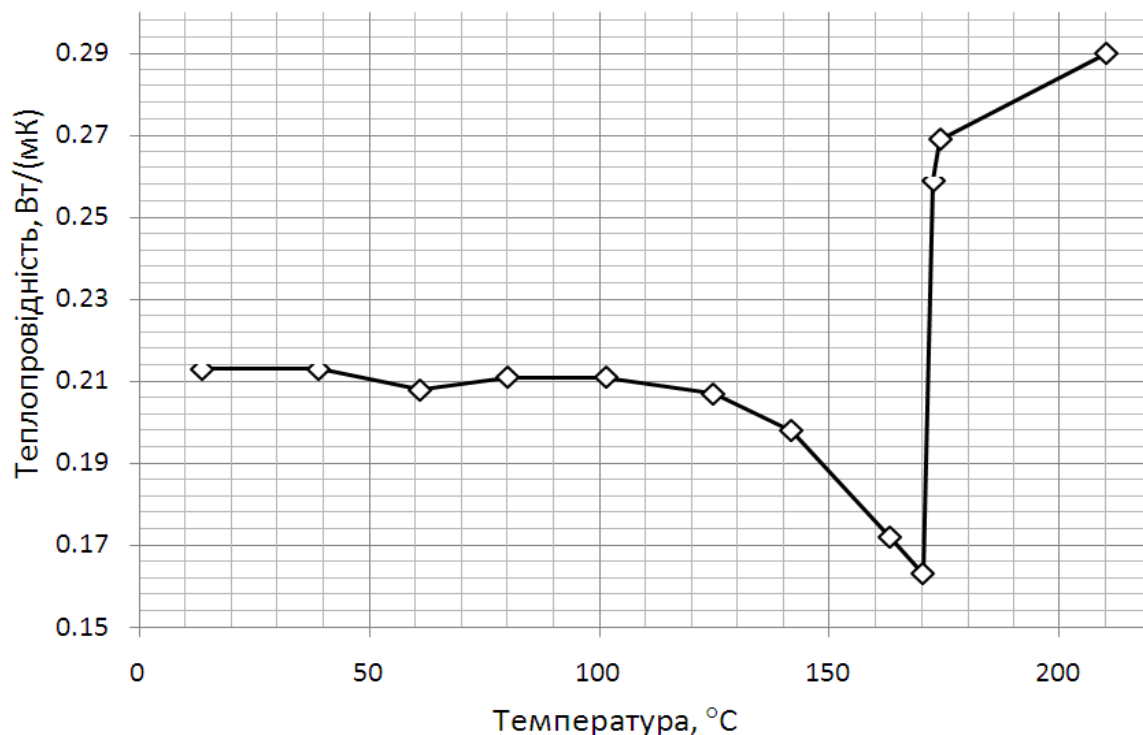


Рисунок 1.4 – Залежність теплопровідності від температури для поліпропілену СТУ 36-13-925-63 [30]

Таблиця 1.1 – Густина поліетилену марки П4020 (МРТУ 6-05-890-66) в залежності від температури [25]

Температура, °C	20	40	70	100	120	130	135	145	160
Густина, кг/м <sup>3</sup>	938	938	938	938	938	938	938	938	938

Питомий об'єм для поліетилену різної густини досліджено в роботі [29] (рис. 1.5).

Для ПЕВТ з густиною 927 кг/м<sup>3</sup> за нормальних умов [31], запропоновано наступну аналітичну залежність для визначення густини від температури:

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} = 1,05 \exp(0,00136T) & (T \leq 135^{\circ}\text{C}) \\ \frac{1}{\rho} = 1,14 + 0,0009T & (T > 135^{\circ}\text{C}) \end{cases} \quad (1.3)$$

Результати експериментальних досліджень залежності густини від

температури для поліетилену наведено на (рис. 1.5).

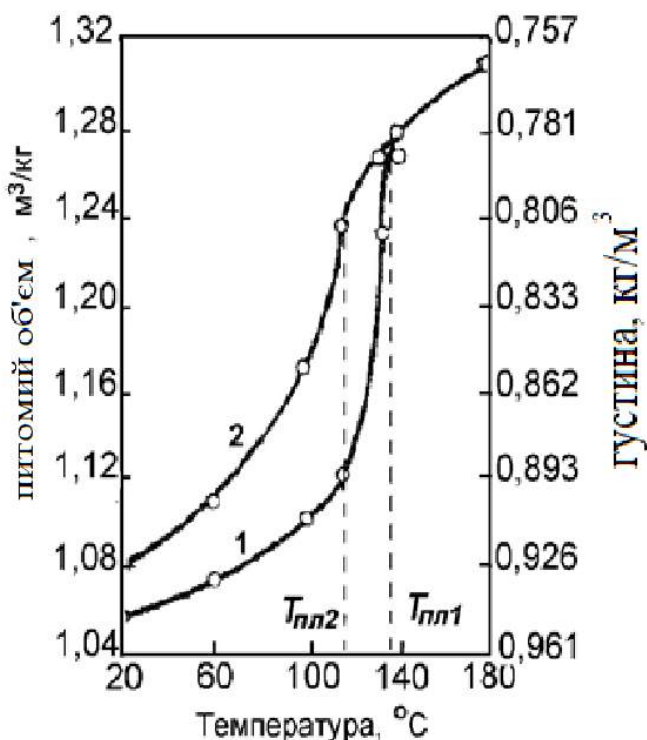


Рисунок 1.5 – Експериментальні значення питомого об'єму від температури поліетилену різної густини (температура  $T_s$  відповідає повному плавленню кристалітів.) [29]

Як видно з порівняльного аналізу (рис. 1.6), густина ПЕВТ суттєво залежить від густини за нормальних умов, яка визначається складом композиції, ступеня кристалічності та температурного діапазону склування. Таким чином, при розрахунку ефектів усадки необхідно використовувати данні саме для тієї марки поліетилену з якої буде виготовляться екструдована труба.

Для ПЕВТ марки 20706-016 експериментальні значення теплоємності та теплопровідності від температури представлено на графіку (рис. 1.7-1.8) [28].

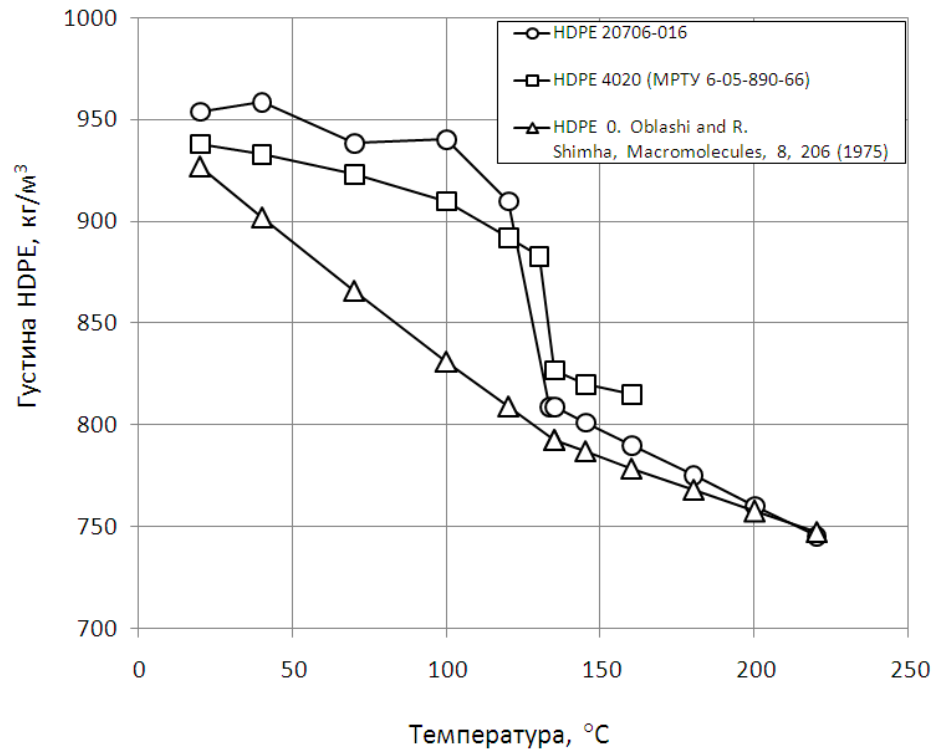


Рисунок 1.6 – Експериментальні залежності густини від температури для різних марок ПЕВТ) [25, 28, 31].

Для ПЕВТ марки 20706-016 [ГОСТ 16338-70], [28] (густина за нормальних умов 953,9 кг/м³):

при температурі від 20°C до 220°C коефіцієнт теплопровідності розраховується, Вт/(мК):

$$\begin{cases} \lambda = 0,342 - 0,361 \cdot 10^{-3}T - 0,374 \cdot 10^{-5}T^2 & 20^{\circ}C \leq T < 134,5^{\circ}C & \Delta = 0,639 \cdot 10^{-3} \\ \lambda = 0,26675 - 0,313476 \cdot 10^{-3}T & 134,5^{\circ}C \leq T \leq 220^{\circ}C & \Delta = 0,567 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad (1.4)$$

при температурі від 20°C до 220 °C питома теплоємність розраховується, Дж/(кгК):

$$C_p(T) = k_1 + k_2T + k_3T^2 + k_4T^3 + k_5T^4. \quad (1.5)$$

Коефіцієнти апроксимуючої залежності  $k_i$  для відповідних діапазонів температури зведено в таблицю 1.2 [28].

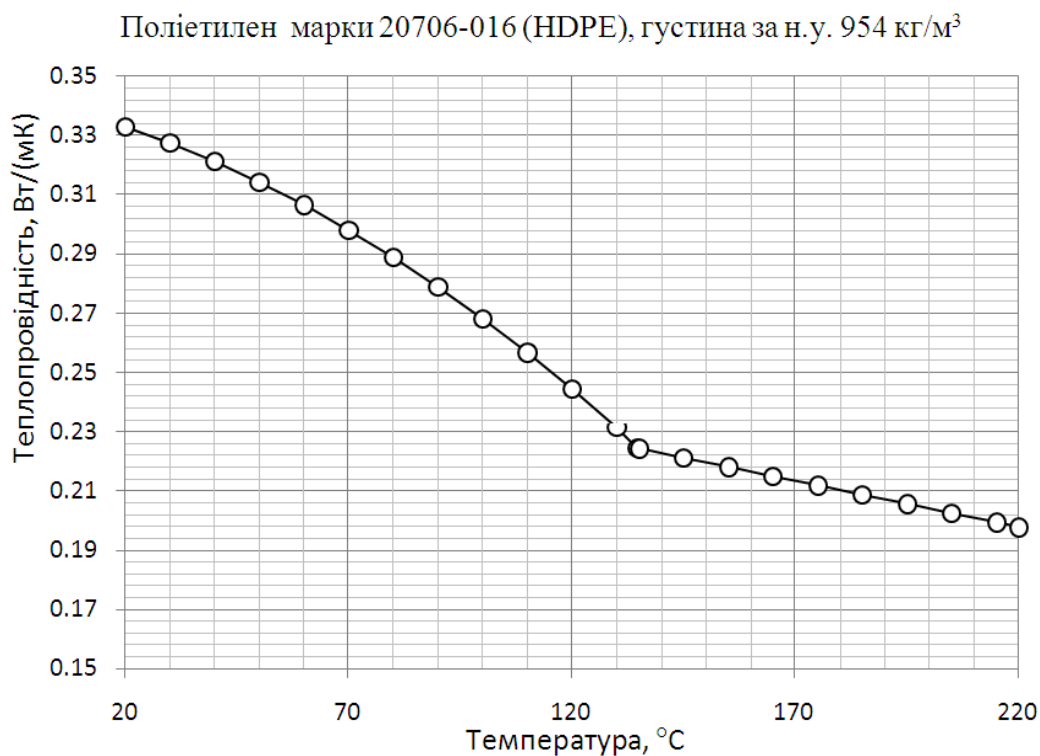


Рисунок 1.7 – Експериментальна залежність теплопровідності від температури для ПЕВТ (марки 20706-016 [28])

Таблиця 1.2 – Коефіцієнти апроксимуючої залежності 1.5 для визначення питомої теплоємності ПЕВТ марки 20706-016 [ГОСТ 16338-70], [28]

Температурний діапазон, °C	Коефіцієнти апроксимуючої залежності 1.5				
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$
$20^{\circ}\text{C} \leq T < 80^{\circ}\text{C}$	2000	0	0	0	0
$80^{\circ}\text{C} \leq T < 110^{\circ}\text{C}$	16957,7	-477,536	4,88453	-0,015297	0
$110^{\circ}\text{C} \leq T < 126^{\circ}\text{C}$	73245,9	289,691	-14,0261	-0,017443	$0,621235 \cdot 10^{-3}$
$126^{\circ}\text{C} \leq T < 130^{\circ}\text{C}$	-2001,34	-7264,3	58,3497	0	0
$130^{\circ}\text{C} \leq T < 134^{\circ}\text{C}$	148345	7038,22	-60,5631	0	0
$134^{\circ}\text{C} \leq T < 136^{\circ}\text{C}$	103296	-740,71	0	0	0
$136^{\circ}\text{C} \leq T < 140^{\circ}\text{C}$	24678,9	-162,407	0	0	0
$140^{\circ}\text{C} \leq T < 220^{\circ}\text{C}$	2000	0	0	0	0

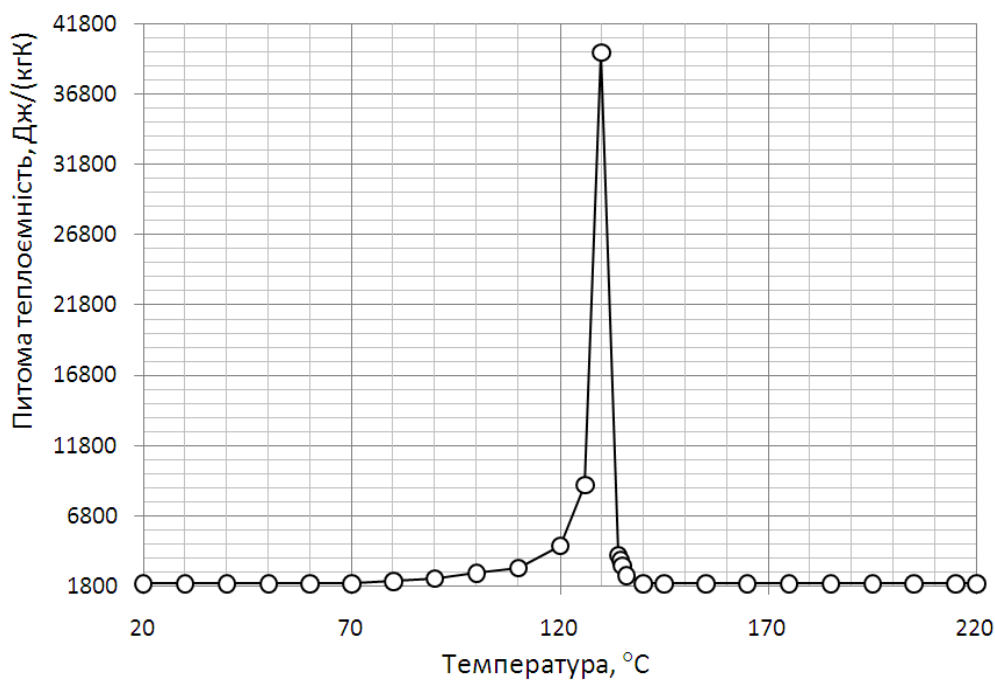


Рисунок 1.8 – Експериментальна залежність питомої теплоємності від температури ПЕВТ марки 20706-016 [28].

### ***Механічні властивості ПЕВТ***

За даними [32-35] залежність модуля пружності поліетиленів різної густини від температури спадаюча (модуль пружності зменшується з ростом температури) з аномалією в діапазоні температур склування (рис. 1.9).

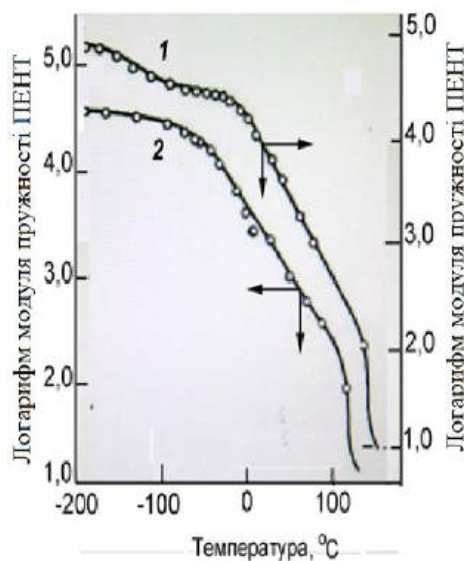


Рисунок 1.9 – Залежність модуля пружності поліетиленів різної густини від температури (за даними [34])



За даними [34] залежність модуля пружності ПЕВТ від температури спадаюча (рис. 1.10).

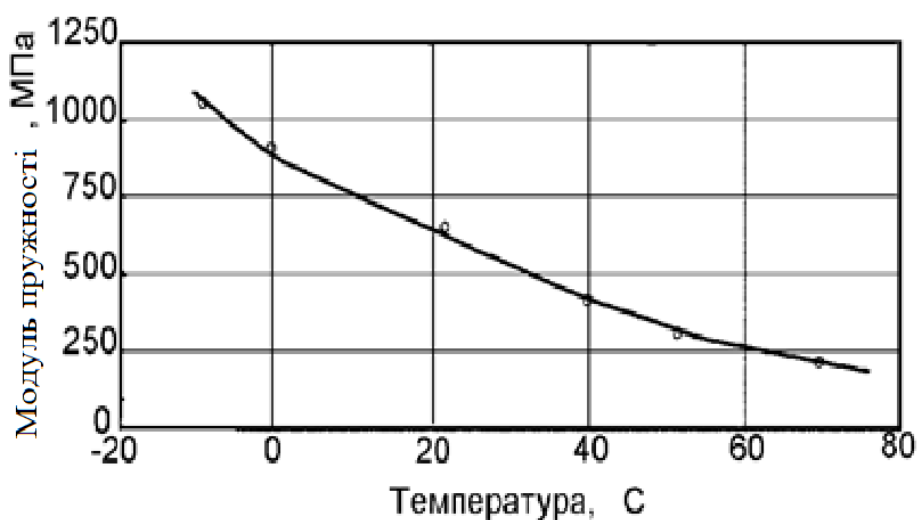


Рисунок 1.10 – Залежність модуля пружності ПЕВТ від температури [32])

Властивості полімерів залежать від молярної маси. Так, наприклад, за даними [29] залежність границі міцності ПЕВТ з мольною масою 400000 від температури спадаюча (рис. 1.11).

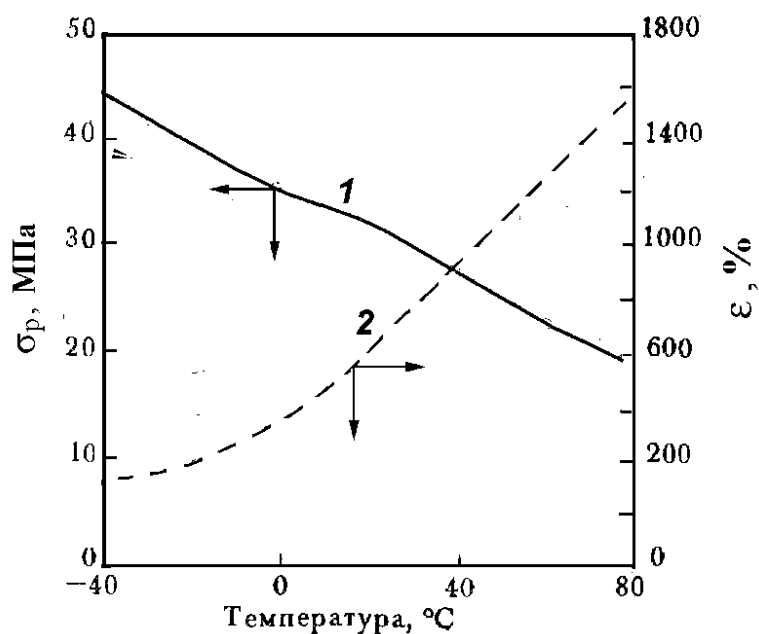


Рисунок 1.11 – Залежність границі міцності ПЕВТ з мольною масою 400000 від температури [28]

В [33] досліджено вплив температури на модуль пружності і границю плинності ПЕВТ марки РЕ-100. Поліетилен за густиною (відповідно – ступеню кристалічності) умовно поділяється на поліетилен низької густини (ПНГ), середньої густини (ПЕСГ), високої густини (ПЕВТ). При виробництві труб які працюють під тиском найбільш важливим механічним параметром є максимальна тривала міцність матеріалу стінки труби (MRS), МПа.

Тривалість збереження властивостей регламентується терміном у 50 років. Протягом цього терміну напруження не повинні зруйнувати стінку труби. Для марки РЕ-100  $MRS=10,0$  МПа [36].

При калібруванні труби з поліетилену в калібрувальному пристрої заготовка труби охолоджується і тиском розрідження притискаються до стінки калібрувальної гільзи, напруження в стінці затверділого шару труби швидкоплинні. Експериментальні данні [33] зображують значення механічних властивостей ПЕВТ РЕ-100 (рис. 1.12).

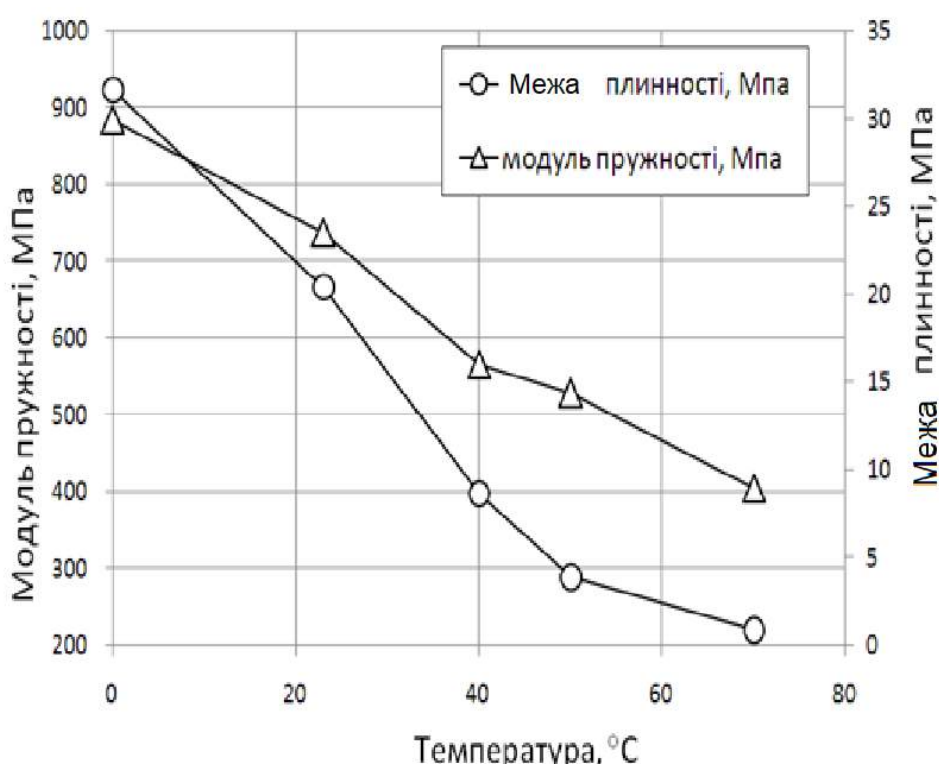


Рисунок 1.12 – Експериментальні значення механічних властивостей ПЕВТ РЕ-100 [33]

Теплофізичні властивості термопластів мають аномалії в області температур склування, при збільшенні густини ПЕВТ діапазон температур склування зменшується і аномальність більш характерна. Механічні властивості ПЕВТ при збільшенні температури зменшуються, і при температурі більше 80°C можна вважати розплав ПЕВТ в'язкотекучею рідиною.

#### 1.4 Критерії оцінки якості виробів з термопластів при калібруванні

##### *Критерії оцінки якості труб з термопластів*

За [5, 8, 36, 37] труби малого діаметра ( $d \leq 63$  мм) мають відповідати вимогам по відхиленню середнього зовнішнього діаметра, овальності, мінімальної товщини стінки.

Методика випробувань передбачають розрахунок середнього зовнішнього діаметра труби:

$$d_{cp} = \frac{d_{max} + d_{min}}{2}, \quad (1.6)$$

де  $d_{max}$  – максимальний зовнішній діаметр труби, м;  $d_{min}$  – мінімальний зовнішній діаметр труби, м;  $d_{cp}$  – середній зовнішній діаметр труби, м (рис. 1.13).

Овальність визначається:

$$\text{Овальність} = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{cp}} \times 100\% \quad (1.7)$$

Відповідно до стандартів, овальність не має перевищувати 3% [5, 8, 36, 37].

Крім овальності зразки труби перевіряють за рядом інших критеріїв.

Наприклад, зміну розмірів труб після прогрівання в повітряному середовищі

$$\Delta = \frac{L - L_0}{L_0} 100\% \quad (1.8)$$

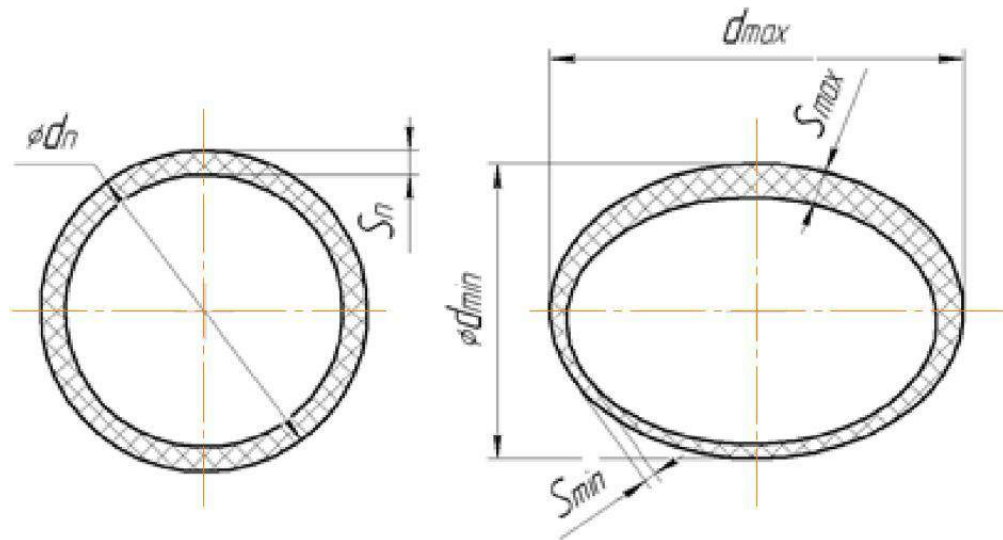
де  $L_0$  і  $L$  середнє арифметичне значення довжин між позначками до і після прогрівання за результатами вимірювання трьох зразків, мм.

Середній коефіцієнт лінійного теплового розширення в установленому

інтервалі температур,  $1/K$  визначають:

$$\gamma = \frac{(1/l_0)(l - l_0)}{T_2 - T_1}, \quad (1.9)$$

де  $T_1$  і  $T_2$  – нижня і верхня межі інтервалу температур,  $K$ ;  
 $l_0$  і  $l$  – довжини зразка при нижній і верхній границі температурного інтервалу,  $mm$ .



$S_n$  – номінальна товщина стінки,  $m$ ;  $d_n$  – номінальний діаметр,  $m$ ;

$S_{max}$ ,  $S_{min}$  – максимальна і мінімальна товщина стінки,  $m$ ;

$d_{max}$ ,  $d_{min}$  – максимальний і мінімальний зовнішній діаметр трубної заготовки.

Рисунок 1.13 – Визначення овальності труби [39, 40].

Границя плинності матеріалу стінки труби при розтягуванні і відносне подовження труб при розриві.

Значення межі текучості при розтягуванні  $\sigma_{pm}$ ,  $MPa$ :

$$\sigma_{pm} = \frac{F_{pm}}{A_0} \leq [\sigma], \quad (1.10)$$

де  $F_{pm}$  – розтягувальна сила при досягненні межі текучості,  $N$ ;  $A_0$  – початковий поперечний переріз зразка,  $mm^2$ .

Значення відносного подовження при розриві  $\varepsilon_p$ , %:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta L_{op}}{L_0} 100\% , \quad (1.11)$$

де  $\Delta L_{op}$  – виміряна довжина зразка в момент розриву, мм;  $L_0$  – початкова довжина зразка, мм.

Визначення стійкості зразка при постійному внутрішньому тиску проводять не менше ніж на трьох зразках. Розрахунок випробувального тиску:

$$P_{вип} = \frac{e_{ymin}}{d_{emmax} - e_{ymin}} 2\sigma_0 , \quad (1.12)$$

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

Або ж за:

$$P_{вип} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (S - c)}{D + (S - c)} , \quad (1.13)$$

де  $S$  – мінімальна товщина стінки, м;  $c$  – додаток на можливий знос, м;  $D$  – внутрішній діаметр труби, м;  $[\sigma]$  – допустиме напруження у стінці труби, МПа.

Результати випробувань вважаються задовільними, 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 не зруйнувався.

З урахуванням усадки, при виготовлені труби на її геометричні розміри встановлюють допуски.

Для визначення частки усадки трубної заготовки використовують формулу:

$$\frac{(D_K - D_3)}{D_K} \leq \chi , \quad (1.14)$$

де  $D_K$  – діаметр трубної заготовки, що виходить з калібратора;

$D_3$  - діаметр труби з урахуванням усадки;  $\chi$  - частка усадка діаметра труби.

Таким чином, при екструзії із застосуванням калібратора трубна заготовка повинна бути виконана за допусками, розрахованими по формулі (1.14). Це дозволить одержати готовий продукт із заданими геометричними та фізико-механічними властивостями.

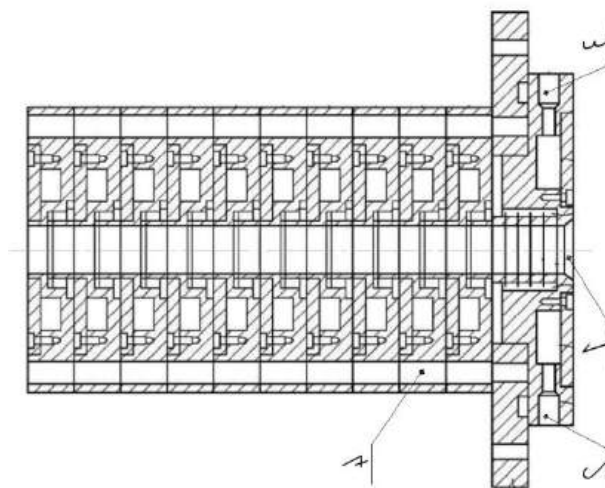
Слід зауважити, що існує мінімальне значення розрідження для забезпечення необхідної овальності труби, яка після калібрувального пристрою ще не повністю охолоджена і рухається у ванні. Сили, які діють на ще не повністю охолоджену трубну заготовку – сили тяжіння (якщо охолодження зрошуванням), або Архімедова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

Основним дефектом, що виникає при недостатньому значенні розрідження є повздовжня усадочна канавка.

### **1.5 Конструкції промислових калібраторів**

Метою винаходу [41] (рис. 1.14) є зменшення внутрішніх напружень в матеріалі труби яка калібрується, покращення умов теплообміну, проводиться контроль значення розрідження вздовж калібрувального пристрою для покращення якості калібрування. Таке технічне рішення реалізується шляхом використання наборної конструкції з пластин, які мають канали для тиску розрідження та води для охолодження. Інтенсифікація гідродинамічного режиму руху води та розвинута поверхня теплообміну значно покращують умови теплообміну.

Недоліками такого технічного рішення є спеціальна конструкція, що призводить до проблем, таких як: необхідність забезпечення співвісності центрального отвору у пластинах після складання пристрою і складності очищення каналів тиску розрідження від відкладень (розплав полімеру випаровує низькомолекулярні сполуки).



1 – патрубок входу трубної заготовки з розплаву полімеру;  
 2 – патрубок передачі тиску розрідження; 3 – патрубок вводу води для охолодження;  
 4 – пластини з системою каналів для охолодження та тиску розрідження

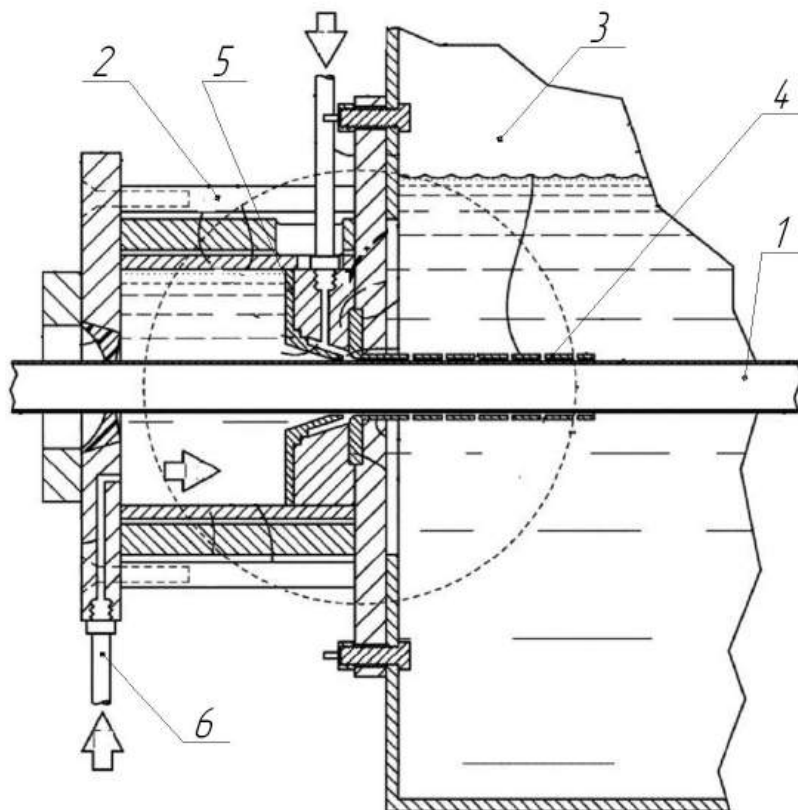
Рисунок 1.14 – Наборний калібрувальний пристрій [41]

Метою винаходу [42] (рис. 1.15) є збільшення продуктивності екструзійної лінії виробництва труб з поліпропілену за рахунок попереднього охолодження трубної заготовки з розплаву методом занурення.

Таке технічне рішення реалізується шляхом встановлення перед калібрувальною гільзою камери з охолоджуючою рідиною (вода), через яку проходить трубна заготовка і формується твердий, механічно міцний шар охолодженого полімеру, який запобігає обриву труби при подальшому переміщенні в калібрувальній гільзі з зовнішнім розрідженням. Слід зауважити, що тиск в камері попереднього охолодження має бути менше атмосферного для запобігання складанню заготовки труби і таким, який не розірве заготовку труби атмосферним тиском зсередини. Тому дану конструкцію можна розглядати як таку що забезпечує зменшення тиску розрідження на початку калібрування.

Недоліками такого технічного рішення роблять процес запуску калібрування більш тяжким, через ускладнення герметизації перед входом до камери попереднього охолодження й регулювання рівня поверхні води в камері (через

ущільнення в камеру потрапляє повітря), а також унеможлиблює використання даного калібратора при охолодженні труб з поліетилену.



1 – труба яка калібрується; 2 – камера попереднього охолодження зануренням; 3 – вакуумна ванна; 4 – калібрувальна гільза; 5 – гідравлічний затвор;  
6 – патрубок вводу охолоджувальної рідини (вода)

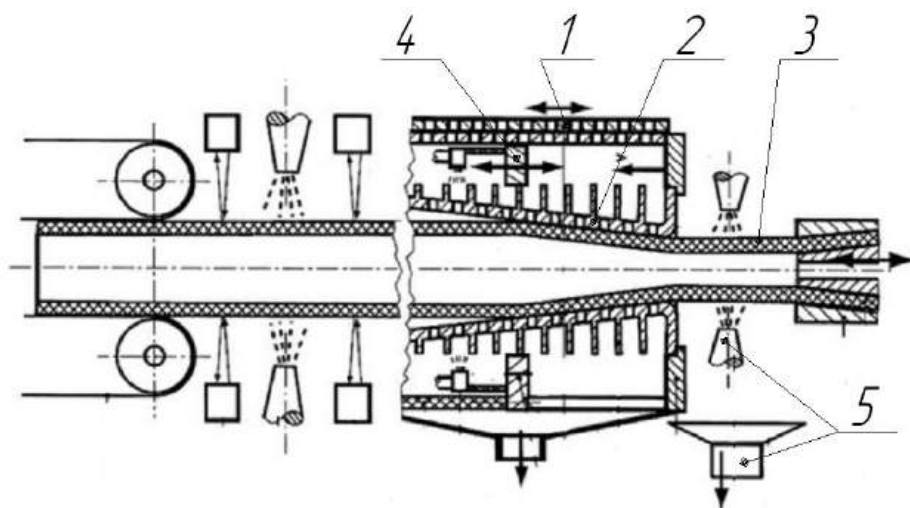
Рисунок 1.15 – Калібрувальний пристрій з камерою попереднього охолодження зануренням [42]

Метою винаходу [48], (рисунок 1.16) є створення способу калібрування з використанням калібрувальної втулки конічної форми, яка регулюється в широкому діапазоні і забезпечує безпроблемне регулювання тиску розрідження і керованого розширення. Таке технічне рішення реалізується зміною корпусу калібрування, який збільшує діаметр свого перерізу вздовж вектору руху труби яка калібрується та лінійним переміщенням перегородки для двозонного режиму роботи по тиску



розрідження.

Недоліками такого рішення є складність конструкції, різнотовщинність труби при її роздуві через нерівномірність температурних полів в розплаві після формуючого інструменту.



1 – вакуумна ванна; 2 – калібрувальна гільза; 3 – заготовка труби з термопласту; 4 – перегородка для двозонного режиму роботи по тиску розрідження; 5 – пристрій попереднього охолодження трубної заготовки (зрошення для ПП або обдув повітрям для ПЕВГ)

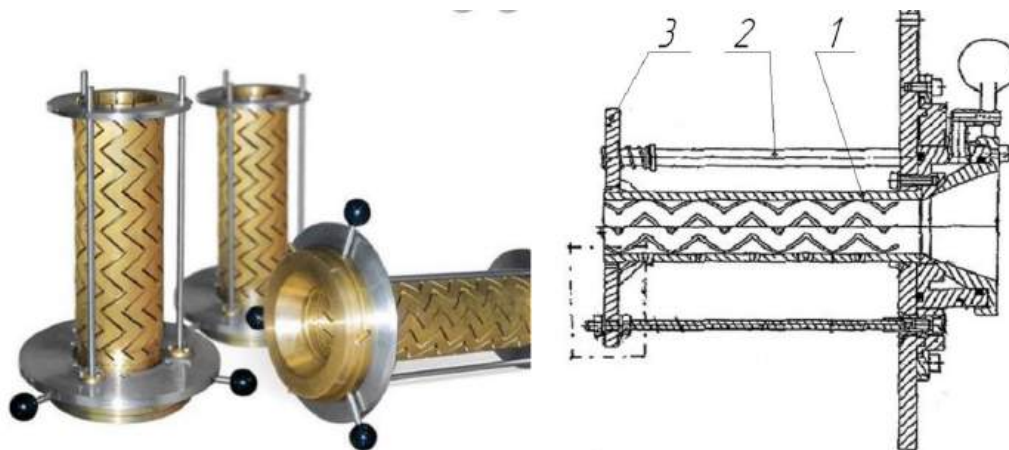
Рисунок 1.16 – Калібрувальний пристрій з конічною формою калібрувальної гільзи [48]

Метою винаходу [49] (рис. 1.17) є використання калібрувальної гільзи з конструкцією механічного регулювання її діаметра, доступної, яка є дуже надійною і може бути виготовлена з меншими витратами.

Технічне рішення механічного регулювання діаметра калібрувальної гільзи досягається тим, що прорізи гільзи виконано хвилястими, а сама гільза стискається в осьовому напрямку за допомогою фланця, положення якого регулюється напрямними, а сам фланець має конус, який при осьовому русі розпирає, або стискає гільзу для збільшення або зменшення її внутрішнього діаметра.

Недоліками такого рішення є малий діапазон регулювання внутрішнього діаметра калібрувальної гільзи та її нециліндричність при регулюванні, що може

зменшити робочу швидкість протягування труби, що калібрується. Аналогом такого рішення є конструкція фірми KUATRO PLAST [50]

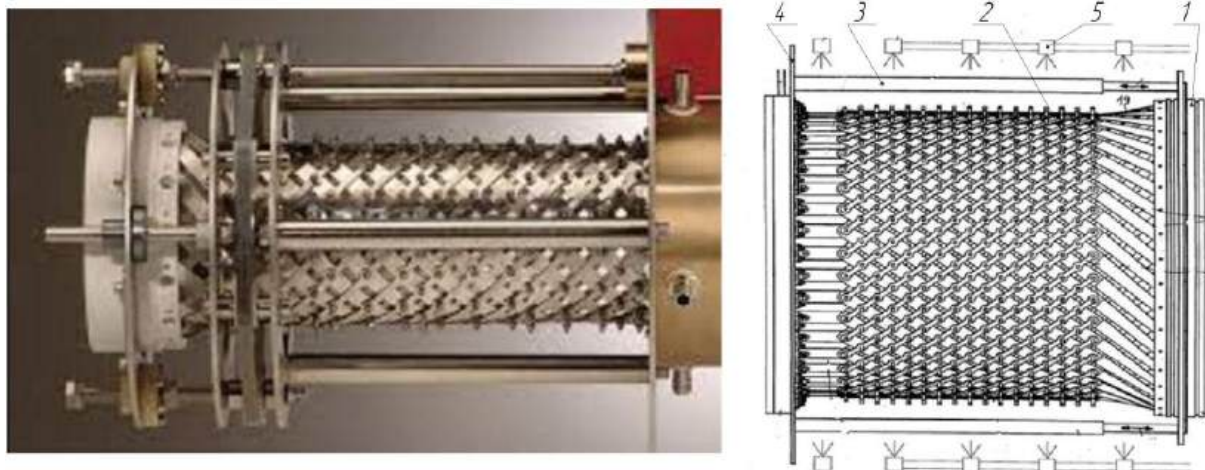


1 – калібрувальна гільза з хвилястими прорізами; 2 – напрямні;

3 – фланець на напрямних, який затискає калібрувальну гільзу в осьовому напрямку

Рисунок 1.17 – Калібрувальний пристрій з регулюємим внутрішнім діаметром калібрувальної гільзи [49]

Метою винаходу [51], (рис. 1.18) є створення калібрувальної втулки для зміни розміру під час роботи, конструкція якої дозволяє регулювати за допомогою простих конструкційних утискувачів без погіршення якості поверхні труби яка калібрується. Заготовка труби яка калібрується проходить втулку попереднього калібрування, в якій формується твердий шар полімеру, здатний витримати механічні навантаження від зусилля протягування труби. Попередньо охолоджена труба проходить систему шарнірно з'єднаних пластин, які можуть обтискати трубу по зовнішній поверхні. Ступінь обтискання регулюється осьовим положенням фланця, який з'єднано з пластинами. Положення фланця регулюється напрямними. Охолодження труби відбувається методом зрошення через форсунки системи подачі води.



1 – втулка попереднього калібрування; 2 – пластини з шарнірним з'єднанням;  
3 – напрямні; 4 – фланець; 5 – форсунки

Рисунок 1.18 – Калібрувальний пристрій з регульованим внутрішнім діаметром [51]

Недоліками такого рішення є нециліндричність гільзи при регулюванні, що може зменшити робочу швидкість протягування труби, що калібрується, та може зробити дефекти на зовнішній поверхні труби, які можуть утворюватися від пластин в місцях шарнірного з'єднання.

Як показує дослідження значна кількість сучасних конструкцій калібрувальних пристроїв виконано дво- та трьохзонними за розрідженням з інтенсифікацією процесу перенесення тепла у вхідній частині калібрувального пристрою [28,53](рис. 1.19).

Критичний аналіз сучасних конструкцій калібрувальних пристроїв дозволив узагальнити напрямки модернізації:

- зменшення тиску розрідження на початку калібрувальної гільзи для уникнення розриву ще не сформованої, механічно міцної плівки охолодженого термопласту від напружень сил тертя, які пропорційні тиску [39-41,47];
- забезпечення регулювання діаметра калібрувальної гільзи для можливості калібрування труб з різних марок термопластів та з різними значеннями *SDR* [42-44].

Перша вакуумна щілина калібрувальної гільзи розташована на відстані 15...37 мм від входу, а мінімальне значення розрідження для труби з поліетилену  $\varnothing 16 \times 2,7$  мм – 0,1 бар (0,01 МПа), і для  $\varnothing 32 \times 5,4$  мм – 0,25 бар (0,025 МПа) [28].



Рисунок 1.19 – Конструкція калібрувального пристрою з трьома зонами розрідження та інтенсифікацією охолодження вхідної частини калібрувальної гільзи [53]

Для реалізації такого процесу, де будуть отримані нормативні критерії гладких труб з термопластів на звичайних калібраторах, необхідно дотримуватись таких умов :

1. Розрідження в робочій камері калібратора має бути достатнім, щоб забезпечити мінімальні значення термічного опору та тертя між стінкою калібратора та поверхнею трубної заготовки;
2. Інтенсивність теплообміну в калібраторі повинна забезпечити достатню кільцеву жорсткість труби, яка усунить ризик пластичних деформацій від зусиль тягнучого пристрою;
3. Матеріал калібратора має бути з високою теплопровідністю, для швидкого охолодження термопласту й формування твердого й міцного шару.

## 1.6 Особливості теплообміну при охолодженні труби в калібраторі

Процеси у калібраторі пов'язані з перенесенням теплоти від трубної заготовки до охолоджувальної поверхні калібратора, з одночасним склуванням розплаву термопласту, що супроводжується усадкою. При цьому на поверхні заготовки утворюються тверда механічна плівка із заданою міцністю достатньою для подолання сил тертя які виникають від дії протягуючого механізму.

Для забезпечення гладкої поверхні, заданої форми і розмірів при калібруванні трубні заготовки мають бути в контакті з внутрішньої поверхнею калібрувальної гільзи достатній час. В камерах калібратора використовується заданий рівень розрідження, який запобігає передчасному усаджуванню труби і збереженню заданого термічного опору.

В роботі [37] наведено основні конструкції калібрувальних пристроїв з сухим та мокрим охолодженням та встановлено, що:

- інтенсивність відведення теплоти залежить від термічного контакту між трубною заготовкою, що калібрується, та внутрішньою стінкою калібрувальної гільзи;
- несуча здатність труби, що калібрується, повинна бути достатньою, для подолання сил тертя та залежить від профілю температурних полів в стінці труби;
- тривалість термічного контакту заготовки труби з розплаву термопласту має бути достатньою для збереження форми та розмірів труби після виходу з калібрувального пристрою;
- для збільшення продуктивності екструзійної лінії калібрувальний пристрій має забезпечити максимально інтенсивне охолодження та мінімальну силу тертя труби в калібрувальній гільзі при достатньо тривалому збереженні термічного контакту.

Для визначення сили тертя запропоновано вираз, Н [37]:

$$F_{friction} = F_{normal} \mu, \quad (1.15)$$

де  $F_{friction}$  – зусилля протягування труби при калібруванні, Н;

$F_{normal}$  – зусилля притискання труби до поверхні калібрувальної гільзи, Н;  
 $\mu$  – коефіцієнт тертя між термопластом та матеріалом калібрувальної гільзи  
 (рис. 1.20).

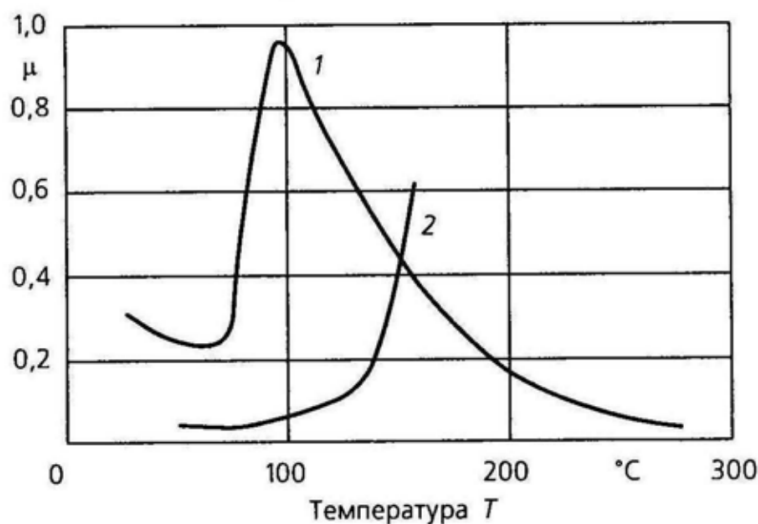


Рисунок 1.20 – Значення коефіцієнта тертя для пари сталь–поліетилен (1); сталь–PVC (2), в залежності від температури [37]

Для розрахунку температурних полів в трубі яка калібрується пропонується одномірне рівняння нестационарної теплопровідності (декартова система координат) [37]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial T}{\partial x} \left( a \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1.16)$$

де  $\frac{\partial T}{\partial t}$  – зміна температури матеріалу стінки труби у часі, К/с;

$\frac{\partial T}{\partial x}$  – градієнт температури в матеріалі стінки труби в радіальному напрямку, К/м;

$a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с.

Для розв'язання рівняння (1.16) пропонуються використати граничні умови II роду для розплаву, що приклеюється до стінки гільзи, [37]:

$$q'' = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=D} = \alpha (T_0 - T_F), \quad (1.17)$$

де  $q''$  – питомий тепловий потік від труби яка охолоджується в калібрувальному пристрої до охолоджувальної рідини, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби, Вт/(м·К);  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні труби до охолоджувальної рідини, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_0$  – температура поверхні труби яка калібрується, К;  $T_F$  – температура охолоджувальної рідини (рис. 1.21).

Для чисельного розв'язку рівняння нестационарної теплопровідності автором [37] пропонується використати метод кінцевих різниць, або кінцевих елементів. Проте, знаючи що у стінки калібрувальної гільзи й у трубного профілю термопласту різні значення коефіцієнтів теплопровідності і товщина шарів, дана гранична умова приносить в розрахунок похибку.

У роботах [28, 54] для моделювання перенесення тепла від труби з полімеру яка охолоджується використано граничні умови III роду і явну схему методу кінцевих різниць.

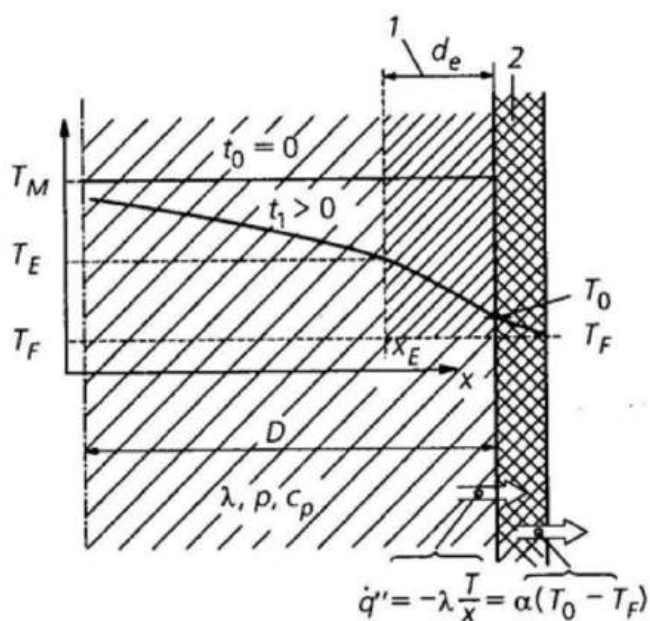


Рисунок 1.21 – Модель охолодження екструдованої труби, розплавлений шар (1); затверділий шар (2); температура охолоджувальної рідини ( $T_E$ ); інші позначення в тексті [37]

Чисельні методи дозволяють розв'язати рівняння нестационарної теплопровідності з урахуванням залежностей теплофізичних параметрів від

температури [54], врахувавши теплоту утворення надмолекулярних структур (склування) у рівнянні нестационарної теплопровідності шляхом використання параметру «ефективна температуропровідність»:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] + \frac{\Delta H_f}{\rho C_p} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = a^* \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (1.19)$$

де  $a^*(T) = \frac{\lambda(T)}{\rho(T)C_p^*(T)}$  – ефективний коефіцієнт температуропровідності, який

враховує теплоту склування ПЕВТ,  $(\frac{M^2}{c})$ ;  $C_p(T)$  – теплоємність ПЕВТ;  $C_p^*(T)$  – ефективна теплоємність ПЕВТ;  $\lambda(T)$  – теплопровідність ПЕВТ;  $\rho(T)$  – густина ПЕВТ.

В роботі [55], досліджено коефіцієнт теплопередачі між трубою з ПЕВТ та охолоджувальною рідиною. Відмічено, що термопласти мають низьку теплопровідність, що ускладнює теплообмін і теплопередача часто лімітує швидкість процесу.

В роботі [57] експериментально досліджено термічний опір контакту між полімером та внутрішньою поверхнею калібрувальної гільзи (рис. 1.22).

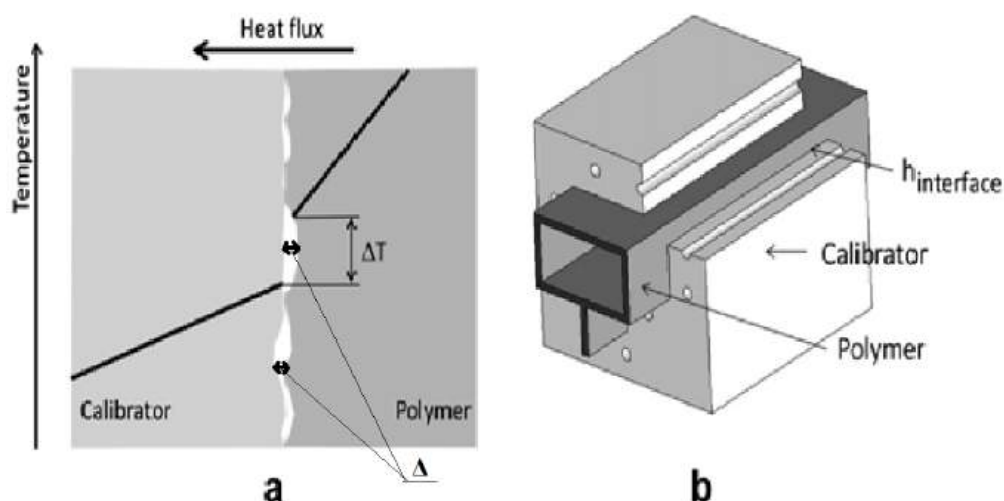


Рисунок 1.22 – Модель теплообміну між двома поверхнями, які не перебувають в ідеальному контакті: (а) схема; (б) калібрування екструдованого профілю [57].  $\Delta$  – термічний опір



Авторами [57] створено систему, що дозволяє легко вивчити залежність процесу калібрування від декількох параметрів (властивості матеріалу калібратора, довжина зони калібрування, швидкість екструзії, якість контакту полімер-калібратор, тип, температура та витрата охолоджувального агенту). Експериментально визначено середні значення коефіцієнта теплопередачі від поверхні екструдованого профілю з полістиролу до охолоджувальної рідини в сухому калібрувальному пристрої. Для умов експерименту встановлене значення коефіцієнта теплопередачі становить  $435 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ . Відзначено значимість впливу термічного опору на теплопередачу між розплавом полімеру та матеріалом калібруючої гільзи, проте не враховано зміну теплофізичних характеристик полімеру при зміні температури.

Відповідно до рис. 1.22, теплота, що відводиться від трубної заготовки може бути визначена як:

$$q = K \cdot \Delta t, \quad (1.20)$$

де  $\Delta t$  - різниця температур, К;  $K$  - коефіцієнт теплопередачі, що визначається за формулою:

$$K = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \Delta + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{\text{води}}}}, \quad (1.21)$$

де  $\delta_1, \delta_2$  - товщини затверділого шару полімеру та калібрувальної гільзи;  $\lambda_1, \lambda_2$  - теплопровідності затверділого шару полімеру та калібрувальної гільзи;  $\Delta$  - термічний опір простору між трубною заготовкою та внутрішньою стінкою калібрувальної гільзи;  $\alpha_{\text{води}}$  - коефіцієнт тепловіддачі води.

Також в роботі [59] не враховано те, що товщина трубної заготовки змінюється під час охолодження, що негативно впливає на точність розрахунку калібруючого обладнання.

Роботи [57-73] спрямовані на покращення процесу охолодження без зменшення продуктивності лінії, а також встановлення параметрів, що суттєво

впливають на калібрування при одержанні виробів із заданими параметрами. Це дозволяє точніше врахувати вплив розрідження на контролювання сил тертя між трубною заготовкою та гільзою калібратора при моделюванні. В даних роботах використано двоступінчастий тип наростання розрідження, але не розглянуто вплив термічного контакту на теплообмін.

### **1.7 Мета та задачі дослідження**

**Метою роботи** є підвищення ефективності процесу теплообміну при калібруванні труб з термопластів та розробка конструкції калібрувального пристрою для одержання продукції із заданими властивостями..

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

- обґрунтувати умови формування контрольованого термічного опору при калібруванні труб з термопластів в калібраторі між поверхнею трубної заготовки та стінкою калібрувальної гільзи;
- сформулювати фізичну модель процесу теплообміну між матеріалом стінки трубної заготовки та охолоджуючою рідиною через стінку калібруючої гільзи з врахуванням фазового переходу, що супроводжується усадкою заготовкою, при охолодженні розплаву термопласту та термічного опору на межі метал-зовнішня стінка труби;
- доповнити математичний опис процесу теплообміну з урахуванням особливостей теплообміну при калібруванні;
- розробити методику експериментальних досліджень та провести натурні експерименти, перевірити адекватність положень фізичної та математичної моделей;
- узагальнити результати експериментальних досліджень та встановити раціональні параметри процесу калібрування;
- розробити технічні пропозиції щодо створення інноваційної конструкції калібратора;

розробити алгоритм та методику розрахунку ефективного калібратора.

## Висновки по розділу 1

Виробництво труб з термопластів через великий попит у багатьох галузях економіки буде стрімко збільшуватись і, особливо в Україні, через зростаючі потреби відновлення житла та інженерних мереж після звільнення наших територій.

Для нарощування обсягів виробництва труб з ПЕВТ та впровадження рециклінгових технологій перероблення вторинної сировини необхідно проводити модернізацію існуючого та створення сучасного енерго-ресурсоощадного обладнання.

Складність створення такого обладнання полягає в тому, що теплофізичні властивості термопластів мають аномалії в області температур склування. При збільшенні густини ПЕВТ діапазон температур склування зменшується і аномальність більш характерна. Другою особливістю є те, що механічні властивості ПЕВТ при підвищенні температури знижуються, і при температурі більше 80°C розплав ПЕВТ наближається до в'язкої рідини.

Для збільшення швидкості протягування труби з термопластів в калібрувальному пристрої при екструзії доцільно використовувати калібратор з контрольованим тиском розрідження в робочих камерах, що дозволяє інтенсифікувати охолодження шляхом зменшення термічного опору в процесі перенесення тепла від заготовки труби до охолоджувальної рідини в камері калібратора.

Попереднє охолодження трубної заготовки шляхом поливу, занурення або зрошення не може бути використано через дефекти, які виникають на поверхні, тому увагу необхідно приділити сухому калібруванню труб з ПЕВТ;

Існуючі методики розрахунку калібрувального пристрою не враховують залежність теплофізичних параметрів термопластичних матеріалів від температури і теплоту кристалізації.

## РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ В КАЛІБРАТОРІ

### 2.1. Фізична модель процесу калібрування труб з термопластів

Калібратор призначений для остаточного формування готового полімерного виробу з доведенням його до стану, що відповідає технічним умовам. Для цього необхідно забезпечити ефективне перенесення тепла від стінки трубної заготовки до внутрішньої поверхні калібрувальної гільзи, стінка якої охолоджується рідиною. Процес охолодження полімерної труби супроводжується затвердіння поверхневого шару полімеру та усадкою, що призводить до збільшення зазору між поверхнею труби та гільзи калібратора, що, своєю чергою, призводить до збільшення термічного опору процесу охолодження. Недостатня механічна міцність утвореного твердого шару на поверхні трубної заготовки через низку ефективності охолодження призводить до руйнування виробу під дією зусиль тягнучого пристрою. Це вимагає зменшенні швидкості протягування, а отже зниження продуктивності лінії.

Для контролювання зазору між стінкою трубної заготовки та гільзи калібратора в його робочих камерах створюється відповідний рівень розрідження, який обмежується величиною сил тертя при русі труби в гільзі калібратора.

Охолодження стінки труби з термопластичного матеріалу при калібруванні супроводжується утворенням надмолекулярних структур і зміною їх теплофізичних і механічних властивостей, збільшенням ступеня кристалічності (склуванням), зменшенням питомого об'єму (усадкою). Фізично необхідно забезпечити збереження термічного контакту між стінкою калібрувальної гільзи і трубою для утворення розвиненого шару твердого термопласту. Передчасне зникнення термічного контакту для труби з ПЕВТ викликає нерівномірність охолодження та відхилення форми, розмірів та шорсткості поверхні труби від заданих значень.

Для уникнення втрати термічного контакту використовується розрідження зовні труби яка калібрується (зі сторони охолоджувальної рідини), при цьому атмосферний тиск всередині трубної заготовки притискає її до внутрішньої стінки

калібрувальної гільзи, що дозволяє контролювати термічний контакт.

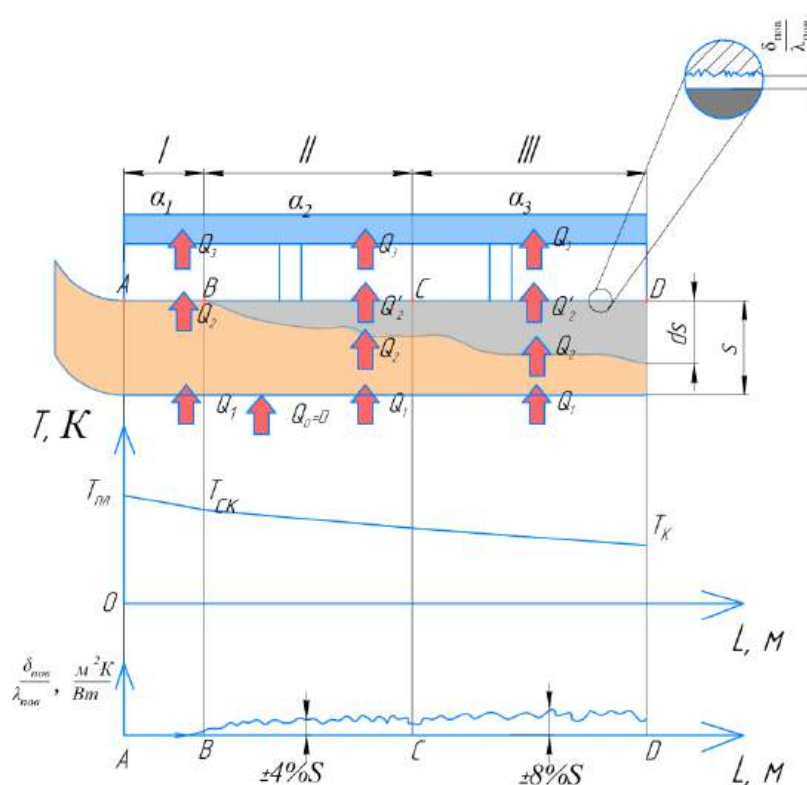
При збільшенні значень розрідження значно зростає сила тертя трубної заготовки зі стінками калібрувальної гільзи, що може призвести до розриву трубної заготовки. Це зумовлено тим, що в тонкому прошарку біля стінки калібрувальної гільзи полімер має кристалічну фазу, яка може сприймати механічні навантаження. Значення розрідження має відповідати умові збереження термічного контакту та забезпечувати задану величину сили тертя і повинно поступово збільшуватися, в залежності від теплофізичних властивостей полімеру. Так для калібрування труб з ПЕВТ максимальне значення розрідження становить біля 0,02 МПа [74].

На підставі наведеного фізичну модель процесу калібрування труби з термопласту на доцільно розділити на дві на: теплову рис. 2.1 та механічну рис. 2.2.

Трубна заготовка надходить до калібруювальної гільзи з температурою розплаву (точка *A* на рис. 2.1) і починає охолоджуватись при щільному контакту зі стінкою калібратора, від якої тепло відводиться водою  $Q_1$ , рис.2.1.

В точці *B* (рис 2.1) на поверхні трубної заготовки починає утворюватися тонкий шар затверділого полімера. Припускаємо, що внаслідок значної адгезії полімера зі стінкою калібратора термічний опір  $\Delta=0$ , а весь гідравлічний напір, який створює формуючий інструмент витрачається на подолання сил тертя при русі трубної заготовки на цій ділянці (зона I). При проходженні ділянки I температура поверхні трубної заготовки знижується до температури початку кристалізації (температури склування), що супроводжується усадкою. Тому в точці *B* (початок зони II) для збереження заданих розмірів необхідно застосовувати мінімальне розрідження. При цьому в зоні II відбуваються відведення теплоти  $Q_2$  та зменшення зовнішнього діаметра трубної заготовки  $d_s$  і з'являється зазор між внутрішньою поверхнею калібратора та полімерною трубою ( $\delta$ ), величина якого визначає додатковий термічний опір процесу охолодження поверхні полімеру. Одночасно з цим зменшується сила тертя затверділої плівки полімера на трубній заготовці з внутрішньою поверхнею калібратора і, відповідно, зменшується тягове зусилля та

ризик розриву труби, оскільки відбувається відрив заготовки від поверхні гільзи під дією сил тяжіння та усадки. У цьому випадку, якщо не вживати заходів із застосуванням розрідження в калібраторі, суттєва інтенсивність охолодження через підвищення температури труби на виході з калібратора значно збільшує ризик її деформації.



$ds$  – змінна товщина затверділого шару полімеру;  $S$  – товщина стінки трубної заготовки

Рисунок 2.1 – Фізична модель процесів теплообміну в калібраторі екструдованої труби з термопласту.

Мінімізація зазору  $\delta$ , хоча і дозволяє зберегти необхідну форму заготовки, супроводжується збільшенням сили тертя руху трубної заготовки в калібраторі і зумовлює необхідність збільшення зусилля протягування і, як наслідок, зростання ризику розриву заготовки.

Отже, в залежності від параметрів поверхні плівки трубної заготовки і

теплофізичних властивостей полімеру, рівень розрідження в камерах калібратора повинний адаптивно змінюватись, відповідно до темпу охолодження без суттєвого обмеження продуктивності екструдера.

На основі зазначеного можна скласти тепловий баланс у вигляді рівняння:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_d = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)WC_{n(t)}(T_{nl} - T_k)\rho_{n(t)}, \quad (2.1)$$

де  $Q_1, Q_2, Q_3$  - відповідно кількості теплоти, які відводяться в зонах I, II і III, Вт;  $Q_d$  - кількість теплоти, яка, в разі необхідності, відводиться додатковим охолодженням, Вт;  $D$  і  $d$  - зовнішній та внутрішній діаметри труби, яка виходить з калібратора, м;  $W$  - швидкість руху трубної заготовки через калібратор, м/с;  $C_{n(t)}$  - теплоємність полімера, яка залежить від температури, кДж/(кг·К);  $\rho_{n(t)}$  - густина полімера, яка залежить від температури, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{nl}$  - температура полімеру при входженні в калібратор, К;  $T_k$  - температура полімеру при виході з калібратора, К

Термічний опір для зони I:

$$R_I = \frac{\delta_{III}}{\lambda_{III}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_1}, \quad (2.2)$$

де  $\delta_{III}$  - товщина стінки трубної заготовки з плаву полімеру, м;  $\lambda_{III}$  - коефіцієнт теплопровідності плаву полімеру, Вт/(м·К);  $\delta_{КАЛ}$  - товщина стінки калібрувальної гільзи, м;  $\lambda_{КАЛ}$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу калібрувальної гільзи, Вт/(м·К);  $\alpha_1$  - коефіцієнт тепловіддачі від поверхні труби до охолоджувальної рідини, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Термічний опір для зони II:

$$R_{II} = \frac{\delta_{III}}{\lambda_{III}} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_2}; \quad 0 \leq \delta_{нов} \leq [\delta] \approx 4\% \cdot \delta_{труби} \quad (2.3)$$

де  $\delta_T$  - товщина затверділого шару полімеру, м;  $\lambda_T$  - коефіцієнт теплопровідності затверділого шару полімеру, Вт/(м·К);  $\delta_{нов}$  - товщина зазору між трубною

заготовкою та калібрувальною гільзою, м;  $\lambda_{нов}$  - коефіцієнт теплопровідності повітря, що знаходиться в зазорі між трубною заготовкою та калібрувальною гільзою, Вт/(м·К);  $\alpha_2$  - коефіцієнт тепловіддачі від поверхні труби до охолоджувальної рідини, Вт/(м²·К);  $[\delta]$  - допустимий зазор, м;  $\delta_{труби}$  - товщина стінки трубної заготовки, м.

Термічний опір зони III:

$$R_{III} = \frac{\delta_{ПЛ}}{\lambda_{ПЛ}} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_3}; \quad \delta_{нов} \leq [\delta] \approx 8\% \cdot \delta_{труби}, \quad (2.4)$$

де  $\alpha_3$  - коефіцієнт тепловіддачі від поверхні труби до охолоджувальної рідини, Вт/(м²·К).

У випадку, коли при виході із зони III температура трубної заготовки ще не дійшла до необхідної, додається додаткова 4-та зона (на рис.2.1 - зона Д), з термічним опором:

$$R_D = \frac{\delta_{ПЛ}}{\lambda_{ПЛ}} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha'_3}; \quad \delta_{нов} \leq [\delta] \approx 8\% \cdot \delta_{труби} \quad (2.5)$$

де  $\alpha'_3$  - коефіцієнт тепловіддачі від поверхні труби до охолоджувальної рідини, Вт/(м²·К).

Умова міцності труби:

$$\frac{F_{тян}}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d_i^2)} < [\sigma]_{дон}, \quad (2.6)$$

де  $F_{тян}$  - тягнуче зусилля, Н;  $D$  - діаметр трубної заготовки, м;  $d_i$  - діаметр твердого шару, м;  $[\sigma]_{дон}$  - допустиме напруження у стінці труби, МПа.

На рис. 2.2 зображено механічну складову і два орієнтовних графіка зі значеннями усадки та розрідження, що їй протидіє.

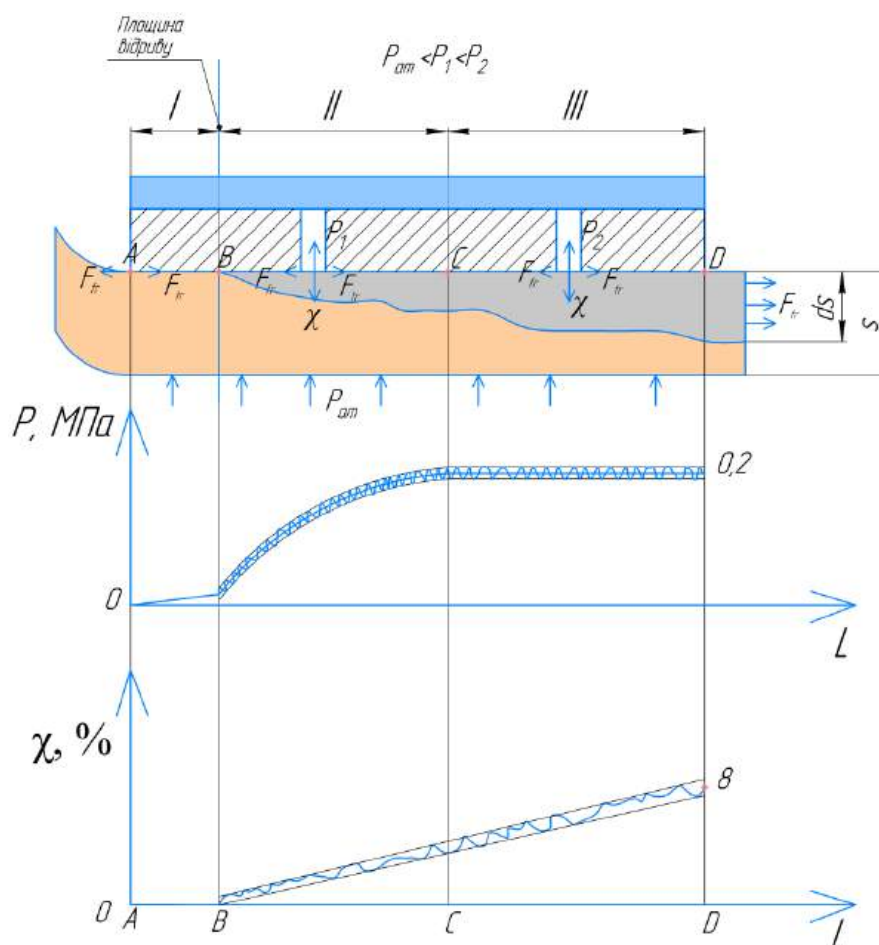
Механічна складова процесу калібрування також складається з 3 зон: перша зона – зона швидкого формування затверділої плівки на поверхні трубної заготовки; друга і третя зони – зони росту товщини затверділої плівки з плаваючим термічним



опором, що виникає через збільшення впливу сил усадки та притискання розрідженням. Зони II і III відрізняються значенням розрідження та товщини полімеру, що застосувався.

В точці *A* відбувається входження трубного профілю в калібрувальну гільзу та починається зона формування твердого шару на поверхні трубної заготовки (зона I). Оскільки зовнішній діаметр трубної заготовки на вході в калібратор більший ніж внутрішній діаметр гільзи на трубну заготовку відразу ж починають впливати сили тертя, а також тягові зусилля, завдяки якому труба протягується через калібратор. Різні діаметри, а також вплив атмосферного тиску всередині труби спричиняють щільне притискання трубної заготовки до стінки калібрувальної гільзи. В цій зоні полімерний матеріал трубної заготовки ще перебуває у стані розплаву, який інтенсивно охолоджується до початку склування (появи кристалічної фази).

Після проходження першої зони (точка *B*), починається відрив труби від стінки гільзи через вплив усадки, що виникає за рахунок затвердіння термопласту. Відповідно, для забезпечення термічного контакту між розплавом та стінкою калібрувальної гільзи, достатньо незначного перепаду тиску, який створюється завдяки розрідженню зовні калібрувальної гільзи. З цією метою стінки камери калібатора на цій ділянці перфоруються. Саме розрідження працює в пульсуючому режимі, що дозволяє його регулювати. В свою ж чергу, наявність регульованого розрідження в камерах калібатора, відповідно до товщини кристалічного шару полімеру, дозволяє контролювати величину зазору між стінками труби та калібатора і, відповідно, мінімізувати термічний опір процесу охолодження. Для запобігання обриву трубної заготовки перфорація на поверхні калібрувальної гільзи розташовується на заданій відстані від точки *A*. В залежності від виду термопласту і діаметра труби, перша прорізь може знаходитися на відстані 10...35 мм, саме на цьому рівні починається зона II.



$F_{fr}$  – сила тертя;  $F_{tr}$  – тягнуча сила;  $P_{at}$  – атмосферний тиск;

$P_1, P_2$  – розрідження ( $P_1 < P_2$ );  $\chi$  – об'ємна усадка.

Рисунок 2.2 – Фізична модель процесів перенесення в калібраторі екструдованої труби з термопласту

Коли розрідження досягає максимально допустимого значення, починається третя зона (точка C), в якій продовжується охолодження труби. Через калібрувальний пристрій трубна заготовка протягується із швидкістю, яка визначається його пропускною здатністю (для туб малого діаметра), або продуктивністю екструдера та типорозміром труби (для труб верхнього діапазону можливостей екструзійної лінії).

Для охолодження калібрувальної гільзи її зовнішня поверхня зрошується або занурюється в воду, що охолоджує матеріал гільзи і відводить тепло.

Одна з проблем калібрування в зоні росту (відповідає зонам II і III) полягає в усадці термопласту, яка починається при склуванні полімеру і дорівнює відносному зменшенню питомого об'єму. Питомий об'єм дорівнює зворотному значенню питомої густини полімеру:

$$\chi_v = \frac{\frac{1}{\rho(t_n)} - \frac{1}{\rho(t_k)}}{\frac{1}{\rho(t_n)}} \cdot 100\% , \quad (2.7)$$

де  $\rho(t_k)$ ,  $\rho(t_n)$  – густина полімеру вкінці та на початку процесу охолодження, кг/м<sup>3</sup>.

Лінійна усадка визначається як [75-78]

$$\chi_L = \sqrt[3]{\frac{\chi_v}{100\%}} \cdot 100\% , \quad (2.8)$$

Діаметр калібрувальної гільзи має бути більшим за діаметр труби, який необхідно отримати, з урахуванням усадки по діаметра. В залежності від діаметра та матеріалу така різниця може бути в межах від 3 до 10 %.

Реалізацію положень запропонованої фізичної моделі доцільно проводити з використанням адаптивного розрідження в камерах калібратора для забезпечення заданої якості виробу та продуктивності екструдера.

## 2.2. Математична модель процесу калібрування труб з термопластів

Для математичного опису процесу калібрування труб з термопластів з урахуванням наведених положень фізичної моделі доцільно сформулювати наступні припущення:

- в зоні формування кристалічного шару полімеру задача перенесення теплоти зовнішня, а процес лімітується коефіцієнтом тепловіддачі від зовнішньої стінки калібрувальної гільзи до охолоджувальної рідини;

- в зоні росту кристалічного шару полімеру задача внутрішня – процес

перенесення теплоти лімітується теплопровідністю термопласту;

– термічний опір в місці контакту труби і калібрувальної гільзи постійний;

– температура розплаву термопласту ( $T_p$ ) на вході в калібрувальний пристрій постійна по перерізу;

– усадка в матеріалі стінки труби відбувається однаково в усіх напрямках і визначається через зміну локального значення питомого об'єму;

– зміна питомого об'єму термопласту при зміні його температури відбувається одночасно.

### 2.2.1. Визначення температурного поля в стінці трубної заготовки при калібруванні

Розрахунок температурного поля в стінці полімера дозволить визначити геометричні розміри зони І.

Тепловий баланс для кінцевого  $i$ -ого елемента на  $j$ -ій довжині (рис. 2.3) у вигляді елементів товщиною  $\Delta y$  та довжиною  $\Delta x = \Delta \tau W$ , [54], Вт:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{d\tau} \rho C_p = \lambda \frac{\partial^2 T}{dx dy} &\Rightarrow \frac{\partial T}{d\tau} W \rho C_p = \lambda \frac{\partial^2 T}{dx dy} \Rightarrow \\ \Rightarrow \rho(T_{j,i}) C_p(T_{j,i}) \left( \Delta \tau W \pi \left[ \left( R_i + \frac{\Delta y}{2} \right)^2 - \left( R_i - \frac{\Delta y}{2} \right)^2 \right] \right) \frac{T_{j+1,i} - T_{j,i}}{\Delta \tau} + \\ + \lambda(T_{j,i}) \left( \frac{T_{j,i-1} - T_{j,i}}{\Delta y} 2\pi \left[ R_i - \frac{\Delta y}{2} \right] \Delta \tau W \right) - \lambda(T_{j,i}) \left( \frac{T_{j,i} - T_{j,i+1}}{\Delta y} 2\pi \left[ R_i + \frac{\Delta y}{2} \right] \Delta \tau W \right), \end{aligned} \quad (2.9)$$

де  $\rho(T_{j,i}) C_p(T_{j,i}) \left( \Delta \tau W \pi \left[ \left( R_i + \frac{\Delta y}{2} \right)^2 - \left( R_i - \frac{\Delta y}{2} \right)^2 \right] \right) \frac{T_{j+1,i} - T_{j,i}}{\Delta \tau}$  – кількість теплової енергії (теплова потужність), що витрачається на зміну температури елемента, Вт;

$\lambda(T_{j,i}) \left( \frac{T_{j,i-1} - T_{j,i}}{\Delta y} 2\pi \left[ R_i - \frac{\Delta y}{2} \right] \Delta \tau W \right)$  – теплова потужність, що передається елементу від внутрішніх до нього шарів труби за рахунок теплопровідності, Вт;

$-\lambda(T_{j,i}) \left( \frac{T_{j,i} - T_{j,i+1}}{\Delta y} 2\pi \left[ R_i + \frac{\Delta y}{2} \right] \Delta \tau W \right)$  – теплова потужність, що відводиться від елемента



потужність, що витрачається на нагрівання повітря, яке потрапляє зовні всередину труби, та потужність охолодження труби, Вт:

$$W \frac{2\pi R_0^2}{4} \rho_{air} C p_{air} (T_{air\_1} - T_{air\_2}) \Leftrightarrow W \frac{2\pi (R_k^2 - R_0^2)}{4} \rho C p (T_p - T_{pipe\_out}) \quad (2.14)$$

$$R_0^2 \rho_{air} \ll (R_k^2 - R_0^2) \rho$$

Як зразок для труби з поліетилену 20х2,7 мм, отримаємо наступні значення:

$$(0,01 - 0,0027)^2 \cdot 1,226 \ll (0,01^2 - (0,01 - 0,0027)^2) 802,$$

$$0,65 \cdot 10^{-4} \ll 374,6 \cdot 10^{-4}$$

де за (2.9)  $R_0 = R_k - s$  – внутрішній радіус труби, м;  $R_k = \frac{D_k}{2} = \frac{0,02}{2} = 0,01$  м – кінцевий радіус труби;  $s = 0,0027$  м – товщина стінки труби;  $\rho_{air} = 1,226$  кг/м<sup>3</sup> – густина повітря за температури 288 К;  $\rho = 802$  кг/м<sup>3</sup> – густина поліетилену за середньої температури розплаву 423 К.

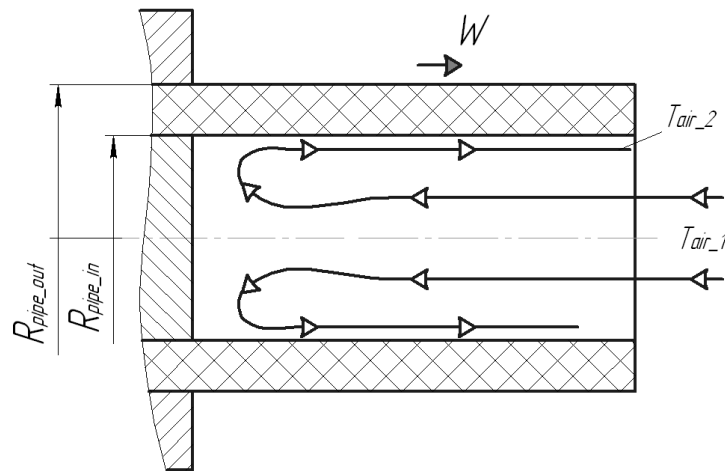


Рисунок 2.4 – Охолодження внутрішньої стінки труби повітрям

Отже, теплова потужність на нагрівання повітря, що потрапляє всередину труби 20х2,7 мм орієнтовно складає 0,17 % від потужності, яка необхідна для охолодження труби. Тому припущення щодо відсутності теплообміну на внутрішній поверхні труби, що калібрується та охолоджується обґрунтоване.

З урахуванням припущення щодо відсутності теплообміну на внутрішній

поверхні труби, що калібрується та охолоджується, і того, що в прийнятому поділі кінцевих елементів товщина внутрішнього кільцевого елемента дорівнює  $\Delta y/2$ , рівняння (2.7) спрощується до виразу:

$$\begin{aligned} & \rho(T_{j,1})C_p(T_{j,1}) \left( \Delta \tau W \pi \left[ \left( R_0 + \frac{\Delta y}{2} \right)^2 - R_0^2 \right] \right) \frac{T_{j+1,1} - T_{j,1}}{\Delta \tau} + \\ & + \lambda(T_{j,1}) \left( \frac{T_{j,1} - T_{j,2}}{\Delta y} 2\pi \left[ R_0 + \frac{\Delta y}{2} \right] \Delta \tau W \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Після скорочення температура внутрішньої поверхні стінки труби на наступному часовому шарі становитиме, К:

$$T_{j+1,1} = T_{j,1} + \frac{-\lambda(T_{j,1}) \left( \frac{T_{j,1} - T_{j,2}}{\Delta y} 2 \left[ R_0 + \frac{\Delta y}{2} \right] \Delta \tau \right)}{\rho(T_{j,1})C_p(T_{j,1}) \left( \left[ \left( R_0 + \frac{\Delta y}{2} \right)^2 - R_0^2 \right] \right)} \quad (2.16)$$

Граничні умови методу кінцевих елементів для зовнішньої стінки труби:

$$\begin{aligned} & \rho(T_{j,k})C_p(T_{j,k}) \left( \Delta \tau W \pi \left[ R_k^2 - \left( R_k - \frac{\Delta y}{2} \right)^2 \right] \right) \frac{T_{j+1,k} - T_{j,k}}{\Delta \tau} - \\ & - \lambda(T_{j,k}) \left( \frac{T_{j,k} - T_{j,k-1}}{\Delta y} 2\pi \left[ R_k - \frac{\Delta y}{2} \right] \Delta \tau W \right) - q_{j,k} 2\pi R_k \Delta \tau W = 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

де  $q_{j,k}$  – питомий тепловий потік від зовнішньої стінки труби яка калібрується, Вт/м<sup>2</sup>.

Після скорочення температура зовнішньої поверхні труби на наступному часовому шарі, К:

$$T_{j+1,k} = T_{j,k} + \frac{\lambda(T_{j,k}) \left( \frac{T_{j,k} - T_{j,k-1}}{\Delta y} 2 \left[ R_k - \frac{\Delta y}{2} \right] \Delta \tau \right) - q_{j,k} 2R_k \Delta \tau}{\rho(T_{j,k})C_p(T_{j,k}) \left( \left[ R_k^2 - \left( R_k - \frac{\Delta y}{2} \right)^2 \right] \right)} \quad (2.18)$$

Для проведення чисельного розрахунку представимо нестационарну

теплопровідність як квазістаціонарний процес конвективного перенесення теплоти. Тоді, відповідно до наведеної фізичної моделі (рис. 2.5) та з урахуванням прийнятих припущень, для умовно розгорнутої труби (пласка пластина) аналогічно до запропонованого у [50] можна записати:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\Delta H_f}{\rho C_p} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial \tau} = a^* \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (2.19)$$

де  $a^*(T) = \frac{\lambda^*(T)}{\rho^*(T)C_p^*(T)}$  - ефективний коефіцієнт температуропровідності, який

враховує теплоту плавлення ПЕВТ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $C_p^*(T)$  - ефективна теплоємність ПЕВТ,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;  $\lambda^*(T)$  - ефективна теплопровідність ПЕВТ,  $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ ;

$\rho^*(T)$  - густина ПЕВТ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\Delta H_f$  - питома теплота кристалізації,  $\text{Дж}/\text{кг}$ .

Використання прийнятої системи координат в (2.19) не вносить суттєвої помилки в результати розрахунків через невеликий розмір шару кристалічного полімеру, який утворюється при охолодженні заготовки труби в калібрувальному пристрої товщина якого знаходиться в межах 1 мм при діаметрі труби, що калібрується, 20 мм.

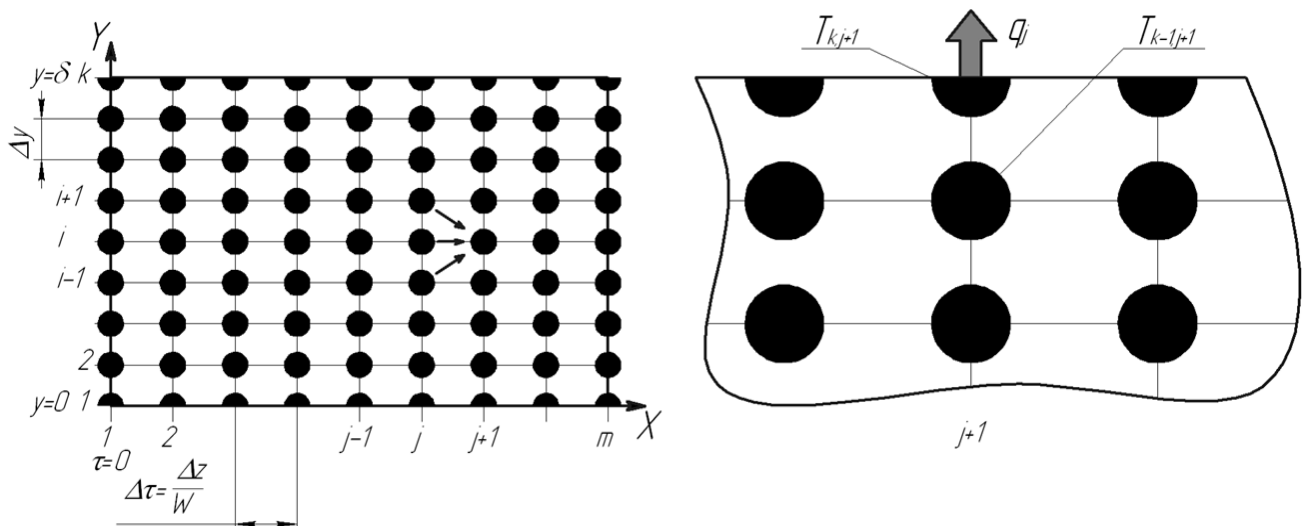


Рисунок 2.5 – Прийнята схема чисельного розрахунку



Використовуючи різницеві рівняння [80] знаходимо розв'язок диференціального рівняння (2.19) за етапами чисельного розв'язування диференціальних рівнянь у частинних похідних, відповідно до [81]:

1. Побудова рівномірної сітки  $N \cdot M$  вузлових точок в геометричній області, відповідно до постановки задачі і граничних умов.

2. Перетворення диференціального рівняння, що розв'язується, з представленням його у найзручнішій для розв'язання системі координат і заміною похідних кінцевими різницями. Використання отриманого різницевого рівняння для описування функціонального зв'язку між сусідніми вузлами сітки, тобто запису різницевого рівняння для кожного з вузлів сітки з одержанням внаслідок цього системи  $(N-1) \cdot (M-1)$  рівнянь з  $(N-1) \cdot (M-1)$  невідомими.

3. Розв'язання системи  $(N-1) \cdot (M-1)$  рівнянь з  $(N-1) \cdot (M-1)$  невідомими одним із відомих швидких і ефективних чисельних методів, вибір якого визначається властивостями системи рівнянь.

Прийнята для розв'язання поставленої задачі геометрична схема розрахунку для виділеного часового шару зображена на рис. 2.5. При цьому для кожного з часових шарів проводиться свій розрахунок.

Рівняння нестационарної теплопровідності у формі (2.19) у кінцевих різницях за прийнятою схемою може бути представлене у вигляді:

$$dy \approx \Delta y \quad \partial \tau = \frac{\partial x}{W} \approx \frac{\Delta x}{W}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^* \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Rightarrow \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta x} = W \cdot a^* \cdot \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta y^2} \quad (2.20)$$

Граничні умови другого роду для зовнішньої поверхні труби, що охолоджується у калібрувальному пристрої у кінцевих різницях, з урахуванням «ефективного теплообміну», та припущення незмінності густини матеріалу:

$$\begin{aligned} \frac{T_{k,j+1}-T_{k,j}}{\Delta\tau} \rho C_p^* \frac{\Delta y}{2} \Delta x \Delta z &= -q_j \Delta x \Delta z - \lambda \frac{T_{k,j}-T_{k-1,j}}{\Delta y} \Delta x \Delta z \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{T_{k,j+1}-T_{k,j}}{\Delta x} &= 2W \frac{-q_j - \lambda^* \frac{T_{k,j}-T_{k-1,j}}{\Delta y}}{\rho^* C_p^* \Delta y} \quad \Big|_{y=R_k} \end{aligned} \quad (2.21)$$

де  $q_j$  – питомий тепловий потік від зовнішньої стінки труби, що калібрується, Вт/м<sup>2</sup>.

Диференціальне рівняння доповнюють граничні умови першого і другого роду, початкова умова – температура розплаву на вході до калібрувального пристрою:

$$T(y) = T_p \quad \Big|_{\tau=0}.$$

Перепишемо граничні умови (2.14) для внутрішньої поверхні труби, що калібрується, з урахуванням «ефективного теплообміну», та припущенням сталості густини матеріалу:

$$\begin{aligned} \frac{T_{1,j+1}-T_{1,j}}{\Delta\tau} \rho C_p^* \frac{\Delta y}{2} \Delta x \Delta z &= -\lambda \frac{T_{1,j}-T_{2,j}}{\Delta y} \Delta x \Delta z \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{T_{1,j+1}-T_{1,j}}{\Delta x} &= -\frac{2\lambda^*}{\rho^* C_p^* \Delta y} \frac{T_{1,j}-T_{2,j}}{\Delta y} \quad \Big|_{y=R_1} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Отримане рівняння дозволяє з більшою точністю визначити зміну температури термопласту під час проходження трубного профілю через калібратор. Для цього необхідно знати температуру в точці входження (точка А), та обрати рівняння для розрахунку теплофізичних характеристик полімеру. Це дозволить визначити час перебування трубного профілю в калібраторі, що в свою чергу дозволить спроектувати калібратор необхідної довжини.

### 2.2.2. Теплопередача в зонах II і III калібратора

Термічний опір для зон II і III калібратора визначається за виразами (2.2) і (2.3). Схема теплопередачі наведена рис. 2.6.

За рівнянням (1.20) для заданого теплового потоку коефіцієнт теплопередачі

визначається за формулою:

$$K = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{води}}}, \quad (2.23)$$

де  $\frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} = \Delta$  - термічний опір у зазорі між трубою, що калібрується, і внутрішньою поверхнею калібрувальної гільзи [56],  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ ;  $\delta_{нов}$  - зазор між стінкою калібратора та поверхнею трубної заготовки, м;  $\lambda_{нов}$  - теплопровідність повітря,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

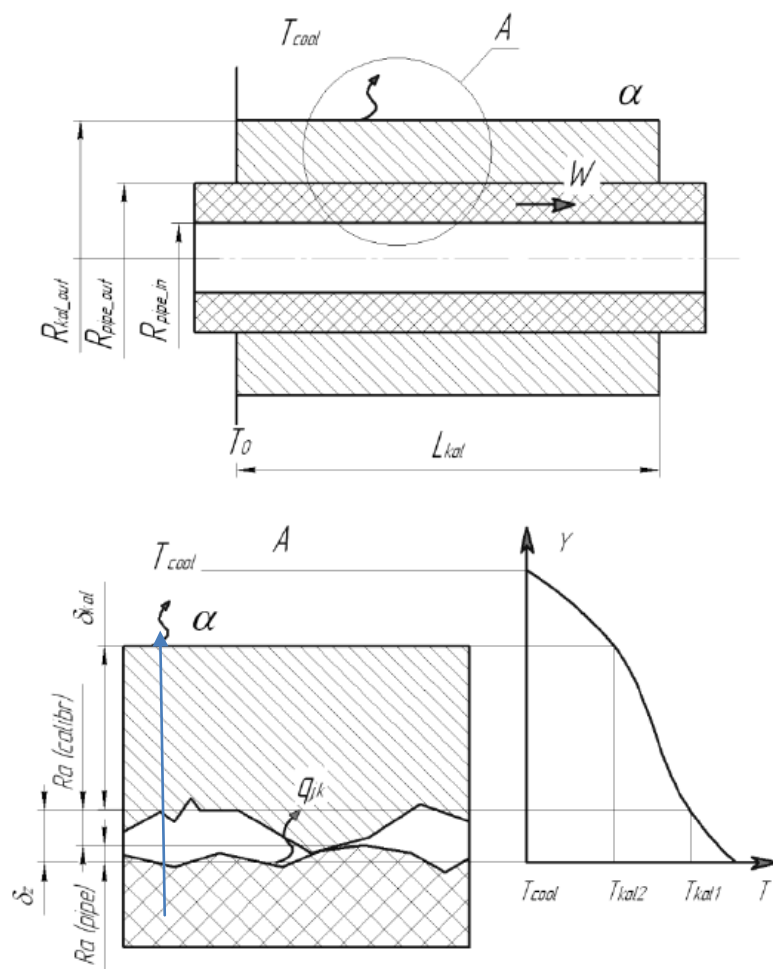


Рисунок 2.6 – Тепловий потік від зовнішньої поверхні стінки труби, що калібрується, до ядра потоку охолоджувальної рідини (позначення в тексті)

Зміна температури в зазорі, К:

$$\Delta T_{air} = q_{j,k} \Delta , \quad (2.24)$$

Термічний опір калібрувальної гільзи,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ :

$$r_{wt} = \frac{R_{pipe\_out}}{\lambda_{kal}} \ln\left(\frac{R_{kal\_out}}{R_{pipe\_out}}\right) , \quad (2.25)$$

де  $R_{pipe\_out}$  – внутрішній радіус калібрувальної гільзи, м;  $R_{kal\_out}$  – зовнішній радіус калібрувальної гільзи, м;  $\lambda_{kal}$  – теплопровідність матеріалу калібрувальної гільзи,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Різниця температур по радіусу циліндричної стінки калібрувальної втулки, К:

$$\Delta T_{kal} = q_{j,k} r_{wt} . \quad (2.26)$$

Питомий тепловий потік через зовнішню поверхню калібрувальної втулки,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ :

$$q_{kal\_out} = q_{j,k} \frac{R_{pipe\_out}}{R_{kal\_out}} . \quad (2.27)$$

Опір перенесенню тепла від зовнішньої стінки калібрувальної гільзи до ядра потоку охолоджувальної рідини,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ :

$$r_{\alpha} = \frac{1}{\alpha_L} , \quad (2.28)$$

де  $\alpha_L$  – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні калібрувальної гільзи до потоку охолоджувальної рідини,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Різниця температур між стінкою калібрувальної втулки та охолоджувальною рідиною, К:

$$\Delta T_{\alpha} = q_{kal\_out} r_{\alpha} = q_{j,k} \frac{R_{pipe\_out}}{R_{kal\_out}} r_{\alpha} . \quad (2.29)$$

Узагальненням (2.15-2.23) отримано залежність для визначення питомого теплового потоку від стінки трубної заготовки, що калібрується, до охолоджувальної рідини через стінку калібрувальної гільзи:

$$\begin{aligned}
T_{j,k} - T_{cool} &= \Delta T_z + \Delta T_{kal} + \Delta T_{\alpha} \Rightarrow \\
T_{j,k} - T_{cool} &= q_{j,k} \Delta + q_{j,k} r_{wt} + q_{j,k} \frac{R_{pipe\_out}}{R_{kal\_out}} r_{\alpha} \Rightarrow \\
q_{j,k} &= \frac{T_{j,k} - T_{cool}}{\Delta + r_{wt} + \frac{R_{pipe\_out}}{R_{kal\_out}} r_{\alpha}} \Rightarrow \\
q_{j,k} &= \frac{T_{j,k} - T_{cool}}{\frac{\delta_{air}}{\lambda_{air}} + \frac{R_{pipe\_out}}{\lambda_{kal}} \ln\left(\frac{R_{kal\_out}}{R_{pipe\_out}}\right) + \frac{R_{pipe\_out}}{R_{kal\_out}} \frac{1}{\alpha_L}} .
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Отже, отримано рівняння для кількісного визначення питомої теплоти при нестационарному процесі охолодження труби з термопласту, із застосуванням калібратора з водяним охолодженням. Це рівняння дозволяє прогнозувати температурні поля в матеріалі стінки труби, що калібрується і визначати довжин зон калібратора.

### 2.3. Умови збереження ефективного термічного контакту труби та поверхні калібратора

Для забезпечення термічного контакту використовується розрідження зовні трубною заготовки, яка під дією атмосферного тиску всередині притискається до внутрішньої поверхні калібрувальної гільзи. При охолодженні труби з термопластів і склуванні її частини (зовнішнього прошарку) виникають напруження через ефект усадки – зменшення питомого об'єму матеріалу. Тому для визначення усадки зроблено припущення, що мінімальне розрідження для збереження термічного контакту відповідає надлишковому тиску всередині труби, що деформує трубу до набуття нею діаметра калібрувальної гільзи (рис. 2.7).

За даними [72, 73], виражена за (2.8) лінійна усадка може досягати значень 10 %, тому при використанні моделі пружних деформацій розраховані напруження в стінці труби можуть перевищити границю плинності. Для визначення необхідного

надлишкового тиску використано визначення впливу пружних та пластичних деформацій.

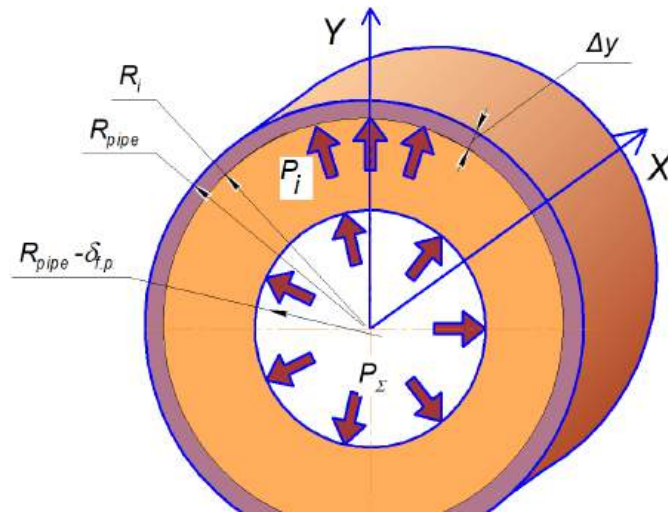


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема заданого термічного контакту трубної заготовки з стінкою калібрувальної гільзи

Тиск, за якого деформація труби відбувається в зоні пружної деформації та забезпечує компенсацію усадки [82]:

$$P_{E-j,i} = \frac{E(T_{j,i})}{\left( \frac{R_i + \frac{\Delta y}{2}}{0,85 \frac{\Delta y}{2}} \right)} \left( \sqrt[3]{\frac{\rho(T_{j,i})}{\rho(T_s)}} - 1 \right), \quad (2.31)$$

де  $T_s$  – верхня межа температурного діапазону склування термопластів, К;  $R_i$  – радіус  $i$ -ого умовного шару кільцевого перерізу для деформації діаметра якого необхідний надлишковий тиск, м;  $E(T_{j,i})$  – модуль пружності термопластів за температури  $T_{j,i}$ , Па;  $\rho(T_{j,i})$  – густина термопластів за температури  $T_{j,i}$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta y$  – товщина умовного прошарку в якому виникають механічні напруження, пов'язані з лінійною усадкою по діаметра, м.

Тиск, необхідний для компенсації усадки в зоні пластичної деформації розраховується за виразом [82]:

$$P_{\sigma i} = \frac{2\sigma(T_{j,i})\Delta y}{2R_i + \Delta y}, \quad (2.32)$$

де  $\sigma(T_{j,i})$  – границя плинності термопласту за температури  $T_i$ , Па.

Тиск, необхідний для компенсації усадки за умови відсутності деформації (напруження в матеріалі стінки труби, що досягли границі плинності, перша теорія міцності), Па:

$$P_{j,i} = \min\{P_{E-j,i}, P_{\sigma-j,i}\}. \quad (2.33)$$

Загальний надлишковий тиск для компенсації напружень від усадки в стінці труби, що калібрується, може бути розрахований як сума надлишкових тисків для всіх умовних прошарків труби, Па.

$$P_{j-\Sigma} = \sum_I^{\frac{R}{\Delta y}} P_{j,i}. \quad (2.34)$$

Ділення перерізу труби на прошарки має забезпечити менший перепад температур всередині умовного прошарку, при рівномірному розбитті і кількості шарів  $i$  товщина шару, м:

$$\Delta y = \frac{\delta}{i}. \quad (2.35)$$

Результатом розрахунку мінімального розрідження для збереження термічного контакту труби з термопластів і калібрувальної гільзи є значення розрідження й визначення умов, за яких усадка трубної заготовки буде в заданих межах, що забезпечить контрольований термічний опір та задану якість готового продукту. Наприклад, для діаметра трубки 25x1.5 мм допустимий зазор між трубною заготовкою та гільзою калібратора складає  $0,2 \pm 0,01$  мм.

Застосування нової методики розрахунку дозволить визначити мінімально необхідне значення розрідження вздовж калібрувальної гільзи для утримання термічного контакту між трубною заготовкою та внутрішньою поверхнею калібрувальної гільзи, що дозволить зменшити тертя та уникнути обриву труби при калібруванні з підвищеною швидкістю, – більше 6 м/хв. (0,1 м/с), а також

мінімізувати зазор між трубною заготовкою та калібрувальною гільзою ( $\Delta < 1\text{мм}$ ), для зменшення термічного опору.

## 2.4. Процес охолодження труби після калібратора

При виготовленні труб з великою товщиною стінки для виконання нормативних вимог до готової продукції та зменшення ризику пластичної деформації застосовується водяне охолодження.

Трубна заготовка з розплаву полімеру рухається і поступово охолоджується, проходячи калібрувальний пристрій, ванну з водою та повітряне охолодження. Час знаходження трубної заготовки в калібрувальному пристрої біля двох секунд. Для моделювання процесу калібрування може бути використана фізична модель пласкої пластини, для моделювання процесів охолодження труби в більшому інтервалі часу обрано рухому циліндричну систему координат (рис. 2.8).

Рівняння збереження енергії для кільцевого елемента при  $r_0 < r < R$ , довжиною  $dz$ , товщиною  $dr$  [28] в циліндричній системі координат:

$$\left| r_0 < r < R, \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0 \right.$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \rho(T) C_p(T) (2\pi r dr dz) = \lambda(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr (2\pi r dz) + \lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dz (2\pi r dr) \Rightarrow \quad (2.36)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial T}{\partial \tau} \rho(T) C_p(T) = \lambda(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}.$$

Після порівняння кількості теплоти, яка відводиться від елементарного об'єму полімеру за сталої координати  $r$  за рахунок теплопровідності в осьовому напрямку з кількістю теплоти, яка відводиться від елементарного об'єму полімеру за сталої координати  $r$  при зміні його температури отримано:



$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T}{\partial \tau} \rho(T) C_p(T) &\Leftrightarrow \lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \Rightarrow \\
 \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial \tau} \frac{\rho(T) C_p(T)}{\lambda(T)} &\Leftrightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} .
 \end{aligned}
 \tag{2.37}$$

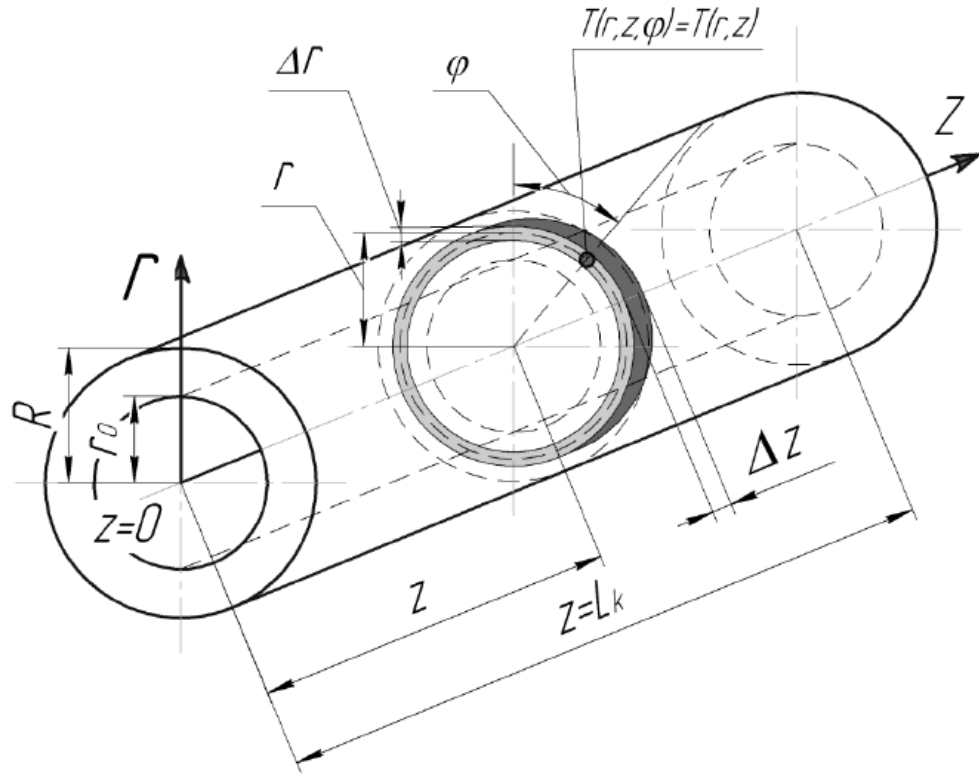


Рисунок 2.8 – Фізична модель процесу охолодження в циліндричній системі координат труби з термопласту

Враховуючи, що змінні  $z$  та  $\tau$  взаємно залежні:  $z=W\tau$  ,  $dz=Wd\tau$  після інтегрування по часу:

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho(T) C_p(T)}{\lambda(T)} \int_{\tau=0}^{\tau=l} \frac{dT(z)}{d\tau} d\tau &\Leftrightarrow \frac{1}{W} \int_{\tau=0}^{\tau=l} \frac{d\left(\frac{dT(z)}{dz}\right)}{d\tau} d\tau \Rightarrow \\
 \Rightarrow \frac{W\rho(T) C_p(T)}{\lambda(T)} T(z) dz &\Leftrightarrow \frac{dT(z)}{dz} \Rightarrow
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\Rightarrow \int_{\tau=0}^{\tau=l} \frac{W\rho(T)Cp(T)}{\lambda(T)} T(z) dz d\tau \Leftrightarrow \frac{1}{W} \int_{\tau=0}^{\tau=l} \frac{dT(z)}{d\tau} d\tau \Rightarrow \\
&\Rightarrow \frac{W\rho(T)Cp(T)}{\lambda(T)} T(z) \Leftrightarrow T(z) \Rightarrow \\
&\Rightarrow \frac{W^2\rho(T)Cp(T)}{\lambda(T)} \gg 1
\end{aligned}$$

З наведеного можна дійти висновку, що тепловий потік від елементарного об'єму через зміну його температури значно більший за тепловий потік від теплопровідності вздовж вісі труби, що калібрується та охолоджується, наприклад, при швидкості труби 5 м/хв (0,083 м/с):

$$\frac{W^2\rho(T)Cp(T)}{\lambda(T)} \approx \frac{0,083^2 \cdot 870 \cdot 2000}{0,15} = 79912 \gg 1.$$

Таким чином, рівняння (2.15) може бути спрощене до вигляду:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda(T)}{\rho(T)Cp(T)} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad |_{r_0 < r < R}. \quad (2.38)$$

Для елементарного кільцевого елемента, розташованого на внутрішній стінці труби, що калібрується та охолоджується, при  $r = r_0$ , довжиною  $dz$ , товщиною  $\frac{dr}{2}$ :

$$\begin{aligned}
&|_{r=r_0} \\
&\frac{\partial T}{\partial \tau} \rho(T)Cp(T) \left( 2\pi r_0 \frac{dr}{2} dz \right) = \lambda(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr (2\pi r_0 dz) + q_4 (2\pi r_0 dz) \Rightarrow \\
&\Rightarrow \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{2\lambda(T)}{\rho(T)Cp(T)} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{2q_4}{\rho(T)Cp(T)dr}.
\end{aligned} \quad (2.39)$$

З урахуванням припущення про відсутність теплообміну на внутрішній поверхні труби, що калібрується та охолоджується (доведення у розділі 2.2.1), припускаємо, що  $q_4(r_0, z, \varphi, \tau) = 0$ . Тоді рівняння (2.39) спрощується до вигляду:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{2\lambda(T)}{\rho(T)Cp(T)} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad | \quad r = r_0. \quad (2.40)$$

Для елементарного кільцевого елемента, розташованого на зовнішній стінці труби, що калібрується та охолоджується, при  $r=R$ , довжиною  $dz$ , товщиною  $\frac{dr}{2}$ :

$$\begin{aligned} | \quad r = R \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} \rho(T) Cp(T) \left( 2\pi R \frac{dr}{2} dz \right) &= \lambda(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr (2\pi R dz) + q_5 (2\pi R dz) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \frac{2\lambda(T)}{\rho(T)Cp(T)} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{2q_5}{\rho(T)Cp(T)dr}. \end{aligned} \quad (2.41)$$

В зоні охолодження труби після калібрувального пристрою ( $\tau \leq \frac{L_k}{W}$ ), питомий тепловий потік  $q_5$  визначається граничними умовами 3-ого роду (рис. 2.9). Після проходження калібрувальної гільзи трубна заготовка напряду взаємодіє з рідиною та продовжує охолоджуватись.

Для зовнішньої поверхні труби, що калібрується, питомий тепловий потік  $q_5$ , Вт/м<sup>2</sup>:

$$q_5 = \alpha_{water2} \Delta T = \alpha_{water2} (T(R, \tau) - T_{cool}) \quad \left| \tau > \frac{L_k}{W} \right. \quad (2.42)$$

де  $\alpha_{water2}$  – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні трубної заготовки до потоку охолоджувальної рідини, Вт/(м<sup>2</sup>К).

Остаточно система рівнянь, що описують процес охолодження труби з термопласту після калібрувального пристрою у нерухомій системі координат при заміні

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} \frac{\partial z}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} W$$

набуває вигляду:

$$\begin{cases}
 \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{2\lambda(T)}{W\rho(T)Cp(T)} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) & | r = r_0 \\
 \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda(T)}{W\rho(T)Cp(T)} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) & | r_0 < r < R \\
 q_5(z \leq L_k) = \frac{(T_{cool} - T(r=R))}{\frac{1}{\alpha_{water1}}} & q_5(z > L_k) = \alpha_{water2} (T(R, \tau) - T_{cool}) \\
 \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{2\lambda(T)}{W\rho(T)Cp(T)} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{2q_5}{W\rho(T)Cp(T)dr} & | r = R
 \end{cases} \quad (2.43)$$

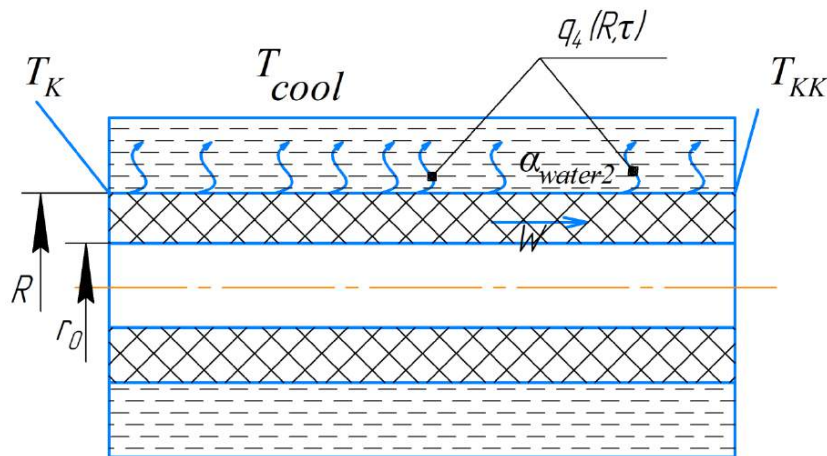


Рисунок 2.9 – Схема перенесення тепла від поверхні труби до охолоджувального середовища після калібрувального пристрою

Дана система рівнянь для чисельного розв'язання нестационарного процесу охолодження труби з термопласту, із застосуванням калібруатора з водяним охолодженням дозволяє за заданими умовами визначити довжину калібруатора та необхідний час перебування трубної заготовки в системі калібрування і охолодження.

## 2.5. Розрахунок зусилля протягування труби через калібратор

Зусилля протягування труби з термопласту виникає при притисканні труби до внутрішньої поверхні калібрувальної гільзи надлишковим тиском і виникненні в наслідок цього сили тертя. Величина надлишкового тиску визначається за виразом, Па:

$$P_{up} = P_{at} - P_{розр} , \quad (2.44)$$

де  $P_{at}$  – атмосферний тиск, Па;  $P_{розр}$  – розрідження в калібраторі, Па.

Тиск притискання труби до калібрувальної гільзи менший за надлишковий тиск на значення мінімального тиску збереження термічного контакту (компенсації усадки діаметра труби) і залежить від поточної довжини калібрування (часу охолодження), Па:

$$P_{j\_np} = (P_{up} - P_{j\_Σ}) . \quad (2.45)$$

Зусилля протягування, Н:

$$F_{np} = \sum_0^m \mu(T_{j,k}) 2\pi R_{pipe\_out} \Delta x \left| (P_{up} - P_{j\_Σ} - P_{розр}) \right| , \quad (2.46)$$

де  $\mu(T_{j,k})$  – коефіцієнт тертя термопласту по внутрішній стінці калібрувальної втулки за поточної температури зовнішньої стінки труби  $T_{j,k}$ ;

$P_{розр} = \frac{\pi}{4} (D_{пл}^2 - d_{вг}^2) \cdot [\sigma]_{пл.на розр.}$  – зусилля на розрив, Н;

$[\sigma]_{пл.на розр.}$  – допустиме напруження плаву на розрив, Па.

Проведемо аналітичний розрахунок для труби з поліетилену П4015 діаметром 25 з товщиною стінки 1,5, результати розрахунків наведені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 Результати розрахунку зусилля на розрив

Товщина твердого шару, м	$[\sigma]_{пл.на розр.}, \cdot 10^6, \text{Па}$	$P_{розр}, \text{Н}$
0,0001	4,7	36,4
0,0003	15	349,01
0,0005	20	769,3
0,001	25	1884

Для розрахунку зусилля протягування зроблено припущення що тиск

розрідження в зазорі між трубою з термопласту, що калібрується, і калібрувальною втулкою до першої перфорації на втулці лінійно зменшується від атмосферного до розрідження в камерах калібратора.

## 2.6. Обчислювальний експеримент щодо визначення локальних значень температури стінки труби з термопласту

Для перевірки правильності математичної моделі процесу перенесення тепла від матеріалу стінки труби, що калібрується, до охолоджувальної рідини через стінку калібрувальної гільзи в програмі *Python 3.12* складено програму та проведено серію обчислювальних експериментів. В програмному коді реалізовано алгоритм методу кінцевих елементів (пп. 2.2.1, 2.2.2) разом з зовнішніми умовами (2.38), розраховано можливу лінійну усадку при охолодженні та склуванні. Розрахунки проведені на прикладі поліетилену марки 20706-16.

У програмному коді для розрахунку теплофізичних, механічних властивостей та коефіцієнта тертя для пари «бронза–поліетилен» (рис. 2.10-2.15) використано метод лінійної апроксимації та відомі апроксимуючі залежності (за їх наявності).

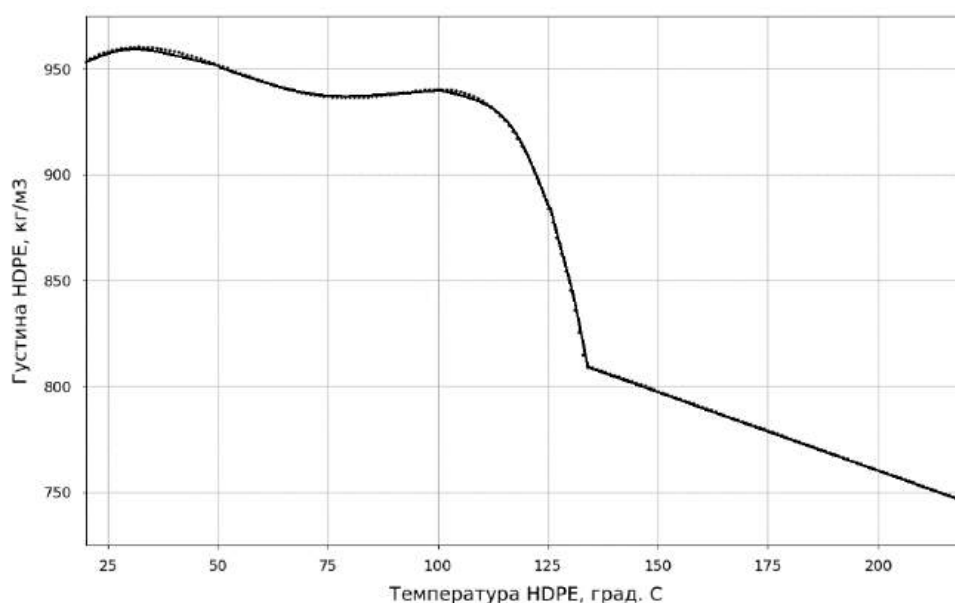


Рисунок 2.10 – Результат апроксимації експериментальних даних [28] густини ПЕВТ марки 20706-16

Точність обчислень звикористанням розробленої програми перевірено шляхом порівняння отриманих значень з довідниковими для: густини (рис 2.10 і 1.3), теплоємності (рис.2.13 і 1.4), теплопровідності (рис. 2.14 і 1.5).

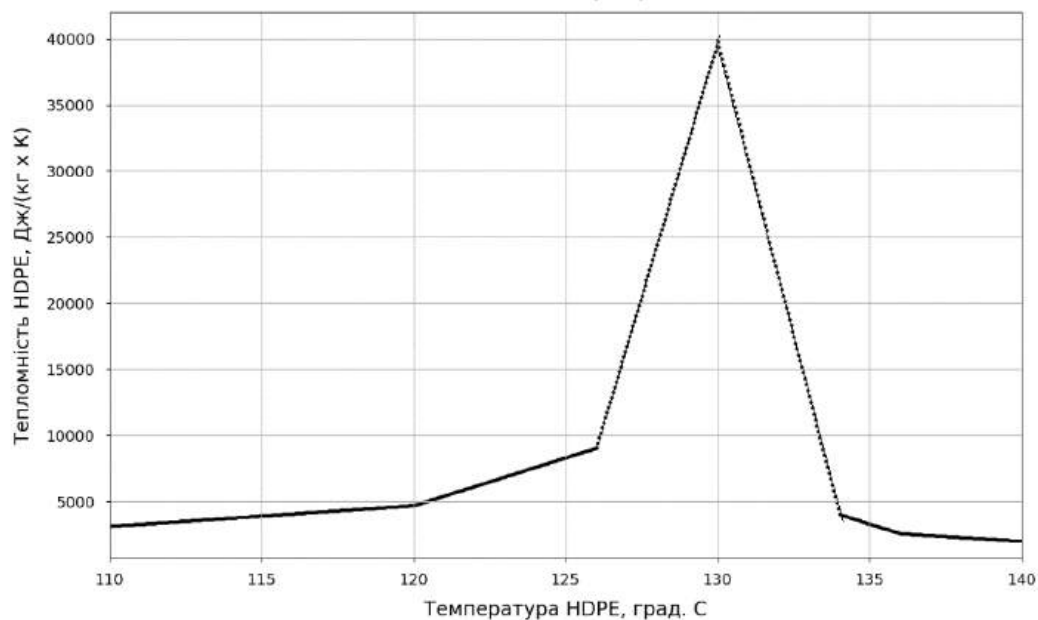


Рисунок 2.11 – Результат лінійної апроксимації експериментальних даних [28] теплоємності ПЕВТ марки 20706-16

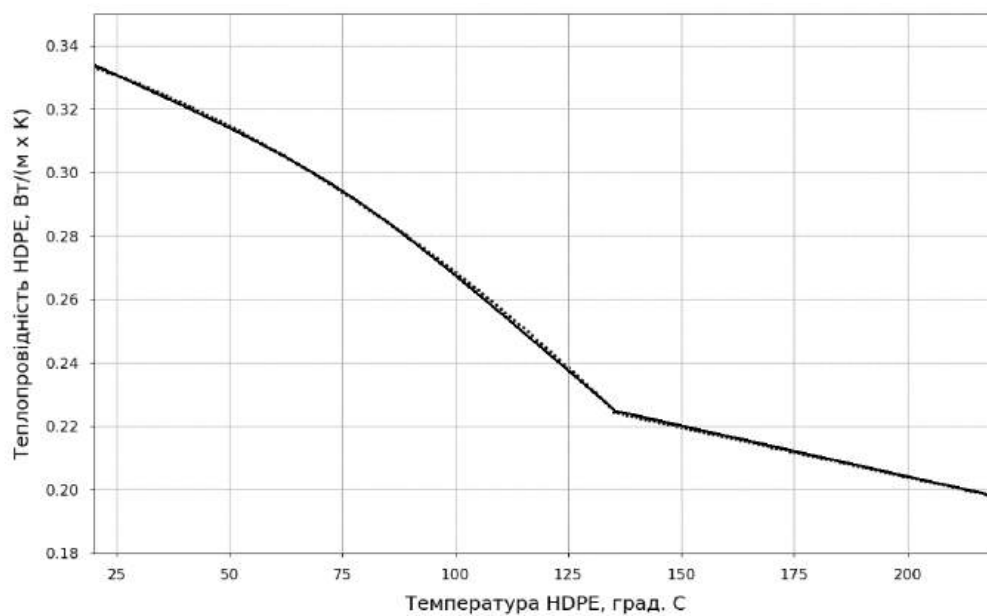


Рисунок 2.12 – Результат лінійної апроксимації експериментальних даних [28] теплопровідності ПЕВТ марки 20706-16

При апроксимації експериментальних даних для модуля пружності та границі

плинності використано дані [33] (рис. 1.19), та метод лінійної апроксимації (рис. 2.12, 2.13), при цьому для верхнього значення діапазону температури склування (408 K) модуль пружності та границя плинності дорівнюють нулю і поліетилен має властивості рідини.

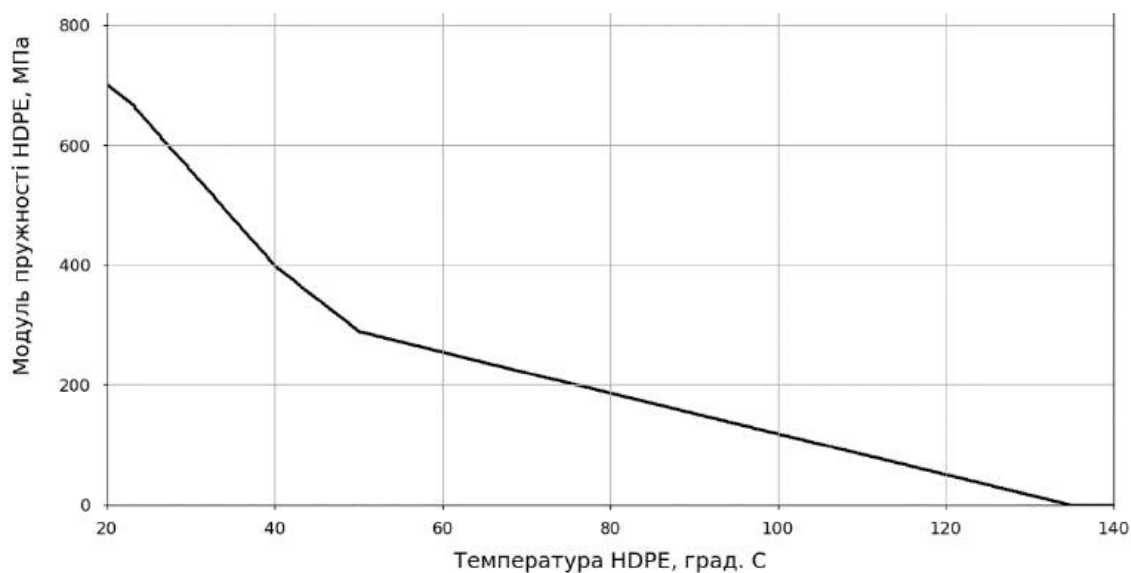


Рисунок 2.13 – Результат лінійної апроксимації експериментальних даних [33] модуля пружності ПЕВТ РЕ-100

Адекватність програмного коду перевірено шляхом порівняння даних [33] по модулю пружності (рис 2.13 і 1.19) і границі плинності (рис.2.14 і 1.19).

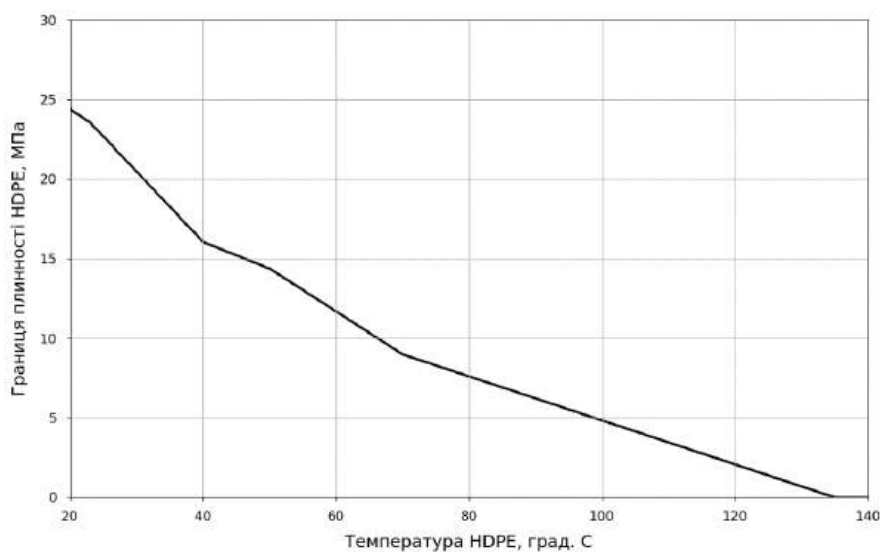


Рисунок 2.14 – Результат лінійної апроксимації експериментальних даних [33] границі плинності ПЕВТ РЕ-100



Для моделювання коефіцієнта тертя між трубою з ПЕВТ і матеріалом стінки калібрувальної гільзи використано експериментальні данні [33] та метод лінійної апроксимації (рис. 2.15).

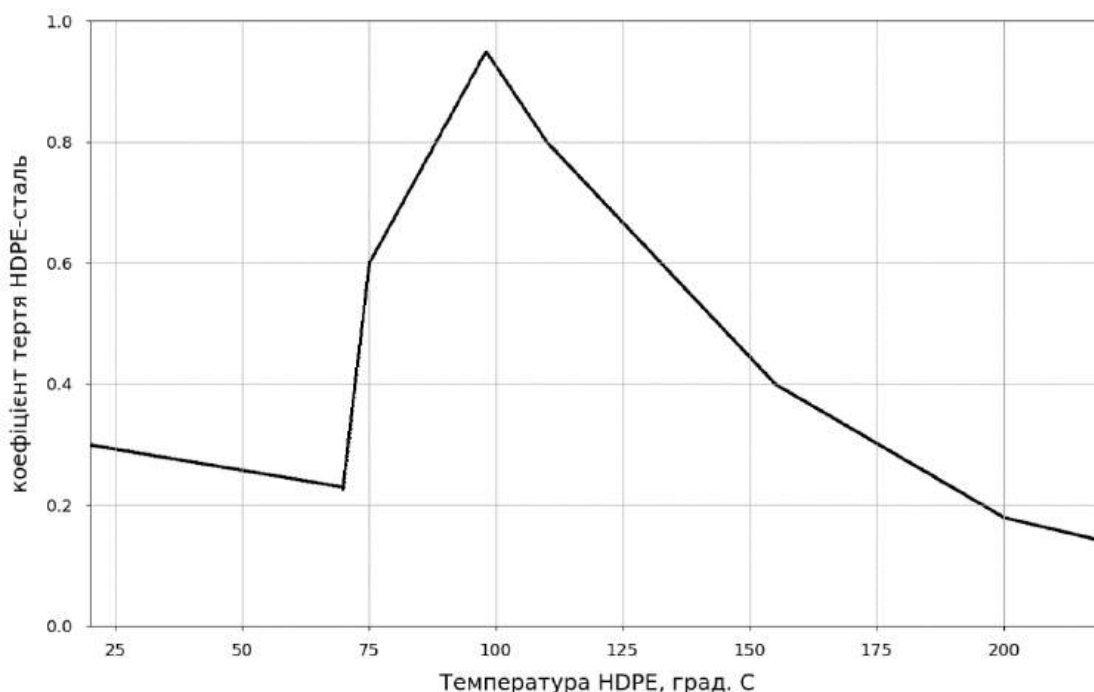


Рисунок 2.15 – Результат лінійної апроксимації експериментальних даних [33] коефіцієнта тертя для пари «бронза–поліетилен»

Як показано в (2.30) не визначеним залишається термічний опір між стінкою труби з термопластів та калібрувальною гільзою, тому першу серію обчислювальних експериментів проведено для різних значень термічного опору контакту з еквівалентною товщиною прошарку повітря  $\delta_z = 5...25$  мкм. Товщину прошарку повітря для обраних умов визначено на підставі натурного експерименту з калібрувальним пристроєм та результатів серії обчислювальних експериментів.

Умови обчислювального та натурного експериментів:

– радіус калібрувальної гільзи внутрішній  $R_{pipe\_out}=0,03305/2=0,016525$  м (рис. 2.8);

– радіус калібрувальної гільзи зовнішній  $R_{kal\_out}= R_{pipe\_out}+0,005=0,021525$  м (рис. 2.8);

– матеріал гільзи БрАЖ9-4 [ГОСТ 18175-78] з теплопровідністю  $\lambda_{kal}=58$

Вт/(мК) [79, 88];

- довжина калібрувальної гільзи  $L_{kal}=0,165$  м;
- розміри труби (діаметр×товщина) 32×3,0 мм;
- матеріал труби ПЕВТ марки 273-83 [85], густина за нормальних умов 950-955 кг/м<sup>3</sup>, дана марка композиції поліетилену фактично є сучасним аналогом марки 20706-016 [ГОСТ 16338-70], [28, 86] (густина за нормальних умов 953,9 кг/м<sup>3</sup>);
- початкова температура розплаву ПЕВТ перед калібрувальним пристроєм  $T_p=493$  К;
- температура охолоджувальної рідини  $T_{cool}=295$  К;
- за результатами попередніх досліджень середній коефіцієнт тепловіддачі від поверхні калібрувальної гільзи до охолоджувальної рідини  $\alpha_{1,2,3}=2654$  Вт/(м<sup>2</sup>К) за критерія Рейнольдса 26015 (циркуляція забезпечується форсунками та циркуляційним насосом);
- швидкість протягування труби  $W=5,2$  м/хв (0,087 м/с) (саме за такої швидкості калібрування трубної заготовки буде проходити без відривів);

*Припущення, прийняті в обчислювальному експерименті:*

- механічні властивості ПЕВТ марки 273-83 [ТУ 2243-104-00203335-2005] відповідають ПЕВТ РЕ-100 [33];
- кроки по товщині прийнято  $\Delta y=3 \cdot 10^{-4}$  м (кількість розбиттів  $k=10$ );
- кроки вздовж вісі, відповідно до умови збіжності та стійкості для явної схеми розрахунку, м:

$$\Delta \tau = k_{\Delta} \Delta y = 0,0192 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 5,75 \cdot 10^{-6} \Rightarrow$$

$$\Delta x = \Delta \tau W = 5,75 \cdot 10^{-6} \cdot 0,087 = 5 \cdot 10^{-7} \quad ,$$

де  $k_{\Delta}$  – коефіцієнт, визначений експериментально при проведенні серії обчислювальних експериментів.

Наведені результати дозволять врахувати зміни теплофізичних властивостей термопласту у пошарової моделі в залежності від температури та реологічних властивостей полімеру, щоб покращити точність розрахунків.

## 2.7 Визначення температурного поля в стінці труби

Можна виділити такі технологічні особливості процесу калібрування:

- пульсація подачі розплаву полімера екструдером;
- мінімальне значення розрідження при калібруванні на початку зони II приймаємо 0,01 МПа;
- критична швидкість калібрування труб малого діаметра з поліетилену при мінімальному значенні розрідження для існуючих конструкцій калібрувального пристрою 6,5 м/хв (0,11 м/с) [74];
- кільцева жорсткість труби після зони охолодження у ванні має забезпечити відсутність пластичних деформацій після тягнучого пристрою;
- кінцева температура внутрішньої поверхні труби не може бути більше 323 К.

Для обчислювальних і імітаційних експериментів як матеріал труби прийнятий поліетилен високої густини П4015 (МРТУ 60-05-890-64). Даний полімер широко використовується для виготовлення плівки, технічних виробів, труб, фітінгів, пакувальних засобів. Разом з цим його теплофізичні властивості значно змінюються в діапазоні температури склування (в зоні склування), а механічні властивості полімеру змінюються під впливом температур (рисунки 2.16-2.17). [25, 33, 87].

На рисунку 2.16 виділено зону склування, яка знаходиться в діапазоні температур 383..393 К, саме в даній зоні відбувається зміна агрегатного стану, і розплав полімеру починає твердіти. Через цю зміну відбувається перетворення властивостей матеріал і він переходить з неньютонівської рідини у твердий стан, що супроводжується різкими змінами і «стрибками» в теплофізичних параметрах.

Мета розрахунку полягає у визначенні температурних полів у трубній заготовці з урахуванням зміни теплофізичних властивостей матеріалу від температури. Використовується модель нестационарного теплообміну.

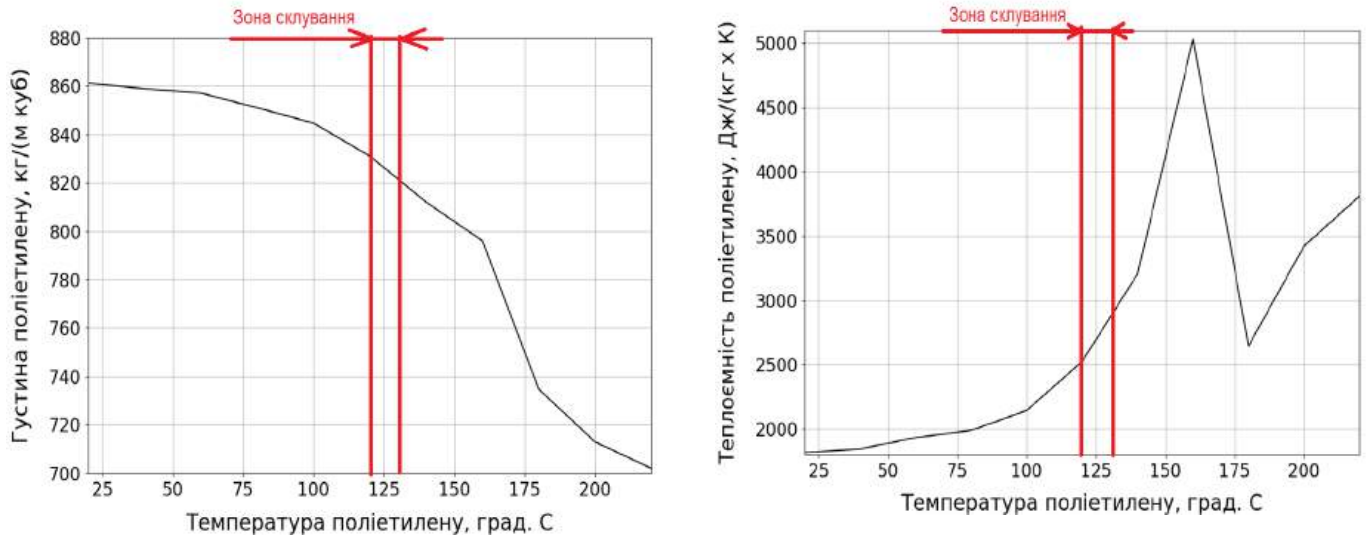


Рисунок 2.16 – Теплофізичні властивості поліетилену марки П4015

Початкові умови :  $T(z=0, r) = T_{i,l} = T_p$ .

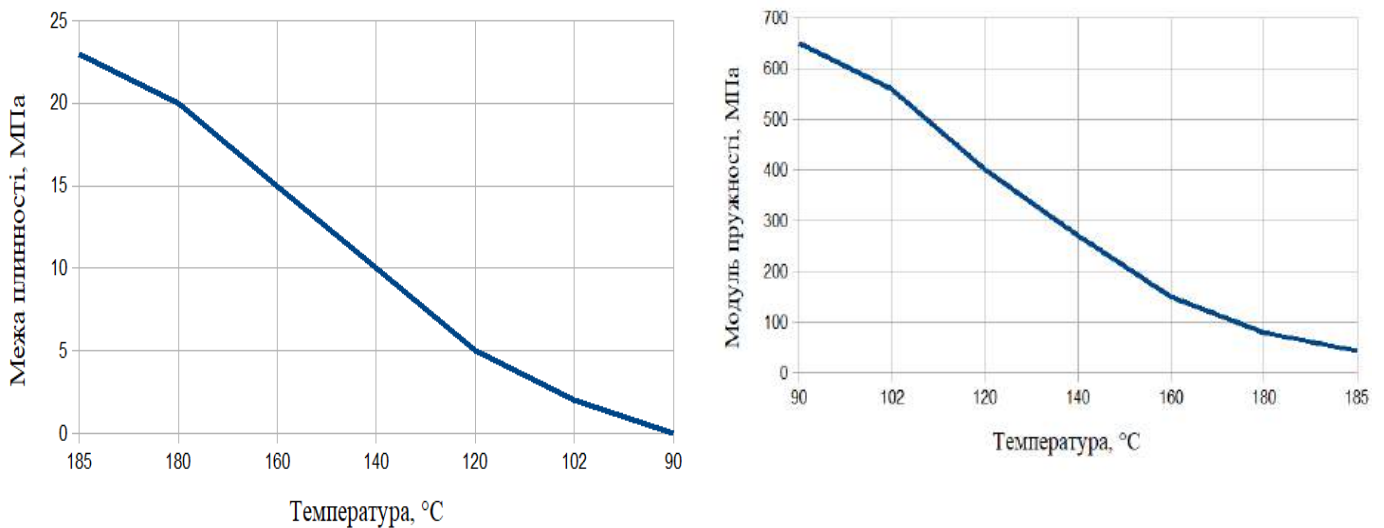


Рисунок 2.17 – Механічні властивості поліетилену марки П4015

Поліетилен при охолодженні кристалізується, при цьому його теплофізичні властивості значно змінюються в діапазоні температури склування (рис. 1.6, 1.7, 2.19).

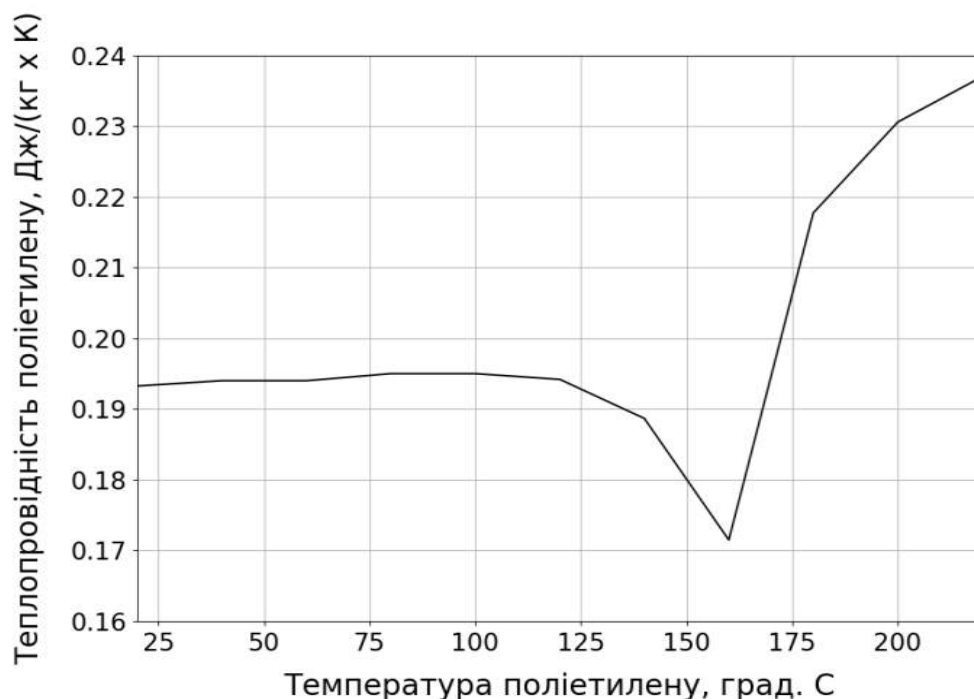


Рисунок 2.19 – Теплопровідність поліетилену в залежності від температури

Програму розрахунку складену у програмі Python 3.12 наведено у додатку Б. Проведено чисельні експерименти, результати яких наведено на рис. 2.20 та в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Зміна температури на внутрішній стороні стінки, що калібрується (обчислювальний експеримент)

$x_i$ , м	$T_i$ , °C
0,000024	209,991
0,0006	209,812
0,0012	206,222
0,001464	199,492
0,0018	180,405
0,00204	153,054
0,00228	103,203
0,0024	74,042

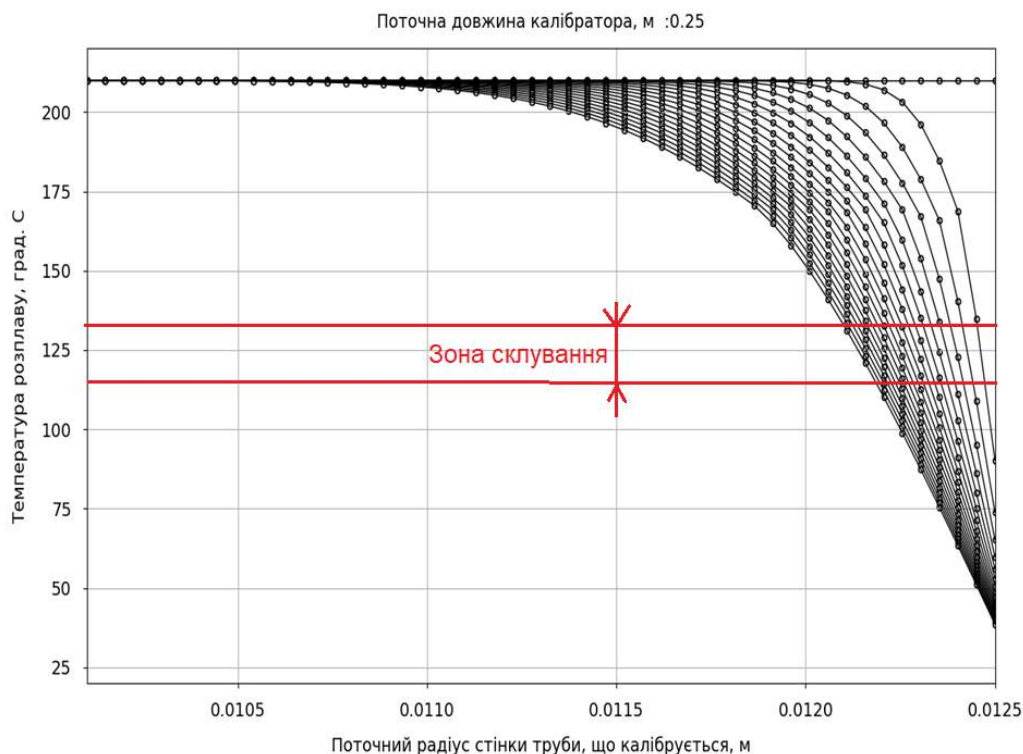


Рисунок 2.20 – Температурні поля в перерізі на 2 секунді перебування труби в калібраторі в результаті обчислювального експерименту

Проведено імітаційне моделювання у програмному пакеті SolidWorks з використанням модуля Flow Simulation за умовами обчислювального експерименту, результати якого зображені на рисунках 2.21-2.22 та наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Результати імітаційного експерименту (значення температур на поверхні трубної заготовки та координати поточної довжини калібрувальної гільзи)

$x_i$ , м	$T_i$ , °C
0,000024	209,9929636
0,0006	209,8328994
0,0012	206,8413566
0,001464	200,9360006
0,0018	182,281494
0,00204	152,5834907
0,00228	109,2201458
0,0024	73,58516688

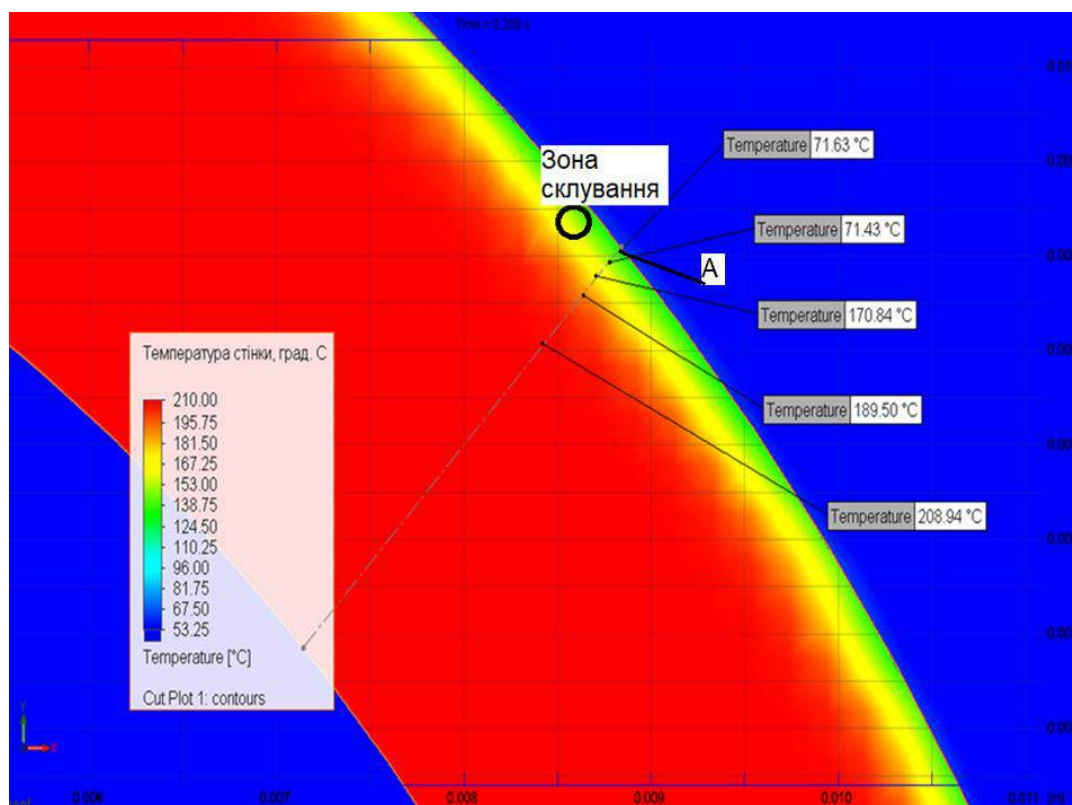


Рисунок 2.21 - Температурні поля в перерізі на 0,2 секунді дослід (відповідає 1 зоні)

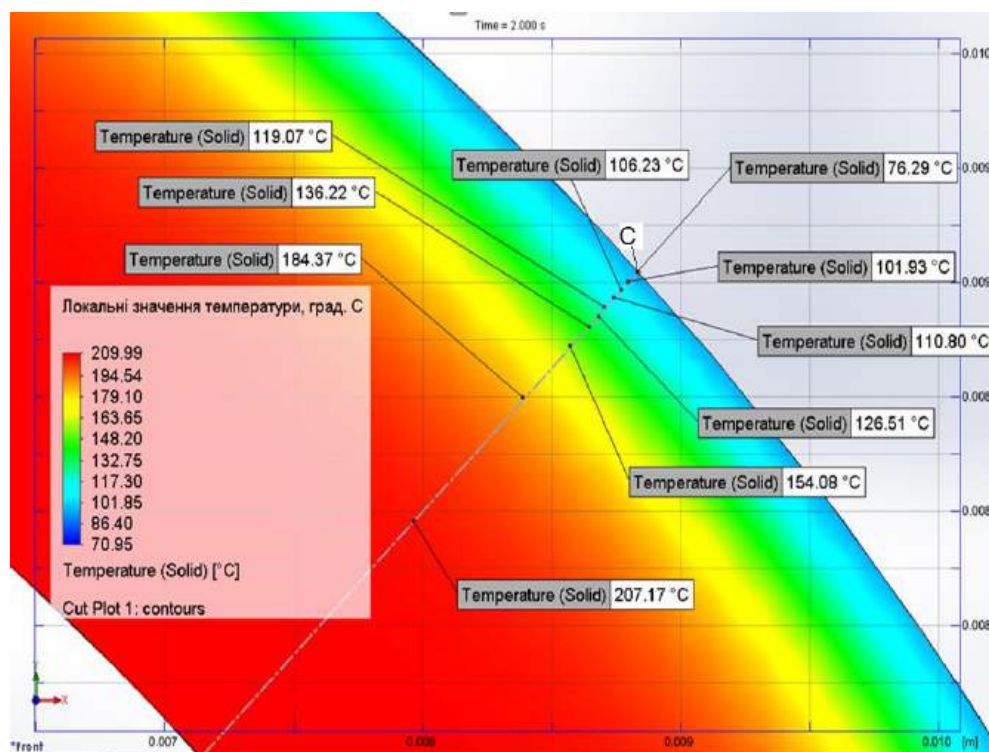


Рисунок 2.22 - Температурні поля в перерізі на 2 секунді дослід (відповідає поточній довжині калібру 0,25 й знаходиться в 3 зоні)

В таблицях 2.2 та 2.3 наведена вибірка з десяти точок за однакових радіусів перерізу при проходженні трубної заготовки калібратора на 2 секунді. Результати отриманих температурних полів зображують швидкість охолодження в перерізі трубної заготовки і вказують на нелінійність характеру температурних полів в ПЕВТ.

Як видно з рисунків 2.20-2.22, перебування трубної заготовки в калібраторі протягом 2 секунд, за термічного опору в 0,2 мм, дозволяє отримати товщину затверділого полімеру в 0,4 мм, при тому що при потраплянні в зону II товщина твердого шару досягала лише 40 мкм.

Також дані моделювання дозволяють визначити зміну товщини твердого шару полімерної трубної заготовки при її проходженні в калібраторі, рисунок 2.23.

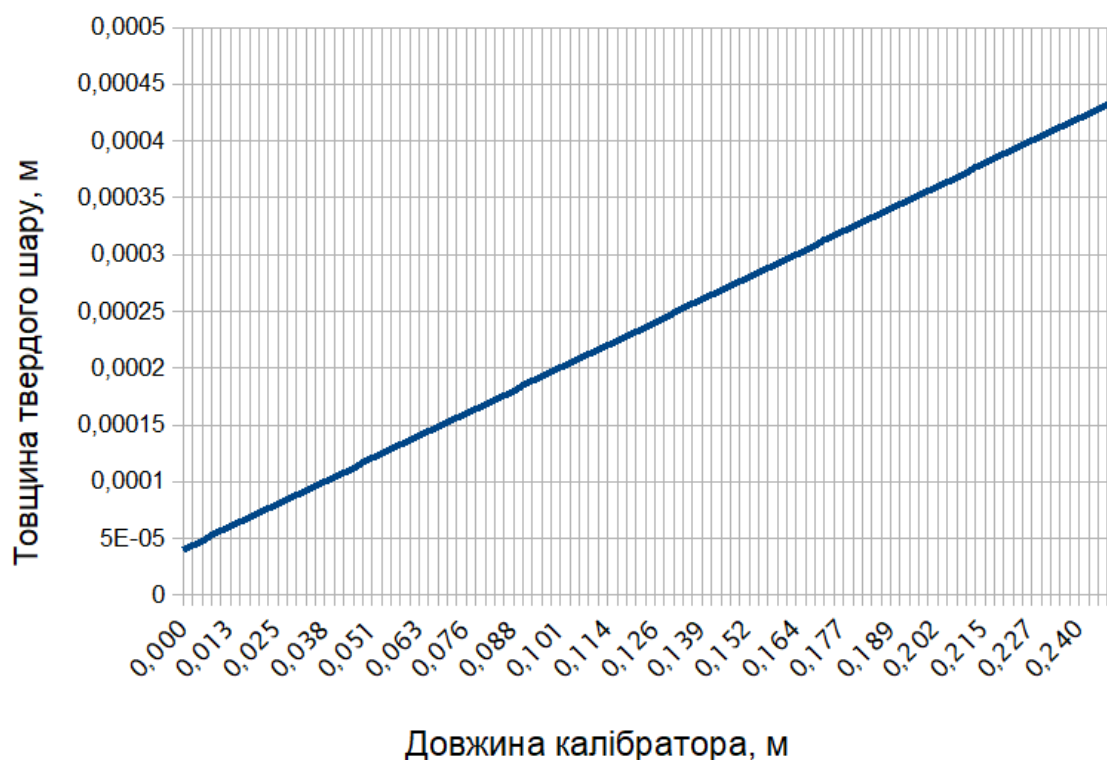


Рисунок 2.23 – Зміна товщини твердого шару трубної заготовки від довжини калібратора (труба 20x2)

Як видно з графіку (рис. 2.23) запропонований підхід до моделювання процесу теплообміну при калібруванні дозволяє підібрати параметри охолодження труби так, що затвердіння матеріалу відбувається поступово, без стрибків по



товщині. Такого результату вдалось досягти при врахуванні зміни усадки (до 10 % від товщини стінки), зміни теплофізичних параметрів та застосуванні адаптивної зміни розрідження, що дозволило забезпечити якісний термічний контакт ( $\Delta < 1$  мм).

## 2.8 Перевірка адекватності математичного опису

Перевірка адекватності математичного опису полягає в порівнянні імітаційних та розрахункових результатів і полягає в розрахунку критерію Фішера [88-89],. F-критерій, або ж критерій Фішера розраховується за формулою:

$$F_{розр} = \frac{S_{ад}^2}{S_{заг}^2} \quad (2.47)$$

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

$S_{заг}^2$  - 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:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y^2}{f_1} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - \hat{y})^2}{n - 2} \quad (2.48)$$

де  $\bar{y}$  - середнє значення експериментальних температур;  $\hat{y}$  - значення температур, отриманих в ході розрахунків;  $n$  - число дослідів (за допомогою SolidWorks'у та нашого числового експерименту було отримано 100 дослідних точок).

$$S_{заг}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{f_2} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1} \quad (2.49)$$

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.

Відповідно до отриманих результатів маємо:

$$S_{ad}^2 = \frac{122762,2442}{100 - 2} = 1252,68$$

$$S_{zag}^2 = \frac{558,266}{100 - 1} = 5,64$$

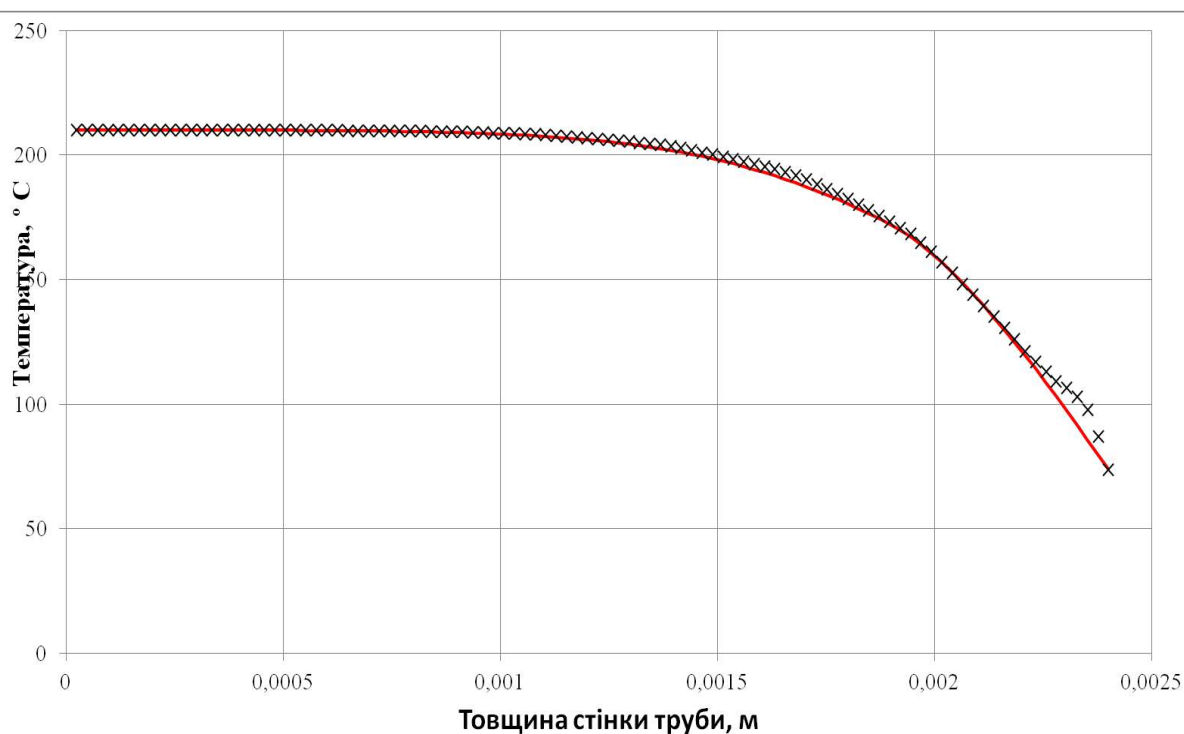
Далі підставивши результати розрахунків у формулу (2.47) отримано розрахунковий критерій Фішера:

$$F_{розр} = \frac{1252,68}{5,64} = 222,143$$

Табличне значення критерію Фішера для  $\alpha = 0,05$ , за наших  $f_1 = 98$  і  $f_2 = 99$ ,  $F_{крит} = 1,3$ .

На рисунку 2.24 зображено порівняння отриманих температурних полів в перерізі трубної заготовки на 2 секунді дослідів.

Оскільки фактичне значення  $F_{розр} > F_{крит}$ , то коефіцієнт детермінації статистично значимий (знайдена оцінка рівняння регресії статистично надійна), і з ймовірністю 95% здатна з вказаною достовірністю спрогнозувати експериментальні результати та описати процес, що свідчить про адекватність математичної моделі, яка аналізувалась, і здатна з вказаною достовірністю спрогнозувати експериментальні результати та описати процес. Це є підтверджено розрахунками.



× – експериментальні значення, — - розрахункові значення

Рисунок 2.24 – Порівняння температурного поля числового та симуляційного експериментів

## Висновки по розділу 2

1. Сформульовано фізичну модель процесу калібрування труб з термопластів яка враховує спосіб перенесення теплоти при охолодженні трубної заготовки в калібраторі, та визначено природу сил, які виникають при цьому.

2. Обґрунтовано умови процесу теплообміну з контрольованим термічним опором при контакті труби та робочій поверхні калібрувальної гільзи при заданій динаміці процесу склування термопласту, що дозволить збільшити продуктивність виготовлення труб при збереженні якості виробів.

3. Доповнено математичну модель процесу нестационарного теплообміну шляхом урахуванням аномальної зміни теплофізичних параметрів полімерів у діапазоні температур стінки трубної заготовки за яких відбувається склування термопласту.

4. Обґрунтовано зміну розрідження в робочих комірках калібратора для забезпечення заданого термічного опору рухомої труби зі стінкою калібратора, необхідного для ефективного теплообміну та мінімізації сили тертя, щоб знизити ризик розриву труби.

5. Запропоновано методику аналітичного розрахунку зусилля протягування трубної заготовки через калібратор, який забезпечує стабільний теплообмін та задані фізико-механічні властивості виробів.

6. Проведено обчислювальний експеримент для визначення впливу на температурні поля в стінці трубної заготовки при охолодженні в калібраторі за різних швидкостей руху труби та різних значень термічного опору, що дозволяє визначити інтенсивність процесу склування, а отже і раціональні параметри проведення процесу охолодження.

## **РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КАЛІБРУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕПЛООБМІНУ**

Мета експериментальних досліджень полягає у перевірці положень фізичної моделі та математичного опису багатofакторних процесів перенесення в калібраторі із застосуванням контрольованого розрідження.

### **3.1. Комплексна методика експериментальних досліджень**

Проведення дослідів передбачало виготовлення гладких труб з поліетилену та поліпропілену з використанням зовнішнього калібрування з розрідженням та водяним охолодженням.

#### ***3.1.1 Вимірювання параметрів електродвигунів дослідної установки***

Вимірювання частоти обертання валу електродвигуна постійного струму типу П–32 потужністю  $N = 1$  кВт у складі приводу тягнучого пристрою проводився тахогенератором типу ТМГ–30П ( $n_{\max} = 4000$  об/хв.), що має клас точності 2,5, з похибкою відображення не більше 1 %.

Витрати потужності трифазного короткозамкнутого електродвигуна приводу ротора типу АО2–42–4 ( $N_d = 7,5$  кВт,  $n = 1450$  об/хв.) записувалась самозаписуючим трифазним 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 для подачі води визначалась непрямим методом шляхом вимірювання струму самозаписуючим амперметром типу Н–370 (межа вимірюваного струму до 5А при  $V = 50\text{mV}$ , клас точності 1,5) та напруги – вольтметром типу Н–372 (межа вимірюваної напруги до 500V, клас точності 1,5).

### ***3.1.2 Вимірювання температури розплаву полімера***

Температура розплаву полімеру в формуючій головці екструдера вимірювалась гребінчастими термопарами типу ХК, розташованих в тефлоновому кільці, що встановлено в матриці так, що приблизно половина гарячого спаю термопари омивалась розплавом полімеру та записувалась за допомогою автоматичного потенціометра типу 149-100R (клас точності 0,5; група ХК, шкала 273...473 К (0...200°C)).

Перед встановленням в головку, матриця разом з термопарами була проградуїрована до 473 К в термостаті типу ТС-15М, заповненому маслом марки «циліндрове-6».

Така конструкція необхідна для забезпечення подачі охолоджувальної рідини з необхідною швидкістю, що забезпечить швидке утворення твердого шару.

Для визначення температури заготовки на виході з калібратора використовувався тепловізор, що встановлено в мобільний телефон Blackview BV9800 Pro, FLIR Lepton. Ціна поділки 0,1 °C.

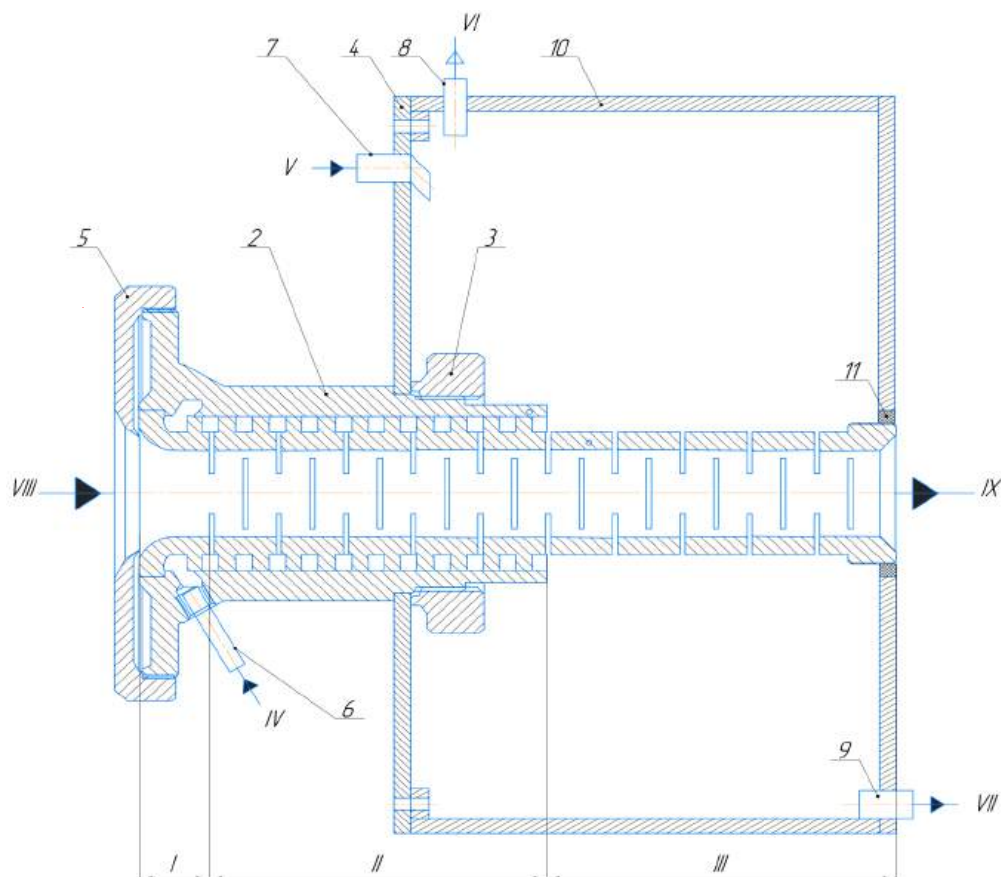
### ***3.1.3 Конструкції калібрувального пристрою при виробництві труб з термопластів***

При калібруванні під розрідженням трубна заготовка в першій зоні притискається до поверхні калібрувальної гільзи внутрішнім атмосферним тиском. При входженні в другу зону трубна заготовка притискається до гільзи розрідженням, що передається через перфорацію в гільзі, які оформлено у вигляді щілин (прорізів) або отворів в стінці гільзи, (рис. 3.1).

Така конструкція калібратора дозволяє:

- в разі збільшення швидкості протягування труби з термопластів в калібрувальному пристрої при екструзії використовувати контрольований тиск розрідження і інтенсифікувати гідродинамічний режим охолодження калібрувальної гільзи для зменшення термічного опору в процесі перенесення тепла від труби, що

калібрується, до охолоджувальної рідини;



I-III – зони калібрування; IV – вхід охолоджувальної рідини; V – вхід додаткової охолоджувальної рідини; VI – вихід повітря (утворення розрідження у ванній); VII – вихід охолоджувальної рідини; VIII – вхід трубної заготовки; IX – вихід трубної заготовки

1 – калібрувальна гільза; 2 – з'єднувальний корпус; 3 – гайка;

4 – фланець; 5 – притискач; 6 – патрубок для подачі охолоджувальної рідини в I і II зони калібратора; 7 – патрубок для подачі додаткової охолоджувальної рідини до вакуумної ванни; 8 – патрубок для з'єднання з вакуум-насосом;

9 – патрубок для відведення охолоджувальної рідини з вакуумної ванної;

10 – вакуумна ванна охолодження; 11 – гумовий ущільнювач

Рисунок 3.1 – Технічна ідея конструкції калібрувального пристрою для гладких труб з композицій поліетилену [90]

– забезпечити якісне початкове охолодження, оскільки попереднє охолодження трубної заготовки шляхом поливу, занурення або зрошення для деяких типів полімеру (вчасності поліетилену) не може бути використано через дефекти, які виникають на поверхні.

Також наведена конструкція калібрувальної гільзи найбільш ефективна з тієї позиції, що швидкість протягування є незмінною.

Для регулювання витрат води, раз на 20 хвилин проводилась перевірка температури трубної заготовки за допомогою тепловізора, і, якщо та не була в межах  $\pm 6$  К від температури на виході з калібратора, то в ручному режимі збільшувалась швидкість подачі рідини.

Для регулювання швидкості протягування тягнучим пристроєм використовувався перетворювач частоти SINUS N. За необхідності, в ручному режимі, збільшувались або зменшувались параметри роботи пристрою, однак при проведенні експерименту регулювання відбувалось в автономному режимі.

### ***3.1.4. Вимірювання розрідження в камерах калібратора***

Для вимірювання розрідження в гільзі калібра використовується мановакуумметр МВПЗ-у2. Матеріал – сталь. Діапазон вимірювання від - 0,1...0,06 МПа. Степінь захисту IP40. Клас точності 1,5. Штуцер розташовано знизу, різьба штуцера М20х1,5. Матеріал механізму – латунь. ТУ 25-05-1664-74. Ціна поділки 0,005МПа.

Під час проведення дослідів проводилась 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 повітрям.

За допомогою реле на вакуум-насосі виставлялось раніше виявлене експериментально при пробних запусках розрідження, за якого, після проходження



трубного профілю калібратора, візуально стінка не мала дефектів й не було обривів при тестовому виготовленні.

### ***3.1.5. Визначення зусилля протягування трубної заготовки через калібратор***

Для вимірювання зусилля протягування полімерної заготовки через калібр використовується динамометр PROTESTER WDF-300. Матеріал – сталь. Діапазон вимірювання від 0 до 300 Н. Ціна поділки 0,1.

### ***3.1.6 Вимірювання продуктивності по готовій продукції***

Час відбору матеріалу вимірювався електронним секундоміром типу ИВПР–203М, з базовою похибкою вимірюваних величин  $\pm 1$  мс в діапазон температур від 278 К до 308 К.

Масу готової продукції зважували на електронних вагах Domotec Ms-400 з точністю вимірювання  $\pm 1$  г, й з максимальною вимірювальною масою 10 кг.

### ***3.1.7. Визначення витрат та температури охолоджувальної рідини***

Визначення об'єму відбувалось за допомогою мірного скляного стакану на 500 мл 2-ого класу точності з ціною поділки 25 мл, і припустимою похибкою вимірювання  $\pm 12,5$  мл.

Температура води визначалась за допомогою електронного цифрового термометра з виносним датчиком, який працює в діапазоні 223...383 К ( - 50...110 °С), з точністю 0,1 К й припустимою похибкою в  $\pm 1$  К.

## **3.2. Основні характеристики полімерів**

Для проведення експериментів обрано найбільш поширений у виробництві поліетилен високої густини (низького тиску) марки HXF-4810H від фірми

КарпатНафтохім у вигляді гранул білого кольору з усередненим діаметром 5 мм (рисунок 3.2) [91].

Фізико-механічні характеристики поліетилену марки HXF-4810H:

- показник текучості розчину (ПТР), при 211,8Н, г/(10хв): 8-12;
- відношення ПТР<sub>21,6</sub>/ПТР<sub>5,0</sub>: 18-33;
- густина, кг/м<sup>3</sup> 0,946-0,950;
- границя текучості при розтягуванні, МПа: 18;
- міцність при розриві, МПа: 30;
- відносне видовження при розриві, %: 550;
- модуль еластичності, МПа: 750.



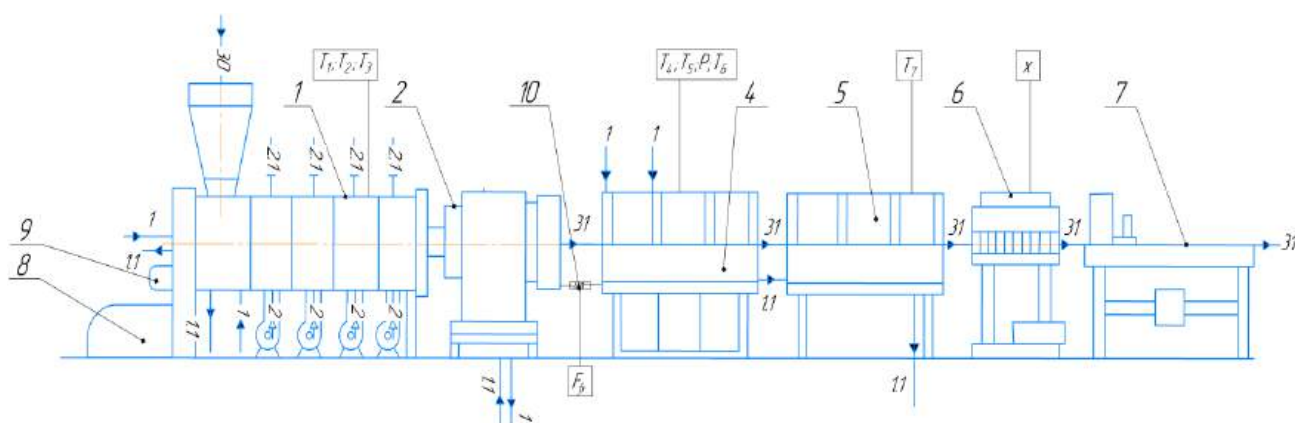
Рисунок 3.2– Гранули ПНТ марки HXF-4810H фірми КарпатНафтохім [91]

### 3.3. Опис експериментальної установки

Досліди проводились на лінії для виробництва полімерних труб малого діаметра із встановленням калібратора для вакуумного зовнішнього калібрування з бронзи, рисунок 3.3.

Гранули полімеру подаються до екструдера 1, де вони, проходячи кожну з зон екструдера (в кожній з яких за допомогою термопар відбувається вимірювання температури розплаву), плавляться та перемішуються. За допомогою тахогенератора (8, ТГ) визначається число обертів черв'яка.

Потім розплав термопласту потрапляє в формуючу головку 2, де відбувається формування під тиском трубного профілю та первинне формування. Для забезпечення мінімального виникнення дефектів на поверхні трубного профілю, відстань від формуючої головки до калібратора 3 робиться невеликою (в проведених дослідженнях відстань була 30 мм). В ванні калібратора вимірювались температура розплаву та тиск. По закінченню проходження калібрувальної гільзи, трубний профіль потрапляє до ванни охолодження 4, заповненої водою температура, якої вимірювалась за допомогою електронного цифрового термометра.



1 - вода; 1.1 – нагріта вода; 2 – повітря; 2.1 – нагріте повітря; 30 – гранули полімеру; 31 – трубна заготовка

1 - екструдер; 2 - формуюча головка; 3 - калібратор; 4 - ванна охолодження; 5 - тягнучий пристрій; 6 - різальний пристрій;

7 – трубна заготовка; 8 – двигун екструдера; 9 – тахогенератор;

10 - динамометр

Рисунок 3.3 – Експериментальна установка для дослідження процесу калібрування труб з термопласту

На виході з ванни трубна заготовка надходить до тягнучого пристрою 5, який

виконує дві функції: протягує через калібратор, тим самим допомагаючи формувати майбутню продукцію, та подає трубну заготовку до різального пристрою 6, де відбувається відмірювання, відрізання і фасування продукції до подальшого транспортування й охолодження.

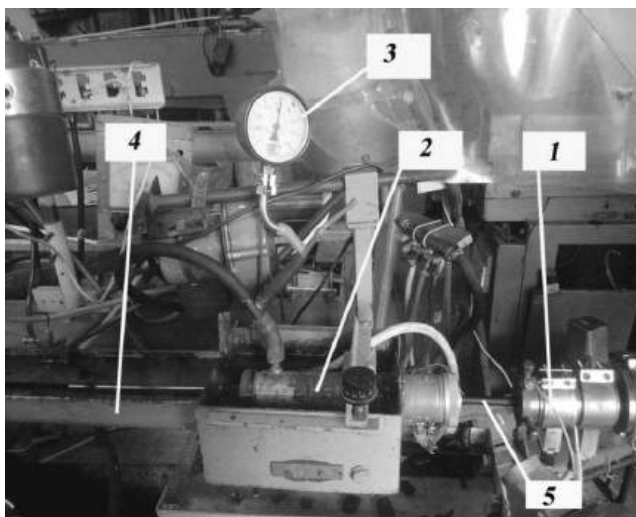
Відбір проб для дослідження отриманої продукції здійснювався після різального пристрою. За деякий проміжок часу бралась проба продукції і зважувалась, після чого відправлялась на остаточне охолодження.

Витрата води вимірювалась окремо на вході та виході. В обох випадках засікався час наповнення мірного стакану.

При проведенні експериментальних досліджень проводилось безперервне вимірювання:

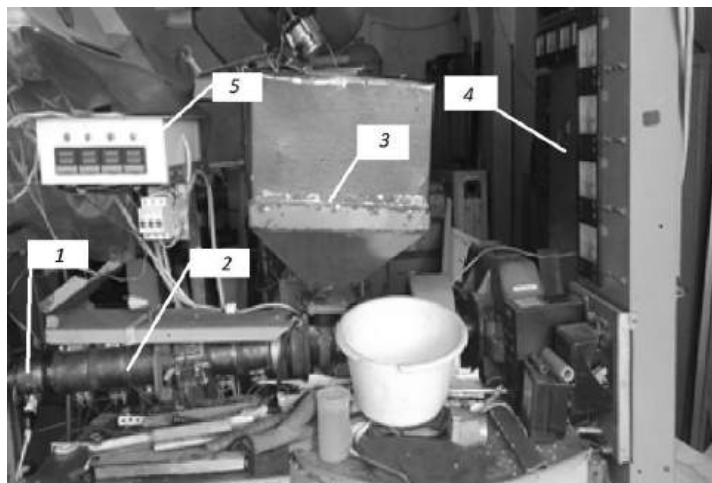
- температури в зоні формування плаву екструдера, °С;
- значення середнього розрідження в калібраторі, МПа;
- зусилля протягування, кг

На рисунках 3.4-3.7 показано зовнішній вид трубної лінії.



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

Рисунок 3.4 – Експериментальна установка



1 – формуюча головка; 2 – екструдер; 3 – бункер подачі гранул до екструдера;  
4 – позонний температурний контролер екструдера; 5 – цифровий  
потенціометр для вимірювання температури плаву в екструдері

Рисунок 3.5 – Експериментальний екструдер



Рисунок 3.6 – Фотографія термопари  
для вимірювання температури плаву в  
екструдері



Рисунок 3.7 – Мановакуумметр  
для вимірювання розрідження в  
камері калібратора

У таблиці 3.1 надано технічну характеристику експериментальної трубної лінії.

Таблиця 3.1 – Технічна характеристика експериментальної трубної лінії

Найменування параметра	Показник
Перероблюваний матеріал	Поліетилен високої густини марки HXF-4810H
Максимальна продуктивність лінії, кг/год	40
Частота обертання черв'яка, об/хв.	20-200
Опір формуючої головки, МПа	2,0–7,0
Встановлена потужність, кВт:	11,2
– шнекового дозатора	0,2
– черв'ячного екструдера	7,5
– нагрівачів	3,5
Довжина калібрувальної гільзи, м	0,22
Швидкість калібрування, м/хв.	3
Витрати охолоджувальної рідини (води), кг/с	0,083
Початкова температура води на вході в калібратор і охолоджувальну ванну, К (°C)	293-294 (20-21)
Температура на виході з калібратора (до вакуумної камери), К (°C)	297 (24)
Температура на виході з калібратора (після вакуумної камери), К (°C)	311-312 (38-39)
Кінцева температура води на виході з охолоджувальної ванни, К (°C)	324-327 (41-44)

### 3.3.1 Тепловий розрахунок калібратора

Мета розрахунку – визначення геометричних параметрів калібрувальної гільзи, що задовільняє умовам проведення дослідів.

Вихідні данні:

Початкова температура охолоджувальної води,  $t_{1B}$ , °C (K)

20 (293)

Кінцева температура охолоджувальної води, $t_{2B}$ , °C (K)	38 (311)
Температура трубної заготовки на вході в каліббратора, $t_{1П}$ , °C (K)	200 (473)
Температура трубної заготовки на виході з каліббратора, $t_{2П}$ , °C (K)	80 (353)
Температура склування полімеру, $t_{СК}$ , °C (K)	125 (398)

Розрахунок геометричних розмірів каліббратора І зони

Розраховуємо середню температуру води, °C:

$$t_{cp1} = \frac{t_{1B} + t_{2B}}{2} = \frac{20 + 38}{2} = 29$$

Визначимо основні параметри води за даної температури (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 Теплофізичні властивості води при середній температурі 29 °C [92]

Параметр	Вода
$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	995
$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$	4174
$\mu \times 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	801,5
$\lambda \times 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$	61,8

Охолоджувальна вода проходить через гвинтовий канал на зовнішній поверхні каліббратора (рисунок 3.8)

Висота і ширина каналу дорівнює, м:

$$h = b = 6 \cdot 10^{-3}$$

Для визначення площі теплообміну в зоні І визначаємо швидкість руху охолоджувальної води, м/с:

$$w = \frac{G}{b \cdot h} = \frac{\frac{5}{60} \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}} = 2,31,$$

де  $G$  - витрати води, кг/с;

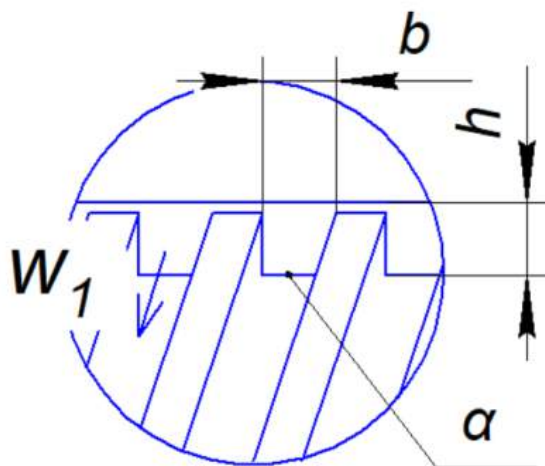


Рисунок 3.8— Схема руху охолоджувальної води в каналах калібратора зони I.

Розраховуємо критерій Рейнольдса для води [93]:

$$Re = \frac{w d_{ecv}}{\nu} = \frac{2,31 \cdot 0,012}{1,002 \cdot 10^{-6}} = 27665,$$

де  $d_{ecv}$  – еквівалентний діаметр, м;

$$d_{ecv} = \frac{4F}{\Pi} = \frac{4b \cdot h}{(2b + 2h)} = \frac{4 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{2(6 + 6) \cdot 10^{-3}} = 0,012;$$

$F$  – площа перерізу каналу, м<sup>2</sup>;  $\Pi$  – периметр перерізу каналу, м;  $\nu$  – кінематична в'язкість води, м<sup>2</sup>/с.

Критерій Прандтля:

$$Pr = \frac{C\mu}{\lambda} = \frac{4174 \cdot 810,5 \cdot 10^{-6}}{61,8 \cdot 10^{-3}} = 54,74$$

де  $C$  - теплоємність води, Дж/кг;  $\mu$  - динамічна в'язкість води, Па·с;



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

Критерій Нуссельта [94]:

$$Nu = 0,021 \cdot (Re)^{0,8} \cdot (Pr)^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_{st}} \right)^{0,25} = 0,021 \cdot (27665)^{0,8} \cdot (54,74)^{0,43} (1,1)^{0,25} = 428$$

де  $Pr$  - критерій Прандтля при середній температурі води;  
 $Pr_{st}$  - критерій Прандтля для води при температурі стінки.

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до води, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_2 = Nu \frac{\lambda}{d_{ev}} = 428 \cdot \frac{61,8 \cdot 10^{-3}}{0,012} = 2204,2$$

При цьому з методики, наведеної в [95, 96]:

- більша різниця температур

$$\Delta t_{\bar{o}} = 200 - 20 = 180^\circ C;$$

- менша різниця температур

$$\Delta t_m = 80 - 38 = 42^\circ C.$$

Оскільки  $\Delta t_{\bar{o}} / \Delta t_m = 4,3$  середня різниця температур визначається за формулою:

$$\Delta t_{cep} = \frac{\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_m}{\ln \left( \frac{\Delta t_{\bar{o}}}{\Delta t_m} \right)} = \frac{180 - 42}{\ln \left( \frac{180}{42} \right)} = 94,5^\circ C.$$

Середня температура полімеру:

$$t_{cp2} = t_{cp1} + \Delta t_{cep} = 123,5^\circ C.$$

Температури полімеру на вході та виході з певної зони, беруться з розрахунків, що проведені в розділі 2 (пп. 2.7).

Розрахунок теплового навантаження для зони I, кВт:

$$Q_1 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)WC_{n(t)}(T_{nl} - T_k)\rho_{n(t)} =$$

$$= \frac{\pi}{4}(0,025^2 - (0,025 - 0,00006)^2) \cdot 0,05 \cdot 2,3 \cdot (200 - 175) \cdot 799,8 = 0,0054$$

де  $D$  - зовнішній діаметр трубної заготовки, м;  $d = D - 2\delta$  - діаметр затверділого шару трубної заготовки, м,  $\delta$  - товщина твердого шару полімеру, м (згідно з п.2.7);  $W$  - швидкість виготовлення (протягування) трубної заготовки через калібратор, м/с;  $C_{n(t)} = 2,3$  - теплоємність полімеру за температури  $175^\circ\text{C}$ , кДж/кг;  $\rho_{n(t)} = 799,8$  - густина полімеру за температури  $175^\circ\text{C}$ , кг/м<sup>3</sup>;  $T_{nl}$  - температура плаву на вході в зону 1,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_k$  - температура полімеру на виході з зони 1,  $^\circ\text{C}$

Тоді термічний опір для зони I, (м<sup>2</sup>·К)/Вт:

$$R_I = \frac{\delta_{ПЛ}}{\lambda_{ПЛ}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{0,003}{0,215} + \frac{0,006}{105} + \frac{1}{2204,2} = 0,0145$$

Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K = \frac{1}{R_I} = \frac{1}{0,0145} = 68,97.$$

Тоді площа поверхні теплообміну для зони 1, м<sup>2</sup>:

$$F_I = \frac{Q_1}{K \cdot \Delta t_{сер}} = \frac{5,4}{68,97 \cdot 94,5} = 0,00083.$$

Тоді довжина зони 1 визначається, м:

$$L_I = \frac{F_I}{\pi \cdot D} = \frac{0,00083}{\pi \cdot 0,025} = 0,0105$$

Розрахунок теплового навантаження для зони II, кВт:

$$Q_2 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)WC_{n(t)}(T_{nl} - T_k)\rho_{n(t)} =$$

$$= \frac{\pi}{4}(0,025^2 - (0,025 - 0,00015)^2) \cdot 0,05 \cdot 2,36 \cdot (175 - 125) \cdot 825 = 0,029$$

де  $C_{n(t)} = 2,36$  - теплоємність полімеру за температури  $125^\circ\text{C}$ , кДж/кг;  
 $\rho_{n(t)} = 825$  - густина полімеру за температури  $125^\circ\text{C}$ , кг/м<sup>3</sup>;  
 $T_{nl}$  - температура розплаву на вході в зону II,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_k$  - температура полімеру на виході з зони 2,  $^\circ\text{C}$

Приймаємо припущення, що величина повітряного зазору між стінкою калібратора та трубною заготовкою по довжині зони II  $\delta_{нов}$  змінюється від 0 до 0.00012 м. Тоді термічний опір для зони II, (м<sup>2</sup>·К)/Вт:

$$R''_{II}(\delta_{нов} = 0) = \frac{\delta_{ПЛ}}{\lambda_{ПЛ}} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_2} =$$

$$= \frac{0,0025}{0,215} + \frac{0,0005}{0,221} + \frac{0}{0,025} + \frac{0,006}{105} + \frac{1}{2204,2} = 0,014$$

$$R'_{II}(\delta_{нов} = 0,00012) = \frac{\delta_{ПЛ}}{\lambda_{ПЛ}} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_2} =$$

$$= \frac{0,002}{0,215} + \frac{0,001}{0,221} + \frac{0,00012}{0,025} + \frac{0,006}{105} + \frac{1}{2204,2} = 0,019$$

Середній термічний опір по зоні II дорівнює, (м<sup>2</sup>·К)/Вт:

$$R_{II} = \frac{(R'_{II} + R''_{II})}{2} = \frac{(0,014 + 0,019)}{2} = 0,0165$$

Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K = \frac{1}{R_{II}} = \frac{1}{0,0165} = 60,61.$$

При цьому площа поверхні дорівнює, м<sup>2</sup>:

$$F_{II} = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{сер}} = \frac{29}{60,61 \cdot 94,5} = 0,0051.$$

Тоді довжина зони II, м:

$$L_{II} = \frac{F_{II}}{\pi \cdot D} = \frac{0,0051}{\pi \cdot 0,025} = 0,065.$$

Довжина гвинтової нарізки, м:

$$\begin{aligned} L_G &= (l^2 + (\pi \frac{(D+h)l}{s})^2)^{0,5} = \\ &= (0,0755^2 + (\pi \frac{(25 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-3})0,0755}{2 \cdot 6 \cdot 10^{-3}})^2)^{0,5} = 0,617 \end{aligned}$$

де  $l = L_I + L_{II} = 0,0105 + 0,065 = 0,0755$  – частина довжини калібрувальної гільзи на якій розташована гвинтова нарізка, м;  $D$  – зовнішній діаметр калібратора, м;  $s=2b$  – крок гвинтової нарізки, м.

Кількість витків,

$$n = \frac{l}{s} = \frac{0,0755}{2 \cdot 6 \cdot 10^{-3}} = 6,3 \approx 7.$$

Розрахунок теплового навантаження для зони III, кВт:

$$\begin{aligned} Q_3 &= \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) W C_{n(t)} (T_{nl} - T_{\kappa}) \rho_{n(t)} = \\ &= \frac{\pi}{4} (0,025^2 - (0,025 - 0,0003)^2) \cdot 0,05 \cdot 2,13 \cdot (125 - 80) \cdot 974,5 = 0,052 \end{aligned}$$

де  $C_{n(t)} = 2,13$  - теплоємність полімеру за температури  $80^\circ\text{C}$ , кДж/кг;  
 $\rho_{n(t)} = 974,5$  - густина полімеру за температури  $80^\circ\text{C}$ , кг/м<sup>3</sup>;  
 $T_{nl}$  - температура розплаву на вході в зону III,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{\kappa}$  - температура полімеру на виході з зони III,  $^\circ\text{C}$

Приймаємо припущення, що величина повітряного зазору між стінкою калібратора та трубною заготовкою по довжині зони III  $\delta_{нов}$  змінюється від 0,00012 до 0,00024 м. Тоді термічний опір зони III, (м<sup>2</sup>·К)/Вт:

$$R'_{III} = R'_{II} = 0,019$$

$$R_{III}'' (\delta_{нов} = 0,00024) = \frac{\delta_{ПЛ}}{\lambda_{ПЛ}} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_2} =$$

$$= \frac{0,001}{0,221} + \frac{0,002}{0,291} + \frac{0,00024}{0,025} + \frac{0,006}{105} + \frac{1}{2204,2} = 0,022$$

Середній термічний опір по зоні III дорівнює, (м<sup>2</sup>·К)/Вт:

$$R_{III} = \frac{(R_{III}' + R_{III}'')}{2} = \frac{(0,019 + 0,022)}{2} = 0,0205.$$

Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K = \frac{1}{R_{III}} = \frac{1}{0,0205} = 48,78$$

При цьому площа поверхні дорівнюватиме, м<sup>2</sup>:

$$F_{III} = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{сер}} = \frac{52}{48,78 \cdot 94,5} = 0,0113.$$

Тоді довжина зони III, м:

$$L_{III} = \frac{F_{III}}{\pi \cdot D} = \frac{0,0113}{\pi \cdot 0,025} = 0,144.$$

Загальна довжина калібрувальної гільзи, м:

$$L_p = \sum L_i = 0,0105 + 0,065 + 0,144 = 0,2195.$$

Прийнята довжина калібрувальної гільзи 0,25 м.

Запас довжини калібрувальної гільзи

$$\zeta = \frac{|L_p - L_E|}{L_E} \cdot 100\% = \frac{|0,2195 - 0,25|}{0,25} \cdot 100\% = 12,2\%$$

Оскільки різниця між розрахунками та експериментальним калібратором складає 12,2%, що в межах норми, вимірювання температур можна вважати точними. Отже, відповідно до розрахунків, перша вакуумна прорізь знаходилась на відстані 12 мм (1мм – запас). Конструкція такої калібрувальної гільзи зображена на рисунку 3.9.

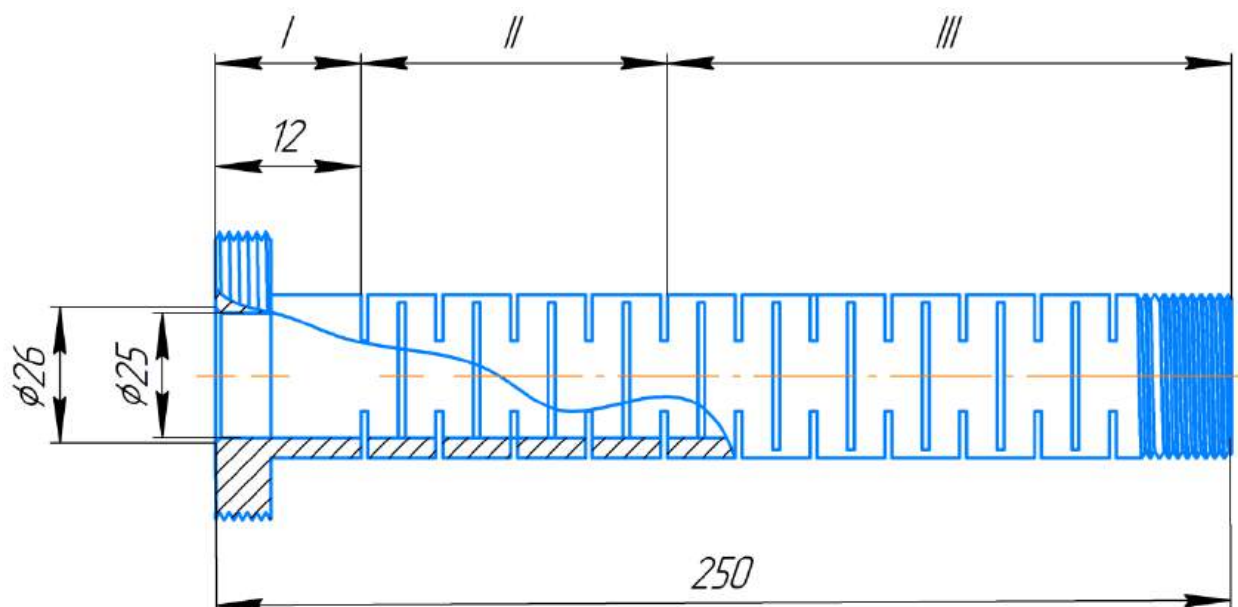


Рисунок 3.9 - Геометричні розміри калібрувальної гільзи, розрахованої за запропонованою моделлю для виготовлення труби з ПЕТ 25х3мм продуктивністю 3,6 кг/год.

### 3.3.2 Розрахунок коефіцієнта перфорації

Мета розрахунку – визначення коефіцієнта перфорації калібрувальної гільзи (рис.3.10).

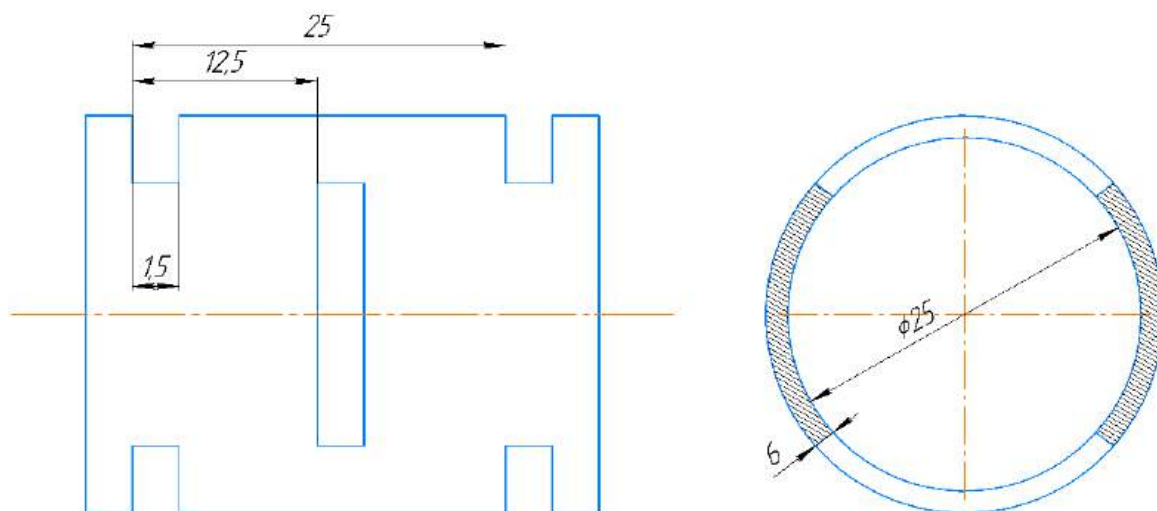


Рисунок 3.10 – Схема перфорації калібрувальної гільзи

Довжина калібрувальної гільзи з перфорацією, розраховується так, м:

$$L_{II} = L_{II} + L_{III} = 0,065 + 0,144 = 0,209$$

Кількість щілин перфорації, на одній стороні:

$$N_{II} = \frac{L_{II}}{t_2} = \frac{0,209}{0,025} = 8,36 \approx 8,$$

де  $t_2 = 0,025$  - крок між щілинами перфорації, що знаходяться на одній стороні, м.

Площа щілини перфорації, м<sup>2</sup>:

$$f_{II} = \frac{\pi R n}{180} k = \frac{\pi \cdot 0,025 \cdot 105}{180} \cdot 0,0015 = 0,000068,$$

де  $n$  - кут між краями щілини;  $k$  - довжина щілини, м.

Коефіцієнт перфорації, %:

$$\varphi = \frac{2 \cdot 2 N_{II} \cdot f_{II}}{(F_{II} + F_{III})} \cdot 100\% = \frac{2 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 0,000068}{(0,0051 + 0,0113)} \cdot 100\% = 13,27.$$

Таким чином, площа щілин перфорації складає 13,27 % від загальної площі теплообміну.

### **3.3.3 Продукт, отриманий з використанням експериментального калібратора**

Дослідження проводилось при швидкості калібрування 0,05 м/с і продуктивності лінії – 10,6 кг/год. Виготовлялась труба діаметра 25 мм, з товщиною стінки 3 мм. Товщина стінки калібрувальної гільзи 6 мм.

За результатами експерименту отримано поліетиленову трубу діаметра 25мм з товщиною стінки 3 мм.

Отриманий зразок має овальність 3,9 %; перепад товщини стінок 2,8 % (таблиця 3.3 та 3.4); гладку поверхню (рисунок 3.11-3.12), без візуальних дефектів, що повністю відповідає діючим вимогам ДСТУ Б В.2.5-32:2007 [97] та ISO [98, 99].

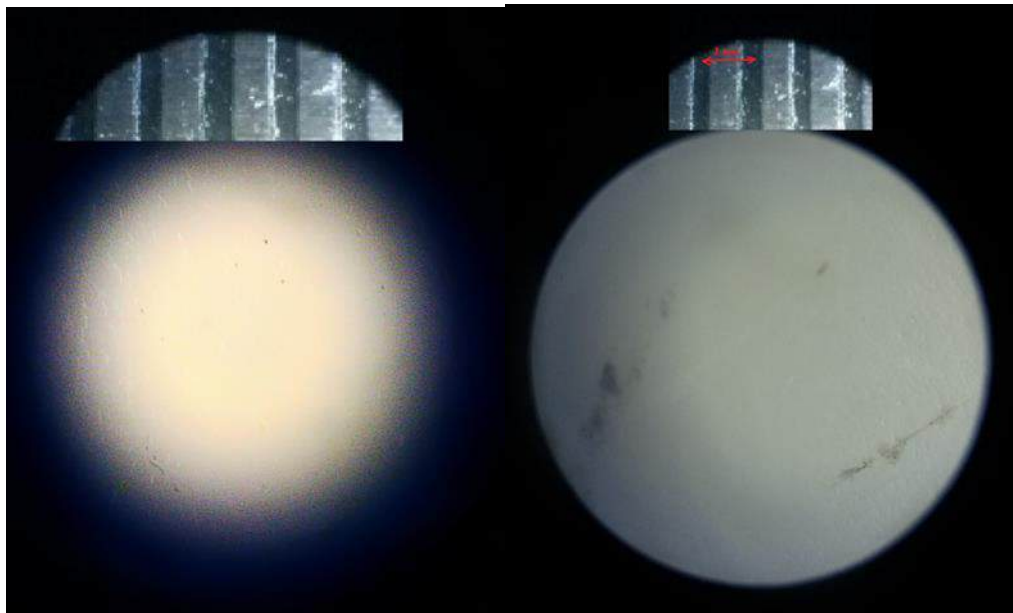


Рисунок 3.11 - Фотографії поверхні отриманої труби під мікроскопом з приближенням  $\times 36$

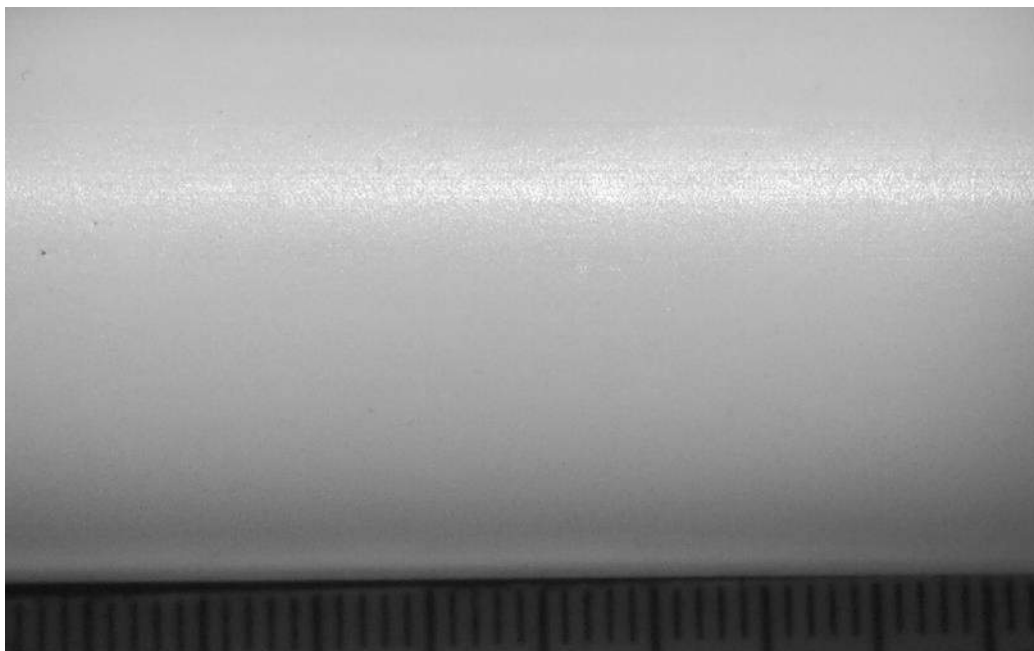






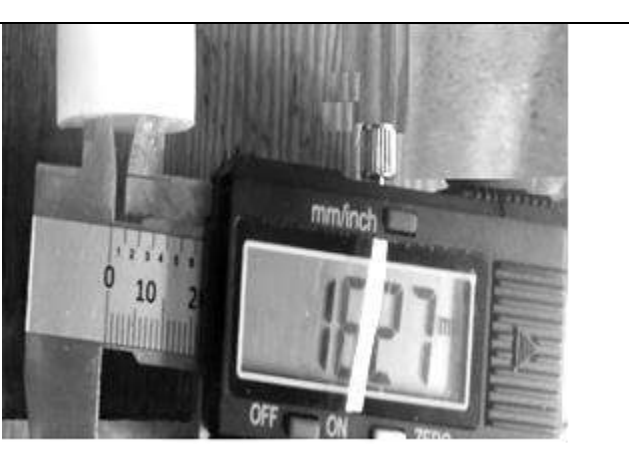



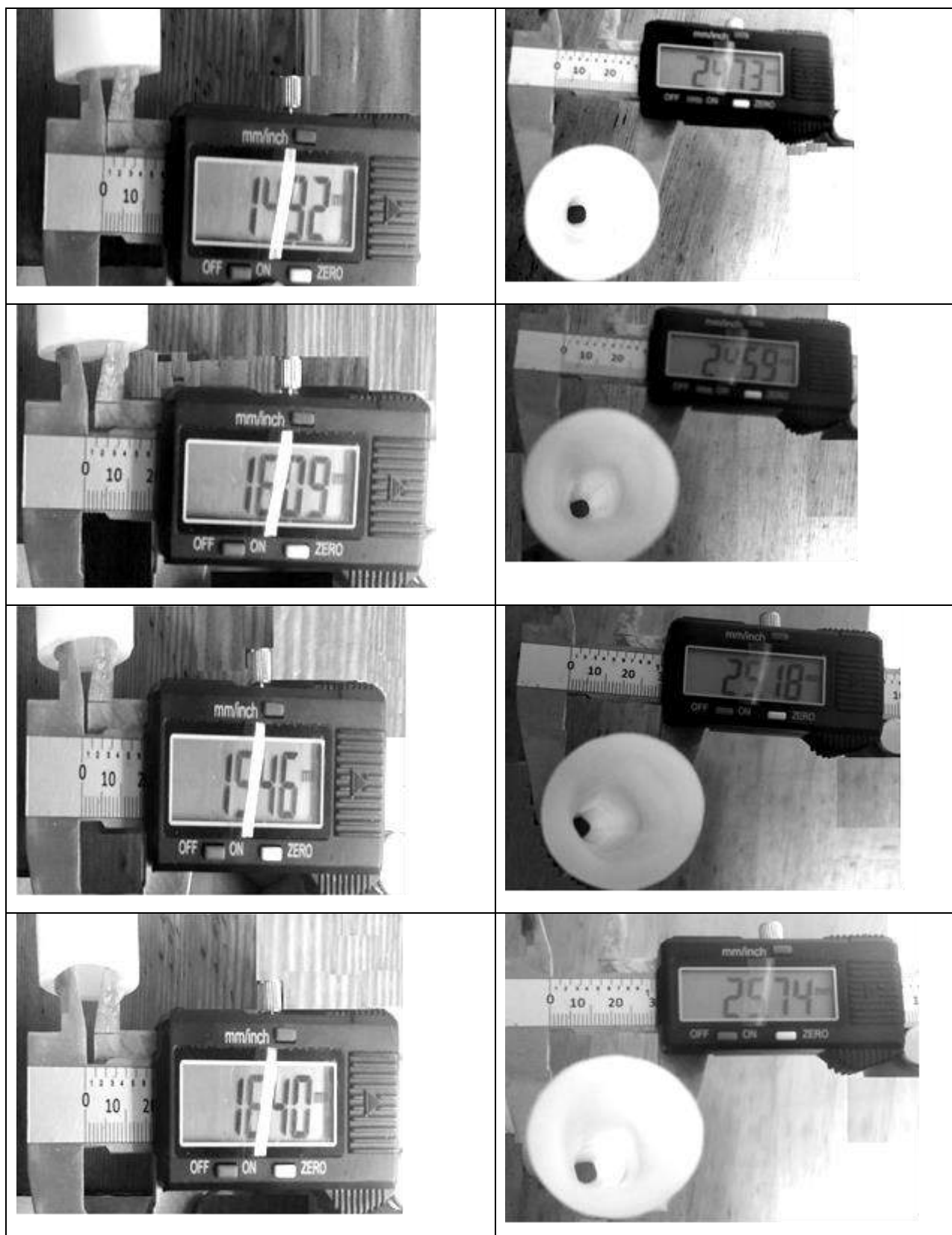
Рисунок 3.12 - Фотографія поверхні труби під звичайною камерою з приближенням  $\times 2.6$ .



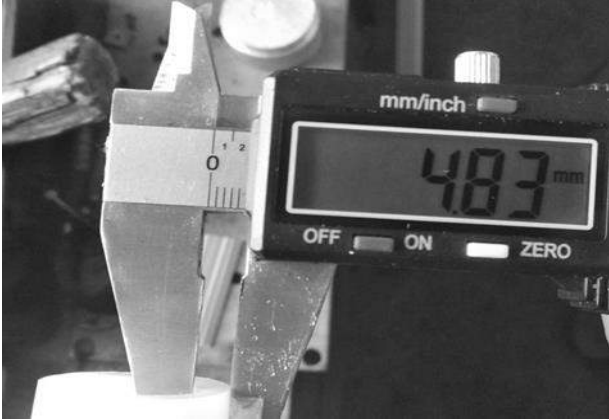






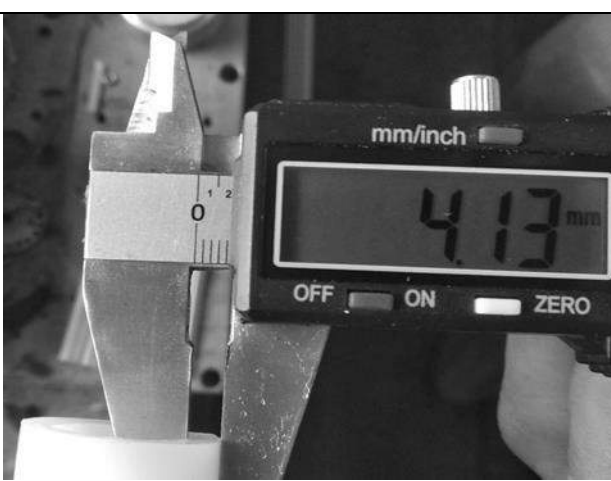
Таблиця 3.3 - Геометрія отриманого зразка труби

Внутрішній діаметр	Зовнішній діаметр
	
	
	
	

Продовження таблиці 3.3



Таблиця 3.4 товщина стінки отриманого зразка труби

Відповідно до даних вимірів, відхилення розмірів занесені у таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 Середні відхилення розмірів

Параметр	Середнє відхилення
Внутрішній діаметр	6%
Зовнішній діаметр	0,4%
Товщина стінки	2,9%

Навіть зважаючи на деякі відхилення, що видно з таблиці 3.3 і 3.4, відповідно до середнього відхилення, отриманий зразок відповідає діючим нормам.

Розрахунок похибки при проведенні натурного експерименту наведено у додатку А.

### 3.3.4. Гідравлічний розрахунок тиску в гвинтовому каналі калібрувальної гільзи

Мета розрахунку – визначення гідравлічного опору калібрувальної гільзи [100-102].

Вхідні дані:

$G_k = 83 \text{ кг/год} = 22,95 \text{ г/с}$  - продуктивність калібратора

$h_k = 0,0015$  - висота каналу, м

$b_k = 0,0015$  - ширина каналу, м

$\lambda = 0,221$  – теплопровідність води за температури  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  [102].

$\rho = 996,65$  – густина води за температури  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$  [102].

$\mu = 0,801 \cdot 10^{-3}$  - в'язкість води за температури  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{Па}\cdot\text{с}$  [102].

Відповідно до розрахунку в розділі 3.3.3 довжина гвинтової нарізки:

$$L_G = 0,617 \text{ м.}$$

Частина довжини калібрувальної гільзи, на якій розташована гвинтова нарізка:

$$l = 0,0755 \text{ м.}$$

Кількість витків:

$$n = \frac{l}{s} = \frac{0,0755}{2 \cdot 6 \cdot 10^{-3}} = 6,3 \approx 7.$$

Крок спіралей:

$$s_1 = s_2 = b + \delta = 0,0015 + 0,0005 = 0,002 \text{ м.}$$

Прийнято радіус напіввитка  $r = 0,0016 \text{ м.}$

Кількість напіввитків спіралі:

$$nk = \left(0,5 - \frac{r}{s_1}\right) + \sqrt{\left(\frac{r}{s_2}\right)^2 + \frac{2l}{\pi \cdot s_2}} = \left(0,5 - \frac{0,0016}{0,002}\right) + \sqrt{\left(\frac{0,0016}{0,002}\right)^2 + \frac{2 \cdot 0,0755}{\pi \cdot 0,002}} = 4,7 \approx 5$$

Коефіцієнт тертя для охолоджувальної рідини:

$$\psi = \frac{0,856}{(\text{Re}_1)^{0,25}} = \frac{0,856}{(13850)^{0,25}} = 0,079.$$

Гідравлічний опір, Па:

$$\Delta P = \psi \frac{lw^2 \rho}{2d_{ekv}} = 0,079 \frac{0,0755 \cdot 7,42^2 \cdot 996,95}{2 \cdot 0,0015} = 30560.$$

### 3.4 Особливості калібрування при виготовленні труб з термопластів

Для калібрувального обладнання перша прорізь робиться на відстані від 10...30 мм, оскільки саме по проходженню такої відстані трубна заготовка під дією сил усадки та гравітації починає відклеюватись від внутрішньої стінки калібрувальної гільзи. Згідно з розрахунками (із запасом) щоб забезпечити якісне охолодження, для труби діаметром 25 мм зона І складає 12 мм, після чого

починається зона II, а після проходження ще 119 мм, - зона III, що йде до кінця калібрувальної гільзи. Такі довжини зон I і II зумовлені наявністю гвинтової нарізки, що дозволяє використовувати асинхронне наростання розрідження (рисунок 3.13), що своєю чергою дозволяє мінімізувати термічний опір між трубною заготовкою та поверхнею стінки калібрувальної гільзи, а також дозволяє контролювати тертя між цими поверхнями.

Через стрімке тепловідведення водою в зонах I і II, на початку зони III потрібно додавати охолоджену воду для достатньої інтенсивності зменшення температури трубної заготовки (до температури меншої ніж 100 °С, а для труб Ø 25 мм - навіть до 80 °С), що забезпечить відсутність утворення пари при контакті труби з водою в рідинній ванні охолодження.

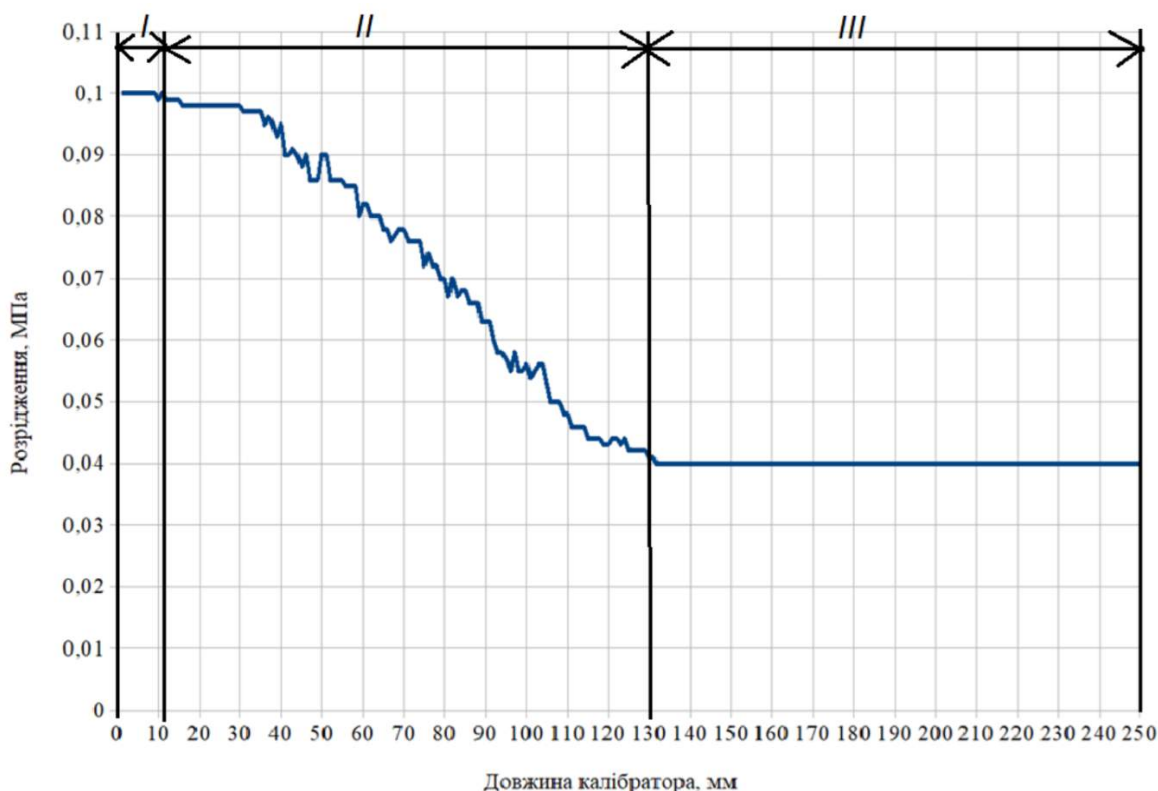


Рисунок 3.13 – Графік зміни розрідження по довжині калібрувальної гільзи

### 3.5. Вибір основних технологічних параметрів калібрування

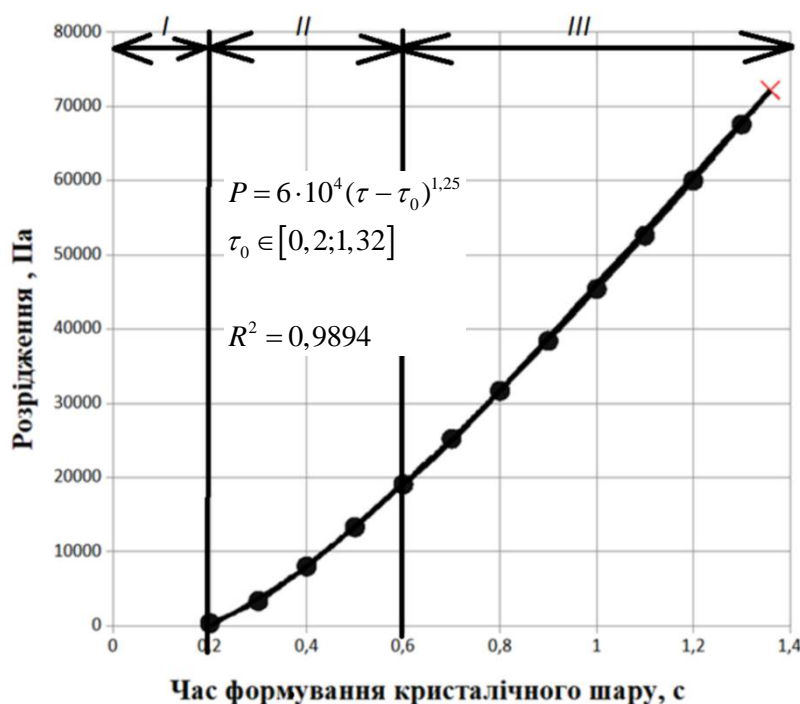
Для обраного матеріалу (пп. 3.2), температуру трубної заготовки при надходженні до калібрувальної гільзи приймаємо 483 К (210 °С).

Початкова температура охолоджувальної рідини (води) становила 293 К (20 °С), з урахуванням положень фізичної моделі, для труб діаметром 25 мм і товщиною стінки 3 мм.

Витрати охолоджувальної води, розраховані за математичною моделлю, по обом каналам становили 0,028 кг/с, що відповідає числу Рейнольдса 27665.

Швидкість виготовлення труби на експериментальній установці за результатами розрахунків по моделі вибрано 0,05 м/с.

Окрім цього, зважаючи на параграф 2.3 та на результати розрахунку, побудовано графік, що показує при якому розрідженні відбудеться відрив затверділого шару на поверхні трубної заготовки від розплаву, тобто відбудеться втягування в щілину перфорації (рисунок 3.14).



○ – експериментальні значення; x – точка відриву

Рисунок 3.14 – Обчислювальний експеримент з визначення мінімального тиску для забезпечення термічного контакту

Відповідно до розрахунків, максимальне розрідження, що може витримати затверділий шар полімеру, складає 72,231 кПа, що може бути досягнуто через 1,32 секунди перебування трубної заготовки всередині калібратора.

### **3.6 Визначення зусилля протягування при застосуванні калібратора обраного типу**

Дослідження проведено за методикою, наведеною в розділі 2.7, при виготовленні труби діаметром 25 мм і товщиною стінки 3 мм.

Показником ефективності контрольованого розрідження в калібрувальній гільзі при виготовленні продукції на лінії було зусилля протягування. Для вимірювання даного параметру використовувався динамометр (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – Фото динамометра

За результатами вимірювань отримано значення, записані в таблицю 3.6.

Узагальнення даних, отриманих за результатами натурного експерименту проведено в програмі MS Excel (рис. 3.16).

Аналіз дослідних даних дозволив запропонувати залежність, що пов'язує зусилля протягування і розрідження:



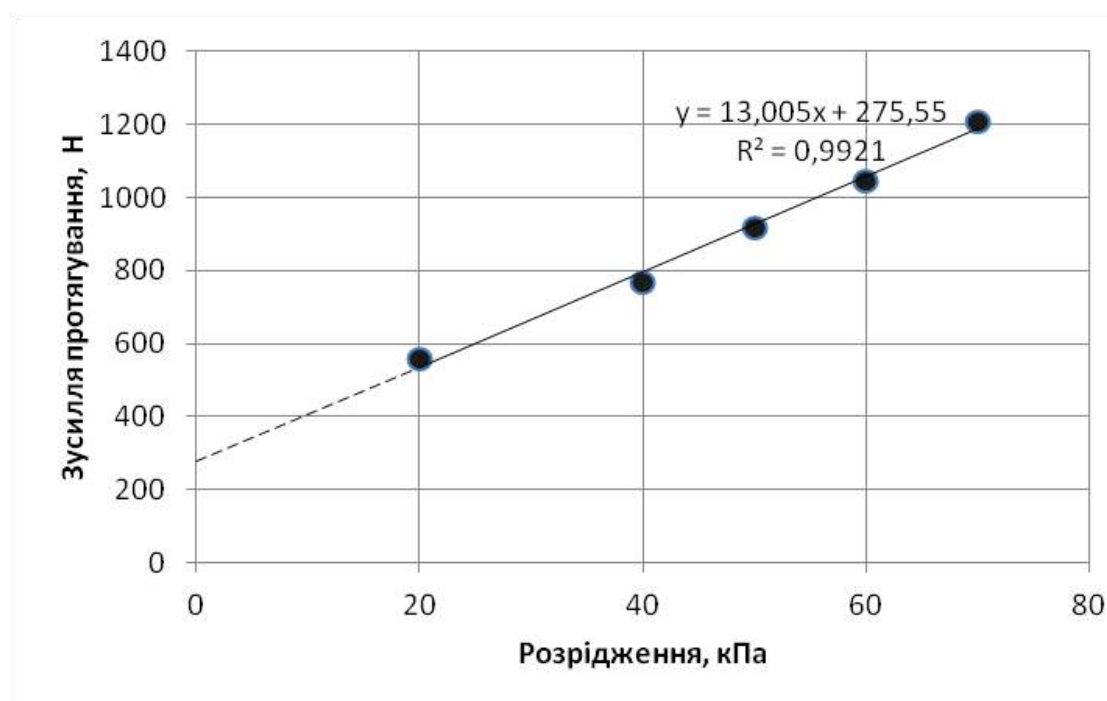
$$F_{fr} = 13,005 \cdot P_{out} + 275,55, \quad (3.2)$$

де  $F_{fr}$  - зусилля протягування, Н;  $P_{out}$  - розрідження, кПа.

Таблиця 3.6 Результати експериментального визначення зусилля протягування труби з ПЕВГ діаметром 25 мм і товщиною стінки 3 мм при продуктивності лінії – 10,6 кг/год

Розрідження, кПа	20	40	50	60	70
Зусилля протягування, Н	560	760	920	1050	1210

Показник величини достовірності апроксимації склав 0,9921 - крива відповідає даним, помилка мінімальна.



● – експериментальні значення

Рисунок 3.16 - Залежність зусилля протягування від величини розрідження камері калібратора

Схема проведення дослідів з визначення коефіцієнта тертя матеріалу труби по

матеріалу калібрувальної гільзи наведена на рисунку 3.17.

Силою  $Q$  зображено сила натягу динамометра та протидіюча їй сила рівна за модулем  $F_{mp}$  (сила тертя). Силою  $Y$  зображено вагу зразка та його реакцію опори  $N$ . Коефіцієнт тертя розраховано за формулою:

$$\mu = \frac{Q}{N}. \quad (3.3)$$

В той же час, силу натягу та реакцію опори, можна визначити за наступними формулами:

$$\begin{cases} Q = Y \cdot \sin \alpha \\ N = Y \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad (3.4)$$

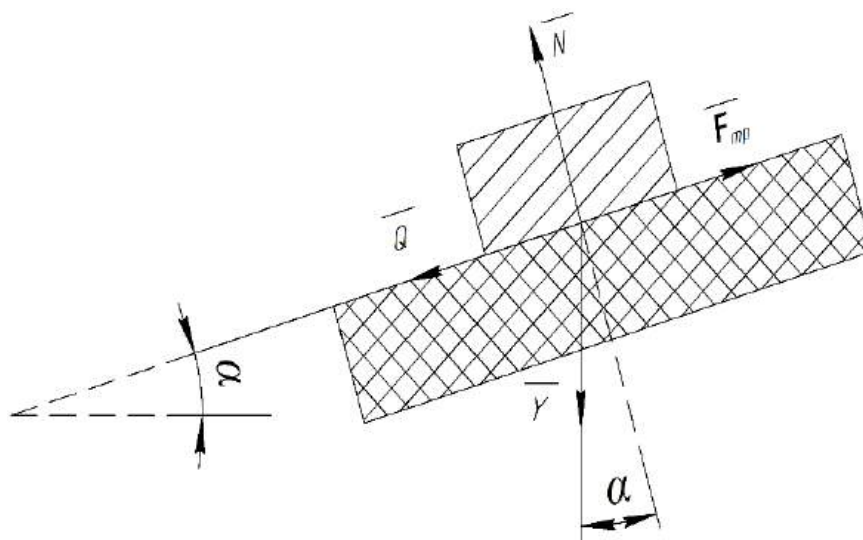


Рисунок 3.17 - Схема проведення дослідів дія сил при похилому напрямі поверхні ковзання зразків

Підставивши формули з (3.4) в рівняння (3.3) отримаємо:

$$\mu = \frac{Q}{N} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.5)$$

Таким чином, визначивши  $\operatorname{tg} \alpha$ , можна знайти коефіцієнт тертя.

Для знаходження величини  $tg\alpha$  проведено натурний експеримент з 10 повторюваних вимірювань. Для оцінки достовірності отриманих даних визначено коефіцієнт варіації. Розраховано середній коефіцієнт тертя для контактної пари «полімер-метал», який визначений рівним 0,789.

Отримане значення коефіцієнта тертя дає можливість розрахувати зусилля протягування, що виникає, при калібруванні труби, Н:

$$F_{fr} = \mu \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot P \quad (3.6)$$

де  $D$  - діаметр трубною заготовки, м;  $P$  - величина розрідження, кПа;  $L$  - довжина калібрувальної гільзи, м.

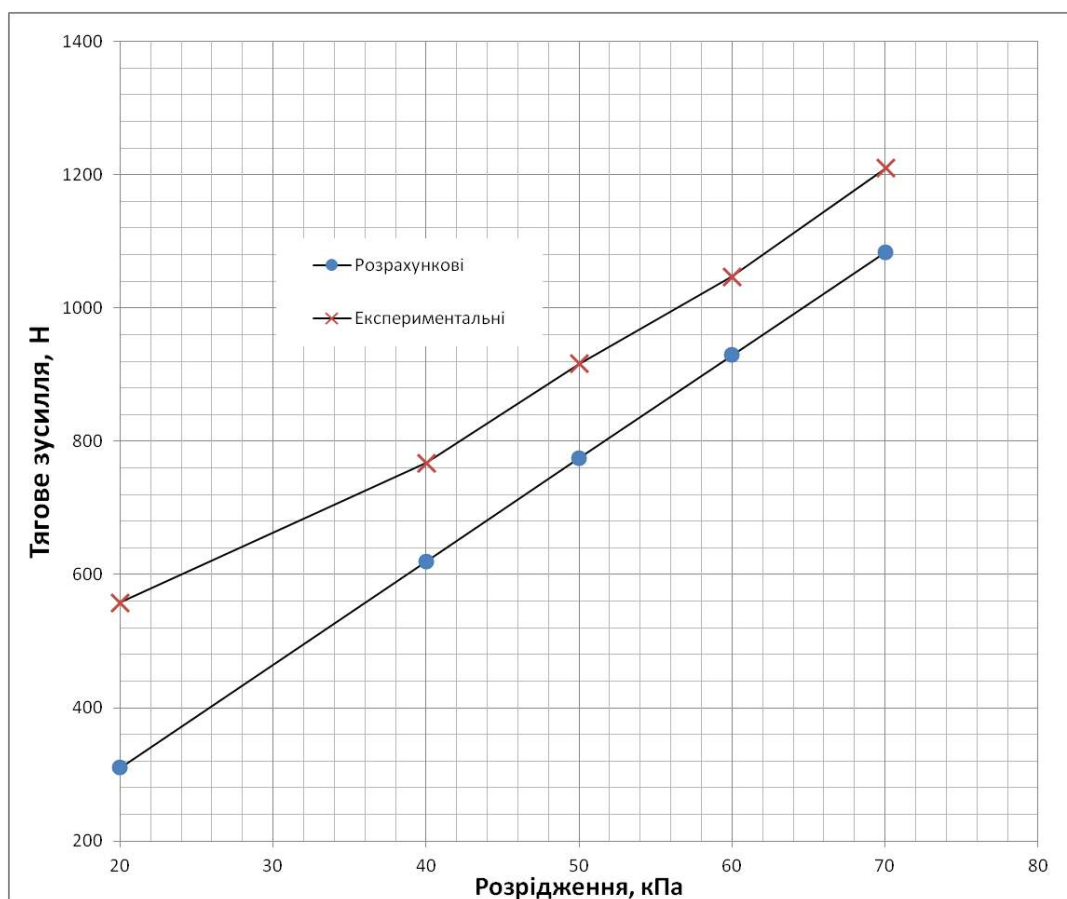
Результати обчислень занесені до таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 Порівняння результатів дослідження та розрахунку зусилля протяжки

Розрідження, кПа	20	40	50	60	70
Зусилля протягування експериментальне, Н	309,7	619,4	774,2	929,1	1083,9
Зусилля протягування розрахункове, Н	557,8	768,1	916,4	1046,8	1209,8

При порівнянні даних наведених значень, можна помітити, що вони суттєво відрізняються (рисунок 3.18).

Відповідно до графіка видно, що значення відрізняються, та йдуть майже паралельно, починаючи з розрідження в 40 кПа. Проаналізувавши, різниці між значеннями тягових зусиль за однакових значень розрідження, можна помітити, що середнє значення цих різниць буде дорівнювати 215,2 Н.



● – розрахункові значення; x – експериментальні значення

Рисунок 3.18 – Порівняння експериментальних та розрахункових зусилля протягування труби діаметром 25 мм

Взявши до уваги те, що діаметр трубної заготовки на початку калібрування приблизно на 1 % товщини стінки більший, ніж діаметр при розрахунках, і, відповідно, необхідність врахування додаткового зусилля, яке необхідно прикласти для подолання сил зчеплення розплаву трубної заготовки з калібрувальною гільзою в зонах I та II, для одержання релевантного значення коефіцієнта тертя є потреба для внесення корегування з додаванням зусилля протягування на момент входження трубної заготовки в гільзу калібратора. Підставивши даний коефіцієнт в рівняння (3.6), отримаємо:

$$F_{fr} = \mu \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot P + \Delta, \quad (3.7)$$

де  $\Delta$  – початкове тертя трубної заготовки при вході до зони I, для визначення якого необхідно провести більше досліджень, для труб діаметром 25 мм відповідно з отриманими результатами складає 215,2 Н.

Рівняння (3.7) дозволяє визначити точне значення зусилля протягування на всій площині порівняння експерименту з розрахунками.

### **3.7 Процес охолодження труби у водяній ванні**

На виході з калібрувального пристрою, часина матеріалу стінки трубної заготовки продовжує перебувати у стані розплаву. Тому вона потребує продовження охолодження, яке здійснюється в спеціальній ванні (рисунок 3.19), іноді двох, по завершенню проходження якої затверділий матеріал трубної заготовки має мати достатню міцність для збереження цілісності і форми при навантаженні на тягнучій і різальній машинах. В ході експериментальних досліджень було помічено, що при неякісному охолодженні в охолоджувальній ванні стінка труби може набути порушення геометрії, як з внутрішньої сторони, так і з зовнішньої. Отже якісне охолодження після калібрування займає важливе місце при виробництві труб з термопластів.

Температура внутрішньої поверхні труби на виході з ванни не повинна перевищувати 323 К [32], оскільки за цієї температури полімер ще має достатньо кільцевої жорсткості труби (що має забезпечити відсутність пластичних деформацій після тягнучого пристрою) для збереження форми після проходження тягнучого пристрою, а також для збереження круглої (в межах допусків) форми після різального інструменту (фрези, ножа, диска). Спираючись на дослідження [33], прийнятною середньою температурою для подачі труби з ПЕВТ до тягнучого пристрою можна вважати 308 К. За такої температури модуль пружності, наприклад, для поліетилену складає 74 % від модуля пружності за температури 293 К, що забезпечить відсутність деформації при використанні різального пристрою.



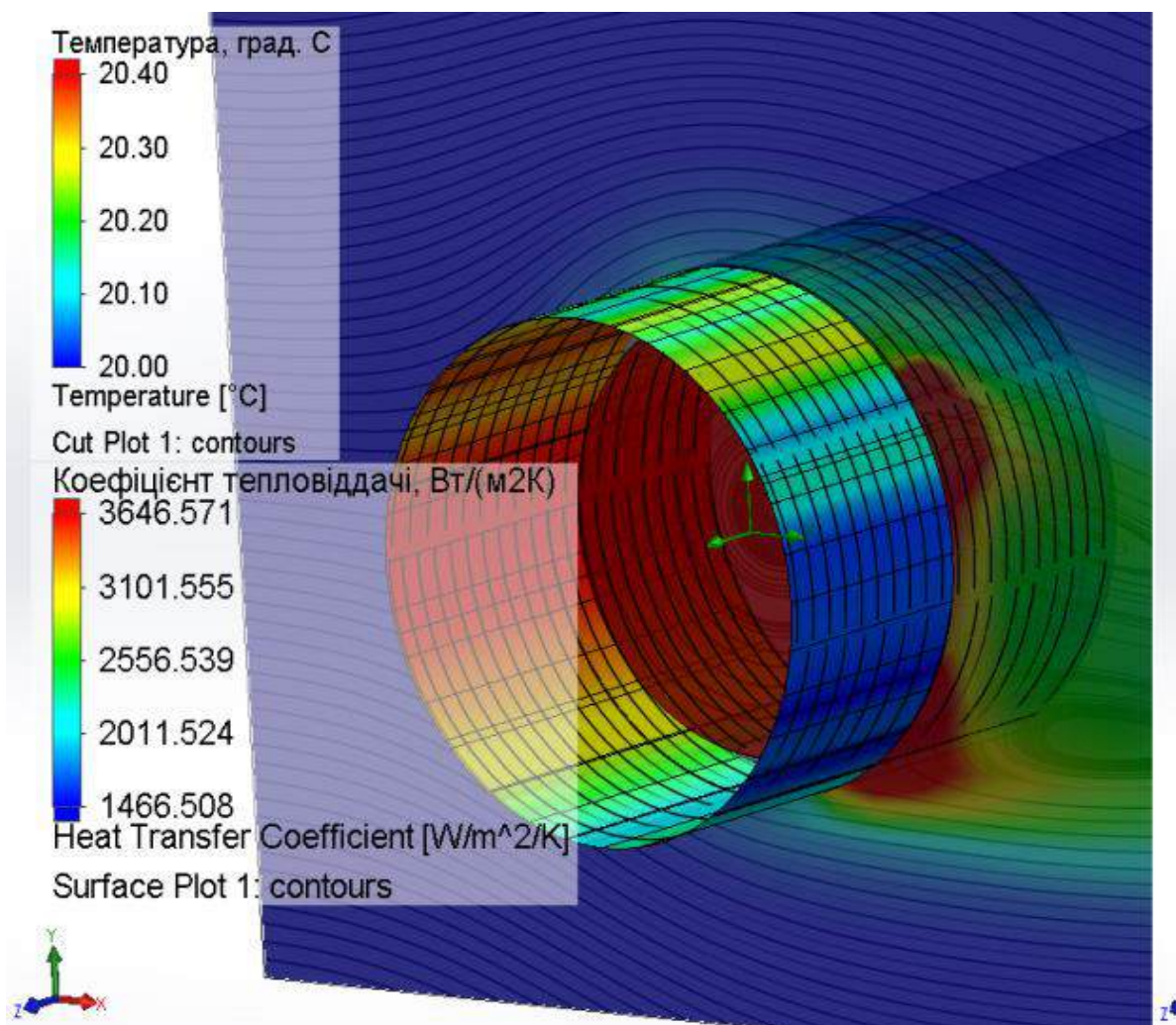


Рисунок 3.20 – Температурне поле при охолодженні труби з поліетилену у воді (значення температур і коефіцієнтів тепловіддачі відповідно до шкал) з вимушеною конвекцією

Додатково було проведено дослідження з вільною конвекцією, що забезпечує коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha = 617 \frac{Bm}{m^2 K}$  (рисунок 3.21). Трубна заготовка діаметра 25 мм, з товщиною стінки 4,4 мм, швидкість протягування труби – 0,133 м/с (8 м/хв).



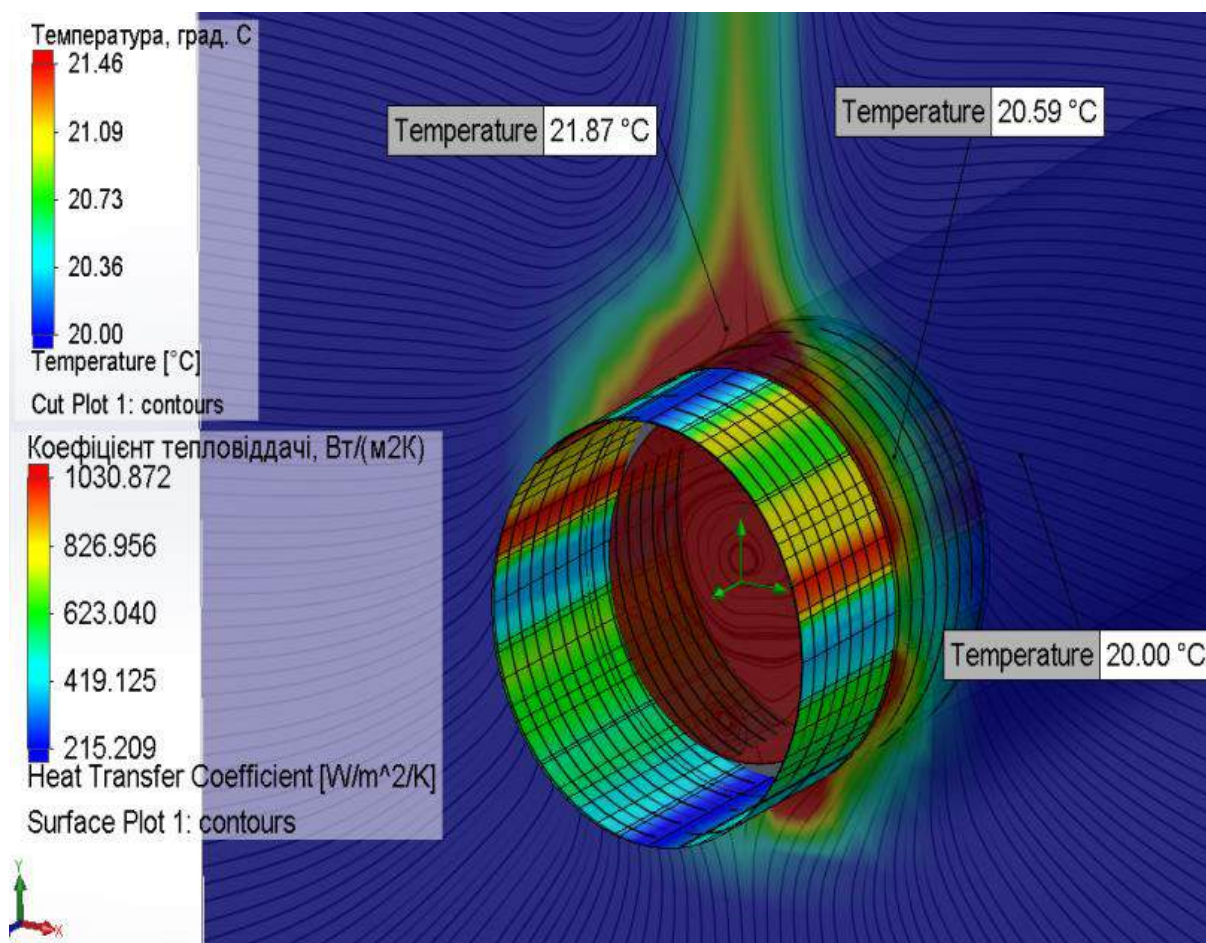


Рисунок 3.21 – Температурне поле при охолодженні труби з поліетилену у воді (значення температур і коефіцієнтів тепловіддачі відповідно до шкал) за вільної конвекції

Результати даного дослідження свідчать про те, що через вплив внутрішньої задачі ані вимушена, ані вільна конвекція не мають суттєвого впливу для пришвидшення охолодження трубної заготовки. Тому, згідно з умовами різання з використанням різального пристрою, а також температури охолоджувальної рідини, побудовано графіки, (рисунок 3.22-3.23) для визначення довжини зони охолодження ліній виробництва труб з ПЕВТ, необхідної для стабільної роботи тягнучого та різального пристроїв. Умови для користування графіками – температура розплаву на виході з формувального інструменту 483 К; охолодження водою з вимушеною течією і температурою 293 К.



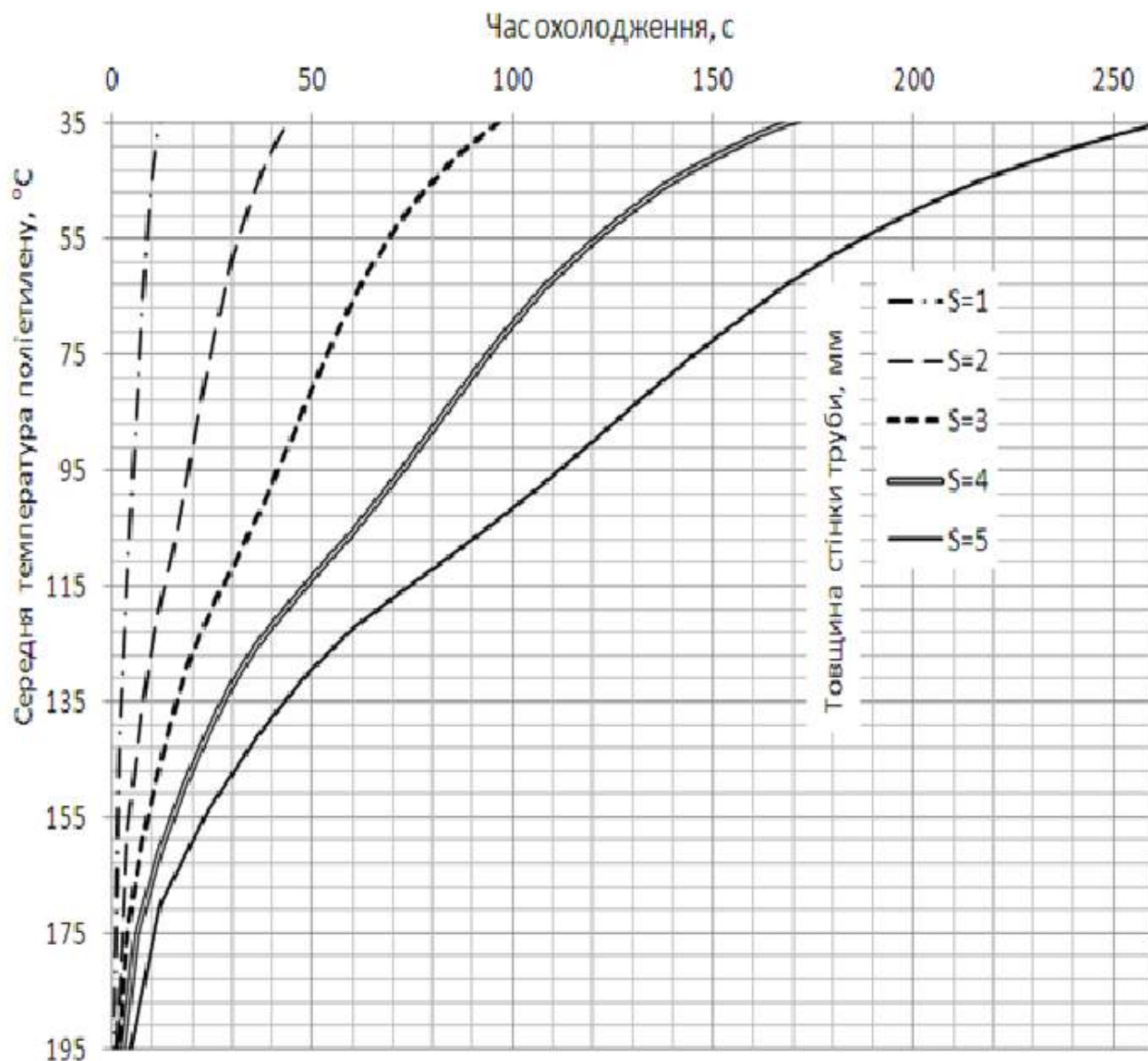


Рисунок 3.22 - Середня температура стінки труби з ПЕВТ від часу охолодження та товщини стінки ( $S$ ) від 1 до 5 мм, швидкість труби – 0,133 м/с (8 м/хв) всієї лінії виготовлення труби

Задаючись часом охолодження та товщиною стінки трубної заготовки, за допомогою графіків на рисунках 3.22 і 3.23, можна визначити температуру стінки труби (на зовнішній поверхні), що має бути забезпечена при виході трубної заготовки з калібратора задля забезпечення заданої геометричної форми та гладкості поверхні виробу.

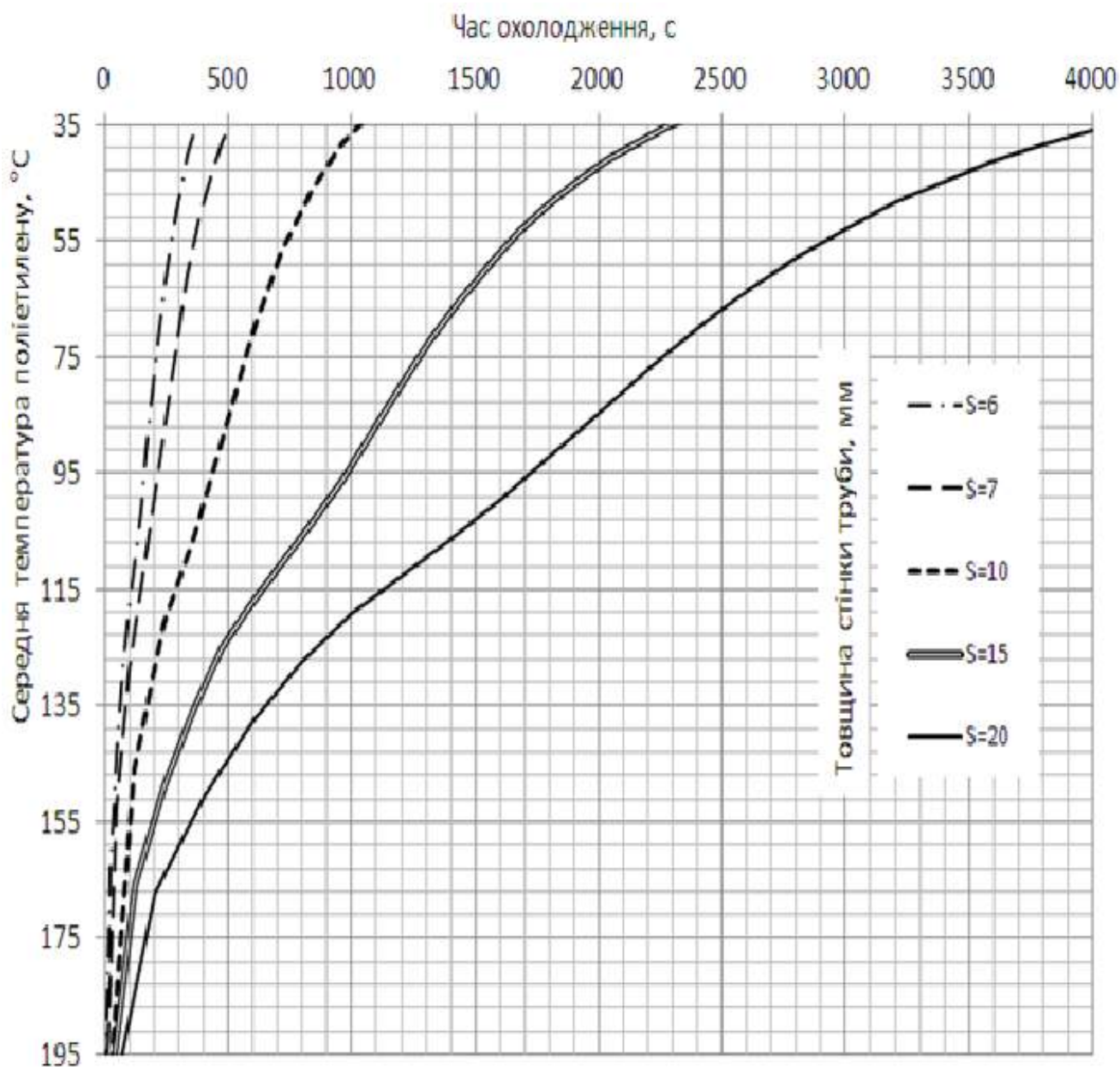


Рисунок 3.23 - Середня температура стінки труби з ПЕВТ від часу охолодження та товщини стінки (S) від 6 до 20 мм, швидкість труби – 0,133 м/с (8 м/хв) всієї лінії виготовлення труби.

### Висновки до розділу 3

1. Створено експериментальну установку і складено методику проведення експериментальних досліджень, яка дозволяє визначити основні механічні параметри процесу калібрування, такі як зусилля протягування при змінних значеннях тиску розрідження.

2. Аналіз похибок при проведенні експериментальних досліджень, та результати оцінки відносних похибок свідчить про те, що прилади, проведені виміри та методи дозволяють достатньо точно провести виміри потрібних величин в необхідних межах.

процесів та можливість їх використання при розрахунках геометричних розмірів окремих зон калібрування при застосуванні адаптованого розрідження в камерах калібратора. Це дозволяє забезпечити високу якість готової продукції шляхом адекватного вибору режимів охолодження та уточненого розрахунку тягнучого зусилля.

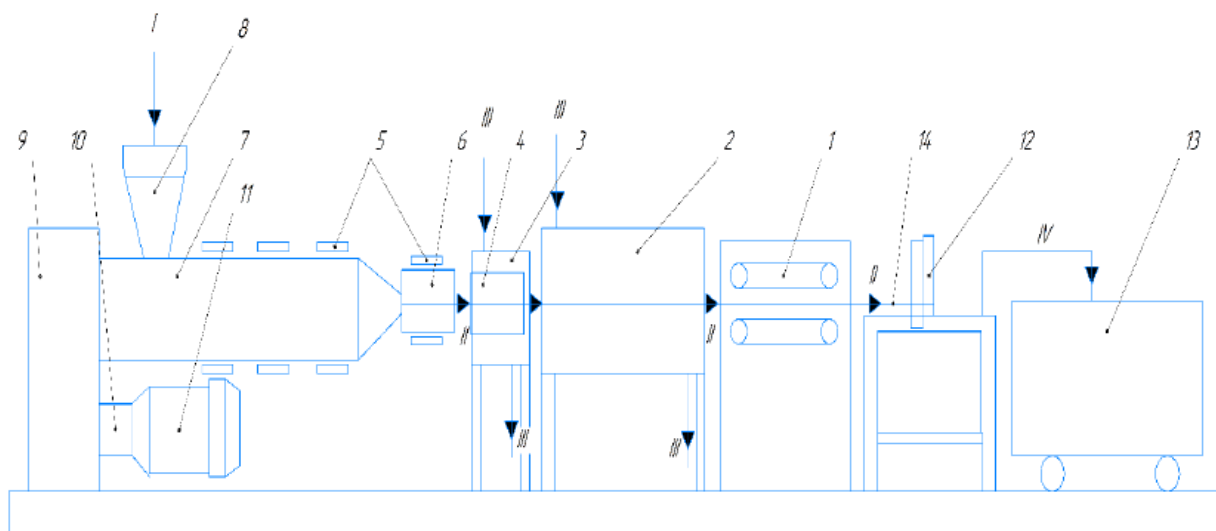
4. Експериментально встановлено доцільність розрахування поля температур в трубній заготовці для розрахунку теплообміну в першій зоні, та визначення умов утворення твердого шару.

5. Експериментально підтверджена доцільність застосування адаптивного розрідження для контролю термічного опору між поверхнею трубної заготовки та стінки калібратора, шляхом створення заданого розміру повітряного зазору, що складає від 0 до 8 % від заданої товщини стінки трубного профілю.

## РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 4.1 Опис технологічного процесу одержання гладких труб з термопластів

За результатами теоретико-експериментальних досліджень розроблено технологічну схему промислової установки для одержання гладких труб з термопластів з використанням калібратора (рисунок 4.1).



*I* – гранули термопласту; *II* – трубна заготовка; *III* – охолоджувальна рідина;  
*IV* – відсортована труба

1 – тягнучий ланцюговий пристрій; 2 – охолоджувальна ванна;  
3 – вакуумна ванна з калібратором; 4 – калібратор; 5 – нагрівальні елементи;  
6 - формуюча головка; 7 – екструдер; 8 – бункер із гранулами термопласту;  
9 – редуктор; 10 – сполучна муфта; 11 – електродвигун;  
12 – механізм різання; 13 – штабелер; 14 – трубна заготовка

Рисунок 4.1 – Промислова схема лінії виробництва полімерних труб

Гранули подаються до бункеру (8), з якого потрапляють до екструдера (7). За допомогою сполучної муфти (10) від електродвигуна (11) крутний момент передається до редуктора (9), і змушує черв'як екструдера обертатись, тим самим змішуючи та транспортуючи розплав термопласту до формуючої головки (6). Весь

шлях в екструдері та формуючій головці підтримується температура, необхідна для підтримки термопластичного матеріалу у розплавленому стані, для чого використовуються нагрівні елементи (5).

Далі утворена трубна заготовка (14) потрапляє до калібратора (4), розташованого у вакуумній ванні (3). У калібраторі відбувається формування геометричних розмірів виробу з одночасним охолодженням зовнішньої поверхні трубної заготовки, що призводить до утворення твердого шару полімеру достатньої для протягування профіля міцності. Охолодження калібрувальної гільзи відбувається за допомогою зрошення рідиною з температурою від 288 до 298 К, що дозволяє охолодити гільзу і, відповідно, заготовку. Подальше охолодження відбувається водою в охолоджувальній ванні (2). На виході з ванни трубна заготовка потрапляє до тягнучого пристрою (1), що окрім протягування трубного профілю через систему охолодження також подає заготовку до різального пристрою (12), де труба необхідної довжини відрізається та подається далі на штабелер (13), і транспортується до складського приміщення.

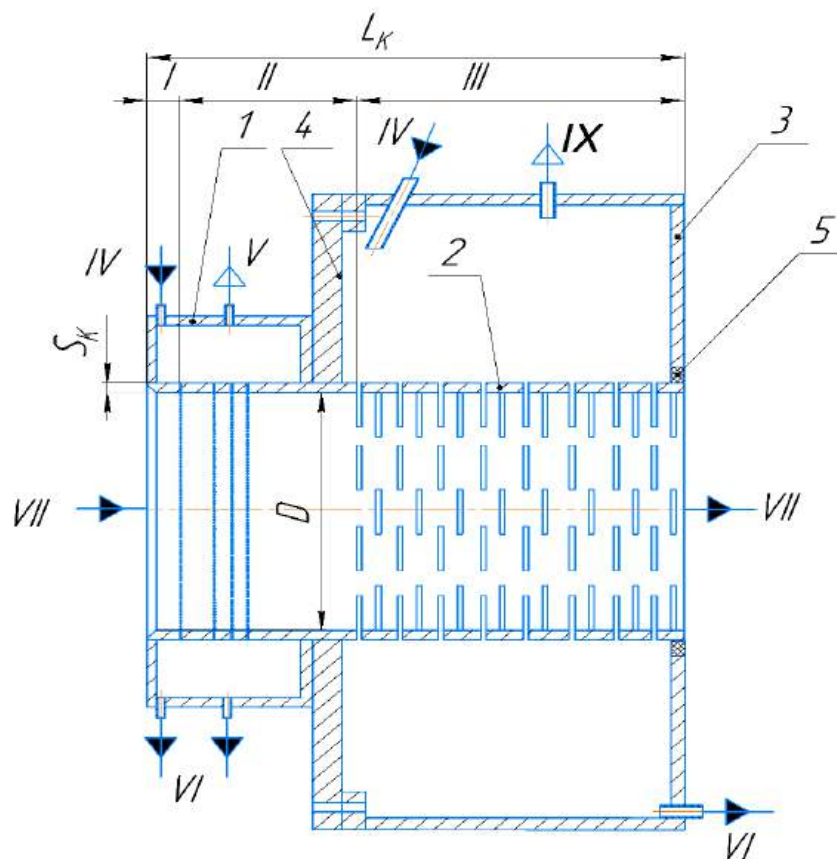
#### **4.2 Конструктивно-технологічна концепція промислового калібратора**

Проведені експериментальні дослідження підтвердили доцільність застосування калібратора, що працює з адаптивним розрідженням і, відповідно, контрольованим термічним опором між трубною заготовкою та внутрішньою стінкою калібрувальної гільзи. До переваг такого способу формування твердого шару трубної заготовки відноситься те, що такий метод дозволяє контролювати тертя між полімером та внутрішньою поверхнею зі збереженням якісного теплообміну.

Результати проведених досліджень калібратора з адаптивним розрідженням використані при створенні конструкції промислового калібратора, зображеної на рисунку 4.2.

Відповідно до п.п. 2.3, при проходженні вздовж довжини калібратора

збільшується товщина затверділої стінки заготовки, що потребує також немиттєвого зростання розрідження для збереження контакту й мінімізації тертя між заготовкою й гільзою.



1 – перша камера розрідження; 2 – калібрувальна гільза; 3 – друга камера розрідження; 4 – фланець; 5 – гумовий ущільнювач

*I* – перша зона калібрування; *II* – друга зона калібрування; *III* – третя зона калібрування; *IV* – вхід охолоджувальної рідини; *V* – вихід повітря (утворення розрідження першого рівня); *VI* – вихід охолоджувальної рідини; *VII* – трубна заготовка, *IX* – вихід повітря (утворення розрідження другого рівня)

Рисунок 4.2– Конструкція промислового калібратора

#### **4.3. Базові вимоги до проведення процесу калібрування трубної заготовки із застосуванням розрідження**

Після виходу полімерної труби з екструдера, вона подається до вакуумного

калібрувального пристрою. Гаряча та м'яка трубна заготовка з термопласту, притискається атмосферним тиском до внутрішньої стінки калібрувальної гільзи. При цьому температура трубного профілю становить близько 523 K [103].

При калібруванні велике значення має температура стінки калібрувальної гільзи. Надто різке охолодження полімеру може викликати мікротріщини на поверхні профілю. Занадто слабе ж охолодження може затягнути в щілини калібратора затверділий полімер, що призведе до необхідності повторного запуску лінії. Одночасно з цим потрібно забезпечити температуру, нижчу за температуру прилипання, оскільки якщо температура буде вищою, то значно зросте коефіцієнт тертя труби по стінці гільзи, що викличе появу внутрішніх напружень на зовнішній стороні трубного профілю, а також погіршення якості поверхні труби. У той же час, залежність якості поверхні труби від температури гільзи зумовлена надмолекулярною структурою полімеру. Як приклад, для аморфних полімерів з підвищенням температури калібрувальної гільзи, зменшується концентрація залишкових напружень, які зумовлюють зменшення анізотропії міцності по перерізу труби. При переробці кристалічних полімерів з підвищенням температури калібрувальної гільзи знижується ступінь кристалічності, що призводить до зменшення шорсткості поверхні і поверхневої міцності профілю.

Для охолодження зазвичай використовують воду, температура якої залежить від швидкості протягування труби і її розмірів. Якщо швидкість протягування труби і діаметр трубної заготовки великі, то, відповідно, необхідно більш інтенсивне охолодження. Зазвичай охолодження профілю регулюється кількістю води, яка подається до калібратора та ванни охолодження.

В залежності від діаметра труби, товщини стінки і типу полімеру обирається розрідження калібрування. Із зростанням розрідження зростає величина напружень, як у радіальному, так і в осьовому напрямках трубної заготовки. Надмірне розрідження викликає зменшення міцності труби, внаслідок утворення мікротріщин через тертя заготовки та внутрішньої стінки калібрувальної гільзи, що може

призвести до розриву труби. Недостатнє розрідження призводить до зниження якості поверхні труби, оскільки утворює поверхневу шорсткість. Тому, зазвичай, величина розрідження підбирається експериментально.

#### 4.4. Методика розрахунку промислового калібратора

##### 4.4.1 Розрахунок теплових полів трубної заготовки при калібруванні та розрідження

Вхідні данні: матеріал гільзи калібру – БрАЖ9–4 ГОСТ 18175–78 з теплопровідністю  $\lambda_{\text{калібр}} = 61 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  [73, 84]; внутрішній діаметр гільзи – 500 мм; товщина стінки гільзи –  $\delta_{\text{калібр}} = 0,03 \text{ мм}$ ; довжина  $L = 880 \text{ мм}$ ; матеріал труби – поліетилен низької густини з теплофізичними властивостями наведеними на рисунках 1.7 і 1.8 [28].

Метою розрахунку є визначення величини розрідження, необхідного для забезпечення термічного контакту трубної заготовки з стінкою калібрувальної гільзи.

За методикою запропонованою в розділі 2.3 для конструкції промислового калібратора величина коефіцієнта тепловіддачі від стінки до води становить

$$\alpha = 891 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}.$$

Методика розрахунку реалізована у програмі. Результати розрахунків для труби діаметром 500 мм з товщиною стінки 30 мм, за швидкістю 8 м/хв, з температурою поліпропілену на вході до калібратора 523 К (250 °С) та температурою води, яка подавалась на охолодження до зони І калібратора – 293 К (20°С), наведені в Додатку В і зображені на рисунках 4.3-4.4, а також в таблиці 4.1.



Таблиця 4.1 Розрахунок зміни величини розрідження в залежності від часу перебування в промисловому калібраторі за рівнянням 2.33

Тиск на шарі, Па	947,7	11382	20552	33650	42381	50545	56208	65089
Час перебування, сек	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

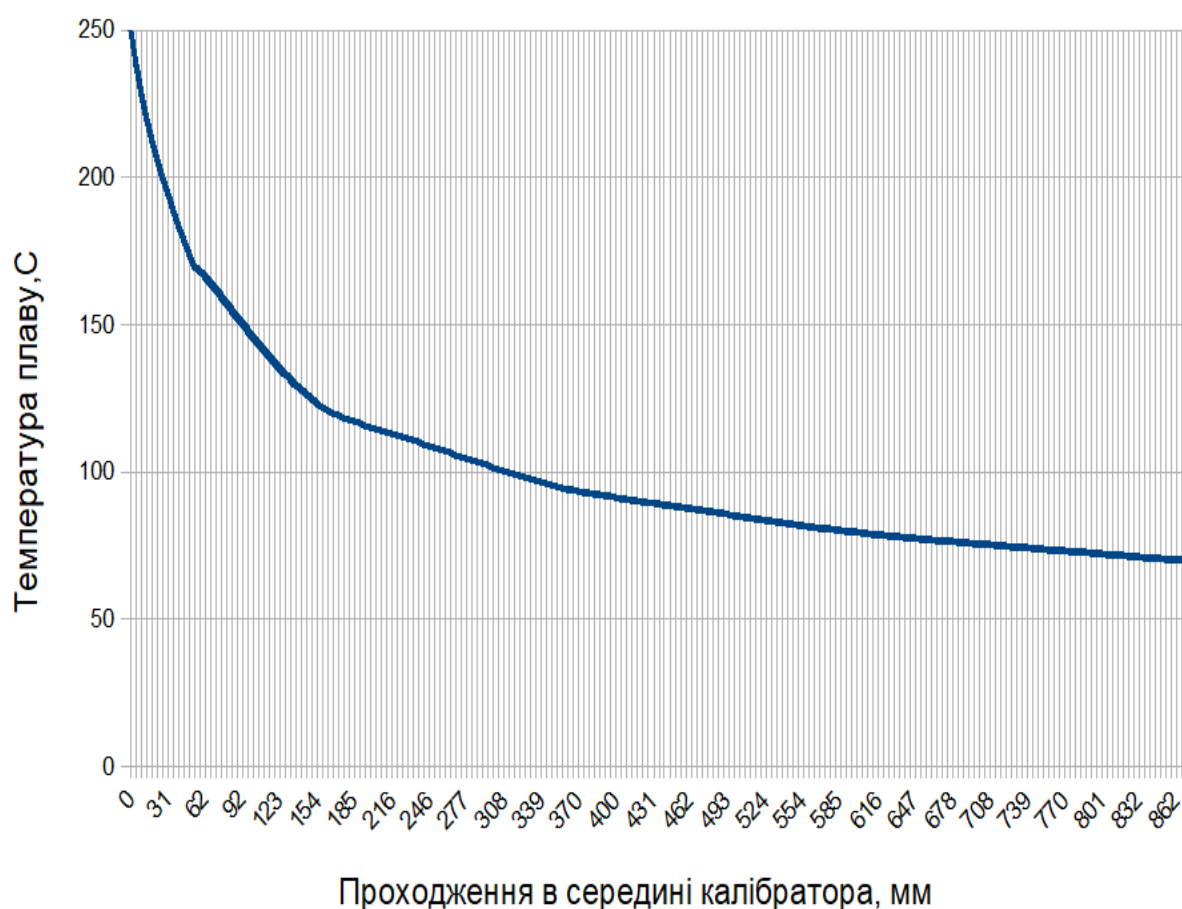


Рисунок 4.3 – Зміна температури поверхневого шару труби по довжині калібратора

Таким чином, запропоновані фізична та математичні моделі дозволяють визначити ефективні умови теплообміну шляхом контрольованого термічного опору з зоні контакту трубної заготовки з внутрішньою стінкою калібрувальної гільзи та розрахування температурного поля в стінці труби, що у свою чергу, дозволяє визначити параметри розрідження в робочих зонах калібратора, при яких

забезпечуються умови міцності необхідні для протягування сформованого виробу із заданими властивостями.

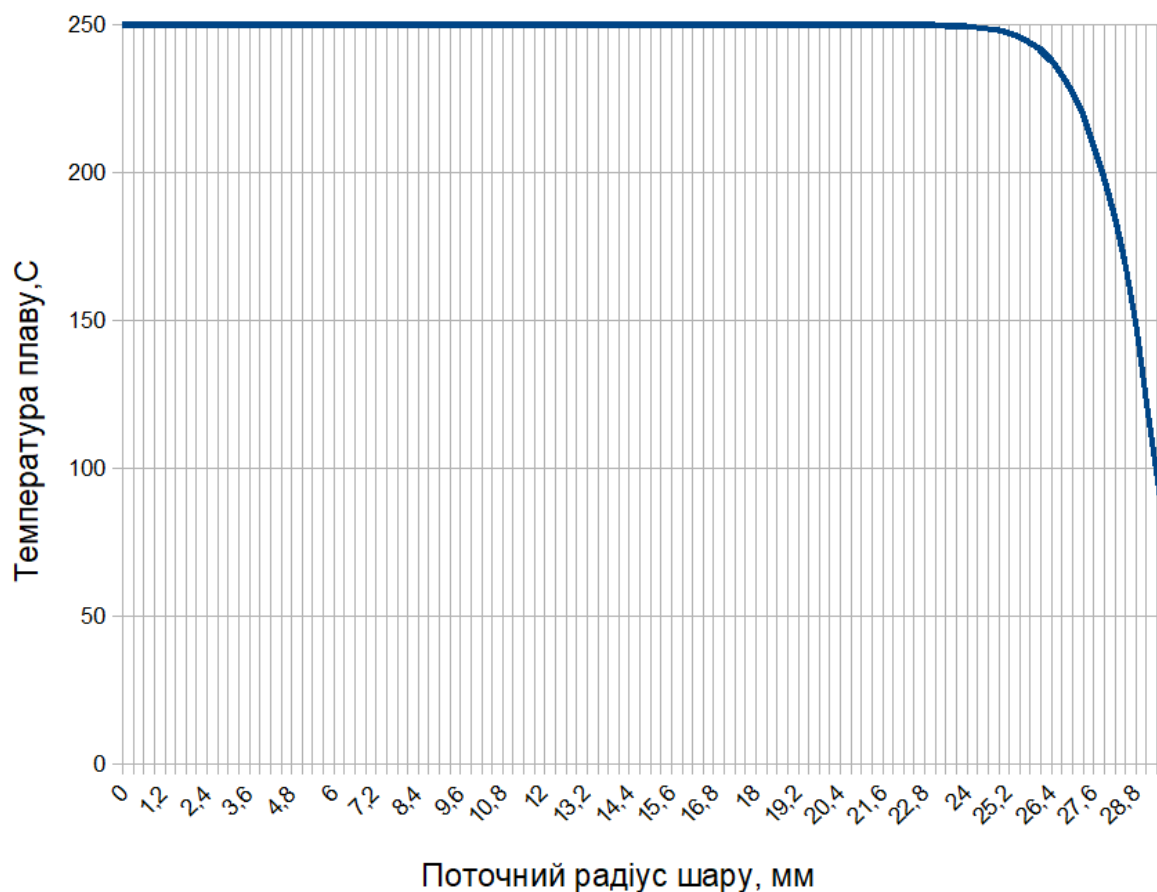


Рисунок 4.3 – Температурне поле труби в перерізі при виході з калібратора при швидкості екструзії 8м/хв, зовнішньому діаметрі 500мм та товщині стінки 30мм розраховане за 2.35

#### 4.4.2 Методика аналітичного розрахунку довжини калібрувальної гільзи

Відомі методики розрахунку калібрувальної гільзи наведені у [24, 104-107].

Мета аналітичного розрахунку полягає у визначенні мінімальної необхідної довжини калібрувальної гільзи (рис. 4.4).

Питомий тепловий потік через матеріал стінки трубної заготовки, контакт між трубою та стінкою калібра, стінку калібратора до ядра потоку охолоджувальної рідини визначається рівнянням (1.8).

При визначенні теплового потоку приймаються такі припущення:

- геометрія трубної заготовки і її розміри незмінні;
- граничні умови постійні ( $\alpha = \text{const}$ ,  $T_F = \text{const}$ );
- рівномірний розподіл початкової температури (в момент часу  $\tau = 0$  температура в будь-якій точці дорівнює  $T_M$ ).

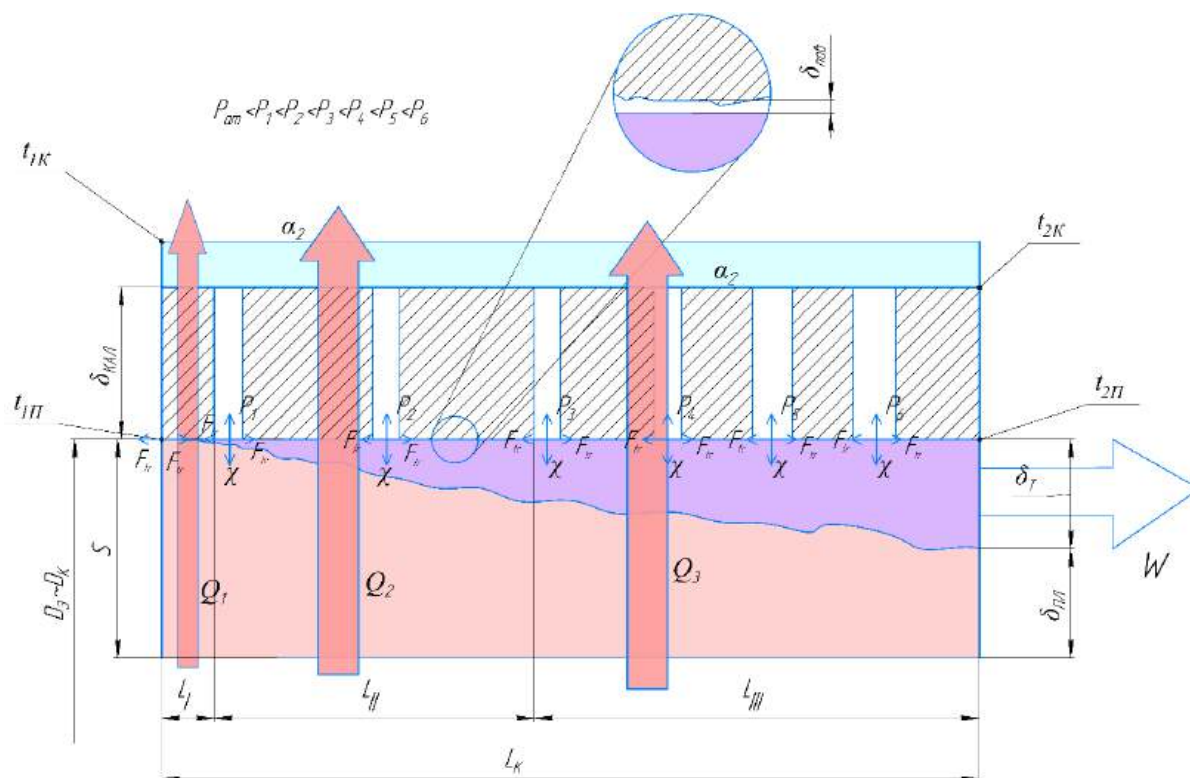


Рисунок 4.4 – Схема охолодження заготовки в калібрувальній гільзі

Одновимірна теплопередача в плоскому тілі описується рівнянням нестационарної теплопровідності (1.19).

Вихідні данні:

Початкова температура охолоджувальної води, $t_{1B}$ , °C	20
Кінцева температура охолоджувальної води, $t_{2B}$ , °C	40
Температура трубної заготовки на вході в калібратора, $t_{1П}$ , °C	250
Температура трубної заготовки на виході з калібратора, $t_{2П}$ , °C	70
Температура склування полімеру, $t_{СК}$ , °C	135

Знаючи ці параметри, можна продовжити розрахунок

Більша різниця температур, °C:

$$\Delta t_{\delta} = t_{1П} - t_{1В} = 250 - 20 = 230$$

Менша різниця температур, °C:

$$\Delta t_{\text{м}} = t_{2П} - t_{2В} = 70 - 40 = 30$$

Середню різницю температур визначається за формулою:

$$\Delta t_{\text{сеп}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)} = \frac{230 - 30}{\ln\left(\frac{230}{30}\right)} = 98,2$$

Середня температура полімеру, °C:

$$t_{\text{ср2}} = t_{\text{ср1}} + \Delta t_{\text{сеп}} = 30 + 98,2 = 128,2$$

Температури полімеру на вході й виході з певної зони, беруться з розрахунків, що проведені в розділі 2 (параграф 2.7).

Розрахунок теплового навантаження для зони I, кВт:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{\pi}{4} (D_3^2 - d^2) W C_{n(T_K)} (T_{\text{пл}} - T_K) \rho_{n(T_K)} = \\ &= \frac{\pi}{4} (0,5^2 - (0,5 - 0,00002)^2) \cdot 0,134 \cdot 2,34 \cdot (250 - 185) \cdot 1050 = 0,336 \end{aligned}$$

де  $D_3$  - зовнішній діаметр трубної заготовки, м;  $d = D_3 - 2\delta$  - діаметр затверділого шару трубної заготовки, м,  $\delta$  - товщина твердого шару полімеру, м (згідно з п.2.7);  $W$  - швидкість виготовлення (протягування) трубної заготовки через калібратор, м/с;  $C_{n(T_K)}$  - теплоємність полімеру за температури  $T_K$ , кДж/кг;  $\rho_{n(T_K)}$  - густина полімеру за температури  $T_K$ , кг/м<sup>3</sup>;  $T_{\text{пл}}$  - температура плаву на вході в зону 1, °C;  $T_K$  - температура полімеру на виході з зони 1, °C

Тоді термічний опір для зони I:

$$R_I = \frac{\delta_{ПЛ}}{\lambda_{ПЛ}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{0,3}{0,19} + \frac{0,03}{61} + \frac{1}{891} = 1,58$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$K_1 = \frac{1}{R_I} = \frac{1}{1,58} = 0,63$$

Тоді площа теплообміну для зони 1, м<sup>2</sup>:

$$F_I = \frac{Q_1}{K_1 \cdot \Delta t_{сер}} = \frac{0,336}{0,63 \cdot 98,2} = 0,0543$$

Тоді довжина зони 1 визначається, м:

$$L_I = \frac{F_I}{\pi \cdot D_3} = \frac{0,0543}{\pi \cdot 0,5} = 0,035$$

Розрахунок теплового навантаження для зони II, кВт:

$$\begin{aligned} Q_2 &= \frac{\pi}{4} (D_3^2 - d^2) W C_{n(T_k)} (T_{пл} - T_k) \rho_{n(T_k)} = \\ &= \frac{\pi}{4} (0,5^2 - (0,5 - 0,0015)^2) \cdot 0,134 \cdot 1,66 \cdot (185 - 135) \cdot 1350 = 17,65 \end{aligned}$$

де  $T_{пл}$  - температура плаву на вході в зону 2, °C;  $T_k$  - температура полімеру на виході з зони 2, °C

Термічний опір для зони II:

Приймаємо припущення, що величина повітряного зазору між стінкою калібрувальної гільзи та трубною заготовкою по довжині зони II  $\delta_{нов} \in [0; 0,045]$

$$\begin{aligned} R_{II}''(\delta_{нов} = 0) &= \frac{\delta_{ПЛ}}{\lambda_{ПЛ}} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_2} = \\ &= \frac{0,25}{0,17} + \frac{0,05}{0,198} + \frac{0}{0,025} + \frac{0,03}{61} + \frac{1}{891} = 1,73 \end{aligned}$$

$$R'_{II} (\delta_{нов} = 0,04 \cdot S) = \frac{\delta_{ПЛ}}{\lambda_{ПЛ}} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_2} =$$

$$= \frac{0,25}{0,17} + \frac{0,05}{0,198} + \frac{0,012}{0,025} + \frac{0,03}{61} + \frac{1}{891} = 2,21$$

Тоді середній термічний опір по зоні 2 дорівнює:

$$R_{II} = \frac{(R'_{II} + R''_{II})}{2} = \frac{(1,73 + 2,21)}{2} = 1,97$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$K_2 = \frac{1}{R_{II}} = \frac{1}{1,97} = 0,51$$

При цьому площа поверхні теплообміну зони 2, м<sup>2</sup>:

$$F_{II} = \frac{Q_2}{K_2 \cdot \Delta t_{сер}} = \frac{17,65}{0,51 \cdot 98,2} = 0,35$$

Тоді довжина 2ої зони дорівнює, м:

$$L_{II} = \frac{F_{II}}{\pi \cdot D_3} = \frac{0,35}{\pi \cdot 0,5} = 0,223$$

Розрахунок теплового навантаження для зони III, кВт:

$$Q_3 = \frac{\pi}{4} (D_3^2 - d^2) W C_{n(T_K)} (T_{пл} - T_K) \rho_{n(T_K)} =$$

$$= \frac{\pi}{4} (0,5^2 - (0,5 - 0,003)^2) \cdot 0,134 \cdot 1,36 \cdot (135 - 70) \cdot 1405 = 39,08$$

де  $T_{пл}$  - температура плаву на вході в зону 3, °C;  $T_K$  - температура полімеру на виході з зони 3, °C

Термічний опір зони III:

Приймаємо припущення, що величина повітряного зазору між стінкою

калібратора та трубною заготовкою по довжині зони III  $\delta_{нов} \in [0,04S; 0,08S]$

$$R'_{III} = R'_H = 2,21$$

$$\begin{aligned} R''_{III}(\delta_{нов} = 0,08S) &= \frac{\delta_{ПЛ}}{\lambda_{ПЛ}} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_2} = \\ &= \frac{0,1}{0,198} + \frac{0,2}{0,186} + \frac{0,024}{0,025} + \frac{0,03}{61} + \frac{1}{891} = 2,54 \end{aligned}$$

Тоді середній термічний опір по зоні III дорівнює:

$$R_{III} = \frac{(R'_{III} + R''_{III})}{2} = \frac{(2,21 + 2,54)}{2} = 2,375$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$K_3 = \frac{1}{R_{III}} = \frac{1}{2,375} = 0,42$$

При цьому площа поверхні теплообміну зони 3, м<sup>2</sup>:

$$F_{III} = \frac{Q_3}{K_3 \cdot \Delta t_{сер}} = \frac{39,08}{0,42 \cdot 98,2} = 0,948$$

Тоді довжина 3 зона дорівнює, м:

$$L_{III} = \frac{F_{III}}{\pi \cdot D_3} = \frac{0,948}{\pi \cdot 0,5} = 0,604$$

Загальна довжина каліббратора, м:

$$L_P = \sum L_i = L_1 + L_2 + L_3 = 0,035 + 0,223 + 0,604 = 0,862$$

Зробимо перевірку з промисловим каліббратором й проведемо перевірку на похибку, %:

$$\varsigma = \frac{|L_P - L|}{L} \cdot 100\% = \frac{|0,862 - 0,880|}{0,880} \cdot 100\% = 2,05.$$

Оскільки похибка  $\varsigma$  не перевищує 15 % розрахунок проведено вірно, а розрахований калібратор має виконувати свої задачі. Отже, відповідно до розрахунків, перша прорізь повинна знаходитись на відстані 35 мм. Конструкція такої калібрувальної гільзи зображена на рисунку 4.5.

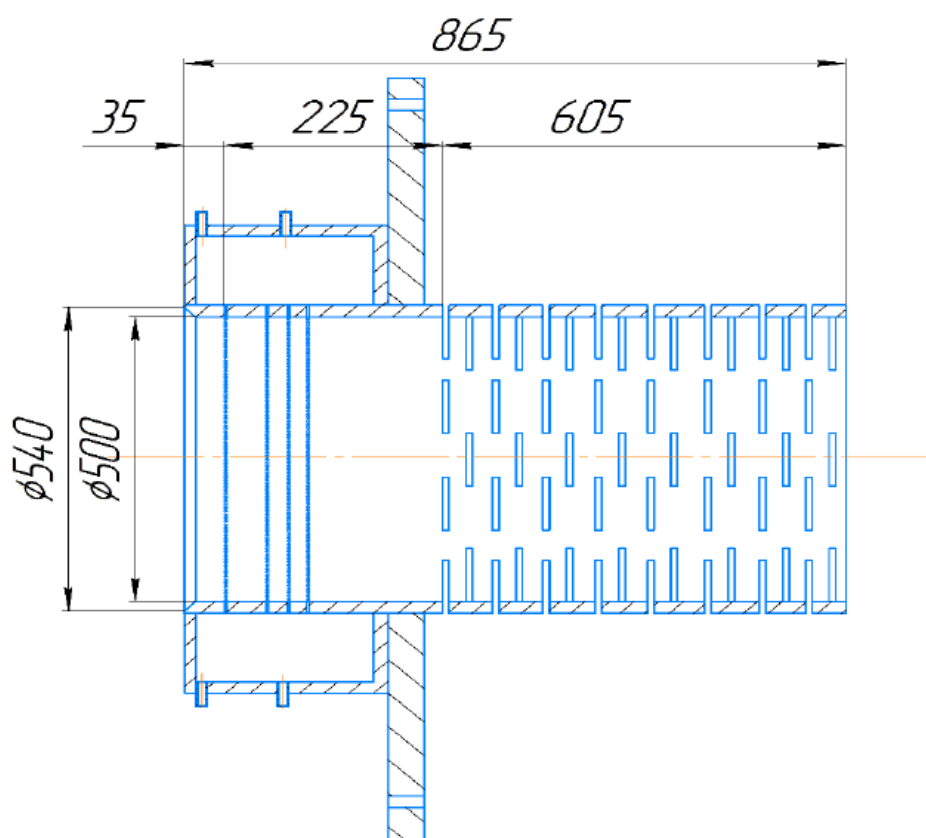


Рисунок 4.5 – Конструкція промислового калібратора

#### 4.4.3 Розрахунок площі перфорації

Метою розрахунку є виявлення коефіцієнта перфорації калібрувальної гільзи (рис. 4.10) [108].

Довжина калібратора з перфорацією, м:



$$L_{II} = L_{III} = 0,605$$

Кількість щілин перфорації, на одній стороні:

$$N_{II} = \frac{L_{II}}{t_2} = \frac{0,605}{0,025} = 24,2 \approx 24$$

де  $t_2 = 0,025$  - крок між щілинами перфорації, що знаходяться на одній стороні, м

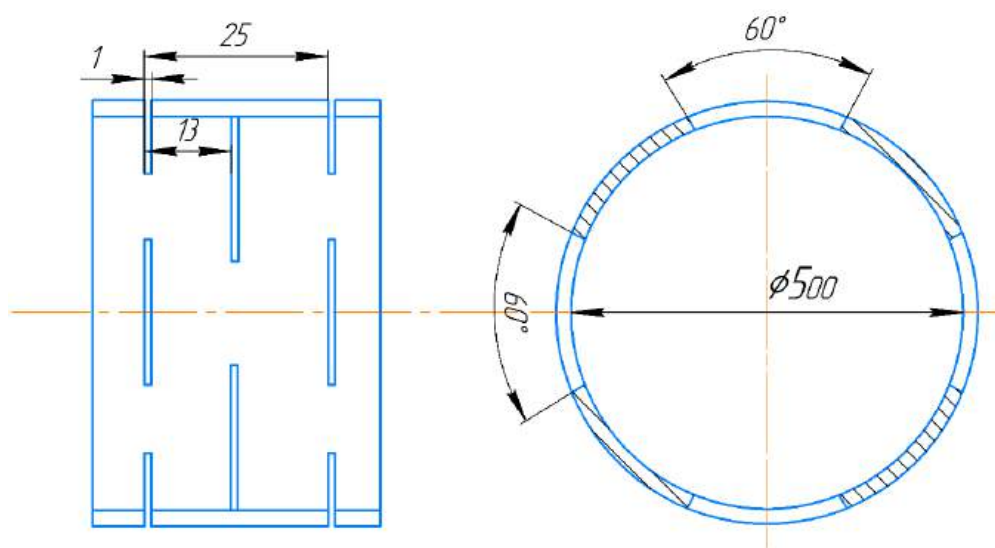


Рисунок 4.10 – Схема перфорації калібратора

Площа щілини перфорації,  $m^2$ :

$$f_{II} = \frac{\pi R n}{180} k = \frac{\pi \cdot 0,5 \cdot 60}{180} \cdot 0,001 = 0,00052$$

де  $n$  - кут між краями щілини;  $k$  - довжина щілини, м

Коефіцієнт перфорації, %:

$$\varphi = \frac{2 \cdot 4 \cdot N_{II} \cdot f_{II}}{F_{III}} \cdot 100\% = \frac{2 \cdot 4 \cdot 24 \cdot 0,00052}{0,948} \cdot 100 = 10,32$$

Таким чином, коефіцієнт перфорації складає 10,32% від усієї площі

теплообміну в зоні III.

#### 4.4.4 Визначення тягнучого зусилля в промисловому калібраторі

Відповідно до результатів отриманих в розділі 3.6 при виготовленні трубної заготовки, проведемо розрахунок тягнучого зусилля для труби діаметром 500 мм і товщиною стінки 30 мм.

З рівнянь (3.2) і (3.7) можна зробити припущення, що, оскільки діаметр трубної заготовки збільшено в 20 разів, а товщину стінки в 10, (в порівнянні зі зразком в розділі 3.6) то відповідно й зусилля входження має бути більшим, приблизно в 10 разів також,  $\Delta=2755,5$ . Тоді рівняння для розрахунку тягнучого зусилля набуде вигляду:

$$F_{fr} = \mu \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot P + 2755,5 \quad (4.1)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя полімеру;  $D$  - діаметр трубної заготовки, м;  $P$  - величина розрідження, кПа;  $L$  - довжина калібрувальної гільзи, м.

При роботі з промисловим калібратором використовувався поліпропілен у якого коефіцієнт тертя дорівнює 0,34. При довжині калібратора 880 мм, проведемо розрахунки.

$$\begin{aligned} F_{fr} &= \mu \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot P + 2755,5 = \\ &= 0,34 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 0,88 \cdot P + 2755,5 = 0,47 \cdot P + 2755,5 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Результати розрахунку тягнучого зусилля за рівнянням (4.2) наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Результати розрахунку тягнучого зусилля в залежності від розрідження при виробництві труби діаметром 500мм та швидкістю 8м/хв

Розрідження, кПа	0	20	40	50
Тягнуче зусилля, Н	2755,5	12150,38	21545,26	26242,7

Отримані результати можуть бути використані при виборі тягнучого пристрою що забезпечує задану продуктивність, а також дотримання допусків на геометричну форму виробу, відсутності дефектів на зовнішній поверхні труби та мінімізацію ризику обриву.

#### 4.4.5 Уточнений розрахунок довжини

Більш точний розрахунок можна виконати з використанням комп'ютерних методів розрахунку, що описано в роботі [посилання на роботу]. Розрахунок проводиться за алгоритмом, що зображено на рис. 4.11.

Розрахунок проводиться за вхідними параметрами, що розписані в таблиці 4.4.

Таблиця 4.3 Вихідні параметри для розрахунку

Параметр	Індекс	Значення
Матеріал калібрувальної гільзи		БрАЖ9–4
Внутрішній діаметр гільзи, мм	$D_{out}$	500
Товщина стінки трубної заготовки, мм	$S$	0,03
Матеріал трубної заготовки		Поліетилен високої густини марки НХF-4810Н
Швидкість калібрування, м/хв	$W$	8
Початкова температура охолоджуючої води, °C	$t_{lv}$	20
Кінцева температура охолоджуючої води, °C	$t_{2v}$	40
Температура трубної заготовки на вході в калібрувальну гільзу, °C	$t_{lp}$	250
Температура трубної заготовки на виході з калібрувальної гільзи, °C	$t_{2p}$	70
Температура склування полімеру, °C	$t_{sk}$	135

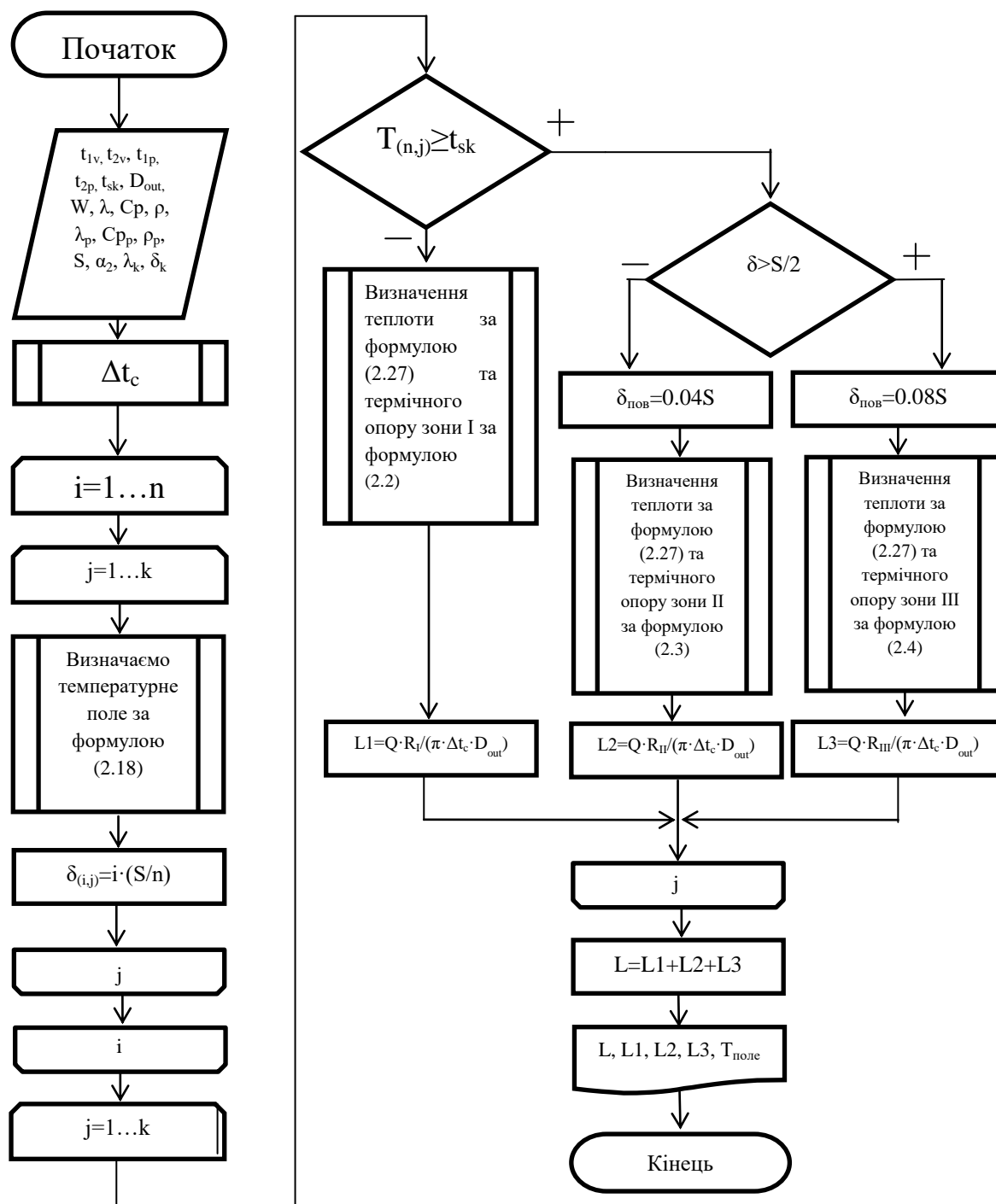


Рисунок 4.11 – Блок-схема розрахунку калібрувальної гільзи

Довжина калібрувальної гільзи, визначена за допомогою запропонованої методики, становить 0,862 м, що майже дорівнює довжині промислової

калібрувальної гільзи, яка складає 0,880 м. Відносна похибка розрахунку складає 2 %, що свідчить про високу точність методики і дозволяє рекомендувати її для визначення параметрів калібрувальних гільз.

#### **4.5. Ефективність від впровадження результатів дисертації**

##### **4.5.1. Соціальна**

Створення технологічних засад виробництва гладких труб з термопластів за допомогою модернізованого калібратора дозволить забезпечити ефективний теплообмін між трубною заготовкою та гільзою з одночасним зменшенням витрат води, як охолоджувача, що підвищить екологічну безпеку на виробництві.

##### **4.5.2. Технічна**

2.1 Можливість підвищення продуктивності промислової лінії виробництва (на 15 % для гладких труб діаметром 500 мм з термопластів) при суттєвому зниженні ризику утворення браку.

2.2 Підвищити надійність роботи калібратора, і тим самим зменшити кількість обривів при роботі лінії.

2.3 Запропонована конструкція калібрувальної гільзи дозволить зберегти якість та відсутність дефектності в продукції.

2.4 Розроблення технології, яка буде в нормальному режимі працювати при рециклінгу дозволить досягти суттєвої економії на матеріалі виробництва (не порушуючи при цьому технічні умови як виробу, так і виробництва).

##### **4.5.3. Економічна**

Розрахунок окупності проекту та повернення інвестицій.

Станом на 20.04.2024 за даними онлайн-магазину «Розетка» вартість 1 бухти (100м) поліетиленової гладкої труби діаметром 25мм - 1055грн. При цьому вартість

калібратора складає 19560\$ (Калібратор фірми Qingdao). За звичайний робочий день, при відсутності обривів й нормальній роботі, можна виготовити 24 бухти, тобто – 2400м труби. За середнього курсу 2024 року, при перерахунку, означає, що даний калібратор «заробляє» 633\$ в день, й окупається відповідно через 31 робочий ден.

При заміні ж даного калібратора, на модернізований, у якого робоча швидкість більша, й власне ціна за сам калібратор менша, отримаємо наступні результати. При ціні за калібратор в 5000\$, в день при ньому буде виготовлятись, при відсутності відривів, 31 бухта, або ж 3100м труби, що складає 817,6\$ в день. А це означає те, що через 6 робочих днів він окупить себе, що свідчить про більш швидке отримання прибутку.

Дані розрахунки ґрунтуються на ідеальній роботі і заміні лише однієї ланки виробничої лінії, а також продажу продукції після виготовлення. У разі непередбачуваних обставин, зупинок, виходу з ладу інших ланок лінії, повернення інвестицій можливе пізніше.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Обґрунтовано технологічну схему промислової установки одержання труб з термопластів.
2. Розроблено промислову конструкцію двозонного калібратора з продуктивністю до 8 м/хв та діаметром 500мм.
3. Отримані результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень використані при розробленні методики розрахунку калібраторів з адаптивним розрідженням для термопластів.
4. Сформульовано рекомендації щодо проектування калібрувального пристрою.
5. Підтверджено ефективність від впровадження результатів дослідження.

## Висновки

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі – підвищення ефективності теплообміну в калібрувальному пристрої при виробництві гладких труб, що забезпечує одержання продукції із заданими властивостями, зменшення витрат охолоджувальної води та мінімізації ризику обриву.

1. Обґрунтовано умови процесу теплообміну при склюванні термопластів з контрольованим термічним опором при контакті трубного профілю та робочої поверхні калібратора, що дозволить збільшити продуктивність трубних ліній до 15 % при збереженні якості виробу.

2. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що застосування калібратора з адаптивним нарощуванням розрідження дозволяє контролювати значення термічного опору між полімером та матеріалом калібрувальної гільзи, що дає можливість зменшити тертя між трубною заготовкою й стінкою внутрішньою стінкою калібру, зберігаючи при цьому якісний теплообмін.

3. Проведено числовий експеримент що дозволив визначити температурні поля в стінці трубної заготовки при охолодженні в калібраторі за різних швидкостей руху труби та різних значень термічного опору, та інтенсивність процесу склювання, а отже і раціональні параметри проведення процесу охолодження.

4. За результатами експериментальних та імітаційних досліджень одержано:

- відповідно до сформульованої методики, визначено значення максимального та мінімального розрідження при охолодженні полімерної труби діаметром 25 мм, які використано при розробці нової конструкції калібрувальної гільзи, для забезпечення контакту між полімером і металом і виключення обривів при виробництві;

- залежність для визначення зусилля протягування, що дозволить підібрати

раціональну величину зусилля протягування для уникнення обривності труб;

- залежності зміни температури з часом охолодження труб з ПЕВТ з товщиною стінки від 1 до 20 мм, що дозволяє визначити довжину ванни охолодження.

5. Результати експериментальних досліджень підтвердили положення фізичної та математичної моделей калібрування, що дозволило вдосконалити методику розрахунку калібраторів з зонами адаптивного розрідження включно з визначенням геометричних розмірів окремих зон калібраторів і заклало підґрунтя для забезпечення високої якості готової продукції шляхом більш коректного вибору режиму охолодження та величини тягнучого зусилля.

6. Експериментально підтверджена доцільність застосування адаптивного розрідження для контролю термічного опору між поверхнею трубної заготовки та стінки калібратора, шляхом створення заданого розміру повітряного зазору, що становить до  $8 (\pm 0,5) \%$  від товщини стінки трубного профілю.

7. За результатами досліджень удосконалена методика розрахунку калібратора, в основу якої покладена модель розрахунку температурних полів в стінках трубної заготовки, та сформульовано рекомендації щодо конструкції промислового апарата для труб діаметром 500мм й продуктивністю трубної лінії 8 м/хв.

8. За результатами досліджень запропоновано вдосконалену конструкцію калібруючого пристрою з адаптивним розрідженням.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський Політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

За матеріалами дисертації опубліковано 29 друкованих праць: 1 монографія, 7 статей, 3 з яких у наукових фахових виданнях України, 1 індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus й 1 іноземна, 3 патенти, 18 тез-доповідей у



міжнародних науково-практичних конференціях, а також 1 звіт з ініціативної теми.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

### Розділ 1

1. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Інжиніринг пакування та пакувального обладнання» спеціальності 131 «Прикладна механіка» та «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / І. О. Мікульонок. 2-ге вид., переробл. та доповн. ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 7,21 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 292 с. – Бібліогр.: с. 287–288. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084>

2. Анализ тенденций развития рынка (факторы влияния, проблемы развития) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://inventure.com.ua/analytics/investments/rynok-plastikovyh-trub-v-ukraine> за 19,06,2022

3. Виробництво труб в Україні впало на 38% р./р. у 2022 році. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://gmk.center/ua/infographic/vyrobnytstvo-trub-v-ukraini-vpalo-na-38-r-r-u-2022-rotsi/> за 24,09,2023

4. ВИРОБНИЦТВО ТРУБ В УКРАЇНІ ЗРОСЛО НА 10,2% Р./Р. У 2023 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://gmk.center/ua/infographic/vyrobnytstvo-trub-v-ukraini-zroslo-na-10-2-r-r-u-2023/> за 24,04,2024.

5. VC Pipe Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report by Material, by Type and Application : Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2022-2031 [Електронний ресурс]. – Режим доступу <https://www.alliedmarketresearch.com/pvc-pipes-market> за 19,02,2024

6. PVC Pipes Market (By Type: Post-chlorinated, Plasticized, Unplasticized; By Application: Sewerage, Plumbing, Water supply, Oil and Gas, Irrigation, Others; By End

User: Agriculture, Building and construction, Telecommunication, Others) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2023 – 2032 [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.precedenceresearch.com/pvc-pipes-market> за 20.02.2024

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

8. Сацердотов А.О., Подиман Г.С., Носов О.П., Двойнос Я.Г. (2018). Технологии сушки вторичного измельченного полиэтилена / Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2018. - № 4. – с. 69-72. ISSN 2413-7723

9. Новое на рынке: труба КОРСИС ПЛЮС. – Полимерные трубы – Украина, № 1, 2008.

10. Корпорация «Энергоресурс-инвест» представляет новую технологию производства крупно-габаритных изделий с пустотелой (сотовой) конструкцией стенки. – Полимерные трубы – Украина, № 3, 2007.

11. Piorkowska, E., & Galeski, A. (2002). Modeling of polymer crystallization in plates, pipes, and rods during cooling. *Journal of Applied Polymer Science*, 86(6), 1363–1372. doi:10.1002/app.11277

12. Ferrante, M., & Capponi, C. (2017). Viscoelastic models for the simulation of transients in polymeric pipes. *Journal of Hydraulic Research*, 55(5), 599–612. doi:10.1080/00221686.2017.1354935

13. Nguyen, K. Q., Mwiseneza, C., Mohamed, K., Cousin, P., Robert, M., & Benmokrane, B. (2021). Long-term testing methods for HDPE pipe - advantages and disadvantages: A review. *Engineering Fracture Mechanics*, 246, 107629. doi:10.1016/j.engfracmech.2021.107629

14. EN 1401-1:1998 Plastics piping systems for non-pressure underground drainage and sewerage. Unplasticized poly (vinylchloride) (PVC-U). Specifications for pipes, fittings and the system

15. ТУ У В.2.7-25.2-32926466-007:2012 "Трубы из полиэтилена защитные для

прокладки волоконно-оптических кабелей связи"

16. Третьяков А. Полимерные гофрированные трубы. – Полимеры – деньги, № 1, 2006.

17. Plastic Pipe Market Report: Trends, Forecast and Competitive Analysis [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.researchandmarkets.com/research/gw32ph/plastic\\_pipe?w=4](https://www.researchandmarkets.com/research/gw32ph/plastic_pipe?w=4) за 19,02,2019

18. Plastic Pipe Market Report 2018 - \$87 Billion Trends, Forecast and Competitive Analysis 2012-2023 - ResearchAndMarkets.com [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.businesswire.com/news/home/20180907005313/en/Plastic-Pipe-Market-Report-2018---87> за 19,02,2019

19. Шунькіна О. В. Аналітичний огляд ринку полімерних труб / О. В. Шунькіна // Вісник Львівської комерційної академії. Серія товарознавча. - 2013. - Вип. 13. - С. 101-104. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vlca\\_2013\\_13\\_29](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vlca_2013_13_29)

20. Підлісна О. А. Інноваційна реконструкція промисловості України в умовах сталого розвитку / О. А. Підлісна // Економічний вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". - 2017. - № 14. - С. 46-53. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/evntukpi\\_2017\\_14\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/evntukpi_2017_14_9)

21. Бойко О. М. Інноваційне забезпечення розвитку промислових підприємств УКРАЇНИ/ Рада по вивченню продуктивних сил України НАН України, Електронний ресурс [http://iee.org.ua/files/conf/conf\\_article19.pdf](http://iee.org.ua/files/conf/conf_article19.pdf)

22. Квак С. А. Пріоритетні галузі інноваційної діяльності промислових підприємств України / С. А. Квак // Наукові записки Львівського університету бізнесу та права. - 2011. - Вип. 6. - С. 51-57. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nzlubp\\_2011\\_6\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nzlubp_2011_6_14)

23. Физические и химические свойства полиэтилена. Химическая стойкость [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.vkpolymer.ru/materials/polyethylene> за 19,08,2018

24. Drobny, J. G. (2014). Handbook of Thermoplastic Elastomers. Велика

Британія: Elsevier Science. p. 464

25. Пивень А.Н., Гречаная Н.А., Чернобыльский И.И. Теплофизические свойства полимерных материалов. Справочник. / Пивень А.Н., Гречаная Н.А., Чернобыльский И.И. Издательское объединение «Вища школа», 1976, 180с.

26. Фиалко Н. М. Теплопроводность полимерных микро- и нанокомпозитов на основе полиэтилена при различных методах их получения / Н. М. Фиалко, Р. В. Динжос, Ю. В. Шеренковский, Н. О. Мерадова, Р. А. Навродская // Промышленная теплотехника. - 2017. - Т. 39, № 4. - С. 21-26. - Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/PTT\\_2017\\_39\\_4\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/PTT_2017_39_4_4).

27. Vlachopoulos, J., & Strutt, D. (2003). Polymer processing. Materials Science and Technology, 19(9), 1161–1169. doi:10.1179/026708303225004738

28. Промежуточный отчет УКРНИИПЛАСТМАШ за темой № 2151-80-35 «Исследования с целью сознания труб диаметром от 6 до 400мм, предназначенного для комплектования автоматизированных производств труб из ПЭ и НПВХ и обеспечивающего повышение производительности в 1,5-3 раза, снижение материалоемкости в 1,5 раза и повышение ресурса до первого кап.ремонта в 1,5 раза. Выдача рекомендаций.», Номер Госрегистрации: 80012856, дата регистрации 29.12.1980. Назва з екрана.— 110с.

29. Malpass, D. B. (2010). Introduction to Industrial Polyethylene: Properties, Catalysts, and Processes. Німеччина: Wiley. p. 156

30. Кіберпласт Україна <http://www.kyberplast.com.ua/> за 19,05,2021

31. O. Oblashi and R. Shimha, Macromolecules, 8, 206 (1975)

32. Godovsky, Y. K. (2012). Thermophysical Properties of Polymers. Німеччина: Springer Berlin Heidelberg. p. 300

33. Merah, N., Saghir, F., Khan, Z., & Bazoune, A. (2006). Effect of temperature on tensile properties of HDPE pipe material. Plastics, Rubber and Composites, 35(5), 226–230. doi:10.1179/174328906x103178

34. V. A. Bely, A. I. Sviridenok, M. I. Petrokovets (2013) Friction and Wear in

Polymer-Based Materials. Велика Британія: Elsevier Science. p. 426

35. Matthews, F., & Rawlings, R. (1999). Composite Materials ([edition unavailable]). Elsevier Science. Retrieved from <https://www.perlego.com/book/1899512/composite-materials-engineering-and-science-pdf> (Original work published 1999)

36. Новые горизонты производительности с экструдерами MONOS+. – Инженерные сети из полимерных материалов, № 3, 2007.

37. Бат П. Производственная линия нового поколения от фирмы «Krah AG». – Полимерные трубы – Украина, № 1, 2008.

38. Stegelmann, M., Lucas, P., & Modler, N. (2019). Design and extrusion of high-performance polyetherimide pipes with variable wall thickness for aircrafts. doi:10.1063/1.5084852

39. Walter Michaeli (1992). Extrusion Dies for Plastics and Rubber: Design and Engineering Computations. Computer Aided Engineering for Polymer Processing, SPE books, Society of plastics engineers, Hanser Publishers, 1992. – p. 340.

40. ДСТУ Б В.2.7-144:2007 Труби для мереж холодного та гарячого водопостачання із полівідходи у

41. Pat. 10107421 B2 (US) Int. B29 C48/88. Pipe/ Alan Wood, Horst Sandner – US 10107421 B2, appl. 07.02.2012; publ. 23.10.2018.

42. Pat. 20190063611 A1 (US) Int. F16 J15/168. Seal device for a negative pressure calibrating unit in an extrusion line/ Reinhard Klose – US 20190063611 A1, appl. 13.01.2017; publ. 28.02.2019.

43. Pat. 9868241 B1 (US) Int. B29 C48/09. Extrusion process for tubular member/ William A. Coulson – US 9868241 B1, appl. 05.09.2014; publ. 16.01.2018.

44. Pat. 102015119328B4 (DE) Int. B29 C48/907. Device and method that can be carried out for the extrusion of tubes with a circular cross-section/ Patentinhhaber gleich – DE 102015119328 B4, appl. 10.11.2015; publ. 19.01.2017.

45. Pat. 3124199 B1 (EP) Int. B29 C48/907, B29 C48/09 B29 C48/903 Infinitely

adjustable calibration sleeve for extruded plastic pipes / Brian Corley – EP 3124199 B1, appl. 26.07.2016; publ. 05.09.2018.

46. Pat. 3812123 A1 (EP) Int. B29 C48/904, B29 C48/903, B29 C48/907. Extrusion system and calibration device for use in an extrusion system for plastic pipes / Ulrich Neumann – EP 3812123 A1, appl. 20.10.2012; publ. 28.04.2021.

47. Pat. 102010045251 A1 (DE) Int. B29 C48/907, B29 C48/08, B29 C48/09, B29 C48/903 , B29 C2948/92619, B29 C2948/92923. Calibration sleeve for calibrating plastic pipes, has cylindrical tubular base form and diameter measurement variable by adjustment device, where sleeve is made of planar resilient steel sheet that is rolled up to cylinder / Erfinder wird später genannt werden – DE 102010045251 A1, appl. 14.09.2010; publ. 15.03.2012.

48. Pat. 2626188 B1(EP) Int. B65 G1/04. Adjustable calibration method/ Manfred Binder, Rudolf Schuster - EP 2626188 B1, appl. 29.10.2014; publ. 14.08.2013

49. Pat. 2860014 A1 (EP) Int. B29C48/908. Adjustable calibration device / Graf Hans Erhard - EP 2860014 A1, appl. 08.10.2014; publ. 15.04.2015.

50. Pipe extrusion calibrating sleeve [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.directindustry.com/prod/kuatro-plast/product-120555-1935865.html> за 19,05,2021

51. Pat. 3124199 B1 (EP) Int. B29C48/907. Infinitely adjustable calibration sleeve for extruded plastic pipes/ Brian Corley- EP 3124199 B1, appl. 26.07.2016; publ. 01.02.2017

52. About Plastic Pipe Extrusion Lines [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sarem.com.tr/en/2020/04/02/about-plastic-pipe-extrusion-lines/> за 21,05,2021

53. AcsCon – Calibration sleeves [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.conpro.de/files/calibration\\_sleeves\\_acs\\_e.pdf](https://www.conpro.de/files/calibration_sleeves_acs_e.pdf) за 21,05,2021

54. Woo, M. W., Wong, P., Tang, Y., Triacca, V., Gloor, P. E., Hrymak, A. N., & Hamielec, A. E. (1995). Melting behavior and thermal properties of high density polyethylene. *Polymer Engineering and Science*, 35(2), 151–156.

doi:10.1002/pen.760350205.

55. Marinho, V. A. D., Cesario, L. V., Costa, A. R. M., Carvalho, L. H., Almeida, T. G., & Canedo, E. L. (2019). Heat transfer coefficient in internal mixers for different polymers and processing conditions. *Chemical Engineering Research and Design*. doi:10.1016/j.cherd.2019.09.025

56. Carneiro, O. S., Nóbrega, J. M., Mota, A. R., & Silva, C. (2013). Prototype and methodology for the characterization of the polymer-calibrator interface heat transfer coefficient. *Polymer Testing*, 32(6), 1154–1161. doi:10.1016/j.polymertesting.2013.07.006

57. Boyer, S. A. E., Grolier, J.-P. E., Yoshida, H., Haudin, J.-M., & Chenot, J.-L. (2009). Phase transitions of polymers over T and P ranges under various hydraulic fluids: Polymer/supercritical gas systems and liquid to solid polymer transitions. *Journal of Molecular Liquids*, 147(1-2), 24–29. doi:10.1016/j.molliq.2009.01.016

58. Saengow, C., Giacomini, A. J., & Kositawong, C. (2015). Extruding plastic pipe from eccentric dies. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 223, 176–199. doi:10.1016/j.jnnfm.2015.05.009

59. R.G. Mammadov., R.Z. Novruzova (2018). Increasing the accuracy of the formation of a given thickness of polyethylene pipes for the production in extrusion lines. *IFAC PapersOnLine*, 51-30 (2018), 396-399. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.11.338

60. Nóbrega, J. M., Carneiro, O. S., Covas, J. A., Pinho, F. T., & Oliveira, P. J. (2004). Design of calibrators for extruded profiles. Part I: Modeling the thermal interchanges. *Polymer Engineering & Science*, 44(12), 2216–2228. doi:10.1002/pen.20249

61. Nóbrega, J. M., & Carneiro, O. S. (2006). Optimising cooling performance of calibrators for extruded profiles. *Plastics, Rubber and Composites*, 35(9), 387–392. doi:10.1179/174328906x128216

62. Habla, F., Fernandes, C., Maier, M., Densky, L., Ferrás, L. L., Rajkumar, A., ... Nóbrega, J. M. (2016). Development and validation of a model for the temperature distribution in the extrusion calibration stage. *Applied Thermal Engineering*, 100, 538–552. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.01.166



63. Li, X., Liu, F., Gong, N., Huang, P., & Yang, C. (2017). Enhancing the joining strength of injection-molded polymer-metal hybrids by rapid heating and cooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 386–393. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.06.034
64. Oro, M. V., & Bazzo, E. (2015). Flat heat pipes for potential application in fuel cell cooling. *Applied Thermal Engineering*, 90, 848–857. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.07.055
65. Shahin, A., Barsoum, I., & Islam, M. D. (2020). Constitutive model calibration of the time and temperature-dependent behavior of high density polyethylene. *Polymer Testing*, 106800. doi:10.1016/j.polymertesting.2020.106800
66. Stegelmann, M. , Muller, M. , Winkler, A. , Liebsch, A. and Modler, N. (2018) Polymer Analyses for an Adapted Process Design of the Pipe-Extrusion of Polyetherimide. *Materials Sciences and Applications*, 9, 614-624. doi: 10.4236/msa.2018.97044.
67. Ramu, A. G., Kim, S., Jeon, H., Al-Mohaimed, A. M., Al-onazi Wedad A., Sathishkumar, V. E., & Choi, D. (2021). A study on the optimization of residual stress distribution in the polyethylene and polyketone double layer pipes. *Journal of King Saud University - Science*, 33(6), 101547. doi:10.1016/j.jksus.2021.101547
68. Amjadi, M., & Fatemi, A. (2020). Creep and Fatigue Behaviors of High-Density Polyethylene (HDPE): Effects of Temperature, Mean Stress, Frequency, and Processing Technique. *International Journal of Fatigue*, 105871. doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.105871
69. Xia, Y., Jiang, N., Zhou, C., Meng, X., Luo, X., & Wu, T. (2021). Theoretical solution of the vibration response of the buried flexible HDPE pipe under impact load induced by rock blasting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 146, 106743. doi:10.1016/j.soildyn.2021.106743
70. Majid, F., & Elghorba, M. (2017). HDPE pipes failure analysis and damage modeling. *Engineering Failure Analysis*, 71, 157–165. doi:10.1016/j.engfailanal.2016.10.002
71. Pongthong, P., Kolutawong, C., & Giacomini, A. J. (2021). Cooling and annealing of plastic pipe. *Thermal Science and Engineering Progress*, 25, 100970.

doi:10.1016/j.tsep.2021.100970

72. Bassiouny, R., Ali, M. R. O., & Hassan, M. K. (2016). An idea to enhance the thermal performance of HDPE pipes used for ground-source applications. *Applied Thermal Engineering*, 109, 15–21. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.08.055

73. IntelliChange: економічно ефектний метод зміни діаметра труб. – Екструзія, № 4, 2005. 15. Бисеров В., Гвоздев І., Гориловський М., Швабауер В. Охолодження полімерних труб в процесі їх виробництва методом екструзії. – Полімерні труби – Україна, № 1, 2008.

## Розділ 2

74. Schwarz O., Ebeling F.-W., Furth B. *KunststoffVerarbeitung*, 7. uberarbeitete Auflage, Wurzburg: Vogel Buchverlag, 1997. 252 S.

75. 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.

76. Schwartz, Seymour S. (1982) *Plastics materials and processes* . – New York: Van Nostrand Reinhold, 1982. –р. 965.

77. Beesetty, P., kale, A., Patil, B., & Doddamani, M. (2020). Mechanical behavior of additively manufactured Nanoclay/HDPE nanocomposites. *Composite Structures*, 112442. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112442

78. Zheng, X., Zhang, X., Ma, L., Wang, W., & Yu, J. (2019). Mechanical characterization of notched high density polyethylene (HDPE) pipe: Testing and prediction. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. doi:10.1016/j.ijpvp.2019.04.016

79. Числові методи: навч. посібник / О.І. Ярошенко, М.В. Григорків. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2018. – 172 с..

80. Wang, X., Zhu, Y., Zhu, M., Zhu, Y., Fan, H., & Wang, Y. (2017). Thermal analysis and optimization of an ice and snow melting system using geothermy by super-long flexible heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 112, 1353–1363.

doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.11.007

81. Tasri, A., & Susilawati, A. (2019). Effect of cooling water temperature and space between cooling pipes of post-cooling system on temperature and thermal stress in mass concrete. *Journal of Building Engineering*, 100731. doi:10.1016/j.jobbe.2019.100731

82. Jeon, S., & Heinz, U. (2016). Introduction to Hydrodynamics. *Quark–Gluon Plasma* 5, 131–187. doi:10.1142/9789814663717\_0003

83. Характеристика материала БрАЖ9-4 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=1083](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1083) за 19,06,2020

84. Материаловедение и технология металлов / Под ред. Г. П. Фетисова – М.: Высшая школа, 2001. – 638 с

85. Технічні умови 2243-104-00203335-2005

86. Суберляк О.В., Баштанник П.І., Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів. – Київ.: 2006. - 270 с

87. Шидловський М.С. Нові матеріали: частина 1 - Структура і механічні властивості конструкційних полімерів та пластмас. [Текст]: Навчальний посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» спеціалізації «Динаміка і міцність машин» – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 192 с.

88. Лупан І. В. Комп'ютерні статистичні пакети : навч.-метод. посіб / І. В. Лупан, О. В. Авраменко. – Кіровоград : [б. в.], 2010. – 218 с.

89. Василенко О. А. Математично-статистичні методи аналізу у прикладних дослідженнях : навч. посіб. / О. А. Василенко, І. А. Сенча. – Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2011. – 166 с

### **Розділ 3**

90. Корнієнко, Я. М. Калібрування труб з поліпропілену [Електронний ресурс] : монографія / Я. М. Корнієнко, Г. С. Подиман, Я. Г. Двойнос ; КПІ імені Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,72 Мбайт). – Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2018 – 101 с. Назва з екрана.

[https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23759/1/Podyman\\_monograph.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23759/1/Podyman_monograph.pdf)

91. Специфікація поліетилену [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.knh.com.ua/uk/spetsyfikatsiya-polietylenu/> за 19,08,2019

92. Лукашова В. В., Мікульонок І. О., Радченко Л. Б. Екструзія пінополімерів [Текст] : монографія. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 175 с.

93. Сокольський О.Л. Числове моделювання впливу пристінного шару на процес течії полімеру в переробному обладнанні / О.Л. Сокольський, І.І. Івіцький, В.І. Сівецький, І.О. Мікульонок // Хімічна промисловість України. — 2013. — № 6. — С. 34–37.

94. Son, D. T., & Surówka, P. (2009). Hydrodynamics with Triangle Anomalies. *Physical Review Letters*, 103(19). doi:10.1103/physrevlett.103.191601

95. Kunststoff — Verarbeitung im Gespräch, 2 Extrusion, 3 unveränderte Auflage. BASF. 1986. 362 S.

96. Ануфриев В., Зверлин В. Машиностроительные аспекты производства гофрированных пластмассовых труб. Инженерные сети из полимерных материалов, № 3, 2005

97. ДСТУ Б В.2.5-32:2007 Труби безнапірні з поліпропілену, поліетилену, непластифікованого полівінілхлориду та фасонні вироби до них для зовнішніх мереж каналізації будинків і споруд та кабельної каналізації

98. ISO 4427-1:2019 Plastics piping systems for water supply and for drainage and sewerage under pressure — Polyethylene (PE) — Part 1: General

99. ISO 4427-2:2019 Plastics piping systems for water supply, and for drainage and sewerage under pressure — Polyethylene (PE) — Part 2: Pipes

100. Artyukhov, A., Artyukhova, N., & Ivaniia, A. (2018). Creation of software for constructive calculation of devices with active hydrodynamics. 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). doi:10.1109/tcset.ю2018.8336173

101. Haghi, A.K., Thomas, S., Palit, S., & Main, P. (Eds.). (2017). *Methodologies*

and Applications for Analytical and Physical Chemistry (1st ed.). Apple Academic Press.  
<https://doi.org/10.1201/9781315159539>

102. Киселев П.Г., Альтшуль А.Д., Данильченко Н.В., Каспарсон А.А., Кривченко Г.И., Пашков Н.Н., Слиский С.М. Справочник по гидравлическим расчетам. Под редакцией П.Г. Киселева. Изд. 4-е, переработ. и доп. М., «Энергия», 1972. – 312 с. с ил.

#### **Розділ 4**

103. Суберляк О.В., Баштанник П.І. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів. – Київ.: 2006. - 270 с.

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

105. Івіцький, Ігор Ігорович. "ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ПОЛІМЕРУ У ШНЕКУ ПЕРЕРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ." N 34 Innovative approaches to the development of science [text]: Materials (2018): 195.

106. Atwater, M. (2018). Materials and Manufacturing: An Introduction to How They Work and Why it Matters. Сполучені Штати Америки: McGraw Hill LLC. p.704

107. Szarvasy L et al. Computer aided optimization of profile extrusion dies. International Polymer Processing, the journal of the Polymer Processing Society. 2000;15(1):28-39.

108. Chris Rauwendaal. Polymer Extrusion 5E. Hanser Publications; 5th edition, 2014. - p. 934.

109. Патент №120801 Україна МПК В29С 55/00, В29С 47/90 (2006.01). Калібратор / Подиман Григорій Сергійович (UA ); Двойнос Ярослав Григорович (UA ) – u201700298 заявл. 11.01.2017, опубл. 27.11.2017, бюл. № 22/2017

110. Заявка на винахід Україна МПК. Калібратор / Подиман Григорій Сергійович (UA ); Двойнос Ярослав Григорович (UA ) – а 2019 07193 заявл. 27.06.2019.

111. Лашинский А.А., Толщинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. Л: Машиностроение. 1970 – 752 с
112. Справочник по гидравлике. Под редакцией Большакова В.А. Киев, издательское объединение «Вища школа», 1977, 280с.
113. Мікульонюк І.О. Переробка вторинної сировини екструзією: Монографія / І.О. Мікульонюк, Л.Б. Радченко. — К. : ІВЦ «Видавництво „Політехніка»», 2006. — 184 с.
114. Vlachopoulos J, Fattamann G. The Role of Rheology in Polymer Extrusion. Hamilton, ON, Canada: Department of Chemical Engineering, McMaster University, Polydynamics, Inc.; 2015
115. Deineha, I., Maslov, A., Potryvaieva, N., Verbivska, L., Koliadych, O. Institutional Environment Tools for Small and Medium-Sized Enterprises Development. Estudios de Economia Aplicada, 2021, 39(3), 4798..
116. Подиман Г.С., Двойнос Я.Г., Рудницький Б.А. / Розрахунок теплообмінних процесів при каландруванні листів з поліетилену. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження» – 2020. - №4. – с.9-16. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2020.219779>
117. Подиман Г.С., Гребельюк І. В., Двойнос Я. Г. Оцінка впливу температурної неоднорідності розплаву на екструзію труб з ПЕТ. Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2018, - №1, - с. 11–17. <https://doi.org/10.20535/2306-1626.1.2018.143370>
118. Podyman H.S., Dvoynos Y.H., Rudnytskyi B.A. Calculation of the system of thermal stabilization of shafts when calendering sheets of thermoplastics. Modern engineering and innovative technologies, Issue 14 / Part 1, pp 23-27, 2020; DOI: 10.30890/2567-5273.2020-14-01-050
119. Подиман Г.С., Крестошина О.П., Бишко М.А. , Двойнос Я.Г. Метод імітаційного моделювання для проектування апаратів з мішалкою. Вісник

Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2019, - №1, - с.31-35. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171026>

120. Podyman H.S., Dvoinos Y.H., Novik V.A. Modeling the Homogenization Process of Polyethylene Compositions in a Single-Screw Extruder with a Maddock Mixing Element. *Mechanics of Composite Materials*. - 2021, - Vol. 57, No. 4, pp 517-526 (ISSN: 0191-5665 | eISSN: 1573-8922). <https://doi.org/10.1007/s11029-021-09974-x>

## Додатки



### Додаток А. Оцінка похибок вимірювання

Методика оцінювання похибок вимірювання описана в [113]

Для оцінки достовірності отриманих даних проаналізуємо похибки вимірювань. Граничні абсолютні та відносні помилки позначаємо відповідно через  $\varepsilon$  та  $\delta$ .

Якщо непрямовимірювана величина  $Y$  є функцією величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$  вимірюваних прямим способом, то згідно теорії похибок [114] гранична абсолютна похибка при визначенні  $Y$  рівна.

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

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

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

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

Гранична відносна похибка при визначенні  $Y$  буде рівною:

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

#### А 1. Обробка прямих вимірювань

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

Таблиця А.1 - Значення замірів зусилля та тиску.

$F_{fr}$ , Н	$P$ , бар
55,95	0,19
56	0,2
56	0,2
56,02	0,2
56,06	0,2
55,86	0,18

На манометрі нанесено значення інструментальної похибки і вони становлять:

$$\Delta_a = 0,05 \text{ бар}$$

На динамометри нанесено значення інструментальної похибки і вони становлять:

$$\Delta_\delta = 0,01 \text{ Н}$$

Для заданої довірительної ймовірності  $\alpha=98\%$  і кількості вимірів  $N=5$  визначаємо коефіцієнт довіри  $t_{98,5}=4,54$

Розрахуємо середнє значення:

$$\langle F_{fr} \rangle = \frac{\sum_{n=1}^N F_{fr_n}}{N} = \frac{55,95 + 56 + 56 + 56,02 + 55,86}{5} = 55,966$$

$$\langle P \rangle = \frac{\sum_{n=1}^N P_n}{N} = \frac{0,19 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,18}{5} = 0,194$$

Знаходимо середнє квадратичне відхилення розрахунків:

$$S_{F_{fr}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (F_{fr_n} - \langle F_{fr} \rangle)^2}{N-1}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(55,95 - 55,97)^2 + (56 - 55,97)^2 + (56 - 55,97)^2 + (56,02 - 55,97)^2 + (55,86 - 55,97)^2}{5-1}} = 0,065$$

$$S_P = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (P_n - \langle P \rangle)^2}{N-1}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(0,19 - 0,194)^2 + (0,2 - 0,194)^2 + (0,2 - 0,194)^2 + (0,2 - 0,194)^2 + (0,18 - 0,194)^2}{5-1}} = 0,0089$$

Розраховуємо випадкову складову похибки:

$$S_{\langle F_{fr} \rangle} = \frac{S_{F_{fr}}}{\sqrt{N}} = \frac{0,065}{\sqrt{5}} = 0,029 \text{ Н}$$

$$\Delta_{F_{fr}} = t_{\alpha:N} \cdot S_{\langle F_{fr} \rangle} = 4,54 \cdot 0,029 = 0,132H$$

$$S_{\langle P \rangle} = \frac{S_P}{\sqrt{N}} = \frac{0,0089}{\sqrt{5}} = 0,004 \text{ бар}$$

$$\Delta_P = t_{\alpha:N} \cdot S_{\langle P \rangle} = 4,54 \cdot 0,004 = 0,0182 \text{ бар}$$

Розрахуємо повну похибку.

Абсолютну:

$$\Delta F_{fr} = \sqrt{\Delta_{\delta}^2 + \Delta_{F_{fr}}^2} = \sqrt{0,01^2 + 0,132^2} = 0,166$$

$$\Delta P = \sqrt{\Delta_a^2 + \Delta_P^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,0182^2} = 0,0532 \text{ бар}$$

Відносно:

$$\delta_{F_{fr}} = \frac{\Delta F_{fr}}{\langle F_{fr} \rangle} = \frac{0,166}{55,86} = 0,29 \cdot 10^{-3} \approx 1\%$$

$$\delta_P = \frac{\Delta P}{\langle P \rangle} = \frac{0,0532}{0,194} = 0,274 \approx 27,4\%$$

Після округлень результат вимірювання тиску та зусилля записуємо у вигляді:

$$F_{fr} = 55,966 \pm 0,0166; \quad \delta \approx 1\%; \quad \alpha = 98\%$$

$$P = 0,194 \pm 0,0532; \quad \delta \approx 27,4\%; \quad \alpha = 98\%$$

А 2. Визначення похибки непрямих вимірювань:

Продуктивність установки по розплаву визначали:

$$G_P = \frac{g}{\tau} \tag{A.4}$$

де  $g$  – вага розплаву за одиницю часу, кг.

Гранична відносна похибка вимірювання продуктивності рівна

$$\delta_{G_P} = \frac{\sqrt{\left(\frac{g}{\tau^2} \cdot \varepsilon_\tau\right)^2 + \left(\frac{1}{\tau^2} \cdot \varepsilon_g\right)^2}}{\frac{g}{\tau}} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_\tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_g}{g}\right)^2} \tag{A.5}$$

де  $\varepsilon_\tau = 0,5\text{ с}$  та  $\varepsilon_g = 0,0023\text{ кг}$

Тоді для продуктивності в 40 кг/год:

$$\delta_{G_p} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_\tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_g}{\tau}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,2}{60}\right)^2 + \left(\frac{0,0023}{60}\right)^2} \cdot 100\% \approx 1\%$$

А 3. Для оцінки похибки між теоретичними і експериментальними даними скористаємось методикою наведеною в [54]:

Визначаємо величину  $\Delta_i$ :

$$\Delta_i = \sqrt{\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y_i}{y_i}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{20}{50}\right)^2 + \left(\frac{20}{49}\right)^2} = 0,59$$

де  $\Delta x_i$  – похибка між експериментальними даними та результатами розрахунку за математичною моделлю;  $x_i$  – значення обертів в точці за розрахунковими даними;  $\Delta y_i$  – похибка між експериментальними даними та результатами розрахунку за математичною моделлю по вісі продуктивності в  $i$  точці;  $y_i$  – значення продуктивності  $i$  в точці за розрахунковими даними;

Величини похибок знаходимо з рисунку 4.2.

Визначаємо величину  $\Delta_\delta$ :

$$\Delta_\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = 0,0831,$$

де  $n$  – кількість дослідних точок

Загальна похибка для серії вимірювань буде:

$$\delta = \Delta_\delta \cdot 100\% = 0,0831 \cdot 100 = 8,31\%.$$

## **ДОДАТОК Б**

**Програма розрахунку температурних полів та тиску розрідження**

На рисунках Б.1а представлена блок-схема до розрахунку температурних полів та тиску розрідження.

Вхідні дані вводяться в блоці 1, а в блоці 2 задаються кроки розрахунку сітки по часу та товщині стінки.

Далі проходить обчислення температур на внутрішній поверхні полімерної заготовки в блоці 4. Потім в блоці 6 проводиться розрахунок температури в середині трубної заготовки, а в блоці 8 ведеться визначення температури на зовнішній поверхні, закриваючи розрахунок температурних полів.

Після введення нових початкових параметрів для розрахунку тиску в блоці 11, проводиться розрахунок деформацій усадки.

Далі, в блоці 14, проводиться порівняння впливу пружних чи пластичних деформацій, після чого проводиться присвоєння необхідного тиску розрідження, що розраховується за урахуванням впливу деформацій.

У блоці 19 відбувається виведення отриманих результатів і закінчується розрахунок.

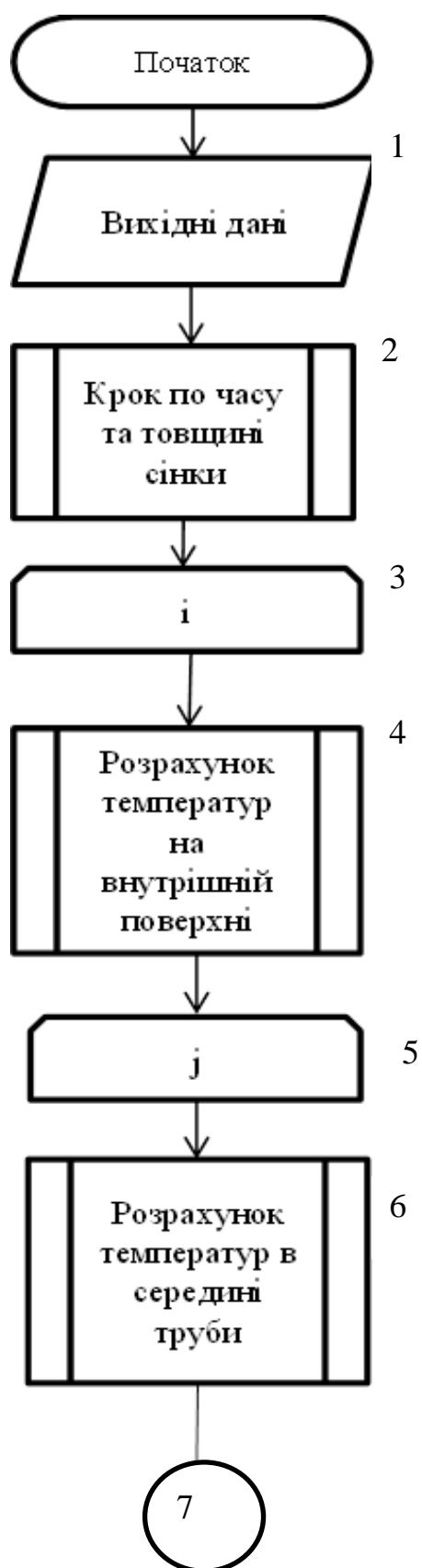


Рисунок Б.1 – Блок-схема до температурних полів та тиску розрідження

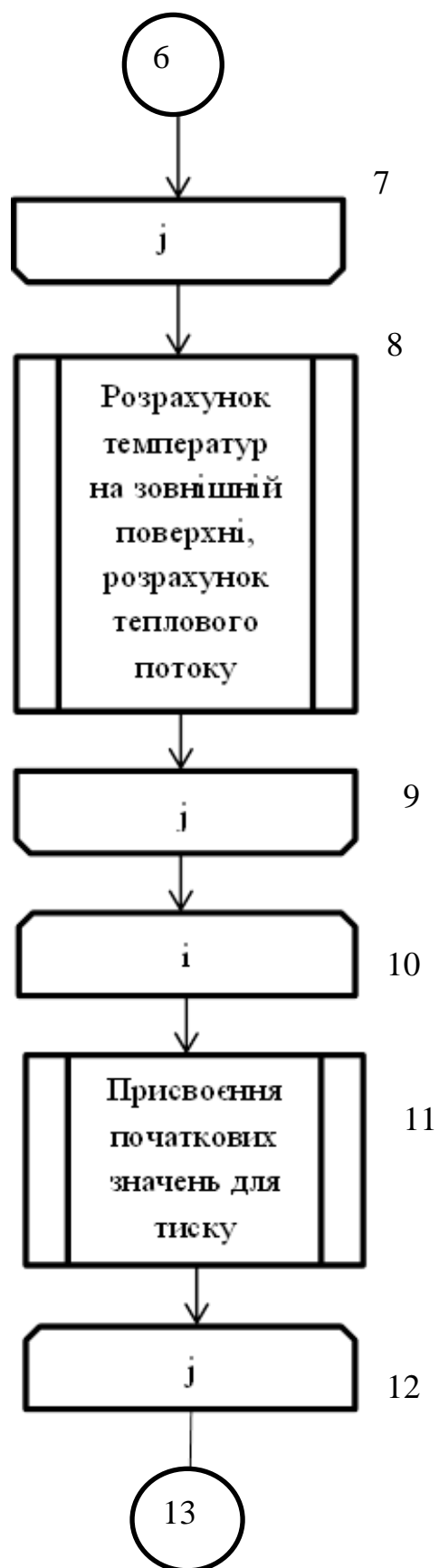


Рисунок Б.1 – Блок-схема до температурних полів та тиску розрідження (продовження)





Рисунок Б.1 – Блок-схема до температурних полів та тиску розрідження (продовження)

Код програми для розрахунку температурних полів та тиску розрідження

```
# -*- coding: cp1251 -*-  
# Внутрішня задача теплообміну  
import matplotlib.pyplot as plt  
import numpy as np  
import math as math  
fas = open('text.txt', 'w')  
fast='cerce'  
  
T1=[]  
T2=[]  
T3=[]  
Tsr=[]  
temp=0  
r=[]  
LAMM=[]  
roM=[]  
CpM=[]  
temp1=1.0  
temp2=1.0  
pi=3.1415926535  
R4=0.0002  
z=0.0  
i=1  
j=1  
f=0.01  
ff=0
```

jkkm=11

# Діаметр гільзи калібратора, м

Dkalin=0.025

Rkalin=Dkalin/2

# Товщина стінки труби, що калібрується, м

Str=0.0024

# Кількість розбиття по товщині труби, шт. (50)

k=100

# Довжина калібруючої гільзи, м

Lk=0.22

# Шаг сітки вздовж труби, м (0.00002)

dz=0.00005

# Шаг сітки по товщині труби, м

dr=Str/(k-1)

jkkk=int(Lk/dz)

jkkm=1

# Зовнішній діаметр калібруючої гільзи, м

Dkalout=Dkalin+0.0035

Rwall=Dkalout/2

ln=math.log(Rwall/Rkalin)

rin=Rkalin-Str

# Швидкість калібрування (протягування труби), м/с

W=6.5/60

# Температура розплаву на вході в калібратор, град. С

Tr=210.0

# Температура води, що охолоджує калібратор, град. С

```

Tcool=20.0
# Коефіцієнт тепловіддачі від стінки калібратора до
# води, що охолоджує калібратор, Вт/(м2 x град) 2654
Alfa1=891
Alfa2=12.14
# Коефіцієнт теплопровідності матеріалу гільзи калібратора, Вт/(м x град.)
LAMkal=56

# Густина поліетилену, кг/м3
tro=np.array([0,13.5,38.8,61.3,80,102,124.2,142,163.8,170.6,173.5,174.2,210,250]
) # Табличні значення температури
rot=np.array([862,862,859,857,851,844,828,810,793,758,750,741,702,702]) #
Табличні значення для густини
def ro(T):
    return np.interp(T,tro,rot)
# Теплоємність поліетилену, Дж/(кг x К)
tCp=np.array([0,13.5,38.8,61.3,80,102,124.2,142,163.8,170.6,173.5,174.2,210,250
]) # Табличні значення температури
Cpt=np.array([1810,1810,1840,1940,1990,2160,2610,3280,5400,9770,2930,2420,
3810,3810]) # Табличні значення для теплоємності
def Cp(T):
    return np.interp(T,tCp,Cpt)
# Теплопровідність поліетилену, Дж/(кг x К)
tLam=np.array([0,13.5,38.8,61.3,80,102,124.2,142,163.8,170.6,173.5,174.2,210,25
0]) # Табличні значення температури
Lamt=np.array([0.193,0.193,0.194,0.194,0.195,0.195,0.194,0.188,0.168,0.160,0.20
5,0.214,0.237,0.237]) # Табличні значення для теплопровідності
def Lam(T):

```

```

return np.interp(T,tLam,Lamt)
for i in range (0,k+2):
    T1.append(0)
    T2.append(0)
    T3.append(0)
    r.append(0)
    #print i,T1[i-1],T2[i-1],T3[i-1]
for i in range (1,k+1):
    T1.insert(i,Tp)#-5*i)
    r.insert(i,rin+(i-1)*dr)
for i in range (0,k+2):
    print i,T1[i],r[i]
for i in range (0,jkk+2):
    Tsr.append(0)
plt.ion() #interactive mode on
fig1 = plt.figure(figsize=(15, 9))
plt.show(block=False)
plt.axis([(Dkalin/2-Str), Dkalin/2, 20.0, 220])
plt.tick_params(labelsize=14,pad=10, grid_alpha=1)
plt.grid(True)
#print "z=",z, T2[1],T2[k]
print 'Шаг по часу, с'+str(round(j*dz/W,5))
title1=u'Час перебування в калібраторі (шаг 0,2 с), с :'+str(round(j*dz/W,1))
plt.title(title1,fontsize=16,pad=15)
plt.plot(r[1:k+1],T1[1:k+1],color='k',linewidth=1)
plt.scatter (r[1:k+1],T1[1:k+1],20,color='k')
plt.scatter (r[1:k+1],T1[1:k+1],4,color='w')
plt.ylabel(u'Температура розплаву, град. C',fontsize=16,labelpad=12)

```

```

plt.xlabel('Поточний радіус стінки труби, що калібрується,
м',fontsize=16,labelpad=12)
plt.pause(0.1)
for j in range(1,jkkk+2):
    temp1=(T1[2]-T1[1])/(dr**2)+(T1[2]-T1[1])/(r[1]*dr)
    temp2=(2*Lam(T1[1])*dz)/(ro(T1[1])*Cp(T1[1])*W)
    T2.insert(1,(T1[1]+temp1*temp2))
    #print T2[1]
    #print "-----"
    for i in range(2,k):
        temp1=(T1[i-1]-2*T1[i]+T1[i+1])/(dr**2)+(T1[i+1]-T1[i-1])/(2*r[i])
        temp2=(Lam(T1[i])*dz)/(ro(T1[i])*Cp(T1[i])*W)
        T2.insert(i,(T1[i]+temp1*temp2))
    q=(Tcool-T1[k])*(Alfa1)
    temp1=(T1[k-1]-T1[k])/(dr**2)+(T1[k]-T1[k-1])/(Dkalin*dr)
    temp2=(2*Lam(T1[k])*dz)/(ro(T1[k])*Cp(T1[k])*W)
    T2.insert(k,(T1[k]+temp1*temp2+(2*q*dz)/(ro(T1[k])*Cp(T1[k])*W*dr)))
    if j%(int(jkkk/10))==0:
        temp=0
        for i in range(1,k+1):
            temp=temp+T1[i]
        Tsr.insert(jkkm,temp/k)
        print "z=",z, Tsr[jkkm],T1[1]
        title1=u'Час перебування в калібраторі (шаг 0,2 с), с :'+str(round(j*dz/W,1))
        title2=u'), с :'+str(round(j*dz/W,2))
        title2=u'), с :'+str(round(j*dz/W,2))
        plt.title(title1,fontsize=16,pad=15)
        plt.plot(r[1:k+1],T1[1:k+1],color='k',linewidth=1)

```

```

plt.scatter (r[1:k+1],T1[1:k+1],20,color='k')
plt.scatter (r[1:k+1],T1[1:k+1],4,color='w')
plt.ylabel(u'Температура розплаву, град. С',fontsize=16,labelpad=12)
plt.xlabel(u'Поточний радіус стінки труби, що калібрується,
м',fontsize=16,labelpad=12)
plt.pause(0.1)

fas.write(str(round(j*dz/W,1))+'\n')
for i in range (1,k+1):
    fast=str(round(T1[i],3))
    fas.write(fast+'\n')

for i in range(1,k+1):
    T1.insert(i,T2[i])
    z=z+dz
for i in range(1,k+1):
    print i,T1[i],r[i]
fig1.savefig('18')
plt.close(fig1)

fas.close()

#-----

#fig1 = plt.figure(figsize=(11, 9))
#plt.show(block=False)
#plt.axis([20, 220, 700, 865])
#plt.tick_params(labelsize=16,pad=10, grid_alpha=1)
#plt.grid(True)

```

```

#title2=u'Теплоємність поліетилену'
#plt.title(title2,fontsize=20,pad=15)
#plt.ylabel(u'Теплоємність поліетилену, Дж/(кг x К)',fontsize=20,labelpad=20)
#plt.xlabel(u'Температура поліетилену, град. С',fontsize=20,labelpad=14)
#for i in range(0,12):
# T1[i]=20*i
# CpM.append(0.1)
# CpM[i]=Cp(T1[i])
#plt.plot (T1[1:12],CpM[1:12],color='k')
#plt.pause(2)
#fig1.savefig('17')
#plt.close(fig1)

```

Тиск

```

# -*- coding: cp1251 -*-
# Внутрішня задача теплообміну
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import math as math
ffp = open('text.txt', 'r')

#Коефіцієнт температурного розширення HDPE
alfat=2.3/10000
r=[]
LAMM=[]
roM=[]
CpM=[]

```



```

pi=3.1415926535
z=0.0
i=1
j=1
data='csd'
data1=[]
data2=[]
# Діаметр гільзи калібратора, м
Dkalin=0.025
Rkalin=Dkalin/2
# Товщина стінки труби, що калібрується, м
Str=0.0024
rin=Rkalin-Str
# Швидкість калібрування (протягування труби), м/с
W=0.11
# Температура розплаву на вході в калібратор, град. С
Tp=210.0
# Кількість розбиття по товщині труби, шт.
k=100
# Шаг сітки вздовж труби, м
dz=0.00001
# Шаг сітки по товщині труби, м
dr=Str/(k-1)
# Густина поліетилену, кг/м3
tro=np.array([0,13.5,38.8,61.3,80,102,124.2,142,163.8,170.6,173.5,174.2,210,250]
) # Табличні значення температури
rot=np.array([862,862,859,857,851,844,828,810,793,758,750,741,702,702]) #
Табличні значення для густини

```

```

def ro(T):
    return np.interp(T,tro,rot)
# Модуль пружності поліетилену, МПа
tE=np.array([0,23,40,50,70,140]) # Табличні значення температури
ZNE=np.array([923,670,407,291,223,0]) # Табличні значення модуля
пружності
def EROZ(T):
    return np.interp(T,tE,ZNE)*10**6
# межа плинності поліетилену, МПа
tPL=np.array([0,23,40,50,70,140]) # Табличні значення температури
ZPL=np.array([29,23,16,14,9,0]) # Табличні значення для межі плинності
def PLROZ(T):
    return np.interp(T,tPL,ZPL)*10**6
def PPL(temper,rad):
    return (EROZ(temper)/(0.83*rad/dr))*(((ro(temper))/ro(Tp))**(0.333)-1-
alfat*(Tp-temper))
def PYS(temper,rad):
    return(2*PLROZ(temper)*dr)/(2*rad)

for i in range (0,150):
    data1.append(0.0)
    data2.append(0.0)
    r.append(0.0)

for i in range(1,11):
    pzaggg1=0.0
    pzaggg2=0.0
    data=ffp.readline()

```

```

data1[i]=float(data)
#print data1[i]
for j in range(1,101):
    data2[0]=Tp
    data=ffp.readline()
    data2[j]=float(data)
    #print ' ',data2[j]
    # Тиск на шарі, Па
    pzaggg1=pzaggg1+PPL((data2[j]+data2[j-1])/2,rin+dr*(j-1))
    print pzaggg1

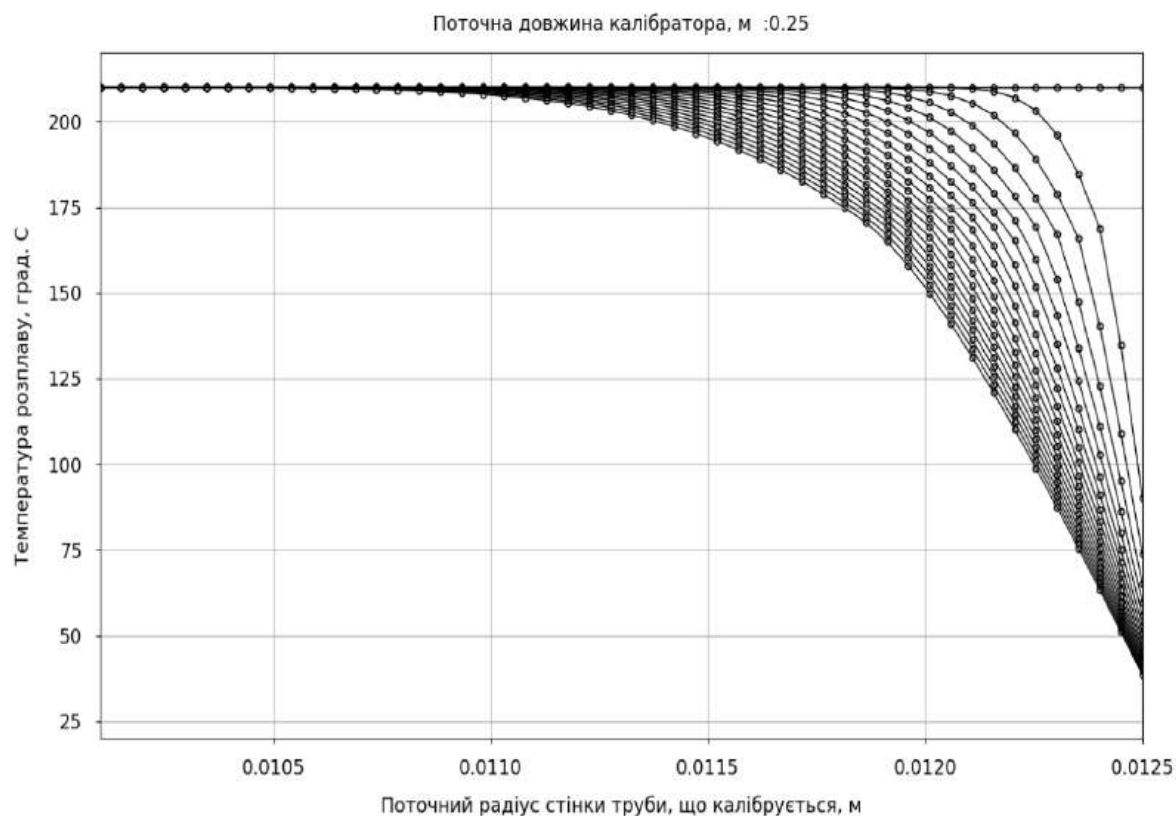
for i in range(1,11):
    print data1[i]

print "
print data2[0]

ffp.close()

```

## Результати програми



t,сек	Тиск на шарі, Па
0,2	373,5153
0,3	3374,048
0,4	8024,884
0,5	13321,49
0,6	19086,5
0,7	25226,89
0,8	31684,02
0,9	38417,03
1	45395,6
1,1	52596,2
1,2	60000
1,3	67591,5
1,36	72231,02

В таблиці Б.1 наведені ідентифікатори до програми розрахунку продуктивності дискового екструдера.

Таблиця Б.1 – Ідентифікатори до програми розрахунку продуктивності дискового екструдера.

Найменування	Позначення одиниць величини	Ідентифікатор	Одиниці виміру
Діаметр гільзи калібратора	D <sub>к</sub>	D <sub>kalin</sub>	м
Зовнішній діаметр калібруючої гільзи	D	D <sub>kalous</sub>	м
Радіус гільзи калібратора	R <sub>к</sub>	R <sub>kalin</sub>	м
Зовнішній радіус калібруючої гільзи	R <sub>ст</sub>	R <sub>wall</sub>	м
Товщина стінки труби, що калібрується	S <sub>тр</sub>	S <sub>tr</sub>	м
Довжина калібруючої гільзи	L <sub>к</sub>	L <sub>k</sub>	м
Швидкість калібрування (протягування труби)	W	W	м/с
Температура розплаву на вході в калібратор	T <sub>р</sub>	T <sub>p</sub>	°C
Температура води, що охолоджує калібратор	T <sub>ох</sub>	T <sub>cool</sub>	°C
Коефіцієнт тепловіддачі від стінки калібратора до води, що охолоджує калібратор	$\alpha_l$	Alfa <sub>l</sub>	Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)

Коефіцієнт теплопровідності матеріалу гільзи калібратора	$\lambda_{\text{кал}}$	LAMkal	Вт/(м·°C)
Густина поліетилену	$\rho(t)$	ro(T)	кг/м <sup>3</sup>
Теплоємність поліетилену	$C_p(t)$	Cp(T)	Дж/(кг·K)
Теплопровідність поліетилену	$\lambda(t)$	Lam(T)	Дж/(кг·K)
Модуль пружності поліетилену	$E(t)$	EROZ(T)	МПа
Межа текучості	$\sigma(t)$	PLROZ(T)	МПа

## **ДОДАТОК В**

**Програма гідравлічного розрахунку тиску в гвинтовому каналі калібратора**

Вхідні дані вводяться в блоці 1, а в блоці 2 задаються висота і ширина спіральної канавки для охолоджувальної рідини на калібраторі в зонах 1 та 2.

Далі проходить обчислення довжини канавки, швидкості рідини, Рейнольдса в блоці 3. Далі в блоці 4 проводиться порівняння отриманого тиску з розрахунковий, завдяки чому, далі визначаються каші висота й ширина гвинтового каналу в блоці 5

Виведення результатів розрахунку в блоці 6.



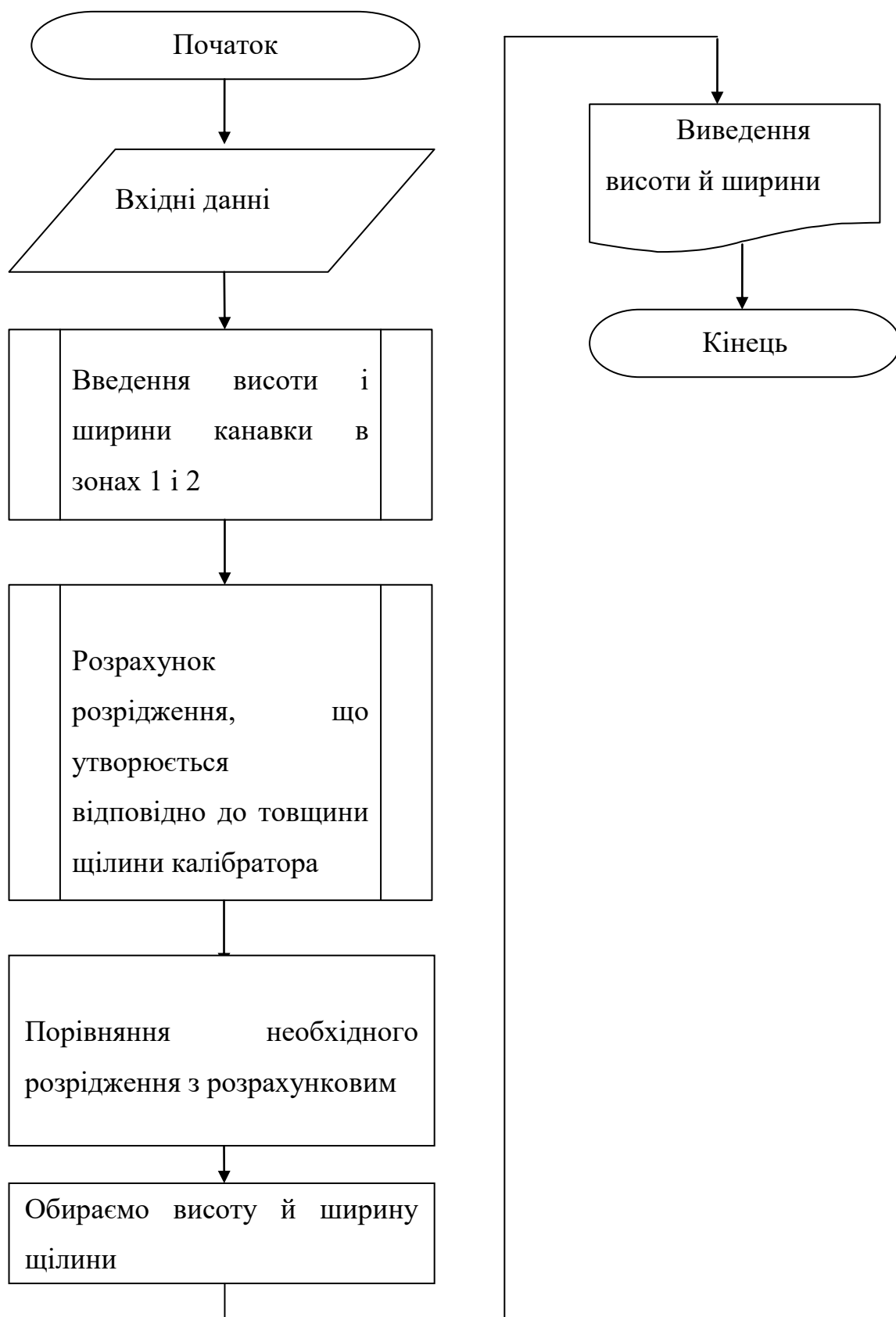


Рисунок В.1 – Блок-схема гідравлічного розрахунку тиску в гвинтовому каналі калібратора

Код програми для розрахунку температурних полів та тиску розрідження з результатами розрахунку

$$\Delta p_{\text{treba}} := 2.2 \cdot 10^4$$

$$Q := \frac{5}{60} \cdot 10^{(-3)} \quad i := 1 \dots 100$$

$$\mu := 0.075 \quad \nu := 1.006 \cdot 10^{(-6)}$$

$$b_i := 0.001 \cdot \frac{i}{10}$$

$$k := 1 \quad d := 0.025$$

$$h_i := k \cdot b_i$$

$$t_i := 2 \cdot b_i$$

$$n_{\text{vit}_i} := \frac{1}{t_i} = \dots$$

$$L_i := \left[ l^2 + \left[ \pi \cdot \left( d + h_i \right) \cdot \frac{1}{t_i} \right]^2 \right]^{0.5} = \dots$$

$$W_i := \frac{Q}{b_i \cdot h_i} = \dots$$

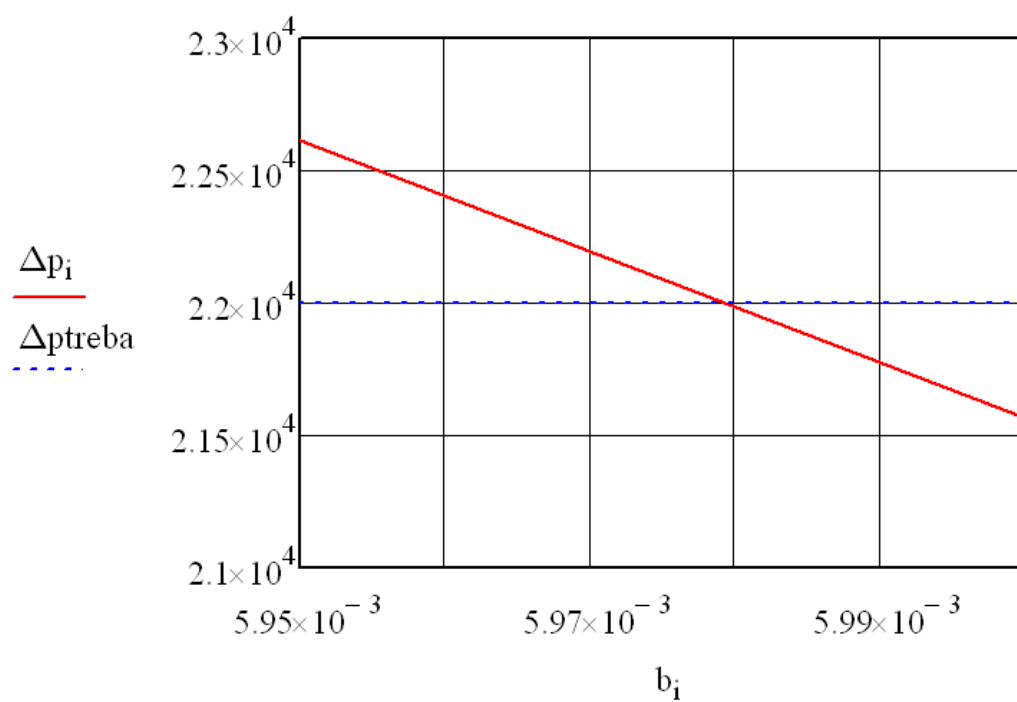
$$\text{dek}v_i := \frac{4 \cdot b_i \cdot h_i}{\left( 2 \cdot b_i + 2 \cdot h_i \right)} = \dots$$

$$\text{Re}_i := \frac{W_i \cdot \text{dek}v_i}{\nu} = \dots$$

$$\psi_i := \frac{0.856}{\left( \text{Re}_i \right)^{0.25}} = \dots$$

$$\psi_i := \frac{0.856}{\left( \text{Re}_i \right)^{0.25}} = \dots$$

$$\Delta p_i := \frac{\psi_i \cdot L_i \cdot \left( W_i \right)^2 \cdot 996.95}{2 \cdot \text{dek}v_i}$$



$$kq_1 := 1 \quad br_1 := 5.98 \cdot 10^{-3}$$

$$brozr := br_1 \quad hrozr := kq_1 \cdot brozr$$

$$Cp := 4.185 \cdot 10^3 \quad \mu := 1.002 \cdot 10^{-3} \quad \lambda := 0.604$$

$$Pr := \frac{Cp \cdot \mu}{\lambda} = 6.943 \quad trozr := 2 \cdot brozr$$

$$nvitrozr := \frac{1}{trozr} = 6.271$$

$$Ww := \frac{Q}{brozr \cdot brozr} = 2.33$$

$$dekviv := \frac{4 \cdot brozr \cdot brozr}{(2 \cdot brozr + 2 \cdot brozr)} = 5.98 \times 10^{-3}$$

$$\text{Rebr} := \frac{Ww \cdot \text{dekviv}}{\nu} = 1.385 \times 10^4$$

$$\text{Nu} := 0.021 \cdot (\text{Rebr})^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.43} = 99.378$$

$$\text{alfa} := \text{Nu} \cdot \frac{\lambda}{\text{dekviv}} = 1.004 \times 10^4$$

$$\text{Lrozr} := \left[ 1^2 + \left[ \pi \cdot (d + \text{hrozr}) \cdot \frac{1}{\text{trozr}} \right]^2 \right]^{0.5} = 0.615$$

$$\psi_{\text{rozr}} := \frac{0.856}{(\text{Rebr})^{0.25}} = 0.079$$

$$\Delta_{\text{prozr}} := \frac{\psi_{\text{rozr}} \cdot \text{Lrozr} \cdot (Ww)^2 \cdot 996.95}{2 \cdot \text{dekviv}} = 2.196 \times 10^4$$

В таблиці В.1 наведені ідентифікатори до програма розрахунку температурних полів та тиску розрідження

Таблиця В.1 – Ідентифікатори до програма розрахунку температурних полів та тиску розрідження.

Найменування	Позначення одиниць величини	Ідентифікатор	Одиниці виміру
Необхідний перепад тиску охолоджувальної рідини	$\Delta P$	$\Delta p_{treba}$	Па
Об'ємна витрата	$Q$	$Q$	$m^3/c$
Число розбиття	$i$	$i$	
Частина довжини калібруючої гільзи на якій розташована гвинтова нарізка	$l$	$l$	м
Кінематична в'язкість води	$\nu$	$\nu$	$m^2/c$
Ширина гвинтового каналу	$b(i)$	$b_i$	м
Висота гвинтового каналу	$h(i)$	$h_i$	м
Зовнішній діаметр труби	$d$	$d$	м

Коефіцієнт, що показує у скільки разів висота відрізняється від ширини висоти від ширин	$k$	$k$	
Крок витка	$t(i)$	$t_i$	м
Кількість висків (в залежності від $k$ )	$n$	$n \cdot v \cdot t_i$	
Довжина гвинтового каналу	$L$	$L_i$	м
Швидкість руху рідини	$\omega$	$W$	м/с
Еквівалентний діаметр	$d_{ekv}$	$d_{ekv}$	м
Критерій Рейнольдса	$Re$	$Re$	
Коефіцієнт тертя для охолоджувальної рідини	$\psi$	$\psi$	
Теплопровідність води	$\lambda$	$\lambda$	$Вт/(м \cdot K)$
Густина води	$\rho$	$\rho$	$кг/м^3$
<u>Динамічна</u> в'язкість води	$\mu$	$\mu$	$Па \cdot с$

Теплоємність води	$C$	$C_p$	$\text{кДж/кг}$
Критерій Нусельта	$Nu$	$Nu$	
Коефіцієнт тепловіддачі	$\alpha$	$\alpha$	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
Критерій Прандтля	$Pr$	$Pr$	



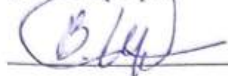
## **ДОДАТОК Г**

### **Акти впровадження результатів роботи**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Декан інженерно-хімічного факультету  
КПІ ім. І. Сікорського

д.т.н., проф.



Євген ПАНОВ

«12» 12 2024 р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**

результатів дисертаційного дослідження Подимана Григорія Сергійовича  
на тему: «Теплообмін при калібруванні труб з термопластів»

Ми, що нижче підписалися, представники Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри Машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв (МАХНВ) к.т.н., доцент Степанюк А.Р., науковий керівник кафедри МАХНВ, д.т.н., професор Корнієнко Я.М., науковий керівник к.т.н., доцент Семінський О.О., аспірант Подиман Г.С., склали даний акт про використання у навчальному процесі кафедри МАХНВ наукових результатів, які отримано під час виконання дисертаційної роботи на тему «Теплообмін при калібруванні труб з термопластів».

Впровадження результатів дисертації в освітній процес забезпечується:

Результати НДР використовуються у навчальному процесі під час підготовки:

1. Здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії»:

у нормативній дисципліні:

- ПО 12.2 Процеси та обладнання хімічної технології.-1. Теплові процеси», дисциплінах вільного вибору;
- «Процеси переробки високомолекулярних сполук» та «Моделювання стану суцільного середовища»
- при виконанні курсового та дипломного проєктів.

2. Здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньою програмою «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання»:

- у нормативній дисципліні ПО4 Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання;
- при виконанні курсового проєкту та магістерської дисертації.

Впровадження результатів НДР дозволяє здобувачам вищої освіти отримати знання про сучасні підходи до процесів теплової взаємодії об'єктів з довкіллям та підвищення їх енергоефективності на основі застосування інтелектуальних систем енергозбереження та ознайомитися з новітніми напрямками моделювання цих процесів.

Впровадження результатів дисертаційної роботи забезпечить більш якісне формування у здобувачів вищої освіти наступних компетентностей:

- здатність до розроблення фізичної та математичної моделі процесів нестационарного теплообміну;
- здатність до обґрунтування методики проведення експериментальних досліджень;
- вміння проводити математичну обробку та узагальнення результатів експериментів.

Завідувач кафедри МАХНВ  
к.т.н., доцент

Андрій СТЕПАНЮК

Науковий керівник кафедри МАХНВ,  
д.т.н., професор

Ярослав КОРНІЄНКО

Керівник аспіранта  
к.т.н., доцент

Олександр СЕМІНСЬКИЙ

Аспірант

Григорій ПОДИМАН