

*В. Т. Вознюк*  
*І. О. Мікульонок*

# **ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕКСТРУДОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ**



Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

*В. Т. Вознюк  
І. О. Мікульонок*

# **ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕКСТРУДОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ**

**Монографія**

Київ  
НТУУ «КПІ»  
2012

УДК 678.027.3:678.023.2  
ББК 32.748  
В64

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут»  
(Протокол № 1 від 16.01.2012 р.)*

Рецензенти: *О. М. Гавва*, д-р техн. наук, проф.,  
Національний університет харчових технологій

*А. Д. Петухов*, д-р техн. наук, проф.,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

*В. М. Бондаренко*, канд. техн. наук,  
Публічне акціонерне товариство  
«Науково-виробниче підприємство „Більшовик”»

**Вознюк В. Т.**

В64      Вознюк В. Т., Мікульонок І. О. Інтенсифікація процесу виготовлення екструдованих полімерних труб [Текст] : монографія. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 142 с.: іл. – Бібліогр.: с. 131–141. – 300 прим.

**ISBN 978-966-622-480-7**

У монографії розглянуто наукові засади розробки та вдосконалення обладнання і процесів охолодження одержуваних екструзією полімерних труб різного призначення, у тому числі одно- і багатошарових, гладких і гофрованих.

Змодельовано процеси, які проходять в калібрувальному та охолоджувальному обладнанні технологічних екструзійних ліній з виготовлення полімерних труб. Проведено експериментальну перевірку розроблених математичних моделей.

Розроблено методики розрахунку екструзійного обладнання, які з достатньою для інженерних розрахунків точністю надають можливість виконувати багатоваріантні розрахунки під час проектування нового й модернізації існуючого обладнання. Надано пропозиції щодо впровадження енергоефективних процесів та обладнання.

Для фахівців полімерного машинобудування та споріднених галузей виробництва, а також викладачів, аспірантів і студентів інженерно-хімічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

**УДК 678.027.3:678.023.2**  
**ББК 34.748**

ISBN 978-966-622-480-7

© В. Т. Вознюк,  
І. О. Мікульонок, 2012

## ВСТУП

Протягом останніх десятиліть намітилася стійка тенденція до широкого впровадження полімерних труб різного призначення і поступової заміни ними металевих і залізобетонних труб. Це пов'язано з високими експлуатаційними характеристиками полімерних труб: стійкістю до кислих і лужних середовищ, легкістю і гнучкістю, низькою теплопровідністю, стійкістю до забруднення внутрішньої поверхні. Серед полімерних труб найбільшого поширення набули екструдовані гладкі і двошарові гофровані труби з термопластичних полімерних матеріалів, у першу чергу поліетилену (ПЕ), поліпропілену (ПП) і полівінілхлориду (ПВХ).

Сучасний рівень розвитку екструзійного обладнання дає змогу забезпечити продуктивність ліній понад 3 тонни на годину, забезпечуючи при цьому високу якість трубної заготовки. Натепер виготовляють напірні гладкі труби діаметром до 1200 мм і з товщиною стінки до 70 мм, а також гофровані труби діаметром до 2400 мм, при цьому обмежною стадією технологічного процесу виготовлення труб є охолодження трубної заготовки від температури формування до температури в зоні приймального пристрою.

Традиційно відведення теплоти від трубної заготовки здійснюють від її зовнішньої поверхні, у той час як від внутрішніх шарів стінки теплота відводиться лише теплопровідністю в бік зовнішньої поверхні. Так, під час виготовлення гладких труб з товщиною стінки більше за 10 мм довжина зони охолодження може досягати десятків метрів. Крім того, одностороннє охолодження може створити несприятливі умови для остаточного формоутворення труби, які спричиняють появу дефектів розмірів і форми труби (бочкоподібність, різновтовщинність, хвилястість внутрішньої поверхні).

Одним із ефективних шляхів інтенсифікації процесу охолодження екструдованих труб є застосування двостороннього відведення теплоти зі стінки. Відповідні дослідження проводяться на Клімовському трубному заводі (Російська Федерація) науковцями Бисеровим В.Т., Гориловским М.И., Швабауэром В.В., Гвоздевым И.В. Зазначені дослідження мають в основному лише експериментальний характер, що призводить до значних витрат матеріальних та енергетичних ресурсів. Аналогічні дослідження, зазвичай на рівні розробки окремих технічних рішень, здійснюють у Німеччині (фірма INOEX GmbH) та Австрії (фірма Cincinnati Extrusion GmbH) науковці Jorg Schuhl, Ludwig Dietzsch, Brigitte Diekhaus.

Теорію розрахунку одностороннього охолодження гладких одношарових полімерних труб, розроблена Доброноговою С. І., Лукачем Ю. Ю., Радченком Л. Б., Ружинською Л. І., достатньо повно висвітлено в літературі. Однак тепер відсутня математична модель охолодження, яка б давала можливість враховувати теплообмін на внутрішній поверхні труби і її багат шарову

структуру. Також натепер відсутня методика моделювання охолодження багатошарових гофрованих полімерних труб. При цьому проектування охолодного обладнання ліній виготовлення таких труб базується тільки на практичному досвіді, що може призводити до нераціональної роботи ліній в цілому.

Крім того, одним із шляхів утилізації вторинних полімерів може бути їх переробка у багатошарові труби, що дає можливість безперервно переробляти полімерні відходи при значній питомій продуктивності по вторинній сировині і одержувати вироби із задовільними властивостями.

У зв'язку з цим однією з важливих і актуальних проблем виготовлення екструдованих полімерних труб є розроблення, вдосконалення та науково обґрунтований вибір ефективних зразків обладнання для охолодження зазначених труб.

Метою досліджень, результати яких наведені у монографії, було створення нових та удосконалення наявних процесів та обладнання охолодження полімерних труб, одержуваних екструзією, а також методів їх розрахунку, що забезпечує заощадження енергетичних і матеріальних ресурсів.

Перший розділ присвячено аналізу тенденцій використання полімерних труб, основних методів і тенденцій розвитку процесів і обладнання охолодження полімерних труб, існуючих методів і моделей розрахунку процесу охолодження полімерних труб, розглянуто вплив умов охолодження на властивості труб.

У другому розділі сформульовано основні положення моделювання процесу охолодження екструдованих полімерних труб, розроблено фізичні і математичні моделі двостороннього охолодження гофрованих і гладких полімерних труб.

Третій розділ присвячено експериментальній перевірці адекватності розроблених математичних моделей реальним процесам охолодження та експериментальному дослідженню дискретної системи охолодження.

У четвертому розділі представлені розроблені за результатами досліджень енергоефективні процеси та обладнання охолодження полімерних труб, новизну і промислово придатність яких підтверджено патентами України на корисні моделі.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ТЕРМІНІВ

### Основні позначення:

$a$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$A$  – площа елемента,  $\text{м}^2$ ;

параметр розрахунку;

$[B]$  – матриця похідних функцій форми по координатам;

$Bi$  – критерій Біо;

$c$  – масова теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;

$[c]$  – матриця демпфування або теплоємності скінченного елемента;

$D$  – зовнішній діаметр труби,  $\text{м}$ ;

$[D]$  – матриця теплопровідності;

$\{f\}$  – вектор вільних членів;

$Fo$  – критерій Фур'є;

$G$  – масова витрата,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$h$  – масова ентальпія,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;

$|J|$  – матриця Якобі;

$[k]$  – матриця жорсткості або теплопровідності і конвективного теплообміну;

$K$  – числовий коефіцієнт, що залежить від умов охолодження;

$L$  – довжина,  $\text{м}$ ;

$M$  – кількість елементів;

$[N]$  – вектор коефіцієнтів функцій форми скінченного елемента;

$q$  – поверхнева густина теплового потоку,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$q_V$  – об'ємна густина теплового потоку,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;

$Q$  – тепловий потік,  $\text{Вт}$ ;

$r$  – поточний радіус,  $\text{м}$ ;

$r, \varphi, z$  – циліндричні координати;

$s$  – товщина стінки труби,  $\text{м}$ ;

$S$  – поверхня скінченного елемента,  $\text{м}^2$ ;

$T$  – температура,  $^\circ\text{C}$ ;

$V$  – об'єм,  $\text{м}^3$ ;

$w$  – вага квадратурної формули Гаусса;

$W$  – лінійна швидкість,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$x, y, z$  – декартові прямокутні координати;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;

$\delta$  – товщина окремого шару труби,  $\text{м}$ ;

$\lambda$  – теплопровідність,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;

$\xi, \eta$  – локальна система координат;

$\mu$  – корінь характеристичного рівняння;

$\theta$  – безрозмірна температура;

$\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\sigma$  – напруження, МПа;  
 $\tau$  – час, с;  
 $\nabla$  – оператор Гамільтона.

### **Основні індекси:**

0 – стосується початкового значення;  
 $e$  – стосується скінченного елемента;  
 $i$  – стосується  $i$ -го шару матеріалу труби;  
 $k$  – стосується  $k$ -го кроку розрахунку;  
 $l$  – стосується  $l$ -го кроку розрахунку;  
min – стосується мінімального значення;  
 $r, \varphi, z$  – стосується відповідної циліндричної координати;  
 $v$  – стосується внутрішньої поверхні труби;  
 $z$  – стосується зовнішньої поверхні труби;  
 $k$  – стосується кінцевого значення величини;  
кл – стосується калібратора;  
пов – стосується поверхні;  
 $s$  – стосується середнього значення величини;  
ср – стосується оточуючого середовища;  
 $\phi$  – стосується формування.

### **Основні скорочення:**

SDR – стандартне співвідношення діаметра і товщини стінки труби;  
ЄС – Європейський Союз;  
ЕРС – електрорушійна сила;  
кафедра МАХНВ – кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв інженерно-хімічного факультету НТУУ «КПІ»;  
кафедра ХПСМ – кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування інженерно-хімічного факультету НТУУ «КПІ»;  
НВП – науково-виробниче підприємство (при назві установи);  
НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»;  
ПАТ – публічне акціонерне товариство;  
ПБ – полібутилен;  
ПВХ – полівінілхлорид;  
ПЕ – поліетилен;  
ПЕВТ – поліетилен високого тиску;  
ПЕНТ – поліетилен низького тиску;  
ПП – поліпропілен.

# 1. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ

## 1.1. Полімерні труби і галузі їх застосування

Полімерні труби набувають все більш широкого застосування у різних сферах життєдіяльності: в будівництві, легкій, харчовій та інших галузях промисловості, а також у комунальному і сільському господарствах [1–27].

Труби з полімерних матеріалів з'явилися в 40-х роках ХХ століття. Перші труби були виготовлені з полівінілхлориду в 1935 році в Німеччині. Технологія їх виготовлення була складною, а військові дії в Європі загальмували її розвиток і поширення таких труб. Згодом з'явилися екструзійні агрегати, що дозволило організувати безперервний процес виготовлення труб і дало поштовх їх широкому застосуванню (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Хронологія створення полімерних труб

Рік створення	Матеріал	Позначення		Країна
		ГОСТ	ISO	
1935	Полівінілхлорид	ПВХ	PVC	Німеччина
1952	Поліетилен низької густини	ПЕНГ	PELD	Англія, США
1955	Поліетилен високої густини	ПЕВГ	PEHD	Німеччина, США
1958-1959	Поліпропілен	ПП	PP	Італія, США
1972	Молекулярнозшитий поліетилен	ПЕКС	PEX	Швеція, Німеччина
1972	Полібутілен	ПБ	PB	США
1979	Металопластик	МП	PEX-AL-PEX	Англія
1997	Армований ПП	МП	PP-STABIL	Німеччина
2004	Металопластик, тип II	МП	PERT-AL- PERT	Німеччина

Стійкість до гідролізу, кислот і лугів, низьке набування в нафті і нафтопродуктах дають можливість застосовувати полімерні труби в хімічній промисловості при прокладанні нових трубопроводів або для футеровки існуючих сталевих трубопроводів [28–31]. Полімерні труби мають низьку проникність по зрідженому і природному газу та одорантам, що разом з високими механічними властивостями дають їм можливість для широкого застосування під час транспортування природного газу [32–34].

Одним із шляхів утилізації полімерів є їх переробка у товстостінні багатопарові труби, що дає можливість безперервно переробляти промислові та побутові відходи при значній питомій продуктивності по вторинній сировині і одержувати вироби із задовільними споживчими та фізико-механічними властивостями [35, 36].

Крім того при застосуванні полімерних труб доволі легко виконати протипожежні заходи, що дозволяє забезпечити безпеку при прокладанні, наприклад, газопроводів з полімерних труб на рівні з металевим газопроводом [37].

У розвинутих країнах Європи полімерні труби в системах водопостачання майже витіснили інші види труби [38–41] (рис. 1.1).

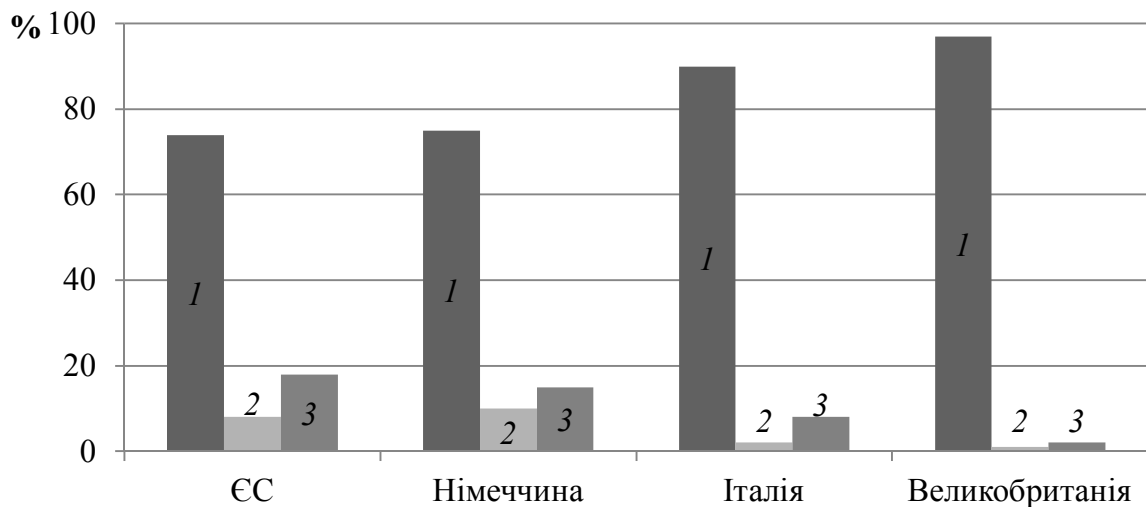


Рис. 1.1. Частка труб з різних матеріалів в системах водопостачання діаметром понад 200 мм [40]: 1 – полімерні, 2 – чавунні, 3 – інші

Щоб оцінити перспективи та доцільність використання полімерних труб сформулюємо їх переваги та недоліки в порівнянні з традиційними.

Переваги полімерних труб:

- не вступають в електрохімічні реакції, тобто не відбувається корозія стінки труби, що підвищує строк експлуатації не тільки трубопроводу, але й сполучених з ним приладів та обладнання;
- поверхня стінки полімерних труб гладкі, що унеможливорює заростання, що у свою чергу дозволяє ефективно використовувати труби меншого діаметра;
- порівняно легкі, мають високу еластичність, пластичність і міцність на розрив, що полегшує їх транспортування та монтаж;
- мають низьку теплопровідність, що зменшує втрати теплоти;
- заміна традиційного водопроводу на полімерний може проводитись методом проштовхування. Заміна трубопроводу таким методом може здійснюватися без улаштування траншеї, а відповідно без зупинки роботи об'єктів, під якими прокладають трубопровід [42, 43].

Недоліки полімерних труб:

– неможливість використання під дією ультрафіолетового випромінювання, тому при прокладанні просто неба необхідний їх захист;

– мають обмеження при використанні в системах опалення [27, 42, 43].

Порівняльна характеристика полімерних труб з найпоширеніших матеріалів і традиційних труб зведена до табл. 1.2.

За призначенням полімерні труби можна поділити на напірні (для холодного та гарячого водопостачання, транспортування газу, систем опалення і т.д.) і безнапірні (каналізація, дренаж). Також полімерні труби поділяють за матеріалом.

Сучасні технології дозволяють виготовляти полімерні труби діаметром до 4000 мм. При транспортуванні води застосовують переважно труби діаметром від 20 до 630 мм із SDR (стандартне співвідношення діаметра і товщини стінки труби) від 26 до 7,6, при транспортуванні газу – діаметром від 20 до 315 мм із SDR від 17,6 до 7,6. Труби більшого діаметра зазвичай застосовують для каналізації та дренажних систем [43].

Труби з полівінілхлориду (ПВХ) використовують у системах холодного водопостачання, в технологічних і каналізаційних системах. Порівняно з іншими полімерами ПВХ має пониженою горючість, підвищеною хімічну стійкість і є менш чутливим до ультрафіолетового випромінювання. ПВХ-труби з'єднуються методом «холодної зварки» або в розтруб на гумову манжету, через значну жорсткість таких труб, для їх з'єднання доводиться використовувати спеціальні фітинги. Напірні системи з ПВХ використовуються в основному для підземної прокладки. Оскільки ПВХ є одним з самих дешевих полімерів, вартість ПВХ-систем відповідно нижча аналогічних сталевих систем і систем з інших полімерів. Однак присутність хлору обмежує застосування таких труб для водопостачання і робить їх складними для вторинної переробки і утилізації, тому останнім часом від них намагаються відмовлятися [44].

Поліетилен (ПЕ) – найбільш використовуваний матеріал для виготовлення полімерних труб. Він хімічно стійкий, малотоксичний, має діелектричні властивості. Поліетилен зберігає експлуатаційні властивості при від'ємних температурах (до мінус 70 °С) і достатньо високу міцність при підвищених температурах (до плюс 60 °С) [45]. Під дією ультрафіолетового випромінювання ПЕ старіє, тому його стабілізують, наприклад, за допомогою сажі [46]. Оскільки міцність поліетилену високого тиску (ПЕВТ) у 2–3 рази менша від міцності поліетилену низького тиску (ПЕНТ), то його застосування для напірних труб обмежується малими діаметрами і галузями застосування, що вимагають високої гнучкості труб [15, 47]. Першим ПЕВГ, що використовувався для виробництва труб, був лінійний гомополімер, високомолекулярний ланцюг якого складався тільки з молекул етилену. При достатньо високій короткотривалій міцності гомополімер мав низьку стійкість до розтріскування і низькі міцнісні властивості при тривалій експлуатації. Значення MRS (мінімальна тривала міцність) складало 6,3 МПа [47].

Таблиця 1.2. Порівняльні характеристики труб різних типів

Тип труби властивості	поліпропілен	поліетілен	полівінілхлорид	чавун	сталь (корозійстійка)	залізобетон
1	2	3	4	5	6	7
Питома маса 1м/п, D = 160 мм, кг	7,06	3,77	5,62	28,1	17,5	104,9
ступінь шорсткості поверхні стінки	гладка	гладкі, сприяють малому опору потоку	низька шорсткість здатність до самоочищення	висока, залежить від внутрішнього покриття (епоксидне)	можливе заростання продуктами корозії, що призводить до підвищення шорсткості	підвищена
стійкість до корозії, заростання перетину	відсутня корозія і заростання перерізу	відсутня корозія і заростання перерізу	відсутня корозія і заростання перерізу	малої піддатливості до корозії, заростання перерізу	піддатливий електродно-хімічний корозійний заростання перетину в короткий період експлуатації	піддатливий корозійний заростання в короткий період експлуатації заростання перерізу
стійкість до мандрівного струму	діелектрик	діелектрик	діелектрик	провідник	провідник	нестійкий
стійкість до дії хімічних та активних речовин, хлорування	стійкі до дії хімічних та активних речовин, хлорування	стійкі до дії більшості хімічних речовин, не стійкі до дії активних речовин	підвищена стійкість до дії хімічних речовин, стійкість до хлорування та активних речовин	нестійкі до всіх чинників	стійкі до всіх чинників	нестійкі до дії кислот, лугів та солей

Продовження табл. 1.2.

1	2	3	4	5	6	7
стійкість до дії біологічних організмів (бактерії, грибок)	висока	висока	висока	низька	середня	низька
стійкість до дії ультрафіолетового випромінювання	втрачає міцність	стає крихким	стійкий	стійкий	пропускає ультрафіолетове випромінювання	стійкий
рівень зносостійкості	високий	високий	високий	низький	середній	низький
границя міцності при розриві, МПа	28–35	20–38	30–50	—	—	—
рівень морозостійкості, °С	—	до мінус 70	до мінус 10	до мінус 60	—	до мінус 50
робоча температура, °С	до 95	до 40	до 40	—	—	до 50
рівень шуму потоку рідини	середній	середній	середній	високий	високий	високий
строк служби, рік	не менше 50	не менше 50	не менше 50	15–20	80 за умов якісного монтажу	20–30

З метою уникнення проблем, що присутні при використанні поліетилену марки ПЕ63, було розроблено поліетилен нового покоління. За рахунок введення в процесі синтезу співмономерів (бутен або гексен), що утворюють на макромолекулах поліетилену бокові відгалуження, різко підвищилась стійкість полімеру до розтріскування і підвищилось значення MRS до 8,0 МПа [48]. Цим значенням характеризують поліетиленові труби з поліетилену марки ПЕ80. Однак, при цьому знизилась короткочасна міцність, модуль пружності і стійкість до швидкого поширення тріщин, що робить неможливим використання цього поліетилену для виробництва газопровідних труб на тиски вище 0,6 МПа [49].

Поєднання високої короткочасної міцності і високої стійкості до розтріскування вдалося отримати утворенням так званого бімодального поліетилену. Під час цілеспрямованого технологічного процесу синтезу отримують дві групи макромолекул – довго- та коротколанцюгові. При цьому співмономер вводиться в високомолекулярну частину полімеру, що забезпечує високу стійкість ПЕ до розтріскування. Низькомолекулярна частина полімеру утворює кристалічні області, за рахунок яких підвищується густина, короткочасна та тривала (MRS 10,0 МПа) міцність і збільшується модуль пружності. Такий поліетилен має високу стійкість до швидкого розповсюдження тріщин, що дозволило виготовляти труби на робочий тиск 1,2 МПа для газових трубопроводів і до 2,5 МПа для водопроводів [50–52]. Крім того, поліетилен ПЕ100 має хороші технологічні властивості. Незважаючи на високу в'язкість розплаву, наявність в розплаві низькомолекулярних фракцій відіграє роль змазки, чим полегшує екструзію полімеру [52].

Зшитий поліетилен (РЕХ) утворюється з'єднанням (зшиванням) по визначеній технології високомолекулярних лінійні ділянки макромолекул між собою поперечними зв'язками з утворенням тривимірної сітчастої структури. Після зшивання матеріал зберігає свої властивості пластика, однак для повторного використання стає непридатним. Поліетилен – єдиний з термопластичних матеріалів здатний до зшивання молекулярних ланцюгів у сітчасту структуру [53]. Зшивання поліетилену здійснюють декількома технологіями. Спосіб зшивання позначають в маркуванні труби першими буквами латинського алфавіту (а – пероксидний, b – силановий, с – радіаційний, d – зшивка азосполуками) [54]. Зшитий поліетилен, порівняно зі звичайним, є більш стійким до впливу високих температур і зберігає при цьому підвищені механічні властивості, характеризується гарною термоусадкою. Завдяки зшиванню покращуються такі показники, як тривала міцність, хімічна стійкість, стійкість до розтріскування, ударостійкість та морозостійкість [53–56].

Поліпропілен (ПП) має високу хімічну стійкість та антифрикційні властивості, має високу стійкість до тріщин від утомленості, підвищенні жорсткість та твердість. Діапазон температур використання під навантаженням від

мінус 5 до 100 °С. Для ПП характерні висока ударна в'язкість, стійкість до багаторазового згинання, задовільна зносостійкість.

Значно покращити властивості ПП вдалося при створенні рандом-співполімеру (ППР, PPRC) додаванням до молекулярного ланцюга молекули етилену [44]. Це дозволило підвищити в'язкість, еластичність, високотемпературну міцність поліпропілену. Завдяки високій еластичності матеріалу, вода в ППР трубах може замерзати, не руйнуючи їх. При переробці ППР та утилізації відходів не утворюються шкідливі речовини, з часом матеріал не виділяє токсичних речовин, що робить ППР труби значно безпечнішими для транспортування води.

Інша модифікація ПП – поліпропілен блочний співполімер (ППБ, PP-B, PP-2). У більшості випадків ППБ включає 20–30 % етиленових добавок, які надають йому у порівнянні з гомопропіленом більшу гнучкість і міцність при температурах до мінус 20 °С. При цьому він має порівняно низьку твердість та температурну стійкість (75–90 °С) [44].

Найбільшого застосування ПП труби набули в системах холодного та гарячого водопостачання, в системах опалення. Найбільший тиск, при якому застосовуються ПП труби, становить 2,5 МПа (труби марки PN 25) [44].

Полібутилен (ПБ) менш твердий порівняно з ПП та ПЕНТ, зносостійкий, морозостійкий – мінус 25–20 °С, порівняно з іншими поліолефінами ПБ характеризується більш високою тривалою міцністю, хімічною стійкістю, вогнестійкістю [53]. За рахунок порівняно низької теплопровідності при застосуванні ПБ-труб можна зменшити втрати теплоти в системах гарячого водопостачання та зменшити витрати на термоізоляцію.

Металопластикові труби поєднують якості полімерних і металевих труб. Найбільшого поширення набула п'ятишарова комбінація: зшитий поліетилен-алюміній (PEX-AL-PEX) [57]. Такі труби зберігають надану їм форму, не потребуючи фіксації, мають значно менший коефіцієнт лінійного розширення порівняно з іншими полімерними трубами, крізь їх стінку відсутнє проникнення кисню [44]. Такі труби не придатні для водопостачання при негативних температурах, не можуть бути з'єднані зварюванням [44]. Застосування поліетилену підвищеної термостійкості (Polyethylene of Raised Temperature) дало можливість досягти бажаної тривалої міцності при високих температурах без зшивання ПЕ, значно полегшити виробництво труб, підвищити продуктивність ліній і застосовувати зварювання для з'єднання таких труб [58, 59].

Для зниження термічних деформацій матеріал стінки армують високоміцним волокном (наприклад, кевлар) [60], орієнтованими високомодульними ПЕ стрічками, скловолоконном на спеціальному полієфірному з'єднувальному матеріалі [15, 61]. Однак більшому застосуванню таких труб заважає їх висока вартість.

Для безнапірних трубопроводів широко застосовують труби з профільованою стінкою (рис. 1.2) [62]. Труби типу *a* – спіральні труби – виготовляють

безперервним намотуванням на спеціальних пристроях-барабанах поліетиле- нових профілів різного поперечного перерізу з їх одночасною екструзійною зваркою. Труби типу *б* – армовані шлангом – виготовляють намотуванням на гладку полімерну трубу полімерних труб малого діаметра. Елементи з'єднують шаром розплаву полімеру. Труби типу *в* – гофровані – виготовляють коекструзією [32].

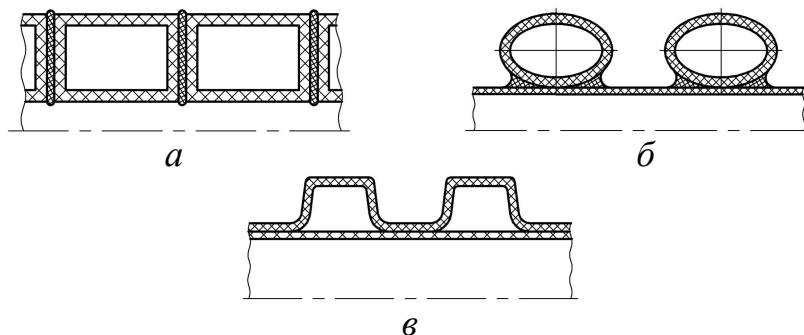


Рис. 1.2. Типи профільованих труб: *а* – спіральні, *б* – армовані, *в* – гофровані

Найбільшого поширення в Україні набули гофровані труби (тип *в*). У таких трубах зовнішній шар гофрований і, завдяки своєму профілю, є достатньо жорстким, а внутрішній шар – забезпечує задовільні гідравлічні умови [63]. Для виготовлення таких труб найбільше використовують ПЕ, рідше ПП і ПВХ [64].

На основі проведеного огляду можна класифікувати полімерні труби (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Схема класифікації полімерних труб

Таким чином, натеper є тенденція до поступового заміщення типових труб полімерними. Найбільшого поширення набули одно- і багат шарові поліетиленові труби, у тому числі гофровані. Поступово розробляють нові матеріали, що поліпшують експлуатаційні характеристики полімерних труб.

## 1.2. Процеси та обладнання виготовлення полімерних труб

Всі стадії технологічного процесу виготовлення полімерних труб неперервні та виконуються на одній лінії неперервної дії (рис. 1.3–1.5).

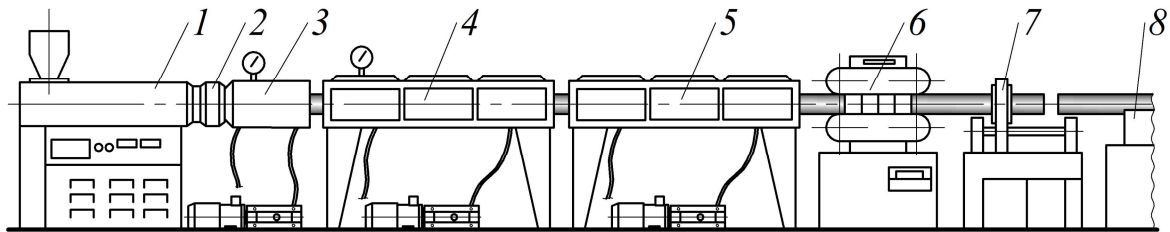


Рис. 1.4. Принципова схема виготовлення труб [65]: 1 – екструдер, 2 – трубна головка, 3 – калібрувальний пристрій, 4 – вакуум-ванна, 5 – ванна зрошення, 6 – тягнучий пристрій, 7 – відрізний пристрій, 8 – приймальний пристрій

Полімер подається в бункер екструдера 1, у якому відбувається плавлення та гомогенізація полімеру, а також створюється тиск, потрібний для продавлювання полімеру крізь трубну головку 2. У калібрувальному пристрої 3 відбувається калібрування труби і її попереднє охолодження. Подальше формування та остаточне охолодження здійснюється у вакуум-ванні 4 і ванні зрошення 5. Тягнучий пристрій 6 забезпечує рух труби крізь всі пристрої після екструдера. Труби відрізають відрізним пристроєм 7. Далі труби надходять до приймального пристрою 8.

При виготовленні двошарових гофрованих труб екструзія заготовок шарів відбувається одночасно, але з двох екструдерів крізь дві головки (рис. 1).

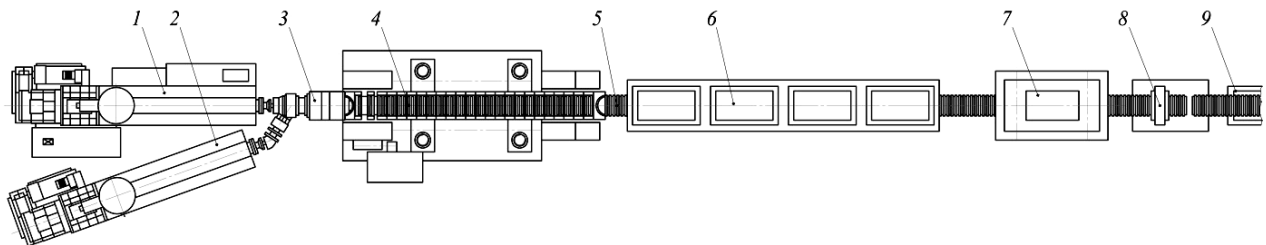


Рис. 1.4. Принципова апаратно-технологічна схема виробництва двошарових полімерних гофрованих труб: 1, 2 – екструдери; 3 – трубна головка; 4 – гофратор; 5 – полімерна гофрована труба; 6 – ванна охолодження; 7 – тягнучий пристрій; 8 – відрізний пристрій; 9 – приймальний пристрій

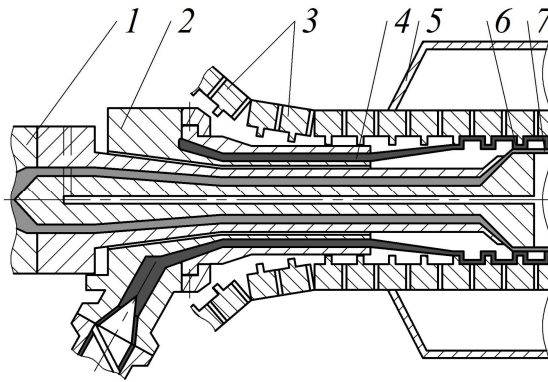


Рис. 1.5. Схема зовнішнього калібрування гофрованих двошарових труб [66]:  
 1 – прямоточна головка, 2 – кутова головка, 3 – напівформи гофратора,  
 4 – трубна заготованка, 5 – вакуумна камера, 6 – зовнішній гофрований шар,  
 7 – внутрішній гладкий шар

Гомогенний розплав з першого екструдера потрапляє в прямоточну головку 1, де формується трубна заготованка гладкого шару двошарової труби 7 (рис. 1.4). Ділянки транспортувального і формувального конфузорного зазорів головки 1 знаходяться в циліндричній порожнині кутової трубної головки 2. У головці 2 для гофрованого шару 4 формується заготовка, з якої вакуумом в камері 5 у півформах 3, утворюються гофри 6.

### 1.2.1. Підготовка розплаву полімеру

Для виготовлення труб головним чином використовують одночерв'ячні екструдери з робочою довжиною черв'яка  $(25-37)D$ , де  $D$  – діаметр черв'яка. Останнім часом віддають перевагу довгим черв'якам  $(37D)$ , що забезпечують меншу пульсацію розплаву і його кращу якість [53]. У лініях для виготовлення труб діаметром більше за 1000 мм іноді застосовують високопродуктивні двочерв'ячні екструдери.

Виконання повздовжнього рифлення циліндра (рис. 1.6, а) в зоні завантаження (70-ті роки ХХ століття) підвищило транспортувальну («штовхальну») здатність зони завантаження в 3-5 раз [54]. Застосування технології Power Feed Technology (PFT) фірмою Cincinnati Extrusion (2009 рік) дозволило ще підвищити продуктивність перероблення за меншого обертового моменту на черв'яку. Технологія PFT полягає у застосуванні завантажувальної охолоджуваної втулки з канавками спіральної конфігурації (рис. 1.6, б) [12].

Значно підвищити якість плавлення вдалося при застосуванні так званого бар'єрного черв'яка [67]. При цьому використання бар'єрного черв'яка без рифлення циліндра може призвести до закупорки бар'єру при підвищених швидкостях обертання черв'яка, тому що тверда пробка не встигне розплавитися [68].

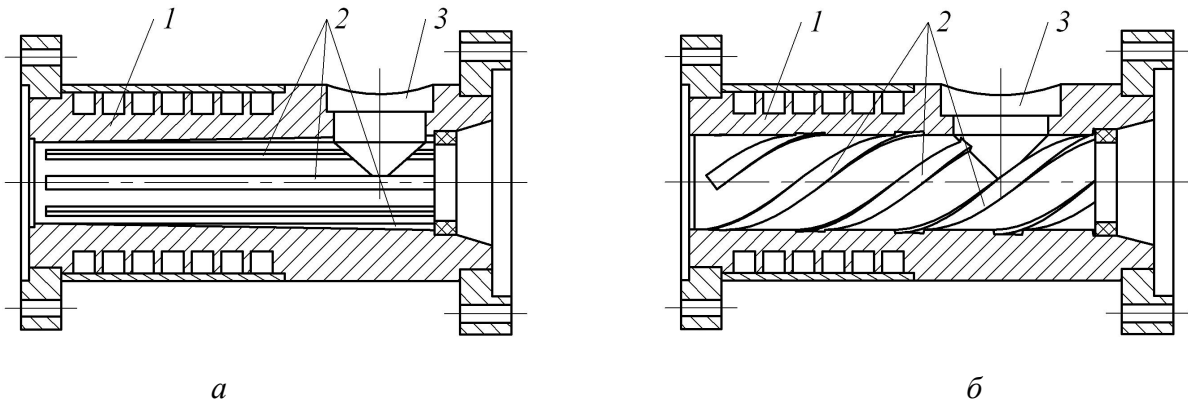


Рис. 1.6. Рифлення циліндра екструдера: *а* – повздовжні; *б* – спіральні;  
 1 – завантажувальна втулка; 2 – канавки; 3 – отвір під завантажувальним бункером

Існують два основні конструкторські підходи до виконання бар'єрної зони в одночерв'ячних екструдерах [54]. У першому випадку проектують бар'єрний зазор дещо збільшеним, щоб забезпечити перехід певної кількості не повністю розплавлених гранул полімеру в канал з розплавленим полімером (рис. 1.7, *а*). Це дещо знижує температуру розплаву за рахунок теплообміну з більш холодними частинками, що дозволяє уникнути термодеструкції. Однак такий підхід може призвести до недостатньої гомогенності розплаву полімеру.

За іншого конструкторського підходу бар'єрний зазор виконано настільки вузьким, що крізь нього може перетекти тільки розплавлений полімер (рис. 1.7, *б*).

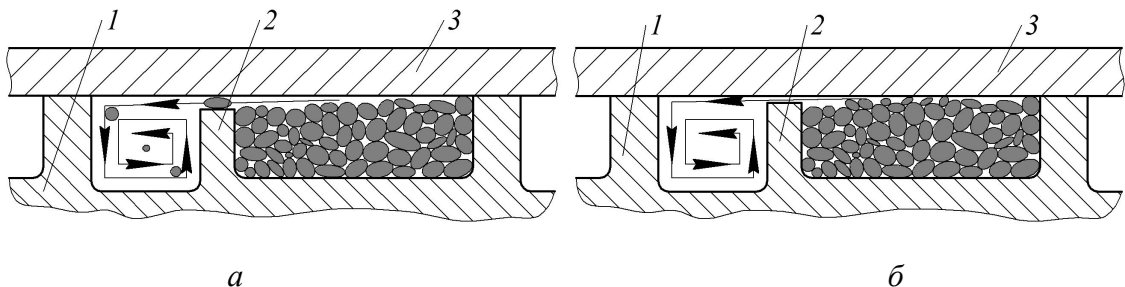


Рис. 1.7. Конструкції бар'єрного черв'яка; *а* – зі збільшеним бар'єрним зазором, *б* – з вузьким бар'єрним зазором; 1 – черв'як; 2 – бар'єр; 3 – циліндр

У парці [69] запропоновано в бар'єрі черв'яка виконувати отвори, що розширюються до грані, яка контактує з гранулами. Розплав полімеру частково перетікає у простір з гранулами, що інтенсифікує плавлення гранул, при цьому форма отворів перешкоджає потраплянню гранул у простір з розплавом (рис. 1.8). Таке виконання дозволяє значно скоротити зону плавлення і, відповідно, витрати енергії, а також сприяє гомогенізації розплаву вже в зоні плавлення.

Інший шлях підвищення інтенсивності плавлення і змішувального ефекту запропоновано в праці [70]. На гребені черв'яка виконано пази, які скошені у бік зони завантаження (рис. 1.9). При цьому зменшується зворотний потік розплаву перероблюваного матеріалу.

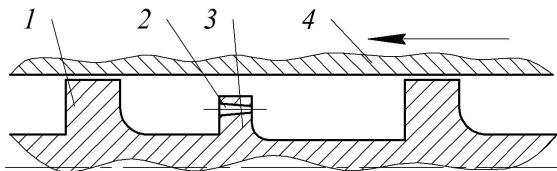


Рис. 1.8. Бар'єрний черв'як [68]:  
1 – черв'як; 2 – бар'єр; 3 – отвір;  
4 – циліндр

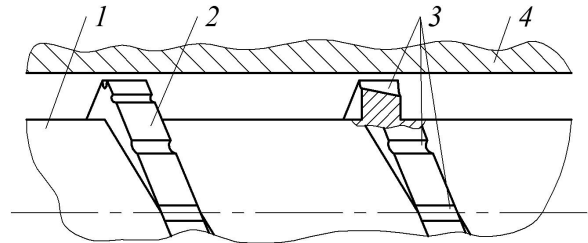


Рис. 1.9. Черв'як з пазами на гребенях витків [69]: 1 – черв'як; 2 – бар'єр; 3 – пази; 4 – циліндр

Значно підвищити якість гомогенізації вдалося за рахунок застосування змішувального елемента – «торпеди» (рис. 1.10, *а*). Крім очевидної гомогонізувальної дії вона створює значний гідравлічний опір (до 10 МПа), що не зменшує продуктивність, але підвищує гомогонізувальну дію попередніх зон черв'яка [68]. Також застосовують гвинтову торпеду (рис. 1.10, *б*) з покращеними характеристиками гомогенізації розплаву [15].

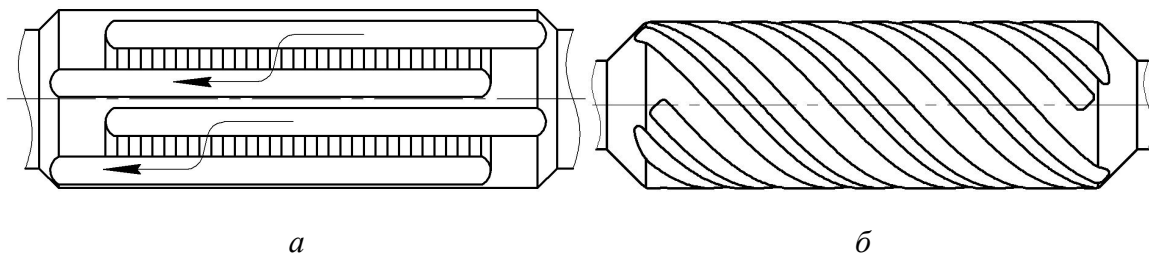


Рис. 1.10. Змішувальний елемент типу «торпеда»: *а* – прямий; *б* – гвинтовий

Сучасні черв'яки зазвичай мають два послідовно розміщені змішувальні елементи – «торпеду» і «пропелер» різної конструкції. Однак з метою ще більшого поліпшення якості гомогенізації фірмою KraussMaffei GmbH запропоновано застосування трьох послідовно розташованих змішувальних елементів, перші два з яких типу «торпеда», останній – «пропелер» (рис. 1.11) [71]. При цьому на внутрішній поверхні циліндра виконані пази в зоні плавлення і на ділянці першого змішувального елемента.

Збільшення гомогонізувального ефекту досягається за рахунок перерозподілу зони плавлення утворюваного біля стінки циліндра розплаву одразу в змішувальний елемент і за рахунок гомогенізації розплаву ще в одному змішувальному елементі.

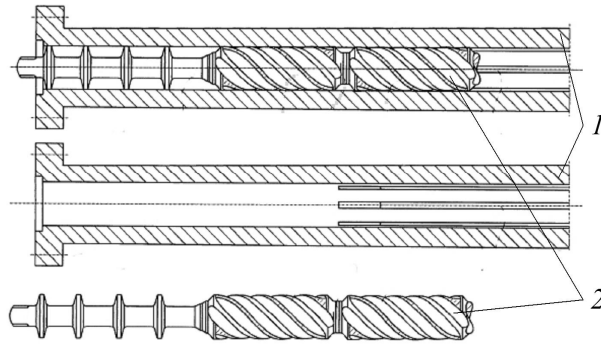


Рис. 1.11. Змішувальний елемент з трьох частин [71]:  
1 – циліндр; 2 – змішувальний елемент

Також для підвищення продуктивності і якості гомогенізації розплаву застосовують і інші різні змішувальні елементи і їх комбінації [72, 73].

### 1.2.2. Формування трубної заготовки

Найбільшого поширення для формування трубної заготовки набули прямоточні кільцеві головки з дорнотримачем. Недоліком таких головок є лінійний стик на готовому виробі, основною причиною яких є високий ступінь орієнтації розплаву поблизу спиць дорнотримача.

Натепер напрацьовано такі основні шляхи зменшення негативного ефекту від спиць дорнотримача [74]:

- використання елементів, що обертаються навколо осі головки;
- нанесення на спиці дорнотримача антиадгезійного покриття;
- збільшення зони стабілізації потоку;
- нагрівання спиць дорнотримача;
- направлення потоку полімеру по каналах, що істотно звужуються, одразу за спицями дорнотримача;
- застосування додаткових опорів;
- застосування змішувальних пристроїв.

Уникнути утворення ліній стику вдалося при застосуванні головок з сітчастою корзиною (рис. 1.12, а) або зі спіральним розподільником (рис. 1.12, б), які набувають все більшого поширення. Вони порівняно з головками з дорнотримачем мають меншу вагу, однак складніші у виготовленні, тому їх застосовують переважно під час виробництва труб великого діаметра (більше за 400 мм).

Поліпшити проходження розплаву крізь головку вдалося додаванням домішок, що зменшують тертя між розплавом і поверхнею корпусу головки, крізь додаткові канали в самій головці [75]. Це сприяє зменшенню гідравлічного опору головки та енергетичних витрат на продавлювання розплаву крізь неї, запобігає утворенню застійних зон, нагару на поверхні каналу та виникненню дефектів на поверхні труб.

З метою уникнення складної заміни формувального інструменту на трубній головці при переході на виробництво труб іншого типорозміру фірмою iNOEX GmbH запропоновано формувальну камеру MAXFLEXX, яка надає можливість без переривання виробництва змінити діаметр і товщину стінки труби [76].

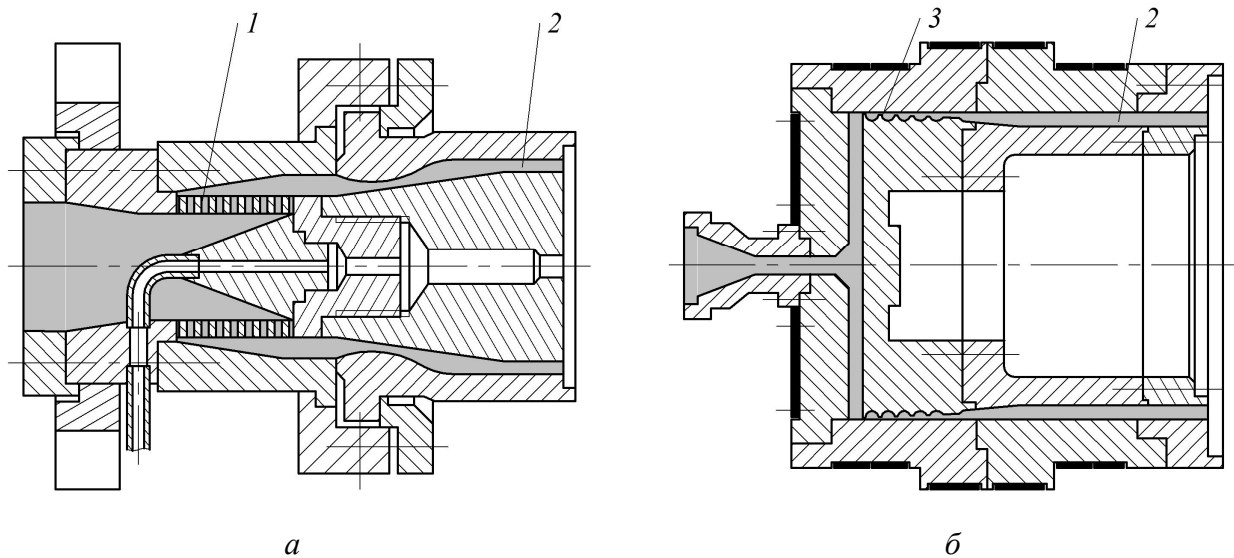


Рис. 1.12. Трубні головки: *а* – з сітчастою корзиною; *б* – зі спіральним розподільвачем; 1 – сітчаста корзина; 2 – зона релаксації; 3 – спіральний розподільник

Таким чином, сучасний рівень розвитку технологій приготування розплаву й формування трубної заготовки дає змогу підвищити продуктивність екструзійного обладнання до декількох тон за годину, однак наступні стадії калібрування і охолодження не забезпечують достатню інтенсивність відведення теплоти з стінки трубної заготовки, що не забезпечує її цілісність і якість за таких швидкостей руху.

Для відведення труби найбільш широко застосовують пристрої гусеничного типу. Відношенням швидкості відведення труби до швидкості екструзії полімеру регулюють ступінь витяжки труби [77]. Різання труб здійснюється пилами різної конструкції (циркуляційна, стрічкова).

Як видно, заключні операції майже не впливають на можливість інтенсифікації виготовлення труб, тому в цій роботі вони докладно не розглядаються.

### 1.2.3. Охолодження труб

У переважній кількості полімерних труб нормованим розміром є зовнішній діаметр, тому під час їх виготовлення застосовують зовнішнє калібрування [15].

Під час виготовлення труб виникає потреба корегувати діаметр калібрувальної поверхні. При застосуванні типових конструкцій калібрувальних при-

строїв у таких випадках необхідно і замінити калібрувальну поверхню, що призводить до значних втрат полімерного матеріалу і часу. У праці [78] цю проблему вирішено застосуванням низки кільцевих елементів 1, стики 2 яких рознесені один відносно іншого по колу таким чином, що в осьовому напрямку калібрувальна поверхня має замкнену кільцеву форму (рис. 1.13). По довжині калібрувального пристрою розташовані елементи 3, якими можна керувати, здійснюючи спільне стискання або розширення всіх кільцевих елементів 1 [78].

Значно збільшити діапазон регулювання діаметра калібрувальної поверхні вдалося при застосуванні конструкції, що запропоновано у праці [79]. За такого виконання калібрувальної поверхні зміна діаметра здійснюється при зміні довжини калібрувальної поверхні (рис. 1.14).

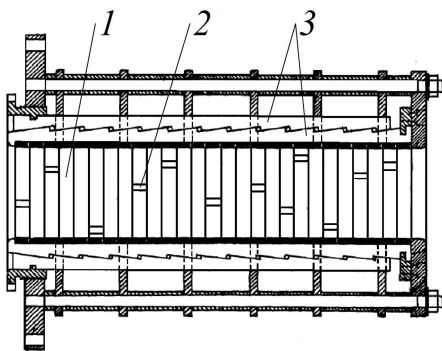


Рис. 1.13. Калібрувальний пристрій:  
1 – кільцевий елемент, 2 – стик,  
3 – елементи керування

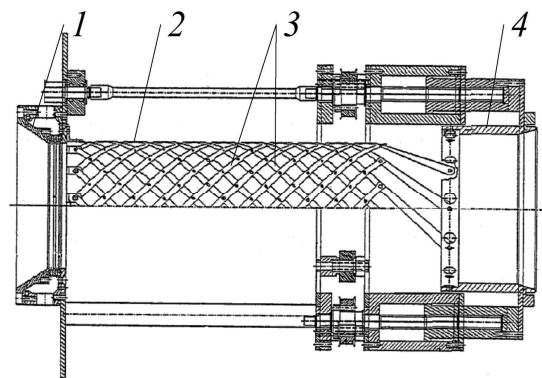


Рис. 1.14. Калібрувальний пристрій:  
1 – вхідний отвір; 2 – калібрувальний  
циліндр; 3 – спіральні стрічки;  
4 – вихідний отвір

У випадку виготовлення двошарових гофрованих полімерних труб для калібрування застосовують гофратори, у яких відбувається формування й попереднього охолодження гофрованих труб до температури, за якої труба не втрачає форми під час подальшого оброблення.

Гофратори можна класифікувати за принципом передачі руху півформам, за способом калібрування труби й за системою охолодження (рис. 1.15) [66].

Визначальним у конструкції гофратора є пристрій передачі руху півформам, оскільки він дозволяє прийняти ту чи іншу схему калібрування і охолодження.

Найбільшого поширення набули дволанцюгові гофратори (рис. 1.16), які мають можливість розведення півформ 6 завдяки переміщенню траверс 3 і 5 по колонах 4, що значно полегшує зміну півформ, але дещо ускладнює конструкцію гофратора [66].

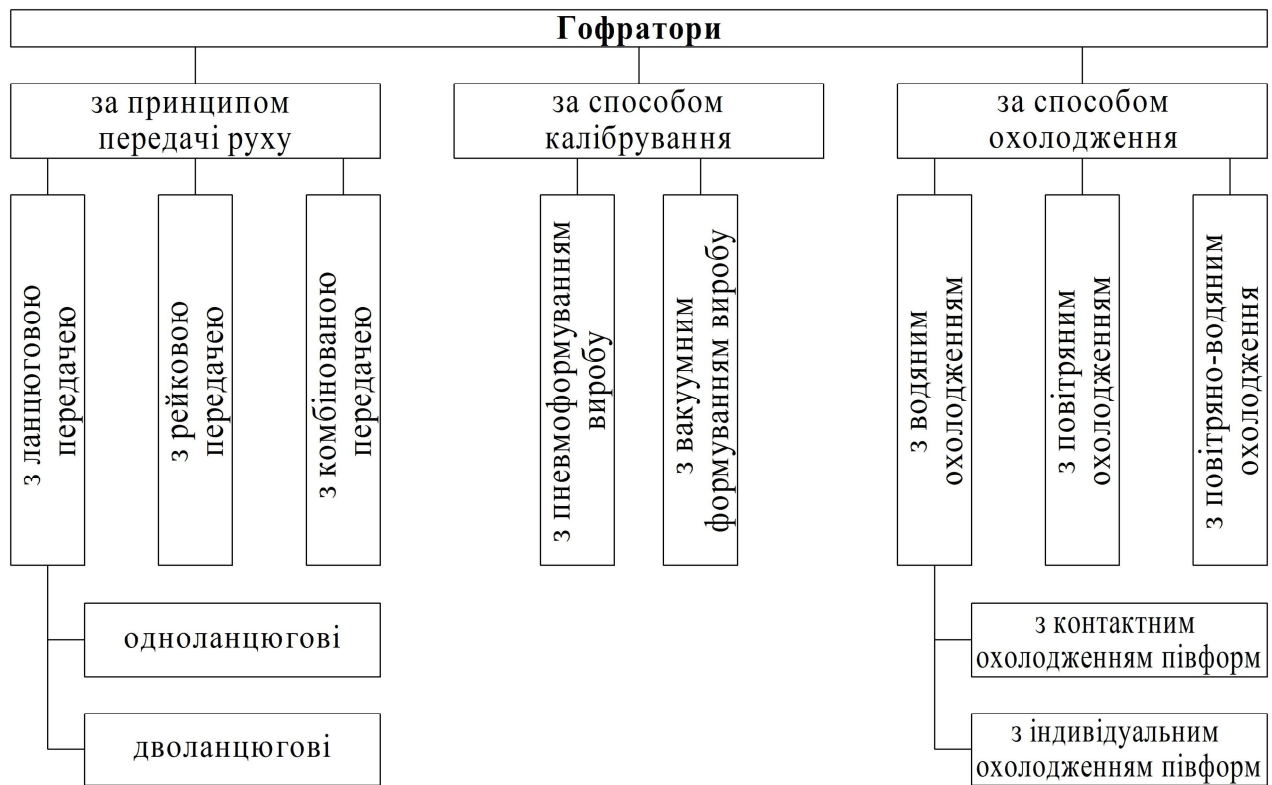


Рис. 1.15. Класифікація гофраторів

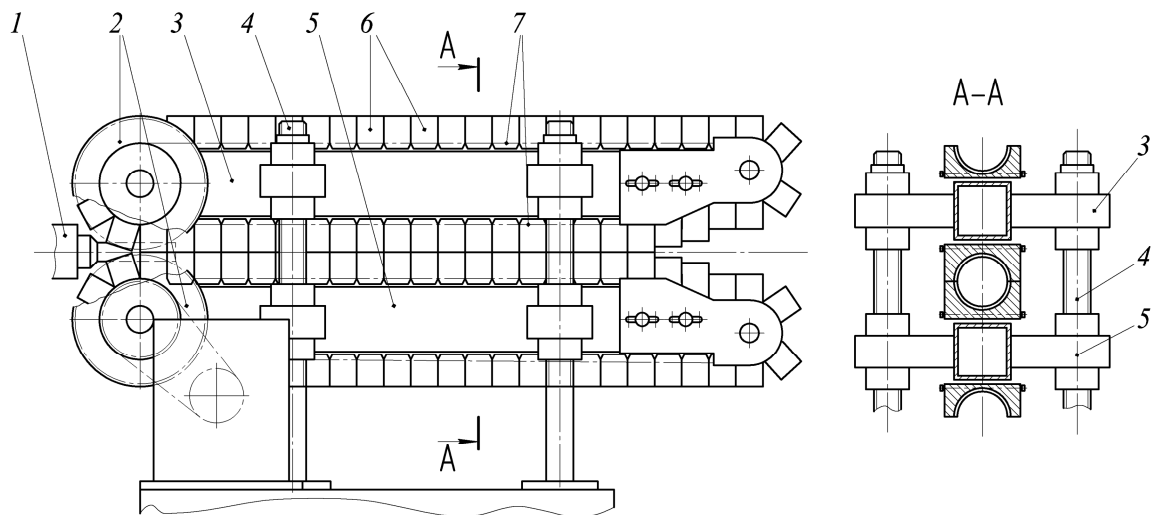


Рис. 1.16. Принципова конструктивна схема дволанцюгового гофратора:  
 1 – екструзійна головка; 2 – урухомні шестерні; 3 – верхня траверса; 4 – колона;  
 5 – нижня траверса; 6 – півформа; 7 – робочий ланцюг; 8 – редуктор урухомника;  
 9 – урухомна ланцюгова передача

У випадку повітряного охолодження півформ дволанцюгових гофраторів повітря вентиляторами 1 подають крізь дифузорний канал 2 до розподільної камери 3, де воно рівномірно розподіляється і, проходячи крізь отвори 4, охолоджує півформи 5 (рис 1.17) [80].

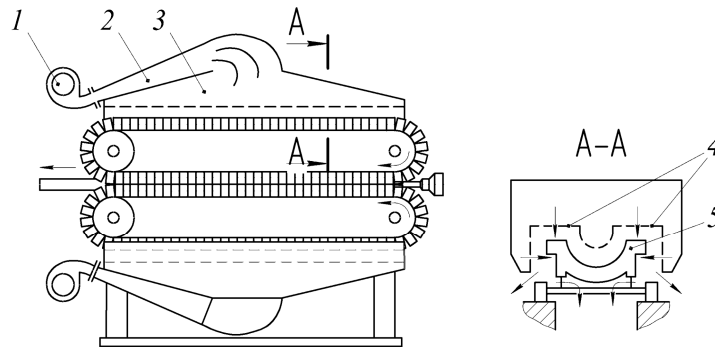


Рис. 1.17. Схема установки дволанцюгового гофратора з повітряним охолодженням півформ: 1 – вентилятор; 2 – дифузорний канал; 3 – напрямний короб; 4 – перфоровані отвори; 5 – півформа

Такий спосіб охолодження півформ є продуктивним і широко застосовується виробниками ГПТ. Він не потребує значних витрат енергії, але відведення теплоти є досить повільним, що призводить до збільшення кількості півформ для надання достатньої жорсткості ГПТ при виході з гофратора.

Інші системи охолодження в дволанцюгових гофраторах поширення не набули за винятком конструкції з індивідуальним водяним охолодженням півформ у замкненому циклі (рис. 1.18) [81].

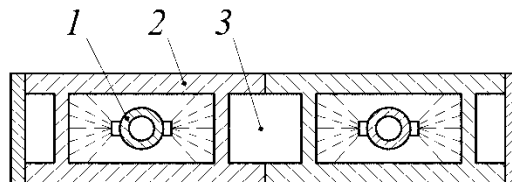


Рис. 1.18. Схема охолодження півформ дволанцюгового гофратора: 1 – форсунка; 2 – півформа; 3 – формувальний канал

Така система дає можливість швидко відвести теплоту від формувальних елементів, що дозволяє зменшити довжину ланцюга півформ, а отже і габаритів машини. Однак у цьому разі складно досягти рівномірного підведення охолоджувальної рідини до охолоджувального контуру півформ.

Одноланцюгові гофратори (рис. 1.19) зберігають усі переваги дволанцюгових і мають більш простий урухомник. Охолодження півформ одноланцюгових гофраторів, зазвичай, виконують повітрям, що подається вентиляторами [66].

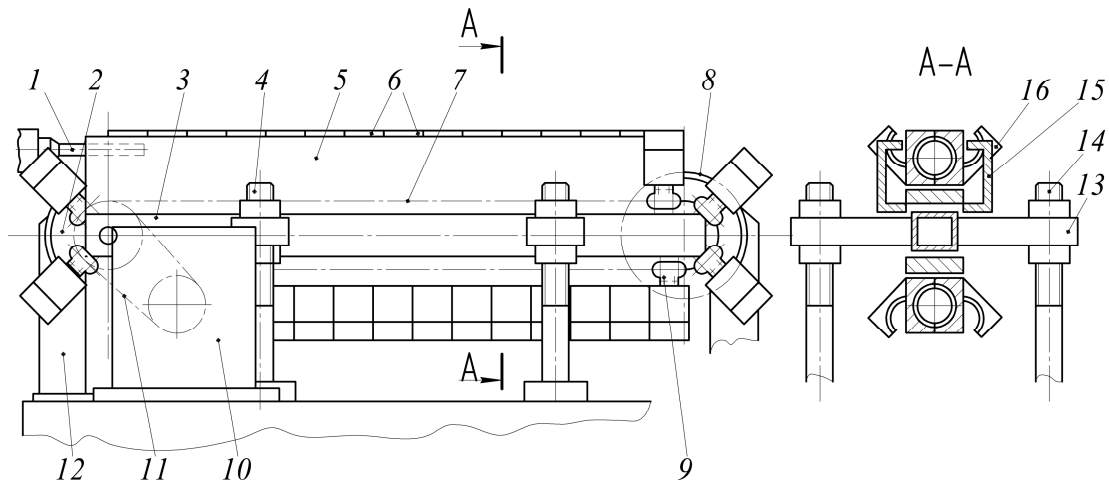


Рис. 1.19. Принципова схема одноланцюгового гофратора: 1 – екструзійна головка; 2 – урухомна шестерня; 3 – траверса; 4 – колона; 5 – напрямна; 6 – півформа; 7 – робочий ланцюг; 8 – заднє лекало; 9 – каретка шестерень; 10 – редуктор урухомника; 11 – урухомна ланцюгова передача; 12 – переднє лекало

Під час експлуатації одноланцюгового гофратора виявлено ряд його переваг перед гофраторами, що виконані за іншими схемами:

- зниження металоємності приблизно в 1,5 рази за рахунок спрощення кінетичної схеми та урухомника;
- покращення умов охолодження півформ гофратора при використанні повітряної схеми охолодження. Зменшення кількості зон охолодження в 1,5 рази дозволяє збільшити швидкість повітря, що подають для охолодження півформ;
- незначна потужність урухомника за рахунок виключення тертя ковзання під час руху ланцюга з півформами і відсутності взаємного перекосу між сполучними півформами;
- швидка та легка заміна ланцюга з півформами.

Розробку півформ гофратора здійснюють на основі загальних вимог, що враховують усадки, вибір матеріалів, чистоту обробки поверхні тощо під час переробки термопластів екструзійно-видувним способом формування.

На сьогоднішній день є два типи півформ: суцільні й складені. Суцільні півформи надійні і ремонтпридатні, але дорожчі і більш складні в експлуатації. Складені півформи значно простіші у виготовленні, проте вони менш надійні.

Для виготовлення гофрованих труб зазвичай використовують складені півформи.

У складеній півформі [82] вкладиш 2 з'єднаний з обоймою 1 за допомогою гвинтів 3 (рис. 1.20). Змінні вкладиші півформи можуть бути використані як для виготовлення гофрованих труб, так і для гладких або комбінованих. Вакуумування здійснюють за допомогою перфорованих отворів. За такої констру-

кції складно забезпечити суцільне прилягання формувальних вкладишів до обойми, що призводить до утворення порожнин з повітрям, які є термічним опором, а отже зменшить інтенсивність охолодження трубної заготовки.

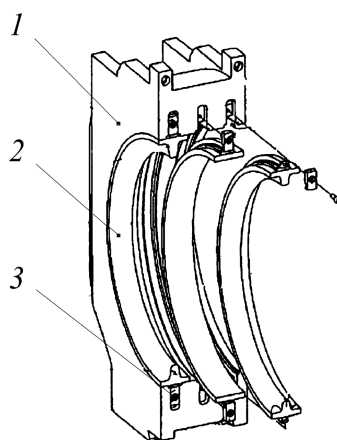


Рис. 1.20. Півформа гофратора: 1 – обойма; 2 – формувальний вкладиш; 3 – гвинт

У праці [83] формувальний елемент 3 (рис. 1.21) монтується безпосередньо на гофрах обойми 1 за допомогою кріплення 2. Збільшення висоти гофрів за того ж зовнішнього діаметра труби надасть можливість використовувати такі труби за більш складних умов експлуатації. Здатність отриманої ГПТ витримувати великі навантаження розширить межі застосування таких труб у різних галузях господарства.

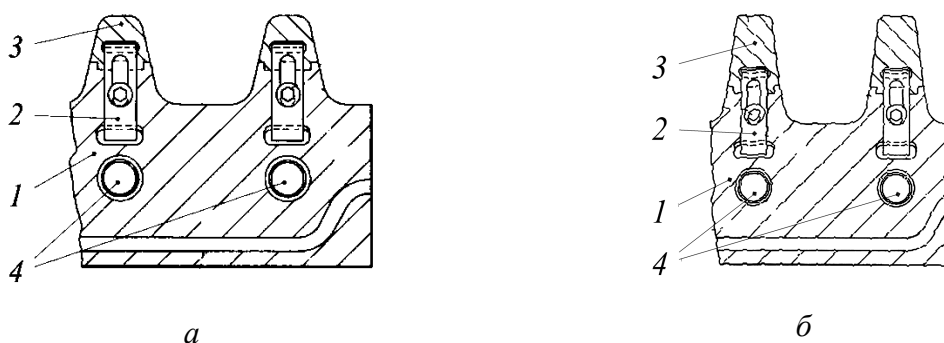


Рис. 1.21. Півформи гофратора: 1 – обойма; 2 – кріплення; 3 – формувальний елемент

Охолодження півформ здійснюють за допомогою охолоджувальної рідини, що циркулює в кільцевих каналах 4.

У півформ, що застосовують для вакуумного калібрування [66] (рис. 1.22), формувальна поверхня півформ 2 з'єднується з вакуумним каналом крізь прорізи б, ширина яких має бути досить малою, щоб уникнути засмоктання в них матеріалу під час формування. Охолодження відбувається за допомогою охолоджувальної рідини, що рухається в каналах 3.

Така півформа забезпечує високу продуктивність технологічної лінії, але потребує значних витрат енергії урухомника, а також енергії на охолодження й вакуумування.

Більш сучасна конструкція півформи для вакуумного калібрування складається з трьох частин (рис. 1.23) [84]: внутрішньої 1 з виконаними в ній перфорованими отворами для вакуумування, середньої 2, яка поділяє вакуум і охолодне середовище, та зовнішньої 3 – захисної накривки. У цьому разі забезпечується рівномірне вакуумування на внутрішніх бокових поверхнях півформ і вирівнюється температурне поле.

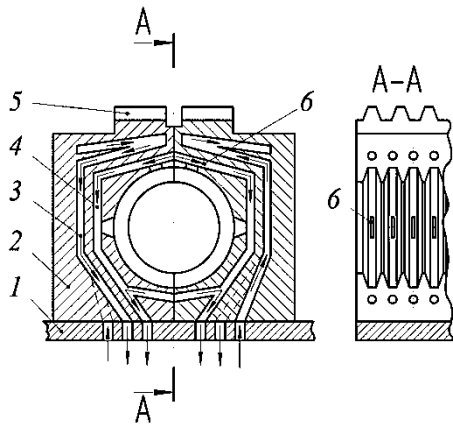


Рис. 1.22. Поперечний розріз півформ гофратора з вакуумною калібруванням: 1 – плита машини; 2 – півформи; 3 – канал для охолоджувальної води; 4 – канал для вакуумування; 5 – рейки; 6 – прорізи для вакуумування формувальної поверхні

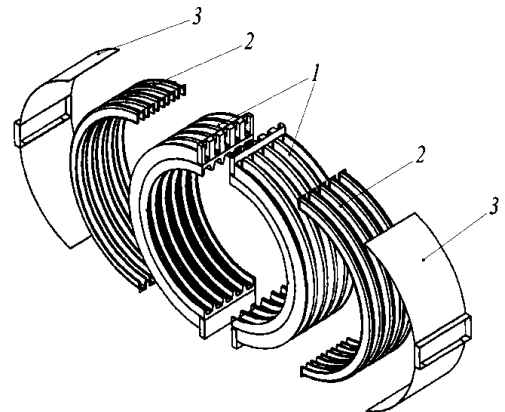


Рис. 1.23. Півформа для вакуумного калібрування: 1 – внутрішня частина; 2 – середня частина; 3 – зовнішня частина

Подальше охолодження труби може бути одностороннім зовнішнім або із застосування внутрішнього охолодження. 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. У праці [85] запропоновано інтенсифікувати цей процес встановленням по довжині ванни перегородок у вигляді ірисових діафрагм, які руйнуватимуть примежовий шар води, що утворюється біля стінки труби, причому конструкція перегородок дозволяє легко перейти на охолодження труб іншого типорозміру.

Дещо інтенсифікувати процес охолодження під час розпилення вдалося, встановивши вентилятори у ваннах над охолоджуваною трубою (рис. 1.24) [86]. Однак таку конструкцію неможливо застосувати у вакуум-ваннах, що при виготовленні труб з малими значеннями SDR складають більшу частину зони охолодження.

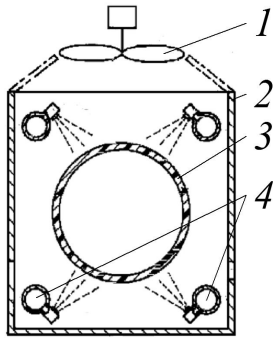


Рис. 1.24. Охолодна ванна [80]: 1 – вентилятор, 2 – ванна, 3 – труба, 4 – канали подачі охолодної води

нований зарубіжними авторами [89–91], а на деяких вітчизняних і російських підприємствах отримані перші результати застосування такої технології [11, 21].

У праці [90] запропоновано встановлення вентилятора 1 на виході з трубної головки 2 для примусової циркуляції повітря в порожнині труби 3 (рис. 1.25).

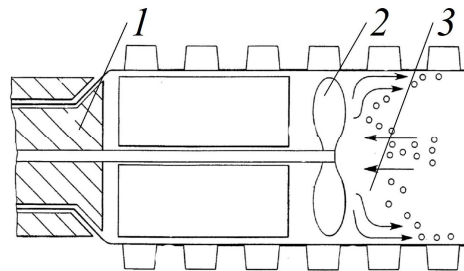


Рис. 1.25. Схема внутрішнього охолодження гофрованої труби за допомогою вентилятора: 1 – трубна головка; 2 – вентилятор, 3 – порожнина полімерної труби

У праці [91] запропонована конструкція подачі холодоагенту крізь трубну головку (рис. 1.26). Принцип роботи пристрою аналогічний роботі відцентрової форсунки. Це істотно збільшує тепловідведення від стінки труби та зменшує кількість води, необхідної для її охолодження. У той же час такий спосіб охолодження є інтенсивним тільки на виході з трубної головки, при подальшому же русі вздовж труби вже нагрітий холодоагент не забезпечує інтенсивного тепловідводу.

На основі проведеного огляду можна класифікувати системи охолодження екструдованих полімерних труб (рис. 1.27).

У праці [87] за рахунок ефективного потрапляння факелу розпилюваної води на поверхню охолоджуваної труби забезпечується підвищення ефективності охолодження в широкому діапазоні діаметрів труби. Це досягається за рахунок можливості переміщення розпилювачів у радіальному напрямку.

Останнім часом намітилася тенденція застосування процесу внутрішнього охолодження полімерних труб [11, 19].

Такий спосіб охолодження вже запропо-

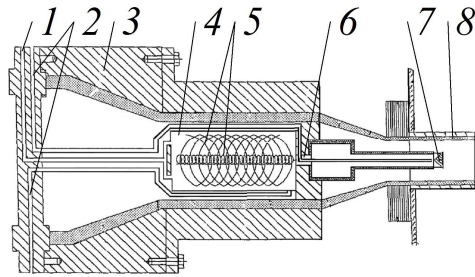


Рис. 1.26. Схема подачі повітряно-водяної суміші всередину труби: 1, 2, 6 – канали подачі повітря, води та повітряно-водяної суміші відповідно, 3 – трубна головка, 4 – камера, 5 – спіраль, 7 – розпилювальний пристрій, 8 – труба



Рис. 1.27. Схема класифікації систем охолодження полімерних труб

На основі досліджень встановлено, що можна підвищити ефективність охолодження полімерної труби на 5–10 % при застосуванні дискретної системи охолодження [92], тобто чергуючи зони повітряного та водяного охолодження.

Отже, одним із високо ефективних рішень інтенсифікації охолодження екструдованих труб є застосування двостороннього відведення теплоти з стінки. Однак, на даний час більшість рішень у цьому напрямку не є науково обґрунтованими і перевіреними на практиці.

#### 1.2.4. Вплив параметрів охолодження на якість полімерних труб

Нерівномірне охолодження в калібрувальному пристрої або при подальшому охолодженні в охолодних ваннах спричинює утворення залишкових напружень у стінці труби, що може погіршити якість та спричинити появу дефектів форми труби [10, 15]. Також анізотропія властивостей, у тому числі теплофізичних, впливає на багато характеристик виробу. Оскільки швидкість процесу кристалізації та твердіння полімерів визначається температурою, то за наявності температурного градієнта швидкість цих процесів різна по товщині стінки, відповідно, по-різному змінюється і об'єм в окремих прошарках матеріалу, що спричинює утворення в стінці градієнта напружень [17].

При односторонньому охолодженні трубної заготовки напруження є взаємно врівноваженими відносно середнього діаметра труби ( $D_c$ ) (рис. 1.28) і проявляється тільки на кінцях відрізка труби.

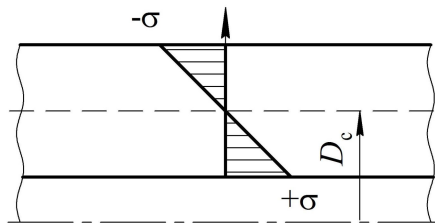


Рис. 1.28. Залишкові напруження при односторонньому охолодженні:  
 $D_c$  – середній діаметр,  $\sigma$  – напруження

На рис. 1.29 показано виникнення залишкових напружень в стінці труби при двосторонньому охолодженні трубної заготовки від температури формування ( $T_f$ ) до температури в приймальному пристрої [93]. У перший момент шари матеріалу, що контактують з охолодною поверхнею або водою, різко охолоджуються, в той час як температура середніх шарів ще достатньо велика. Поверхневі шари матеріалу стискаються відповідно коефіцієнту термічного розширення даного матеріалу, чому протидіють внутрішні ще гарячі шари.

Оскільки температура зовнішніх шарів нижче, а внутрішніх вище за середню температуру ( $T_c$ ), то по товщині стінки трубної заготовки діють температурні напруження, характер яких відповідає епюрі 2 (рис 1.29). У цьому випадку зовнішні шари є розтягнутими, внутрішні – стиснутими. При різкому охолодженні напруження в поверхневих шарах можуть перевищити границю плинності матеріалу і тоді ці шари будуть деформуватися необоротно, в той час як внутрішні шари перебувають у пружнодеформованому стані в умовах

всєбїчного стискування. На останньому етапї охолодження необоротно деформованї зовнїшнї шари заважають термїчному стисканню внутрїшнїх шарїв (рис 1.29, еюра 3) [93–95]. При рївномїрному охолодженнї трубної заготовки в поверхневих шарах виникають залишковї термїчнї напруження стискання, у внутрїшнїх – розтягнення.

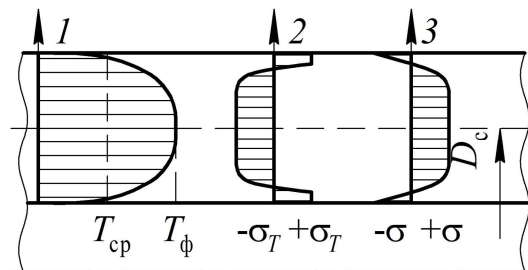


Рис. 1.29. Залишковї напруження при двосторонньому охолодженнї: 1 – еюра температури в початковий момент охолодження; 2 – еюра термїчних напружень у початковий момент охолодження; 3 – еюра залишкових напружень у стїнцї повнїстю охолодженої труби

У працї [10] наведенї результати експериментальної оцїнки залишкових напружень у стїнцї полїмерної труби за рїзних способїв охолодження трубної заготовки (рис. 1.30). Прийнято, що всї труби мають залишковї напруження по природї їх виготовлення. І хоча з часом цї напруження релаксують, можливість їх зменшення з самого початку забезпечить бїльш надїйну роботу трубопроводу [10, 96].

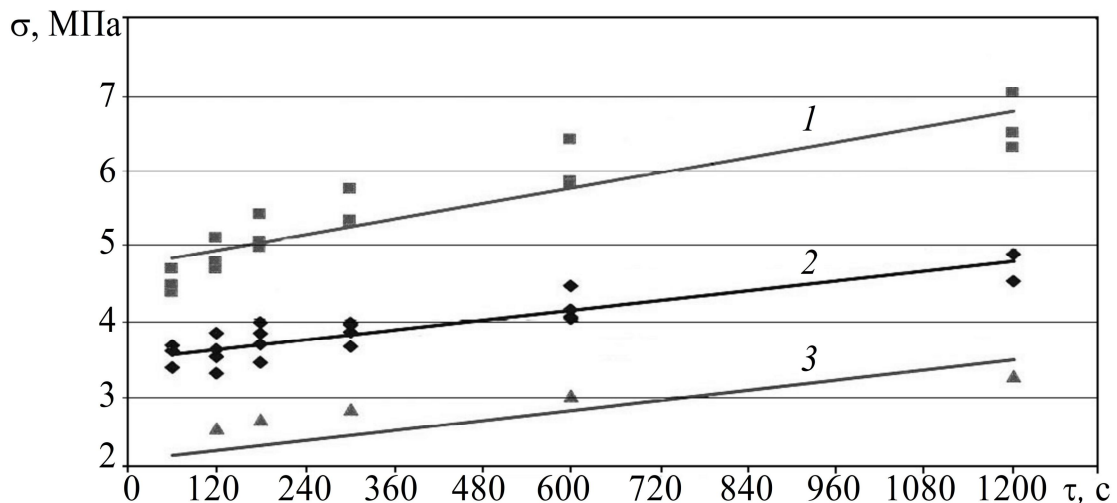


Рис. 1.30. Залишковї напруження в стїнцї полїмерної труби:  
1 – одностороннє охолодження; 2 – двостороннє охолодження повітрям;  
3 – двостороннє охолодження повітряно-водяною сумїшшю

Пїд час одностороннього вакуумного калїбрування і наступного охолодження полїмерних труб у вакуумних ваннах можливий перерозподїл на вну-

трішній поверхні стінки труби матеріалу, який ще перебуває у в'язкоплинному стані після трубної головки, що призводить до різнотовщинності стінки труби [48, 97]. Під час двостороннього охолодження матеріал на внутрішній поверхні стінки труби значно швидше переходить у високоеластичний стан, що значно зменшує різнотовщинність стінки труби.

Таким чином, величина залишкових напружень у трубі є пропорційною величині температурних градієнтів, відповідно умови охолодження значно впливають на властивості одержуваних полімерних труб. Так застосування двостороннього охолодження дозволяє вирівняти градієнт температур у стінці труби відносно середнього діаметра, що дає змогу зменшити дефекти форми труби від залишкових напружень.

### 1.3. Моделювання процесів калібрування та охолодження труб

Для визначення раціональних параметрів процесів охолодження труби на кожній з ділянок охолодження потрібні науково обґрунтовані математичні моделі, які враховуватимуть конструктивні особливості калібрувальних і охолоджувальних пристроїв в умовах характерних кожній з виділених ділянок [98].

Основою проектного розрахунку пристроїв для охолодження труб є визначення довжини зони обробки за умови заданої продуктивності технологічної лінії. У цьому разі метою розрахунку є визначення температурного поля виробу та часу його перебування в зоні обробки, що за відомої швидкості виробу дає можливість визначити розміри цієї зони [16]. Основою же перевірного розрахунку зазначених пристроїв є визначення максимальної швидкості виробу в зоні термообробки відомих розмірів, а метою визначення температурного поля виробу на виході із зони термообробки та порівняння розрахованої температури з допустимою.

Охолодження полімерної труби є нестационарним процесом, який розглядають в рухомій системі координат [10, 13, 15, 20, 99]. У праці [14] процес розглянуто в нерухомій системі координат, що дає можливість розглядати охолодження труби, як стаціонарний процес.

У праці [10] запропонована методика розрахунку довжини зони охолодження  $L$ , яка базується на великому практичному досвіді

$$L = KG / (SDR),$$

де  $K$  – числовий коефіцієнт, що залежить від умов охолодження;  $G$  – масова продуктивність, кг/год;  $SDR$  – стандартне розмірне співвідношення труб.

Такий спосіб взагалі не прийнятний для дослідження температурних полів у стінці, дає значні похибки під час визначення довжини зони охолодження для багат шарових труб і труб нових типорозмірів, а також не дає змоги врахувати теплообмін на внутрішній поверхні труби, при цьому не враховуються теплофізичні властивості полімеру і охолодного середовища.

У працях [15, 99] стінку труби приймають як пластину, а охолодження труби розглядають в нерухомій декартовій системі координат (рис. 1.31). Задачу вважають одномірною оскільки ширина і довжина труби більші на декілька порядків за її товщину.

Основою розглядуваної моделі є використання закономірностей нестационарного процесу до стаціонарного характеру виробництва виробів із полімерних матеріалів. Цю модель процесу можна представити в наступному вигляді

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

Початкова умова

$$T = T_0 \Big|_{\tau=0}. \quad (1.2)$$

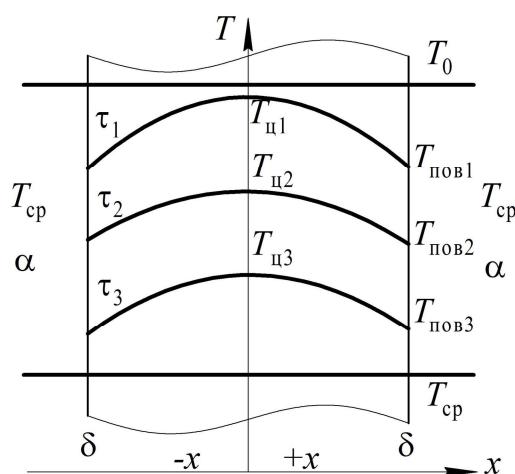


Рис. 1.31. Зміна температури по товщині стінки:  $T_{\text{ср}}$ ,  $T_0$ ,  $T_{\text{пов}}$ ,  $T_{\text{ц}}$  – температури охолодного середовища, розплаву, поверхні, центра пластини, відповідно;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі середовища;  $\delta$  – товщина половини стінки,  $\tau$  – час

Граничні умови (третього роду)

$$\alpha(T_{\text{пов}} - T_{\text{ср}}) \Big|_{x=\pm\delta} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\pm\delta}. \quad (1.3)$$

Умови однозначно враховують теплофізичні властивості полімеру і охолодного середовища, які знаходяться за відносними температурами. Розв'язок диференціального рівняння (1.1) при початковій умові (1.2) та граничних умовах (1.3) представлено у вигляді

$$\theta = \frac{T - T_{\text{ср}}}{T_0 - T_{\text{ср}}} = \frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cdot \cos \mu_1} \cos\left(\mu_1 \frac{x}{\delta}\right) \exp(-\mu_1^2 \cdot Fo) \quad (1.4)$$

або

$$\theta = A \cdot \cos\left(\mu_1 \frac{x}{\delta}\right) \exp(-\mu_1^2 \cdot Fo),$$

де  $\mu$  – корінь характеристичного рівняння

$$\operatorname{ctg}\mu = \frac{\mu}{\operatorname{Bi}}.$$

Величина  $A$  є функцією критерію  $\operatorname{Bi} = \alpha\delta/\lambda$  та завчасно може бути розрахована та протабульована. Рівняння (1.4) описує температуру для будь-якого значення  $x$ , а при фіксованій координаті (центр стінки або поверхня) безрозмірна температура являється функцією двох критеріїв

$$\begin{aligned}\theta_{\text{ц}} &= f_1(\operatorname{Bi}; \operatorname{Fo}), \\ \theta_{\text{пов}} &= f_2(\operatorname{Bi}; \operatorname{Fo}).\end{aligned}$$

Після логарифмування (1.4) можна побудувати графічні залежності  $\theta = f(\operatorname{Bi}; \operatorname{Fo})$ , а потім по значенню  $\theta$  визначається температура стінки.

За такої моделі складно точно обрахувати температуру у не характерних точках (центр стінки або поверхня) і, відповідно, якісно врахувати вплив теплофізичних властивостей полімеру, ще негативно впливає на точність розрахунків. Таку модель не можливо застосувати для розрахунку багат шарових труб, у яких теплофізичні властивості кожного шару значно відрізняються. Також за такої моделі не можливо визначити температурні поля під час охолодження крізь металеву стінку в охолодних пристроях контактного типу (калібратор, вакуум-ванна).

Більш точно описують процес в циліндричній системі координат (рис. 1.32) [13, 14, 20]. При цьому моделювання процесу охолодження труби базується на розв'язанні рівняння нестационарної теплопровідності, що описує перенос теплоти по товщині стінки труби [9, 10, 13, 14, 20]

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda(T)\nabla T), \quad (1.5)$$

де  $\rho$ ,  $c$  і  $\lambda$  – густина, масова теплоємність і теплопровідність матеріалу стінки труби;  $T$  – поточна температура матеріалу труби;  $\tau$  – час.

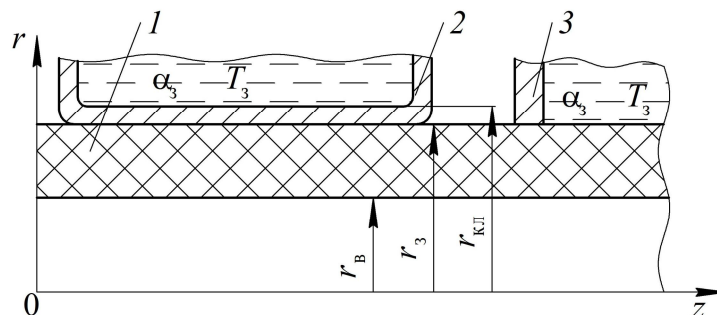


Рис. 1.32. Розрахункова схема процесу охолодження полімерної труби в циліндричній системі координат: 1 – полімерна труба, 2 – калібрувальний пристрій, 3 – охолодна ванна;  $r_{\text{в}}$ ,  $r_{\text{з}}$ ,  $r_{\text{кл}}$  – радіуси труби внутрішній, зовнішній і радіус калібрувальної втулки відповідно,  $\alpha_{\text{з}}$  – коефіцієнт тепловіддачі зовнішнього середовища,  $T_{\text{з}}$  – температура зовнішнього середовища

У циліндричній системі координат рівняння (1.5) має вигляд

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\lambda(T)}{r}\frac{\partial T}{\partial r},$$

де  $r$  – поточний радіус труби.

Під час опису процесу охолодження труби в нерухомій системі координат час  $\tau$  виражається через швидкість відведення труби та координату  $z$  [14]

$$W_z\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\lambda(T)}{r}\frac{\partial T}{\partial r}. \quad (1.6)$$

Початкова умова

$$T = T_0|_{\tau=0}. \quad (1.7)$$

В зазначених працях теплообміном на внутрішній поверхні нехтують

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_b} = 0. \quad (1.8)$$

На поверхнях контакту полімеру з внутрішньою поверхнею калібрувальної втулки ( $r = r_3$ ) та зовнішньою поверхнею втулки і водою ( $r = r_{\text{кл}}$ ) щільність теплового потоку  $q$  одна і таж, тому граничні умови мають вигляд

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_3-0} = \lambda_{\text{кл}}\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_3+0}, \quad (1.9)$$

$$\lambda_{\text{кл}}\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_{\text{кл}}} = \alpha_3(T_{\text{кл}} - T_3). \quad (1.10)$$

Під час охолодження у ваннах граничні умови мають вигляд

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_3} = \alpha_3(T_{\text{пов}} - T_3). \quad (1.11)$$

Математична модель охолодження (1.6)–(1.11) розв'язується числовими методами, застосовуючи неявну [13] або явну [14] кінцево-різницеву схеми.

Однак у зазначених методиках також не передбачена можливість моделювання процесу охолодження багатошарових труб і не врахована можливість аналізу процесу відведення теплоти з внутрішньої поверхні стінки труби.

Відповідно виникає потреба в розробленні методики розрахунку температурних полів у стінці багатошарової полімерної труби під час охолодження з урахуванням можливості відведення теплоти з обох поверхонь стінки.

Всі наведені методики моделювання охолодження стосуються тільки гладких труб. Проектування ж систем охолодження гофрованих труб виконується виробниками відповідного обладнання, базуючись на практичному досвіді. Однак при використанні нових матеріалів і виготовленні труб з новою конструкцією стінки попередній досвід може бути неприйнятним, а напрацювання нового потребує значних затрат енергії, матеріальних і людських ресурсів. На час виконання досліджень існуючих методик моделювання процесу

охолодження двошарових гофрованих полімерних труб не було знайдено.

Однак слід розглянути моделювання теплопровідності оребрених поверхонь [100–102], насамперед оребрених труб [103–105], що за формою поперерізу дуже схожі на гофровані двошарові полімерні труби.

Розглядаючи кругле ребро товщиною  $\delta$  з радіусами  $r_1$  і  $r_2$  (рис. 1.33) прийнято, що основа ребра ( $r = r_1$ ) має постійну температуру  $T_0$ , а температура охолодного середовища  $T_{cp} = \text{const}$ . При цьому теплопровідність ребра приймається однаковою у всіх точках ребра. Також нехтують зміною температури по товщині ребра. Для визначення температурних полів складають тепловий баланс

$$\frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\theta}{dr} - \frac{2\alpha}{\lambda\delta} \theta = 0, \quad (1.12)$$

де  $\theta = T - T_{cp}$  – надлишкова температура ребра, °С.

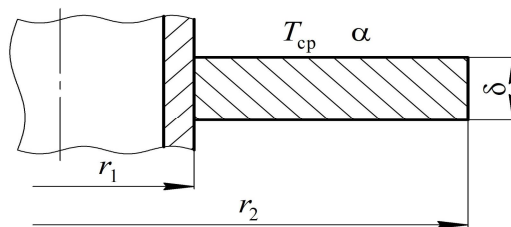


Рис. 1.33. Розрахункова схема процесу охолодження ребра

Комплекс величин  $2\alpha/(\lambda\delta) = m^2$ . Позначимо  $z = mr$ . Після простих перетворень (1.12) отримано рівняння

$$\frac{d^2\theta}{dz^2} + \frac{1}{z} \cdot \frac{d\theta}{dz} - \theta = 0, \quad (1.13)$$

яке відноситься до класу спеціальних диференціальних рівнянь, що називаються рівняннями Бесселя. Відповідно розв'язок (1.13) можна записати

$$\theta = C_1 I_0(z) + C_2 K_0(z),$$

де  $I_0(z) = I_0(mr)$  – модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку;  $K_0(z) = K_0(mr)$  – модифікована функція Бесселя другого роду нульового порядку;  $C_1$  і  $C_2$  знаходяться з граничних умов

$$\theta(mr)|_{r=r_1} = \theta_0; \quad \left. \frac{d\theta}{dr} \right|_{r=r_2} = 0.$$

Остаточний розв'язок має вигляд

$$\theta = \theta_0 \frac{I_0(mr)K_1(mr_2) + I_1(mr_2)K_0(mr)}{I_0(mr_1)K_1(mr_2) + I_1(mr_2)K_0(mr_1)},$$

де  $I_1(z)$  і  $K_1(z)$  – функції Бесселя першого порядку першого і другого роду відповідно. Таблиці функцій Бесселя є в математичних довідниках.

При цьому для наближеного врахування теплообміну з зовнішньої бокової поверхні ребра умовно збільшують  $r_2$  на значення рівне  $0,5\delta$ .

Для моделювання охолодження двошарової гофрованої труби зазначену методику дуже складно застосувати, адже вона не дає змоги врахувати наявність повітря в середині гофри, а також ця модель не враховує зміни температури по товщині ребра, що може призвести до значних похибок за приблизно однакових розмірах сторін ребра, яку у випадку з розглядуваними трубами. Крім цього під час охолодження труб температура вздовж основи гофри (ребра) значно змінюється, що не можливо врахувати у наведеній моделі.

Відповідно виникає потреба в розробленні наукових засад і математичних моделей охолодження гофрованих полімерних труб у гофраторі і охолодних ваннах, які дали б змогу проектувати ефективно обладнання і прогнозувати режими його роботи.

#### **1.4. Висновки і завдання дослідження**

Подальше істотне підвищення обсягів виготовлення полімерних труб можливе лише за рахунок інтенсифікації процесу охолодження за допомогою застосування разом із зовнішнім охолодженням внутрішнього. Процес двостороннього охолодження є достатньо ефективним, проте його впровадження пов'язане зі складністю визначення режимів роботи обладнання і параметрів охолодних пристроїв. На теперішній час вибір цих параметрів проводиться експериментально, що потребує значних матеріальних витрат.

Для розв'язання поставлених задач важливого значення набуває математичне моделювання процесу охолодження, яке дозволяє на основі числового моделювання здійснювати обґрунтований вибір параметрів обладнання і режимів охолодження, які забезпечують відповідну інтенсивність охолодження і якість труб. Числове моделювання дозволяє також істотно скоротити обсяг експериментальних досліджень і зменшити вартість проектних робіт.

Аналіз тенденцій розвитку процесу та обладнання виробництва полімерних труб дозволяє зробити такі висновки.

1. На сучасному етапі розвитку обладнання і технології виготовлення екструдованих полімерних труб обмежною стадією є охолодження.

2. Теорія розрахунку одностороннього охолодження гладких одношарових полімерних труб достатньо висвітлена в літературі, однак натепер відсутня математична модель охолодження гладких полімерних труб, яка б давала можливість враховувати теплофізичні властивості для кожного шару багатошарових гладких труб, а також враховувати теплообмін на внутрішній поверхні труби.

3. Натепер відсутня методика моделювання охолодження багатошарових гофрованих полімерних труб. При цьому проектування охолодного обладнання ліній виготовлення таких труб базується тільки на практичному досві-

ді, що може призводити до нераціональної роботи ліній в цілому.

4. Для одержання достовірних даних необхідна розробка наукових методик моделювання процесу охолодження як гладких, так і гофрованих полімерних труб, які б враховували різні властивості матеріалів багатошарової стінки і зміну їх теплофізичних властивостей від температури та можливість двостороннього охолодження.

5. Відсутність достовірних експериментальних даних процесу двостороннього охолодження обмежує застосування числового моделювання.

6. Незначний обсяг досліджень двостороннього охолодження екструдованих полімерних труб не дає змоги ефективно застосовувати такий спосіб охолодження, відповідно виникає потреба у розробці ресурсо- і енергоефективних параметрів роботи двосторонньої системи охолодження.

Для проведення досліджень двостороннього охолодження необхідне створення спеціальної дослідної установки.

У зв'язку з викладеним завдання досліджень такі:

1. Проаналізувати стан питання моделювання процесів та обладнання ліній виготовлення екструдованих полімерних труб, обґрунтувати доцільність застосування двостороннього охолодження.

2. Розробити фізичну модель процесів та обладнання для охолодження багатошарових гофрованих труб та удосконалити фізичну модель процесів та обладнання для двостороннього охолодження багатошарових гладких труб.

3. Розробити математичні моделі та алгоритми розрахунку процесу двостороннього охолодження багатошарових труб, у тому числі гофрованих, у процесі їх виготовлення екструзією.

4. Експериментально дослідити одно- і двостороннє охолодження полімерних труб.

5. Розробити рекомендації із впровадження енергоефективних процесів та обладнання охолодження полімерних труб.

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ЕКСТРУДОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ

### 2.1. Охолодження гофрованих полімерних труб

#### 2.1.1. Фізична модель процесу

Формування гофрованих труб і попереднє охолодження трубної заготовки до температури, за якої властивості полімеру забезпечують збереження форми труби під час подальшої її обробки, здійснюють у гофраторах. Остаточне охолодження труби здійснюють у ваннах зрошенням зовнішньої стінки водою (рис. 2.1). Кількість ванн залежить від типорозміру труби та продуктивності лінії [15].

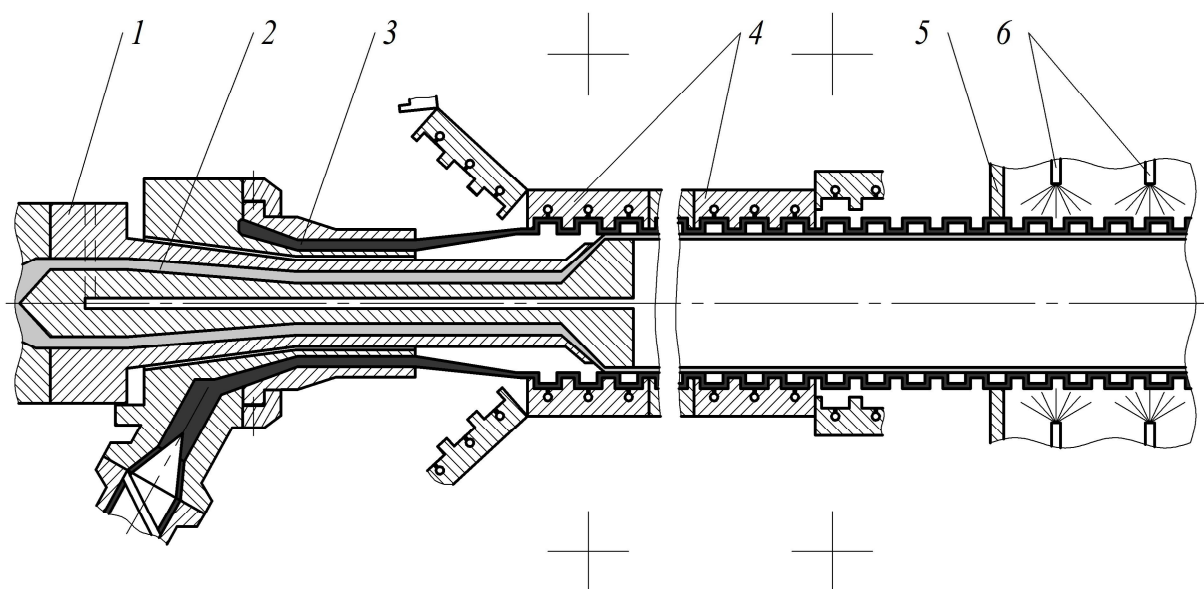


Рис. 2.1. Схема виготовлення двошарових гофрованих труб: 1 – прямоточна екструзійна головка; 2 – кутова екструзійна головка; 3 – труба заготованка зовнішнього шару; 4 – півформи гофратора; 5 – ванна охолодження; 6 – форсунки

Формування гофрів здійснюють вакуумуванням крізь повздовжні зазори у впадинах півформ гофратора, які сполучені з кільцевими каналами, по яких рухається охолодна вода. При цьому тепловий потік рухається переважно крізь матеріал гофратора. Інтенсивність охолодження визначають режимом течії охолодної води в кільцевому каналі, які переважно виконуються круглого перетину, і термічний опір півформи гофратора. У такому випадку неможливо достатньо точно задати граничні умови на зовнішній поверхні труби, тому при розрахунку слід розраховувати температурні поля і у гофраторі.

У кільцевих каналах теплота віддається від твердої металевої поверхні до рухомої охолодної води, тому теплообмін на поверхні цих каналів слід

описати граничними умовами третього роду. Рух охолодної в кільцевому каналі еквівалентний руху рідини у трубах, тому коефіцієнт тепловіддачі до води можна визначати за залежностями (4.17)–(4.22) у праці [106].

Беручи до уваги розміщення кільцевих каналів, можна стверджувати, що найбільша інтенсивність охолодження буде спостерігатися на вершинах гофрів труби. При цьому у випадку відсутності внутрішнього охолодження внутрішні шари у стінці труби майже не охолоджуються, що обумовлено низькою теплопровідністю полімеру і повітря в гофрах труби.

Через певний час у шарі повітря у гофрах утворюються значний градієнт температури, що спричиняє конвективне перенесення теплоти у повітрі, який можливо врахувати тільки при розв'язанні тривимірної задачі теплопереносу. Однак зважаючи на невелику теплоємність повітря порівняно з полімером і замкнений обмежений простір конвективного руху, можна знехтувати конвективним теплообміном в повітрі без значної втрати достовірності при моделюванні.

Під час перебування труби на повітрі відбувається охолодження за умов вільної конвекції та за рахунок випромінювання. При цьому між гофрами захоплюється повітря, яке рухається надалі з трубою, тобто утворюються застійні зони. Тому охолодження гофрованих труб за умов вільної конвекції є не доцільним. Однак у цей час теплота розподіляється з внутрішніх шарів до поверхні, що приводить до більш раціонального наступного охолодження у ванні.

Охолодження на повітрі здійснюють дуже короткий час у порівнянні з часом охолодженням у гофраторі і охолодних ваннах, отже на ділянках повітряного охолодження відводиться невелика кількість теплоти. Тому з достатньою точністю гофровану трубу можна розглядати, як гладку трубу, що охолоджується за умов вільної конвекції і за рахунок випромінювання і теплообмін на поверхні труби слід описати граничними умовами третього роду, а коефіцієнт тепловіддачі до повітря можна визначати за залежностями (4.46)–(4.48) і (4.69), (4.70) у праці [106].

Під час зрошення води на поверхню труби і ваннах утворюється водяна плівка, яку краплі безперервно збурюють, що інтенсифікує процес теплообміну. Для визначення коефіцієнта тепловіддачі за зрошення полімерної труби водою отримані емпіричні залежності (166) у праці [13] та (6.44) у праці [16].

Інтенсивність охолодження повітрям внутрішньої поверхні труби визначається режимом руху повітря і внутрішнім діаметром труби, також присутній теплообмін випромінюванням. Відповідно для визначення коефіцієнта тепловіддачі з внутрішньої поверхні стінки до повітря можна використовувати залежності (4.17)–(4.22) і (4.69), (4.70) у праці [106].

За достатньо низької температури внутрішньої поверхні інтенсивність охолодження під час застосування повітряно-водяної суміші буде визначатися впливом гідродинамічних факторів: процесом течії плівки і динамічним впли-

вом крапель. Тут можливі три фактори: краплі «м'яко» осідають на поверхні плівки, забезпечуючи тільки приток маси; краплі турбулізують поверхневий шар плівки; краплі з достатнім імпульсом проникають крізь плівку, досягаючи поверхні труби. За таких умов коефіцієнт тепловіддачі слід визначати за емпіричними залежностями (4.43)–(4.47) у праці [107].

Під час охолодження повітряно-водяною сумішшю поверхні труби з температурою вище за 100 °С вода, перебуваючи у дрібнодисперсному стані (туман), швидко нагрівається і випаровується, за рахунок чого процес охолодження істотно інтенсифікується. За таких умов коефіцієнт тепловіддачі слід визначати за емпіричними залежностями наведеними у праці [107] на сторінках (170–172).

Зважаючи на конструкцію стінки гофрованої полімерної труби, для подальшого моделювання охолодження стінку доцільно умовно поділити на двошарову ділянку між гофрами труби (I) і гофра, що складається з зовнішнього гофрованого і внутрішнього гладкого шарів полімеру, а також з шару повітря між ними (рис. 2.2). При цьому лінії теплових потоків нормальні до кожної з охолоджених поверхонь і відрізняються за величиною. Так під час охолодження у гофраторі це спричинено різним термічним опором гофратара над кожною охолоджуваною поверхнею: над вершиною гофра термічний опір буде найменший, над боковими поверхнями елемента II більший, а над елементом I найбільший.

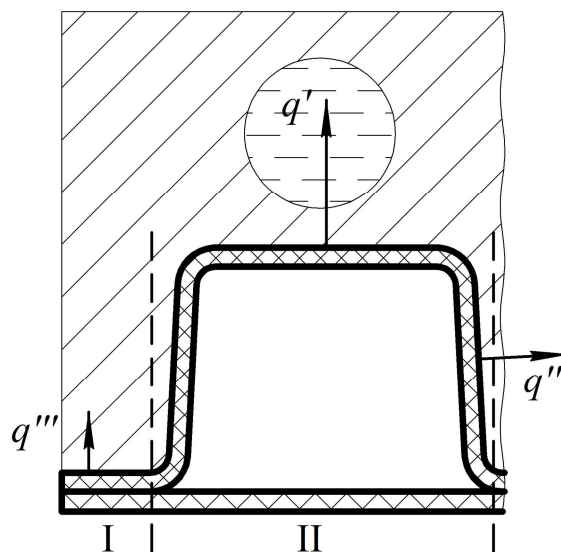


Рис. 2.2. Елементи конструкції стінки двошарової гофрованої труби  
( $q' > q'' > q'''$  – теплові потоки)

Після охолодження у гофраторі градієнти температур будуть відмінні вздовж кожної охолоджуваної поверхні, що у свою чергу обумовлює і різну величину теплових потоків на кожній з цих поверхонь під час подальшого охолодження на повітрі і в охолоджених ваннах.

Змінна по довжині конструкція стінки труби, відмінність теплових потоків на кожній з охолоджуваних поверхонь, а також відмінність умов охолодження на різних ділянках системи охолодження не дає змоги розглядати охолодження гофрованої полімерної труби у нерухомій системі координат, як у випадку з гладкими полімерними трубами [14, 20, 99].

Процес охолодження гофрованих полімерних труб доцільно розглядати в циліндричній системі координат (рис. 2.3).

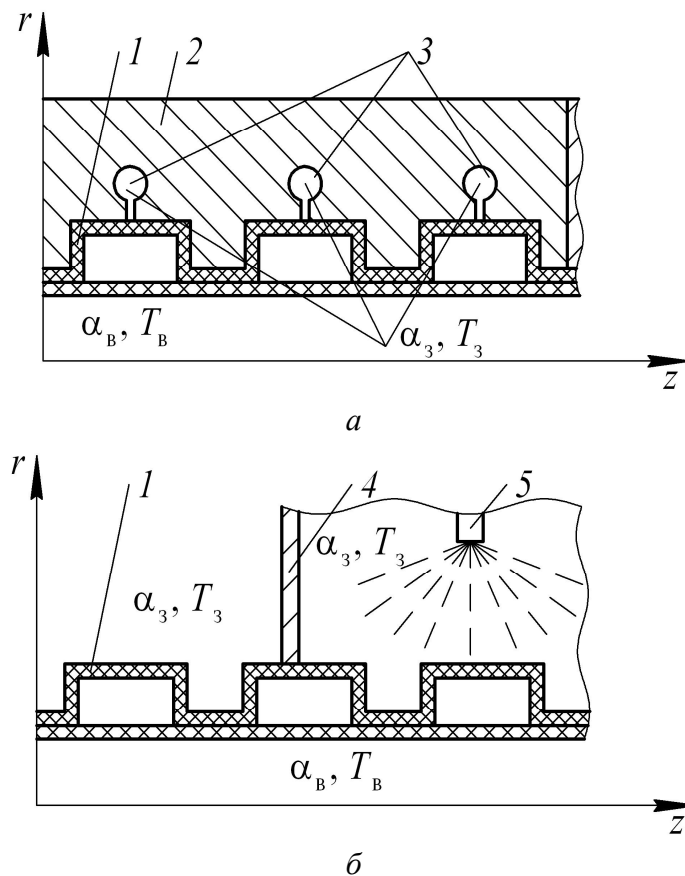


Рис. 2.3. Розрахункова схема охолодження гофрованих полімерних труб: а – в гофраторі; б – в охолодній ванні; 1 – труба; 2 – півформа гофратора; 3 – канали охолодної води; 4 – ванна охолодження; 5 – форсунка;  $T_3$ ,  $T_B$  – температура охолодного середовища із зовнішньої та внутрішньої сторін стінки труби;  $\alpha_3$ ,  $\alpha_B$  – коефіцієнти тепловіддачі від поверхонь труби до охолодного середовища

При цьому можна зробити такі припущення:

– сучасні охолодні пристрої забезпечують однакові умови охолодження по всьому периметру певного діаметрального перерізу труби, тому приймаємо, що процес вісесиметричний, а значить, у певному діаметральному перерізі труби значення температури не залежить від кутової координати;

– під час руху трубної заготовки крізь охолодні пристрої орієнтація молекул полімеру вже не відбувається, а конвективний теплообмін в повітрі,

що знаходиться в гофрах труби, не має суттєвого впливу через низьку теплоємність повітря порівняно з полімером, а отже можна вважати, що перенос теплоти у кожному шарі труби здійснюється тільки теплопровідністю;

– оскільки розв’язання задачі теплопровідності крізь багат шарову стінку пов’язано з знаходженням температурних полів по обидві сторони від межі розділу сусідніх двох шарів, то на цій межі застосовуються граничні умови четвертого роду.

Зроблені припущення під час розгляду процесів калібрування та охолодження гофрованої полімерної труби роблять можливим виокремити найбільш впливові параметри процесів і розробити їх математичний опис.

### 2.1.2. Математичне моделювання процесу

Охолодження гофрованих полімерних труб, як і у випадку гладких полімерних труб [13, 14, 20], можна описати рівнянням енергії

$$\rho_i(T)c_i(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = -\nabla(\lambda_i(T)\nabla T) + q_V. \quad (2.1)$$

Оскільки під час охолодження в повітрі відсутні внутрішні джерела енергії, то дисипативна складова  $q_V = 0$ .

Під час охолодження теплофізичні властивості полімеру істотно змінюються, а на певних етапах навіть відбувається перехід полімеру з в’язко-плинного стану у твердий, тому рівняння (2.1) доцільно записати в ентальпійній формі. У циліндричній системі координат із врахуванням зроблених припущень воно набуває вигляд

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda_i(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_i(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad i = \overline{1, N}, \quad (2.2)$$

де  $h = \int_0^T c_i(T) \rho_i(T) dT$ ,  $i = \overline{1, N}$  – ентальпія;  $r, z$  – поточні радіус і довжина

на стінки труби;  $\rho_i, c_i$  і  $\lambda_i$  – густина, масова теплоємність і теплопровідність матеріала  $i$ -го шару труби ( $i = \overline{1, N}$ ),  $N$  – кількість шарів;  $T$  – температура;  $\tau$  – час.

Початковою умовою є вихідний розподіл температури. При цьому, оскільки сучасне екструзійне обладнання забезпечує достатньо задовільну температурну однорідність розплаву, то можна прийняти, що в початковий момент часу на виході з екструзійної головки трубна заготовка по товщині стінки має однакову температуру

$$T(r, z) \Big|_{\tau=0} = T_0. \quad (2.3)$$

де  $T_0$  – початкова температура.

На границі контакту між шарами стінки труби, а також між зовнішньою і поверхнею труби і гофратором приймаємо граничні умови четвертого роду

$$\begin{cases} \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0, \end{cases} \quad (2.4)$$

де  $\mathbf{n}$  – зовнішня нормаль до поверхні труби;  $\{T\} = T^+ - T^-$ ;  $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{q}^+ - \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{q}^-$ ;  $\mathbf{q} = -\lambda_i(T)\nabla T$ ,  $i = \overline{1, N}$  – щільність теплового потоку;  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$  – оператор Гамільтона в циліндричній системі координат, а в місці контакту стінки труби з охолодним середовищем – граничні умови третього роду

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda_i(T)\nabla T) = \alpha_b(T)(T - T_b); \quad i = \overline{1, N}, \quad (2.5)$$

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda_i(T)\nabla T) = \alpha_s(T)(T - T_s); \quad i = \overline{1, N}. \quad (2.6)$$

Рівняння (2.2) з початковим (2.3) і граничними (2.4)–(2.6) умовами є математичною моделлю калібрування та охолодження гофрованих полімерних труб.

### 2.1.3. Вибір методів розв’язання математичної моделі та алгоритм розрахунку

Як було зазначено у пп. 2.1.1, складна конструкція, що періодично міняється по довжині стінки гофрованої труби, а також неоднорідність умов охолодження на окремих поверхнях елементів стінки, спричиняють в цих елементах утворення градієнтів температур різних за напрямками і значеннями. Тому для числового розв’язання нестационарної вісесиметричної задачі охолодження гофрованої труби в гофраторі, на повітрі та охолодних ваннах доцільно застосувати метод скінченних елементів (МСЕ) [108–111].

Систему диференціальних рівнянь МСЕ для лінійного рівняння нестационарної теплопровідності для одного скінченного елемента можна записати наступним чином [108]

$$[c^{(e)}] \frac{\partial \{T\}}{\partial \tau} + [k_\lambda^{(e)}] \{T\} + \{f^{(e)}\} = 0. \quad (2.7)$$

де  $[c^{(e)}]$  – матриця демпфування або теплоємності скінченного елемента;  $[k^{(e)}]$  – матриця жорсткості або теплопровідності і конвективного теплообміну;  $\{T\}$  – вектор температури, °C;  $\{f^{(e)}\}$  – вектор вільних членів;  $\tau$  – час, с; індекс  $(e)$  означає, що наведені матриці і вектори відносяться до скінченного елемента.

У загальному випадку для тривимірних задач матриці  $[c^{(e)}]$ ,  $[k^{(e)}]$ ,  $\{f^{(e)}\}$  виражаються формулами [108]

$$[c^{(e)}] = \int_V c_p \rho [N]^T [N] dV; \quad (2.8)$$

$$[c^{(e)}] = \int_V c_p \rho [N]^T [N] dV; \quad (2.9)$$

$$\{f^{(e)}\} = - \int_S \alpha T_{cp} [N]^T dS, \quad (2.10)$$

де  $V$  – об’єм скінченного елемента,  $m^3$ ;  $S$  – поверхня скінченного елемента, на якій задані граничні умови 3-го роду,  $m^2$ ;  $c_p$  – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);  $\rho$  – густина, кг/ $m^3$ ;  $[N]$  – вектор коефіцієнтів функцій форми скінченного елемента;  $[B]$  – матриця похідних функцій форми по координатах;  $[D]$  – матриця теплопровідності, у якій враховується анізотропія властивостей матеріалу;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/( $m^2 \cdot K$ );  $T_{cp}$  – температура оточуючого середовища,  $^{\circ}C$ .

Вирази (2.9) і (2.10) записані для випадку граничних умов 3-го роду і без врахування внутрішніх джерел теплоти. В МСЕ граничні умови 4-го роду і відсутність теплообміну на зовнішніх границях (адіабатичні умови) реалізуються автоматично, тобто спеціально задавати немає потреби.

Для числового розв’язання рівняння (2.7) необхідно спочатку провести заміну першої похідної по часу на її скінченно-різницевий аналог. Для цього використано абсолютно стійкою неявною різницевою схемою з першим порядком апроксимації по часу [112]

$$\left( [k^{(e)}] + \frac{1}{\Delta\tau} [c^{(e)}] \right) \{\hat{T}\} = \frac{1}{\Delta\tau} [c^{(e)}] \{T\} - \{f^{(e)}\} + O(\Delta\tau), \quad (2.11)$$

де  $\Delta\tau$  – крок інтегрування по часу, с;  $\hat{T}$  – температура на верхньому часовому рівні,  $^{\circ}C$ .

Систему рівнянь (2.11), записану для одного скінченного елемента, нескладно трансформувати для множини елементів, на які розбивається розрахункова область труби при її дискретизації. У результаті у векторній формі запису отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\left( [K] + \frac{1}{\Delta\tau} [C] \right) \{\hat{T}\} = \frac{1}{\Delta\tau} [C] \{T\} - \{F\} + O(\Delta\tau),$$

де  $[K] = \sum_{e=1}^M \{k^{(e)}\}$ ;  $[C] = \sum_{e=1}^M \{c^{(e)}\}$ ;  $F = \sum_{e=1}^M \{f^{(e)}\}$ ;  $M$  – кількість елементів, на яку розбито розрахункову область.

Для переходу від тривимірної задачі до вісесиметричної скористаємося замінами в рівняннях (2.8)–(2.10) такого вигляду [108] (об’ємні інтеграли в вісесиметричній задачі зводиться до вигляду  $\int_V r dV$  після чого, як постійні члени виносяться за знак інтеграла)

$$\begin{cases} dV = 2\pi r dA; \\ dS = 2\pi r dL, \end{cases} \quad (2.12)$$

де  $r$  – радіус, м;  $A$  – площа елемента, м<sup>2</sup>;  $L$  – довжина сторони елемента, м.

Застосовуючи заміну (2.12) до виразів (2.8)–(2.10), отримуємо

$$[c^{(e)}] = 2\pi \int_A r^2 c_p \rho [N]^T [N] dA; \quad (2.13)$$

$$[k^{(e)}] = 2\pi \int_A r^2 [B]^T [D] [B] dA + 2\pi \int_L r \alpha [N]^T [N] dL; \quad (2.14)$$

$$\{f^{(e)}\} = -2\pi \int_L r \alpha T_{cp} [N]^T dL, \quad (2.15)$$

де  $D = \begin{bmatrix} \lambda_{rr} & 0 \\ 0 & \lambda_{zz} \end{bmatrix}$ ;  $\lambda_{rr}$  і  $\lambda_{zz}$  – теплопровідність матеріалу в напрямках

координатних осей  $Or$  і  $Oz$ , відповідно, Вт/(м·К). Для ізотропного матеріалу маємо, що  $\lambda_{rr} = \lambda_{zz}$ .

Як одиницю дискретизації розрахункової області використаємо лінійний чотирикутний скінченний елемент [108–111] (рис. 2.4)

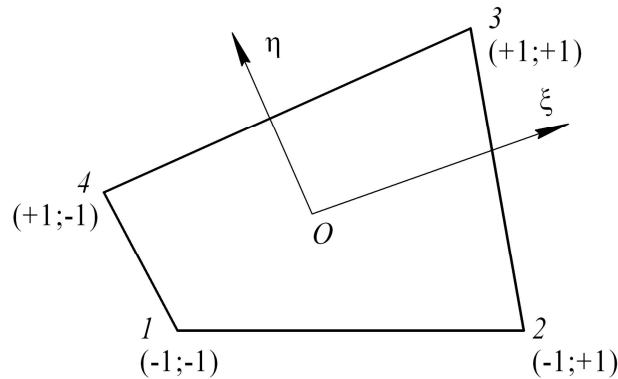


Рис. 2.4. Лінійний чотирикутний елемент з локальною системою координат  $(\xi, \eta)$ ; 1–4 – номери вузлів елемента (початок координат елемента знаходяться в центрі мас елемента)

Інтеграли (2.13)–(2.15) визначаються числовим методом з використанням квадратурних формул Гауса [108–112]

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f(\xi_i, \eta_j) w_i w_j \quad (2.16)$$

де  $w$  – вага квадратурної формули Гауса,  $n = 2$  – кількість вузлів.

Функції форми елемента (рис. 2.4) визначають за формулами [109]

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta); \quad N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta);$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta); \quad N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta). \quad (2.17)$$

З виразу (2.17) не можливо безпосередньо отримати часткові похідні  $\frac{\partial N_i}{\partial r}, \frac{\partial N_i}{\partial z}, i = \overline{1,4}$ . Тому для їх отримання використаємо матрицю Якобі

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial r}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} = |J| \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix}, i = \overline{1,4}, \quad (2.18)$$

звідки отримаємо

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} = |J|^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix}, i = \overline{1,4}, \quad (2.19)$$

де  $|J| = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial r}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \end{bmatrix}$  – матриця Якобі або якобіан переходу від системи

координат  $(\xi, \eta)$  до системи  $(r, z)$ .

Координати  $(r, z)$  будь-якої точки елемента можна виразити за допомогою його функції форми  $[N]$  (2.17) і декартові координати вершин елемента  $\{R_i\}, \{Z_i\}, i = \overline{1,4}$

$$\begin{cases} r = N_1 R_1 + N_2 R_2 + N_3 R_3 + N_4 R_4; \\ z = N_1 Z_1 + N_2 Z_2 + N_3 Z_3 + N_4 Z_4, \end{cases} \quad (2.20)$$

або в загальному випадку

$$x = P_1 X_1 + P_2 X_2 + P_3 X_3 + P_4 X_4. \quad (2.21)$$

Продиференціювавши (2.21) по  $\xi$  отримаємо

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \frac{\partial P_1}{\partial \xi} X_1 + \frac{\partial P_2}{\partial \xi} X_2 + \frac{\partial P_3}{\partial \xi} X_3 + \frac{\partial P_4}{\partial \xi} X_4, \quad (2.22)$$

де

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_1}{\partial \xi} &= \left( \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \right)' = -\frac{(1 - \eta)}{4}; & \frac{\partial P_2}{\partial \xi} &= \left( \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \right)' = \frac{(1 - \eta)}{4}; \\ \frac{\partial P_3}{\partial \xi} &= \left( \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \right)' = \frac{(1 + \eta)}{4}; & \frac{\partial P_4}{\partial \xi} &= \left( \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta) \right)' = -\frac{(1 + \eta)}{4}. \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Після підстановки (2.23) у (2.22) для кожної з координат  $(r, z)$  отримаємо

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial \xi} &= \frac{-(1-\eta)R_1 + (1-\eta)R_2 + (1+\eta)R_3 - (1+\eta)R_4}{4}, \\ \frac{\partial r}{\partial \eta} &= \frac{-(1-\xi)R_1 - (1+\xi)R_2 + (1+\xi)R_3 + (1-\xi)R_4}{4}, \\ \frac{\partial z}{\partial \xi} &= \frac{-(1-\eta)Z_1 + (1-\eta)Z_2 + (1+\eta)Z_3 - (1+\eta)Z_4}{4}, \\ \frac{\partial z}{\partial \eta} &= \frac{-(1-\xi)Z_1 - (1+\xi)Z_2 + (1+\xi)Z_3 + (1-\xi)Z_4}{4}. \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

Матриця Якобі тепер запишеться у вигляді (після підстановки (2.24) у (2.18))

$$|J| = \begin{vmatrix} \frac{\partial r}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial r}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \end{vmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -(1-\eta) & (1-\eta) & (1+\eta) & -(1+\eta) \\ -(1-\xi) & -(1+\xi) & (1+\xi) & (1-\xi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & Z_1 \\ R_2 & Z_2 \\ R_3 & Z_3 \\ R_4 & Z_4 \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$

Після того, як отримані співвідношення для визначення матриці Якобі, переходимо до визначення співвідношень, що визначають вибраний елемент (2.13)–(2.15). Для визначення цих інтегралів скористаємося спрощеною методикою [108], відповідно до якої для вісесиметричної задачі можна використати співвідношення, отримані для плоскої задачі, використовуючи при цьому множник-константу  $2\pi\bar{R}$ , який можна винести за знак інтеграла. Тоді для визначення матриць теплоємності матимемо

$$[c^{(e)}] = 2\pi \int_A r^2 c_p \rho [N]^T [N] dA \approx 2\pi\bar{R} c_p \rho \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N]^T [N] \det[J] d\xi d\eta, \quad (2.26)$$

$$\text{де } \bar{R} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^4 R_i}{4} \right]^2.$$

У виразі (2.26) подвійний інтеграл  $\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N]^T [N] \det[J] d\xi d\eta$  визначається

числовим методом відповідно до (2.16) як для плоскої задачі [108].

Для визначення матриць (2.14) і (2.15), пов'язаних з конвективним теплообміном, необхідно визначити два поверхневі інтеграли

$$2\pi \int_L r \alpha [N]^T [N] dL \approx 2\pi\bar{R} \int_L \alpha [N]^T [N] dL, \quad (2.27)$$

$$2\pi \int_L r \alpha T_c [N]^T dL \approx 2\pi \bar{R} \int_L \alpha T_{cp} [N]^T dL. \quad (2.28)$$

У цьому випадку всі дії аналогічні плоскій задачі за винятком множника-константи  $2\pi\bar{R}$ . Надалі методика аналогічна плоскій задачі.

Оскільки елемент лінійний (рис. 2.4), то ці інтеграли із врахуванням вище викладеного визначаються аналітично [108]. Розглянемо, наприклад, сторону між вузлами 2 і 3, на якій має здійснюватися конвективний теплообмін. Запишемо добуток  $[N]^T [N]$  для цієї сторони елемента

$$[N]^T [N] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1-\eta \\ 1+\eta \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{2} [0 \quad (1-\eta) \quad (1+\eta) \quad 0] = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-\eta)^2 & (1-\eta^2) & 0 \\ 0 & (1-\eta^2) & (1+\eta)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Далі необхідно зв'язати диференціал довжини  $dL$  з диференціалом змінної інтегрування  $d\eta$  з використанням якобіана

$$dL = |\Delta J| d\eta \quad \text{або} \quad dL = \frac{L_{23}}{2} d\eta, \quad (2.30)$$

$$\text{де } |\Delta J| = \frac{L_{23}}{2}.$$

Підстановка виразів (2.29) і (2.30) у (2.27) дає

$$\begin{aligned} 2\pi \bar{R}_{23} \int_{L_{23}} \alpha [N]^T [N] dL &= 2\pi \bar{R}_{23} \frac{\alpha}{4} \int_{-1}^1 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-\eta)^2 & (1-\eta^2) & 0 \\ 0 & (1-\eta^2) & (1+\eta)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{L_{23}}{2} d\eta = \\ &= 2\pi \bar{R}_{23} \frac{\alpha L_{23}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\text{де } \bar{R}_{23} = \frac{\sum_{i=2}^3 R_i}{2}.$$

Аналогічно для сторін 1-2, 3-4 і 4-1:

$$2\pi \bar{R}_{12} \alpha \int_{L_{12}} [N]^T [N] dL = 2\pi \bar{R}_{12} \frac{\alpha L_{12}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

$$2\pi\bar{R}_{34}\alpha \int_{L_{34}} [N]^T [N] dS = 2\pi\bar{R}_{34} \frac{\alpha L_{34}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (2.33)$$

$$2\pi\bar{R}_{41}\alpha \int_{L_{41}} [N]^T [N] dL = 2\pi\bar{R}_{41} \frac{\alpha L_{41}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad (2.34)$$

$$\text{де } \bar{R}_{12} = \frac{\sum_{i=1}^2 R_i}{2}; \bar{R}_{34} = \frac{\sum_{i=3}^4 R_i}{2}; \bar{R}_{41} = \frac{R_1 + R_4}{2}.$$

Співвідношення для визначення інтеграла (2.28) отримуються аналогічним чином

$$2\pi\bar{R}_{12}\alpha T_c \int_{L_{12}} [N]^T dL = 2\pi\bar{R}_{12} \frac{\alpha T_c}{2} \int_{-1}^1 \begin{bmatrix} 1-\eta \\ 1+\eta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{L_{12}}{2} d\eta = 2\pi\bar{R}_{12} \frac{\alpha T_c L_{12}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

$$2\pi\bar{R}_{23}\alpha T_{cp} \int_{L_{23}} [N]^T dL = 2\pi\bar{R}_{23} \frac{\alpha T_c L_{23}}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.36)$$

$$2\pi\bar{R}_{34}\alpha T_{cp} \int_{L_{34}} [N]^T dL = 2\pi\bar{R}_{34} \frac{\alpha T_c L_{34}}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.37)$$

$$2\pi\bar{R}_{41}\alpha T_{cp} \int_{L_{41}} [N]^T dL = 2\pi\bar{R}_{41} \frac{\alpha T_c L_{41}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.38)$$

$$\text{де } \bar{R}_{12} = \frac{\sum_{i=1}^2 R_i}{2}; \bar{R}_{23} = \frac{\sum_{i=2}^3 R_i}{2}; \bar{R}_{34} = \frac{\sum_{i=3}^4 R_i}{2}; \bar{R}_{41} = \frac{R_1 + R_4}{2}.$$

Найбільш трудомісткою операцією є обрахування першого інтегралу, що входить у матрицю теплопровідності і конвективного теплообміну. Тут та-

кож скористаємося спрощеною методикою [108]

$$2\pi \int_A r^2 [B]^T [D][B] dA \approx 2\pi \bar{R} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D][B] \det[J] d\xi d\eta, \quad (2.39)$$

$$\text{де } \bar{R} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^4 R_i}{4} \right]^2.$$

Запишемо вирази для  $[B]^T, [B]$ .

$$\begin{aligned} [B] &= \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial r} & \frac{\partial N_2}{\partial r} & \frac{\partial N_3}{\partial r} & \frac{\partial N_4}{\partial r} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & \frac{\partial N_3}{\partial \xi} & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \\ &= [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{-(1-\eta)}{4} & \frac{(1-\eta)}{4} & \frac{(1+\eta)}{4} & \frac{-(1+\eta)}{4} \\ \frac{-(1-\xi)}{4} & \frac{-(1+\xi)}{4} & \frac{(1+\xi)}{4} & \frac{(1-\xi)}{4} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$[B]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial r} & \frac{\partial N_1}{\partial z} \\ \frac{\partial N_2}{\partial r} & \frac{\partial N_2}{\partial z} \\ \frac{\partial N_3}{\partial r} & \frac{\partial N_3}{\partial z} \\ \frac{\partial N_4}{\partial r} & \frac{\partial N_4}{\partial z} \end{bmatrix}. \quad (2.41)$$

Алгоритм множення матриць  $[B]^T [D][B]$  при обчисленні (2.39) такий:

1. Заповнюється матриця координат елемента  $[R \quad Z]$  з розмірністю  $4 \times 2$ ;
2. Визначається матриця похідних функцій форми  $[B]$ , визначена в безрозмірних координатах  $\xi$  і  $\eta$  розмірністю  $2 \times 4$ .
3. Обраховується матриця Якобі  $[J]$  по (2.25), розмірністю  $2 \times 2$  і визначається  $\det[J]$ .
4. Визначається зворотна матриця Якобі  $[J]^{-1}$ .
5. Визначається матриця похідних функцій форми в розмірних координатах  $r$  і  $z$   $[B] = [J]^{-1}[B]$  з розмірністю  $2 \times 4$ .
6. Виконується перемноження матриць  $[B]^T [D]$ , в результаті чого отри-

маємо матрицю  $4 \times 4$ .

7. Виконується процедура числового інтегрування по (2.16), а результат множиться на  $2\pi\bar{R}$ .

Для ефективного розв'язання нелінійної нестационарної вісесиметричної задачі ізотропної теплопровідності можна скористатися записом системи рівнянь МСЕ, представленим у [115, 116]

$$\sum_{e=1}^M \left( \left( [k_{\lambda}^{(e)}] \lambda^{(e)}(\hat{T}) + [k_{\alpha}^{(e)}] \alpha(\hat{T}) \right) \hat{T} + [c^{(e)}] \left\{ \frac{\hat{H}^e(T) - H^e(T)}{\Delta\tau} \right\} \right) = - \sum_{e=1}^M \{f^{(e)}\} + O(\Delta\tau), \quad (2.42)$$

де  $M$  – кількість елементів;  $\hat{T}$  – температура на верхньому часовому рівні,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $H(T) = \int_0^T c_p(t) \rho(t) dt$  – ентальпія,  $\text{Дж/м}^3$ ;  $[k_{\lambda}^{(e)}] = 2\pi \int_A r^2 [B]^T [D] [B] dA$ ,  $[k_{\alpha}^{(e)}] = 2\pi \int_L r \alpha [N]^T [N] dL$  и  $[c^{(e)}] = 2\pi \int_A r^2 c_p \rho [N]^T [N] dA$  – матриці теплопровідності, зовнішнього конвективного теплообміну и теплоємності відповідно, які визначаються за умови  $\lambda = \alpha = c_p \rho = 1$ ;  $[N]$  – матриця коефіцієнтів функцій форми;  $[B] = \nabla \{N\}$ ;  $\nabla$  – оператор Гамільтона;  $A$  – площа елемента,  $\text{м}^2$ ;  $\{f^{(e)}\} = -2\pi \int_L r \alpha T_c [N]^T dL$ ;  $L$  – довжина сторони елемента, на якій задані граничні умови 3-го роду,  $\text{м}$ ;  $\Delta\tau$  – крок інтегрування за часом,  $\text{с}$ ;  $T_{\text{cp}}$  – температура зовнішнього середовища,  $^{\circ}\text{C}$ .

Для визначення матриць, що входять у (2.42), можна скористатися вище викладеною методикою (2.12)–(2.41), розробленою для лінійної задачі, тобто методика розрахунку МСЕ (2.12)–(2.41) є справедливою і для нелінійних задач з незначними змінами в частині задавання теплофізичних властивостей матеріалів.

Після лінеаризації (2.42) по температурі за методом Ньютона [112–114], отримаємо

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^M \left( [k_{\lambda}^{(e)}] \left( \frac{\partial \lambda^{(e)}(T^k)}{\partial T} \{T^k\} + \lambda^{(e)}(T^k) \right) + [k_{\alpha}^{(e)}] \left( \frac{\partial \alpha(T^k)}{\partial T^k} \{T^k\} + \alpha(T^k) \right) + \right. \\ & \quad \left. + [c^{(e)}] \left\{ \frac{c_p^{(e)}(T^k) \rho^{(e)}(T^k)}{\Delta\tau} \right\} \right) \{ \Delta T^{k+1} \} = \\ & = - \sum_{e=1}^M \{f^{(e)}\} - \sum_{e=1}^M \left( \left( [k_{\lambda}^{(e)}] \lambda^{(e)}(T^k) + [k_{\alpha}^{(e)}] \alpha(T^k) \right) \{T^k\} + [c^{(e)}] \left\{ \frac{H^e(T^{k+1}) - H^e(T^k)}{\Delta\tau} \right\} \right), \quad (2.43) \end{aligned}$$

де  $k$  – номер ітерації.

Система рівнянь (2.43) на кожній ітерації розв'язується відносно  $\Delta T$ , а шукана температура визначається за формулою

$$\{T^{k+1}\} = \{T^k\} + \{\Delta T^{k+1}\}. \quad (2.44)$$

Критерієм отримання числового розв'язку вихідної задачі є виконання умови

$$|\Delta T_i^{k+1}| \leq \varepsilon_T, i = \overline{1, N},$$

де  $\varepsilon_T$  – задана точність розрахунку поля температури, К;  $N$  – кількість вузлів, отриманих у результаті скінченно-елементної дискретизації розрахункової області.

Під час використання форми запису системи рівнянь МСЕ типу (2.42) матриці жорсткості і демпфування необхідно обраховувати тільки один раз у процесі виконання ітерацій. Методика (2.42)–(2.44) є також ефективною і при врахуванні фазових переходів [115, 116]. Система лінеаризованих рівнянь розв'язується методом Гауса з врахуванням стрічкової або розрідженої структури матриці системи лінійних алгебраїчних рівнянь [117–120].

На підставі сформульованої в п. 2.1.2 математичної моделі і вибраного методу її розв'язання розроблено алгоритм розрахунку процесів калібрування та охолодження гофрованих полімерних труб. Відповідно до схеми зазначеного алгоритму температурні поля в стінці труби визначаються залежно від умов охолодження, що реалізуються у певному типі охолодного обладнанні (рис. 2.5).

Вихідними даними для розрахунку є: умови охолодження (вільна або вимушена конвекція); тип теплоносія (вода, повітря); початкова температура виробу; продуктивність екструзійного обладнання; визначальні розміри виробу (зовнішній діаметр і товщина стінки труби, розміри гофри); розмір елемента розрахункової області; температура теплоносіїв; властивості теплоносія (теплопровідність, кінематична в'язкість, характеристичне число Прандтля) як функції температури; теплофізичні властивості матеріалів стінки (густина, масова теплоємність, теплопровідність) як функції температури; якщо конвекція вимушена, то витрата теплоносія; якщо розрахунок перевірний, то довжина зони охолодження, а якщо розрахунок проектний, то допустима кінцева температура матеріалів стінки; коефіцієнти тепловіддачі як функції параметрів охолодження (умови охолодження, температура, фізичні і теплофізичні властивості, витрата охолодної речовини у випадку вимушеної конвекції, температура поверхні труби та її діаметр). Ці дані вводяться у блоці 2.

У блоці 3 здійснюється розбиття розрахункової області на чотирикутні елементи, кожному з яких присвоюється номер, а також виокремлюються лінії, на яких буде відбуватися контакт з охолодним середовищем, для присвоєння граничних умов при подальших розрахунках. Також у цьому блоці задається крок розрахунку за часом і визначається крок по координаті  $z$ . У блоці 4 виводяться початкові значення температурного поля в стінці.

У блоках 5–17 обраховуються температурні поля під час подальшого охолодження. Так у блоці 6 здійснюється розрахунок часу при наступному

кроці  $\Delta\tau$ , а також присвоєння температур на нижчому часовому рівні при  $\Delta\tau$ . У блоках 7-14 залежно від ділянки охолодження задаються відповідні граничні умови, визначаються коефіцієнти тепловіддачі, після чого обчислюються температура для кожного елемента розрахункової області. У випадку проведення розрахунку в гофраторі також розраховуються і температурні поля у півформах гофратора (блоки 8, 9).

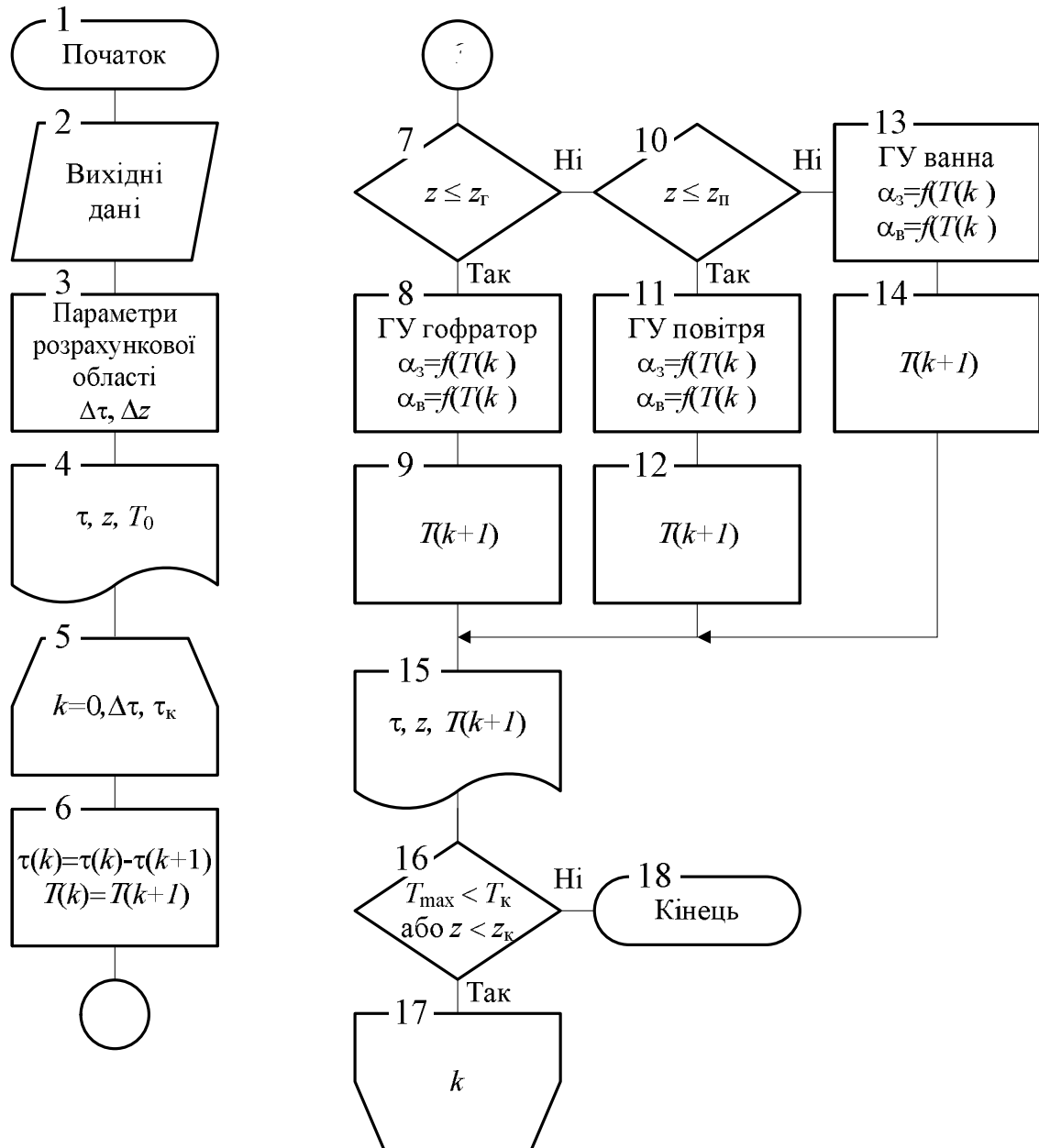


Рис. 2.5. Схема алгоритму розрахунку охолодження багат шарових гофрованих полімерних труб

Після виведення значень часу, довжини зони охолодження і температури (блок 15) у блоці 16 здійснюється перевірка поточного максимального зна-

чення температури в стінці з заданим кінцевим під час здійснення проектного розрахунку, у випадку перевірного розрахунку порівнюється значення координати  $z$  із заданим кінцевим значенням.

#### 2.1.4. Результати числового моделювання та їх аналіз

На основі розробленого алгоритму розроблена програма розрахунку охолодження гофрованих полімерних труб, що дає можливість здійснювати пошук раціональних параметрів зазначеного процесу для різних типорозмірів труб.

Під час охолодження зовнішньої поверхні труби водою (від  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а внутрішньої – повітрям, час охолодження скоротився приблизно на 12 %, під час охолодження внутрішньої поверхні повітряно-водною сумішшю – на 44 % (рис. 2.6.), що свідчить про достатньо високу ефективність застосування двостороннього охолодження під час виготовлення гофрованих полімерних труб. Моделювання здійснено для труби ПЕ тип В-Р-У/SN8/DN/ID200/176/ 6000/ДСТУ Б В.2.5-32:2007 [121].

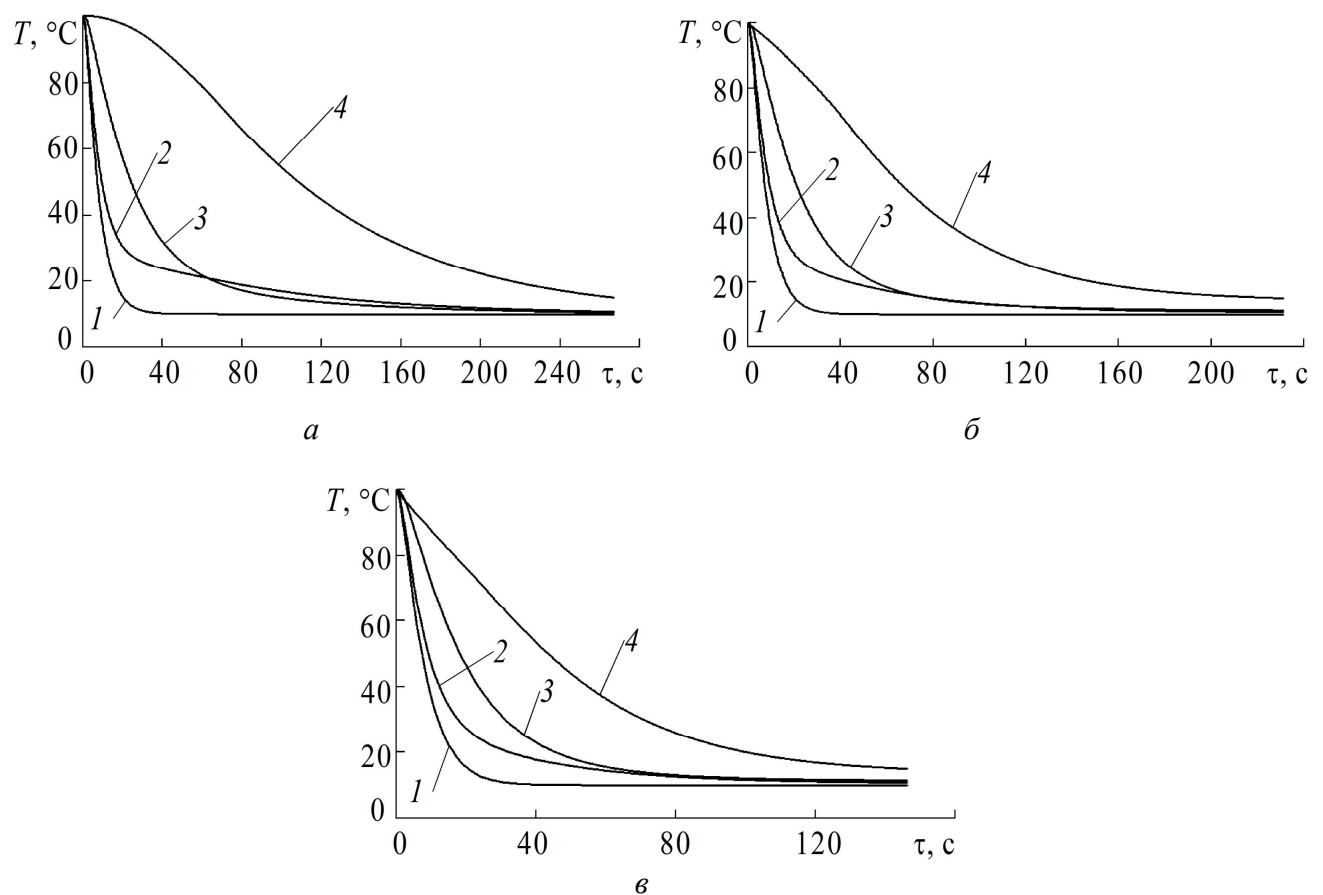


Рис. 2.6. Температурні поля в стінці труби: а – зовнішнє водяне охолодження; б – двостороннє охолодження (зовнішнє водяне і внутрішнє повітряне); в – двостороннє охолодження (зовнішнє водяне і внутрішнє з використанням повітряно-водяна суміші); 1–4 – номери термопар відповідно до рис. 2.7

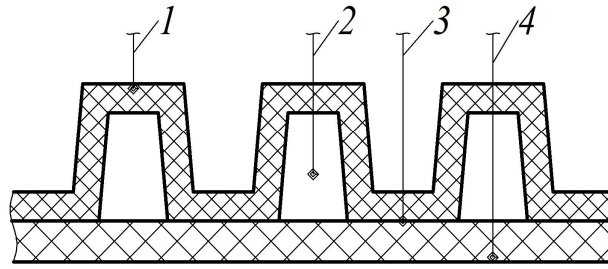


Рис. 2.7. Схема розташування термопар в стінці гофрованої труби: 1–4 – номери термопар

Під час охолодження внутрішньої поверхні труби із застосуванням повітряно-водяної суміші вода використовується більш раціонально ніж у випадку конвективного водяного охолодження. Під час охолодження поверхні з температурою більше за 100 °С вода, що перебуває в дрібнодисперсному стані, швидко нагрівається і випаровується, за рахунок чого процес охолодження істотно інтенсифікується.

Для оцінки ефективності використання двостороннього охолодження проведено числове моделювання охолодження труб різного діаметра від 160 °С до 40 °С (рис. 2.8).

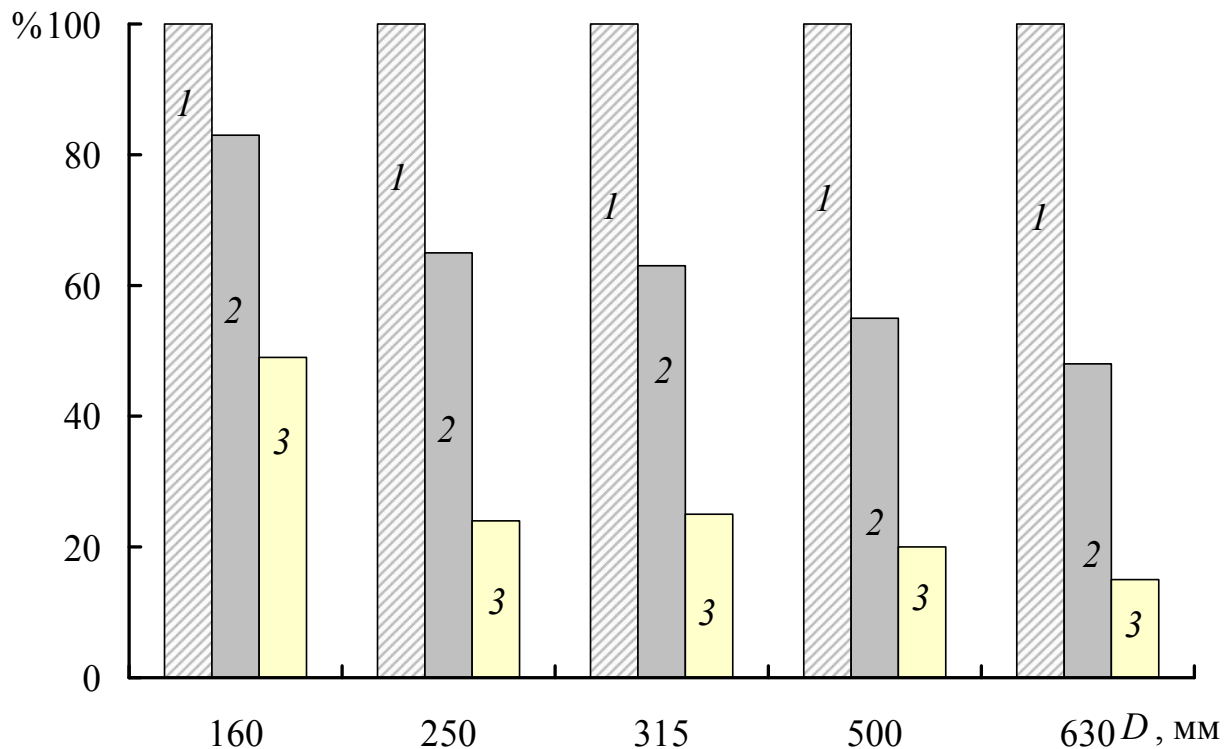


Рис. 2.8. Відсоткове співвідношення часу охолодження гофрованих труб різного діаметра: 1 – одностороннє зовнішнє охолодження; 2 – двостороннє охолодження (внутрішнє – повітря); 3 – двостороннє охолодження (внутрішнє – повітряно-водяна суміш)

За підвищених температур ефект від застосування двостороннього охолодження гофрованих труб з діаметром 200 мм збільшується під час застосування повітря на 7 %, а у випадку застосування повітряно-водяної суміші – 11 % (рис. 2.8). Зі збільшенням розмірів труби ефективність двостороннього охолодження також зростає.

За достатньо інтенсивного зовнішнього охолодження зрошенням охолодною водою повітря в середині гофрів чинить значний термічний опір. Тому ділянки внутрішнього шару труби під гофрами залишаються майже неохолодженими упродовж достатньо довгого часу, в той час як температура зовнішнього шару досягає потрібного значення (рис. 2.9). Якщо у цьому разі процес охолодження завершити, то за рахунок подальшого перерозподілу теплоти між внутрішніми і зовнішніми шарами стінки труби останні можуть поступово прогрітися, що у свою чергу може призвести до втрати трубою своєї форми. Для запобігання цього необхідно здійснювати подальше охолодження труби, що у випадку одностороннього зовнішнього охолодження не тільки достатньо довго, але й призводить до значної витрати охолодної води.

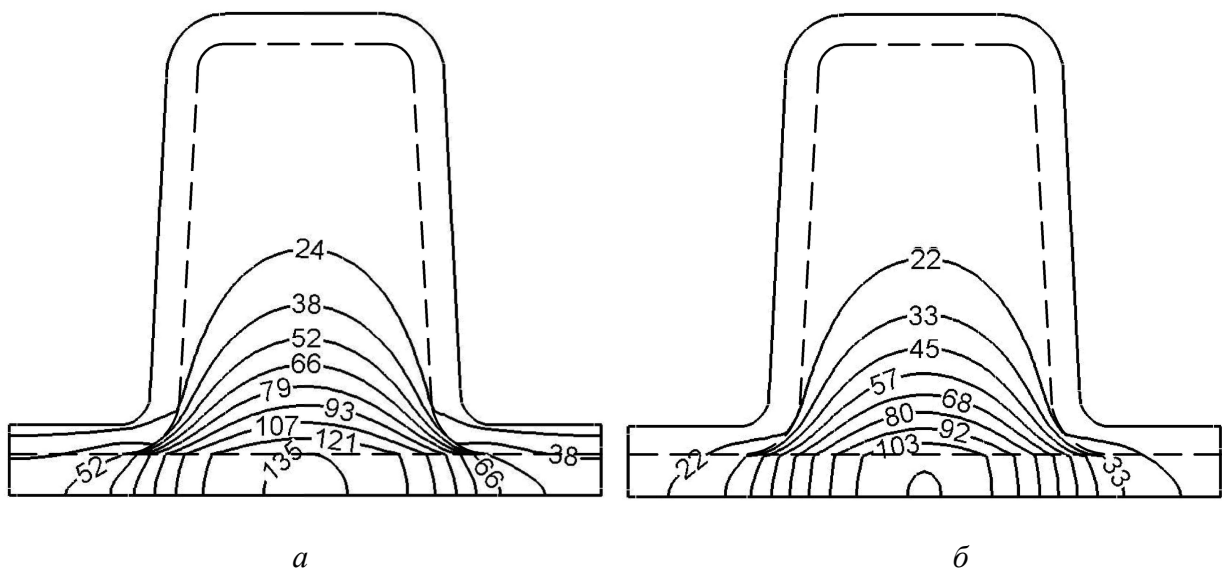


Рис. 2.9. Температурні поля поліетиленової гофрованої труби (зовнішній діаметр 200 мм [121], початкова температура труби 160 °С) після 30 с (а) і 60 с (б) одностороннього зовнішнього охолодження водою з температурою 10 °С

Під час двостороннього охолодження ділянки внутрішнього шару під гофрами охолоджуються безпосередньо (з боку внутрішньої поверхні труби), що може забезпечити значне скорочення часу охолодження навіть під час застосування повітря для охолодження внутрішньої поверхні (рис. 2.10), а особливо під час застосування повітряно-водяної суміші (рис. 2.11).

Під час виготовлення труб невеликого діаметра більш раціонально використовувати повітря для охолодження внутрішньої поверхні стінки, а під час виготовлення труб великих діаметрів – повітряно-водяну суміш.

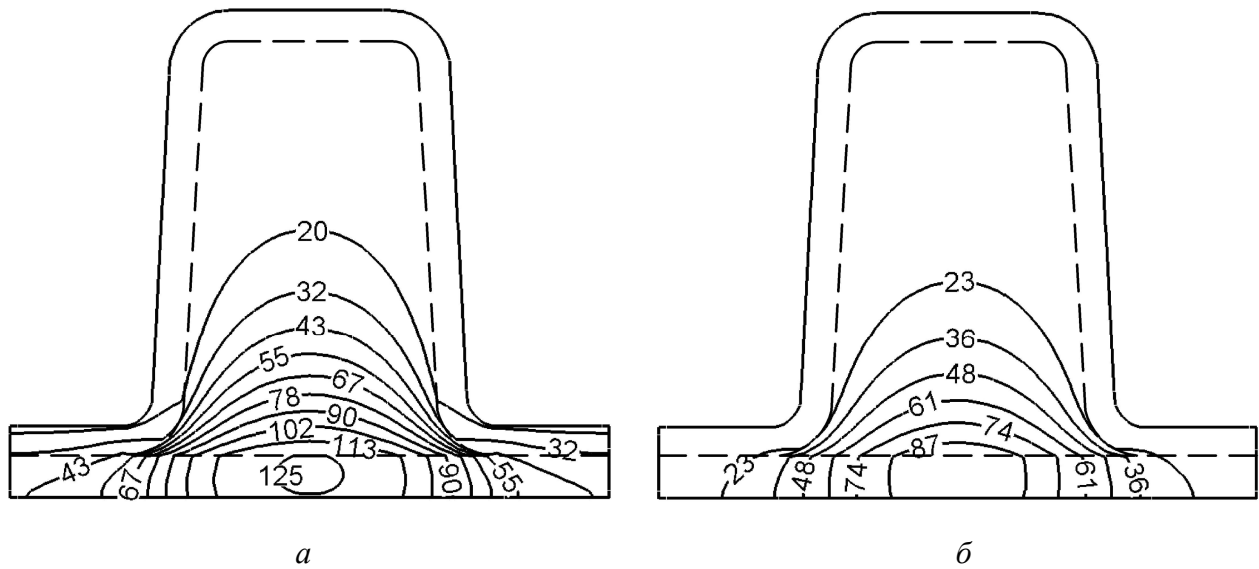


Рис. 2.10. Температурні поля поліетиленової гофрованої труби (зовнішній діаметр 200 мм [121], початкова температура труби 160 °С) після 30 с (а) і 60 с (б) двостороннього охолодження (зовнішнє охолодження – вода, внутрішнє – повітря; температура води 10 °С)

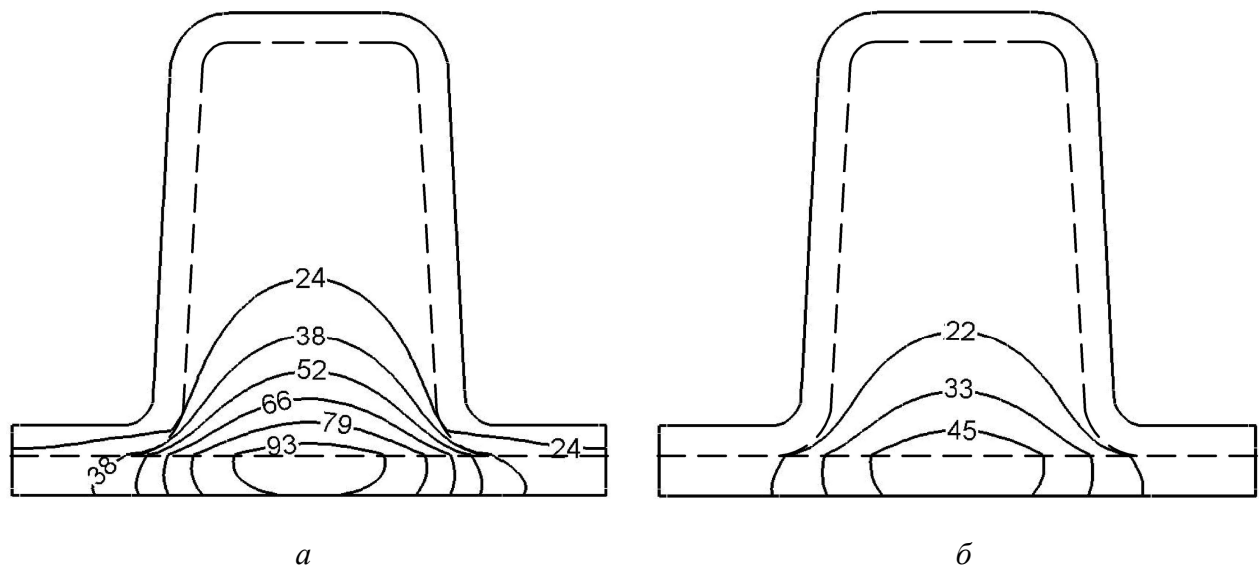


Рис. 2.11. Температурні поля поліетиленової гофрованої труби (зовнішній діаметр 200 мм [121], початкова температура труби 160 °С) після 30 с (а) і 60 с (б) двостороннього охолодження (зовнішнє охолодження – вода, внутрішнє – повітряно-водяна суміш; температура води 10 °С)

## 2.2. Охолодження гладких полімерних труб

### 2.2.1. Фізична модель процесу

Залежно від умов охолодження шлях, який проходить труба в охолодних пристроях, можна розділити на декілька ділянок (рис. 2.12).

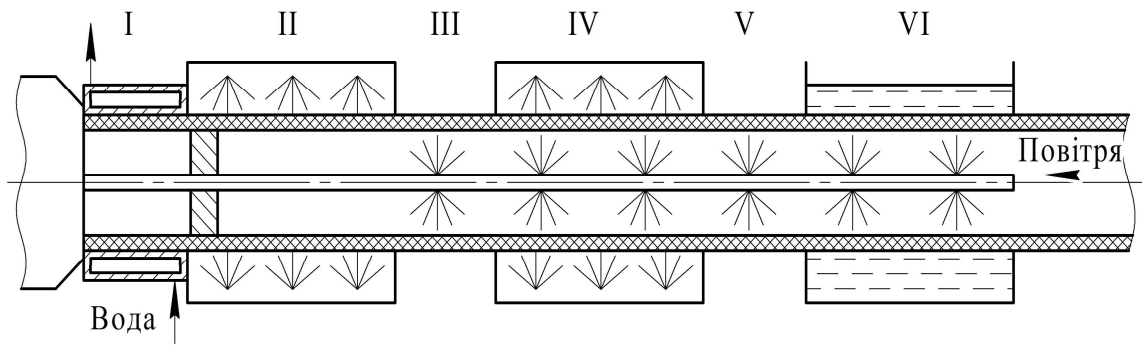


Рис. 2.12. Схема охолодження екструдованих гладких полімерних труб

I ділянка – калібрування і часткове охолодження труби в калібрувальному пристрої.

II ділянка – охолодження у вакуумній ванні розпиленням води на зовнішню поверхню та охолодження внутрішньої поверхні повітрям.

III, V ділянки – зони між охолодними ваннами, на яких труба зовні охолоджується повітрям в умовах вільної конвекції та повітрям або повітряно-водяною сумішшю всередині.

IV, VI ділянки – охолодження зовнішньої поверхні труби у ваннах зрошення водою або за умов вільної конвекції та охолодження внутрішньої поверхні повітрям або повітряно-водяною сумішшю.

Під час охолодження труби температура змінюється лише в напрямку радіуса, при цьому температура по товщині стінки змінюється в широкому інтервалі – від температури розплаву до температури охолодного середовища. У цьому інтервалі температур значно змінюються теплофізичні властивості температури, що потрібно враховувати під час моделювання процесу.

Після формування у трубній головці трубна заготовка надходить до калібрувального пристрою, де здійснюється її калібрування по зовнішньому діаметру і часткове охолодження. Відведення теплоти від трубної заготовки здійснюють потоком води крізь калібрувальну гільзу. При цьому можуть бути реалізовані різні схеми руху води в калібрувальному пристрої [13]. У праці [13] для кожного випадку руху води наведені методики визначення коефіцієнта тепловіддачі, які і використовувалися під час досліджень.

Під час калібрування трубної заготовки на зовнішній поверхні еструдату утворюється твердий шар полімеру, що запобігає зміні форми труби після калібрування. Товщина твердого шару полімеру визначається інтенсивністю і часом охолодження. До моменту виходу з калібрування середня температура шару полімеру, що забезпечуватиме достатню жорсткість труби, має бути нижчою за температуру склування [122, 123].

При розрахунку охолодження труби в калібрувальному пристрої гільзу доцільно розглядати як ще один шар (рис. 2.13), так як у цьому випадку неможливо достатньо точно задати граничні умови на зовнішній поверхні труби.

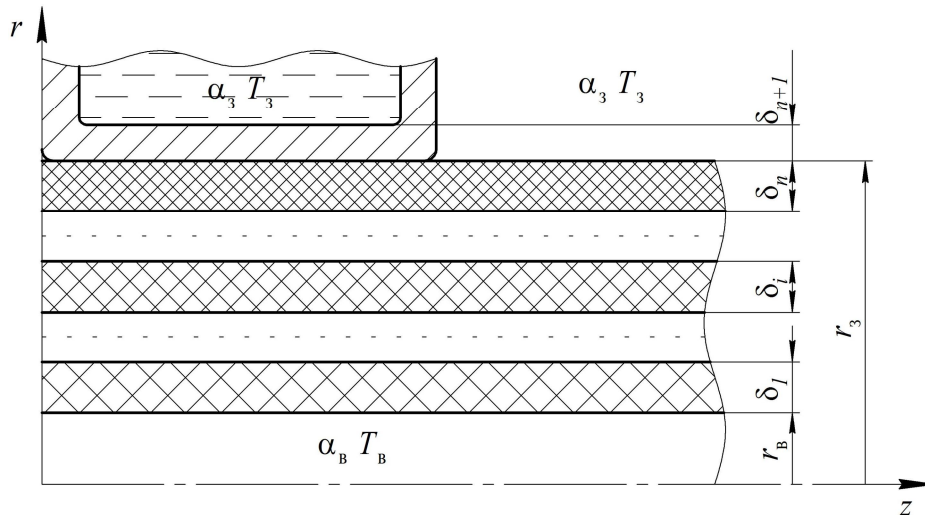


Рис. 2.13. Розрахункова схема охолодження полімерної труби:  $r_B$ ,  $r_3$  – внутрішній та зовнішній радіуси труби;  $z$  – вісь напрямку руху труби;  $\delta_1$ ,  $\delta_i$ ,  $\delta_n$ , – товщина  $i$ -го шару стінки;  $\delta_{n+1}$  – товщина втулки калібрувального пристрою;  $T_3$ ,  $T_B$  – температура навколишнього середовища з боку зовнішньої та внутрішньої поверхонь стінки труби;  $\alpha_3$ ,  $\alpha_B$  – коефіцієнти тепловіддачі від поверхонь труби до охолодного середовища

В умовах вільної конвекції трубу охолоджують у ваннах зануренням у шар води та на ділянках повітряного охолодження, що обумовлено незначною швидкістю відведення труби (до 9 м/хв). Під час перебування труби на повітрі також відбувається охолодження і за рахунок теплового випромінювання. У цьому випадку теплообмін на поверхні труби слід описати граничними умовами третього роду, а коефіцієнт тепловіддачі до повітря можна визначати за залежностями (4.46)–(4.48) і (4.69), (4.70) у праці [106].

Охолодження зануренням труби у шар охолодної води раціонально застосовувати під час виготовлення тонкостінних труб невеликого діаметра (до 63–100 мм). Для труб більшого розміру слід застосовувати охолодження зрошенням охолодної води. Під час зрошення води на поверхню труби утворюється водяна плівка, яку краплі безперервно збурюють, що інтенсифікує процес теплообміну. Для визначення коефіцієнта тепловіддачі за зрошення полімерної труби водою отримані емпіричні залежності (166) у праці [13] і (6.44) у праці [16].

Процес охолодження труби доцільно розглядати в циліндричній системі координат. При цьому слід зробити такі припущення:

- перенесенням теплоти вздовж осі труби нехтуємо, оскільки товщина стінки на декілька порядків менша від довжини труби і, відповідно, термічний опір вздовж осі  $z$  на декілька порядків більше термічного опору вздовж осі  $r$ ;
- сучасні охолодні пристрої забезпечують однакові умови охолодження по всьому периметру кожного поперечного перетину труби, тому приймаємо, що процес вісесиметричний, отже не залежить від кутової координати;
- оскільки розв’язання задачі теплопровідності крізь багат шарову стін-

ку пов'язане з знаходженням температурних полів по обидві сторони від межі розділу сусідніх двох шарів, то на цій межі застосовуються граничні умови четвертого роду;

– під час руху трубної заготовки крізь охолодні пристрої орієнтація молекул полімеру вже не відбувається, тобто перенос теплоти у кожному шарі труби здійснюється тільки теплопровідністю.

### 2.2.2. Математичне моделювання процесу

Охолодження багатошарової труби описується рівнянням нестационарної теплопровідності, як і у випадку охолодження одношарової [14, 20], при цьому враховується зміна теплофізичних властивостей для кожного окремого шару

$$\rho_i(T)c_i(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda_i(T)\nabla T), \quad (2.45)$$

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.

Охолодження екструдованої труби розглядаємо в нерухомій відносно ванни охолодження циліндричній системі координат (рис. 2.13), тобто температура матеріалу стінки в кожній фіксованій точці відносно системи координат в часі не змінюється. При цьому координата і час пов'язані між собою залежністю

$$\tau = \frac{z}{W_z},$$

де  $W_z$  – швидкість руху труби, яка дорівнює

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

де  $G$  – масова продуктивність екструдера, кг/с.

Тоді рівняння (2.45) набуває вигляду

$$W_z\rho_i(T)c_i(T)\frac{\partial T}{\partial z} = \nabla(\lambda_i(T)\nabla T). \quad (2.46)$$

Рівняння (2.46) у циліндричних координатах із врахуванням зазначених припущень набуває вигляду [14]

$$W_z\rho_i(T)c_i(T)\frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_i(T)\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r}\right). \quad (2.47)$$

Для калібрувальної втулки ( $W_z = 0$ ) рівняння (2.47) має вигляд [14]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (2.48)$$

Для формулювання умов однозначності за основу використано рівняння (14.9)–(14.13) праці [14], які з врахуванням багат шарової конструкції стінки труби і теплообміну на її внутрішній поверхні набувають такий вигляд:

– Початковою умовою є вихідний розподіл температури. При цьому, оскільки сучасне екструзійне обладнання забезпечує достатньо задовільну температурну однорідність розплаву, то можна прийняти, що в початковий момент часу на виході з екструзійної головки трубна заготовка по товщині стінки має однакову температуру

$$T(r, z)|_{\tau=0} = T_0. \quad (2.49)$$

– Граничні умови процесу охолодження в калібрувальному пристрої та вакуум-ванні

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_B} = \alpha_B (T|_{r=r_B} - T_B); \quad (2.50)$$

$$T_i = T_{i+1}, \lambda_i(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=\sum_i \delta_i} = \lambda_{i+1}(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=\sum_i \delta_i}; \quad (2.51)$$

$$T_n = T_{n+1}, \lambda_n(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_3} = \lambda_{n+1}(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_3}; \quad (2.52)$$

$$\lambda_{n+1}(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_3+\delta_{n+1}} = \alpha_3 (T|_{r=r_3+\delta_{n+1}} - T_3). \quad (2.53)$$

– У випадку охолодження труби у водній ванні рівняння (2.52) та (2.53) замінюються рівнянням

$$\lambda_n(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_3} = \alpha_3 (T|_{r=r_3} - T_3). \quad (2.54)$$

Рівняння (2.47)–(2.54) є математичною моделлю одно- і двостороннього охолодження одно- і багат шарових гладких полімерних труб.

### 2.2.3. Вибір методів розв'язання математичної моделі та алгоритм розрахунку

Для розв'язання рівнянь (2.47)–(2.54) доцільно застосовувати метод скінченних різниць, який широко використовується під час математичного моделювання і описаний у працях [115, 116], і який використано для розв'язання математичної моделі одностороннього охолодження одно шарової труби [14]. Сутність методу скінченних різниць полягає в заміні диференціального рівняння системою алгебраїчних рівнянь, до яких входять значення функції в дискретних (вузлових) точках. У результаті розв'язання цієї системи одержують масиви числових значень функції в цих точках.

Отже для розв'язання лінійної задачі теплопровідності в стінці труби застосуємо явну скінченно-різницеву схему [124] для чого трубу розділимо сіткою з кроками  $\Delta z$  і  $\Delta r$  (рис. 2.14). Значення функції у вузлових точках позначені відповідно індексами  $k$  по координаті  $r$  ( $k = \overline{1, m}$ ), індексами  $l$  по координаті  $z$ .

Замінімо диференціальні рівняння і граничні умови скінченно-різницевиими. Для рівняння (2.47) маємо

$$w_z \rho_i(T) c_i(T) \frac{T_{k,l+1} - T_{k,l}}{\Delta z} = \lambda_i(T) \left( \frac{T_{k-1,l} - 2T_{k,l} + T_{k,l+1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{T_{k+1,l} - T_{k,l}}{\Delta r} \right).$$

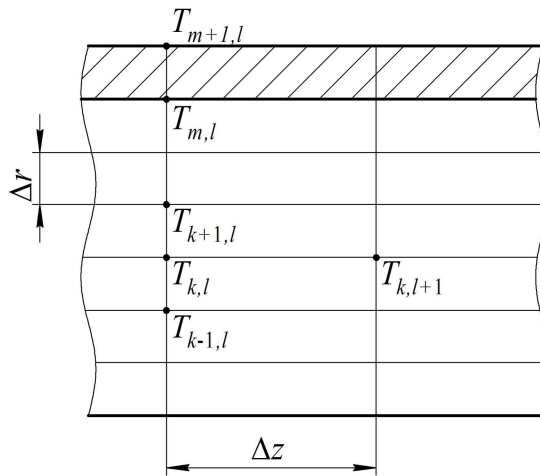


Рис. 2.14. Схема сітки для розв'язання за явною скінченно-різницевою схемою:  
 $T$  – температура у вузлових точках;  $\Delta z$  – крок по осі  $z$ ;  $\Delta r$  – крок по радіусу

Розв'язуючи це рівняння відносно температури  $T_{ij+l}$ , отримаємо

$$T_{k,l+1} = T_{k,l} + \frac{\lambda_i(T) \Delta z}{w_z \rho_i(T) c_i(T) \Delta r^2} \left[ T_{k-1,l} - 2T_{k,l} + T_{k,l+1} + \frac{\Delta r}{r} (T_{k+1,l} - T_{k,l}) \right].$$

Рівняння (2.48) є рівнянням стаціонарної теплопровідності крізь циліндричну стінку, його розв'язок відомий і має вигляд

$$q = \frac{T_{m,l+1} - T_{m+1,l+1}}{\frac{r_3}{\lambda_{n+1}(T)} \ln \frac{r_3 + \delta_{n+1}}{r_3}}, \quad (2.55)$$

де  $T_{m+1,j+1}$  – температура внутрішньої поверхні калібрувальної втулки.

З граничної умови (2.49) маємо

$$\lambda_1(T) \frac{T_{1,l+1} - T_{0,l+1}}{\Delta r} = \alpha_B (T_{0,l+1} - T_B),$$

звідки

$$T_{0,l+1} = \frac{T_B + \frac{\lambda_1(T)}{\alpha_B \Delta r} T_{1,l+1}}{1 + \frac{\lambda_1(T)}{\alpha_B \Delta r}}. \quad (2.56)$$

З рівнянь (2.52) і (2.53) із врахуванням (2.55) отримаємо

$$\lambda_n(T) \frac{T_{m-1,l+1} - T_{m,l+1}}{\Delta r} = \frac{T_{m,l+1} - T_{m+1,l+1}}{\frac{r_3}{\lambda_{n+1}(T)} \ln \frac{r_3 + \delta_{n+1}}{r_3}}, \quad (2.57)$$

$$\frac{T_{m,l+1} - T_{m+1,l+1}}{\frac{r_3}{\lambda_{n+1}(T)} \ln \frac{r_3 + \delta_{n+1}}{r_3}} = \alpha_3 (T_{m+1,l+1} - T_3). \quad (2.58)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (2.56) і (2.57) відносно температур  $T_{m,l+1}$  і  $T_{m+1,l+1}$ , отримаємо

$$T_{m,l+1} = \frac{T_3 + \left( \frac{r_3}{r_3 + \delta_{n+1}} \cdot \frac{\lambda_n}{\alpha_3 \Delta r} + \frac{A_1 \lambda_n}{\Delta r} \right) T_{m-1,l+1}}{1 + \frac{r_3}{r_3 + \delta_{n+1}} \cdot \frac{\lambda_n}{\alpha_3 \Delta r} + \frac{A_1 \lambda_n}{\Delta r}}, \quad (2.59)$$

$$T_{m+1,l+1} = \frac{T_{m,l+1} + \alpha_3 A_2 T_3}{1 + \alpha_3 A_2},$$

$$\text{де } A_1 = \frac{r_3}{\lambda_{n+1}(T)} \ln \frac{r_3 + \delta_{n+1}}{r_3} \text{ і } A_2 = \frac{r_3 + \delta_{n+1}}{\lambda_{n+1}(T)} \ln \frac{r_3 + \delta_{n+1}}{r_3}.$$

Аналогічно до визначення температури на внутрішній поверхні труби (2.56) запишемо вираз для визначення температури на зовнішній поверхні

$$T_{m,l+1} = \frac{T_3 + \frac{\lambda_n(T)}{\alpha_3 \Delta r} T_{m-1,l+1}}{1 + \frac{\lambda_n(T)}{\alpha_3 \Delta r}}. \quad (2.60)$$

Під час охолодження у ваннах значення  $A_2 = 0$ , у такому випадку (2.59) і (2.60) є ідентичними.

Під час застосування явної схеми існує обмеження щодо вибору співвідношення між кроками розрахунку  $\Delta r$  і  $\Delta z$ , яке в даному випадку матиме вигляд

$$\Delta z = \frac{w_z \rho_i(T) c_i(T) \Delta r^2}{4 \lambda_i(T)}. \quad (2.61)$$

Значення коефіцієнтів тепловіддачі обчислюються за рівняннями визначеними для кожного етапу у пп. 2.2.1.

На підставі сформульованої в п. 2.2.2 математичної моделі і вибраного методу її розв'язання розроблено алгоритм розрахунку процесів калібрування та охолодження гладкої полімерної труби. Схему зазначеного алгоритму складено з модулів, кожний з яких визначає певні параметри й характеристики охолодного обладнання (рис. 2.15).

Вихідними даними для розрахунку є: умови охолодження (вільна або вимушена конвекція); тип теплоносія (вода, повітря); початкова температура виробу; продуктивність екструзійного обладнання; визначальні розміри виробу (зовнішній діаметр і товщина стінки труби); крок розрахунку по товщині стінки; температура теплоносія; властивості теплоносія (теплопровідність, кінематична в'язкість, характерне число Прандтля) як функції температури; теплофізичні властивості матеріалів стінки (густина, масова теплоємність, теплопровідність) як функції температури; якщо конвекція вимушена, то швидкість руху теплоносія і напрям його руху відносно труби; якщо розрахунок перевірений, то довжина зони охолодження, а якщо розрахунок проектний – то допустима кінцева температура матеріалів стінки; коефіцієнти тепловіддачі як функції параметрів охолодження (умови охолодження, температура, фізичні і теплофізичні властивості, витрата охолодної речовини у випадку вимушеної конвекції, температура поверхні труби та її діаметр). Ці дані вводяться у блоці 2.

Якщо розрахунок перевірений, то визначають загальну тривалість і поточний час термообробки, а якщо розрахунок проектний, то визначають поточну довжину ділянки термообробки.

У блоці 3 і 4 задаються початкові значення температур у вузлових точках, визначається значення коефіцієнтів тепловіддачі в зоні калібрування і на внутрішній поверхні труби, швидкість  $W_z$ , а також обчислюються значення параметрів  $A_1$  і  $A_2$ . Значення координати  $z$ , часу  $\tau$  і кількості теплоти  $Q$ , яка буде віддана трубою, приймаються рівними нулю, а значення кроку розрахунку  $\Delta z$  визначається за формулою (2.61).

У блоці 5 визначається значення координати  $z$  і час  $\tau$ . У блоках 6–8 знаходять температури у внутрішніх вузлових точках. При цьому визначають теплофізичні властивості матеріалів стінки за температури  $T_{k,l+1}$ . У блоці 9 визначають температуру та коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні труби, а температура і коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні труби визначають у блоках 10–13. У блоці 10 параметр  $A_3 = \lambda_n(T)/\alpha_3 \Delta r$ , а  $A_4 = 0$ .

У випадку обрахунку процесу калібрування ( $j=0$ ) у блоці 12 визначають температуру на поверхні контакту калібрувальної втулки з водою  $T_{m+1,l+1}$  і значення відповідного коефіцієнта тепловіддачі, при цьому  $A_3 = \frac{r_3}{r_3 + \delta_{n+1}} \frac{\lambda_{n+1}(T)}{\alpha_3 \Delta r}$  і

$A_4 = \frac{A_4 \lambda_{n+1}(T)}{\Delta r}$ . У блоках 14 і 15 здійснюють переіндексацію температур.

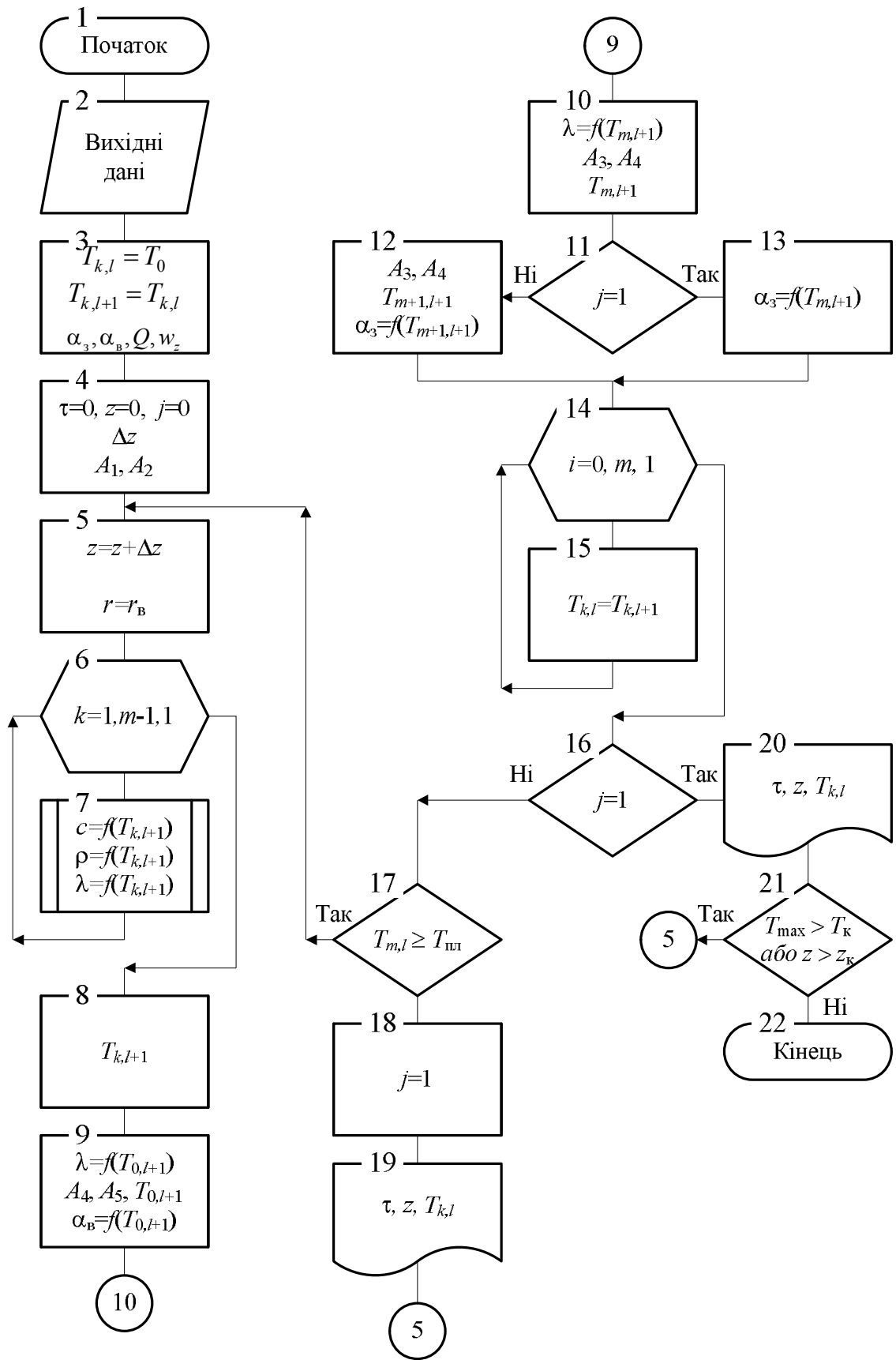


Рис. 2.15. Схема алгоритму розрахунку охолодження гладких полімерних труб

При значенні  $j=0$  в блоці 17 порівнюють температуру зовнішньої поверхні труби з температурою плавлення. Якщо поверхня охолодилася до температури плавлення, лічильник  $j$  стає рівним 1 (блок 18) і виводиться значення часу  $\tau$ , координати  $z$  та профіль температур після калібрування (блок 19). В іншому випадку блок 17 повертає на блок 5 для продовження розрахунку процесу калібрування.

При значенні  $j=1$  блок 20 виводить на кожному кроці  $\Delta z$  значення часу  $\tau$ , координати  $z$  і профіль температур. У блоці 21 порівнюють максимальну температуру в стінці труби з заданим кінцевим значенням під час проектного розрахунку, а під час перевірного розрахунку порівнюють значення координати  $z$  з кінцевим заданим. У випадку досягнення кінцевих значень розрахунків завершують, і в іншому випадку здійснюють перехід на блок 5 для продовження розрахунку процесу охолодження.

#### **2.2.4. Результати числового моделювання та їх аналіз**

За розробленими математичними моделями охолодження гладких полімерних труб була розроблена програма, яка дає можливість здійснювати моделювання роботи систем охолодження.

Розглянемо систему охолодження екструдованих труб ПЕ 80 SDR 11 – 630×57,2 технічна 12,5 бар ДСТУ Б В.2.7-151:2008 [125]. Результати моделювання були порівняні з даними промислової установки, що наведені у праці [10] (рис. 2.16).

Розрахункове значення довжини зони охолодження відрізняється приблизно на 2 м від довжини реальної установки. Тобто відхилення склало лише 4,5 %. Це можна пояснити труднощами врахування при моделюванні дійсних умов охолодження, у тому числі і дійсних теплофізичних властивостей матеріалу труби.

На промисловій установці довжина зони охолодження, на якій використовуються вакуум-ванни, становить 36 м, чому майже точно відповідають дані, отримані при моделюванні. Охолодження припиняється при досягненні температури в стінці труби не більше за 90 °С, що відповідає 42 м на реальній установці і майже 44 м при моделюванні процесу. Далі труба охолоджується до 65 °С, після чого відрізається відрізним пристроєм. Слід зазначити, що при односторонньому охолодженні довжина вакуум-ванн становить 86 % від загальної довжини зони охолодження.

Моделювання двостороннього охолодження здійснювалось для випадків застосування повітря та повітряно-водяної суміші для відведення теплоти з внутрішньої поверхні труби (рис. 2.17).

Очевидно, за одночасного відведення теплоти з обох поверхонь стінки труби значно зменшується довжина зони охолодження. Так, за умови застосування повітря як холодоагенту, довжина зони охолодження зменшиться на

16 м, а при застосуванні повітряно-водяної суміші – на 26 м, що підтверджує ефективність застосування внутрішнього охолодження. Також слід відмітити, що довжина зони використання вакуум-ванн теж зменшилася: у першому випадку можна застосовувати чотири типові ванни по 6 м кожна, а в другому випадку – дві ванни по 6 м та одна завдовжки 4 м. Тобто, двостороннє охолодження дозволяє значно зменшити витрати енергії як на подачу холодоагенту так і на створення вакууму. Також можна досягти значної економії холодоагенту та зменшити виробничу площу цеху, що займає лінія для виготовлення труб.

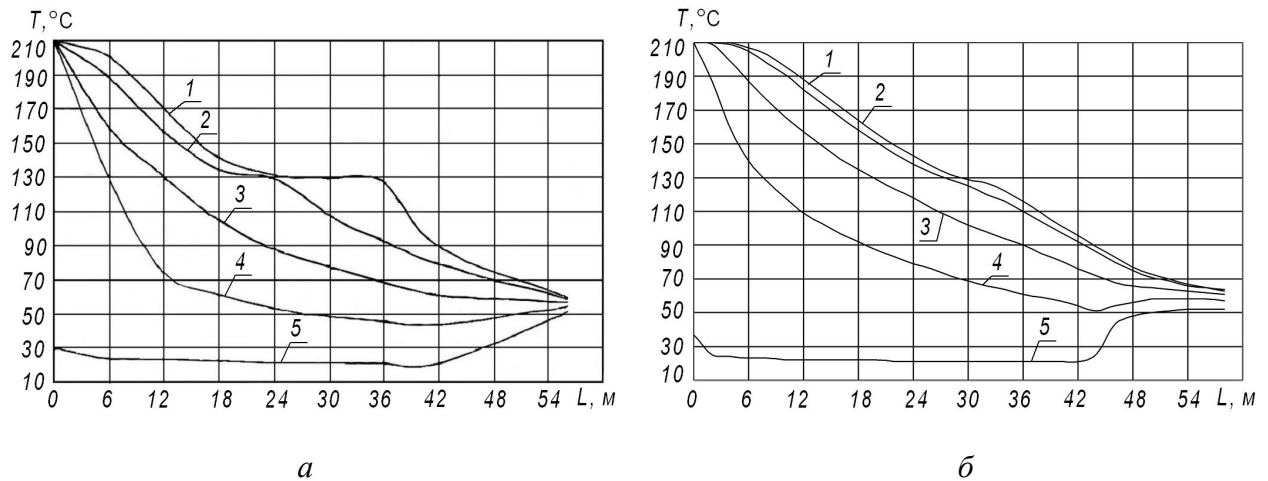


Рис. 2.16. Температура стінки труби: *а* – дані отримані, з промислової установки, *б* – дані, отримані при моделюванні; 1 –  $r = r_B$ , 2 –  $r = r_B + 0,22s$ , 3 –  $r = r_B + 0,45s$ , 4 –  $r = r_B + 0,68s$ , 5 –  $r = r_B + s$ ;  $r_B$  – внутрішній радіус труби;  $s$  – товщина стінки труби

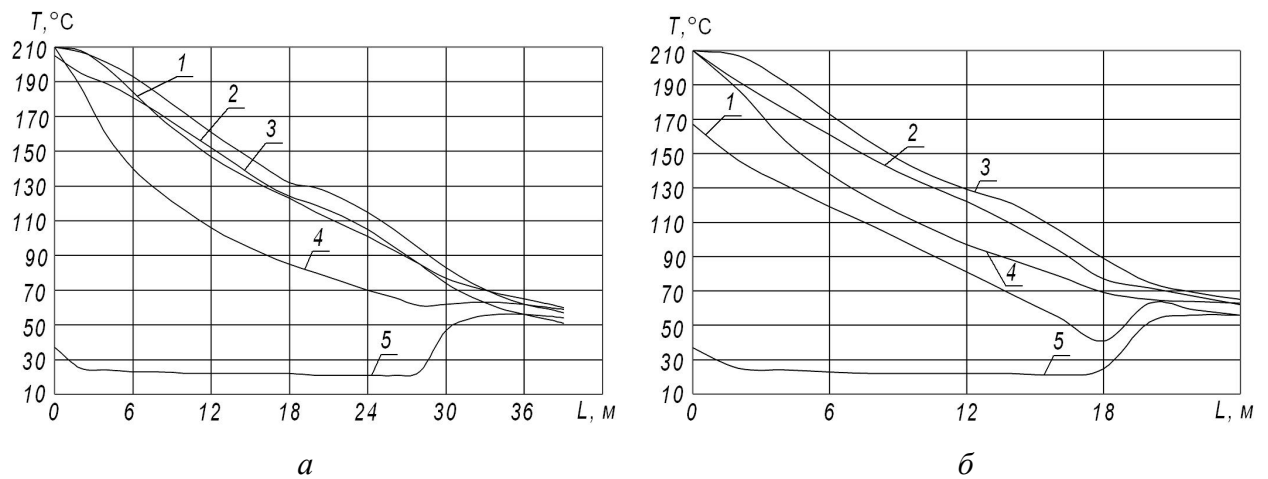


Рис. 2.17. Температура стінки труби при двосторонньому охолодженні: *а* – з внутрішнім охолодження повітрям, *б* – з внутрішнім охолодження повітряно-водяної суміші

На рис. 2.18 наведено профілі температур стінки труби при односторонньому та двосторонньому охолодженні, що дозволяє легко оцінити, як змінюється інтенсивність охолодження залежно від застосовуваного методу охолодження.

Певною проблемою при виготовленні труб великого діаметра є можливий перерозподіл полімеру з верхньої частини труби в нижню під дією сил тяжіння [97]. При застосуванні двостороннього охолодження полімер на внутрішній поверхні значно швидше переходить у твердий стан, що може також дозволити вчасно зафіксувати форму і розміри поперечного перерізу труб і збільшити продуктивність лінії.

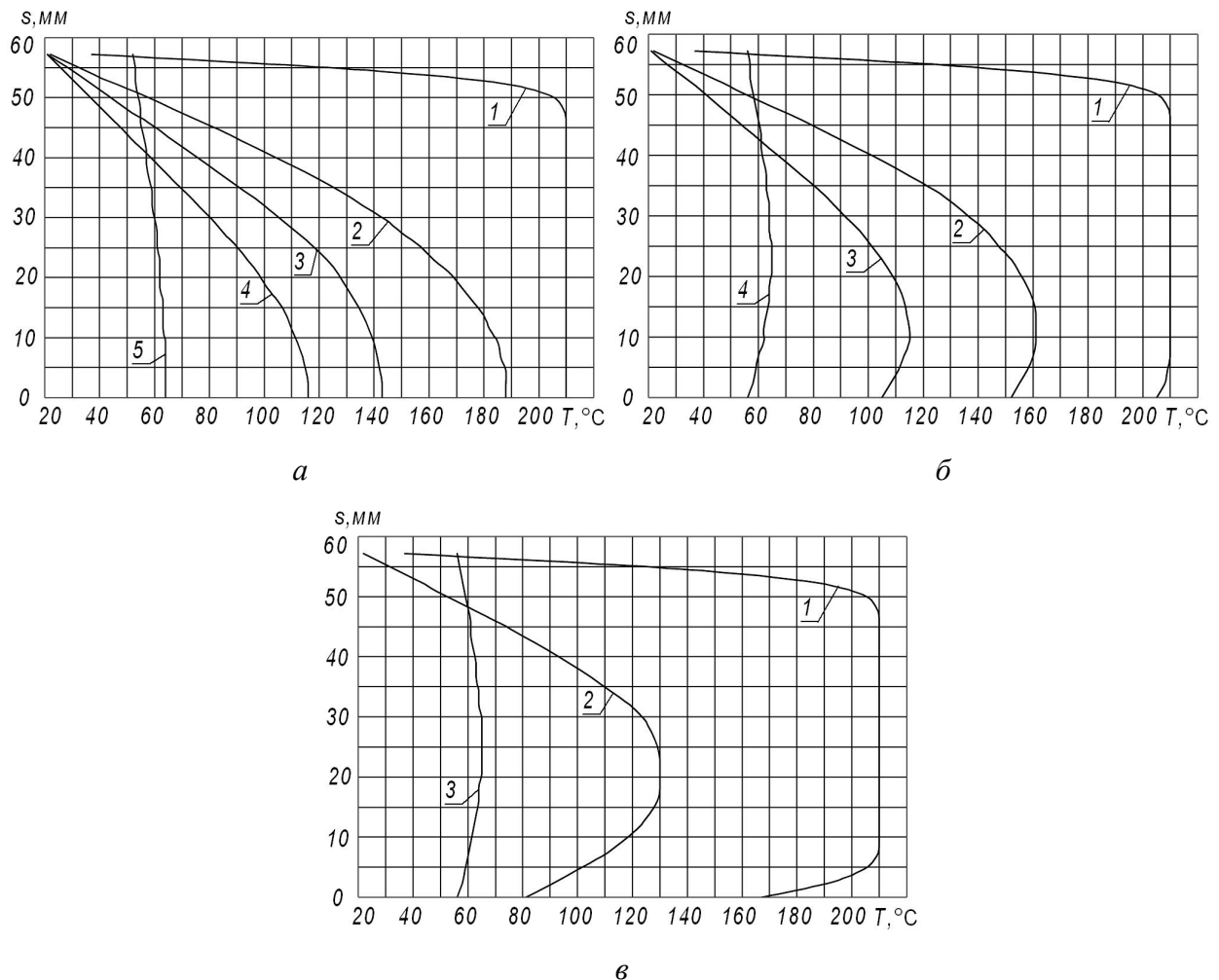


Рис. 2.18. Профілі температури стінки: а – при односторонньому охолодженні, б – при двосторонньому охолодженні з застосуванням повітря, в – при двосторонньому охолодженні з застосуванням повітряно-водяної суміші; 1 – 0 м, 2 – 12 м, 3 – 24 м, 4 – 36 м, 5 – 56 м

Під час охолодження в стінці труби виникають залишкові напруження, які негативно впливають на експлуатаційні властивості труби. Хоча ці напруження за одностороннього охолодження при значній дожині відрізка труби не впливають на її форму, однак на кінцях призводять до бочкоподібності труби. За двостороннього охолодження зменшується градієнт температури по товщині стінки (рис. 2.18), що зменшує загальну величину напружень і сприяє їх

розподілу по товщині стінки таким чином, що ці напруження частково або повністю компенсуються. Розподіл напружень залежить від співвідношення інтенсивності відводу теплоти з внутрішньої та зовнішньої поверхонь.

Слід зазначити, що процес двостороннього охолодження достатньо складний з конструктивної точки зору, тому за попередньою оцінкою отримані результати довжини зони охолодження в реальних умовах будуть на 25–30 % більшими.

Для труб різного діаметра з однаковим геометричним співвідношенням SDR 11 [126] ефективність застосування внутрішнього охолодження збільшується зі збільшенням діаметра (рис. 2.19.). Однак для труб великого діаметра ефективність застосування повітряно-водяної суміші майже не змінюється зі збільшенням діаметра. У цих випадках обмежним є процес підведення теплоти зсередини стінки до охолоджуваних поверхонь, а ефективність застосування внутрішнього охолодження забезпечується на ділянках з високою середньою температурою стінки (тобто має місце внутрішня задача охолодження). Можна зробити висновок, що для труб великого діаметра з SDR 11 скоротити час охолодження більш ніж на 70 % неможливо.

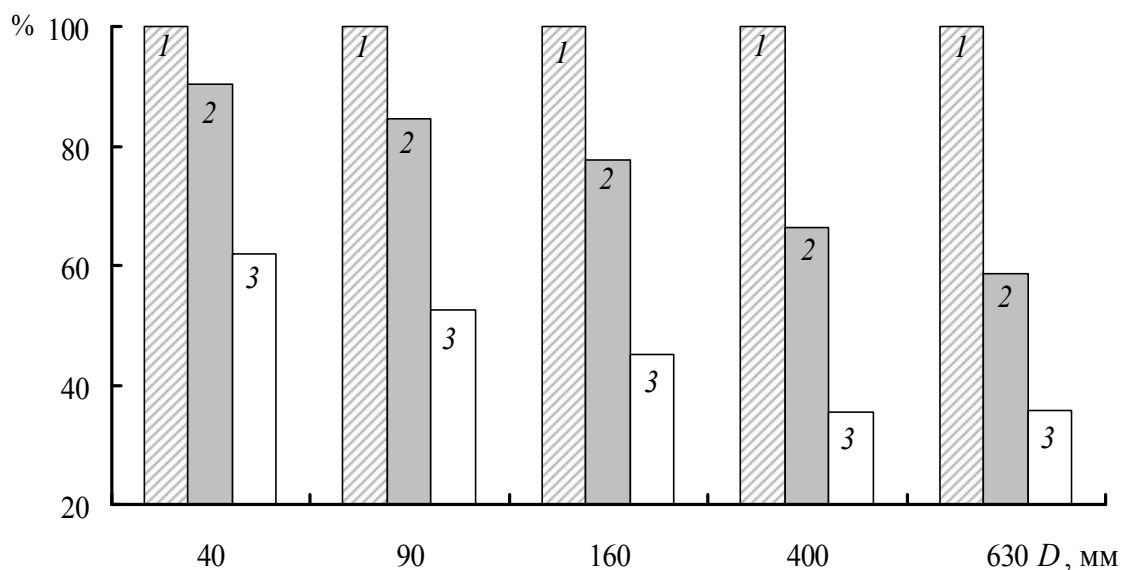


Рис. 2.19. Відсоткове співвідношення часу охолодження для труб різного діаметра: 1 – одностороннє зовнішнє охолодження; 2 – двостороннє охолодження (внутрішнє – повітря); 3 – двостороннє охолодження (внутрішнє – повітряно-водяна суміш)

Розглянувши вплив товщини стінки труби на час охолодження (рис. 2.20), можна зробити висновок, що ефективність застосування двостороннього охолодження зростає при збільшенні товщини стінки труби. Моделювання здійснювалося для труб діаметром 225 мм з різним геометричним співвідношенням SDR 9...33. Відповідно, можна стверджувати, що з урахуванням витрат на встановлення і обслуговування внутрішнього охолодження

застосування двостороннього охолодження виправдане лише під час виготовлення труб з товщиною стінки більше за 10 мм.

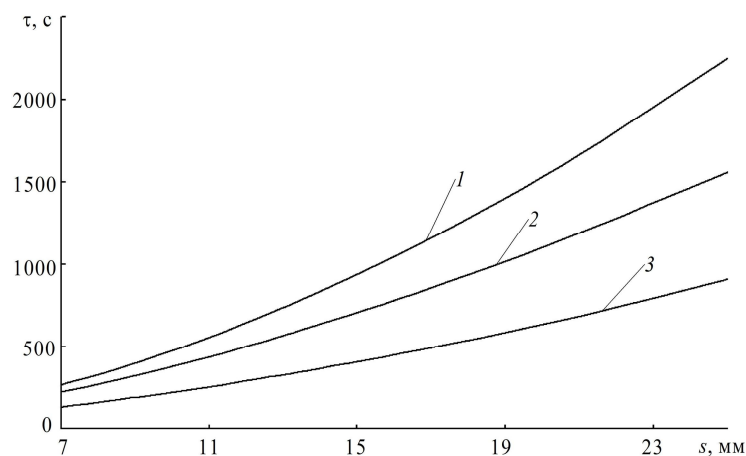


Рис. 2.20. Потрібний час охолодження труб з різною товщиною стінки:  
1 – одностороннє зовнішнє охолодження; 2 – двостороннє охолодження (внутрішнє – повітря); 3 – двостороннє охолодження (внутрішнє – повітряно-водяна суміш)

Температура охолодної води протягом року може істотно змінюватися, що істотно впливає на час охолодження і потребує зміни технологічних параметрів лінії виробництва труб. Тому виробникам доводиться застосовувати холодильні машини для охолодження води до необхідної температури з витратою значної кількості енергії на цей процес особливо в літку [127]. Так застосування охолодної води з температурою 6 °С скоротить час охолодження труби ПЕ 80 SDR 11 – 160×14,6 технічна 12,5 бар ДСТУ Б В.2.7-151:2008 приблизно на 600 с порівняно з охолодження водою з температурою 26 °С (рис. 2.21).

У випадку застосування двостороннього охолодження вплив температури охолодної води зменшується (рис. 2.21) особливо під час застосування повітряно-водяної суміші для внутрішнього охолодження. За таких умов охолодження стає можливим застосування охолодної води різної температури без зміни технологічних параметрів лінії і уникнути значної витрати енергії на охолодження води у контурі системи охолодження.

Підвищити ефективність охолодження можна застосувавши дискретну систему охолодження, яка полягає у розташуванні охолодних ванн на певній відстані одна від одної [128, 129]. На ділянках між ваннами труба контактує з повітрям і охолоджується лише за рахунок конвективного теплообміну. За час перебування труби у цій зоні з внутрішніх шарів стінки труби до зовнішніх підводиться значна кількість теплоти. Відповідно, відведення теплоти у наступній ванні буде значно інтенсивніше.

На рис. 2.22 наведено результати моделювання роботи типової (а) та дискретної (б) систем охолодження для труби з зовнішнім діаметром 630 мм та SDR 11 (товщина стінки 57,3 мм).

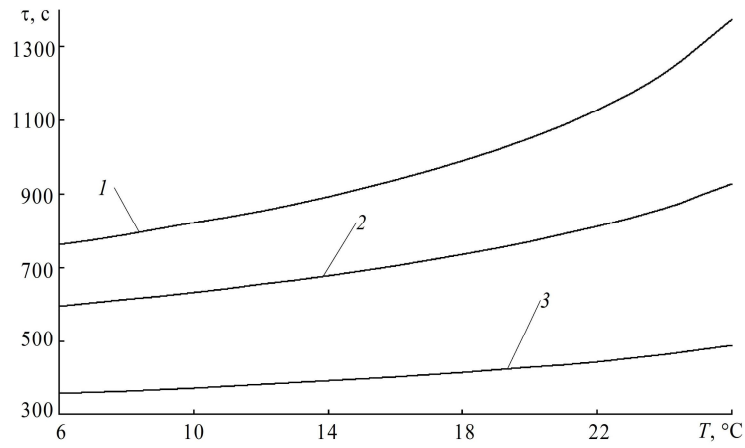
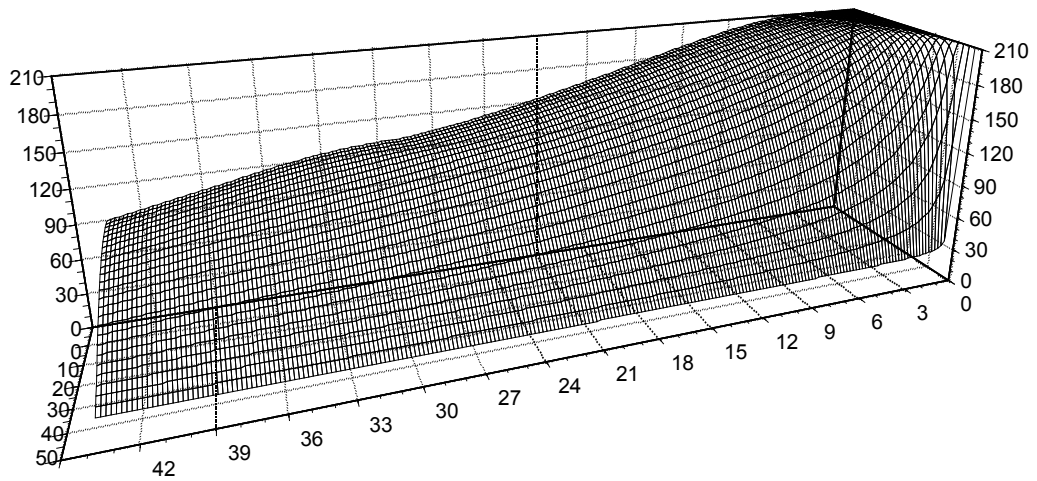
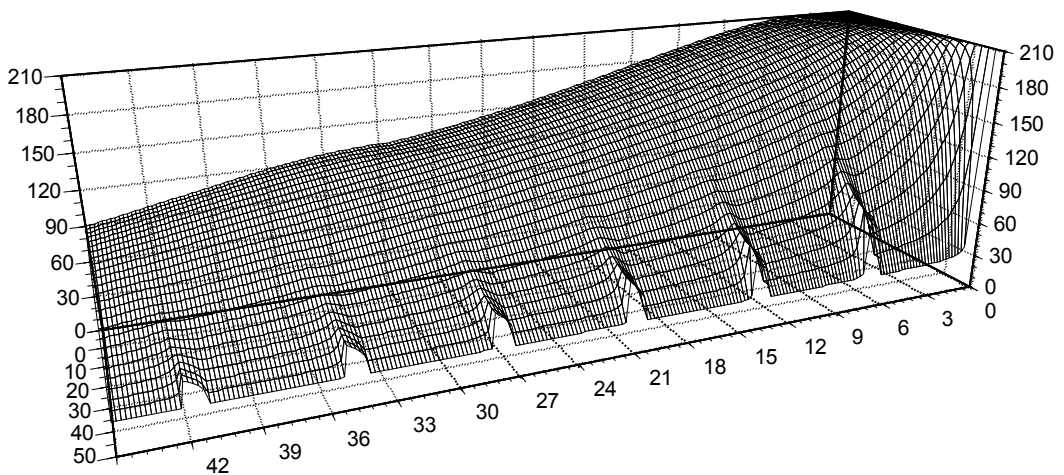


Рис. 2.21. Вплив температури охолодної води на час охолодження:  
 1 – одностороннє зовнішнє охолодження; 2 – двостороннє охолодження (внутрішнє – повітря); 3 – двостороннє охолодження (внутрішнє – повітряно-водяна суміш)



*a*



*б*

Рис. 2.22. Температурні поля у стінці труби: *a* – типова схема охолодження; *б* – дискретна система охолодження

При застосуванні звичайної системи необхідна сумарна довжина ванн склала 43,7 м, а при дискретній системі 39 м, тобто вдалося майже на 5 м скоротити зону охолодження на якій необхідно було застосовувати ванни, що істотно скоротить витрати охолодної води та енергії.

### **2.3. Висновки**

Відповідно до проведених досліджень можна зробити такі висновки.

1. Розроблено фізичну модель одно- і двостороннього калібрування та охолодження гофрованих полімерних труб.

2. Розроблено математичну модель та алгоритм розрахунку системи двостороннього охолодження багатошарової гофрованої полімерної труби. Установлено, що під час одностороннього зовнішнього охолодження ділянки внутрішнього шару гофрованої труби під гофрама дуже повільно охолоджуються, що обумовлено значним термічним опором повітря у гофрах стінки. Як наслідок, під час безпосереднього охолодження внутрішньої поверхні труби час охолодження може скоротитися у декілька разів. Так установлено, що у випадку застосування повітря для внутрішнього охолодження час процесу скорочується на 15 % під час охолодження труб малого діаметра (менше від 0,4 м) і до 40 % під час охолодження труб великого діаметра (більше за 0,4 м), у випадку застосування повітряно-водяної суміші – на 20 % і 80 % відповідно.

3. Удосконалено фізичну модель охолодження гладких полімерних труб. Сформульовані фізичні особливості охолодження багатошарових гладких полімерних труб з врахуванням теплообміну на внутрішній поверхні труби.

4. Удосконалено математичну модель та алгоритм розрахунку охолодження гладких полімерних труб. Вперше у моделі враховано теплообмін на внутрішній поверхні труби та її багатошарову структуру.

Розроблено методику, алгоритм і програму розрахунку системи охолодження полімерних труб, які дають змогу визначити раціональні параметри систем охолодження, що забезпечує можливість скоротити час охолодження до 80 %, зменшення ресурсоемності процесу виготовлення полімерних труб на 10–15 % та енергоємності – до 30 %, а також поліпшення якості одержуваних виробів – зменшення «бочкоподібності» («ПАТ НВП «Більшовик»», НВП «Пластотехніка», «Науковий центр Концерну «Техвоєнсервіс», м. Київ).

5. Установлено, що ефективність застосування двостороннього охолодження зростає зі збільшенням діаметра еструдованих труб. Також застосування двостороннього охолодження зменшує вплив на час охолодження температури охолодної води для охолодження зовнішньої поверхні труби, що дає змогу застосовувати воду різної температури без зміни параметрів роботи лінії і уникнути надмірних енергетичних затрат на охолодження води у контурі системи охолодження труб.

## **3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ**

### **3.1. Мета і завдання експериментальних досліджень**

Мета досліджень – експериментальна перевірка адекватності розроблених математичних моделей процесів калібрування і охолодження полімерних труб різного призначення з урахуванням можливості двостороннього охолодження, а також перевірка гіпотез, щодо раціоналізації процесу охолодження зазначених труб.

Експериментальні дослідження охолодження полімерних труб різного призначення здійснювали на базі обладнання кафедр ХПСМ і МАХНВ під час виконання держбюджетних НДР «Математичне моделювання енергоефективних процесів утилізації полімерних відходів через виготовлення спієних композиційних матеріалів» (д/б № 2383-п, № ДР 0109U000374) [143] і «Розроблення енергоефективних процесів та обладнання виробництва полімерних труб різного призначення» (№ 2459, № ДР 0111U000577).

Під час охолодження полімерної труби головним технологічним параметром є температура і час. Трубу охолоджують по температурі, за якої стає можлива її подальша обробка (відрізка, укладка в стопи, намотування у рулони, бухти, тощо), час охолодження визначає довжину зони охолодження і об'єм необхідних холодоагентів. Отже, температура і час охолодження вибрані, як параметри для оцінки адекватності математичних моделей і дійсних експериментальних даних.

### **3.2. Опис експериментальної установки**

Експериментальна установка\* (рис. 3.1) призначена для визначення часу охолодження та температурних полів у стінці полімерних труб різного призначення за різних умов і способів охолодження. Конструкція експериментальної установки дає можливість реалізовувати схеми як одностороннього зовнішнього або внутрішнього, так і двостороннього охолодження. Установка складається з ванни 2, термошафи 7, систем зовнішнього і внутрішнього охолодження і контрольно-вимірювальних приладів.

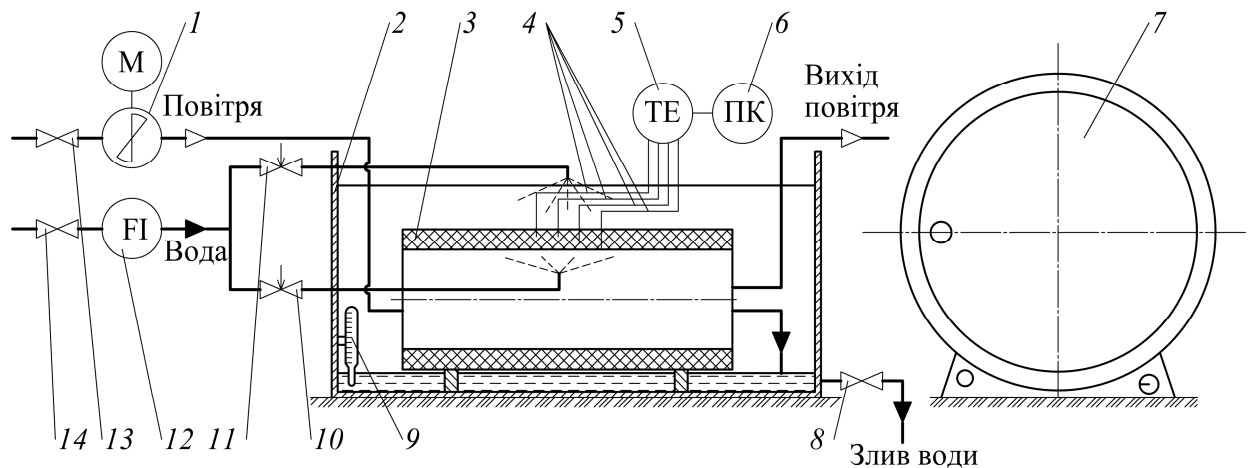
Зовнішнє охолодження труби реалізують за умов вільної конвекції зануренням труби у шар проточної води або зрошенням труби водою у ванні 2. Внутрішнє охолодження здійснюють повітрям або повітряно-водяною сумішшю, що утворюється під час розпилення води у порожнині труби 3.

---

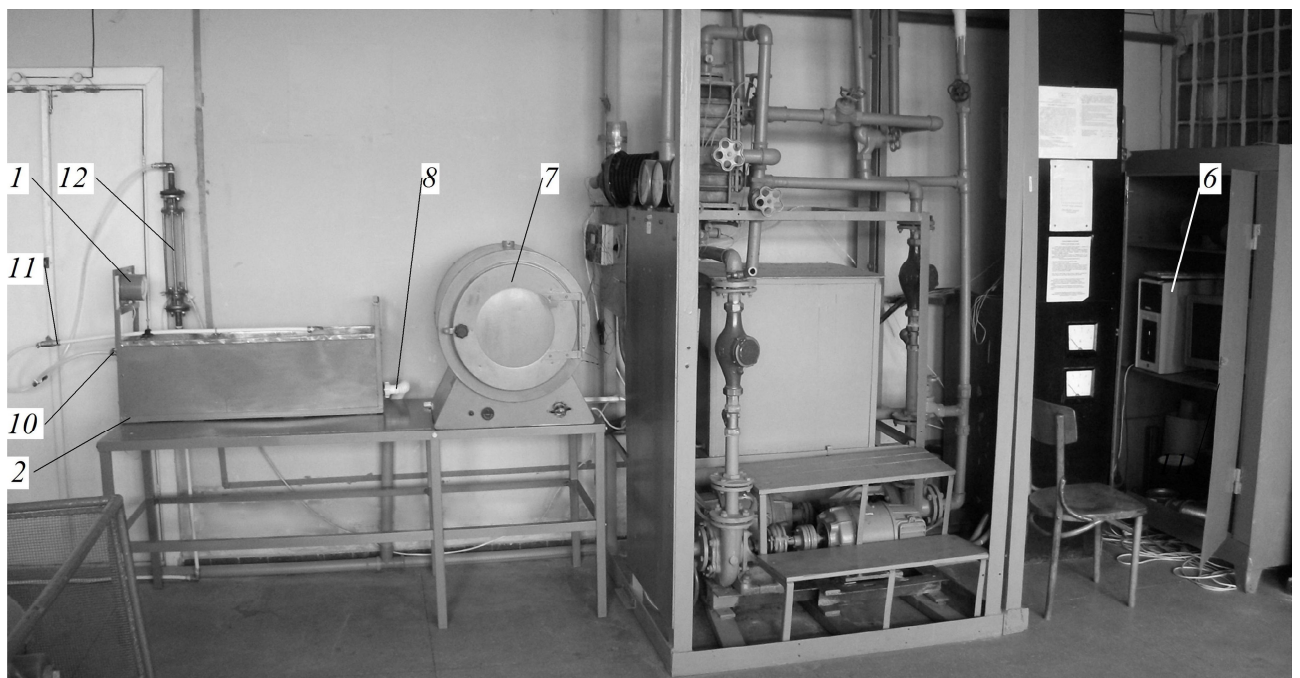
\* У виготовленні первісного варіанту експериментальної установки і проведенні досліджень брав участь студент групи ЛН-31м Алфьоров О. А., а у виготовленні остаточного варіанту установки і проведенні на ній досліджень – студент групи ЛР-51м Вмноградов Є. Ю. і студент групи ЛР-61м (пізніше групи ЛД-61м) Кравченко Ю. О.

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

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



а



б

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

Для зручної обробки та відображення зміни температури було створено програму в графічному середовищі програмування LabVIEW 8.5 (рис. 3.2).

Під час дослідження охолодження гладкої труби термопари були запаяні на зовнішній і внутрішній поверхнях, а також на глибині 2 та 4 мм від зовнішньої поверхні стінки труби. Під час охолодження гофрованих труб термопари були розміщені в різних шарах стінки (рис. 2.7).

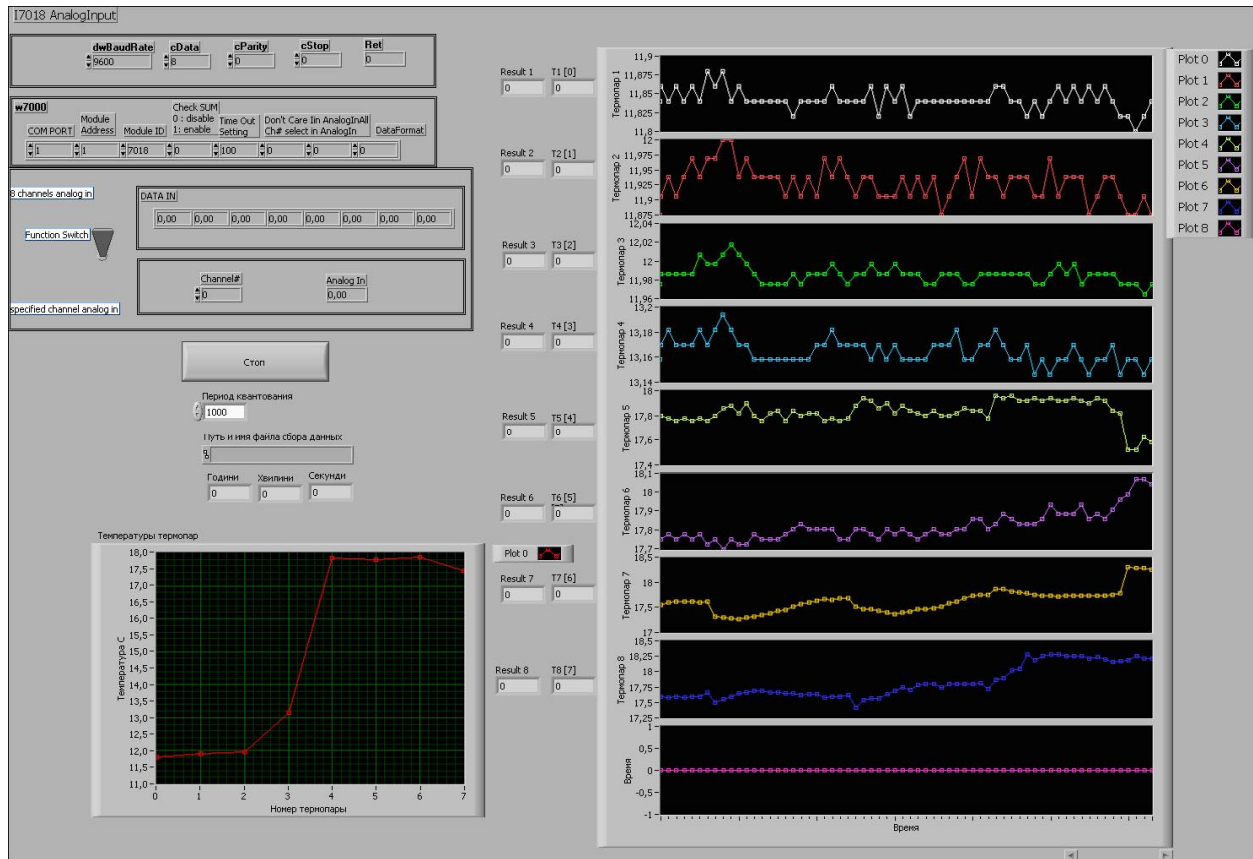


Рис. 3.2. Вікно програми для оброблення експериментальної інформації

Під час виготовлення труб умови охолодження вздовж системи охолодження незмінні – температура та витрата охолодної води постійні. Під час експериментальних досліджень умови охолодження також залишали постійними в часі. При цьому у праці [16] показано, що швидкість руху труби майже не впливає на інтенсивність охолодження під час зрошення труби охолодною водою.

### 3.3. Контрольовані фізичні величини і засоби їх вимірювання

Під час створення експериментальної установки та розробки методики експериментальних досліджень охолодження полімерних труб різного призначення було поставлено завдання передбачити можливість змінення і контролювання параметрів охолодження зазначених труб з необхідною точністю, а також забезпечення відтворюваності експерименту.

В основу вибору методів вимірювань величин і класів точності приладів було покладено відносну похибку вимірювання цих величин [131].

Для досягнення поставленого завдання на основі аналізу особливостей процесу охолодження встановлено необхідність контролювати такі параметри:

а) температуру полімерної труби по її товщині за допомогою термопар ТХК–2688 (НСХ L, діапазон вимірювання від 0 до 200 °С), у комплекті з аналогового-цифровим модулем I-7018 з класом точності 0,05 степінь дискретизації вимірювання температури становила 1 с, а також інтерфейсним модулем I-7520;

б) глибину запаювання термоелектричних перетворювачів за допомогою мікрометра ГОСТ 6507 з ціною поділки шкали 0,01 мм і діапазоном вимірювання 0–25 мм;

в) температуру охолодної води та охолодного повітря за допомогою лабораторних термометрів з ціною поділки 0,2 °С (діапазон вимірювання від 0 до 250 °С);

г) витрату охолодної води визначали за допомогою ротаметра постійного перепаду тиску РМ 2,5 ЖУЗ ДСТУ ГОСТ 13045:2009 з класом точності 1,0.

Аналіз похибок, що мали місце під час проведення експериментальних досліджень, і результати оцінювання відносних похибок засвідчили, що використані вимірювальні прилади дають можливість провести заміри величин у потрібних діапазонах з необхідною точністю.

### **3.4. Досліджені матеріали і труби**

Найбільш поширеними матеріалами для виготовлення полімерних труб є поліетилен та поліпропілен. Поліетилен використовують для виготовлення труб холодного водопостачання, газопостачання та труб з профільованою стінкою, а поліпропілен для труб холодного і гарячого водопостачання. Виходячи з цього експерименти проводилися на гладких поліетиленових трубах ПЕ 80 SDR 11 – 63×5,8 технічна 12,5 бар ДСТУ Б В.2.7-151:2008, та на гофрованих двошарових трубах ПЕ тип В- Р- U/SN8/DN/ID200/176/6000 ДСТУ Б В.2.5-32:2007 і ПЕ тип В- Р- U/SN8/DN/ID400/343/6000 ДСТУ Б В.2.5-32:2007, виробництва холдингу «Євротрубпласт». Для виготовлення цих труб застосовували поліетилен ПЕ 80 марки GM 5010 T3 black, виробництва концерну Basell (Німеччина). Також експерименти проводилися на гладких поліпропіленових трубах ПП-80 тип 3 (PPR) – клас 1/10 бар, S 2,5 – 90×15 – ДСТУ Б В.2.5-144:2007 виробництва ТОВ «Інтерпласт». Для виготовлення цих труб застосовували поліпропілен PP-R80 тип 3 марки HOSTALEN 5216/34, виробництва концерну Basell (Німеччина).

### **3.5. Дослідження процесів охолодження**

Дослідну трубу нагрівали у термошафі. Після прогріву труби по товщині до заданої температури, трубу підключали до системи охолодження. Беручи до

уваги, що експериментальні дослідження процесу охолодження полімерної труби передбачають проведення значної кількості дослідів, а отже і необхідність забезпечення початкової температури трубною заготовкою, то з метою запобігання термодеструкції матеріалу труби та втрати трубою форми й розмірів максимальну початкову температуру труби встановлювали не більше за 120 °С.

Відведення теплоти з зовнішньої поверхні труби з гладкою стінкою здійснювали за допомогою води при вільній конвекції або зрошенням труби водою, гофрованої труби – тільки зрошенням водою, адже при конвективному охолодженні у проміжках між гофрами будуть утворюватися застійні зони, що складатимуть значний термічний опір.

Відведення теплоти з внутрішньої поверхні стінки труби здійснювали за допомогою повітря з навколишнього середовища, води та повітряно-водяної суміші. При охолодженні повітрям, його подачу здійснювали за допомогою вентиляторів різної продуктивності. Вода для систем зовнішнього і внутрішнього охолодження відбиралась з системи централізованого водопостачання.

### **3.5.1. Дослідження процесу двостороннього охолодження гофрованих труб**

Експериментальні дослідження охолодження гофрованих труб проводились для випадків охолодження внутрішньої поверхні труби повітрям і повітряно-водяною сумішшю. Під час охолодження труби ПЕ тип В- Р- U/SN8/DN/ID200/176/6000 від 100 °С до 15 °С за використання повітря для внутрішнього охолодження час охолодження скоротився приблизно на 12 %, за використання повітряно-водяної суміші – 44 % (рис. 3.3), що свідчить про ефективність застосування двостороннього охолодження.

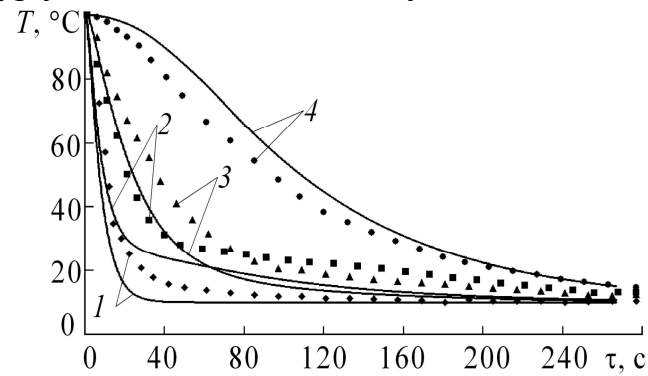
Порівнюючи температурні поля стінки труби, отримані експериментально і в результаті моделювання, відхилення значень температур не перевищило 25 %, а часу охолодження – 10 % (рис. 3.3), що свідчить про адекватність розроблених фізичної і математичної моделей.

Для кожного співставлення експериментальних та теоретичних даних процесу двостороннього охолодження гофрованої труби визначено похибку вимірювання (Додаток В).

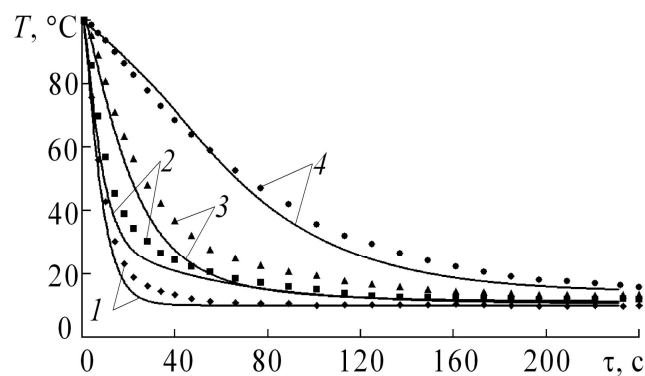
Також були проведені дослідження двостороннього охолодження на трубі ПЕ тип В- Р- U/SN8/DN/ID400/343/6000 (рис. 3.4) від 100 °С до 20 °С. У цьому випадку за використання повітря для внутрішнього охолодження час охолодження скоротився приблизно на 28 %, за використання повітряно-водяної суміші – 58 %. Це підтверджує, що ефективність застосування двостороннього охолодження зростає зі збільшенням діаметра охолоджуваної труби.

У випадку охолодження зовнішньої поверхні труби на повітрі за умов вільної конвекції, а внутрішньої – за допомогою повітряно-водяної суміші, також вдалося скоротити час процесу на 17 % (рис. 3.5). При цьому з обох сторін труби

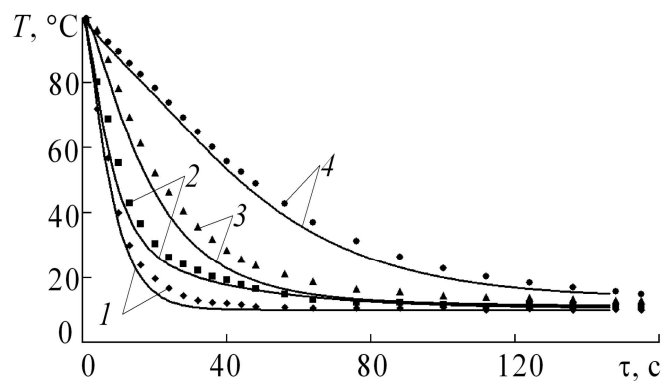
реалізують менш інтенсивні умови охолодження, за яких утворюються менші градієнти температур у стінці, а отже і зменшуються залишкові напруження.



*a*



*б*



*в*

*Рис. 3.3.* Зміна температурних полів стінки гофрованої труби в часі за різних способів охолодження ( $D = 200$  мм): *a* – одностороннє; *б* – двостороннє, повітрям; *в* – двостороннє, повітряно-водяна суміш; 1–4 – номери термопар відповідно до рис. 2.7; ■, ●, ◆, ▲ – експериментальні дані, — – теоретичні дані

Такий підхід також дає змогу значно скоротити витрати охолодної води у порівнянні з одностороннім зовнішнім охолодженням, адже для утворення повітряно-водяної суміші використовувалось на 55 % менше охолодної води на погонний метр порівняно зі зрошенням води на зовнішню поверхню труби.

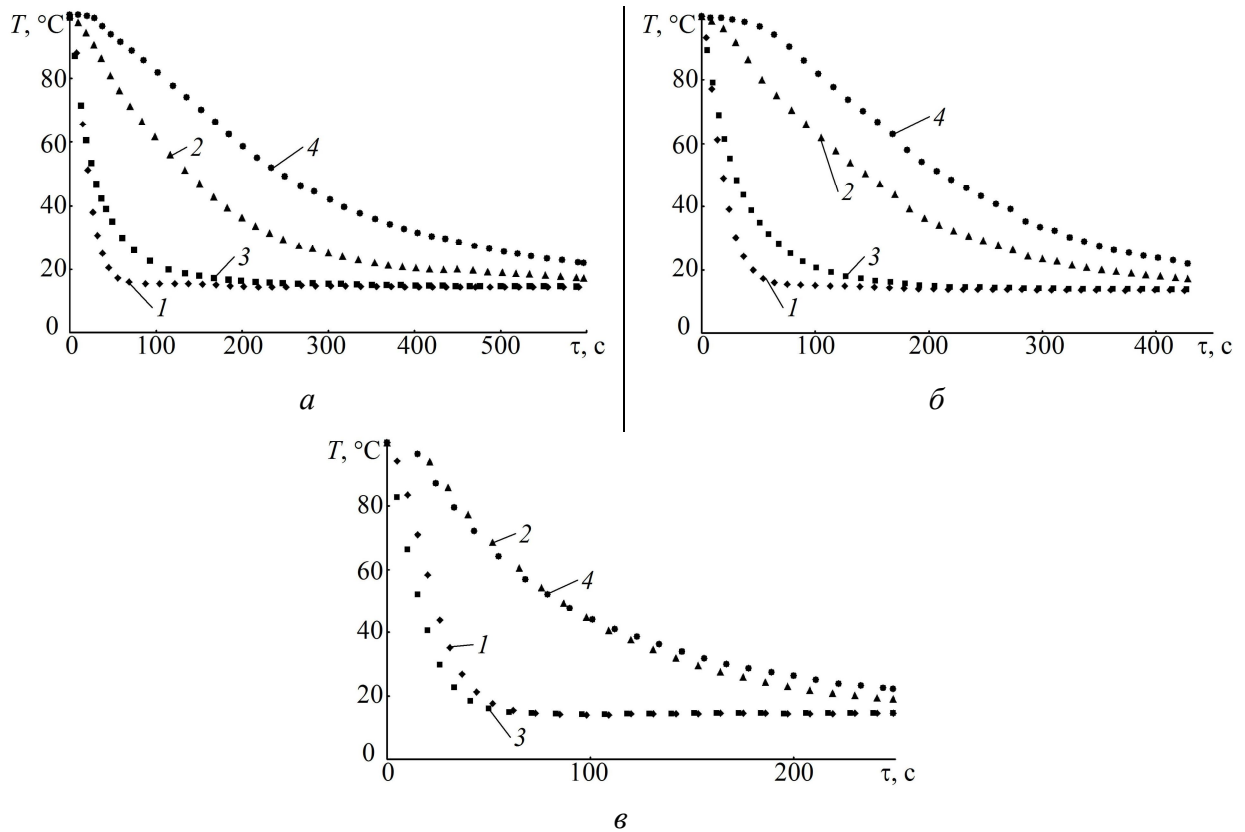


Рис. 3.4. Зміна температурних полів стінки гофрованої труби в часі за різних способів охолодження ( $D = 400$  мм): а – одностороннє; б – двостороннє, повітрям; в – двостороннє, повітряно-водяна суміш; 1–4 – номери термопар відповідно до рис. 2.7

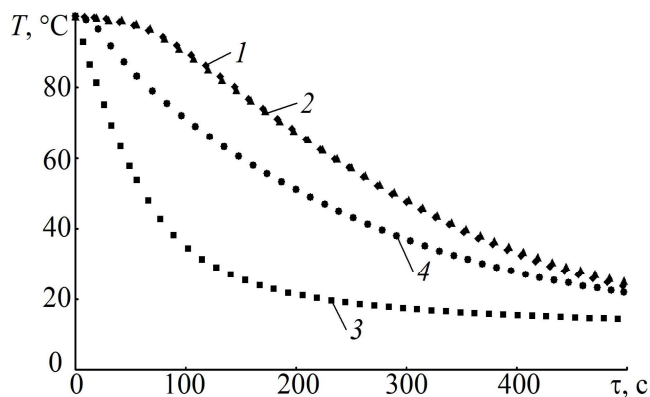


Рис. 3.5. Зміна температурних полів стінки гофрованої труби в часі за одностороннього внутрішнього (повітряно-водяна суміш) охолодження ( $D = 400$  мм): 1–4 – номери термопар відповідно до рис. 2.7

### 3.5.2. Дослідження дискретної системи охолодження гофрованих труб

Дослідження ефективності застосування дискретної системи охолодження проводилися на трубі ПЕ тип В- Р- U/SN8/DN/ID400/343/6000. Під час

дослідження температура охолодної води становила  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для обрахунку довжини зони охолодження відповідно до типорозміру досліджуваної труби швидкість її руху прийнято  $2\text{ м/хв}$  [132]. Охолодження здійснювали до досягнення температури  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  на внутрішній поверхні труби.

Під час неперервного охолодження труби час охолодження склав  $597\text{ с}$  (рис. 3.4, *a*). Упродовж першої хвилини процесу охолодження відбувається інтенсивне відведення теплоти від труби, після чого температура зовнішньої поверхні труби стає майже рівною температурі охолодної води. Інтенсивність подальшого охолодження обмежується параметрами стінки.

Для дослідження процесу охолодження з повітряними проміжками було змодельовано процес для типових охолодних ванн завдовжки  $6\text{ м}$  (рис. 3.6) і  $4\text{ м}$  кожна (рис. 3.7).

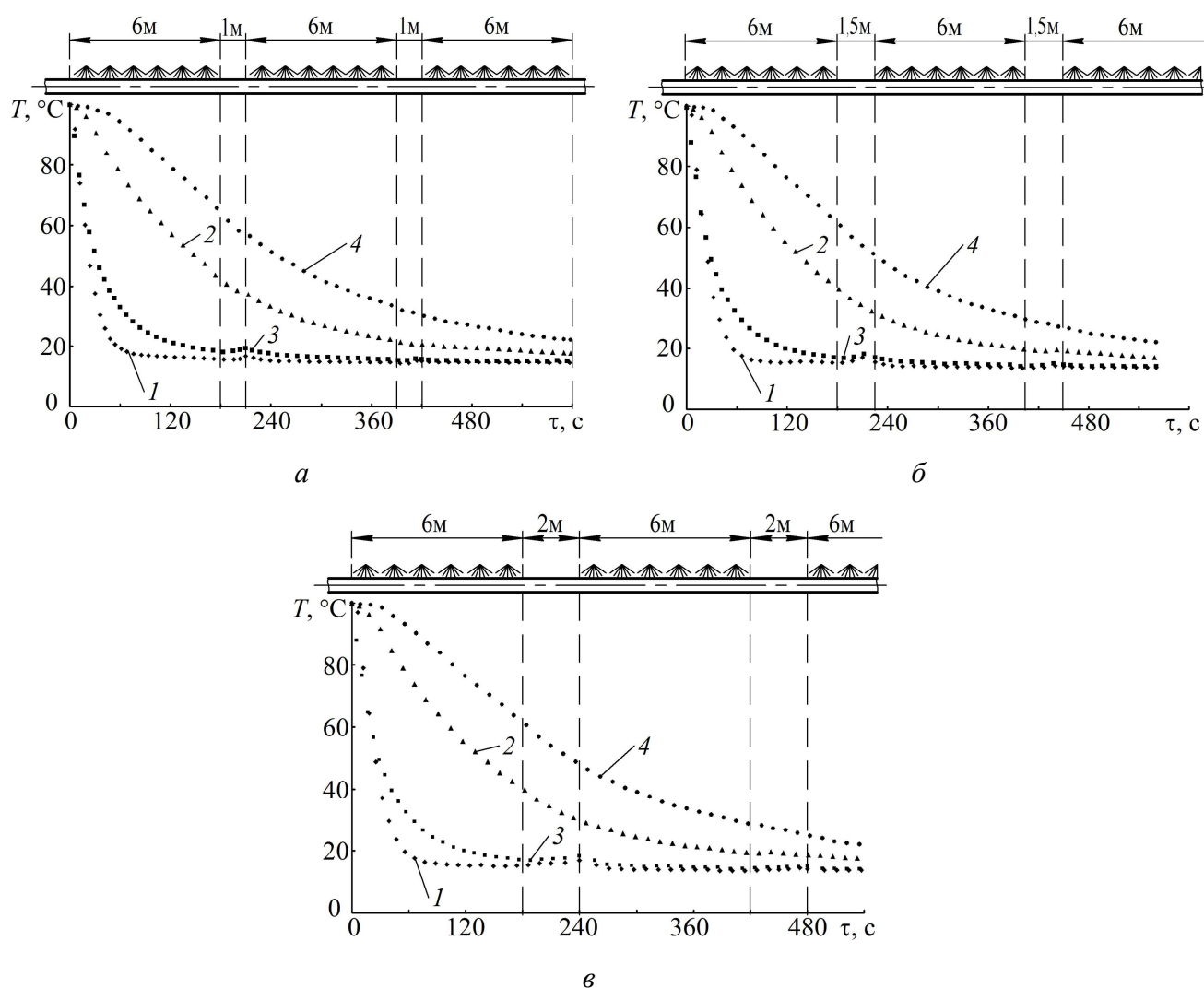


Рис. 3.6. Зміна температурних полів у часі (ділянки зрошення –  $6\text{ м}$ ):  
*a* – повітряні проміжки –  $1\text{ м}$ ; *б* – повітряні проміжки –  $1,5\text{ м}$ ;  
*в* – повітряні проміжки –  $2\text{ м}$ ; *1–4* – номери термопар відповідно до рис. 2.7 ( $D = 400\text{ мм}$ )

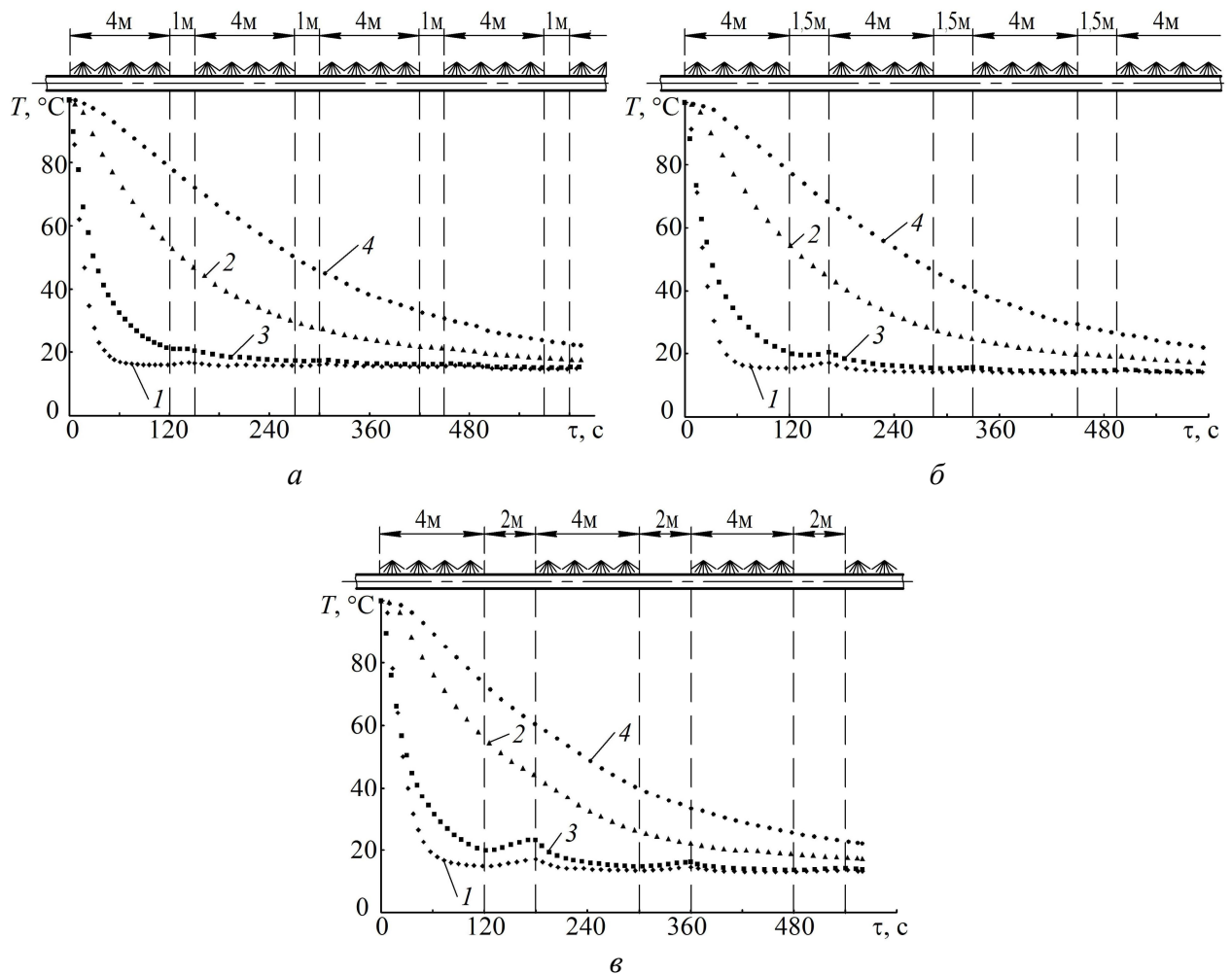


Рис. 3.7. Зміна температурних полів у часі (ділянки зрошення – 4 м) ( $D = 400$  мм):  
 а – повітряні проміжки – 1 м; б – повітряні проміжки – 1,5 м;  
 в – повітряні проміжки – 2 м; 1–4 – номери термопар відповідно до рис. 2.7

На повітряних ділянках відбувається прогрів зовнішньої поверхні труби за рахунок підведеної енергії від внутрішніх шарів. Відповідно, під час застосування більш довгих повітряних ділянок відбувається більш значне вирівнювання температури по товщині стінки, що сприяє підвищенню ефективності охолодження водою у кожній наступній ванні.

Під час застосування ванн завдовжки 4 м зменшення температурного градієнта на повітряних ділянках більш суттєве, що свідчить про більшу ефективність застосування дискретної системи з невеликими ділянками зрошення.

Для подальшого аналізу ефективності застосування дискретної системи охолодження були проведені аналогічні дослідження з ділянками зрошення завдовжки 2 м (рис. 3.8). У цьому разі зміна градієнта температури у стінці найбільш значна, а у випадку застосування повітряних проміжків завдовжки 2 м відбувається і деяке підвищення температури в зоні встановлення термопарі 3.

Під час застосування дискретної системи охолодження потрібний час і відповідно довжина зони охолодження не завжди можуть бути меншими порі-

вняно з неперервним зрошенням (рис. 3.9, а), однак витрати охолодної води у будь-якому випадку зменшуються (рис. 3.9, б).

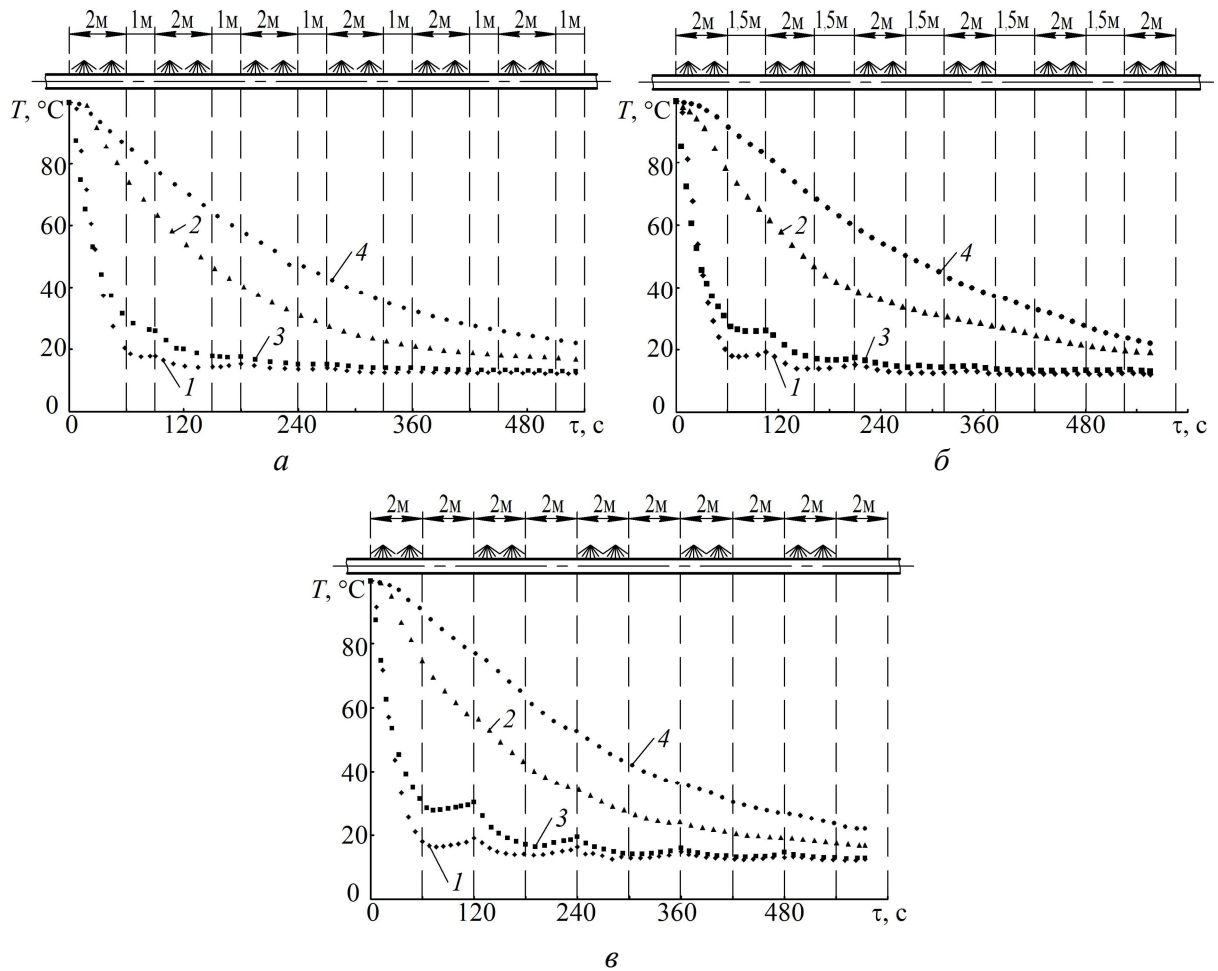


Рис. 3.8. Зміна температурних полів у часі (ділянки зрошення – 2 м) ( $D = 400$  мм):  
 а – повітряні проміжки – 1 м; б – повітряні проміжки – 1,5 м; в – повітряні проміжки – 2 м;  
 1–4 – номери термопар відповідно до рис. 2.7

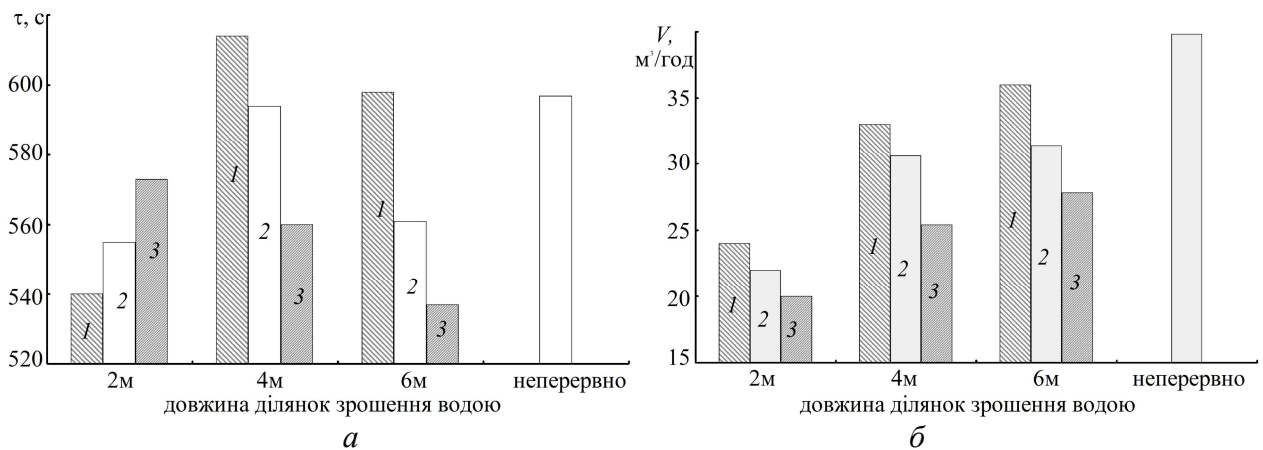


Рис. 3.9. Порівняння часу охолодження  $\tau$  (а) і об'ємної витрати води  $V$  (б) за різних схем охолодження ( $D = 400$  мм): 1 – повітряні проміжки – 1 м; 2 – повітряні проміжки – 1,5 м; 3 – повітряні проміжки – 2 м

Так, найменший час охолодження зафіксовано під час застосування схеми з двометровими ваннами та однометровими повітряними проміжками між ними (540 с), а також під час застосування схеми з ваннами завдовжки 6 м з повітряними проміжками завдовжки 2 м (537 с). Однак у другому випадку витрата охолодної води була на 3,8 м<sup>3</sup>/год більша, але при цьому порівняно з неперервним охолодженням витрата води менша на 12 м<sup>3</sup>/год.

Порівнюючи ефективність охолодження за різних схем дискретної системи охолодження з застосуванням типових ванн, можна сказати, що раціональне застосовувати ванни завдовжки 4 м. За таких схем час охолодження на 3–6 % більший, але при цьому витрати охолодної води менші на 3–9 %.

Під час застосування неперервного одностороннього охолодження у стінці труби постійно присутній значний градієнт температур, що призводить до заморожених залишкових напружень [92]. Під час охолодження в дискретній системі на повітряних ділянках температурний градієнт зменшується, що дає змогу напруженням у стінці поступово релаксувати, а отже дає і істотно зменшити залишкові напруження.

Як видно з рис. 3.9, найменший час охолодження відповідає дискретній системі з чергуванням повітряних і водяних ділянок завдовжки 6 і 2 м відповідно, а мінімальна витрата води – з чергуванням двометрових водяних і повітряних ділянок.

### 3.5.3. Дослідження двостороннього охолодження гладких труб

Час одностороннього охолодження труби ПЕ 80 SDR 11 – 63×5,8 технічна 12,5 бар від температури 100 °С до 20 °С склав 249 с (рис. 3.10). Проведені дослідження в першу чергу дали можливість оцінити ефективність застосування двостороннього охолодження. Так, за умови застосування повітря як «внутрішнього» холодоагенту час охолодження труби порівняно тільки із зовнішнім охолодженням скоротився на 12,5 % (рис. 3.11, а). При цьому об'ємна витрата повітря  $V$  становила 0,0261 м<sup>3</sup>/с, що забезпечило значення  $Re = 457$ .

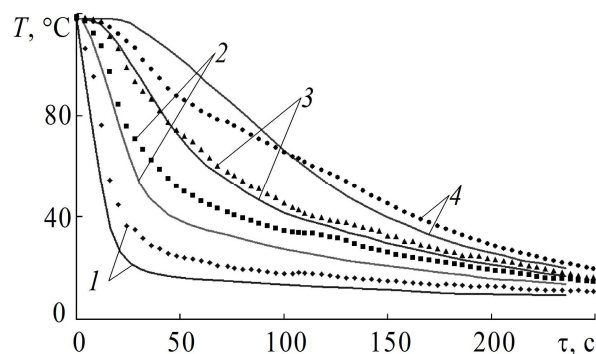


Рис. 3.10. Зміна температурних полів стінки гладкої труби в часі – одностороннє зовнішнє охолодження ( $D = 63$  мм): 1 – зовнішня поверхня; 2 – шар на глибині 2 мм; 3 – шар на глибині 4 мм; 4 – внутрішня поверхня; ■, ●, ◆, ▲ – експериментальні дані, — – теоретичні дані

Для встановлення доцільності інтенсифікації охолодження повітрям були проведенні додаткові дослідження із змінною об'ємною витратою повітря. При збільшенні витрати повітря до  $0,0497 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $Re = 870$ ) порівняно з одностороннім водяним охолодженням скорочення часу охолодження становило  $15,7\%$  (рис. 3.11, б), а збільшення до  $0,0806 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $Re = 1411$ ) –  $17,5\%$  (рис. 3.11, в).

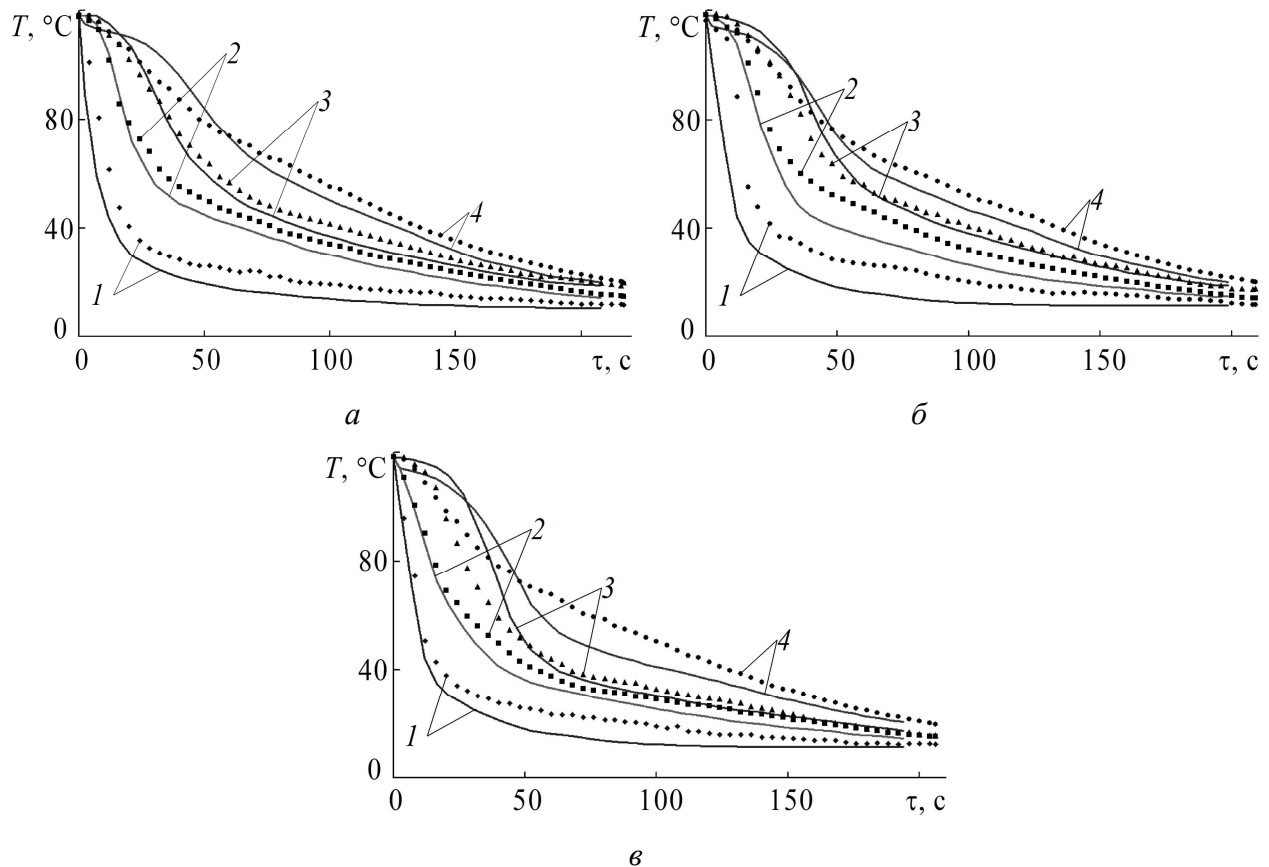


Рис. 3.11. Зміна температурних полів стінки гладкої труби в часі – двостороннє, повітрям ( $D = 63 \text{ мм}$ ): а –  $V = 0,0261 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Re = 457$ ; б –  $V = 0,0497 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Re = 870$ ; в –  $V = 0,0806 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Re = 1411$ ; 1 – зовнішня поверхня; 2 – шар на глибині 2 мм; 3 – шар на глибині 4 мм; 4 – внутрішня поверхня; ■, ●, ◆, ▲ – експериментальні дані, — – теоретичні дані

Застосування для внутрішнього охолодження холодоагентів, що забезпечують більший коефіцієнт тепловіддачі (повітряно-водяна суміш, вода) дало можливість підвищити ефективність застосування двостороннього охолодження. При відведенні теплоти повітряно-водяною сумішшю час охолодження скоротився на  $44\%$  (рис. 3.12, а), а при застосування води – на  $57\%$  (рис. 3.12, б). При цьому витрата води склала  $0,0875 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  і  $0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  відповідно.

Таким чином скорочення часу на  $22\%$  під час охолодження водою порівняно з охолодженням повітряно-водяною сумішшю потребує збільшення витрати води на  $300\%$ . Крім того, ефективність використання тільки води буде знижуватись при збільшенні діаметра охолоджуваної труби.

У використанні води при виробництві труб малого діаметра потреби немає, адже достатню інтенсивність відведення теплоти забезпечує охолодження лише зовнішньої поверхні стінки труби. При виробництві же труб великого діаметра зі значною товщиною стінки доцільність використання води втрачається в силу її надмірної витрати. Також при охолодженні водою різке двостороннє охолодження матеріалу стінки у в'язкоплинному стані може призвести до погіршення якості поверхні.

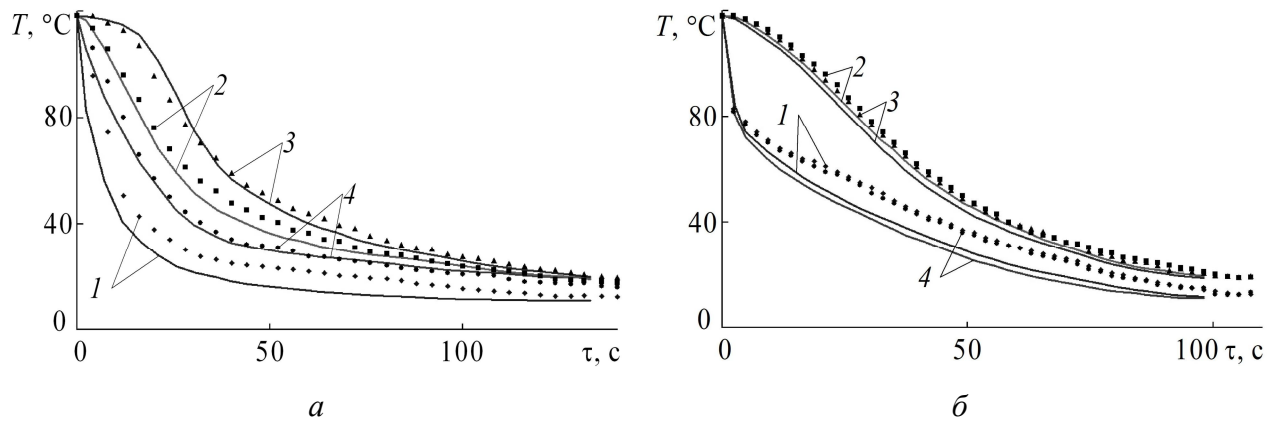


Рис. 3.12. Зміна температурних полів стінки гладкої труби в часі ( $D = 63$  мм):  
 а – повітряно-водяною сумішшю; б – водою; 1 – зовнішня поверхня;  
 2 – шар на глибині 2 мм; 3 – шар на глибині 4 мм; 4 – внутрішня поверхня;  
 ■, ●, ◆, ▲ – експериментальні дані, — – теоретичні дані

Отже, при використанні повітряно-водяної суміші значно доцільніше використовується вода. Знаходячись у дрібнодисперсному стані (туман) вода, швидко нагріваючись від стінки труби, переходить у пару у випадку температури поверхні більше за  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При фазовому переході води відбувається значне відведення теплоти з поверхні стінки, що значно інтенсифікує процес охолодження.

За температур нижче від  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  значна інтенсивність відведення теплоти забезпечується гідродинамічним фактором: на поверхні стінки утворюється водяна плівка, при цьому каплі безперервно збурюють цю плівку, вносячи у плівку нову масу охолодної води.

Проведені дослідження показали недоцільність інтенсифікації охолодження збільшенням витрати повітря (рис. 3.13). Так, при збільшенні витрати повітря майже у 4 рази вдалося скоротити час охолодження лише на 5%. Однак порівняно з використанням повітряно-водяної суміші спосіб охолодження з застосуванням повітря значно легше реалізувати конструктивно. Як і у випадку використання води, зі збільшенням діаметра труби ефективність відведення теплоти повітрям буде знижуватись.

Зі співставлення експериментальних і теоретичних значень зміни температури в часі на різних шарах стінки труби (рис. 3.10–3.12) видно, що мак-

симальне відхилення теоретичних температур від експериментальних склало приблизно 25 %, а максимальне відхилення часу охолодження – 8 %, що дає підставу зробити висновок про адекватність розробленої математичної моделі реальному процесу двостороннього охолодження полімерної труби.

Для кожного співставлення експериментальних та теоретичних даних процесу двостороннього охолодження гладкої труби визначено похибку вимірювання.

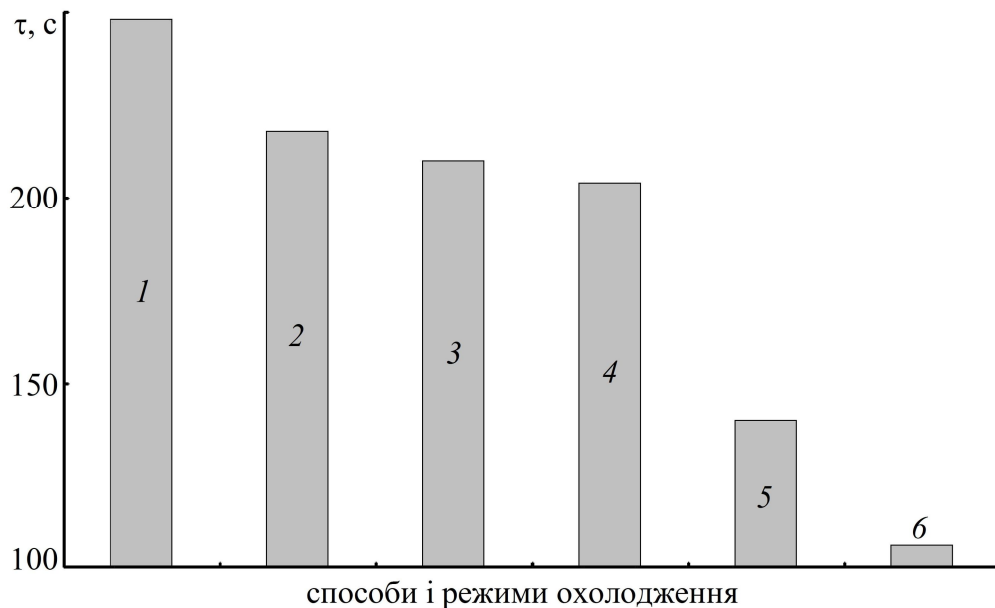


Рис. 3.13. Час охолодження труби за різних способів і режимів ( $D = 63 \text{ мм}$ ):  
1 – одностороннє; 2 – двостороннє, повітрям ( $V = 0,0261 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Re = 457$ );  
3 – двостороннє, повітрям ( $V = 0,0497 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Re = 870$ ); 4 – двостороннє, повітрям ( $V = 0,0806 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Re = 1411$ ); 5 – двостороннє, повітряно-водяна суміш; 6 – двостороннє, водою

Також були проведені дослідження двостороннього охолодження на трубі ПП-80 тип 3 (PPR) – клас 1/10 бар, S 2,5 –  $90 \times 15$  (рис. 3.13) від  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

У цьому випадку за використання повітря для внутрішнього охолодження час охолодження скоротився приблизно на 25 %, за використання повітряно-водяної суміші – 67 %. Це підтверджує, що ефективність застосування двостороннього охолодження зростає зі збільшенням як діаметра, так і товщини стінки охолоджуваної труби.

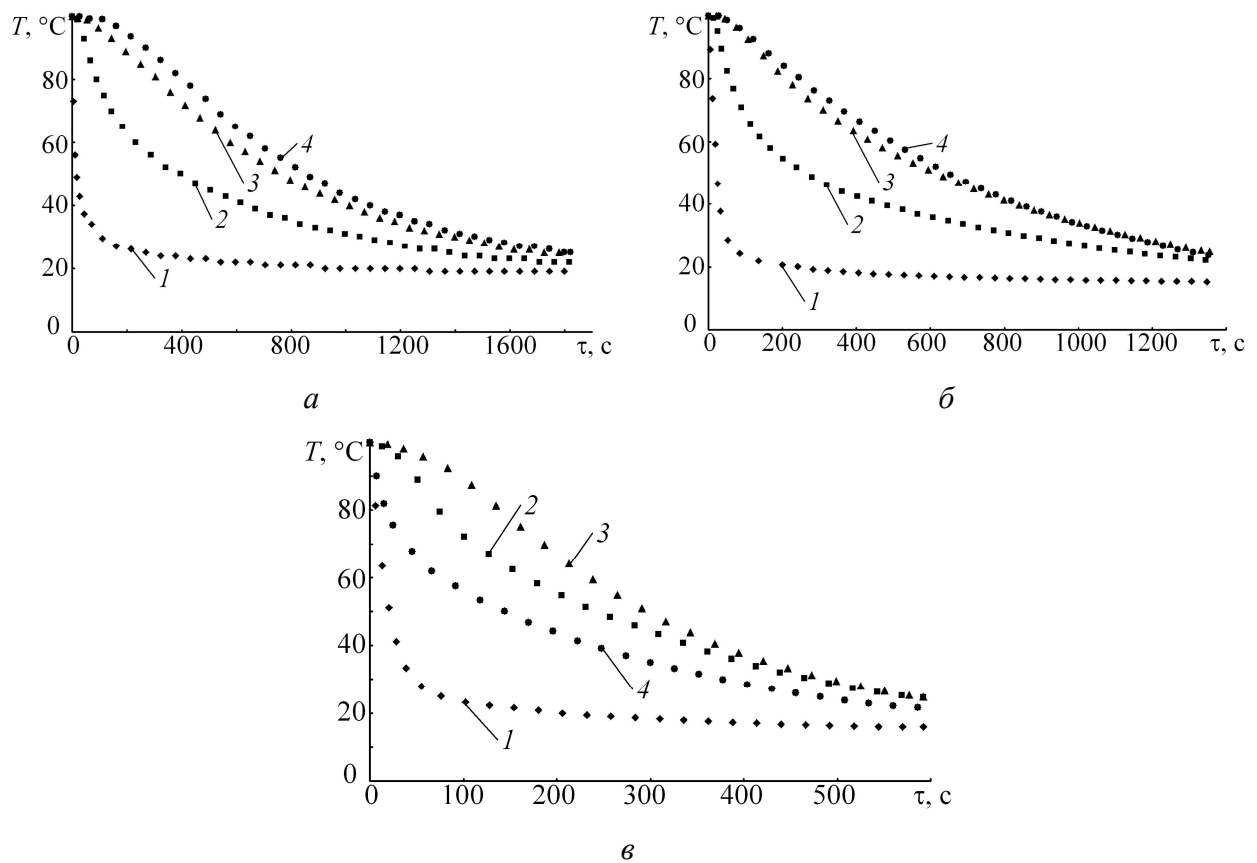


Рис. 3.14. Зміна температурних полів стінки гладкої труби в часі ( $D = 90$  мм): а – одностороннє; б – двостороннє, повітрям; в – двостороннє, повітряно-водяна суміш; 1–4 – номери термопар відповідно до рис. 3.15

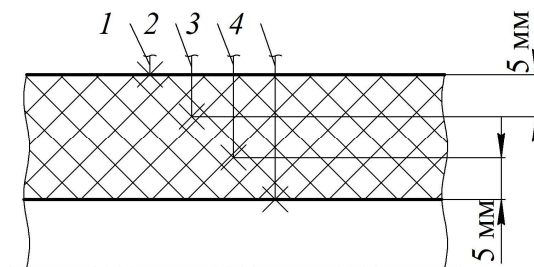


Рис. 3.15. Схема розміщення термопар ( $D = 90$  мм): 1–4 – номери термопар

### 3.5.4. Дослідження дискретної системи охолодження гладких труб

Дослідження ефективності застосування дискретної системи охолодження для гладких труб проводилися на трубі ПП-80 тип 3 (PPR) – клас 1/10 бар, S 2,5 – 90×15. Під час дослідження температура охолодної води становила 15 °С. Для обрахунку довжини зони охолодження відповідно до типорозміру досліджуваної труби швидкість її руху прийнято 1 м/хв [132]. Охолодження здійснювали до досягнення температури 35 °С на внутрішній поверхні труби.

Під час неперервного охолодження труби час охолодження склав 1821 с (рис. 3.14, *a*). За короткий час охолодження температура зовнішньої поверхні труби стає майже рівною температурі охолодної води. Інтенсивність подальшого охолодження обмежується параметрами стінки. Для дослідження процесу охолодження з повітряними проміжками було змодельовано процес для типових охолодних ванн завдовжки 6 м (рис. 3.16) і 4 м кожна (рис. 3.17). Під час застосування більш довгих повітряних ділянок ефективність охолодження водою у кожній наступній ванні збільшується. Для подальшого аналізу ефективності застосування дискретної системи охолодження були проведені дослідження з ділянками зрошення завдовжки 2 м (рис. 3.18).

На відміну від гофрованих труб застосування дискретної системи охолодження під час виготовлення гладких труб забудь-якої схеми дає змогу скоротити як і час охолодження (рис. 3.19, *a*), так і зменшити витрати охолодної води (рис. 3.19, *б*) порівняно з неперервним зрошенням.

Найменший час охолодження зафіксовано під час застосування схеми з чотириметровими ваннами та однометровими повітряними проміжками між ними (1314 с). При цьому найменша витрата води склала  $26 \text{ м}^3/\text{год}$  за охолодження у двометрових ваннах з двометровими повітряними проміжками.

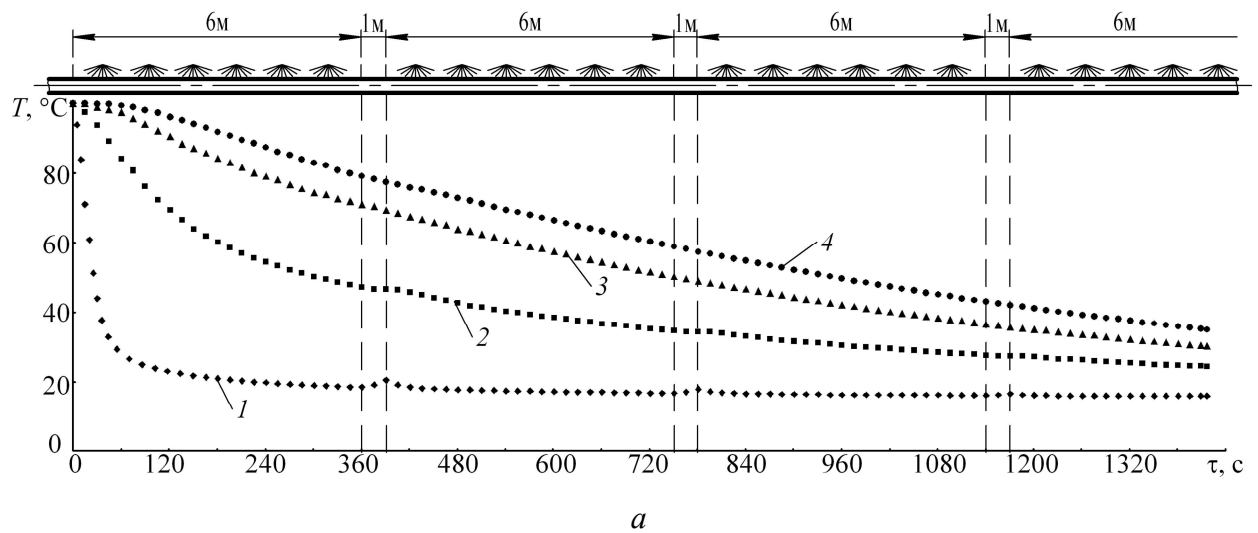
### 3.6. Висновки

Під час виготовлення екструдованих полімерних труб умови охолодження вздовж системи охолодження незмінні – температура та витрата охолодної води постійні на кожній ділянці водяного охолодження. Під час цих досліджень умови охолодження також залишали постійними в часі відповідно до кожного реалізованого способу процесу. Це свідчить про адекватність проведених експериментальних досліджень.

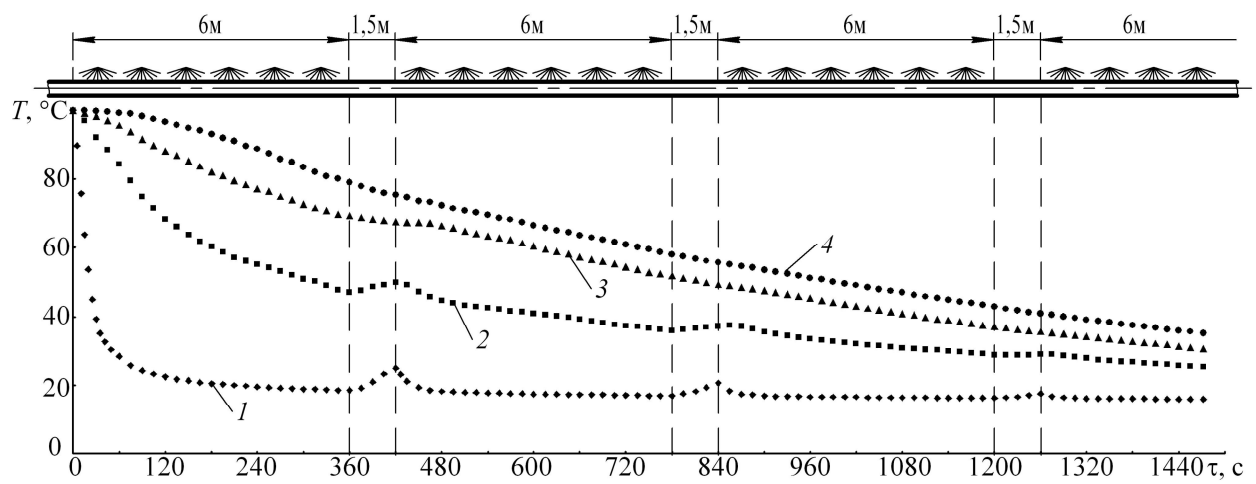
Порівняння експериментальних даних із результатами математичного моделювання, отриманих під час охолодження труб за її температур менше ніж  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , очевидно підтверджують адекватність розроблених математичних моделей, а отже це підтверджує і якісне врахування умов охолодження і зміну теплофізичних властивостей від температури. При цьому можна вважати, що моделі адекватні і при температурах труби більше за  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , адже умови охолодження незмінні по довжині всієї системи охолодження і відомі теплофізичні властивості матеріалу при температурах труби більше за  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Відповідно до проведених досліджень можна зробити такі висновки:

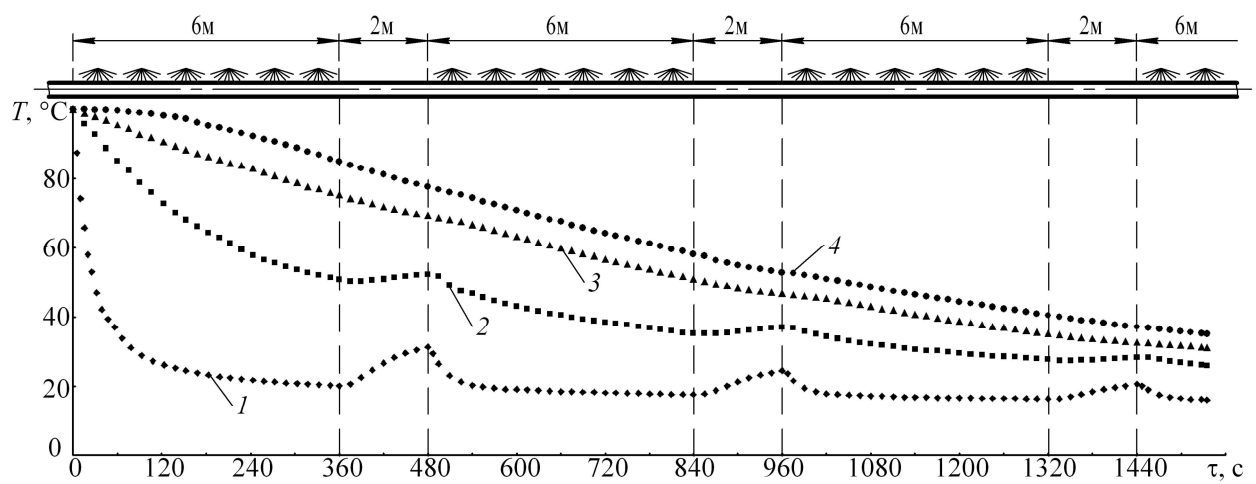
1. Експериментально досліджено двостороннє охолодження двошарових гофрованих полімерних труб. Доведено доцільність застосування такого охолодження. Підтвердження адекватності розроблених математичних моделей. Відхилення результатів розрахунків та експериментів для різних умов процесів не перевищує 7–25 %.



*a*



*б*



*в*

Рис. 3.16. Зміна температурних полів в часі, ділянки зрошення – 6 м ( $D = 90$  мм):  
*a* – повітряні проміжки – 1 м; *б* – повітряні проміжки – 1,5 м;  
*в* – повітряні проміжки – 2 м; 1–4 – номери термопар відповідно до рис. 3.15

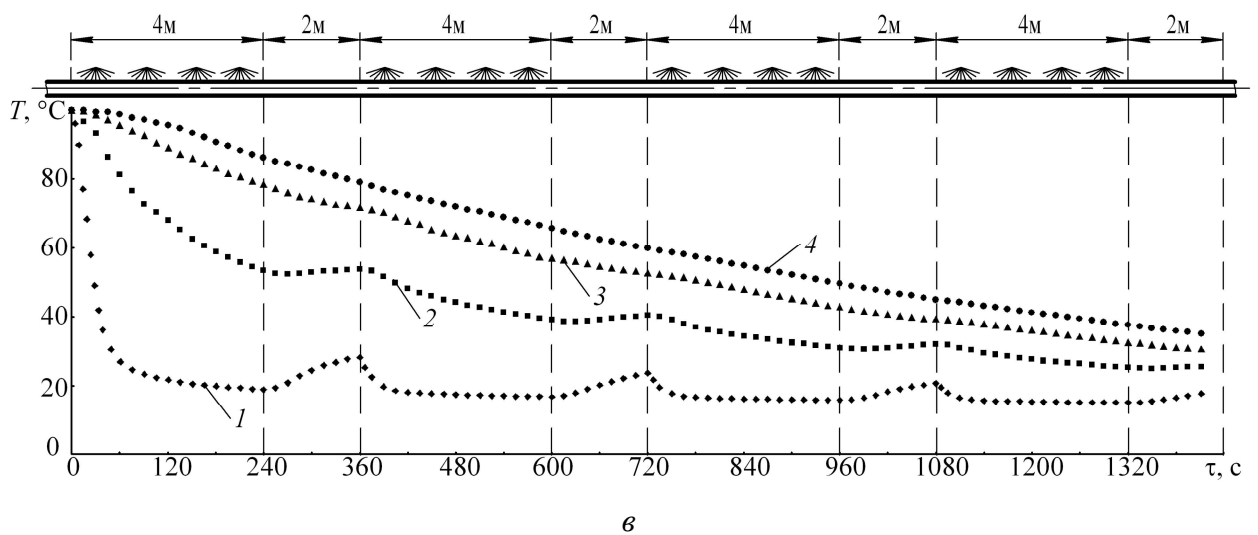
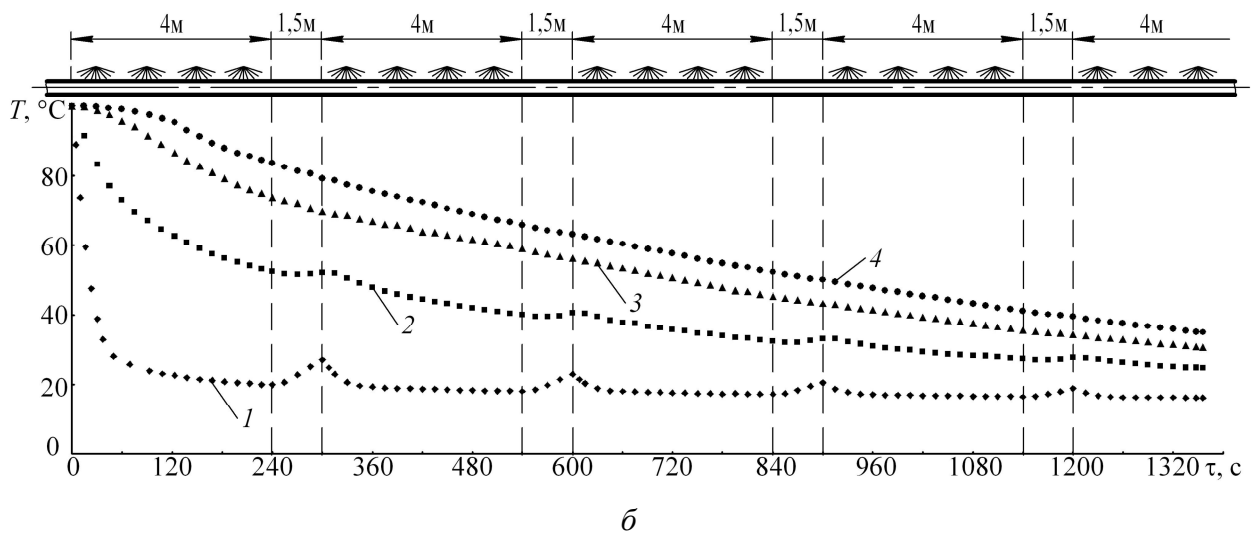
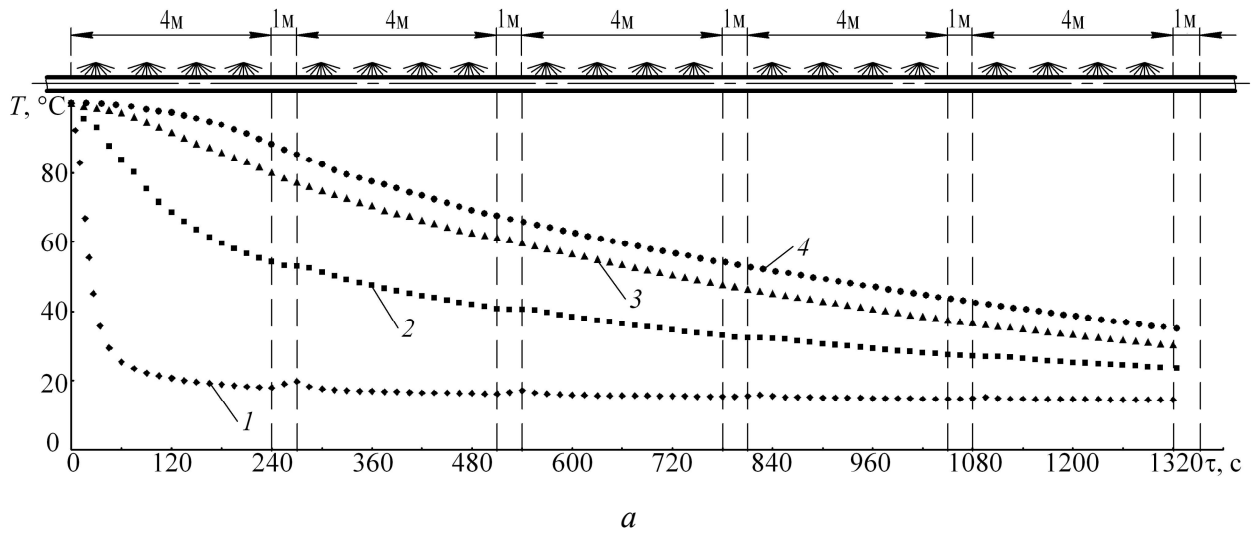


Рис. 3.17. Зміна температурних полів в часі, ділянки зрошення – 4 м ( $D = 90$  мм):  
 а – повітряні проміжки – 1 м; б – повітряні проміжки – 1,5 м;  
 в – повітряні проміжки – 2 м; 1–4 – номери термопар відповідно до рис. 3.15

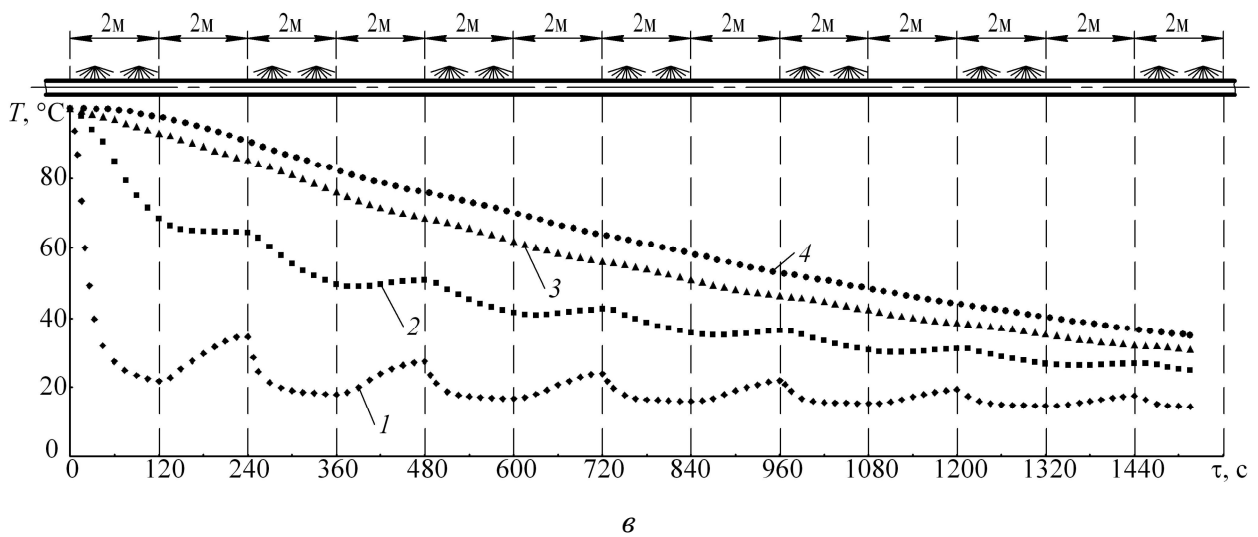
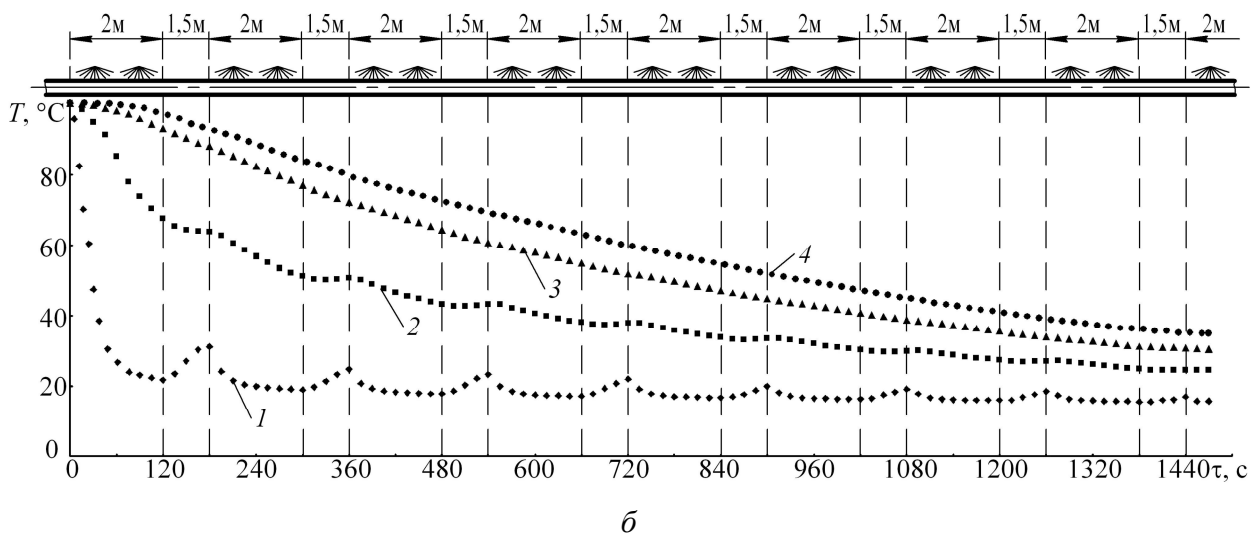
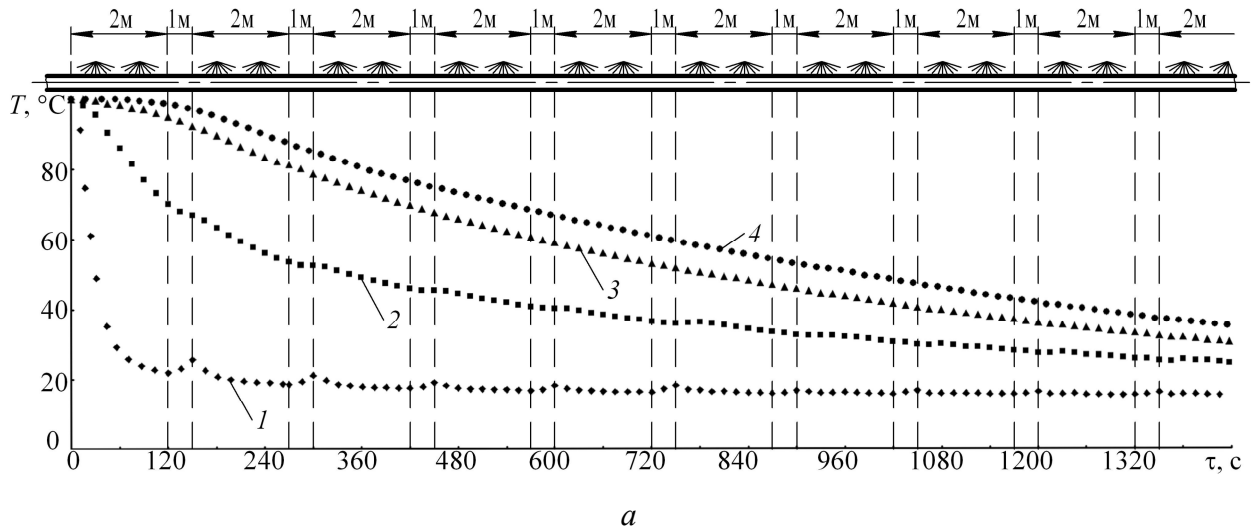


Рис. 3.18. Зміна температурних полів в часі, ділянки зрошення – 2 м ( $D = 90$  мм):  
 а – повітряні проміжки – 1 м; б – повітряні проміжки – 1,5 м;  
 в – повітряні проміжки – 2 м; 1–4 – номери термопар відповідно до рис. 3.15

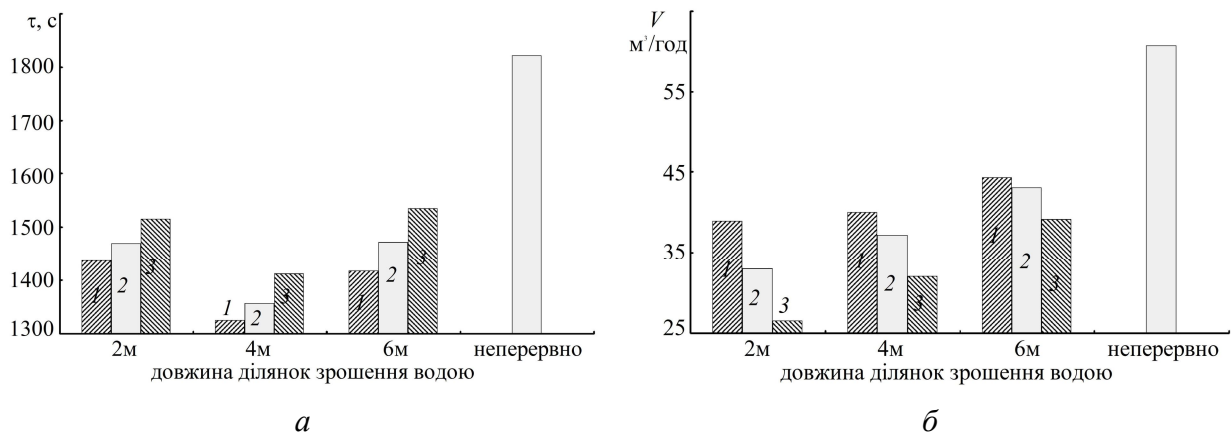


Рис. 3.19. Порівняння часу охолодження (а) і необхідної витрати води (б) за різних схем охолодження ( $D = 90$  мм): 1 – повітряні проміжки – 1 м; 2 – повітряні проміжки – 1,5 м; 3 – повітряні проміжки – 2 м

2. Експериментально встановлено, що використання води для відведення теплоти з обох поверхонь труби є недоцільним внаслідок надмірної витрати води і погіршення якості труби. При інтенсивному двосторонньому охолодженні полімер внутрішніх шарів не встигає релаксувати, як наслідок у стінці утворюються заморожені залишкові напруження. Тому слід здійснювати охолодження внутрішньої поверхні після зони калібрування.

3. Встановлено, що використання повітря забезпечує найменше скорочення часу охолодження. При цьому інтенсифікувати охолодження збільшенням витрати повітря недоцільно. Застосування повітря для охолодження внутрішньої поверхні гофрованих труб більш ефективне ніж для гладких труб, що обумовлено особливостями конструкції стінки гофрованих труб.

4. Майже у два рази вдалося інтенсифікувати охолодження при застосуванні повітряно-водної суміші. При цьому витрати охолодної води порівняно з використанням лише води для охолодження внутрішньої поверхні зменшуються втричі.

5. Порівняння експериментальних і теоретичних даних процесів охолодження гладких та гофрованих полімерних труб підтверджує їх достатню збіжність, а отже і адекватність розроблених математичних моделей охолодження.

6. Експериментально досліджено можливість раціоналізації охолодження полімерних труб, застосуванням дискретної системи охолодження. Встановлено, що застосування такої системи дає змогу скоротити витрати охолодної води майже на 50 % і зменшити довжину зони охолодження на 10 % у випадку охолодження гофрованих полімерних труб, у випадку гладких труб – на 47 % і 22 %, відповідно.

## **4. РОЗРОБЛЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ**

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволили розробити ряд нових енергоефективних способів і зразків обладнання, новизна яких підтверджена патентами України на корисні моделі.

### **4.1. Способи охолодження полімерних труб**

**4.1.1.** Під час виробництва полімерних труб обмеженою стадією технологічного процесу є процес їх охолодження від температури формування до температури в зоні приймального пристрою. Про значення процесу охолодження на якість виробу можна зробити висновок, беручи до уваги, що довжина такої ділянки охолодження може досягати десятків метрів [15]. Так, відомий спосіб охолодження екструдованої полімерної труби, що включає охолодження зовнішньої її поверхні [13]. Зазначений спосіб забезпечує задовільне охолодження лише тонкостінних труб, у разі же екструдовання товстостінних труб (особливо зі значною швидкістю) стає майже непридатним.

Спосіб охолодження екструдованої полімерної труби [21] включає охолодження зовнішньої і внутрішньої її поверхонь, при цьому охолодження внутрішньої поверхні труби здійснюють потоком повітря від вільного кінця труби назустріч напрямку екструзії. Цей спосіб дозволяє суттєво інтенсифікувати процес охолодження і позитивно впливає на якість внутрішньої поверхні труб. У той же час зазначений спосіб достатньо ефективний лише для труб невеликого діаметра, оскільки для забезпечення ефективного обдування внутрішньої поверхні труби повітрям необхідне використання потужного вентилятора. Це призводить до надмірних витрат енергії.

Якщо ж у випадку здійснення внутрішнього охолодження потоком повітря, що рухається від вільного кінця екструдованої труби, розмістити в середині труби елементи, що підвищуватимуть швидкість руху охолодного повітря (рис. 4.1), то відбуватиметься суттєва інтенсифікація охолодження внутрішньої поверхні труби.

Забезпечення щонайменше на одній ділянці внутрішньої поверхні труби прискореного руху повітря за постійної витрати цього повітря інтенсифікує процес охолодження або за постійної інтенсивності процесу охолодження зменшує витрату зазначеного повітря.

Використання як вторинного теплоносія повітря, одержаного після охолодження внутрішньої поверхні полімерної труби, дозволяє використати його для теплового оброблення (підігрівання, осушування) інших матеріалів і середовищ, за рахунок чого зменшує енергоємність виготовлення труб.

У результаті проведених досліджень встановлено, що під час одностороннього зовнішнього охолодження з поліетилену високої густини діаметром

110 мм і товщиною стінки 12,3 мм необхідна довжина охолодження складала 24 м. Під час двостороннього охолодження зазначеної труби довжина ділянки охолодження складала 16 м, а у випадку здійснення прискорення руху охолодженого повітря на одній привело до скорочення ділянки охолодження ще на 1,5 м. Здійснивши прискорення охолодженого повітря на трьох ділянках довжина системи охолодження складала 12 м.

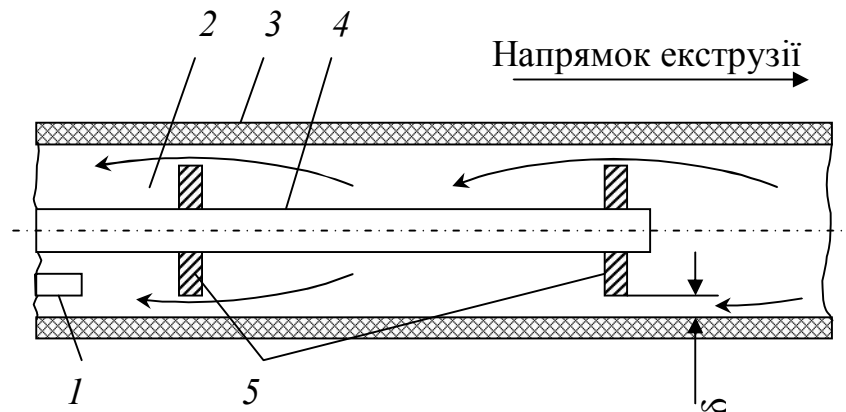


Рис. 4.1. Спосіб інтенсифікації внутрішнього охолодження труб:  
 1 – патрубок для відведення повітря крізь трубну головку;  
 2 – внутрішній простір труби; 3 – труба; 4 – тримач; 5 – насадки

У той же час повітря, що потрапляє всередину полімерної труби, може захоплювати пил, бруд, а також частинки полімеру, утворювані під час поперечного відрізання мірних кусків труб, які осаджуються на розігрітій внутрішній поверхні труби. Внаслідок міцного зчеплення зазначених частинок твердої фази з матеріалом труби якість її внутрішньої поверхні погіршується. Уникнути цього можна фільтруючи повітря після його потраплення в порожнину полімерної труби (рис. 4.2).

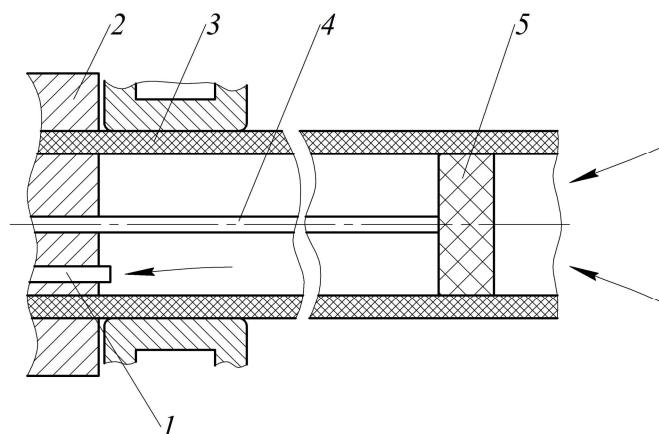


Рис. 4.2. Схема очищення охолодженого повітря для внутрішнього охолодження:  
 1 – патрубок для відведення повітря крізь трубну головку; 2 – трубна головка;  
 3 – труба; 4 – тримач; 5 – фільтр

Фільтрування повітря, призначеного для охолодження внутрішньої поверхні полімерної труби, після його потрапляння в порожнину полімерної труби сприяє видаленню з повітря твердих дисперсних частинок і запобігає забрудненню зазначеної поверхні труби. Таким чином підвищується якість одержуваної екструдованої труби.

Запропоновані технічне рішення захищене патентами України на корисні моделі № 40269, 41529 [133, 134] і впроваджено у ПАТ «НВП “Більшовик”» та Філії «Наукового центру» Концерну «Техвоєнсервіс» (м. Київ).

**4.1.2.** Здійснюючи двостороннє охолодження екструдованих полімерних труб можна досягти значного скорочення довжини зони охолодження [135, 136]. Одним з шляхів охолодження внутрішньої поверхні труб є застосування охолодного повітря, що рухається від вільного кінця труби до трубної головки [133]. Також можливе охолодження внутрішньої поверхні з використанням повітряно-водяної суміші, що значно інтенсифікує охолодження порівняно з застосуванням повітря [137]. За таких умов у стінці гладкої полімерної труби можуть утворюватися значні градієнти температур. У випадку, коли полімер вже перейшов у тверду фазу, такі умови не значно впливають на властивості труб. Однак в зоні калібрування, коли полімер на внутрішніх шарах ще перебуває у в'язкоплинному стані, інтенсивне двостороннє охолодження труби може призвести до передчасного твердіння внутрішніх шарів стінки труби і появи різноманітних дефектів, зокрема у вигляді гофр, напливів, а також призводити до утворення значних залишкових напружень у стінці.

У результаті проведених досліджень запропоновано здійснювати інтенсивне охолодження внутрішньої поверхні труби після калібрувального пристрою (рис. 4.3).

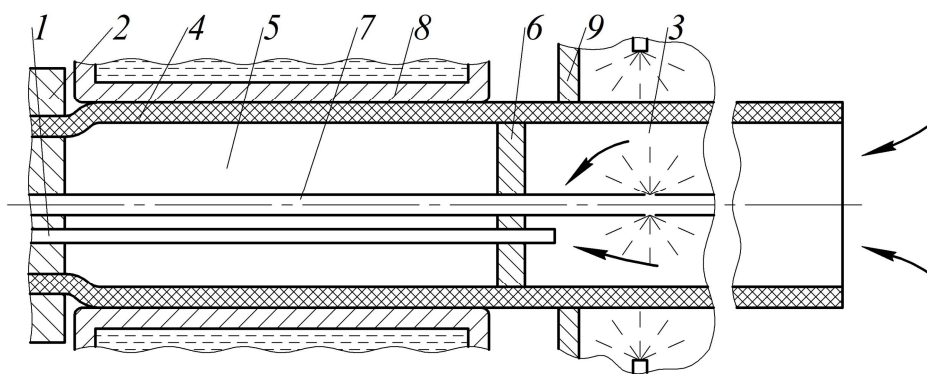


Рис. 4.3. Схема внутрішнього охолодження: 1 – патрубок для відведення повітря крізь трубну головку; 2 – трубна головка; 3 – внутрішній простір труби; 4 – внутрішня поверхня труби; 5 – внутрішня поверхня труби на ділянці калібрування; 6 – перегородка; 7 – трубка; 8 – калібрувальний пристрій; 9 – ванна

Запропоноване технічне рішення захищене патентом України на корисну модель № 47245 [138] і впроваджено в Товаристві з обмеженою відповідальністю «НВП „Пластотехніка”».

## 4.2. Обладнання для охолодження полімерних труб

**4.2.1.** Під час виготовлення екструдованих полімерних труб можна значно інтенсифікувати процес застосовуючи двостороннє охолодження трубної заготовки [135, 136]. У працях [21, 133–138] внутрішнє охолодження запропоновано за допомогою повітря або повітряно-водяної суміші. В обох випадках виникає потреба у відведенні відпрацьованого холодоагенту крізь трубну головку. При цьому для підведення охолодної води у внутрішній простір труби у трубній головці змонтовано трубчастий елемент, а також виконано канал для відведення нагрітого холодоагенту, при цьому зазначені трубчастий елемент та канал рознесені в об'ємі трубної головки один від одного.

Внаслідок окремого розміщення трубчастого елемента для подавання охолодної води та каналу для відведення відпрацьованого холодоагенту призводить до нерівномірного температурного поля трубної головки, а отже і зниження якості готової полімерної труби.

У випадку розміщення трубчастого елемента для подавання охолодної води усередині каналу для відведення нагрітого холодоагенту нагріта в результаті охолодження внутрішньої поверхні сформованої полімерної труби повітряно-водяна суміш рухається навколо трубчастого елемента (рис. 4.4).

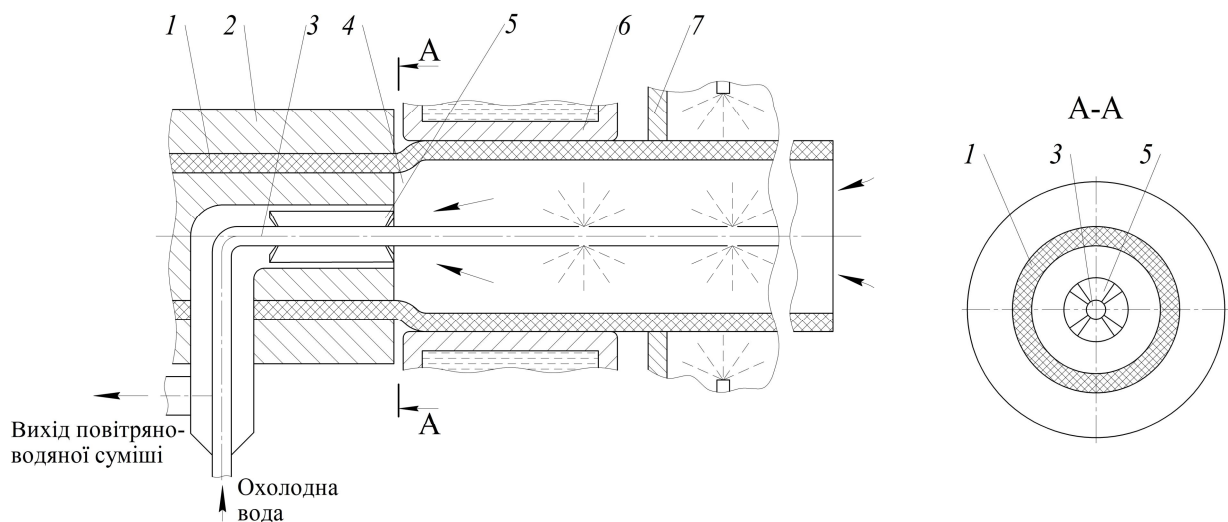


Рис. 4.4. Схема пристрою безперервного формування полімерних труб: 1 – труба; 2 – трубна головка; 3 – трубчастий елемент; 4 – внутрішній простір труби; 5 – канал; 6 – калібрувальний пристрій; 7 – ванна

Таке виконання перешкоджає охолодженню охолодною водою трубної головки і запобігає передчасному охолодженню полімеру в каналах трубної

головки. Коаксіальне розміщення зазначених каналу та трубчастого елемента забезпечує утворення рівномірного температурного поля екструзійної головки, що сприяє одержанню полімерної труби високої якості.

Запропоноване технічне рішення захищене патентом України на корисну модель № 49468 [139].

**4.2.2.** Для охолодження полімерних труб широкого поширення набули ванни, у яких труба охолоджується за умов вільної конвекції в шарі води [140, 141]. Однак під час охолодження труб великого діаметра на трубу діють значні виштовхувальні зусилля, а під час виготовлення гофрованих труб між гофрами утворюються застійні зони. Крім того проходячи крізь шар води труба тягне за собою певний шар рідини, швидкість якого змінюється від максимальної на поверхні виробу до нуля на деякій відстані (примежовий шар). Зазначений примежовий шар погіршує умови теплообміну [142, 143]. Тому все більшого поширення набувають ванни, у яких охолодження здійснюють зрошенням води на зовнішню поверхню труби [86, 144–146], що дає змогу уникнути складнощів притаманних ваннам занурення і забезпечує достатню інтенсивність охолодження. Однак конструкція зрошувальних ванн не забезпечує ефективного використання холодоагенту під час переходу пристрою на охолодження труби іншого діаметра. Наприклад, під час зменшення діаметра труби частина факелів холодоагенту, що виходить з розпилювачів, проходить повз трубу, що спричинює нераціональне використання холодоагенту.

Якщо забезпечити ефективне потрапляння факелу розпилюваного холодоагенту безпосередньо на поверхню охолоджуваної труби незалежно від її діаметра, то вдасться заощаджувати значну кількість холодоагенту, забезпечуючи необхідну інтенсивність охолодження. Тому доцільно кожний розпилювач встановлювати з можливістю переміщення в радіальному напрямі горизонтальної ванни (Рис. 4.5).

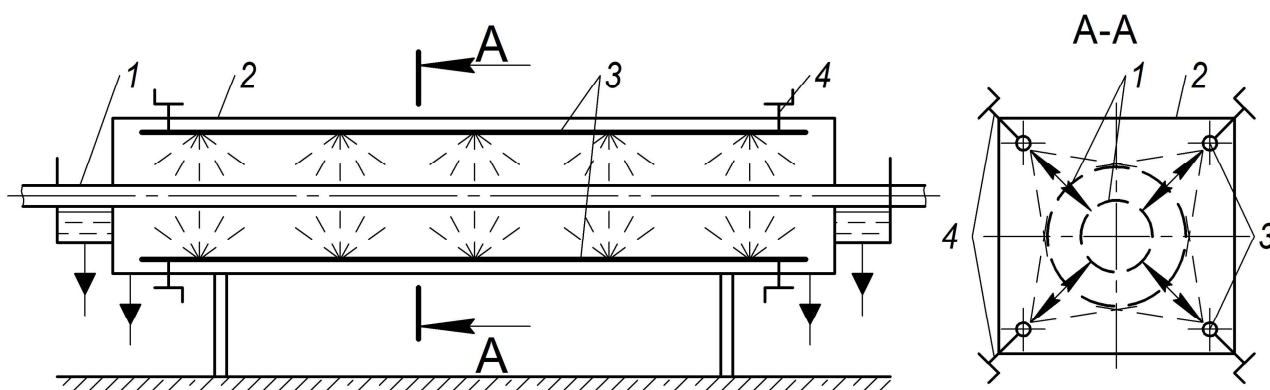


Рис. 4.5. Схема охолодної ванни: а – повздовжній переріз ванни; б – поперечний переріз ванни; 1 – труба; 2 – ванна; 3 – розпилювачі; 4 – урухомники

Під час охолодження труби максимально можливого для пристрою певного типорозміру діаметра розпилювачі рідкого холодоагенту розміщують на максимальній відстані від поздовжньої осі ванни. При цьому забезпечується потрапляння факелів холодоагенту, що виходять із сопел розпилювачів, на поверхню труби, а отже і ефективне її охолодження. У разі переходу екструзійної лінії на випуск труби меншого діаметра розпилювачі переміщують у радіальному напрямі горизонтальної ванни, тобто ближче до її поздовжньої осі, а отже і поверхні охолоджуваної труби. При цьому весь холодоагент, що виходить із сопел розпилювачів, потрапляє на поверхню труби, ефективно її охолоджуючи.

Спорядження же кожного розпилювача двома урухомниками переміщення, рознесеними по його довжині (рис. 4.5. в), забезпечує можливість їх розташування під кутом до труби, а отже і можливість регулювання інтенсивності охолодження труби по її довжині (наприклад, менш інтенсивне на вході труби у ванну і більш інтенсивне на виході із неї труби; для цього розпилювачі розміщують на більшій відстані від труби на початку ванни і на меншій – у її кінці).

Запропоноване технічне рішення захищене патентом України на корисну модель № 53879 [87] і впроваджено у ПАТ «НВП “Більшовик”» та Філії «Наукового центру» Концерну «Техвоєнсервіс» (м. Київ).

**4.2.3.** У випадку виготовлення труб невеликого діаметра ( $D < 50$  мм) процес охолодження у ваннах здійснюють за умови вільної конвекції зануренням труби у шар охолодної води. Однак, за такого процесу екструдованою трубою захоплюється пристінний шар охолодної води, який поступово прогрівається і, рухаючись разом з трубою, сповільнює процес охолодження. Для руйнування пристінного шару, а отже і збільшення коефіцієнта тепловіддачі, запропоновано або пропускати крізь шар охолодної води бульбашки чи струминки повітря (рис. 4.6) [147].

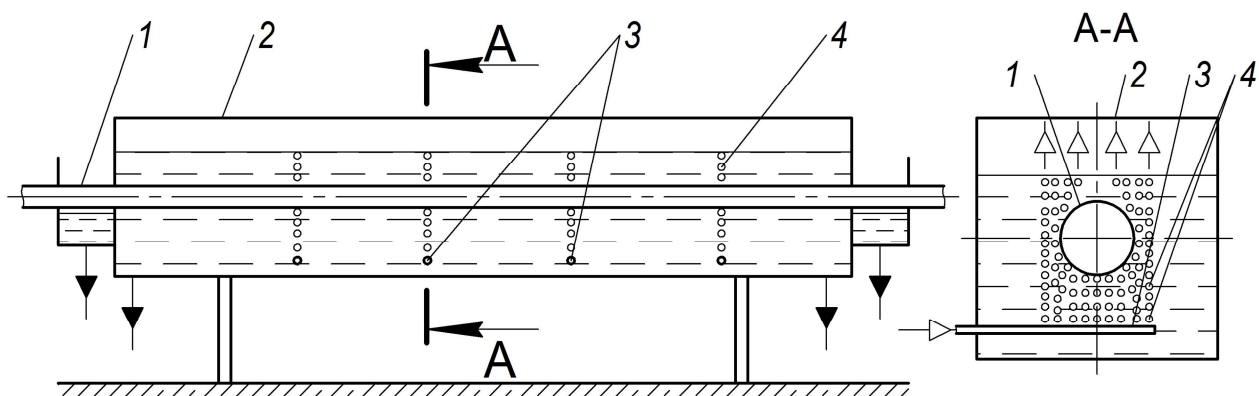
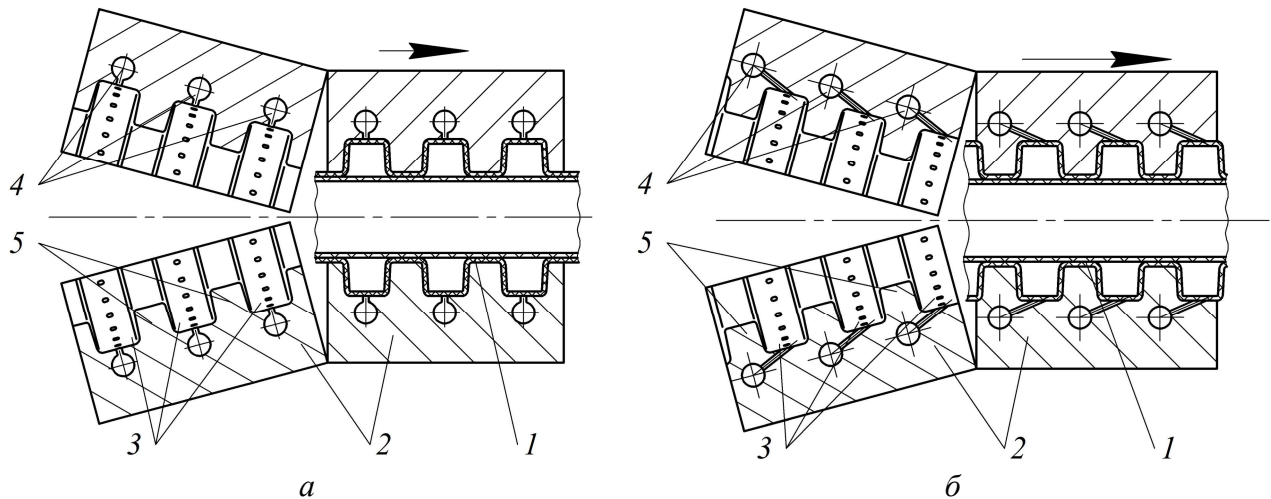


Рис. 4.6. Схема руйнування пристінного шару: 1 – труба, 2 – ванна, 3 – барботери, 4 – бульбашкова завіса

**4.2.4.** Формування і калібрування гофрів на зовнішньому шарі гофрованих труб здійснюють у гофраторах, основними робочими елементами яких є півформи [66]. Для формування гофрів кільцеві канавки на півформах з'єднані з вакуум каналами, які розташовані безпосередньо над цими впадинами [66, 148–150] (рис. 4.7 *a*). При цьому по цих каналах також рухається охолодна рідина.



*Рис. 4.7.* Повздовжній перетин півформи гофратора: *a* – з вакуумканалами над кільцевими канавками; *б* – з вакуумканалами над виступами, утвореними кільцевими канавками; 1 – труба; 2 – півформа; 3 – кільцеві канавки; 4 – кільцеві вакуумканали; 5 – виступи, утворені кільцевими канавками

Проте зазначена конструкція півформи в разі утворення гофрів на трубах великого діаметра (зазвичай понад 400 мм) внаслідок розміщення кільцевих вакуумканалів безпосередньо над кільцевими канавками не забезпечує рівномірного температурного поля на робочій (внутрішній) поверхні корпусу півформи, що знижує експлуатаційні властивості не тільки зовнішнього гофрованого шару труби, а й всієї труби в цілому.

Проведенні дослідження показали, що у випадку розміщення кільцевих вакуум каналів над виступами, утвореними кільцевими канавками (рис. 4.7 *б*), термічний опір між кільцевими вакуумканалами і різними ділянками робочої (внутрішньої) поверхні корпусу півформи вирівнюється, а отже вирівнюється температурне поле на робочій (внутрішній) поверхні корпусу півформи, яка забезпечує не тільки формоутворення гофрів, а й попереднє охолодження труби, а отже структуру затверділого полімеру і його властивості.

Запропоноване технічне рішення захищене патентом України на корисну модель № 61574 [151].

**4.2.5.** Двостороннє охолодження потребує значної витрати охолодної води, в першу чергу для охолодження зовнішньої поверхні труби. Тому під час виготовлення двошарових гофрованих труб запропоновано здійснювати

охолодження зовнішньої поверхні труби повітрям за умов вільної або вимушеної конвекції, а її внутрішньої поверхні – повітряно-водяною сумішшю, розпилюваною в порожнині труби (рис. 4.8) [152].

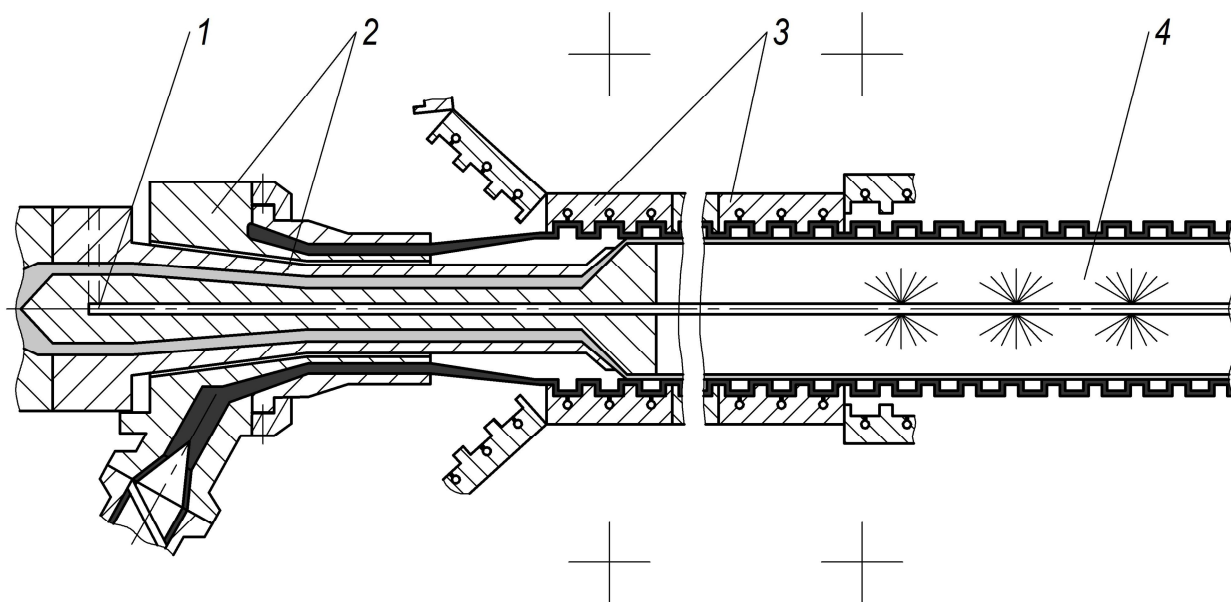


Рис. 4.8. Схема двостороннього охолодження двошарових гофрованих труб:  
1 – канал підведення охолодної води, 2 – трубні головки, 3 – гофратор,  
4 – зона внутрішнього охолодження (повітряно-водяна суміш)

Заготованки шарів гофрованої полімерної труби після проходження гофратора й набуття потрібних розмірів і форми потрапляють у ванну охолодження. Оскільки зовнішня гофрована поверхня труби має набагато більшу площу поверхні, ніж її гладка внутрішня поверхня, то тепловий потік, що відводиться з її зовнішньої поверхні повітрям є сумірним тепловому потоку, що відводиться з її внутрішньої поверхні повітряно-водяною сумішшю. При цьому значно скорочуються витрати охолодної води порівняно з одностороннім зовнішнім охолодженням, адже для утворення повітряно-водяної суміші використовується на 55 % менше охолодної води порівняно зі зрошенням води на зовнішню поверхню труби.

### 4.3. Висновки

Відповідно до проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Теоретично обґрунтовано, розроблено та впроваджено спосіб двостороннього охолодження полімерних труб. Під час реалізації цього способу у внутрішньому просторі екструдованої труби розміщуються конструктивні елементи, які забезпечуватимуть на певних ділянках прискорений рух охолодного повітря, а також розміщується фільтр, який унеможливує потрапляння бруду з охолодним повітрям. Відповідні технічні рішення захищені патентами

України на корисні моделі № 40269, 41529 і впроваджено у ПАТ «НВП “Більшовик”» та Філії «Наукового центру» Концерну «Техвоєнсервіс» (м. Київ), що забезпечило зменшення довжини охолодження і витрату води на 15–18 % порівняно з базовим водяним охолодженням, а також підвищення якості одержуваних труб (зменшення бочкоподібності, покращення якості внутрішньої поверхні труб).

2. Теоретично обґрунтовано, розроблено та впроваджено спосіб двостороннього охолодження. Під час реалізації цього способу інтенсивне охолодження внутрішньої поверхні труби здійснюють після зони калібрування. Такий підхід дозволяє уникнути утворення надмірних залишкових напружень у стінці труби і дефектів на її внутрішній поверхні. Відповідне технічне рішення захищене патентом України на корисну модель № 47245 і впроваджено в Товаристві з обмеженою відповідальністю «НВП „Пластотехніка”», що дозволило збільшити продуктивність лінії порівняно з базовою на 11–15 % і зменшити споживання охолодної води на 10–13 % (залежно від типорозміру труб та режимів їх одержання).

3. Розроблено енергоресурсоефективні формувальні пристрої для гладких і гофрованих полімерних труб, що також приводять до покращення їх якості. Технічні рішення захищено патентами України на корисні моделі № 49468 і 61574.

4. Розроблено та впроваджено ресурсоефективну конструкцію охолодної ванни зрошення, яка дає змогу раціоналізувати роботу розпилювачів для кожного з діаметрів екструдованих труб без заміни обладнання. Відповідне технічне рішення захищене патентом України на корисну модель № 53879 і впроваджено у ПАТ «НВП “Більшовик”» та Філії «Наукового центру» Концерну «Техвоєнсервіс» (м. Київ), що привело до зменшення довжини зони охолодження на 5–7 % і до скорочення витрати води на 10–14 % порівняно з базовим водяним охолодженням.

## ВИСНОВКИ

Головний результат дисертації – вирішення важливої науково-технічної задачі створення науково обґрунтованих методів моделювання, розробки та вдосконалення процесів та обладнання одно- і двостороннього охолодження одно- і багат шарових полімерних труб різного призначення, які забезпечують визначення раціональних конструктивних параметрів обладнання та режимів його роботи, що сприятиме заощадженню енергетичних і матеріальних ресурсів.

1. У результаті проведеного аналізу стану питання моделювання процесів та обладнання ліній виготовлення екструдованих полімерних труб встановлено, що існуючі моделі та методики розрахунку процесів та обладнання охолодження стосуються лише одношарових гладких труб і не забезпечують можливості ефективної розробки і вдосконалення процесів та обладнання для двостороннього охолодження багат шарових полімерних труб різного призначення.

2. Розроблено фізичну і математичну моделі, алгоритм і програму розрахунку одно- і двостороннього процесу охолодження багат шарових гофрованих полімерних труб. Установлено, що під час одностороннього зовнішнього охолодження ділянки внутрішнього шару гофрованої труби під гофрами дуже повільно охолоджуються, що обумовлено значним термічним опором повітря у гофрах стінки. Під час безпосереднього охолодження внутрішньої поверхні труби час охолодження скорочується у декілька разів. Так, встановлено, що у разі застосування повітря для внутрішнього охолодження час процесу скорочується на 15 % під час охолодження труб малого діаметра (менше від 0,4 м) і до 40 % під час охолодження труб великого діаметра (більше за 0,4 м), у разі застосування повітряно-водяної суміші – на 20 % і 80 %, відповідно.

3. Удосконалено фізичну і математичну моделі, алгоритм і програму розрахунку процесу охолодження гладких полімерних труб, у яких враховані особливості охолодження багат шарових труб і теплообмін на внутрішній поверхні труби. Розроблені алгоритм і програма розрахунку процесу охолодження гладких полімерних труб дають змогу визначити раціональні параметри систем охолодження, що забезпечує можливість скоротити час охолодження до 80 %, зменшити ресурсоємність процесу виготовлення полімерних труб на 10–15 % та енергоємність – до 30 %, а також підвищити якість одержуваних виробів – зменшити «бочкоподібність» (ПАТ «НВП «Більшовик»», НВП «Пластотехніка», «Науковий центр Концерну «Техвоєнсервіс», м. Київ).

4. Установлено, що застосування двостороннього охолодження зменшує вплив температури охолодної води на тривалість процесу. Це дає змогу застосовувати воду з рівнем температур 6–20 °С без зміни параметрів роботи трубної лінії і уникнути надмірних енергетичних затрат на охолодження води у контурі системи охолодження труб.

5. Експериментально досліджено процес двостороннього охолодження двошарових гофрованих полімерних труб. Доведено доцільність застосування цього методу охолодження. Підтверджено адекватність розроблених математичних моделей. Відхилення результатів розрахунків від експериментальних даних для різних умов процесів не перевищує 7–25 %.

6. Експериментально досліджено можливість раціоналізації процесу охолодження полімерних труб застосуванням дискретної системи охолодження (чергуванням ділянок водяного і повітряного охолодження). Встановлено, що застосування такої системи дає змогу скоротити витрати охолодної води майже на 50 % і зменшити довжину зони охолодження на 10 % у випадку охолодження гофрованих полімерних труб, у випадку гладких труб – на 47 % і 22 %, відповідно.

7. Проведені в лабораторних і виробничих умовах дослідження підтвердили доцільність застосування низки розроблених ресурсоенергоєфективних заходів з охолодження екструдованих полімерних труб. Результати досліджень захищені сімома патентами України на корисні моделі, чотири з яких впроваджені у виробництво, що забезпечило зменшення довжини охолодження і витрату води на 15–18 %, збільшення продуктивності лінії на 11–15 % порівняно з базовими параметрами роботи трубних ліній, а також підвищення якості одержуваних труб (зменшення бочкоподібності і різнотовщинності труби, а також хвилястості її внутрішньої поверхні) (ПАТ «НВП “Більшовик”», НВП «Пластотехніка», «Науковий центр Концерну «Техвоєнсервіс», м. Київ).

8. Результати роботи впроваджені в практику проектування та експлуатації обладнання для охолодження полімерних труб різного призначення. Результати досліджень використано в навчальному процесі кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування і кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв НТУУ «КПІ».

## ДОДАТОК А. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОХОЛОДЖЕННЯ ГОФРОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ

### А.1. Дослідження одностороннього зовнішнього охолодження ( $D = 200$ мм)

Дослідний зразок – ПЕ тип В-Р-У/SN8/DN/ID200/176/6000 ДСТУ Б В.2.5-32:2007.

Охолодження труби здійснювали у ванні зрошенням охолодної води на зовнішню поверхню труби:

- температура охолодної води, °С 9
- початкова температура труби, °С 100
- кінцева температура охолодження, °С 15

*Таблиця А.1. Температурні поля за одностороннього охолодження*

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100	100	101	99	68	34	54	52	56
1	94	97	100	96	71	33	52	50	54
2	83	96	99	96	74	32	50	49	53
5	75	93	95	94	77	32	49	48	51
8	70	90	93	93	80	31	48	47	50
11	65	88	90	91	86	29	45	44	48
14	62	84	87	90	92	28	43	42	45
17	60	83	82	88	98	27	40	40	43
20	57	78	78	85	104	26	39	38	41
23	53	77	76	83	110	25	37	36	39
26	51	72	70	82	116	24	35	34	37
29	49	71	70	80	122	23	33	33	36
32	46	70	69	78	128	22	32	31	34
35	44	68	65	76	134	22	30	30	32
38	43	67	65	74	140	21	29	29	31
41	41	66	63	72	146	20	28	28	30
44	40	65	59	70	152	20	27	26	28
47	39	63	61	68	158	19	26	25	27
50	37	61	61	66	164	19	25	24	26
53	37	60	60	64	170	18	24	24	25
56	36	59	58	62	176	18	23	23	24
59	36	57	57	60	182	17	22	22	23
62	35	56	55	59	188	17	21	21	22
65	35	55	54	57	194	16	21	21	22

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
200	16	20	20	21	242	14	17	17	17
206	16	19	19	20	248	14	16	16	17
212	15	19	19	20	254	14	16	16	17
218	15	18	18	19	260	14	16	16	16
224	15	18	18	19	266	13	16	15	16
230	15	18	17	18	272	13	15	15	16
236	14	17	17	18	278	13	15	15	15

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

## А.2. Дослідження одностороннього зовнішнього охолодження ( $D = 400$ мм)

Дослідний зразок – ПЕ тип В-Р-У/SN8/DN/ID400/343/6000 ДСТУ Б В.2.5-32:2007.

Охолодження труби здійснювали у ванні зрошенням охолодної води на зовнішню поверхню труби:

- температура охолодної води, °С 14
- початкова температура труби, °С 100
- кінцева температура охолодження, °С 22

Таблиця А.2. Температурні поля за одностороннього охолодження

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	99,1	282	44,6	26,6	14,6	15,5
6	100,0	97,6	88,1	87,1	300	42,0	25,3	14,6	15,4
19	99,7	94,3	51,1	60,6	315	39,7	24,1	14,6	15,4
25	98,9	90,6	38,0	53,2	333	37,7	23,1	14,5	15,2
37	96,4	86,4	25,1	42,3	351	35,9	22,1	14,5	15,1
45	93,8	81,0	20,6	35,1	371	34,3	21,4	14,4	15,0
56	91,5	76,4	17,3	30,2	167	66,4	42,9	15,0	17,2
69	88,8	71,4	15,9	26,0	183	62,3	39,5	14,7	16,7
84	85,7	66,5	15,4	22,7	199	58,6	36,4	14,5	16,3
99	81,9	61,5	15,4	21,5	216	54,9	33,8	14,4	16,0
115	77,7	56,0	15,5	20,0	232	51,9	31,5	14,3	15,8
134	74,0	51,1	15,4	18,7	247	49,0	29,5	14,2	15,6
150	70,1	46,9	15,2	17,9	265	46,2	27,6	14,8	15,3

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
386	32,8	20,9	14,4	15,0	504	25,6	19,0	14,3	14,7
402	31,5	20,4	14,4	14,9	520	24,8	18,7	14,3	14,7
419	30,5	20,1	14,4	14,9	536	24,2	18,4	14,3	14,6
435	29,7	19,9	14,3	14,8	554	23,5	18,1	14,3	14,6
448	28,6	20,0	14,3	14,7	572	22,9	17,8	14,3	14,6
469	27,3	19,7	14,3	14,7	590	22,2	17,4	14,2	14,5
487	26,4	19,3	14,3	14,7	597	21,8	17,2	14,2	14,5

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

### А.3. Дослідження двостороннього охолодження (внутрішнє – повітря, $D = 200$ мм)

Дослідний зразок – ПЕ тип В-Р-У/SN8/DN/ID200/176/6000 ДСТУ Б В.2.5-32:2007.

Охолодження зовнішньої поверхні здійснювали водою у ванні зрошенням охолодної води на зовнішню поверхню труби, внутрішньої – повітрям:

– температура охолодної води, °С	9
– температура охолодного повітря, °С	18
– об'ємна витрата охолодного повітря, м <sup>3</sup> /с	0,0597
– початкова температура труби, °С	100
– кінцева температура охолодження, °С	15

Таблиця А.3. Температурні поля за двостороннього охолодження (внутрішнє – повітрям)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100	100	100	100	32	43	65	66	70
1	90	95	99	96	35	41	63	65	68
2	85	93	97	95	38	40	62	64	66
5	73	92	92	93	41	38	61	62	64
11	63	86	86	87	44	37	59	61	62
14	59	81	82	85	47	36	58	59	60
17	55	78	81	82	50	35	56	57	58
20	52	68	78	79	53	34	55	56	57
23	49	68	74	77	56	33	53	54	55
26	47	67	68	75	59	32	52	53	53
29	44	66	68	72	62	31	50	51	52

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
68	30	48	49	49	155	17	23	24	22
71	29	46	47	47	161	16	22	23	21
74	28	45	46	46	167	16	21	22	21
77	27	44	45	44	173	15	20	21	20
89	25	39	41	39	179	15	20	21	19
95	24	37	38	37	185	15	19	20	18
101	23	35	37	35	191	14	18	19	18
107	22	33	35	33	197	14	18	19	17
113	21	32	33	31	203	14	17	18	17
119	20	30	31	29	209	13	17	18	16
125	20	29	30	28	215	13	16	17	16
131	19	27	29	26	221	13	16	17	16
137	18	26	27	25	227	13	15	16	15
143	18	25	26	24	233	13	15	16	15
149	17	24	25	23	239	12	15	15	14

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

#### **А.4. Дослідження двостороннього охолодження (внутрішнє – повітря, $D = 400$ мм)**

Дослідний зразок – ПЕ тип В-Р-У/SN8/DN/ID400/343/6000 ДСТУ Б В.2.5-32:2007.

Охолодження зовнішньої поверхні здійснювали водою у ванні зрошенням охолодної води на зовнішню поверхню труби, внутрішньої – повітрям:

- температура охолодної води, °С 14
- температура охолодного повітря, °С 20
- об'ємна витрата охолодного повітря, м<sup>3</sup>/с 0,0597
- початкова температура труби, °С 100
- кінцева температура охолодження, °С 22

Таблиця А.4. Температурні поля за двостороннього охолодження (внутрішнє – повітрям)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	99,6	37	98,2	86,4	24,2	43,6
8	99,5	98,5	77,3	79,1	51	96,7	80,1	17,1	34,8
25	99,2	93,5	39,2	55,2	64	94,2	75,1	16,0	28,0

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
77	90,4	70,5	15,4	25,2	272	39,1	26,4	13,8	14,3
90	86,0	66,0	15,2	22,7	285	35,1	24,5	13,7	14,2
103	81,8	61,9	15,0	20,7	298	33,3	23,6	13,6	14,1
129	73,7	54,0	14,8	18,0	311	32,2	22,8	13,7	14,1
142	70,1	50,6	14,6	17,2	324	30,1	21,5	13,6	14,0
155	66,7	47,3	14,5	16,5	337	28,7	20,9	13,5	14,0
168	63,0	43,9	14,3	16,1	350	27,3	20,1	13,5	13,9
181	57,9	39,4	14,2	15,5	363	26,3	19,5	13,5	13,9
194	54,2	36,3	14,0	15,0	376	25,3	19,0	13,5	13,9
207	51,3	34,0	13,9	14,8	389	24,5	18,5	13,5	13,9
233	45,9	30,6	13,9	14,5	402	23,8	18,0	13,5	13,8
246	43,3	29,1	13,8	14,4	415	23,0	17,5	13,5	13,8
259	40,8	27,7	13,8	14,3	428	22,0	17,2	13,5	13,8

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

#### **А.5. Дослідження двостороннього охолодження (внутрішнє – повітряно-водяна суміш, $D = 200$ мм)**

Дослідний зразок – ПЕ тип В-Р-У/SN8/DN/ID200/176/6000 ДСТУ Б В.2.5-32:2007.

Охолодження зовнішньої поверхні здійснювали водою у ванні зрошенням охолодної води на зовнішню поверхню труби, внутрішньої – повітряно-водяною сумішшю:

– температура охолодної води, °С	9
– температура повітряно-водяної суміші, °С	12
– об'ємна витрата охолодного повітря, м <sup>3</sup> /с	0,0597
– об'ємна витрата води для повітряно-водяної суміші, м <sup>3</sup> /с	$64,9 \cdot 10^{-6}$
– початкова температура труби, °С	100
– кінцева температура охолодження, °С	15

Таблиця А.5. Температурні поля за двостороннього охолодження  
(внутрішнє – повітряно-водяною сумішшю)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100	100	100	100	2	88	93	99	79
1	96	96	100	83	5	75	89	94	71

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
8	70	86	90	62	56	30	28	45	20
11	67	79	85	56	59	30	27	43	19
14	62	74	79	50	62	29	26	42	18
17	58	69	73	47	68	27	25	39	17
20	54	67	71	43	74	25	23	37	15
23	51	60	67	39	80	24	22	34	14
26	48	54	57	36	86	23	20	32	13
29	45	48	52	34	98	21	18	28	12
32	42	44	48	31	110	19	16	25	11
35	40	40	45	29	122	17	15	22	11
38	38	37	48	27	128	17	14	21	10
41	36	34	50	26	134	16	14	20	10
44	35	33	50	24	140	15	13	19	10
47	34	31	49	23	146	15	13	18	10
50	32	30	48	22	152	14	12	17	10
53	31	29	46	21	158	14	12	15	10

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

#### **А.6. Дослідження двостороннього охолодження (внутрішнє – повітряно-водяна суміш, $D = 400$ мм)**

Дослідний зразок – ПЕ тип В-Р-У/SN8/DN/ID400/343/6000 ДСТУ Б В.2.5-32:2007.

Охолодження зовнішньої поверхні здійснювали водою у ванні зрошенням охолодної води на зовнішню поверхню труби, внутрішньої – повітряно-водяною сумішшю:

– температура охолодної води, °С	13
– температура повітряно-водяної суміші, °С	14
– об'ємна витрата охолодного повітря, м <sup>3</sup> /с	0,0597
– об'ємна витрата води для повітряно-водяної суміші, м <sup>3</sup> /с	$64,9 \cdot 10^{-6}$
– початкова температура труби, °С	100
– кінцева температура охолодження, °С	22

Таблиця А.6. Температурні поля за двостороннього охолодження  
(внутрішнє – повітряно-водяною сумішшю)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	99,8	131	36,2	34,7	14,4	14,4
7	98,1	99,0	94,2	82,7	142	33,9	31,9	14,4	14,4
15	96,4	95,4	71,1	52,1	153	31,7	29,5	14,4	14,4
24	87,2	94,0	43,8	29,7	164	29,9	27,5	14,4	14,4
33	79,5	85,9	35,1	22,6	175	28,6	25,9	14,4	14,4
43	72,0	77,4	21,3	18,2	186	27,4	24,3	14,4	14,4
52	64,1	68,6	17,5	15,9	197	26,2	23,0	14,3	14,4
64	56,8	60,5	15,4	14,9	208	24,9	21,8	14,4	14,4
74	52,1	54,4	14,5	14,5	219	23,7	20,9	14,4	14,5
86	47,8	49,5	14,1	14,3	230	23,1	20,1	14,4	14,5
98	44,0	44,8	14,0	14,2	241	22,4	19,4	14,4	14,5
109	41,0	40,7	14,0	14,2	245	22,1	18,9	14,4	14,4
120	38,5	37,6	14,4	14,3	249	22,0	18,1	14,3	14,3

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

### А.7. Дослідження одностороннього внутрішнього охолодження (внутрішнє – повітряно-водяна суміш, $D = 400$ мм)

Дослідний зразок – ПЕ тип В-Р-У/SN8/DN/ID400/343/6000 ДСТУ Б В.2.5-32:2007.

Охолодження зовнішньої поверхні здійснювали повітрям за умов вільної конвекції, внутрішньої – повітряно-водяною сумішшю:

– температура охолодної води, °С	13
– температура повітряно-водяної суміші, °С	14
– об'ємна витрата охолодного повітря, м <sup>3</sup> /с	0,0597
– об'ємна витрата води для повітряно-водяної суміші, м <sup>3</sup> /с	$64,9 \cdot 10^{-6}$
– початкова температура труби, °С	100
– кінцева температура охолодження, °С	22

Таблиця А.7. Температурні поля за двостороннього охолодження (внутрішнє – повітряно-водяною сумішшю)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	100,0	252	43,1	57,5	57,4	19,0
8	99,0	99,8	99,9	92,7	265	41,3	55,1	54,6	18,5
19	96,4	99,6	99,7	81,3	278	39,7	52,6	52,2	18,1
30	91,6	99,0	99,2	75,2	291	38,1	50,3	49,8	17,7
42	87,1	99,0	98,3	63,3	304	36,6	48,1	47,7	17,4
56	83,1	97,9	97,5	53,8	317	35,1	46,0	45,4	17,1
70	79,0	96,6	96,0	48,1	330	33,8	43,8	43,4	16,7
83	75,5	93,8	94,2	42,8	343	32,5	41,9	41,2	16,4
96	72,0	91,0	91,9	38,2	356	31,3	40,1	39,2	16,2
109	69,0	88,2	89,1	34,4	369	30,1	38,3	37,3	15,9
122	66,1	85,1	86,2	31,4	382	29,1	36,5	35,7	15,7
135	63,3	82,2	83,2	29,1	395	28,1	34,9	34,1	15,5
148	60,5	79,4	80,2	26,9	408	27,0	33,5	32,4	15,3
161	58,0	76,5	76,9	25,4	421	26,2	32,0	30,8	15,2
174	55,6	73,5	74,0	24,0	434	25,3	30,6	29,4	15,0
187	53,3	70,7	71,2	22,8	447	24,6	29,4	28,1	14,9
200	51,0	68,0	68,5	21,8	460	23,8	28,2	27,0	14,7
213	48,9	65,3	65,3	21,0	473	23,1	27,1	25,9	14,6
226	46,9	62,5	62,5	20,3	486	22,5	26,1	24,9	14,5
239	45,0	60,0	59,8	19,6	496	22,0	25,2	23,8	14,3

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

### А.8. Дослідження дискретної системи охолодження

Дослідний зразок – ПЕ тип В-Р-У/SN8/DN/ID400/343/6000 ДСТУ Б В.2.5-32:2007.

Охолодження зовнішньої поверхні здійснювали повітрям за умов вільної конвекції, внутрішньої – повітряно-водяною сумішшю:

– температура охолодної води, °С	12
– температура охолодного повітря, °С	19
– об’ємна витрата води, м <sup>3</sup> /с	64,9·10 <sup>-6</sup>
– початкова температура труби, °С	100
– кінцева температура охолодження, °С	22

Таблиця А.8. Температурні поля за охолодження в дискретній системі  
(ділянки зрошення – 2 м, повітряні ділянки – 1 м)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	100,0	261	44,5	29,1	13,7	15,1
11	99,5	99,4	84,2	74,7	276	42,2	27,3	14,0	15,2
23	96,3	99,0	60,5	53,2	291	40,1	25,8	13,7	14,5
33	93,7	92,0	37,1	44,2	306	38,1	24,6	12,8	14,3
43	90,6	85,8	27,3	37,1	321	36,3	23,5	12,6	14,1
55	87,4	80,3	20,4	31,5	336	34,6	22,6	12,5	13,9
66	84,5	74,0	18,4	28,3	351	33,1	21,7	12,5	13,9
81	80,4	68,5	17,6	26,1	366	31,8	21,0	12,7	14,0
96	76,8	63,3	16,5	22,8	381	30,5	20,4	12,8	13,6
111	73,2	58,3	15,3	20,1	396	29,3	19,7	12,5	13,5
126	69,9	53,9	14,5	20,0	411	28,3	19,3	12,5	13,4
141	66,5	49,9	14,1	18,8	426	27,3	18,9	12,4	13,3
156	63,1	46,2	14,3	17,7	441	26,4	18,4	12,5	13,3
171	59,9	43,0	14,8	17,4	456	25,6	18,2	12,6	13,3
186	57,2	40,2	15,3	17,6	471	24,8	17,9	12,4	13,2
201	54,4	37,6	14,7	16,6	486	24,0	17,8	12,3	13,1
216	51,7	35,1	14,1	16,0	501	23,3	17,6	12,2	13,0
231	47,2	32,9	13,8	15,5	516	22,6	17,3	12,2	12,9
246	46,8	30,8	13,6	15,2	531	22,0	16,9	12,3	12,9

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

Таблиця А.9. Температурні поля за охолодження в дискретній системі  
(ділянки зрошення – 2 м, повітряні ділянки – 1,5 м)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	100,0	18	99,1	96,7	67,7	60,5
9	99,4	98,2	96,4	85,4	27	98,4	94,5	53,9	52,6
36	96,9	91,5	35,1	41,2	165	68,2	47,1	13,9	17,1
48	94,9	84,8	24,0	33,7	178	65,6	44,0	14,1	16,6
61	91,5	78,4	20,2	30,8	191	62,9	42,1	14,7	16,7
74	88,6	73,6	17,8	26,4	204	60,6	40,3	15,2	17,4
87	86,1	69,1	17,9	25,9	230	56,0	37,6	14,5	16,6
100	83,4	65,3	18,4	25,9	243	54,0	36,4	13,6	15,7
110	80,6	61,6	17,8	24,6	256	52,3	35,2	13,1	15,2
126	77,3	58,0	15,6	21,4	269	50,3	33,8	12,8	14,7
139	73,7	53,8	13,9	19,2	282	48,6	33,1	12,5	14,2
152	70,9	50,2	13,9	18,0	295	46,9	32,0	12,7	14,8

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
308	45,2	31,3	12,5	14,5	438	31,7	23,9	12,3	13,3
321	42,9	30,6	12,6	14,3	451	30,4	23,1	12,3	13,3
334	41,2	30,0	12,9	14,5	464	29,0	22,3	12,3	13,3
347	40,0	29,1	13,1	14,7	477	27,7	21,6	12,3	13,5
360	38,5	28,6	13,0	14,7	490	26,4	21,0	12,3	13,4
373	37,3	27,7	12,5	14,1	503	25,3	20,6	12,2	13,4
386	36,3	27,2	12,3	13,8	516	24,4	20,2	12,4	13,4
399	35,1	26,5	12,3	13,6	529	23,7	19,9	12,5	13,5
412	33,6	25,6	12,3	13,4	542	22,8	19,4	12,5	13,5
425	32,6	24,6	12,3	13,2	555	22,0	19,2	12,1	13,2

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

Таблиця А.10. Температурні поля за охолодження в дискретній системі (ділянки зрошення – 2 м, повітряні ділянки – 2 м)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	100,0	83	84,7	65,3	16,5	27,9
11	99,4	99,4	71,7	74,7	96	81,7	61,7	17,3	28,7
22	98,6	95,3	57,0	62,5	109	78,9	58,2	17,8	29,4
33	97,1	86,9	33,1	45,4	120	76,9	56,5	19,2	30,4
44	93,9	81,2	25,7	39,3	135	74,6	53,0	16,0	22,4
57	91,4	74,7	17,9	31,3	148	71,3	49,4	14,9	20,5
70	87,9	69,5	16,7	28,4	161	68,0	46,1	14,3	19,1
174	65,3	43,3	14,0	18,0	382	34,3	22,4	13,5	14,5
187	61,2	40,2	13,7	16,4	395	33,1	21,8	12,8	13,7
200	58,3	38,3	13,9	16,8	408	31,8	21,3	12,7	13,5
213	55,8	36,6	14,5	17,5	421	30,3	20,5	12,4	13,2
226	53,8	35,3	15,0	18,1	434	29,3	20,1	12,4	13,1
240	52,7	34,4	16,3	19,5	447	28,4	19,7	12,5	13,3
252	50,2	32,5	14,1	17,4	460	27,6	19,5	12,9	13,5
265	47,9	30,6	13,6	15,5	480	26,9	19,2	13,1	14,6
278	45,5	29,0	12,5	14,9	489	26,7	19,1	13,2	13,9
291	43,7	27,8	13,2	14,3	502	26,0	18,8	12,9	13,6
304	41,9	26,5	12,9	14,1	515	25,1	18,4	12,6	13,2
317	40,1	25,3	12,8	14,1	525	24,4	18,0	12,3	13,0
330	38,7	24,7	13,4	14,7	538	23,7	17,6	12,4	13,0
343	37,2	24,0	13,7	15,1	551	22,6	17,2	12,1	12,7
360	36,2	24,2	14,8	16,0	564	22,1	17,0	12,2	12,8
369	35,4	23,1	14,0	15,1	573	22,0	16,9	12,4	12,9

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

Таблиця А.11. Температурні поля за охолодження в дискретній системі  
(ділянки зрошення – 4 м, повітряні ділянки – 1 м)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	100,0	138	74,7	50,0	16,4	20,9
8	99,8	98,7	85,9	90,0	150	71,9	47,1	16,5	20,4
18	98,7	96,2	46,7	65,9	164	69,3	44,4	16,3	19,8
29	97,2	89,3	27,6	50,5	177	66,7	41,7	15,8	18,7
41	95,4	82,6	20,5	41,3	190	64,1	39,4	15,7	18,3
54	92,8	77,1	17,6	35,2	203	62,1	37,8	16,1	18,4
66	90,3	72,2	16,5	30,2	216	59,7	36,0	16,0	18,1
78	87,7	67,6	16,3	26,5	229	57,3	34,1	15,9	17,8
90	85,1	63,4	16,1	25,0	242	55,0	32,6	15,8	17,5
102	82,4	59,6	15,9	23,0	255	52,6	31,3	15,7	17,3
114	79,9	56,2	16,0	21,4	268	50,5	30,1	15,8	17,2
126	77,2	52,9	16,1	20,9	281	48,3	29,0	15,6	17,1
294	46,4	28,0	15,7	17,2	463	29,6	21,1	15,7	16,4
307	44,9	27,3	16,4	17,5	476	28,9	20,8	15,6	16,2
320	43,4	26,4	16,0	17,1	489	28,0	20,4	15,5	15,9
333	41,7	25,6	15,7	16,8	502	26,6	19,6	15,4	15,4
346	39,9	24,8	15,6	16,5	515	25,9	19,3	14,8	15,3
359	38,3	24,1	15,6	16,4	528	25,3	19,1	14,8	15,3
372	37,0	23,7	15,5	16,3	541	24,7	18,9	14,8	15,2
385	35,8	23,2	15,5	16,3	554	24,2	18,6	14,8	15,1
398	34,6	22,7	15,5	16,2	567	23,6	18,3	14,7	15,1
411	33,5	22,3	15,5	16,1	580	23,1	18,1	14,7	15,1
424	32,4	21,9	15,5	16,1	593	22,7	17,9	14,7	15,1
437	31,3	21,6	15,5	16,1	605	22,3	17,7	14,8	15,2
450	30,4	21,3	15,6	16,2	614	22,0	17,5	14,8	15,2

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

Таблиця А.12. Температурні поля за охолодження в дискретній системі  
(ділянки зрошення – 4 м, повітряні ділянки – 1,5 м)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	100,0	85	86,0	66,7	15,6	25,6
10	99,5	99,4	91,6	88,5	98	82,9	62,4	15,5	23,8
21	98,8	97,0	53,7	62,7	111	79,8	58,4	15,4	20,9
33	97,6	90,5	30,3	48,2	124	76,9	54,5	15,4	19,9
46	94,7	83,2	23,6	38,1	137	73,9	50,9	15,9	19,4
59	91,9	77,1	19,6	31,3	150	70,9	48,1	16,3	19,4
72	88,9	71,8	16,3	28,2	163	68,2	45,6	17,1	20,3

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
372	35,4	22,7	13,9	14,7	267	49,1	29,6	14,3	15,7
385	34,1	22,1	13,9	14,6	293	45,2	27,2	14,2	15,2
398	32,7	21,6	13,9	14,5	306	43,2	26,3	14,4	15,3
411	31,6	21,1	13,8	14,4	320	41,3	25,5	14,6	15,4
424	30,5	20,7	13,8	14,3	333	39,7	24,8	14,8	15,6
437	29,5	20,2	13,8	14,3	346	38,2	24,0	14,5	15,1
450	29,1	19,9	13,8	14,2	359	36,7	23,3	14,0	14,9
463	28,1	19,9	14,1	14,4	489	26,5	19,4	14,4	14,7
476	27,3	19,6	14,1	14,5	502	25,9	19,2	14,7	14,9
176	65,8	43,0	16,3	19,5	515	25,4	18,9	14,5	14,7
189	63,3	40,3	15,4	17,7	528	25,0	18,6	14,2	14,6
202	60,6	38,0	14,7	17,2	541	24,1	18,2	14,0	14,4
215	58,2	36,0	14,6	16,8	554	23,4	18,0	14,0	14,3
228	55,8	34,2	14,5	16,4	567	22,9	17,7	14,0	14,3
241	53,5	32,5	14,4	16,2	580	22,3	17,4	14,0	14,3
254	51,2	30,9	14,3	15,9	594	21,9	17,2	14,0	14,2

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

Таблиця А.13. Температурні поля за охолодження в дискретній системі (ділянки зрошення – 4 м, повітряні ділянки – 2 м)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	100,0	218	53,5	37,0	14,2	17,3
10	99,1	99,7	96,2	76,0	231	51,0	34,4	14,1	16,7
23	98,5	96,4	50,0	56,8	244	48,5	32,5	13,8	15,9
36	96,2	88,5	31,6	44,9	257	46,3	30,7	13,7	15,6
49	92,8	81,8	22,5	37,3	270	44,2	29,2	13,6	15,3
62	89,2	76,1	17,7	31,4	283	42,2	27,8	13,5	14,9
75	85,2	71,1	16,6	26,7	296	40,4	26,5	13,5	14,7
88	81,7	66,1	15,6	23,3	309	38,7	25,3	13,5	14,6
101	78,2	62,0	15,2	21,9	322	37,3	24,4	13,6	15,1
114	74,8	58,0	15,0	20,6	335	35,8	23,6	14,0	15,4
127	71,4	54,5	14,9	20,0	348	34,7	22,8	14,2	16,0
140	68,3	51,3	15,3	20,8	361	33,3	22,2	14,5	16,1
153	65,4	48,7	15,8	21,6	374	32,5	21,5	13,7	14,9
166	62,9	46,4	16,8	23,0	387	31,3	20,9	13,4	14,6
179	60,4	44,3	17,1	23,2	400	30,3	20,4	13,3	14,3
192	58,1	41,7	16,2	21,4	413	29,4	20,1	13,2	14,1
205	55,8	39,4	14,6	18,2	426	28,4	20,0	13,1	14,0

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
439	27,7	19,9	13,1	13,9	504	24,2	18,3	13,2	13,8
452	27,0	19,5	13,1	13,8	518	23,6	18,0	13,4	13,9
465	26,3	19,2	13,1	13,7	531	23,1	17,8	13,5	14,1
478	25,5	18,8	13,1	13,6	544	22,6	17,6	13,5	14,2
491	24,9	18,5	13,1	13,7	560	22,0	17,3	13,2	13,7

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

Таблиця А.14. Температурні поля за охолодження в дискретній системі (ділянки зрошення – 6 м, повітряні ділянки – 1 м)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	99,7	293	43,2	27,8	14,9	16,4
10	99,5	99,0	73,9	76,4	306	41,2	26,7	14,9	16,3
21	99,0	96,2	46,8	57,7	319	40,0	25,9	14,8	16,1
33	98,0	90,7	30,2	46,1	332	38,4	24,9	14,7	16,0
46	96,9	84,0	22,4	38,5	345	36,9	24,1	14,8	15,9
59	94,6	78,7	19,1	32,9	358	35,7	23,4	14,7	15,8
72	91,5	73,4	17,5	28,1	371	34,6	22,8	14,7	15,7
85	88,4	68,8	17,1	26,1	384	33,4	22,2	14,7	15,6
98	85,0	64,8	16,8	23,0	397	31,7	21,3	14,3	15,2
111	81,8	60,9	16,5	21,8	410	31,0	20,7	14,3	15,2
124	78,6	57,0	16,4	20,9	423	29,9	20,6	15,0	15,6
137	75,5	53,7	16,3	20,2	436	29,0	20,3	14,7	15,3
150	72,2	50,5	16,1	19,5	449	28,0	19,9	14,7	15,2
163	69,2	47,6	15,9	18,9	462	27,5	19,8	14,6	15,1
176	65,7	43,7	15,8	18,4	475	26,9	19,6	14,6	15,1
189	61,5	40,8	15,5	18,0	488	26,3	19,5	14,6	15,1
202	58,1	38,6	15,9	18,7	514	25,1	19,1	14,6	15,0
215	56,6	37,2	16,7	19,3	527	24,4	18,9	14,6	15,0
228	53,8	35,0	15,6	17,9	540	23,8	18,7	14,6	15,0
241	51,3	33,2	15,2	17,5	553	23,3	18,4	14,6	15,0
254	48,9	31,6	15,1	17,1	566	23,0	18,2	14,6	14,9
267	47,1	30,3	15,0	16,9	579	22,5	18,0	14,5	15,2
280	45,0	28,9	15,0	16,5	598	22,0	17,6	14,6	15,0

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

Таблиця А.15. Температурні поля за охолодження в дискретній системі  
(ділянки зрошення – 6 м, повітряні ділянки – 1,5 м)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	99,5	288	40,4	25,6	14,1	15,5
9	99,7	99,0	78,8	76,5	301	39,1	24,6	14,0	15,2
20	99,4	96,3	64,4	56,7	314	37,5	23,9	14,1	14,9
32	98,5	91,8	37,1	49,5	327	35,9	23,0	14,0	15,0
44	95,8	84,8	23,6	39,7	340	34,6	22,3	14,0	15,0
56	93,1	79,0	19,7	32,5	353	33,6	21,6	14,0	14,8
68	90,2	73,8	17,6	29,3	366	32,5	21,3	14,0	14,8
80	86,9	68,7	16,3	26,6	379	31,6	21,0	14,0	14,6
93	83,8	64,3	15,9	22,7	392	30,7	20,4	13,7	14,6
106	80,1	59,7	15,6	21,2	405	29,6	19,7	13,5	14,2
132	73,3	52,0	15,8	19,2	418	28,7	19,5	13,6	14,4
145	70,3	48,7	15,8	18,6	432	28,0	19,3	13,8	15,0
158	67,1	45,4	15,6	17,6	444	27,2	19,6	14,4	14,7
171	63,7	42,6	15,5	17,0	457	26,5	19,2	13,9	14,6
184	60,5	39,8	15,5	16,9	470	25,6	18,9	13,8	14,4
197	56,8	36,7	15,9	17,3	483	24,7	18,6	13,7	14,2
210	54,0	34,5	17,0	18,1	496	24,4	18,5	13,8	14,3
223	51,4	32,3	15,5	17,0	509	23,9	18,2	13,8	14,3
236	48,8	30,6	14,9	16,6	522	23,3	17,9	13,8	14,2
249	46,3	29,1	14,4	16,1	535	23,0	17,6	13,8	14,2
262	44,1	27,6	14,1	15,8	548	22,5	17,3	13,8	14,2
275	42,4	26,8	14,3	15,6	561	22,0	17,2	13,8	14,1

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

Таблиця А.16. Температурні поля за охолодження в дискретній системі  
(ділянки зрошення – 6 м, повітряні ділянки – 2 м)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	99,5	106	80,1	59,7	15,6	21,2
9	99,7	99,0	97,1	76,5	119	76,3	55,5	15,2	20,0
20	99,4	96,3	64,4	64,8	132	73,3	52,0	15,5	19,2
32	98,5	91,8	37,1	49,5	145	70,3	48,7	15,1	18,6
44	95,8	84,8	23,6	39,7	158	67,1	45,4	15,1	17,6
56	93,1	79,0	19,7	32,5	171	63,7	42,6	15,2	17,0
68	90,2	73,8	17,6	29,3	184	60,5	39,8	15,5	16,9
80	86,9	68,7	16,3	26,6	197	56,8	36,7	15,9	17,3
93	83,8	64,3	15,9	22,7	210	54,0	34,5	16,0	17,4

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
236	48,8	30,6	16,8	18,3	405	29,6	19,7	13,5	14,2
262	44,1	27,6	15,4	16,8	418	28,7	19,5	13,6	14,3
275	42,4	26,8	14,3	15,6	431	28,0	19,3	13,8	14,4
288	40,4	25,6	14,1	15,5	444	27,2	19,6	13,9	14,6
301	39,1	24,6	14,0	15,2	457	26,5	19,2	13,9	14,7
314	37,5	23,9	14,1	14,9	470	25,6	18,9	14,5	14,9
327	35,9	23,0	14,0	15,0	483	24,7	18,6	14,2	15,1
353	33,6	21,6	14,0	14,8	496	24,0	18,5	13,8	14,3
366	32,5	21,3	14,0	14,8	509	23,0	18,2	13,8	14,3
379	31,6	21,0	14,0	14,6	522	22,4	17,9	13,8	14,2
392	30,7	20,4	13,7	14,6	535	22,0	17,6	13,8	14,2

\* – номери термопар відповідно до рис. 2.7.

## ДОДАТОК Б. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОХОЛОДЖЕННЯ ГЛАДКИХ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ

### Б.1. Дослідження одностороннього зовнішнього охолодження ( $D = 63$ мм)

Дослідний зразок – Труба ПЕ 80 SDR 11 – 63×5,8 технічна 12,5 бар ДСТУ Б В.2.7-151:2008.

Охолодження труби здійснювали у ванні за умов вільної конвекції:

- температура охолодної води, °С 12
- початкова температура труби, °С 118
- кінцева температура охолодження, °С 20

*Таблиця Б.1. Температурні поля за одностороннього охолодження*

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	118	118	118	118	107	18	34	43	63
4	107	117	119	117	110	18	34	41	62
8	96	112	118	117	114	18	34	41	60
12	76	107	117	116	118	18	33	40	59
16	55	97	111	115	122	17	32	39	57
20	45	85	106	112	130	16	31	38	54
24	36	76	99	109	134	16	30	37	52
28	35	71	94	107	138	16	28	36	50
32	32	67	90	102	142	16	28	35	49
36	29	63	87	98	146	15	27	35	47
40	28	59	82	95	150	15	26	33	45
44	26	55	78	91	154	15	26	32	43
48	25	52	74	88	158	15	25	31	42
52	24	50	72	86	162	14	24	31	41
56	24	48	70	84	166	14	24	29	39
60	23	46	67	82	170	14	23	29	38
64	22	45	64	80	174	13	23	28	37
68	21	43	60	79	178	14	22	27	35
76	20	41	57	76	186	13	21	25	33
80	20	40	54	74	190	13	21	25	32
84	19	39	52	73	194	13	20	25	31
88	19	38	51	71	198	13	20	24	30
92	19	36	49	69	202	13	19	23	29
96	18	35	48	67	210	12	18	22	27
100	18	35	46	66	214	12	18	22	26
104	18	34	44	64	218	12	17	21	25

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
226	11	16	20	24	242	11	15	17	21
230	11	16	19	23	246	11	15	16	20
234	11	16	18	22	249	11	15	17	20

\* – номери термопар відповідно до рис. 3.14.

## Б.2. Дослідження одностороннього зовнішнього охолодження ( $D = 90$ мм)

Дослідний зразок – ПП-80 тип 3 (PPR) – клас 1/10 бар, S 2,5 – 90×15 – ДСТУ Б В.2.5-144:2007.

Охолодження труби здійснювали у ванні за умов вільної конвекції:

– температура охолодної води, °С	15
– початкова температура труби, °С	100
– кінцева температура охолодження, °С	25

Таблиця Б.2. Температурні поля за одностороннього охолодження

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	100,0	870	21,0	34,0	46,0	49,0
17	49,0	99,0	99,5	100,0	924	20,0	33,0	44,0	47,0
27	42,9	96,0	99,4	100,0	979	20,0	32,0	42,0	44,0
44	37,4	93,0	99,3	99,7	1034	20,0	31,0	40,0	42,0
65	34,0	86,0	99,0	99,3	1088	20,0	30,0	38,0	40,0
110	29,6	75,0	96,4	99,1	1143	20,0	29,0	36,0	38,0
160	27,0	70,0	93,1	96,9	1197	20,0	28,0	35,0	37,0
214	26,0	65,0	89,0	93,7	1252	20,0	27,0	33,0	35,0
269	25,0	60,0	85,0	90,1	1307	19,0	26,0	32,0	34,0
323	24,0	56,0	81,0	86,3	1361	19,0	26,0	31,0	32,0
378	24,0	52,0	76,0	82,1	1416	19,0	25,0	30,0	31,0
433	23,0	50,0	72,0	78,0	1470	19,0	24,0	29,0	30,0
487	23,0	47,0	68,0	74,0	1525	19,0	24,0	28,0	29,0
542	22,0	45,0	64,0	69,0	1580	19,0	23,0	27,0	28,0
597	22,0	43,0	60,0	65,0	1634	19,0	23,0	26,0	27,0
651	22,0	41,0	57,0	62,0	1689	19,0	23,0	26,0	27,0
706	21,0	39,0	54,0	58,0	1744	19,0	22,0	25,0	26,0
760	21,0	37,0	51,0	55,0	1798	19,0	22,0	25,0	25,0
815	21,0	36,0	48,0	52,0	1822	19,0	22,0	25,0	25,0

\* – номери термопар відповідно до рис. 3.14.

### Б.3. Дослідження двостороннього охолодження (внутрішнє – повітря, $D = 63$ мм)

Дослідний зразок – Труба ПЕ 80 SDR 11 – 63×5,8 технічна 12,5 бар  
ДСТУ Б В.2.7-151:2008.

Охолодження зовнішньої поверхні здійснювали водою за умов вільної конвекції, внутрішньої – повітрям за різних швидкостей руху:

– температура охолодної води, °С	12
– температура охолодного повітря, °С	20
– об'ємна витрата охолодного повітря, м <sup>3</sup> /с	0,0261
	0,0497
	0,0806
– початкова температура труби, °С	118
– кінцева температура охолодження, °С	20

Таблиця Б.3. Температурні поля за двостороннього охолодження  
(внутрішнє – повітря,  $V = 0,0261$  м<sup>3</sup>/с,  $Re = 457$ )

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	118	118	118	118	112	18	31	38	50
4	101	116	118	118	116	17	30	37	49
8	81	113	116	116	120	17	29	36	47
12	62	102	111	112	124	17	29	35	45
16	48	86	108	108	128	17	28	34	44
20	41	79	102	106	132	17	27	33	42
24	35	73	97	101	136	16	26	32	40
28	33	68	91	97	140	16	26	31	39
32	31	62	87	94	144	16	25	30	37
36	29	58	81	91	148	15	24	29	36
40	28	55	75	87	152	15	23	28	35
48	26	51	67	80	164	14	21	26	31
52	26	50	64	78	168	14	21	25	30
60	24	46	57	74	176	13	20	23	28
64	24	45	54	72	180	13	19	23	27
68	24	44	52	70	184	13	19	22	26
72	24	42	50	68	188	13	18	22	25
76	22	41	48	66	192	12	17	22	24
84	20	38	46	63	200	12	16	21	23
88	20	37	45	61	204	12	16	20	22
92	20	36	44	59	208	12	15	20	21
100	19	34	42	55	216	12	15	19	20
104	19	33	41	54	217	12	15	20	20

\* – номери термопар відповідно до рис. 3.14.

Таблиця Б.4. Температурні поля за двостороннього охолодження  
(внутрішнє – повітря,  $V = 0,0497 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Re = 870$ )

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	118	118	118	118	108	18	30	39	49
4	113	117	118	118	112	18	29	37	48
8	110	114	118	117	116	18	28	36	47
12	88	112	115	113	120	17	27	34	46
16	55	101	111	109	124	17	26	33	44
20	48	90	106	105	128	16	26	32	43
24	42	76	101	100	132	16	25	30	41
28	37	69	96	97	136	16	24	29	39
32	36	64	89	92	140	16	23	30	38
36	34	60	82	87	144	16	23	28	36
40	32	57	73	83	148	16	22	27	35
44	30	55	67	79	152	16	21	27	33
48	28	52	64	77	156	15	21	26	32
52	28	51	59	74	160	15	20	25	31
56	27	49	57	71	164	15	20	24	30
60	27	47	56	69	168	14	19	23	29
64	26	46	53	67	172	14	18	23	27
68	26	44	51	65	176	14	18	22	27
72	25	42	51	63	180	13	17	21	25
76	25	40	49	62	184	13	17	20	24
80	24	39	48	60	188	14	16	19	24
84	23	37	46	59	192	13	16	19	23
88	22	36	45	57	196	13	15	19	22
92	21	34	43	56	200	12	15	18	22
96	21	33	42	54	204	12	14	18	21
100	20	32	41	52	208	12	14	17	20
104	19	31	40	51	209	12	14	18	20

\* – номери термопар відповідно до рис. 3.14.

Таблиця Б.5. Температурні поля за двостороннього охолодження  
(внутрішнє – повітря,  $V = 0,0806 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Re = 1411$ )

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	118	118	119	118	20	38	69	96	98
4	96	111	118	117	24	34	65	87	95
8	75	101	116	114	28	32	60	78	90
12	51	90	113	109	32	30	56	71	85
16	43	79	107	103	36	29	53	65	82

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
40	28	50	59	78	112	17	27	31	45
44	27	46	55	76	116	17	27	30	44
48	26	43	52	72	120	16	27	30	43
52	26	41	49	71	128	16	25	28	40
56	25	39	46	69	136	16	24	26	37
60	23	38	44	68	140	15	23	26	35
64	23	36	42	65	144	15	23	25	34
68	23	34	40	63	152	14	21	24	32
72	22	33	38	61	156	14	21	23	31
76	22	33	37	60	164	14	20	20	29
80	21	32	37	58	168	14	19	20	28
84	21	31	36	56	172	13	19	19	27
92	20	30	35	54	184	13	17	18	24
96	20	30	34	52	188	13	17	18	23
100	19	29	33	51	196	13	16	17	22
104	18	28	32	49	200	13	16	16	21
108	19	28	31	47	204	13	15	16	20

\* – номери термопар відповідно до рис. 3.14.

#### Б.4. Дослідження двостороннього охолодження (внутрішнє – повітря, $D = 90$ мм)

Дослідний зразок – ПП-80 тип 3 (PPR) – клас 1/10 бар, S 2,5 – 90×15 – ДСТУ Б В.2.5-144:2007.

Охолодження зовнішньої поверхні здійснювали водою за умов вільної конвекції, внутрішньої – повітрям за різних швидкостей руху:

– температура охолодної води, °С	18
– температура охолодного повітря, °С	20
– об'ємна витрата охолодного повітря, м <sup>3</sup> /с	0,0497
– початкова температура труби, °С	100
– кінцева температура охолодження, °С	35

Таблиця Б.6. Температурні поля за двостороннього охолодження

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	100,0	85	24,3	70,9	96,4	96,1
25	46,6	95,2	100,0	100,0	135	21,9	61,5	87,3	92,6
53	28,4	82,5	99,2	98,6	200	20,6	54,6	82,5	84,1

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
241	20,0	51,8	78,1	80,4	815	16,4	30,6	41,3	41,0
282	19,2	48,7	73,7	76,3	856	16,3	29,8	39,6	39,2
323	18,8	46,1	70,1	72,9	897	16,1	28,9	38,1	37,4
364	18,4	44,1	66,7	69,5	938	16,0	28,2	36,5	35,8
405	18,1	42,5	63,6	66,4	979	15,9	27,4	35,2	34,1
446	17,8	40,9	60,9	63,3	1020	15,8	26,7	33,8	32,7
487	17,6	39,5	58,2	60,3	1061	15,7	26,0	32,6	31,4
528	17,4	38,2	55,7	57,5	1102	15,7	25,4	31,3	30,1
569	17,2	36,9	53,3	54,7	1143	15,6	24,8	30,2	28,8
610	17,1	35,7	51,0	52,0	1184	15,6	24,2	29,1	27,6
651	16,9	34,6	48,9	49,5	1225	15,5	23,6	28,2	26,6
692	16,8	33,5	46,9	47,2	1266	15,4	23,1	27,2	25,6
733	16,7	32,5	44,9	44,9	1307	15,3	22,6	26,3	24,6
774	16,5	31,5	43,0	42,9	1356	15,3	22,1	25,0	23,7

\* – номери термопар відповідно до рис. 3.14.

### Б.5. Дослідження двостороннього охолодження (внутрішнє – повітряно-водяна суміш, $D = 63$ мм)

Дослідний зразок – Труба ПЕ 80 SDR 11 – 63×5,8 технічна 12,5 бар ДСТУ Б В.2.7-151:2008.

Охолодження зовнішньої поверхні здійснювали водою за умов вільної конвекції, внутрішньої – повітряно-водяною сумішшю:

– температура охолодної води, °С	12
– температура повітряно-водяної суміші, °С	16
– об'ємна витрата води для повітряно-водяної суміші, м <sup>3</sup> /с	$64,9 \cdot 10^{-6}$
– об'ємна витрата повітря, м <sup>3</sup> /с	0,0497
– початкова температура труби, °С	118
– кінцева температура охолодження, °С	20

Таблиця Б.7. Температурні поля за двостороннього охолодження  
(внутрішнє – повітряно-водяна суміш)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	118	118	118	118	16	43	87	107	66
4	96	114	118	106	20	38	76	96	57
8	75	106	116	94	24	34	68	87	50
12	51	96	113	80	28	30	61	78	45

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
32	28	56	71	41	88	17	27	31	22
36	26	52	65	37	92	17	26	31	22
40	25	48	59	34	96	16	25	29	21
44	24	45	55	32	100	15	24	28	21
48	24	42	52	32	104	15	23	27	21
52	23	41	49	31	108	15	23	26	20
56	23	38	46	30	112	14	22	25	19
60	22	37	44	28	116	14	21	24	18
64	21	34	42	28	120	13	20	23	18
68	20	33	40	27	124	13	19	22	18
72	20	31	38	26	128	13	19	22	17
76	20	30	36	25	131	13	18	21	18
80	19	29	34	24	136	13	18	20	16
84	18	28	32	23	140	12	18	20	16

\* – номери термопар відповідно до рис. 3.14.

### Б.6. Дослідження двостороннього охолодження (внутрішнє – повітряно-водяна суміш, $D = 90$ мм)

Дослідний зразок – ПП-80 тип 3 (PPR) – клас 1/10 бар, S 2,5 – 90×15 – ДСТУ Б В.2.5-144:2007.

Охолодження зовнішньої поверхні здійснювали водою за умов вільної конвекції, внутрішньої – повітряно-водяною сумішшю:

– температура охолодної води, °С	15
– температура повітряно-водяної суміші, °С	16
– об'ємна витрата води для повітряно-водяної суміші, м <sup>3</sup> /с	$64,9 \cdot 10^{-6}$
– об'ємна витрата повітря, м <sup>3</sup> /с	0,0497
– початкова температура труби, °С	100
– кінцева температура охолодження, °С	25

Таблиця Б.8. Температурні поля за двостороннього охолодження  
(внутрішнє – повітряно-водяна суміш)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	100,0	100,0	100,0	100,0	76	25,0	79,5	92,4	57,4
13	63,4	98,8	99,4	81,8	102	23,3	72,2	87,6	53,3
39	33,4	95,9	98,1	67,7	128	22,3	67,0	81,3	49,9
55	27,9	88,9	95,9	61,7	154	21,5	62,3	75,2	46,8

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
180	20,8	58,1	69,7	44,1	388	17,2	36,0	37,9	28,4
206	20,0	54,7	64,1	41,4	414	17,0	33,9	35,5	27,1
232	19,5	51,3	59,4	39,2	466	16,5	30,4	31,3	24,8
258	19,0	48,5	54,9	37,0	492	16,3	28,9	29,6	23,8
284	18,6	45,9	50,9	35,0	518	16,1	27,4	28,0	22,9
310	18,2	43,3	47,1	33,2	544	16,0	26,2	26,6	22,1
336	17,9	40,7	43,8	31,5	570	15,9	25,1	25,3	21,6
362	17,5	38,2	40,7	29,9	592	16,0	24,6	24,9	21,2

\* – номери термопар відповідно до рис. 3.14.

### Б.7. Дослідження двостороннього охолодження (внутрішнє – вода, $D = 63$ мм)

Дослідний зразок – Труба ПЕ 80 SDR 11 –  $63 \times 5,8$  технічна 12,5 бар ДСТУ Б В.2.7-151:2008.

Охолодження зовнішньої поверхні здійснювали водою за умов вільної конвекції, внутрішньої – водою:

– температура охолодної води, °С	12
– об'ємна витрата охолодної води, м <sup>3</sup> /с	$0,45 \cdot 10^{-3}$
– початкова температура труби, °С	118
– кінцева температура охолодження, °С	20

Таблиця Б.9. Температурні поля за двостороннього охолодження (внутрішнє – вода)

Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С				Час охолодження $\tau$ , с	Температура стінки на відповідному шарі, °С			
	1*	2*	3*	4*		1*	2*	3*	4*
0	118	118	118	118	54	34	45	44	33
2	83	118	118	82	56	33	43	42	32
5	78	117	117	77	63	29	36	38	28
7	74	115	115	73	65	28	35	36	27
12	68	110	109	67	72	25	32	31	24
16	64	103	102	63	79	21	28	27	19
21	61	96	94	59	84	19	26	25	18
26	57	87	86	56	89	17	24	24	16
30	53	78	77	51	91	16	24	22	16
37	46	66	65	45	98	14	21	21	15
40	44	62	61	43	101	14	20	20	13
47	39	53	52	38	105	13	19	19	12
51	36	47	47	35	108	13	19	19	13

\* – номери термопар відповідно до рис. 3.14.

## ДОДАТОК В. РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

### В.1. Методика розрахунку похибок вимірювання фізичних величин

Визначення похибки середнього результату вимірювань (як прямих, так і непрямих) фізичних величин здійснюємо за методикою, наведеною в праці [153].

Так, похибку середнього результату прямих вимірювань фізичних величин виконуємо в такій послідовності.

Дослідно-інструментальну помилку середнього результату вимірювань фізичної величини  $\bar{x}$  визначають за залежністю

$$\sigma_{\text{дпп}}(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2}, \quad (\text{В.1})$$

де  $\sigma_{\text{пвп}}$ ,  $\sigma_{\text{пр}}$ ,  $\sigma_{\text{окр}}$  – похибки первинного вимірювального перетворювача, приладу та округлення, відповідно:

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3}, \quad (\text{В.2})$$

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left( \frac{\gamma_0}{100} D_{\text{вим}} \right), \quad (\text{В.3})$$

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}}. \quad (\text{В.4})$$

де  $\Delta_{\text{дпп}}$  – довідникова похибка приладу;  $\gamma_0$  – клас точності приладу;  $D_{\text{вим}}$  – діапазон вимірювання приладу;  $C$  – ціна поділки шкали (ступінь дискретизації цифрового відліку) приладу.

Випадкова помилка середнього результату становить

$$\theta(\bar{x}) = \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}. \quad (\text{В.5})$$

де  $x_i$  –  $i$ -й результат вимірювання;  $\xi$  – коефіцієнт Стюдента, який залежить від довірчої імовірності  $P_d$  і кількості вимірювань  $n$ .

Повна похибка прямого вимірювання фізичної величини обчислюється за формулою

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{дпп}}^2(\bar{x}) + \theta^2(\bar{x})}, \quad (\text{В.6})$$

а значення фізичної величини для довірчої імовірності 0,6826 становитиме

$$x = \bar{x} \pm \sigma(\bar{x}). \quad (\text{В.7})$$

Похибку середнього результату непрямих вимірювань фізичних величин виконуємо в такій послідовності.

Дослідно-інструментальну помилку середнього результату вимірювань фізичної величини  $\bar{x}$  визначають за формулою

$$\sigma_{\text{дип}}(\bar{x}) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{\text{дип}}^2(x_1) + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{\text{дип}}^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_k}\right)^2 \sigma_{\text{дип}}^2(x_k)}, \quad (\text{B.8})$$

де  $x = F(x_1, x_2, \dots, x_k)$  – залежність шуканої величини  $x$  від величин  $x_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ), що вимірюють безпосередньо.

Випадкова помилка середнього результату в цьому разі становить

$$\theta(\bar{x}) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \theta^2(x_1) + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \theta^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_k}\right)^2 \theta^2(x_k)}. \quad (\text{B.9})$$

Остаточну повну похибку непрямого вимірювання фізичної величини з урахуванням (B.8) і (B.9) визначають за залежністю (B.6), а значення фізичної величини для довірчої імовірності 0,6826 – за залежністю (B.7).

## В.2. Розрахунок похибки вимірювання температури труби

Похибка первинного вимірювального перетворювача згідно з (B.2) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дип}}}{3} = \pm \frac{0,52}{3} = \pm 0,17 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де довідникова похибка приладу I-7018 становить

$$\Delta_{\text{дип}} = \pm \left( \frac{0,15 - 0,05}{100} |T_{\text{в}}| + \frac{0,05}{100} |T_{\text{к}}| \right) = \pm \left( \frac{0,15 - 0,05}{100} |120| + \frac{0,05}{100} |800| \right) = \pm 0,52 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де  $T_{\text{в}}$  – контрольоване значення параметра (максимальне значення температури труби становило  $120 \text{ } ^\circ\text{C}$ );  $T_{\text{к}}$  – більша (за модулем) з границь вимірювань.

Похибка приладу згідно з (B.3) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left( \frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left( \frac{0,15}{100} \cdot 850 \right) = 0,43 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де  $D_{\text{вим}} = T_{\text{в}} - T_{\text{н}} = 800 - (-50) = 850 \text{ } ^\circ\text{C}$  (тут  $T_{\text{н}}$  і  $T_{\text{в}}$  – нижня і верхня границі вимірювання приладу).

Похибка округлення згідно з (B.4) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} = 0,03 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (B.1)

$$\sigma_{\text{дип}}(\bar{T}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,17^2 + 0,43^2 + 0,03^2} = 0,46 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тепер визначимо величину випадкової помилки середнього результату вимірювання температури в стінці труби. Для визначення випадкової похибки проводили три вимірювання зазначеної температури, які в одному з дослідів становили  $86,1$ ;  $85,8$ ;  $85,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ , відповідно.

Середнє арифметичне температури становить

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i = \frac{1}{3}(86,1 + 85,8 + 85,9) = 85,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить

$$\begin{aligned} \theta(\bar{T}) &= \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{T} - T_i)^2} = \\ &= 1,3 \sqrt{\frac{1}{3(3-1)} [(85,9 - 86,1)^2 + (85,9 - 85,8)^2 + (85,9 - 85,9)^2]} = 0,12 \text{ } ^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

де  $\xi=1,3$  – значення коефіцієнта Стьюдента для  $P_d = 0,6826$  і  $n = 3$  [153].

Повна похибка прямого вимірювання температури (див. (В.6))

$$\sigma(\bar{T}) = \sqrt{\sigma_{\text{дін}}^2(\bar{T}) + \theta^2(\bar{T})} = \sqrt{0,46^2 + 0,12^2} = 0,48 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Значення температури в стінці труби відповідно до (В.7) становить

$$T = \bar{T} \pm \sigma(\bar{T}) = \bar{T} \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

У більшості вимірювань фізичних величин значення випадкової помилки їх середнього результату, як і у випадку, що розглянуто, значно менше від значення дослідно-інструментальної помилки, тому надалі для визначення повної похибки прямого вимірювання фізичних величин братимемо до уваги тільки дослідно-інструментальну помилку, тобто приймаємо, що  $\sigma(\bar{x}) = \sigma_{\text{дін}}(\bar{x})$ .

### **В.3. Розрахунок похибки вимірювання глибини запаювання термопар у стінці труби**

Похибка мікрометра ГОСТ 6507–90 становить [154]

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left( \frac{C}{2} \right) = \frac{1}{3} \left( \frac{0,01}{2} \right) = 0,002 \text{ мм}.$$

Похибка округлення згідно з (В.4) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,01}{\sqrt{12}} = 0,003 \text{ мм}.$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (В.1)

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{h}) = \sqrt{\sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,002^2 + 0,003^2} = 0,0036 \text{ мм}.$$

Значення глибини запаювання термопар становить (див. п. В.2)

$$h = \bar{h} \pm \sigma(\bar{h}) = \bar{h} \pm 0,004 \text{ мм}.$$

#### **В.4. Розрахунок похибки вимірювання температури охолодного середовища**

Похибка лабораторного термометра ГОСТ 13646–68 становить [154]

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left( \frac{C}{2} \right) = \frac{1}{3} \left( \frac{0,2}{2} \right) = 0,03 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Похибка округлення згідно з (В.4) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,2}{\sqrt{12}} = 0,06 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (В.1)

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{T}_{\text{ср}}) = \sqrt{\sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,03^2 + 0,06^2} = 0,07 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Значення температури охолодного середовища становить (див. п. В.2)

$$T_{\text{ср}} = \bar{T}_{\text{ср}} \pm \sigma(\bar{T}_{\text{ср}}) = \bar{T}_{\text{ср}} \pm 0,07 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

#### **В.5. Розрахунок похибки вимірювання об'ємної витрати охолодної води**

Похибка ротаметра ДСТУ ГОСТ 13045:2009 становить

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left( \frac{C}{2} \right) = \frac{1}{3} \left( \frac{0,1}{2} \right) = 0,017 \text{ л/хв.}$$

Похибка округлення згідно з (В.4) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} = 0,03 \text{ л/хв.}$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (В.1)

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{V}) = \sqrt{\sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,017^2 + 0,03^2} = 0,04 \text{ л/хв.}$$

Значення об'ємної витрати охолодної води становить (див. п. В.2)

$$V = \bar{V} \pm \sigma(\bar{V}) = \bar{V} \pm 0,04 \text{ л/хв.}$$

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Югени Ж.-К. Более 20 лет опыта распределения природного газа по полиэтиленовым трубам / Ж.-К. Югени // Полимергаз. — 2000. — № 3. — С. 28—31.
2. Михасёнок О. Я. Тенденции индустрии пластмасс / О. Я. Михасёнок // Полимерные материалы. — 2003. — № 2. — С. 4—8.
3. Смирнова Г. Применение новых технологий при реконструкции тепловых сетей на предприятиях теплоэнергетического комплекса / Г. Смирнова // Полимерные трубы. — 2005. — № 1. — С. 7—8.
4. Адриади Ю. Применение труб из полимерных материалов в инженерных сетях / Ю. Адриади // Полимерные трубы. — 2005. — № 2. — С. 3—8.
5. Сасов Ю. Будущее тепловых сетей первой столицы Украины / Ю. Сасов // Полимерные трубы. — 2009. — № 3. — С. 62—63.
6. Мурашов Р. Полимерные трубы. Классификация и назначение / Р. Мурашов // Строительная Инженерия. — 2004. — С. 12—16.
7. Двойнос Я. Дело – Труба / Я. Двойнос // Пластикс. — 2002. — № 1. — С. 30—36.
8. Коврига В. Применение полимерных материалов в производстве труб различного назначения / В. Коврига, И. Гвоздев // Полимерные трубы. — 2003. — № 1. — С. 16—20.
9. Швабауэр В. В. Новое в технике и технологии производства труб из термопластов / В. В. Швабауэр // Пластические массы. — 2006. — № 10. — С. 22—26.
10. Бисеров В. Т. Охлаждение полимерных труб в процессе их производства методом экструзии / В. Т. Бисеров, И. В. Гвоздев, М. И. Горюловский, В. А. Швабауэр // Полимерные трубы. — 2008. — № 1. — С. 18—20.
11. Кольвах И. Трубное производство / И. Кольвах, Г. Соловьёв // Полимерные трубы. — 2007. — Спецвыпуск, сентябрь. — С. 13—19.
12. Хэдер В. Cincinnaty Extrusion: для разных типов полиолефиновых труб – оптимальный экструдер / В. Хэдер // Инженерные сети из полимерных материалов. — 2010. — № 27. — С. 8—13.
13. 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.
14. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії: навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / Радченко Л. Б. — К.: ІЗМН, 1999. — 220 с.
15. Володин В. П. Экструзия профильных изделий из термопластов / В. П. Володин. — СПб : Профессия, 2005. — 480 с.
16. Ким В. С. Теория и практика экструзии полимеров / В. С. Ким. — М. : Химия, КолосС, 2005. — 568 с.
17. Биргер И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. — М. : Машгиз, 1963. — 232 с.
18. Бортников В. Г. Основы технологии переработки пластических масс : учеб. пособ. для вузов / В. Г. Бортников. — Л. : Химия, 1983. — 304 с.

19. Петухов А. Д. Рынок трубного полимерперерабатывающего оборудования в Украине — сегодня / А. Д. Петухов, М. В. Сезонов // Полимерные трубы. — 2008. — № 2. — С. 23—27.
20. Доброногова С. И. Расчет процесса охлаждения полимерных труб / С. И. Доброногова, К. Ю. Жемгулис, А. Г. Чепижный // Хим. машиностроение : респ. межвед. науч.-техн. сб. — 1983. — Вып. 38. — С. 42—46.
21. Заявка на изобретение № 2007111578 Россия, МПК<sup>8</sup> В 29 В 47/00. Способ изготовления полимерных труб и устройство для его осуществления / М. И. Горилковский, В. А. Швабауэр, В. Т. Бисеров, И. В. Гвоздев ; заявитель и патентообладатель ЗАО «Завод АНД Газтрубпласт» — № 2007111578/12 ; заявл. 29.03.2007 ; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 28.
22. Pat. № 1916089 (EP), Int. Cl<sup>8</sup> В 29 С 47/88. Vorrichtung zur Extrudieren von Hohlstrangen / Brigitte Diekhaus (DE), Jorg Schmuhl (DE) ; Anmelder INOEX GmbH (DE). — № 07015837.3 ; filed 11.08.2007 ; Veröffentlichungstag 30.04.2008, Patentblatt 2008/18.
23. Применение полиэтиленовых труб при строительстве и эксплуатации артезианских скважин // Мастерская. — 2005. — № 4. — С. 22—23.
24. Водопровод на основе полиэтиленовых труб // Мастерская. — 2006. — № 1. — С. 52—53.
25. Прокладка трубопровода под водой // Мастерская. — 2006. — № 8. — С. 78—79.
26. Willoughby D. A. Plastic Piping Handbook / D. A. Willoughby. — New York: McGraw-Hill Publications, 2002. — 205 p.
27. Хольгер Мальмстен Пластмассовые трубы, их характеристики и область применения / Мальмстен Хольгер. — Стокгольм: Северное объединение производителей пластмассовых труб, 2000. — 116 с.
28. Любченко А. Строительство дюкера / А. Любченко // Полимерные трубы. — 2008. — № 3. — С. 74—77.
29. Якушева-Соренсен Т. История водоотведения и водоснабжения государственного Эрмитажа / Т. Якушева-Соренсен // Полимерные трубы. — 2007. — № 4. — С. 76—83.
30. Шмелев А. Касафлекс – гибкая альтернатива для сетей отопления / А. Шмелев // Полимерные трубы. — 2008. — № 4. — С. 24—30.
31. Фаттахов М. М. Создание и использование пластмассовых трубопроводов в нефтегазовой отрасли России : автореф. дис. на соиск. уч. степ. док. техн. наук : спец. 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» / М. М. Фаттахов. — Уфа, 2009. — 37 с.
32. Хрустов Ю. Поведение полиэтиленового трубопровода при землетрясении / Ю. Хрустов, Е. Бутринов, В. Коврига // Полимерные трубы. — 2008. — № 3. — С. 1—6.
33. Завизенов К. В. Обзор некоторых аспектов производства труб для нефтяной промышленности / К. В. Завизенов // Территория НЕФТЕГАЗ. — 2004. — № 10. — С. 25—32.

34. Фаизов Р. Б. Актуальность и экономические аспекты проблемы коррозии и защиты металлических сооружений / Р. Б. Фаизов // Нефть. Газ. Промышленность. — 2004. — № 3. — С. 35—40.
35. ЛаМантиа Ф. Вторичная переработка пластмасс / Ф. ЛаМантиа ; [пер. с англ. Г. Е. Заикова]. — СПб : Профессия, 2006. — 400 с.
36. Голованов А. В. Эффективные полимерные трубы на основе вторичных полиолефинов : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» / Голованов Андрей Владиславович. — М., 2010. — 143 с.
37. CHOI K. K. Fire Stops for Plastic Pipe / K. K. CHOI // Fire Technology. — 1987. — № 4. — P. 267—279.
38. Scheelen A. Facilitating the pipe system choice of European water engineers / A. Scheelen // European Plastics News. — Belgium, 2005. — P. 105—121.
39. Beech S. H. Polyethylene pipeline systems – the big success story / S. H. Beech, J. N. Duncan, J. B. Millar // Plastics Pipes XI. — Munich, Germany, 2001. — P. 113—122.
40. Горилловский М. Повышение эффективности и инновации – необходимые условия выживания / М. Горилловский, К. Трусов // Полимерные трубы. — 2009. — № 1. — С. 8—14.
41. Горилловский М.И. Перспективы развития производства и потребления полиэтиленовых труб в России / М. И. Горилловский, С. В. Топалов // Пластические массы. — 2003. — № 7. — С. 3—5.
42. Gabriel L. H. Service life of drainage pipe / L. H. Gabriel, E. T. Moran. — Washington : Transportation Research Board, 1998. — 139 p.
43. Church R. Residential PEX Water Supply Plumbing Systems: Design guide / R. Church, M Cudahy, L MacNevin. — Irving : PPI, 2006. — 128 p.
44. Каган Д. Ф. Трубопроводы из пластмасс / Д. Ф. Каган. — М. : Химия, 1980. — 296 с.
45. Starck P. Thermal properties of ethylene / long chain  $\alpha$ -olefin copolymers produced by metallocenes / P. Starck, B. Lofgren // European Polymer Journal. — 2002. — Vol. 38, N 1. — P. 97—107.
46. Hubert L. Physical and mechanical properties of polyethylene for pipes in relation to molecular architecture. I. Microstructure and crystallization kinetics / L. Hubert, L. David, R. Seguela, G. Vigier, C. Degoulet, Y. Germain // Polymer. — 2001. — Vol. 42, N 20. — P. 8425—8434.
47. Гвоздев И. Трубные марки полиэтилена типа ПЭ-100 / И. Гвоздев // Полимергаз. — 2001. — № 1. — С. 19—21.
48. Гвоздев И., Производство труб большого диаметра из полиэтилена / И. Гвоздев, В. Швабауэр // Полимерные трубы. — 2004. — № 1. — С. 4—7.
49. Honda H. The evolution and present stats of polyethylene (PE) water pipes in Japan / H. Honda // Plastics Pipeline Systems for the Millennium X: Svenska Mässan Centre Göteborg. — Sweden, 1998. — P. 29—38
50. Горилловский М. Трубы из ПЭ-80 и ПЭ-100. Новый взгляд на теорию и практику применения / М. Горилловский, И. Гвоздев // Полимерные трубы. — 2004. — № 4. — С. 22—24.

51. Le Roux D. PE-100 opens new Horizons for Plastic Pipes / D. Le Roux, L. E. Ahlstrand, H. Espersen // *Plastics Pipeline Systems for the Millennium X: Svenska Mässan Centre Göteborg*. — Sweden, 1998. — P. 9—21.
52. Laurent E. Comprehensive evaluation of the long-term mechanical properties of PE 100 resins meeting the requirements of modern installation techniques / E. Laurent // *Plastics Pipes XI*. — Munich, Germany, 2001. — P. 63—73.
53. Производство изделий из полимерных материалов / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко. — СПб : Профессия, 2008. — 464 с.
54. Шварц О. Переработка пластмасс / О. Шварц, Ф-В. Эмбелинг, Б. Фурт. — СПб : Профессия, 2008. — 320 с.
55. Горилловский М. И. Разработка оптимизированных технологических процессов производства напорных труб различного диаметра из сополимеров этилена с бутеном и гексеном и сшитого полиэтилена : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.06 «Технология и переработка полимеров и композитов» / Горилловский Мирон Исаакович. — М., 2006. — 149 с.
56. Кикель В. В. Долговечностью при высоких температурах эксплуатации : автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.17.06 «Технология и переработка полимеров и композитов» / В. В. Кикель. — М., 2007. — 19 с.
57. Pat. № 10312700 DE, Int. Cl<sup>7</sup> F 16 L 9/147, Kunststoffrohr / Rudi Roberto (CH), Bolli Anga (CH); applicant Brugg Rohr AG Holding (CH). — № 20031012700; application date 21.03.2003; publication date 30.09.2004.
58. Бухин В. В. Новое в производстве и применении труб из полимерных материалов / В. В. Бухин // *Трубопроводы и экология*. — 2002. — № 2. — С. 26—32.
59. Рябец Ю. С. Несущая способность и долговечность металлопластовых труб / Ю. С. Рябец, В. Т. Антонов, Н. И. Маширов // *Полимергаз*. — 2004. — № 2. — С. 12—14.
60. Pat. № 2154401 EP, Int. Cl<sup>8</sup> F 16 L 9/12, Faserverstärktes Kunststoffrohr. / Tomas Simoner (AT); applicant Hobas Engineering GmbH (AT). — № 09008591.1; application date 01.07.2009; publication date 17.02.2010.
61. Gibson A.G. Continuous fibre reinforced thermoplastic pipes (RTPs) for use in the transport and distribution of fluids for the oil and gas industries / A. G. Gibson // *Plastics Pipeline Systems for the Millennium X: Svenska Mässan Centre Göteborg*. — Sweden, 1998. — P. 679—687.
62. Третьяков А. Полимерные гофрированные трубы. — *Полимеры – деньги*. — 2006. — № 1. — С. 7—14.
63. Янин О. Профилированные трубы для водоотведения и канализации. Проблемы эффективного применения и особенности расчета на прочность / О. Янин, Е. Бутринов // *Полимерные трубы*. — 2009. — № 2 (11). — С. 28—33.
64. Сезонов М. В. Полимерные канализационные трубы – предложение есть. Что же выбрать? / М. В. Сезонов // *Полимерные трубы*. — 2009. — № 1. — С. 46—51.
65. Основы технологи переработки пластмасс: учеб. для ВУЗов / С.В. Власов, Л.Б. Кандырин, В.Н. Кулезнев и др. — М : Химия, 2004. — 600 с.

66. Масенко Л. Я. Гофрированные трубы из пластмасс / Л. Я. Масенко. — М : Химия, 1989. — 88 с.

67. Pat. № 82,535/59 (EP), Int. Cl<sup>1</sup> B 29 F 3/02. Screw for extrusion apparatus / Maillefer Charles E. (CH). — № 82535 ; application date 12.03.1959 ; publication date 31.12.1959.

68. Готовко Н. Анализ работы современного одношнекового экструдера / Н. Готовко, В. Швабауер // Полимерные трубы. — 2008. — № 4(9). — С. 33—36.

69. Pat. № 2009040235 (WO), Int. Cl<sup>8</sup> B 29 C 47/62. Extruder screw for machines extruding plastics material / Gumina Antonio (IT), Paoletti Stefano (IT) ; applicant SAMP S.P.A (IT). — № 2008EP61852 ; application date 08.09.2008 ; publication date 04.02.2009. 2009040235

70. Пат. № 1737 Україна, МПК<sup>7</sup> В 29 С 47/60. Черв'як екструдера для перероблення полімерних матеріалів / І. О. Мікульонок, В. О. Новік, Л. Б. Радченко, В. І. Сівецький ; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» (UA). — № u 2002 075454 ; заявл. 03.07.2002 ; опубл. 15.04.2003., Бюл. № 4.

71. Pat. № 102008038529 (DE), Int. Cl<sup>8</sup> B 29 C 47/66. Einschneckenextruder / Schneider, Florian ; applicant KraussMaffei Technologies GmbH . — № 102008038529.8 ; application date 20.08.2008 ; publication date 05.11.2009.

72. Рябинин Д. Д. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей / Д. Д. Рябини, Ю. Е. Лукач. — М. : Машиностроение, 1965. — 364 с.

73. Раувендаль К. Экструзия полимеров / К. Раувендаль ; пер. с англ. ; под ред. А. Я. Малкина. — СПб. : Профессия, 2006. — 768 с.

74. Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины: Конструкции и технические расчеты / В. Микаэли ; пер. с англ. ; под ред. В. П. Володина. — СПб. : Профессия, 2007. — 472 с.

75. Пат. № 25417 Україна, МПК (2006) В 29 С 47/14. Екструзійна головка / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, С. В. Півненко ; заявник і патентовласник Нац. технік. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u 2007 03007 ; заявл. 22.03.2007 ; опубл. 10.08.2007., Бюл. № 12.

76. MAXFLEXX: максимальная гибкость благодаря инновационным средствам экструзии [Электронный ресурс]. — Дата доступа : вересень 2010 р. — Режим доступа:

<http://www.inoex.de/ru/maxflexx/>.

77. Басов Н.И. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов / Н. И. Басов, Ю. В. Казанков, В. А. Любартович — М. : Химия, 1986. — 488 с.

78. Пат. № 2165355 (RU), МПК<sup>7</sup> В 29 С 47/90. Трубный калибровочный блок для машин, предназначенных для экструзии пластмассовых изделий, таких как труб / Кнуд Кристиан Педерсен (DK) ; заявитель Кнуд Кристиан Педерсен (DK). — № 97120557/12 ; заявл. 17.05.1996 ; опубл. 20.04.2001.

79. Pat. № 102005062138 (DE), Int. Cl<sup>8</sup> B 29 C 47/90. Kalibrierhülse für extrudierte Kunststoffrohre / Schmuhl, Jörg, Michels, Rolf, Möller, Jörg ; applicant Inoex

GmbH (DE). — № 102005062138.4 ; application date 22.12.2005 ; publication date 05.07.2007.

80. Пат. № 1356366 (SU), МПК<sup>4</sup> В29С 47/88. Установка для непрерывного изготовления труб из термопластических материалов / Е.П Дибан, В.Г. Зверлін, В.Н. Корпухов, А.И. Мазур ; заявитель Институт технической теплофизики АН УССР. — № 1356366; заявл. 31.05.1986 ; опубл. 12.08.1986 .

81. Pat. № 5164204 (US), Int. Cl<sup>5</sup> В29С 53/30. Modular corrugator / Rainer Werpert, Gerhard Henninger; applicant Frankische Rohrwerke Gebr. Kirchner GmbH & Co (DE). — № 5164204; application date 12.08.1990 ; publication data 21.03.1991.

82. Заявка № 20040241266 (US), Int. Cl<sup>7</sup> В29С 47/90. Mobile impression half-mould for a corrugator for making pipes with transverse ribs / Gerhard Neubauer (DE), Klaus Kaufmann (DE); applicant Gerhard Neubauer (DE), Klaus Kaufmann (DE). — № 10/491,066 ; application date 29.09.2001 ; publication date 02.12.2004.

83. Заявка № 2004045828 (WO), Int. Cl<sup>7</sup> В29С 47/12. Molding apparatus with mold blocks having profiled face adjustment / Lupke, Manfred, A. (CA), Lupke, Stefan. A (CA) ; applicant / Lupke, Manfred, A. (CA), Lupke, Stefan. A (CA). — № PCT/CA2003/001719 ; application date 12.11.2003 ; publication date 03.06.2004.

84. Pat. № 6652258 (US), Int. Cl<sup>7</sup> В29С 47/90. Mold blocks for thermoforming large diameter corrugated plastic pipe /Joseph M. Starita (US); applicant Joseph M. Starita (US). — № 09/579,782 ; application date 26.05.2000 ; publication date 25.11.2003.

85. Пат. № 18744 Україна, МПК (2009) В 29 С 35/00. Пристрій для охолодження довговимірних виробів / І. О. Мікульонок ; заявник і патентовласник Нац. технік. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u 2006 06030 ; заявл. 31.05.2006 ; опубл. 15.11.2006., Бюл. № 11.

86. Pat. № 2002144408 (JP), Int. Cl<sup>7</sup> В 29 С 47/88. Method and device for cooling extrusion molded pipe / Oki Makoto ; applicant Mitsubishi Plastics Ind Ltd. — № 20000346599 ; application date 14.11.2000 ; publication date 21.05.2002.

87. Пат. № 53879 Україна, МПК (2006) В 29 С 35/00. Пристрій для охолодження полімерних труб / І. О. Мікульонок, В. Т. Вознюк ; заявник і патентовласник Нац. технік. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u201003423 ; заявл. 24.03.2010 ; опубл. 25.10.2010., Бюл. № 20.

89. Pat. № 6019934 (US), Int. Cl<sup>8</sup> В1 В 29 С 47/78. Hollow extrusion using internal coolant / Ulrich Schulte (DE) ; applicant Hoechst Aktiengesellschaft (DE). — № 08/795,278 ; application date 04.02.1997 ; publication date 01.02.2000.

90. Pat. № 1562731 (EP), Int. Cl<sup>8</sup> В1 В 29 С 47/90. Pipe molding apparatus with mold tunnel air turbulence / Lupke Manfred Arno Alfred (CA), Lupke, Stefan (CA) — № 03770832.8 ; application date 17.08.2005 ; publication date 02.05.2007., bulletin 2007/18.

91. Pat. № 1916089 (EP), Int. Cl<sup>8</sup> В 29 С 47/88. Vorrichtung zun Extrudieren von Hohlstrangen / Brigitte Diekhaus (DE), Jorg Schmuhl (DE) ; applicant INOEX GmbH (DE). — № 07015837.3 ; publication date 11.08.2007 ; publication date 30.04.2008, bulletin 2008/18.

92. Мікульонок І. О. Моделювання термообробки погонних композитних матеріалів / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко, Л. І. Ружинська // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — № 2. — С. 66—71.
93. Виноградов В. М. Остаточные напряжения в деталях из пластических масс / В. М. Виноградов // Пластические массы. — 1975. — № 4. — С. 20—31.
94. Огибалов П. М. Конструкционные полимеры: методы экспериментального исследования / П. М. Огибалов, Н. И. Малинин, В. П. Нетребко, Б. П. Кишкин ; Под ред. П.М. Огибалова. — М. : Изд-во МГУ, 1972. — 327 с.
95. Кербер М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учеб. пособие / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г.С. Головкин. — СПб. : Профессия, 2009. — 560 с.
96. Освальд Т. Литье пластмасс под давлением / Т. Освальд, Л.-Ш. Турнг, П. Дж. Грэмман ; пер. с англ. ; под ред. Э. Л. Калинцева. — СПб. : Профессия, 2005. — 712 с.
97. Устюгов В. А. Моделирование процессов деформирования и повреждения полимерных труб при термомеханических нагрузках : автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук : спец. 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» / В. А. Устюгов. — Ижевск, 2004. — 27 с.
98. Бисеров Б. Т. Процесс стекания расплава при экструзии крупногабаритных труб из полиэтилена / Б. Т. Бисеров, М. И. Горилловский, Швабауэр В. В. // Полимерные трубы. — 2005. — № 1. — С. 8—11.
99. Торнер Р. В. Оборудование заводов по переработке пластмасс / Р. В. Торнер, М. С. Акутин. — М. : Химия, 1986. — 400 с.
100. Лукач Ю. Е. Методические указания по проведению НДРС по курсу «Машины и аппараты химических производств. Исследование процесса производства полимерных труб» / составители Ю. Е. Лукач, С. И. Доброногова, Е. А. Назаренко и др. — К. : КПИ, 1984. — 44 с.
101. Исаченко В. П. Теплопередача : учеб. для вузов / В. П. Исаченко, А. А. Осипова, А. С. Сукомел. — М. : Энергоиздат, 1981. — 416 с.
95. Ройзен Л. И. Тепловой расчет оребренных поверхностей / Л. И. Ройзен, И. Н. Дулькин ; под ред. В. Г. Фастовского. — М. : Энергия, 1977. — 256 с.
102. Золотоносов А. Я. Математическая модель теплопроводности в длинном ребре переменной высоты с учетом изменения условий теплообмена / А. Я. Золотоносов, Я. Д. Золотоносов, Т. В. Белавина // Известия КазГАСУ. — 2009. — № 2(12). — С. 190—196
103. Письменный Е. Н. Расчет конвективных поперечно-оребранных поверхностей нагрева / Е. Н. Письменный. — К. : Альтерпрес, 2003. — 181 с.
104. Письменный Е. Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребранных труб / Е. Н. Письменный. — К. : Альтерпрес, 2004. — 244 с.
105. Цветков Ф. Ф. Тепломассообмен : учеб. пособ. для вузов / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. — М. : Издательство МЭИ, 2005. — 550 с.
106. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. — Л. : Химия, 1987. — 576 с.

107. Исаченко В.П. Струйное охлаждение / В.П. Исаченко, В.И. Кушнырев. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 216 с.
108. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд ; пер. с англ. А. А. Шестакова ; под ред. Б. Е. Победри. — М. : Мир, 1979. — 392 с.
109. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич ; пер. с англ. ; под ред. Б. Е. Победри. — М. : Мир, 1975. — 541 с.
110. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Стренг Г., Фикс Дж. ; пер. с англ. В. И. Агошкова и др. ; под ред. Г. И. Марчука. — М. : Мир, 1977. — 349 с.
111. Норри Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз ; пер. с англ. Г. В. Демидова, А. Л. Урванцева ; под ред. Г. И. Марчука. — М. : Мир, 1981. — 304 с.
112. Калиткин Н. Н. Численные методы : учеб. пособие / Н. Н. Калиткин ; под ред. А. А. Самарского. — М. : Наука, 1978. — 512 с.
113. Панов Є. М. Числове моделювання теплоелектричного стану алюмінієвих електролізерів / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, І. В. Пулінець // Вісник НТУУ “КПІ”. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження : зб. наук. праць. — 2009. — №2(4). — С. 59—65.
114. Карвацький А. Я. Теплоелектричний та механічний стан високотемпературних енергоємних промислових агрегатів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.05.13 «Машини та апарати хімічних виробництв» / А. Я. Карвацький. — К., 2010. — 40 с.
115. Турчак Л.И. Основы численных методов / Л.И. Турчак — М. : Наука, 1987. — 320 с.
116. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар ; пер. с англ. ; под ред. В.Д. Виленского. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
117. Тьюарсон Р. Разреженные матрицы / Р. Тьюарсон ; пер. с англ. — М. : Мир, 1977. — 190 с.
118. Джордж А. Численное решение больших разреженных систем уравнений / А. Джордж, Дж. Лю ; пер. с англ. Х. Д. Икрамова. — М. : Мир, 1984. — 334 с.
119. Райс Дж. Матричные вычисления и математическое обеспечение / Дж. Райс ; пер. с англ. О. Б. Арушаняна. — М. : Мир, 1984. — 264 с.
120. Уилкинсон Р. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра / Р. Уилкинсон ; пер. с англ. ; под ред. Ю. И. Топчеева. — М. : Машиностроение, 1976. — 389 с.
121. Труби безнапірні з поліпропілену, поліетилену, непластифікованого полівінілхлориду та фасонні вироби до них для зовнішніх мереж каналізації будинків і споруд та кабельної каналізації. Технічні умови : ДСТУ Б В.2.5-32:2007. — [Чинний від 2007-09-03]. — К. : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2007. — 112 с. — (Національний стандарт України).
122. Володин В. П. Экструзия пластиковых труб и профилей / В. П. Володин — СПб. : Профессия, 2010. — 240с.
123. Уилоуби Д. Полимерные трубы и трубопроводы / Дэвид Уилоуби. — СПб. : Профессия, 2010. — 485с.

124. Волков Е.А. Численные методы : учеб. пособие / Е.А. Волков. — М. : Наука, 1987. — 248 с.
125. Труби поліетиленові для подачі холодної води. Технічні умови : ДСТУ Б В.2.7-151:2008. — [Чинний від 2009-06-01]. — К. : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2009. — 33 с. — (Національний стандарт України).
126. Труби поліетиленові для подачі горючих газів. Технічні умови : ДСТУ Б В.2.7-73-98. — [Чинний від 1998-10-28]. — К. : Держбуд України, 1998. — 44 с. — (Національний стандарт України).
127. Справочник по пластмассовым трубам / под ред. Г. Лауэра ; пер. с нем. под. ред. В.С. Кима. — Л. : Химия, 1985. — 248 с.
128. Моделювання охолодження проводів і кабелів / Л. Г. Воронін, І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко, Л. І. Ружинська // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — № 6. — С. 32—39.
129. Мікульонок І. О. Матеріали і виробли, одержувані неперервним формуванням. Аналіз умов охолодження / І. О. Мікульонок // Хімічна промисловість України. — 2006. — № 4. — С. 33—37.
130. Математичне моделювання енергоефективних процесів утилізації полімерних відходів через виготовлення спінених композиційних матеріалів : звіт про НДР (заключ.) : 2383 / Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т» ; кер. І. О. Мікульонок ; викон.: В. В. Лукашова [та ін.]. — К., 2010. — 215 с. — № 0109U000374.
131. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. — [изд. 2-е, перераб. и доп.]. — Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. — 304 с.
132. Corrugated Plastic Pipe Machines: проспект фірми DROSSBACH GMBH & Co. — [Б. м.: б. и.], 2009. — 12 с.
133. Пат. 40269 Україна, МПК<sup>8</sup> В 29 С 47/88. Спосіб охолодження екструдованої полімерної труби / І. О. Мікульонок, В. Т. Вознюк, О. А. Алфьоров; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u2008 13841; заявл. 01.12.08; опубл. 25.03.09, бюл. № 6.
134. Пат. 41529 Україна, МПК<sup>8</sup> В 29 С 47/88. Спосіб охолодження екструдованої полімерної труби / І. О. Мікульонок, В. Т. Вознюк, О. А. Алфьоров; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u2008 14920; заявл. 24.12.2008; опубл. 25.05.2009, бюл. № 10.
135. Вознюк В. Т. Екструзія полімерних труб. Процес двостороннього охолодження трубної заготовки / В. Т. Вознюк, І. О. Мікульонок, О. А. Алфьоров // Хімічна промисловість України. — 2009. — № 1. — С. 33—36.
136. Вознюк В. Т. Двостороннє охолодження полімерних труб. Моделювання процесу / В. Т. Вознюк, Л. Г. Воронін, І. О. Мікульонок, Л. І. Ружинська // Хімічна промисловість України. — 2009. — № 5. — С. 52—56.
137. Вознюк В. Т. Експериментальні дослідження двостороннього охолодження полімерної труби / В. Т. Вознюк, І. О. Мікульонок // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2010. — № 1(5). — С. 4—7.

138. Пат. № 47245 Україна, МПК(2009) В 29 В 47/88. Спосіб охолодження екструдованої полімерної труби / В. Т. Вознюк, І. О. Мікульонок ; заявник і патентовласник Нац. технік. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u200907362 ; заявл. 13.07.2009 ; опубл. 25.01.2010, бюл. № 2.

139. Пат. № 49468 Україна, МПК(2009) В 29 С 47/88. Пристрій безперервного формування полімерної труби / В. Т. Вознюк, І. О. Мікульонок ; заявник і патентовласник Нац. технік. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u200912606 ; заявл. 04.12.2009 ; опубл. 26.04.2010, бюл. № 8.

140. А. с. 1722852 СССР, МПК<sup>5</sup> В29С 35/16. Устройство для охлаждения длинномерных изделий / С. А. Рощупкин, Ю. Е. Лукач, И. О. Микулёнок, Л. И. Ружинская, В. Д. Биденко, Л. Р. Зейгермахер (СССР) ; заявитель Киев. политехнич. ин-т. — № 4838843/05 ; заявл. 12.06.1990 ; опубл. 30.03.1992, Бюл. № 12.

141. А. с. 1735036 СССР, МПК<sup>5</sup> В29С 47/88. Устройство для охлаждения длинномерных полимерных изделий / С. А. Рощупкин, И. О. Микулёнок, В. Д. Биденко (СССР) ; заявитель СКБполимермаш Киев. НПО «Большевик». — № 4816813/05 ; заявл. 23.04.1990 ; опубл. 23.05.1992, Бюл. № 19.

142. Мікульонок І. О. Моделювання термообробки погонних композитних матеріалів / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко, Л. І. Ружинська // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — № 2. — С. 66—71.

143. Grünschloß E. Experimentelle Bestimmung der Wärmeübergangszahlen bei der Kühlung von extrudierten Kunststoffrohren aus HD-PE im Wasserbad / E. Grünschloß, L. Radtschenko // Plastverarbeiter. — 1979. — Bd 30, № 10. — S. 631—639.

144. А. с. 1386482 СССР, МПК<sup>4</sup> В29С 47/90. Ванна для охлаждения пластмассовых труб / В. Ф. Александров, В. Н. Корпухов, Н. А. Колесник (СССР) ; заявитель Украинский научно-исследовательский и конструкторский институт по разработке машин и оборудования для переработки пластических масс, резин и искусственной кожи. — № 4014120/23-05 ; заявл. 14.01.1986 ; опубл. 07.04.1988, Бюл. № 13.

145. Pat. № 6813576 (US), Int. Cl<sup>8</sup> B1 В 29 С 47/78. Method and device for cooling and calibrating a section / Siegfried Topf (AT) ; applicant Topf Kunststofftechnik GmbH (AT). — № 10/111,423 ; application date 04.11.2000 ; publication date 02.11.2004.

146. Pat. № 2218030 (GB), Int. Cl<sup>4</sup> B1 В 29 С 47/92. Controlling the vacuum of a tube vacuum calibrating tank / Walter Mashall (GB) ; applicant Speedex Engineering Limited (GB). — № 8810618.2 ; application date 05.05.1988 ; publication date 08.11.1989.

147. Заявка на корисну модель № 201111723 Україна, МПК<sup>9</sup> В 29 С 47/88, В 29 С 35/00. Спосіб охолодження екструдованого матеріалу / І. О. Мікульонок, В. Т. Вознюк ; заявник і патентовласник Нац. технік. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u 201111723 ; заявл. 04.10.2011.

148. Pat. № 2004/0241266 (US), Int. Cl<sup>7</sup> B1 В 29 С 47/90. Mobile impression half-mould for a corrugator for making pipes with transverse ribs / Gerhard Neubauer (DE), Klaus Kaufmann (DE) ; applicant Gerhard Neubauer (DE), Klaus Kaufmann (DE). — № 10/491,066 ; application date 10.09.2002 ; publication date 02.12.2004.

149. Pat. № 2004/045828 (WO), Int. Cl<sup>7</sup> B 29 C 47/12. Molding apparatus with mold blocks having profiled face adjustment / Lupke Manfred (CA), Lupke Stefane (CA) ; applicant Lupke Manfred (CA), Lupke Stefane (CA) — № PCT/CA2003/001719 ; application date 12.11.2003 ; publication date 03.06.2004.

150. Pat. № 5976298 (US), Int. Cl<sup>6</sup> B1 B 29 C 47/06. Method of producing multi-layer thermoplastic pipe / Ralf-Peter Hegler (DE), Wilhelm Hegler (DE) ; applicant Ralf-Peter Hegler (DE). — № 08/598,474 ; application date 08.02.1996 ; publication date 02.11.1999.

151. Пат. № 61574 Україна, МПК(2011.01) В 29 С 59/00. Півформа гофратора полімерної труби / І. О. Мікульонок, В. Т. Вознюк ; заявник і патентовласник Нац. технік. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u 2010 15187 ; заявл. 16.12.2010 ; опубліковано 25.07.2011, бюл. № 14.

152 Заявка № 201112204 Україна, МПК<sup>9</sup> В29С 47/88, В 29 С 35/00. Спосіб охолодження екструдованої гофрованої полімерної труби / І. О. Мікульонок, В. Т. Вознюк ; заявник і патентовласник Нац. технік. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u 201111722 ; заявл. 18.10.2011.

153. Инженерные методы расчёта погрешностей при выполнении лабораторных работ по курсам «Тепломассообмен» и «Техническая термодинамика» / сост. В. В. Босый, Г. Н. Васильченко, Е. Н. Панов. — К. : «КПІ», 1985. — 72 с.

154. Брановицкая С. В. Вычислительная математика в химии и химической технологии / С. В. Брановицкая, Р. Б. Медведев, Ю. Я. Фиалков. — К. : Вища шк., 1986. — 216 с.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
Перелік умовних позначень, символів і скорочень.....	5
1. Тенденції розвитку процесу та обладнання виготовлення полімерних труб.....	7
1.1. Полімерні труби і галузі їх застосування.....	7
1.2. Процеси та обладнання виготовлення полімерних труб.....	15
1.2.1. Підготовка розплаву полімеру.....	16
1.2.2. Формування трубної заготовки.....	19
1.2.3. Охолодження труб.....	20
1.2.4. Вплив параметрів охолодження на якість полімерних труб.....	26
1.3. Моделювання процесу охолодження труб.....	31
1.4. Висновки і завдання дослідження.....	36
2. Теоретичні дослідження процесу охолодження екструдованих полімерних труб.....	38
2.1. Охолодження гофрованих полімерних труб.....	38
2.1.1. Фізична модель процесу.....	38
2.1.2. Математичне моделювання процесу.....	42
2.1.3. Вибір методів розв'язання математичної моделі та алгоритм розрахунку.....	43
2.1.4. Результати числового моделювання та їх аналіз.....	54
2.2. Охолодження гладких полімерних труб.....	57
2.2.1. Фізична модель процесу.....	57
2.2.2. Математичне моделювання процесу.....	60
2.2.3. Вибір методів розв'язання математичної моделі та алгоритм розрахунку.....	61
2.2.4. Результати числового моделювання та їх аналіз.....	66
2.3. Висновки.....	72
3. Експериментальні дослідження процесу охолодження полімерних труб.....	73
3.1. Мета і завдання експериментальних досліджень.....	73
3.2. Опис експериментальної установки.....	73
3.3. Контрольовані фізичні величини і засоби їх вимірювання.....	75
3.4. Досліджені матеріали і труби.....	76
3.5. Дослідження процесів охолодження.....	76
3.5.1. Дослідження двостороннього охолодження гофрованих труб.....	77
3.5.2. Дослідження дискретної системи охолодження гофрованих труб.....	79
3.5.3. Дослідження двостороннього охолодження гладких труб.....	83
3.5.4. Дослідження дискретної системи охолодження гладких труб.....	87
3.6. Висновки.....	88
4. Розроблення енергоефективних процесів та обладнання охолодження екструдованих полімерних труб.....	93
4.1. Способи охолодження полімерних труб.....	93
4.2. Обладнання для охолодження полімерних труб.....	96
4.3. Висновки.....	100
Висновки.....	102
Додаток А. Результати експериментальних досліджень охолодження гладких полімерних труб.....	104
Додаток Б. Результати експериментальних досліджень охолодження гофрованих полімерних труб.....	119
Додаток В. Розрахунок похибок вимірювання фізичних величин.....	127
Список використаних джерел.....	131



Наукове видання

**Вознюк В'ячеслав Тарасович**  
**Мікульонок Ігор Олегович**

# **Інтенсифікація процесу виготовлення екструдованих полімерних труб**

**Монографія**

В авторській редакції

Темплан 2012 р., поз.