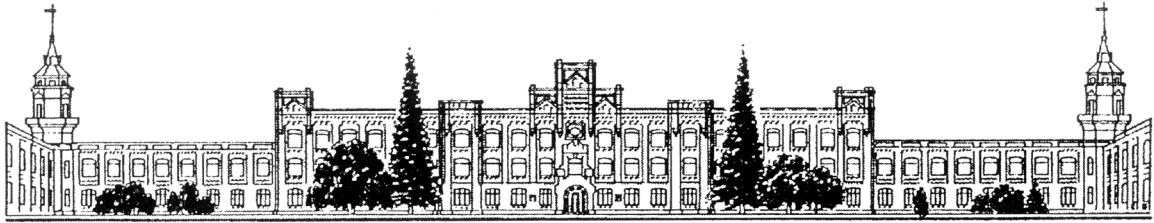


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»



## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ**

для студентів інженерно-хімічного факультету всіх форм навчання  
з навчальної дисципліни «Обладнання для переробки полімерів»

Київ  
2010

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

для студентів інженерно-хімічного факультету всіх форм навчання  
з навчальної дисципліни «Обладнання для переробки полімерів»

*Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ»*

Київ  
2010

Дослідження ефективності процесу охолодження полімерних труб : метод. вказівки до проведення лабораторної роботи; для студ. інженерно-хімічного факультету всіх форм навчання з навч. дисципліни «Обладнання для переробки полімерів» [Текст] / уклад. В. Т. Вознюк, І. О. Мікульонок, Є. Ю. Виноградов. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – 16 с. – 50 пр.

*Гриф надано Методичною радою НТУУ «КПІ»  
(Протокол № 3 від 02 грудня 2010 р.)*

Навчальне видання

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ  
ОХОЛОДЖЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ**

Методичні вказівки до проведення лабораторної роботи

для студентів інженерно-хімічного факультету всіх форм навчання  
з навчальної дисципліни «Обладнання для переробки полімерів»

Укладачі: *Вознюк Вячеслав Тарасович, аспірант  
Мікульонок Ігор Олегович, д-р техн. наук, доц.  
Виноградов Євген Юрійович, студент*

Відповідальний  
за випуск *Я. М. Корнієнко, д-р техн. наук, проф.*

Рецензент *В. І. Сівецький, канд. техн. наук, проф.*

*За редакцією укладачів*

## ВСТУП

Труби є одним із найбільш поширених виробів, одержуваних із термопластичних полімерів методом екструзії. З початку третього тисячоліття обсяг виробництва полімерних труб істотно зростає як в Україні, так і за її межами. При цьому процес їх виготовлення залишається доволі ресурсо- та енергоємним.

Під час виробництва полімерних труб екструзією обмежною стадією зазвичай є охолодження трубної заготовки після її формування через низьку теплопровідність полімерів. У випадку виробництва труб великого діаметра зі значною товщиною стінки зона охолодження може складати десятки метрів, що вимагає використовувати велику кількість охолодної води та енергії на її охолодження, особливо влітку.

Останнім часом активно ведуться дослідження, спрямовані на інтенсифікацію процесу охолодження полімерних труб після їх формування, що дасть можливість підвищити продуктивність лінії в цілому.

Одним з перспективних шляхів інтенсифікації і зниження собівартості виробництва полімерних труб є застосування двосторонньої системи їх охолодження. Двостороннє охолодження також може поліпшити якість форми труби та її внутрішньої поверхні.

Зовнішнє охолодження здійснюють у охолодних ваннах зануренням у шар води або розпиленням води на поверхню труби. Зануренням у шар води раціональніше охолоджувати труби малого діаметра та шланги. Для охолодження внутрішньої поверхні труби застосовують повітря і повітряно-водяну суміш (ПВС), при цьому застосування тільки води є нераціональним.

### 1. МЕТА ТА ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ РОБОТИ

*Метою даної роботи є експериментальне дослідження одно- та двостороннього охолодження полімерної труби за різних умов та визначення ефективності застосування різних способів і холодоагентів.*

Завдання досліджень:

- 1) експериментально визначити температурні поля та час охолодження полімерної труби під час одностороннього охолодження за умов вільної конвекції зануренням у шар води та зрошення труби водою;
- 2) експериментально визначити температурні поля та час охолодження полімерної труби під час двостороннього охолодження із застосуванням повітря та ПВС для охолодження внутрішньої поверхні труби;
- 3) Розрахувати температурні поля за різних методів охолодження та порівняти їх з результатами експериментальних досліджень;
- 4) Оцінити інтенсивність та ефективність різних способів охолодження полімерних труб.

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

### 2.1. Виготовлення полімерних труб

Усі стадії технологічного процесу виготовлення полімерних труб неперервні та реалізуються на одній технологічній лінії (рис. 2.1).

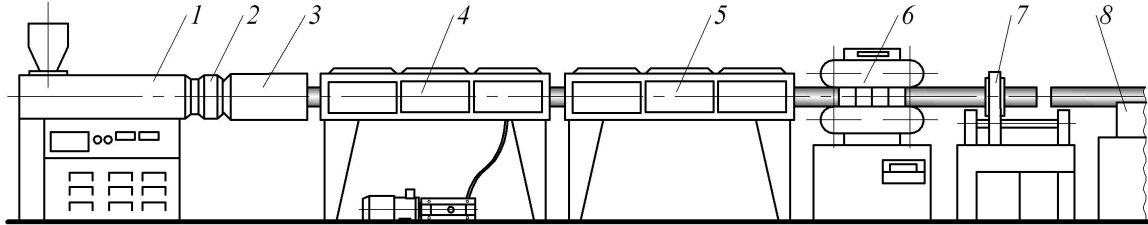


Рис. 2.1. Принципова апаратно-технологічна схема виготовлення гладких полімерних труб: 1 – екструдер; 2 – трубна головка; 3 – калібрувальний пристрій; 4 – вакуум-ванна; 5 – ванна зрошення; 6 – тягнучий пристрій; 7 – відрізний пристрій; 8 – приймальний пристрій

Гранульований полімер подається в завантажувальний бункер екструдера 1. В екструдері відбувається плавлення та гомогенізація полімеру, а також створюється тиск, потрібний для продавлення полімеру крізь трубну головку 2, у якій формується трубна заготованка. В калібрувальному пристрої 3 здійснюється калібрування трубної заготованки і часткове її охолодження. Подальше формування та остаточне охолодження здійснюється в вакуум-ванні 4 і ванні зрошення 5 або декількох таких ваннах залежної від діаметра та товщини стінки труби. Тягнучий пристрій 6 забезпечує переміщення труби крізь всі пристрої після екструдера. Двигун цього пристрою синхронізується з електродвигуном екструдера. Труби діаметром більше за 50 мм відрізаються відрізками по 6, 9, 12 м відрізним пристроєм 7 (труби діаметром менше від 50 мм намотуються в бухти). Далі труби надходять до приймального пристрою 8.

### 2.2. Математична модель охолодження полімерних труб

Охолодження багатошарової труби описується рівнянням нестационарної теплопровідності

$$\rho_i(T)c_i(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_i(T)\nabla T), \quad (2.1)$$

де  $\rho_i$ ,  $c_i$  і  $\lambda_i$  – густина, масова теплоємність і теплопровідність матеріалу  $i$ -го шару  $n$ -шарової стінки труби ( $i = \overline{1, n}$ ; для одношарової  $n = 1$ );  $T$  – поточна температура матеріалу.

Оскільки при охолодженні труби її температура змінюється в широкому діапазоні, то необхідно враховувати залежність теплофізичних властивостей від температури.

Охолодження екструдованої труби розглядають в нерухомій циліндричній системі координат (рис. 2.2), тобто температура матеріалу стінки в кожній

фіксованій точці відносно системи координат не змінюється в часі. При цьому координата і час пов'язані між собою залежністю

$$t = \frac{z}{W_z}, \quad (2.2)$$

де  $W_z$  – швидкість відведення труби, яка дорівнює

$$W_z = \frac{G}{\rho\pi(r_3^2 - r_B^2)}, \quad (2.3)$$

де  $G$  – продуктивність екструдера.

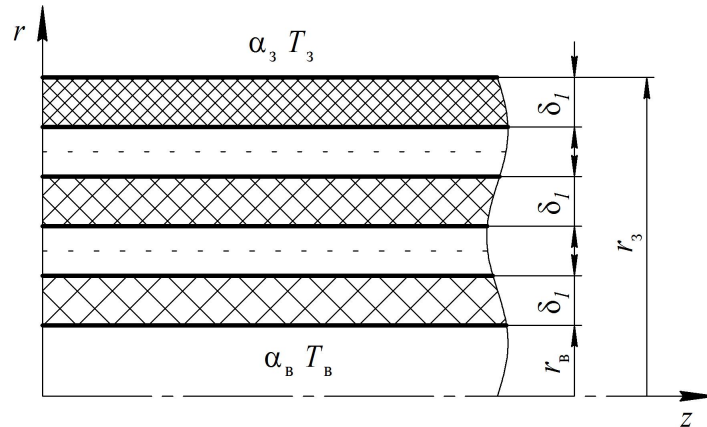


Рис. 2.2. Схема охолодження полімерної труби:  $r_B$ ,  $r_3$  – внутрішній та зовнішній радіуси труби;  $z$  – вісь напрямку руху труби;  $\delta_1, \delta_i, \delta_n$  – товщина  $i$ -го шару стінки;  $T_{c.з}, T_{c.в}$  – температура навколишнього середовища із зовнішньої та внутрішньої сторін стінки труби;  $\alpha_{c.з}, \alpha_{c.в}$  – коефіцієнти тепловіддачі від поверхонь труби до охолодженого середовища

Тоді рівняння (2.1) набуває вигляду

$$W_z \rho_i(T) c_i(T) \frac{\partial T}{\partial z} = \nabla(\lambda_i(T) \nabla T). \quad (2.4)$$

Для подальшого розгляду процесу охолодження в циліндричній системі координат робимо такі припущення:

- перенесенням теплоти вздовж осі  $z$  нехтуємо, оскільки товщина стінки на декілька порядків менша від довжини труби;
- процес охолодження вісесиметричний, отже не залежить від кутової координати;
- у місці контакту двох сусідніх шарів реалізовані граничні умови четвертого роду;
- перенесення теплоти в кожному шарі матеріалу труби здійснюється теплопровідністю.

Рівняння (2.4) в циліндричних координатах із врахуванням зазначених припущень набуває вигляду

$$W_z \rho_i(T) c_i(T) \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_i(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (2.5)$$

Граничні умови процесу охолодження в калібрувальному пристрої або вакуум-ванні

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_B} = \alpha_{c.B} \left( T \Big|_{r=r_B} - T_{c.B} \right); \quad (2.6)$$

$$T_i = T_{i+1}, \lambda_i(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=\sum_i \delta_i} = \lambda_{i+1}(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=\sum_i \delta_i}; \quad (2.7)$$

$$\lambda_n(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_3} = \alpha_{c.3} \left( T \Big|_{r=r_3} - T_{c.3} \right) \quad (2.8)$$

Рівняння (2.5)–(2.8) є математичною моделлю одно- і двостороннього охолодження одно- і багатопарових полімерних труб, яку розв’язують числовими методами.

## 2.2. Охолодження полімерних труб

Охолодження полімерних труб за умови вільної конвекції здійснюють у ваннах зануренням і на ділянках повітряного охолодження. Описується цей процес критеріальною залежністю [1]

$$Nu = \frac{\alpha_k d}{\lambda_{ж}} = C(Gr \cdot Pr)^n K, \quad (2.9)$$

де  $Nu$  – критерій Нусельта;  $\alpha_k$  – середній по периметру коефіцієнт тепловіддачі від поверхні труби до охолодної рідини за рахунок вільної конвекції, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $d$  – діаметр труби, м;  $\lambda_c$  – коефіцієнт теплопровідності охолодного середовища, Вт/(м·К);  $Gr = g\beta(T|_{r=r_3} - T_c)d^3/\nu_c^2$  – критерій Грасгофа;  $Pr = \rho_c c_{pc} \nu_c / \lambda_c$  – критерій Прандтля;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – прискорення сили тяжіння;  $\beta$  – температурний коефіцієнт розширення охолодного середовища, К<sup>-1</sup>;  $\rho_c$  – густина охолодного середовища, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{pc}$  – масова ізобарна теплоємність охолодного середовища, Дж/(кг·К);  $C, n$  – константи для даного режиму течії потоку і геометрії системи (табл. 1);  $K$  – безрозмірна корегуюча функція.

Таблиця 2.1. Значення величин  $C, n$  і  $K$  для горизонтально розміщеної труби під час зовнішнього охолодження.

$Gr \cdot Pr$	$C$	$n$	$K$
$10^4 < (Gr \cdot Pr) < 10^9$	0,47	0,25	1
$(Gr \cdot Pr) > 10^9$	0,1	0,33	1
$10^4 < (Gr \cdot Pr)$	Впливом вільної конвекції можна знехтувати		

З рівняння (2.9) визначаємо коефіцієнт тепловіддачі за рахунок вільної конвекції

$$\alpha_k = \frac{\lambda_{ж}}{d} C(Gr \cdot Pr)^n K, \quad (2.10)$$

Під час охолодження зануренням труби у воду  $\alpha = \alpha_k$ .

Під час охолодження труби на повітрі враховується також коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_B$  за рахунок теплового випромінювання

$$\alpha_B = \varepsilon c_0 10^{-8} \frac{T^4|_{r=r_3} - T_c^4}{T|_{r=r_3} - T_c}, \quad (2.11)$$

де  $\varepsilon$  – приведений ступінь чорноти зовнішньої поверхні труби;  $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Повний коефіцієнт тепловіддачі на повітрі

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_B \quad (2.12)$$

Під час охолодження труб зрошенням для визначення коефіцієнта тепловіддачі можна використовувати емпіричну формулу [2]

$$\alpha = 619 \frac{G_c^{0,5}}{D^{0,625}}, \quad (2.13)$$

де  $G_c$  – питома масова витрата води, яка припадає на охолодження одного погонного метра труби,  $\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{год})$ .

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі в горизонтальній трубі під час охолодження повітрям внутрішньої поверхні можна використовувати формули [1] (табл. 2.2).

Таблиця 2.2. Формули для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі під час охолодження повітрям.

Gr·Pr	Межі застосування		Формули або рисунок
$< 8 \cdot 10^5$	Re < 2300	$20 \leq \left( \text{Re} \cdot \text{Pr} \frac{d}{L} \right)^*$	$\text{Nu} = 1,55 \left( \text{Re} \frac{d}{L} \right)^{1/3}$
		$\left( \text{Re} \cdot \text{Pr} \frac{d}{L} \right) < 20$	$\text{Nu} \approx 3,66$
	$2300 < \text{Re} < 10000$	—	Рис. 2.3.
$> 8 \cdot 10^5$	Re < 3500	$20 \leq \left( \text{Re} \cdot \text{Pr} \frac{d}{L} \right) \leq 120$	$\text{Nu} = 0,8 \left( \text{Re} \cdot \text{Pr} \frac{d}{L} \right)^{0,4} (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,1}$
		$\left( \text{Re} \cdot \text{Pr} \frac{d}{L} \right) \leq 10$	$\text{Nu} = 0,5 \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr} \frac{d}{L}$
	Re > 3500	—	$\text{Nu} = 0,022 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4}$

\* L – довжина труби

Інтенсивність відведення теплоти від стінки труби залежить від режиму руху повітря, що характеризує критерій Рейнольдса



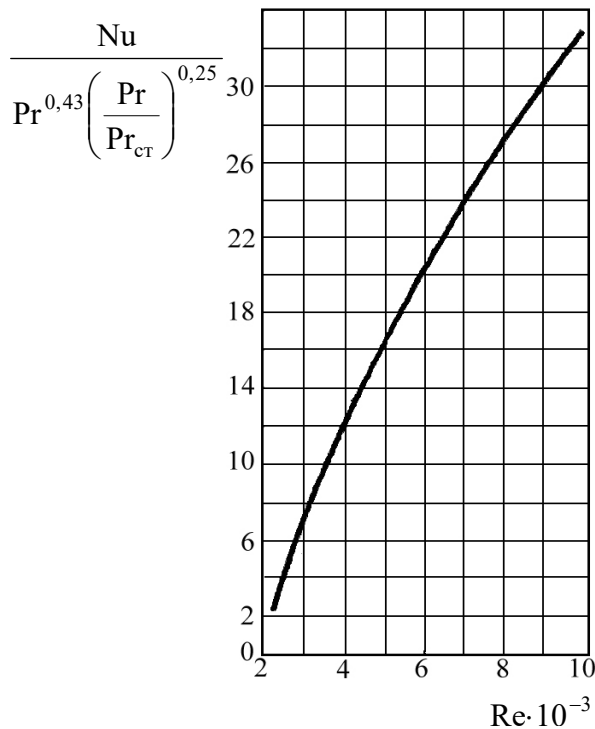


Рис. 2.3. Залежність  $\frac{Nu}{Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{cr}}\right)^{0,25}}$  від критерія  $Re$  при значенні  $(Gr \cdot Pr) < 8 \cdot 10^5$

$$Re = \frac{w_c d}{\nu_c}, \quad (2.14)$$

де  $w_c$  – швидкість руху повітря, м/с;  
 $d$  – внутрішній діаметр труби, м.

Під час розрахування охолодження за початковий розподіл приймають постійну по перетину охолоджуваної труби температуру. При використанні сучасних екструзійних машин, черв'яки яких споряджені спеціальними змішувальними елементами, ця умова на виробництві виконується достатньо точно.

### 3. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

На експериментальній установці (рис. 2) реалізують схеми як одностороннього зовнішнього, так і двостороннього охолодження. Дослідження охолодження здійснюють на поліетиленовій трубі 3 діаметром 0,1 м з товщиною стінки 0,011 м і завдовжки 0,4 м. Трубу нагрівають у термошафі 7.

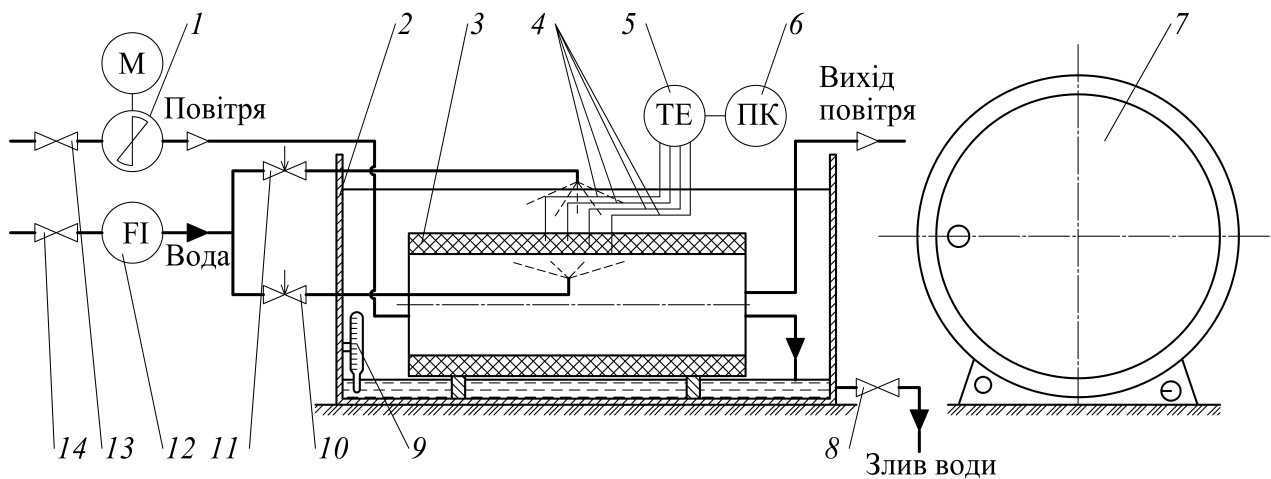


Рис. 3.1. Принципова схема дослідної установки: 1 – вентилятор; 2 – ванна; 3 – труба; 4 – термопари; 5 – термоелектричний перетворювач; 6 – комп'ютер; 7 – термошаф; 8, 13, 14 – крани; 9 – термометр; 10, 11 – вентилі; 12 – ротаметр

Зовнішнє охолодження труби реалізують за умов вільної конвекції зануренням труби у шар проточної води або зрошенням труби водою у ванні 2. Внутрішнє охолодження здійснюють повітрям або повітряно-водною сумі-

шшо, що утворюється під час розпилення води у порожнині труби 2.

Регулювання витрати води у системі внутрішнього охолодження здійснюють вентилем 10, у системі зовнішнього охолодження – вентилем 11. Об'ємну витрату води контролюють за допомогою ротаметра 12. Повітря для внутрішнього охолодження подають вентилятором 1. Замір температури охолодної води здійснюють ртутним термометром 9.

Зміна температури в стінці труби вимірюється термопарами 4, термоЕРС яких перетворюється у термоелектричному перетворювачі 5, що під'єднаний до комп'ютера 6. Заміри температури записуються кожену секунду.

Оброблення та відображення зміни температури здійснюють за допомогою програми в графічному середовищі програмування LabVIEW 8.5.

#### **4. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ**

Під час підготовки до роботи і виконання досліджень потрібно дотримуватися таких вимог техніки безпеки.

1) Перед пуском установки перевірити справність заземлення установки, а також відсутність сторонніх предметів у термошафі.

2) Пуск і зупинення установки здійснювати тільки з дозволу викладача, суворо дотримуючись послідовності передбачених дій.

3) Під час роботи установки:

а) забороняється працювати на установці без захисних рукавичок;

б) торкатися руками або іншими предметами проводів і термопар.

4) Про будь-яку несправність у роботі установки необхідно терміново сповістити викладача або навчально-допоміжний персонал. Самостійне усунення виявлених неполадок категорично забороняється.

#### **5. ПОРЯДОК І РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

##### **5.1. Підготовка установки до роботи**

5.1.1. Включити рубильник силового щита. Переконавшись в наявності напруги у всіх фазах мережі короткочасним включенням вентилятора, що нагнітає повітря для внутрішнього охолодження.

5.1.2. Встановити в термошафу досліджувану полімерну трубу.

5.1.3. За годину до початку досліджень увімкнути термошафу. Регулятором виставити потрібну температуру нагрівання труби. Беручи до уваги, що експериментальні дослідження процесу охолодження полімерної труби передбачають проведення значної кількості дослідів, а отже і необхідність забезпечення початкової температури трубної заготовки, то з метою запобігання термодеструкції матеріалу труби та втрати трубою форми й розмірів максимальну

початкову температуру труби слід встановлювати не більше за 120 °С.

5.1.4. Увімкнути комп'ютер та запустити програму оброблення експериментальних даних. За показниками термопар контролювати прогрів стінки труби.

5.1.5. У комп'ютері створити папку для запису результатів дослідів.

## **5.2. Дослідження одностороннього охолодження за умови вільної конвекції**

5.2.1. Встановити зрошувальний пристрій системи зовнішнього охолодження ближче до лівого краю ванни 2.

5.2.2. Кран 8 і вентиль 10 закрити, вентиль 11 відкрити.

5.2.3. Набрати воду у ванні достатнього рівня для повного занурення досліджуваної труби.

5.2.4. За досягнення потрібного рівня води повністю відкрити кран 8. Регулюючи вентилем 11 витрату води, що надходить у ванну, досягти стабільного рівня води у ванні.

5.2.5. Температуру охолодної води визначити ртутним термометром 9.

5.2.6. Коли температура у стінці труби досягне потрібного значення і буде однаковою по товщині, дістати трубу з термошафи 7 і встановити у ванні 2.

5.2.7. Процес охолодження контролювати за показниками термопар, що відображаються у програмі.

5.2.8. Охолодження проводити доти, поки температура в стінці труби не стане рівномірною, при цьому дверцята термошафи 7 слід тримати закритими.

5.2.9. Файл з експериментальними даними переписати з папки запису даних програми у папку запису результатів дослідів. У назві файлу вказати спосіб охолодження і температуру охолодної води (наприклад «Зовнішнє\_занурення\_Т=10»).

5.2.10. Отримані значення температури і часу звести до табл. 5.1.

*Таблиця 5.1. Експериментальні данні охолодження полімерної труби*

Метод охолодження	Час охолодження, с	Температура стінки труби відповідно до розташування термопар, °С			
		1	2	3	4
	1				
	2				
	3				
	...				
	<i>n</i>				

5.2.11. Закрити вентиль 11 і повністю злити воду з ванни 2.

5.2.12. Трубу розмістити у термошафі 7.

### **5.3. Дослідження одностороннього охолодження під час зрошення охолодною водою**

5.3.1. Установити зрошувальний пристрій системи зовнішнього охолодження над місцем розміщення труби у ванні.

5.3.2. Вентиль *10* закрити, кран *8* відкрити.

5.3.3. Повторити дії за підпунктом 5.2.6.

5.3.4. Відкрити вентиль *11*.

5.3.5. Повторити дії за підпунктами 5.2.7 – 5.2.12.

### **5.4. Дослідження двостороннього охолодження під час зрошення охолодної води та повітрям**

5.4.1. Під'єднати канал нагнітання охолодного повітря для внутрішнього охолодження до вентилятора *1*.

5.4.2. Встановити зрошувальний пристрій системи зовнішнього охолодження над місцем розміщення труби.

5.4.3. Увімкнути вентилятор *1*.

5.4.4. Коли температура у стінці труби досягне потрібного значення і буде однаковою по товщині, дістати трубу з термошафи *7*, установити у ванні *2* і підключити її до каналу нагнітання охолодного повітря.

5.4.5. Повторити дії за підпунктами 5.3.4.– 5.3.5.

5.4.6. Вимкнути вентилятор *1*.

### **5.5. Дослідження двостороннього охолодження під час зрошення охолодної води та ПВС**

5.5.1. Встановити канал подачі води для внутрішнього охолодження з форсункою у місці розміщення охолоджуваної труби.

5.5.2. Повторити дії за підпунктом 5.4.2.

5.5.3. Коли температура у стінці труби досягне потрібного значення і буде однаковою по товщині, дістати трубу з термошафи *7*, установити у ванні *2* так, щоб форсунка каналу подачі води для внутрішнього охолодження була у порожнині труби.

5.5.4. Відкрити вентилі *10* і *11*.

5.5.5. Повторити дії за підпунктами 5.2.7 – 5.2.10.

5.5.5. Закрити вентилі *10* і *11* і злити повністю воду з ванни *2*.

5.5.6. Після закінчення експерименту на термошафі *7* регулятор установити на 0 °С, вимкнути термошафу. Виключити рубильник силового щита. Прибрати робоче місце.

## 6. ОБРОБЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

6.1. За отриманими експериментальними даними, що записані програмою для оброблення експериментальної інформації у вигляді таблиць, побудувати графіки зміни температури стінки труби у часі  $T=f(t)$  та температурні поля  $T=f(s)$  для часу охолодження  $t = 0, 30, 60, 120, 180, 240$  с, де  $s$  – товщина стінки.

6.2. Визначити похибку вимірювань.

6.3. Скориставшись нижче наведеною програмою розрахунку, визначити зміну температури стінки труби у часі під час охолодження за аналогічних умов експерименту.

*Програма визначення температурних полів і часу охолодження під час одно- і двостороннього охолодження полімерної труби.*

CLS

OPEN "d:\truba.doc" FOR OUTPUT AS #1

PRINT "Розрахунок процесу охолодження труби"

PRINT

PRINT "Введіть вхідні дані:"

INPUT "Зовнішній діаметр труби"; d2

INPUT "Внутрішній діаметр труби, м"; d1

INPUT "Діаметр калібруючої втулки, м"; d3

INPUT "Число вузлів по координаті у"; n

INPUT "Температура рідини, град С"; tc

INPUT "Температура повітря, град С"; trov

INPUT "Продуктивність, кг/год"; g

INPUT "Початкова температура розплаву, град С"; th

INPUT "Температура плавлення полімеру, град С"; tp

INPUT "Теплопровідність калібруючої втулки, Вт/м\*К"; last

INPUT "Кінцева температура розплаву, град С"; tk

INPUT "Інтервали апроксимації теплофізичних властивостей s1,s2,s3"; s1, s2, s3

INPUT "Через скільки кроків виводити результати"; sk

DEF FNro1 (t) = -8.59 \* 10 ^ (-3) \* t ^ 2 + .3237 \* t + 938

DEF FNro2 (t) = -8.59 \* 10 ^ (-3) \* t ^ 2 + .3237 \* t + 938

DEF FNro3 (t) = -8.59 \* 10 ^ (-3) \* t ^ 2 + .3237 \* t + 938

DEF FNro4 (t) = -.595 \* t + 895.5

DEF FNc1 (t) = -5.235 \* 10 ^ (-8) \* t ^ 6 + 1.926 \* 10 ^ (-5) \* t ^ 5 - 2.516 \* 10 ^ (-3) \* t ^ 4 + .1461 \* t ^ 3 - 3.733 \* 10 ^ (0) \* t ^ 2 + 4.612 \* 10 ^ (1) \* t + 1.529 \* 10 ^ (3)

DEF FNc2 (t) = -5.235 \* 10 ^ (-8) \* t ^ 6 + 1.926 \* 10 ^ (-5) \* t ^ 5 - 2.516 \* 10 ^ (-3) \* t ^ 4 + .1461 \* t ^ 3 - 3.733 \* 10 ^ (0) \* t ^ 2 + 4.612 \* 10 ^ (1) \* t + 1.529 \* 10 ^ (3)

DEF FNc3 (t) = 4.952 \* 10 ^ (-1) \* t + 2027

```

DEF FNc4 (t) = 4.952 * 10 ^ (-1) * t + 2027
DEF FNla1 (t) = -1.998 * 10 ^ (-9) * t ^ 3 - 1.937 * 10 ^ (-5) * t ^ 2 - 5.896 * 10 ^ (-4) * t + .7217
DEF FNla2 (t) = -1.998 * 10 ^ (-9) * t ^ 3 - 1.937 * 10 ^ (-5) * t ^ 2 - 5.896 * 10 ^ (-4) * t + .7217
DEF FNla3 (t) = -1.998 * 10 ^ (-9) * t ^ 3 - 1.937 * 10 ^ (-5) * t ^ 2 - 5.896 * 10 ^ (-4) * t + .7217
DEF FNla4 (t) = 7.956 * 10 ^ (-9) * t ^ 4 - 5.814 * 10 ^ (-6) * t ^ 3 + 1.564 * 10 ^ (-3) * t ^ 2 - 1.842 * 10 ^ (-1) * t + 8.33
DEF FNal2 (t) = 46.045 * ((t - tc) / d2) ^ .25
alp = 110: s = (d2 - d1) / 2 / n: r1 = d1 / 2: r2 = d2 / 2: r3 = d3 / 2: j = 1
REDIM t(n + 1), s(n + 1)
FOR i = 0 TO n
t(i) = th: s(i) = th
NEXT i
al = FNal2(t(n)): q = 0: dr = (r2 - r1) / n
wz = g / (3600 * FNro4(th) * 3.14 * (r2 ^ 2 - r1 ^ 2))
z = 0: j = 1: a = (r3 / last) * LOG(r3 / r2)
dz = FNro1(tc) * FNc1(tc) * wz * dr ^ 2 / (4 * FNla1(tc))
IF dz > .05 THEN dz = .05
FOR i = 0 TO n
PRINT #1, USING "##.# "; s * i * 1000;
NEXT i
PRINT #1,
1 : z = z + dz: r = r1: vk = vk + 1
FOR i = 1 TO n - 1
r = r + dr
IF s(i) < s1 THEN 2
IF s(i) < s2 THEN 3
IF s(i) < s3 THEN 4
ro = FNro4(s(i)): c = FNc4(s(i)): la = FNla4(s(i))
GOTO 5
2 : ro = FNro1(s(i)): c = FNc1(s(i)): la = FNla1(s(i))
GOTO 5
3 : ro = FNro2(s(i)): c = FNc2(s(i)): la = FNla2(s(i))
GOTO 5
4 : ro = FNro3(s(i)): c = FNc3(s(i)): la = FNla3(s(i))
5 : aa = la * dz / (ro * c * wz * dr ^ 2): x = dr / r
t(i) = aa * (s(i + 1) - 2 * s(i) + s(i - 1) + x * (s(i + 1) - s(i))) + s(i)
NEXT i
t(0) = t(1)

```

```

IF alp = 0 THEN t(0) = t(1): GOTO 111 ELSE GOTO 222
222 :
IF s(0) < s1 THEN 66
IF s(0) < s2 THEN 77
IF s(0) < s3 THEN 88
lap = FNla4(s(0)): GOTO 99
66 : lap = FNla1(s(0)): GOTO 99
77 : lap = FNla2(s(0)): GOTO 99
88 : lap = FNla3(s(0))
99 : a11 = lap / (alp * dr): a22 = 0
t(0) = (tpov + t(1) * (a11 + a22)) / (1 + a11 + a22)
111: IF j = 1 THEN a = 0
IF s(n) < s1 THEN 6
IF s(n) < s2 THEN 7
IF s(n) < s3 THEN 8
la = FNla4(s(n)): GOTO 9
6 : la = FNla1(s(n)): GOTO 9
7 : la = FNla2(s(n)): GOTO 9
8 : la = FNla3(s(n))
9 : a1 = la / (al * dr): a2 = a * la / dr
t(n) = (tc + t(n - 1) * (a1 + a2)) / (1 + a1 + a2)
IF j = 1 THEN 10
t2 = a1 * (t(n - 1) - t(n)) + tc: GOTO 11
10 : al = FNal2(t(n))
11 : dq = la * (t(n - 1) - t(n)) / dr * 6.28 * r2 * dz
q = q + dq
FOR i = 0 TO n
s(i) = t(i)
NEXT i
IF vk = sk THEN 12 ELSE 13
12 :
vk = 0
IF j = 0 THEN 13
PRINT #1, USING "##.# "; z;
PRINT #1, USING "###.# "; z / wz;
FOR i = 0 TO n
PRINT #1, USING "##### "; t(i);
NEXT i
PRINT #1,
13 : IF j = 1 THEN 14
IF t(n - 1) > tp THEN 1

```

```

j = 1: z1 = 1000 * z
14 : FOR i = 0 TO n
IF t(i) > tk THEN 1
NEXT i
PRINT #1,
PRINT #1, USING "Довжина зони охолодження ###.# м"; z; z / wz
FOR i = 0 TO n
PRINT #1, USING "### " ; t(i);
NEXT i
END

```

6.4. Розраховані значення температури і часу звести до табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Теоретичні данні охолодження полімерної труби

Метод охолодження	Час охолодження, с	Температура стінки труби відповідно до розташування термопар, °С			
		1	2	3	4
	1				
	2				
	3				
	...				
	n				

6.5. За отриманими теоретичними даними побудувати графіки зміни температури стінки труби у часі  $T = f(t)$  і температурні поля  $T = f(s)$  для часу охолодження  $t = 0, 30, 60, 120, 180, 240$  с.

## 7. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізуйте та обґрунтуйте характер побудованих графіків.
2. Проаналізуйте ефективність охолодження полімерної труби за різних способів охолодження і холодоагентів.
3. Порівняйте дослідні та теоретичні результати. Поясніть їх розбіжність.

## 8. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дайте оцінку термопластичним полімерним матеріалам як об'єкту виготовлення труб.
2. Наведіть основні конструкції полімерних труб і галузі їх застосування.
3. Поясніть чому саме охолодження є обмежною стадією виготовлення полімерних труб екструзією.



4. Дайте оцінку способів охолодження труб зануренням у шар води та розпиленням. Запропонуйте можливі шляхи інтенсифікації охолодження під час охолодження зазначеними способами.

5. Проаналізуйте різницю процесів одно- і двостороннього охолодження. Поясніть як ці способи охолодження впливають на форму труб та їх подальшу експлуатацію.

6. Дайте оцінку застосування повітря та ПВС для охолодження внутрішньої поверхні труби. Чому недоцільно застосовувати для внутрішнього охолодження воду як самостійний холодоагент?

7. Поясніть механізм відведення теплоти при застосуванні ПВС.

8. Назвіть можливі граничні умови. Наведіть їх приклади в теплообмінних процесах. Граничні умови якого роду реалізуються у місцях контакту двох сусідніх шарів і в місцях контакту поверхні труби з охолодним середовищем?

9. Користуючись наведеною в п. 6 програмою, розробіть графічну схему алгоритму розрахунку.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носкоав. — Л. : Химия, 1987. — 576 с.

2. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров / В.С. Ким. — М. : Химия, КолосС, 2005. — 568 с.

3. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії : навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / Л. Б. Радченко — К. : ІЗМН, 1999. — 220 с.

4. Лукач Ю. Е. Алгоритм расчета устройств для термообработки изделий из термопластов : учеб. пособ. [для студ. выш. учеб. завед.] / Лукач Ю. Е., Доброногова С. И., Ружинская Л. И. — К. : КПИ, 1984. — 84 с.

5. Володин В. П. Экструзия профильных изделий из термопластов / В. П. Володин. — СПб : Профессия, 2005. — 480 с.

6. Теплові процеси та апарати хімічних і нафтопереробних виробництв: Розділ перший. Теплопередача : навч. посіб. / Ю.Ю. Лукач, І.О. Мікульонок, Г.Л. Рябцев, М.В. Сезонов. — К. : НМЦВО, 2000. — 172 с.

7. Производство изделий из полимерных материалов / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко. — СПб : Профессия, 2008. — 464 с.

8. Полімерні композитні матеріали й вироби з них. Одержання, перероблення та властивості : термінол. слов. / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко. — К. : ІВЦ «Видавництво „Політехніка”», 2005. — 179 с.

9. Мікульонок І. О. Переробка вторинної сировини екструзією : монографія / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко. — К. : ІВЦ «Видавництво „Політехніка”», 2006. — 184 с.

10. Мікульонок І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : монографія / І. О. Мікульонок. — К. : ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. — 265 с.