

*І. О. Мікульонок*

# ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСИ ПЕРЕРОБКИ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ



*І. О. Мікульонок*

**ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСИ  
ПЕРЕРОБКИ  
ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ  
МАТЕРІАЛІВ  
З ВИКОРИСТАННЯМ  
ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ**

Київ  
«ПОЛІТЕХНІКА»  
Київ 2009

УДК 678.5.05.002.8  
ББК 35.710

М59

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут»  
(протокол № 6 від 22 червня 2009 р)*

Рецензенти:

*Ю. Ф. Снежкін, д-р техн. наук, професор, член-кор. НАН України,  
заступник директора Інституту технічної теплофізики  
НАН України*

*О. М. Гавва, д-р техн. наук, професор,  
професор кафедри технічної механіки і пакувальної техніки  
Національного університету харчових технологій*

*А. Д. Петухов, д-р техн. наук, професор,  
професор кафедри хімічної технології композиційних матеріалів  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут»*

### **Мікульонок І.О.**

М59 Мікульонок І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини: монографія. – К.: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. – 265 с.: іл. – Бібліогр.: с. 239–262.

**ISBN 978-966-622-323-7**

У монографії розглянуто наукові засади розробки та вдосконалення обладнання і процесів комплексної переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини, що забезпечує можливість визначення раціональних конструктивних параметрів обладнання та режимів його роботи, а отже – і заощадження енергетичних і матеріальних ресурсів, а також зменшення забруднення навколишнього середовища.

Розроблено загальні принципи вибору обладнання та узагальнену математичну модель процесів переробки ТпМ, яка враховує дисипативні джерела енергії, джерела енергії, пов'язані з перетвореннями в об'ємі маси, а також реальні граничні умови на поверхні об'єму перероблюваного ТпМ. Також розроблено або вдосконалено математичні моделі одно- і двочерв'ячних екструдерів (з одно- і різноспрямованим обертанням черв'яків), валкових машин, роторного змішувача, а також пристроїв для термообробки. Досліджено вплив параметрів обладнання і режимів його роботи на ефективність процесів переробки.

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

УДК 678.5.05.002.8  
ББК 35.710

ISBN 978-966-622-323-7

© І. О. Мікульонок, 2009

---

---

## ВСТУП

Одними з найпоширеніших матеріалів, які застосовуються майже в усіх галузях промисловості та побуті, є пластмаси, світовий обсяг виробництва яких стабільно зростає і за прогнозами у 2010 році перевищить 300 млн т [1–3]. При цьому приблизно чверть від світового обсягу споживання пластмас припадає на країни Європи [3]. В Україні виробництво полімерів на початку третього тисячоліття (за період з 2000 р. по 2006 р.) збільшилося з 12,7 до 25,5 % і продовжує зростати, а обсяг їх товарного виробництва у 2006 році досяг майже 1,5 млрд доларів США [4].

Широке застосування виробів і матеріалів передбачає і відповідну проблему утилізації відходів, що утворюються під час виробництва, зберігання та використання цих виробів і матеріалів. Загальні щорічні обсяги утворюваних відходів тільки в Європі досягають 3 млрд т: від 3,8 т на одного мешканця Західної Європи до 6,3 т на одного мешканця Східної Європи [5].

Незважаючи на очевидну необхідність утилізації відходів, значна їх частка піддається видаленню, і в першу чергу захороненню, яке є найнижчим вибором в ієрархії поводження з відходами [6, 7]. У США та більшості європейських і центральноазійських країн до цього часу піддаються захороненню до 90 % відходів. Але навіть захоронення є досить затратний захід: лише з 1980 по 1987 рік вартість захоронення відходів у США зросла з 20 до 90 доларів за тонну, при цьому тенденція до зростання вартості зберігається [5, 8].

В Україні щороку накопичується 35 млн м<sup>3</sup> лише твердих побутових відходів, які захоронюють на 770 полігонах загальною площею майже 3000 га і частково спалюють на сміттєспалювальних заводах [9] (для порівняння, у Російській Федерації щороку накопичується майже в 40 разів більше – 1333 млн м<sup>3</sup> відходів [7]). Полімери в цьому загальному обсязі становлять 6–7 % [10].

На початку третього тисячоліття щорічне споживання пластмас у перерахунку на одного мешканця в країнах Європейського Союзу (ЄС) становило 95 кг, паперу й картону – 205 кг, скла – 38 кг, а частка утворюваних відходів (від обсягу споживання) – для пластмас – 56 %, паперу й картону – 96 %, скла – 83 %. Рівень утилізації зазначених відходів використанням їх як вторинних матеріальних ресурсів (зазвичай фізичної утилізації, тобто повторного застосування з використанням притаманних відповідним матеріалам властивостей, далі – переробки, рециклінгу (англ. recycling)), становить відповідно 15, 56 і 59 %. Решту утворюваних відходів піддають захороненню та утилізації використанням їх як вторинних енергетичних ресурсів (для відходів пластмас відповідно 62 і 22 %) [11].

На сучасному етапі поводження з відходами досить високі рівні утилізації притаманні лише паперу, картону, металам, склу й гумі. Найнижчий рі-

вень утилізації характерний для пластмас, незважаючи на те, що більшу частку серед них становлять термопласти, обсяг яких більше за обсяг реактопластів [11] і повторна переробка яких простіша, ніж реактопластів.

В Україні рівень утилізації полімерних відходів, як і в більшості країн світу, незначний і не перевищує 7 % при загальній утилізації відходів у 10–13 %, хоча внаслідок стабільного збільшення цін на полімерну сировину [12] останнім часом спостерігається стійка тенденція до його зростання. Крім того, Пакувальною Директивою ЄС (2004/12/ЄС) лише для пакувальних відходів передбачається, що до 2012 року держави-члени ЄС мають досягти 22,5 % рециклінгу пластмас [10]. Аналізуючи темпи зростання обсягів переробки, споживання та утилізації полімерів у країнах Східної Європи [3], можна прогнозувати суттєве збільшення відповідних обсягів і в Україні.

У багатьох варіантах сучасної політики поводження з відходами [5, 7, 13] розрізняють п'ятиступеневу ієрархію варіантів управління відходами: попередження виникнення відходів; повторне використання; фізичну переробку; енергетичну й хімічну переробку; безпечне розміщення або захоронення [13].

З точки зору енергоресурсозаощадження та вирішення екологічних проблем третій варіант на тепер є найбільш доцільним. При цьому найпоширенішими методами переробки полімерних відходів є безперервні методи, що ґрунтуються на застосуванні екструзійного, валкового і змішувального технологічного обладнання.

Теорія і практика переробки термопластичних матеріалів (ТпМ) донедавна стосувалися в основному переробки лише полімерів. Ґрунтовні дослідження властивостей цих матеріалів та їх переробки проводили як вітчизняні вчені (Доброногова С. І., Ліпатов Ю. С., Лукач Ю. Ю., Пахаренко В. О., Петухов А. Д., Півень О.Н., Радченко Л. Б., Ружинська Л. І., Яхно О. М. та ін.), так і російські вчені (Акутин М. С., Басов Н. И., Бекин Н. Г., Богданов В. В., Виноградов Г. В., Гуль В. Е., Калинин Э. Л., Ким В. С.-Х., Красовский В. Н., Кулезнёв В. Н., Малкин А. Я., Торнер Р. В., Тябин Н. В. та ін.), а також вчені з країн далекого зарубіжжя (Ardichvilli G., Bernhardt E. C., Gaskell R. E., Maxwell B., McKelvey J. M., Rauwendaal C., Reher E. O., Schenkel G., Tadmor Z., Unkrüer W. та ін.).

Останнім часом у зв'язку зі зростанням масштабів виробництва та асортименту полімерів і матеріалів на їх основі, а також необхідністю утилізації промислових і побутових відходів з використанням полімерів, сільськогосподарської сировини та інших матеріалів і виробів, що втратили споживчі властивості, широкого поширення набувають нові ТпМ, у тому числі й термопластичні композиційні матеріали (ТпКМ) [14–23]. Зазначені матеріали являють собою реологічно складні середовища, особливістю яких є те, що до їх складу входять найрізноманітніші сполуки й речовини. Їх в'язкість часто на декілька порядків перевищує в'язкість низькомолекулярних рідин і залежить не тільки

від температури, але і від інтенсивності деформування та інших факторів. Процеси їх переробки характеризуються значними дисипативними тепловиділеннями, які значно перевищують кількість теплоти, що підводять або відводять в обладнанні, а встановлювальна потужність обладнання при цьому часто досягає сотень і тисяч кіловатів. Особливої уваги під час переробки потребують вторинні полімерні матеріали, що характеризуються різними формами й ступенями деструкції (хімічної, фізичної, механічної), які залежать від умов попередньої переробки, експлуатації та зберігання цих матеріалів. Властивості вторинних полімерів можуть істотно відрізнятись від відповідних властивостей первинних матеріалів, при цьому одним з основних їх недоліків часто є знижена термомеханічна стійкість [23]. Тому майже кожний полімер, композиція або біологічна сировина потребує певної конструкції робочих органів обладнання й режимів переробки, за яких досягають раціональне використання енергетичних і матеріальних ресурсів, а також потрібну якість продукції [24].

ТпМ переробляють переважно екструзією, вальцюванням і каландруванням, причому серед основних зразків технологічного обладнання існує стійка тенденція збільшення частки одно- і двочерв'ячних екструдерів. При цьому провідні фірми пропонують обладнання, яке призначене для переробки аналогічних матеріалів, але яке в той же час за однієї продуктивності може істотно відрізнятись конструкцією робочих органів і режимами переробки, що спричинює певні складнощі у виробничників під час вибору обладнання. У зв'язку з цим зростає значення математичного моделювання процесів переробки ТпМ, особливо композиційних і термочутливих, яке робить можливим для певного матеріалу числовим моделюванням здійснювати пошук як геометрії робочих органів обладнання, так і режимів переробки. Також математичне моделювання робить можливим з великої різноманітності обладнання вибирати саме те, яке забезпечує потрібні властивості продукції.

Необхідність послідовного впровадження в життя концепції сталого розвитку також потребує розробки високоефективних обладнання та процесів утилізації полімерних та інших відходів, що не лише забезпечить заощадження матеріальних та енергетичних ресурсів, але і зменшить забруднення навколишнього середовища.

У зв'язку з цим одним з пріоритетних напрямів наукових досліджень у галузі хімічного машинобудування є розробка, вдосконалення та обґрунтований вибір ефективних зразків обладнання для переробки ТпМ з використанням вторинної сировини, особливо композиційних і термочутливих.

Метою досліджень було створення наукових засад розробки ресурсоефективних обладнання та процесів переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини, що забезпечує заощадження енергетичних і матеріальних ресурсів, а також зменшення забруднення навколишнього середовища.

Результати досліджень впливу конструктивних особливостей обладнання для переробки ТпМ з використанням вторинної сировини, режимів його експлуатації і властивостей зазначених матеріалів на параметри процесів переробки стали науковою основою розробки та впровадження методик і рекомендацій щодо вибору принципів схем, проектування й виготовлення обладнання, а також визначення раціональних режимів його експлуатації, зокрема методики, алгоритми і програми розрахунку роторних змішувачів, валкового обладнання, одно- і двочерв'ячних екструдерів, а також систем охолодження гранул, стренг, листів, труб, кабелів і проводів, які забезпечили підвищення продуктивності і зменшення енергоємності відповідного обладнання, а також поліпшення якості одержуваних матеріалів і виробів (ВАТ «НВП „Більшовик”», ВАТ «Київхімволокно», ВКФ «ПоліЕк», м. Київ; ЗАО «Средневожский завод полимерных изделий», м. Тольятті, Російська Федерація та ін.).

Автор висловлює щире подяку доктору технічних наук, професору Радченку Леоніду Борисовичу, доктору технічних наук, професору Лукачу Юрію Юхимовичу і кандидату технічних наук, доценту Ружинській Людмилі Іванівні за допомогу та увагу до проведених досліджень.

---

---

## ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

- $a$  – питома робота, Дж/кг;  
температуропровідність (за наявності індексу),  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $c$  – масова теплоємність, Дж/(кг·К);  
 $D$  – діаметр робочого органу (черв'яка, валка, ротора тощо), м;  
 $e$  – ширина гребеня витка, м;  
 $f$  – фрикція в міжвалковому проміжку;  
 $G$  – витрата;  
 $h$  – величина проміжку зони деформування (для міжвалкового проміжку – половина його величини); висота каналу (глибина нарізки) черв'яка екструдера, м;  
 $i$  – масова ентальпія, Дж/кг;  
 $K$  – коефіцієнт консистенції,  $\text{Па}\cdot\text{с}^n$ ;  
 $L$  – довжина, м;  
 $M$  – маса, кг; крутний момент, Н·м (визначаються відповідним індексом);  
 $n$  – показник степеня реологічного рівняння;  
частота обертання робочого органу (за наявності індексу), об/с;  
 $N$  – потужність, Вт;  
 $p$  – тиск, Па;

$q$  – поверхнева густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $q_V$  – об’ємна густина теплового потоку, Вт/м<sup>3</sup>;  
 $Q$  – тепловий потік, Вт;  
 $r$  – поточний радіус, м;  
 $r, \varphi, \theta$  – сферичні координати;  
 $R$  – радіус робочого органу;  
 $Re$  – характеристичне число Рейнольдса;  
 $s$  – крок гвинтової нарізки черв’яка, м;  
 $S$  – площа, м<sup>2</sup>;  
 $t$  – час, с;  
 $T$  – температура, °С;  
 $V$  – об’єм, м<sup>3</sup>;  
 $w, W$  – лінійна швидкість, м/с;  
 $x, y, z$  – декартові прямокутні координати;  
 $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $\gamma$  – центральний кут ділянки валка, рад;  
 $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву, с<sup>-1</sup>;  
 $\delta$  – загальна товщина ТпМ або товщина його окремого шару, м;  
 $\varepsilon$  – безрозмірний аналог координати  $x$ ;  
 $\eta$  – коефіцієнт корисної дії (за наявності індексу «пр»);  
     в’язкість (за наявності індексів «тпм», «тп», «відн»);  
 $\lambda$  – теплопровідність, Вт/(м·К);  
 $\mu$  – динамічна в’язкість, Па·с;  
 $\nu$  – кінематична в’язкість, м/с;  
 $\xi$  – безрозмірний аналог координати  $y$ ;  
 $\rho$  – густина (за наявності індексів «тп» або «тпм»), кг/м<sup>3</sup>;  
 $r, \theta, z$  – циліндричні координати;  
 $\tau$  – дотичні напруження, Па;  
 $\varphi$  – об’ємна частка наповнювача ТпКМ;  
 $\varphi_{\text{ч}}$  – кут нахилу гвинтової нарізки черв’яка, рад;  
 $\psi$  – коефіцієнт фрикції в міжвалковому проміжку;  
 $\omega$  – кутова швидкість робочого органу, рад/с;  
 $\nabla$  – оператор Гамільтона.

Основні індекси:

$0$  – стосується початкового значення;  
 $i$  – стосується  $i$ -го компонента термопластичного матеріалу;  
 $M$  – стосується маси;  
 $\text{min}$  – стосується мінімального значення;  
 $V$  – стосується об’єму;  
 $x, y, z$  – стосується відповідної декартової прямокутної координати;

$r, \varphi, \theta$  – стосується відповідної сферичної координати;  
 $\rho, \varphi, z$  – стосується відповідної циліндричної координати;  
 $v$  – стосується робочої поверхні валка (барабана для термообробки);  
відн – стосується відносної величини;  
 $v_x$  – стосується входу термопластичного матеріалу на ділянку об'єкта;  
 $g_r$  – стосується гребеня роторного змішувача;  
дис – стосується дисипації;  
екв – стосується еквівалентної величини;  
зк – стосується змішувальної камери роторного змішувача;  
 $k$  – стосується кінця ділянки об'єкта;  
 $n$  – стосується наповнювача;  
 $o_r$  – стосується охолодної рідини;  
 $o_c$  – стосується оточуючого середовища;  
 $p$  – стосується початку ділянки об'єкта;  
 $p_l$  – стосується плавлення термопластичного полімеру;  
 $p_r$  – стосується приводу;  
 $r$  – стосується робочої поверхні ротора роторного змішувача;  
 $s_p$  – стосується серпоподібного проміжку роторного змішувача;  
 $t$  – стосується тихохідного робочого органу;  
 $t_v$  – стосується твердіння термопластичного полімеру;  
 $t_p$  – стосується термопластичного полімеру;  
 $t_{pm}$  – стосується термопластичного матеріалу;  
 $ц$  – стосується циліндра;  
 $ч$  – стосується черв'яка;  
 $ш$  – стосується швидкохідного робочого органу.

Основні скорочення:

АБС – акрилонітрилбутадієн-стирольний співполімер;  
кафедра МАХНВ – кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних  
виробництв інженерно-хімічного факультету НТУУ «КПІ»;  
ВАТ – відкрите акціонерне товариство (при назві установи);  
ВКФ – виробничо-комерційна фірма (при назві установи);  
ЗАО – закрите акціонерне товариство (при назві установи);  
НВП – науково-виробниче підприємство (при назві установи);  
НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут»;  
ПВХ – полівінілхлорид;  
ПЕВГ – поліетилен високої густини;  
ПЕВТ – поліетилен високого тиску;  
ПЕНГ – поліетилен низької густини;  
ПЕНТ – поліетилен низького тиску;

ПП – поліпропілен;  
    приватне підприємство (при назві установи);  
ПС – полістирол;  
ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю (при назві установи);  
ТпКМ – термопластичний композиційний матеріал;  
ТпМ – термопластичний матеріал.

---

## 1. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ, ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ

### 1.1. Використання полімерів та утилізація полімерних відходів

За останні півстоліття річний обсяг виробництва полімерів і матеріалів на їх основі перевищив 200 млн т і впевнено наближається до позначки 300 млн т [1–3] (рис. 1.1).

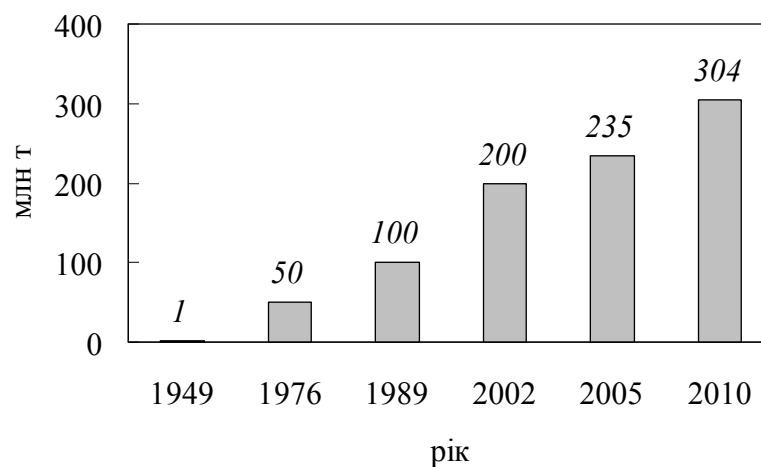


Рис. 1.1. Динаміка світового виробництва пластмас

Наприкінці ХХ і особливо на початку ХХІ століття відбувається помітне підвищення ролі вторинної сировини. Підґрунтям цього явища є все більші труднощі із забезпеченням промисловості матеріальними ресурсами й суттєвий прогрес у створенні ефективних технологій переробки промислових і побутових відходів. Утилізація відходів, у тому числі і полімервмісних, перетворюється на одну з головних соціально-економічних і технічних проблем розвитку виробництва [5–8, 23].

Виділяють два основні шляхи поводження з полімерними відходами виробництва та споживання: утилізація (використання відходів як вторинної сировини) і видалення (здійснення процесів чи операцій, що не пов'язані й не приводять до утилізації відходів) [6] (рис.1.2).

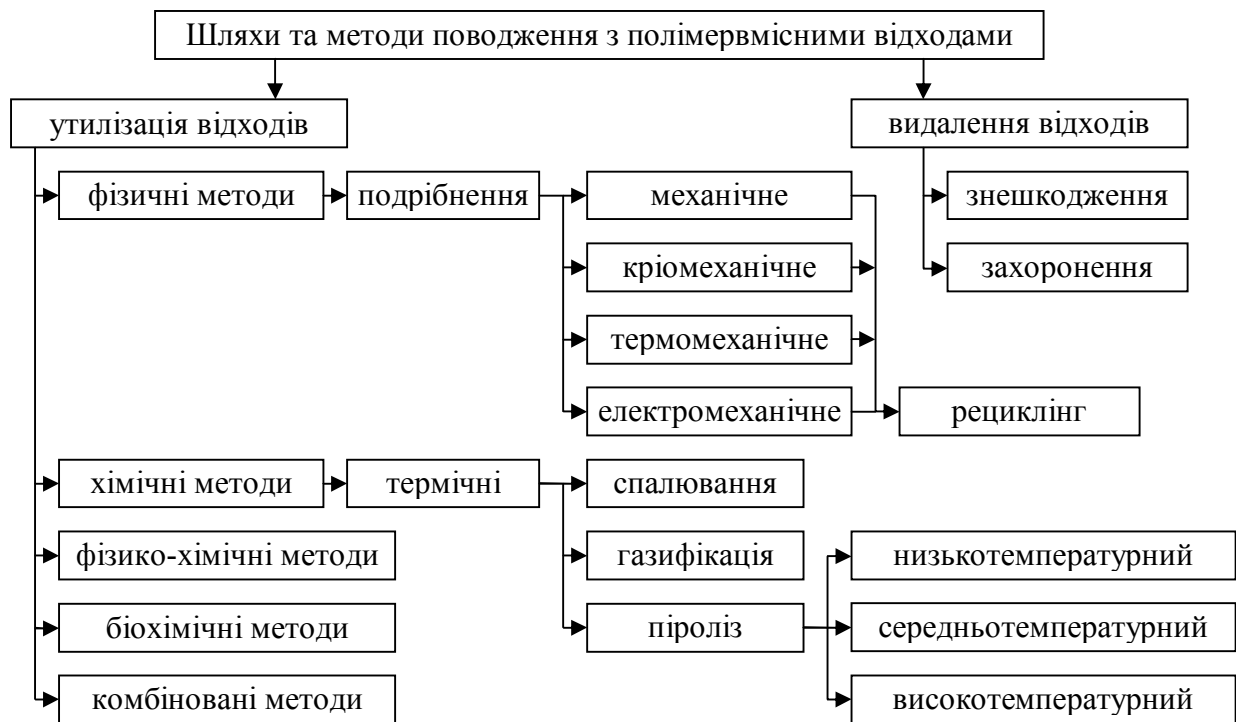


Рис. 1.2. Основні методи та шляхи використання полімерних відходів

Методи утилізації відходів можна поділити на такі основні групи [17, 25, 26]:

- фізичні методи, під час реалізації яких змінюються лише форма, розміри, агрегатний стан і деякі інші властивості матеріалу відходів за умови збереження їх якісного хімічного складу; ці методи притаманні методам, застосовуваним для переробки первинної сировини;

- хімічні методи, під час реалізації яких змінюються фізичні властивості і якісний хімічний склад, причому взаємодія речовин здійснюється в стехіометричних співвідношеннях, які визначаються рівняннями хімічних реакцій;

- фізико-хімічні методи, під час реалізації яких відбуваються взаємопов'язані фізичні й хімічні перетворення, причому хімічна взаємодія речовин здійснюється в нестехіометричних співвідношеннях;

- біохімічні методи, під час реалізації яких мають місце хімічні перетворення за участі мікроорганізмів;

- комбіновані методи, які є сполученням методів різних груп, один з яких може бути домінуючим.

Отже, основні методи утилізації можна реалізувати за трьома напрямками: матеріальним, термічно-сировинним та безпосередньо енергетичним.

Методи видалення відходів можна поділити на такі основні групи [6]:

- знешкодження, тобто зменшення чи усунення шкідливості відходів фізичним (зокрема механічним), фізико-хімічним чи біологічним обробленням;
- захоронення, тобто остаточне розміщення відходів у процесі їх видалення в спеціально відведених місцях чи на об'єктах таким чином, щоб довгостроковий шкідливий вплив відходів на навколишнє природне середовище та здоров'я людини не перевищував установлених нормативів.

Найдешевшим і найрозповсюдженим (але і найнераціональним) натеper способом поводження з відходами є їх захоронення. Однак суттєве збільшення кількості ділянок під полігони і звалища, а також відсутність контролю за ними може призвести до забруднення води й повітря, виникнення пожеж, масового розмноження гризунів тощо. Основний недолік захоронення відходів – це безповоротні втрати потенційно відновлюваних матеріалів, тому все більше уваги приділяється методам утилізації.

Найдоцільнішим з методів утилізації є використання полімервмісних відходів як вторинної сировини. У цьому випадку майже повністю використовуються всі властивості полімерів саме з точки зору їх призначення.

За принципом утворення вторинну полімерну сировину поділяють на три категорії: відходи виробництва, відходи споживання й змішані відходи виробництва й споживання [27, 28]. При цьому відходи споживання, у свою чергу, поділяють на відходи від виробничого й від побутового споживання.

Також вторинну полімерну сировину поділяють: за характером процесів формування – на класи; за вихідними полімерами – на види; за характеристикою полімерних відходів – на групи (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Класифікація вторинної полімерної сировини

Категорія полімерної сировини	Клас полімерної сировини	Вид полімерної сировини	Група полімерних відходів	
			поворотні відходи	неповоротні відходи
1	2	3	4	5
Відходи виробництва	Термопластичні	Поліолефіни, полістироли, полівінілхлориди, поліформальдегіди, полікарбонати, поліефіри, поліакрилати, поліаміди	Чисті витоки з сопла, облой, ливники, некондиційна продукція, прогінні маси термопластів одного виду, у тому числі і під час переходу з одного кольору на інший	Нагари, термодеструктований матеріал, прогінні маси під час переходу з одного виду сировини на інший, забруднені розсипи гранул, залишки сировини, які повністю або частково втратили початкові властивості і не відповідають нормативним документам

1	2	3	4	5
Відходи споживання	Термопластичні	Поліолефіни, полістироли, полівінілхлориди, поліформальдегіди, полікарбонати, поліефіри, поліакрилати, поліаміди	–	Вироби культурно-побутового призначення: канцелярські, галантерейні, сантехнічні товари, електроприлади, дитячі іграшки, корпусні деталі телерадіоапаратури, тара промислового і господарського призначення (ящики, бочки, каністри, банки і т. ін.)
Відходи виробництва	Терморезистивні	Фенопласти, амінопласти, склопластики	–	Облой, ливники, нагари, виточки з форм, просипки матеріалу, некондиційна продукція
Відходи споживання	Терморезистивні	Фенопласти, амінопласти, склопластики	–	Вироби культурно-побутового призначення (футляри, скриньки, склянки, канцелярські вироби, підставки, шахи, кулі, доміно, дитячі іграшки, посуд тощо), деталі побутових електропристроїв та електроприладів (вилки, розетки, вимикачі тощо), фотоприладдя, тара і т. ін.
Змішані відходи виробництва і споживання	Різні класи	Різні види	–	Вироби культурно-побутового призначення (дитячі іграшки, електроприлади, радіотовари тощо), змішані розсипи гранул, прогінні маси термопластів під час переходу з одного виду матеріалу на інший

Підсумовуючи викладене, можна зробити висновок, що найбільш перспективним методом утилізації полімерних та інших твердих відходів є їх використання як вторинних матеріальних ресурсів, а саме – для переробки їх у термопластичні матеріали.

## 1.2. Класифікація термопластичних матеріалів та їх основні технологічні властивості

### 1.2.1. Класифікація термопластичних матеріалів

Завдяки можливості змінювання властивостей полімеру за рахунок використання наповнювачів, модифікаторів та інших добавок сучасною промисловістю використовується до ста і більше марок полімерних композиційних матеріалів на основі одного базового полімеру, що істотно розширяє його технологічні та експлуатаційні можливості [29, 30].

Полімери, використовувані для створення композиційних матеріалів, яких промисловістю випускається десятки тисяч марок, можна поділити на чотири групи [31]:

1) ненасичені полієфіри, фенольні, меламінові, кремнієорганічні смоли, поліфеніленсульфід; понад 90 % марок на основі цих полімерів випускають наповненими;

2) полівінілхлорид, поліаміди, епоксидні смоли, полісульфон, поліфеніленоксид, полієфірсульфон, поліуретан, полібутилентерефталат, мочевиноформальдегідні смоли; від 50 % до 90 % марок на основі цих полімерів випускають наповненими;

3) поліпропілен, поліамід-6, поліамід-11, поліамід-12, фторопласти, поліацеталі, полікарбонати, поліетилентерефталат; від 25 % до 50 % марок на основі цих полімерів випускають наповненими;

4) ефіри целюлози, акрилові полімери, поліетилен, полістирол; до 10 % марок на основі цих полімерів випускають наповненими.

При цьому значну частку (у 2002 році приблизно третину [32]) серед полімерних композиційних матеріалів займають ТпКМ.

Широкого використання ТпКМ набули з таких міркувань:

1) додавання до полімерів дешевих наповнювачів зменшує вартість ТпКМ;

2) створення ТпКМ з поліпшеними порівняно з полімером властивостями (фізико-механічними, фізико-хімічними, теплофізичними, електрофізичними, оптичними, естетичними, технологічними та ін.);

3) створення ТпКМ з максимально реалізованими в них властивостями наповнювачів (властивості ТпКМ в основному визначаються властивостями наповнювача, якщо його вміст у композиції досягає 70 %) [16, 31];

4) можливість утилізації відходів полімерів і пластмас, а також інших матеріалів, застосовуваних у ТпКМ як наповнювачів;

5) наявність суттєвих технологічних та експлуатаційних переваг порівняно з термореактивними композиційними матеріалами (ТрКМ): можливість переробки більшістю існуючих методів, тривалий термін зберігання сировини перед її переробкою, відносно невелика тривалість формування, високий коефіцієнт використання матеріалу, ремонтпридатність виробів, можливість повторної переробки, велика ударна в'язкість, значна хімічна тривкість та ін.

Залежно від типу наповнювача розрізняють дисперсні, армовані й дисперсно-армовані структури ТпКМ [14, 16, 31, 33], при цьому в окремі класи можна виділити багаточарові, комбіновані, гібридні й поліматричні ТпКМ [30] (рис. 1.3 [33]).

Залежно від типу наповнювача ТпКМ поділяють на дисперсно-наповнені матеріали (наповнювач – дисперсні частинки), армовані матеріали (містять зміцнювальний наповнювач зазвичай безперервної структури), газонаповнені й рідиннонаповнені матеріали [15, 18, 34, 35].

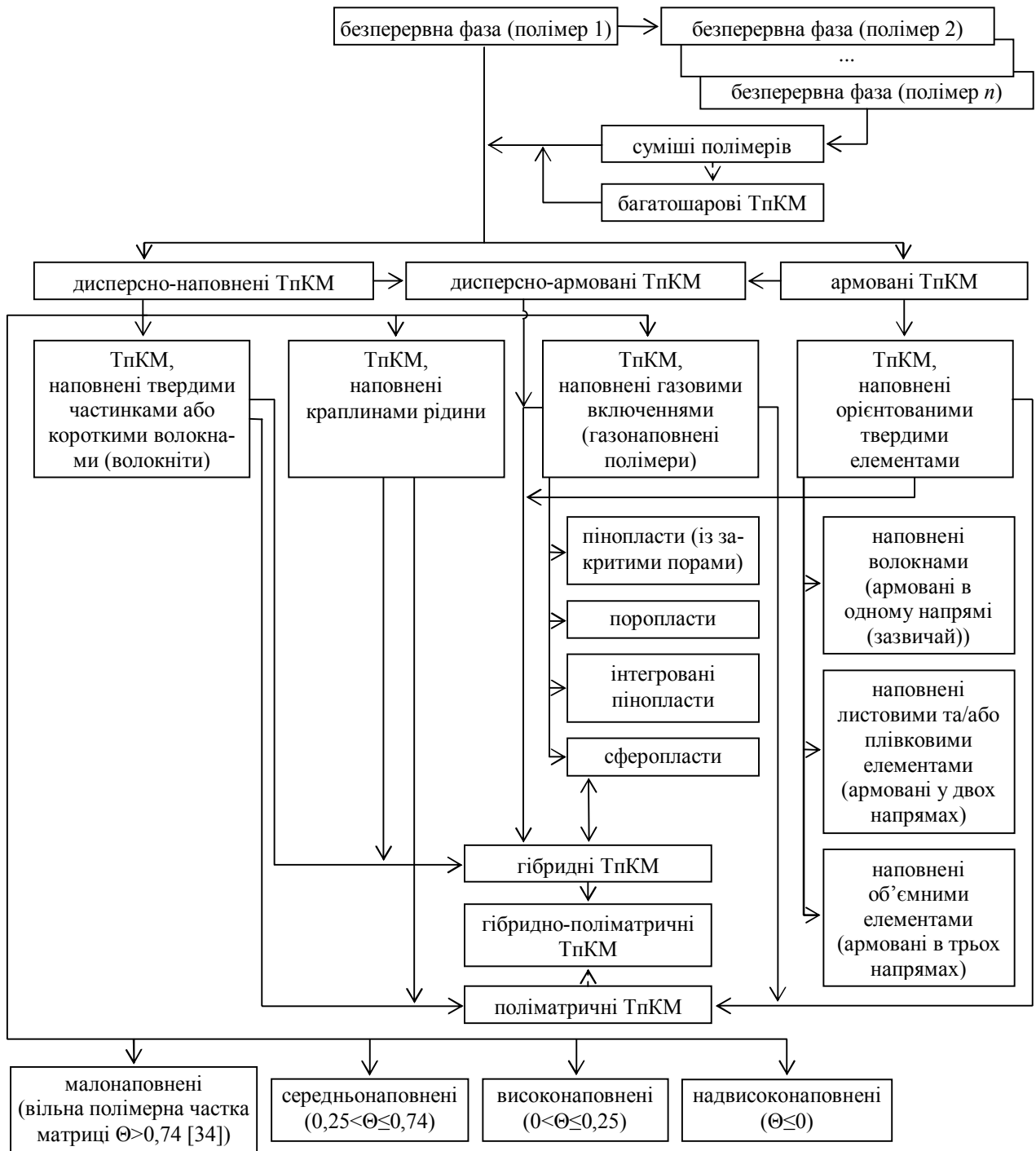


Рис. 1.3. Класифікація термопластичних композиційних матеріалів

За механізмом впливу на ТпКМ наповнювачі можна поділити на три типи [36]:

1. Інертні. Це наповнювачі, мета застосування яких – здешевлення кінцевого продукту, коли припустиме певне погіршення властивостей ТпКМ порівняно з чистим полімером.

2. Активні. Це наповнювачі, поліпшені технологічні властивості яких

визначаються їх властивостями: формою частинок, рівнем їх анізотропності, а також хімією поверхні частинок відносно до певного полімеру.

3. Функціоналізовані. Це поверхнево-модифіковані наповнювачі, модифікацію яких здійснюють органічними апретами або неорганічними сполуками, після чого наповнювачі стають носіями спеціальних властивостей, що дає можливість доповнювати, замінювати або заощаджувати певні технологічні цільові добавки.

До наповнювачів ставлять загальні вимоги [15, 18, 35]: сумісність з полімерною матрицею і здатність диспергуватися в ній з утворенням композиту однорідної структури; добра змочуваність розплавом полімеру; термічна, механічна, термічна й хімічна стійкість під час приготування композиту, а також зберігання та експлуатації виробу (крім спеціальних наповнювачів, наприклад, антипіренів); відсутність істотного погіршення перероблюваності композиту; вибухопожежобезпечність; незначна вартість. Специфічні вимоги, які ставлять до наповнювачів, залежать від прогнозованих властивостей одержуваних ТпКМ.

Властивості ТпКМ визначаються властивостями полімерної матриці й наповнювача, співвідношенням їх вмісту в композиції, характером розподілу наповнювача в матриці, природою взаємодії на межі поділу «полімер–наповнювач». При цьому наповнювач, поліпшуючи певні характеристики ТпКМ, може одночасно погіршувати інші його властивості. Тому в кожному конкретному випадку під час вибору типу, концентрації й способу поверхневої модифікації наповнювача необхідно ретельно збалансувати ефекти, обумовлені присутністю в складі ТпКМ наповнювача та інших компонентів [37].

Характер взаємодії твердих наповнювачів з іншими компонентами сумішей (змочування, адсорбція, адгезія, тертя та (або) хімічна реакція) визначається головним чином складом наповнювачів і структурою їх поверхні. Властивості поверхні залежать не тільки від природи й фазової структури наповнювачів, але й від способу та умов їх одержання, а також від обробки поверхні. При цьому важливе значення мають також загальна або питома величина поверхні наповнювачів, її дефектність і шорсткість. Так, наприклад, гума крихта, одержана пружнодеформаційним способом у роторному подрібнювачі, відрізняється від криогенної крихти меншими розмірами й розвинутою поверхнею з активними функціональними групами [38, 39].

Класифікацію наповнювачів наведено на рис. 1.4 [14, 15, 31, 33, 35, 37, 40–73].

Різноманітність природи наповнювачів, форми, розмірів і властивостей їх частинок, можливість модифікування, а також поєднання декількох наповнювачів дає можливість створювати величезну кількість марок композиційних матеріалів зі спеціальними властивостями [33, 35, 43, 57, 58, 66, 70, 73–76].

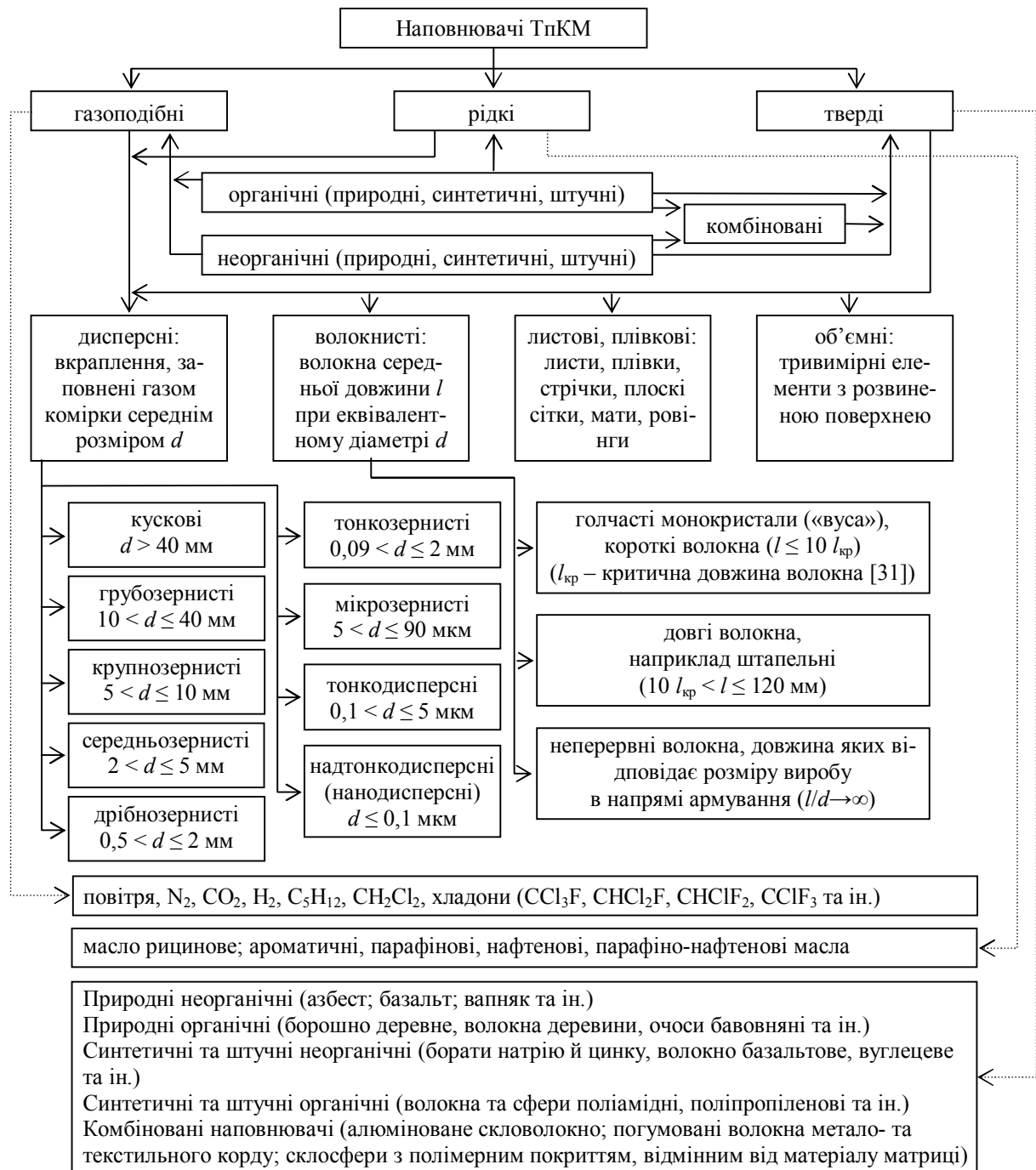


Рис. 1.4. Класифікація наповнювачів термопластичних композиційних матеріалів ( $d$  – еквівалентний розмір частинки наповнювача)

У 2005 році світове споживання наповнювачів досягло 15 млн т, вартість яких становила приблизно 6 млрд євро. При цьому щорічний приріст споживання наповнювачів приблизно на 1 % випереджає приріст споживання полімерів [67].

Розробка нових ТпМ, і в першу чергу з використанням вторинної сировини, методи їх переробки, а також створення й модернізація технологічного

обладнання для їх одержання й переробки у виробі передбачає наявність даних багатьох властивостей цих матеріалів, одними з визначальних яких під час проектування обладнання для одержання й переробки ТпМ (а саме з метою визначення енергосилових параметрів обладнання й температурних полів перероблюваного матеріалу) є теплофізичні та реологічні властивості.

### 1.2.2. Теплофізичні й реологічні властивості термопластичних матеріалів

До теплофізичних властивостей, які застосовуються під час математичного моделювання процесів переробки ТпМ, відносять густину, теплопровідність, теплоємність і температуропровідність, а також лінійний та об'ємний коефіцієнти теплового розширення [31, 77–81].

У загальному випадку теплофізичні властивості ТпМ залежать від його структури, природи і параметрів компонентів, а іноді (особливо для вторинних сировини) і передісторії одержання або переробки як самих матеріалів, так і їх компонентів, які повною мірою врахувати під час аналітичного визначення цих властивостей важко або навіть неможливо [23, 82–85].

Теплопровідність ТпКМ залежно від вмісту в них наповнювача у вигляді кулястих частинок визначають за залежністю [31]

$$\lambda_{\text{ТпМ}} = \lambda_{\text{Тп}} \left( 1 + \frac{\varphi_{\text{н}}}{(1 - \varphi_{\text{н}})/3 + \lambda_{\text{Тп}}/(\lambda_{\text{н}} - \lambda_{\text{Тп}})} \right), \quad (1.1)$$

де  $\lambda_{\text{ТпМ}}$ ,  $\lambda_{\text{Тп}}$  і  $\lambda_{\text{н}}$  – теплопровідність ТпКМ, полімеру і наповнювача;  $\varphi_{\text{н}}$  – об'ємна частка наповнювача.

Теплопровідність ТпКМ, що складаються з матриці, в якій ізольовані одна від одної кулясті частинки наповнювача розташовані у вузлах правильної кубічної решітки, можна визначити за залежністю [84]

$$\lambda_{\text{ТпМ}} = \lambda_{\text{Тп}} \left[ 1 + 3\varphi_{\text{н}} \left( \frac{\lambda_{\text{н}} + 2\lambda_{\text{Тп}}}{\lambda_{\text{н}} - \lambda_{\text{Тп}}} - \varphi_{\text{н}} + \frac{A}{B} + C \right)^{-1} \right], \quad (1.2)$$

$$\text{де } A = 1,3091 \frac{\lambda_{\text{Тп}} - \lambda_{\text{н}}}{\lambda_{\text{н}} + 4\lambda_{\text{Тп}}/3} \varphi_{\text{н}}^{10/3} \left( 1 - 0,1173 \frac{\lambda_{\text{Тп}} - \lambda_{\text{н}}}{\lambda_{\text{н}} + 6\lambda_{\text{Тп}}/5} \varphi_{\text{н}}^{11/3} \right)^2;$$

$$B = 1 + 0,4054 \frac{\lambda_{\text{Тп}} - \lambda_{\text{н}}}{\lambda_{\text{н}} + 4\lambda_{\text{Тп}}/3} \varphi_{\text{н}}^{7/3} - 6,6568 \frac{(\lambda_{\text{Тп}} - \lambda_{\text{н}})^2}{(\lambda_{\text{н}} + 4\lambda_{\text{Тп}}/3)(\lambda_{\text{н}} + 5\lambda_{\text{Тп}}/6)} \varphi_{\text{н}}^6;$$

$$C = 0,0723 \frac{\lambda_{\text{Тп}} - \lambda_{\text{н}}}{\lambda_{\text{н}} + 6\lambda_{\text{Тп}}/5} \varphi_{\text{н}}^{14/3} + 0,15256 \frac{\lambda_{\text{Тп}} - \lambda_{\text{н}}}{\lambda_{\text{н}} + 8\lambda_{\text{Тп}}/7} \varphi_{\text{н}}^6.$$

Якщо в (1.2) обмежитися першими двома членами, отримують формулу

$$\lambda_{\text{ТПКМ}} = \lambda_{\text{ТП}} + 3\varphi_{\text{Н}}\lambda_{\text{ТП}} \frac{(\lambda_{\text{Н}} - \lambda_{\text{ТП}})}{\lambda_{\text{Н}} + 2\lambda_{\text{ТП}}},$$

а якщо першими чотирма і шістьма – формули Релея і Мередіт–Тобіаса [81, 84].

Також для ТПКМ з ізольованими включеннями може бути запропонована залежність [84]

$$\frac{\lambda_{\text{ТПКМ}} - \lambda_{\text{Н}}}{\lambda_{\text{ТП}} - \lambda_{\text{Н}}} \left( \frac{\lambda_{\text{ТП}}}{\lambda_{\text{ТПКМ}}} \right)^{1/3} = 1 - \varphi_{\text{Н}}.$$

Теплопровідність ТПКМ з невпорядкованим розподілом компонентів можна визначити за формулою [83]

$$\lg \lambda_{\text{ТПКМ}} = \sum_{i=1}^n (\varphi_i \lg \lambda_i) \quad \text{або} \quad \lambda_{\text{ТПКМ}} = \prod_{i=1}^n \lambda_i^{\varphi_i},$$

де  $\lambda_i$  – теплопровідність  $i$ -го компонента ТПКМ.

Більш складними є випадки теплопровідності для анізотропних ТПКМ, наприклад, з орієнтованим наповнювачем. У цьому разі теплопровідність вздовж орієнтації волокнистих [31] або шаруватих наповнювачів [16] розраховують за правилом адитивності [86]:

$$\lambda_{\text{ТПКМ}}^{\parallel} = \lambda_{\text{Н}}\varphi_{\text{Н}} + \lambda_{\text{ТП}}(1 - \varphi_{\text{Н}}),$$

поперек орієнтації волокон – за залежністю [31]

$$\lambda_{\text{ТПКМ}}^{\perp} = \lambda_{\text{ТП}} \left( 1 + \frac{\varphi_{\text{Н}}}{(1 - \varphi_{\text{Н}})/2 + \lambda_{\text{ТП}}/(\lambda_{\text{Н}} - \lambda_{\text{ТП}})} \right),$$

а поперек орієнтації довгих ( $l/d \gg 1$ ) волокон або шарів наповнювача – за залежністю [16]

$$\lambda_{\text{ТПКМ}}^{\perp} = [\varphi_{\text{Н}}/\lambda_{\text{Н}} + (1 - \varphi_{\text{Н}})/\lambda_{\text{ТП}}]^{-1}.$$

Масову теплоємність ТПКМ, який складається з  $n$  компонентів, можна визначити за правилом адитивності [81]

$$c_{\text{ТПКМ}} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i c_i, \quad (1.3)$$

де  $\bar{x}_i$  і  $c_i$  – масова частка й масова теплоємність  $i$ -го компонента ТПКМ.

Температуропровідність ТПКМ з хаотичним розташуванням компонентів, а також шаруватого ТПКМ за умови розповсюдження теплового потоку поперек шарів можна розрахувати за залежністю [81]

$$a_{\text{ТПКМ}} = a_{\text{ТПКМ}}^{\perp} = \left( \sum_{i=1}^n (\varphi_i / \sqrt{a_i}) \right)^{-2},$$

де  $a_i$  – температуропровідність  $i$ -го компонента ТПКМ,

а шаруватого ТПКМ за умови розповсюдження теплового потоку вздовж шарів – за формулою [82]

$$a_{\text{ТПМ}}^{\parallel} = \left( \sum_{i=1}^n (\varphi_i \sqrt{a_i}) \right)^2.$$

Густину ТпКМ можна розрахувати за правилом адитивності об'ємів  $n$  компонентів [81]

$$1/\rho_{\text{ТПМ}} = \sum_{i=1}^n (x_i/\rho_i), \quad (1.4)$$

де  $\rho_i$  – густина  $i$ -го компонента ТпКМ.

Для визначення однієї з основних теплофізичних властивостей ТпКМ або його компонентів (зазвичай температуропровідності або масової ізобарної теплоємності) також можна скористатися залежністю, яка зв'язує їх між собою:  $a = \lambda/(c_p \rho)$ .

Температурні коефіцієнти об'ємного і лінійного розширення розраховують за залежностями, наведеними в праці [31].

Слід зазначити, що ефективні властивості багатокомпонентних ТпКМ зернистої структури можна визначити послідовним обчисленням ефективних властивостей бікомпонентних систем. При цьому беруть до уваги лише об'єми (об'ємні частки) компонентів, а відносні розміри, форму та орієнтацію частинок не враховують [83, 87].

Для багатокомпонентних систем з декількома матрицями також запропоновано методику розрахунку ефективного коефіцієнта теплопровідності за їх складом на основі рівняння Дульнева [88] за такою методикою [89]: 1) багатокомпонентну систему на основі декількох матриць розглядають як механічну суміш, що складається з композицій на основі однієї матриці та одного наповнювача; 2) для кожної із зазначених композицій визначається її масова частка в загальній суміші і робиться розрахунок  $\lambda_{\text{ТПМ}i}$  за рівнянням Дульнева; 3) остаточний розрахунок  $\lambda_{\text{ТПМ}}$  системи здійснюють за рівнянням Дульнева для складу з  $i$  композицій з  $\lambda_{\text{ТПМ}i}$ , визначеними за п. 2.

Однією з основних реологічних характеристик системи, здатних до течії, є її в'язкість  $\eta$ , яка є коефіцієнтом пропорційності між дотичним напруженням  $\tau$  і градієнтом швидкості  $\dot{\gamma}$  під час простого зсуву:  $\eta = \tau/\dot{\gamma}$  [90–93]. Оскільки для більшості полімерних матеріалів, у тому числі й композиційних, співвідношення  $\tau/\dot{\gamma}$  залежить не тільки від температури, а й від режимів деформування, зазначене співвідношення називають ефективною (уявною) в'язкістю. Для «чистих» полімерів у літературі (наприклад у працях [79, 94]) є досить повні дані, необхідні для визначення їх реологічних властивостей, а от властивості ТпКМ, незважаючи на наявність певних даних (наприклад у працях [15, 95]), найчастіше потрібно розраховувати [96].

Реологічну поведінку розведених суспензій з твердими частинками (при

об'ємній частці наповнювача в ТпКМ  $\varphi_n < 0,06$ ) описують рівнянням Ейнштейна [31, 87, 97]:

$$\eta_{\text{ТПМ}} = \eta_{\text{ТП}}(1 + k_e \varphi_n) \text{ або } \eta_{\text{а'аі}} = 1 + k_e \varphi_i, \quad (1.5)$$

де  $\eta_{\text{ТПМ}}$ ,  $\eta_{\text{ТП}}$  і  $\eta_{\text{відн}}$  – в'язкості ТпКМ, полімеру і відносна в'язкість;

$k_e$  – коефіцієнт форми частинок наповнювача (коефіцієнт Ейнштейна) [14, 31].

Також можна скористатися залежністю Кернера [15]

$$\eta_{\text{відн}} = 1 + k_e \varphi_n / (1 - \varphi_n)$$

або узагальненою формулою Ейнштейна [98]

$$\eta_{\text{відн}} = 1 + k_e \varphi_n + B_2 \varphi_n^2,$$

де  $B_2$  – коефіцієнт, який залежить від  $k_e$  і  $\varphi_n$  [96, 98].

У праці [85] узагальнена формула Ейнштейна для ТпКМ з кулястими частинками наповнювача пропонується у вигляді  $\eta_{\text{відн}} = 1 + 2,5 \varphi_n + 1,4 \varphi_n^2$ .

Для некулястих частинок можна скористатися залежністю з урахуванням коефіцієнта форми  $f$ , який визначають як співвідношення довжини частинок до їх поперечного розміру [85]:

$$\eta_{\text{відн}} = 1 + 0,67 f \varphi_n + 1,62 f^2 \varphi_n^2.$$

Слід відзначити, що формула (1.5) одержана за умови ідеального адгезійного зв'язку між компонентами ТпКМ, а також відсутності гідродинамічної взаємодії частинок наповнювача між собою.

При об'ємній частці наповнювача до 0,15 використовують рівняння Смолвуда–Гута [31]

$$\eta_{\text{відн}} = 1 + k_e \varphi_n + \beta \varphi_n^2,$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, що враховує взаємодію частинок і дорівнює 14,7.

При об'ємній частці наповнювача до 0,30 включно, у тому числі і для систем поліфракційного складу, застосовують рівняння Муні [31, 99]:

$$\ln(\eta_{\text{відн}}) = \frac{k_e \varphi_n}{1 - \varphi_n / \varphi_{\text{max}}} \text{ або } \eta_{\text{відн}} = \exp[k_e \varphi_n / (1 - \varphi_n / \varphi_{\text{max}})], \quad (1.6)$$

де  $\varphi_{\text{max}}$  – максимальна об'ємна частка наповнювача при щільній упаковці частинок без зміни їх форми (для випадкової упаковки кулястих частинок  $\varphi_{\text{max}} \approx 0,61$  [98]).

Також у цьому випадку можна скористатися формулою Дохерті–Крігера [98]  $\eta_{\text{відн}} = (1 - \varphi_n / \varphi_{\text{max}})^{-k_e \varphi_{\text{max}}}$ , залежністю [100]  $\eta_{\text{відн}} = (1 - \varphi_n / \varphi_{\text{max}})^{-2}$  або рівнянням Ейлера [15]  $\eta_{\text{відн}} = (1 + 1,25 \varphi_n / (1 - \varphi_n / \varphi_{\text{max}}))^2$ .

За умови об'ємної частки наповнювача понад 0,30 пропонують залежність Ландела–Мозера–Баумана [15, 31]

$$\eta_{\text{відн}} = 1 / (1 - \varphi_n / \varphi_{\text{max}})^{2,5}.$$

Також при  $\varphi_H > 0,30$  застосовують залежність [98]

$$\eta_{\text{відн}} = \frac{3z}{16} \frac{1}{(\varphi_{\text{max}}/\varphi_H)^{1/3} - 1},$$

$$\text{де } z = \frac{4 - \varphi_H + \sqrt{(4 - \varphi_H)^2 - 16(1 - \varphi_H)}}{2(1 - \varphi_H)}.$$

При  $\varphi_H < 0,40$  можна скористатися залежністю

$$\eta_{\text{відн}} = \frac{27}{20\varphi_{\text{max}}} \frac{\varphi_H^2}{(1 - \varphi_H/\varphi_{\text{max}})^3}.$$

Також за умови об'ємної частки наповнювача до 0,45 прийнятні результати можна отримати за допомогою формули Арреніуса

$$\eta_{\text{відн}} = \exp(k_e \varphi_H).$$

При  $\varphi_H < 0,50$  задовільні результати дає залежність

$$\eta_{\text{відн}} = 1 + 5,5\varphi_H \frac{4\varphi_H^{7/3} + 10 - 84/11\varphi_H^{2/3}}{10(1 - \varphi_H^{10/3}) - 25\varphi_H(1 - \varphi_H^{4/3})}.$$

Ефективну в'язкість в'язкої рідини з абсолютно жорсткими частинками можна визначити за формулою Муні (1.6) або залежністю [87]

$$\eta_{\text{відн}} = \frac{1 + 0,5\varphi_H}{(1 - \varphi_H)^2}.$$

Також в'язкість високонаповнених систем може бути розрахована згідно з теорією вільного об'єму  $\varphi_{\text{во}}$  [31]:

$$\eta_{\text{ТПМ}} = 1/(K \varphi_{\text{во}}^n), \quad (1.7)$$

де  $K$  і  $n$  – константи;  $\varphi_{\text{во}} = \varphi_{\text{max}} - \varphi_H$ .

На відміну від формули Муні (1.6) залежність (1.7) справедлива для ТПКМ з частинками наповнювача довільної форми й широкого розподілу за розмірами.

У разі переробки гомогенного ТПМ із суміші полімерів його в'язкість визначають за правилом логарифмічної адитивності в'язкостей компонентів [31]:

$$\lg \eta_{\text{ТПМ}} = \sum_{i=1}^n (x_i \lg \eta_i) \quad \text{або} \quad \eta_{\text{ТПМ}} = \prod_{i=1}^n \eta_i^{\bar{x}_i},$$

де  $\eta_i$  і  $\bar{x}_i$  – в'язкість і масова частка  $i$ -го компонента ТПМ.

Також для попереднього оцінювання залежності в'язкості розплаву суміші двох полімерів можна скористатися рівнянням Кулезньова–Кандиріна [14]

$$\lg \eta_{\text{ТПМ}} = \varphi_{\text{ТП1}}^2 \lg \eta_{\text{ТП1}} + (1 - \varphi_{\text{ТП1}}^2) \lg \eta_{\text{ТП2}},$$

де  $\varphi_{\text{ТП1}}$ ,  $\eta_{\text{ТП1}}$  і  $\eta_{\text{ТП2}}$  – об'ємна частка і в'язкості компонентів ТПМ.

Також у широкому діапазоні вмісту наповнювача ефективна в'язкість ТПКМ систем можна описати квадратичним поліномом виду [14]

$$\eta_{\text{відн}} = 1 + \alpha_1 \varphi_{\text{н}} + \alpha_2 \varphi_{\text{н}}^2,$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти, які залежать від властивостей компонентів ТпКМ.

У разі переробки наповненої кулястими частинками системи, поведінку дисперсійного середовища якої можна описати степеневим законом (законом Оствальда де Вейла) [78, 88, 101–103 та ін.]:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad \text{або} \quad \tau = K_0 \exp\left(-\beta \frac{T - T_0}{T_0}\right) |\dot{\gamma}|^n \text{sign}(\dot{\gamma}), \quad (1.8)$$

де  $K$  – коефіцієнт консистенції;  $K_0$  – коефіцієнт консистенції, що відповідає температурі  $T_0$ ;  $\beta$  – температурний коефіцієнт;  $n$  – індекс течії (у деяких працях, наприклад [101], розглядається величина, обернена  $n$ ).

її відносно в'язкість можна описати рівнянням [98]:

$$\eta_{\text{відн}} = \frac{C(m)}{\left[(\varphi_{\text{max}}/\varphi_{\text{н}})^{1/3} - 1\right]^{1-3/2m}},$$

де  $m = 1 - n$ ;  $C(m)$  – функція індексу течії розплаву полімеру ТпКМ:

$$C(m) = \begin{cases} \frac{3}{8} 2^{m/2} \left[ \frac{(3-2m)(2-m)}{1-m} \right] \text{B}\left(2 - \frac{m}{2}, 1 - \frac{3m}{2}\right), & 0 < m \leq 0,3; \\ 1,77, & m > 0,3. \end{cases} \quad (1.9)$$

У виразі (1.9) значення  $C(m)$  визначають за допомогою бета-функції  $\text{B}(p, q)$  [104] (тут  $p$  і  $q$  – аргументи бета-функції).

Слід зазначити, що ефективну в'язкість багатокомпонентних ТпКМ зернистої структури, як і їх теплофізичні властивості, можна визначити послідовним обчисленням ефективних властивостей бікомпонентних систем [87]. Але, зважаючи на те, що при цьому беруть до уваги лише об'єми (об'ємні частки) компонентів і не враховують відносні розміри, форму та орієнтацію частинок, такий підхід може призвести до одержання значень, відмінних від реальних.

Підсумовуючи вищевикладене, необхідно зазначити, що майже всі пропонувані залежності для визначення теплофізичних і реологічних властивостей ТпМ передбачають рівномірний розподіл компонентів по їх об'єму, що можливе лише безпосередньо перед формуванням з них продукції або після нього. Під час переробки ТпМ, особливо під час приготування композицій, склад перероблюваної маси відрізняється від ідеального, і тому теплофізичні властивості ТпМ доцільно розраховувати за правилом адитивності.

Крім того, зазначені заоєжності задовільно описують реологічні властивості ТпМ з використанням первинних полімерів і нейтральних компонентів (наприклад, нефункціоналізованих наповнювачів (див. п. 1.2.1). Вторинна же сировина, і в першу чергу вторинні полімери і матеріали на їх основі, характеризуються наявністю хімічних змін, спричинених різними формами й ступенями деструкції (хімічної, фізичної, механічної та їх комбінації), яка залежить

від умов попередньої переробки, експлуатації та зберігання цієї сировини. Одним з основних недоліків вторинних полімерів є їх знижена термомеханічна стійкість, яка збільшується з кожним циклом наступної переробки та використання. При цьому навіть під час переробки ТпМ із суміші первинного і вторинного одного і того самого полімеру реологічні властивості ТпМ не підпорядковуються правилу адитивності і зазвичай виявляються значно гіршими за розраховувані на підставі закону лінійної композиції [23].

Для з'ясування можливості застосування тієї чи іншої розрахункової залежності для визначення реологічних властивостей ТпМ з використанням вторинної сировини бажано здійснити її експериментальну перевірку, яка в більшості випадків ґрунтується на віскозиметричних дослідженнях композиції під час її простого зсуву, що майже не відповідає реальним умовам переробки. Крім того, для проведення віскозиметричних досліджень необхідно одержати ТпМ, що зазвичай здійснюють за допомогою екструзії, яка у свою чергу передбачає наявність відповідних даних з реології. З огляду на зазначене для практичного застосування реологічних властивостей ТпМ доцільно застосувати результати дослідів, проведених безпосередньо на відповідному переробному обладнанні [105, 106]. Такий підхід дає можливість максимально врахувати конструктивні й режимні особливості обладнання та процесу переробки відповідного ТпМ.

### **1.3. Аналіз основних методів рециклінгу полімерних відходів та обладнання для їх реалізації**

Процес одержання та переробки ТпМ з використанням вторинної сировини зазвичай включає такі стадії: підготовка (сортування, дроблення, мийка, зневоднення, сушіння) і дозування компонентів, їх змішування, формування, термообробка (зазвичай охолодження), різання, оздоблювання тощо [7, 23, 26, 107–110].

У типовій технологічній лінії виробництва грануляту з термопластичних відходів (рис. 1.5) вихідна сировина надходить на приймальний стіл 1, з якої видаляють домішки, а полімерну складову стрічковим транспортером 3 подають у подрібнювач 4. Подрібнена сировина шнековим транспортером подається на гарячу мийку, а потім – послідовно на фрикційну та флотаційну мийку. Після промивання й видалення основної вологи подрібнена сировина сушиться і подається в екструдер 14, що формує стренги, які після охолодження подрібнюються і у вигляді гранул потрапляють у бункер-нагромаджувач 17. Залежно від складу і стану вихідної сировини наведена схема може бути змінена.

Основні проблеми для такої схеми виникають під час сортування відходів. Однак їх можна уникнути, забезпечивши прямий контакт переробників вторинної сировини з виробниками: заводами з виробництва пластмас, фармацевтичними підприємствами, торговельними організаціями тощо.

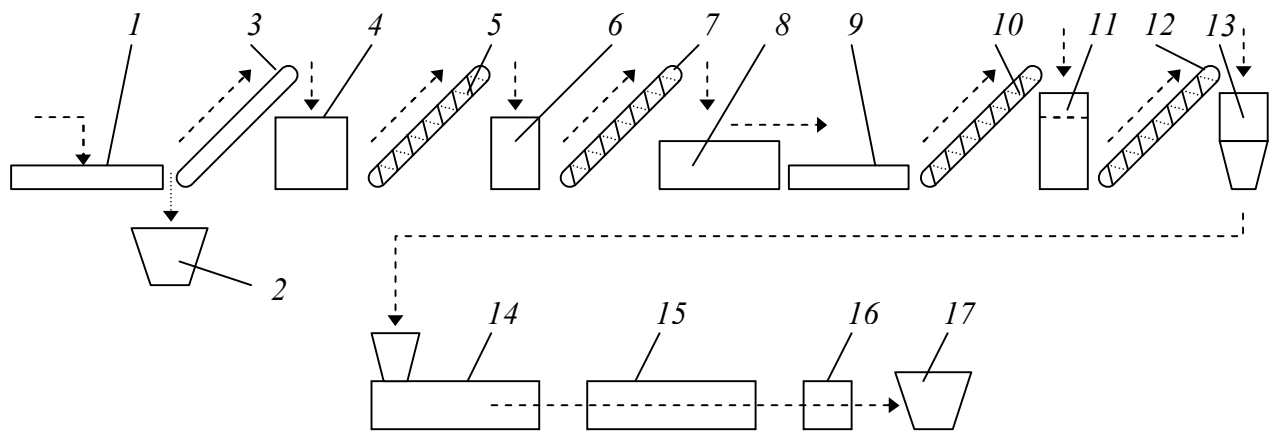


Рис. 1.5. Схема технологічної лінії виробництва грануляту: 1 – приймальний стіл; 2 – бункер для домішок; 3 – стрічковий транспортер; 4 – подрібнювач; 5, 7, 10, 12 – шнекові транспортери; 6 – гаряча мийка; 8 – фрикційна мийка; 9 – флотаційна мийка; 11 – промивальний пристрій; 13 – сушарка; 14 – екструдер; 15 – охолодний пристрій; 16 – гранулятор; 17 – бункер-нагромаджувач

Якщо вторинна сировина надходить безпосередньо з таких підприємств, то технологічна схема істотно спрощується, оскільки стають зайвими майже всі стадії до подрібнювання сировини. Саме цим і пояснюється досить великий рівень утилізації використання відходів виробництва: співвідношення рівнів використання полімерних відходів виробництва і споживання становить приблизно 9:1 [111].

Безумовно, навіть за умови бездоганних ідентифікування, очищення та остаточної підготовки полімерних відходів у ряді випадків застосування методів фізичної утилізації стає неможливим або недоцільним. У таких випадках відходи доцільно застосовувати як вторинні енергетичні ресурси, оскільки теплота згоряння полімервмісних відходів складає 38–46 МДж/кг, а теплота згоряння кам'яного вугілля й мазуту – 31 і 44 МДж/кг відповідно [22, 23, 112–114].

Лінії з виробництва безперервних і погонних виробів з ТпМ можна поділити на три групи: каландрові, екструзійні та комбіновані (рис. 1.6–1.9) [22, 108, 115–126].

Каландрові лінії (див. рис. 1.6) застосовуються для одержання листових і рулонних виробів і відрізняються великою продуктивністю (до 10 млн м<sup>2</sup>/рік та більше), однак необхідність спеціального змішувального та змішувально-підігрівального обладнання (роторних змішувачів і вальців) значно ускладнює та здорожує лінію. Крім того, такі лінії можуть забезпечити доволі обмежений асортимент одержуваної продукції. Тому лінії на базі каландрів використовуються виключно у великотоннажних виробництвах.

Екструзійні лінії, хоч зазвичай і мають меншу продуктивність, ніж каландрові, вирізняються безперечними перевагами: суміщенням багатьох функцій в одній машині (плавлення полімеру, змішування, дегазація, формування

ТпМ), можливістю швидкого переходу на випуск виробу іншої форми й розмірів (заміною формувального пристрою), універсальністю (одержанням майже всіх видів і типорозмірів безперервних і погонних матеріалів і виробів).

У зв'язку з цим переваги ліній на базі екструдерів безперечні й завдання полягає головним чином у правильному виборі базової машини, визначення послідовності подавання компонентів підготовлюваної суміші, а також агрегатного стану полімеру під час введення до його складу наповнювача (див. рис. 1.7).

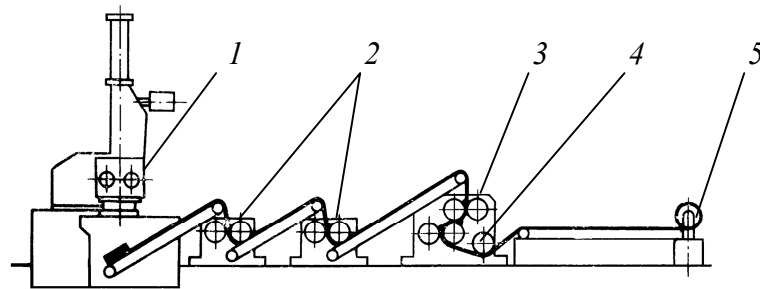


Рис. 1.6. Схема лінії для виробництва одношарових рулонних ТпМ на базі каландра: 1 – роторний змішувач; 2 – вальці; 3 – каландр; 4 – охолодний пристрій; 5 – приймальний пристрій

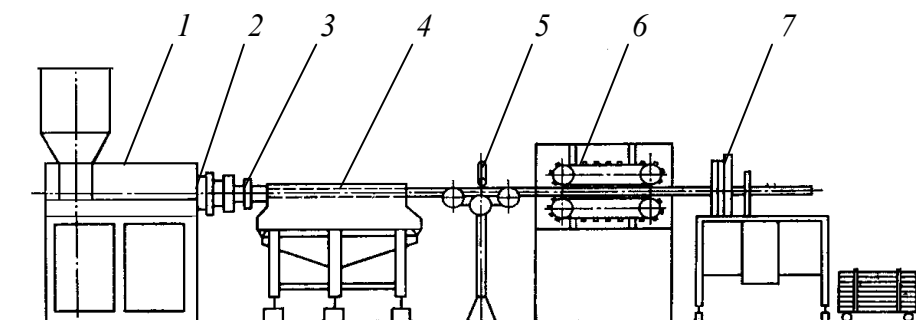


Рис. 1.7. Схема лінії для виробництва труб із ТпМ на базі черв'ячного екструдера: 1 – черв'ячний екструдер; 2 – трубна головка; 3 – калібрувальний пристрій; 4 – охолодний пристрій; 5 – маркувальний пристрій; 6 – тягнучий пристрій; 7 – відрізний пристрій

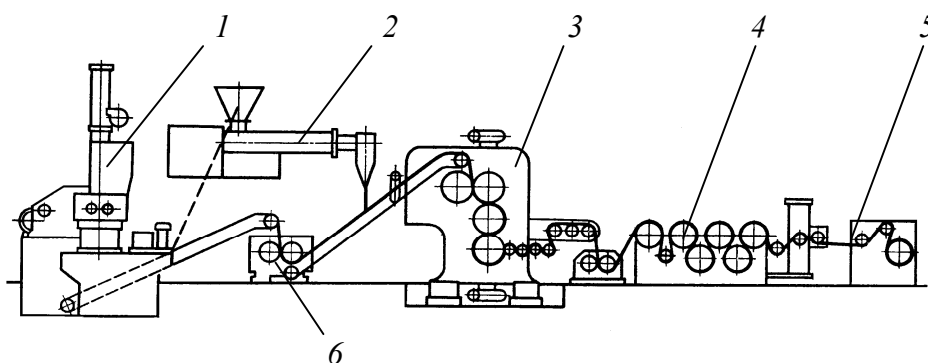


Рис. 1.8. Схема лінії для виробництва рулонних ТпМ на базі каландра з універсальним (вальцьово-екструзійним) живленням: 1 – роторний змішувач; 2 – черв'ячний екструдер; 3 – каландр; 4 – охолодний пристрій; 5 – приймальний пристрій; 6 – вальці

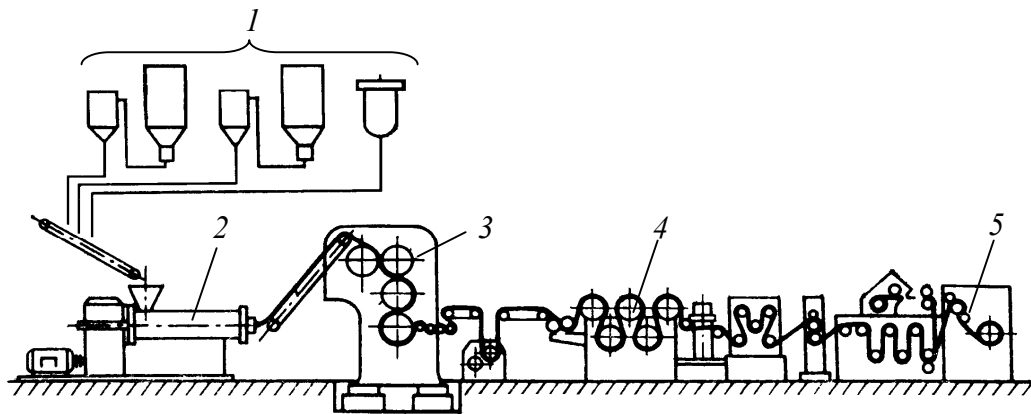


Рис. 1.9. Схема комбінованої (екструзійно-каландрової) лінії для виробництва рулонних ТпМ: 1 – бункери компонентів ТпМ; 2 – черв'ячний екструдер; 3 – каландр; 4 – охолодний пристрій; 5 – приймальний пристрій

Аналіз сучасних конструкторських рішень у технології формування виробів з ТпМ на основі екструзійної технології дозволив виділити такі п'ять основних варіантів реалізації процесу [28, 108, 110, 127]:

1. Екструзійна установка на базі однокерв'ячного екструдера, який у цьому випадку має три функціональні зони: подавання, плавлення й гомогенізації. У першу зону подають гранули полімеру, які ущільнюються плаваються в другій зоні, в кінці якої дозують наповнювач. У третій зоні за необхідності забезпечується дегазація й відбувається змішування розплаву полімеру з наповнювачем, після чого ТпМ екструдується крізь формувальний пристрій.

Основні переваги: відносно прості конструкція і процес керування установкою, забезпечення достатньо якісного змішування.

2. Екструзійна установка на базі двокерв'ячного екструдера.

У цьому випадку можливі два варіанти організації процесу:

а) заздалегідь змішані гранули або порошок полімеру й наповнювач дозуються на вхідній ділянці екструдера. Під час проходження сумішню екструдера відбувається розплавлення полімеру, його змішування з наповнювачем, гомогенізація та екструдування крізь формувальний пристрій.

Основні переваги: висока якість змішування, простота конструкції установки та схеми керування процесом, можливість використання порошкоподібного полімеру. Недоліки: відносно складна конструкція, уповільнений режим плавлення полімеру внаслідок одночасного подавання компонентів ТпМ;

б) компоненти суміші дозуються окремо: на вхідній ділянці екструдера – полімер, а після його розплавлення – наповнювач. Під час подальшого проходження сумішню екструдера відбувається її гомогенізація та екструдування крізь формувальний пристрій.

Основні переваги: висока якість змішування, можливість використання порошкоподібного полімеру, підвищена порівняно з попереднім варіантом ін-

тенсивність плавлення полімеру. Недоліки: відносно складна конструкція, необхідність встановлення системи дозування наповнювача.

3. Каскадна екструзійна установка на базі черв'ячного екструдера-розплавлювача й черв'ячного змішувача. Гранули полімеру надходять в екструдер-розплавлювач, після чого розплав разом з дозованим наповнювачем потрапляє до змішувача, де відбувається процес змішування компонентів ТпМ та його екструдювання крізь формувальний пристрій.

Основні переваги: інтенсивне розплавлення полімеру й достатньо якісне змішування. Недолік – ускладнена конструкція установки.

4. Каскадна екструзійна установка на базі дискового розплавлювача-змішувача та одночерв'ячного екструдера-змішувача. У цій схемі гранули полімеру та наповнювач одночасно дозуються в дисковий розплавлювач, потім розплав з наповнювачем надходить до одночерв'ячного екструдера, остаточно гомогенізується та екструдюється крізь формувальний пристрій.

Основні переваги: висока якість змішування в дисковому екструдері, спрощена конструкція екструдера (наявність одночерв'ячного екструдера замість двочерв'ячного). Недолік – зменшення інтенсивності плавлення полімеру в присутності наповнювача й необхідність їх попереднього змішування.

5. Каскадна екструзійна установка на базі черв'ячного або дискового екструдера-розплавлювача і двочерв'ячного екструдера-змішувача. У цьому варіанті розплав полімеру з першого екструдера під тиском потрапляє в другий, в який дозується і наповнювач, при цьому розплав ефективно розподіляється між частинками наповнювача, що сприяє одержанню високогомогенізованого ТпМ [128].

Основні переваги: інтенсивне розплавлення полімеру та якісне змішування. Недолік – ускладнена конструкція установки.

Аналізуючи вищенаведені схеми конструктивної реалізації екструзійної технології ТпМ, можна зробити висновок щодо доцільності застосування схем з попереднім плавленням термопласту і подальшим введенням у розплав наповнювача та інших компонентів ТпМ.

Комбіновані лінії з виробництва безперервних і погонних виробів з ТпМ займають проміжне положення між каландровими та екструзійними (див. рис. 1.8, 1.9).

Однією з перших стадій переробки ТпМ з використанням вторинної сировини є її подрібнювання, для якого зазвичай застосовують валкові дробарки й черв'ячні подрібнювачі, а також ножові гранулятори. Останнім часом поширення набуває високоефективний пружнодеформаційний метод руйнування полімервмісних матеріалів, на якому ґрунтується робота роторних подрібнювачів для утилізації полімервмісних відходів. Зазначений метод не лише забезпечує одержання крихти з розвиненою активованою питомою поверхнею, а й відрізняється невисокою енергоємністю [39, 108, 129–134].

Чи не найвідповідальнішою стадією переробки ТпМ з використанням вторинної сировини є змішування. У випадку періодичного змішування всі компоненти одночасно або у певній послідовності вводяться до обмеженого об'єму полімеру, на який багатократно діють робочі органи змішувального обладнання. За цим принципом працюють барабанні, лопатеві, вихрові, роторні змішувачі й вальці періодичної дії. Безперервне змішування реалізують в одно-, дво- та багаточерв'ячних екструдерах, дискових, черв'ячно-дискових, дисково-черв'ячних, дисково-камерних змішувачах і на вальцях безперервної дії.

Одним з традиційних видів змішувального обладнання залишаються роторні змішувачі та вальці як періодичної, так і безперервної дії, робочими органами яких є, відповідно, два ротори та валки, що обертаються назустріч один одному [115, 117, 135]. Незважаючи на певні переваги цього обладнання (можливість регулювання тривалості та інтенсивності дії робочих органів на оброблювану композицію, забезпечення продуктивності в широкому діапазоні, зручність експлуатації), воно відрізняється суттєвими матеріало- та енергоємністю.

Натепер дуже широко використовують універсальні та достатньо продуктивні черв'ячні екструдери-змішувачі (фірмою Berstorff GmbH (Німеччина) розроблено одночерв'ячний екструдер з діаметром черв'яка 800 мм для переробки поліетилену низької густини продуктивністю 40 т/год [136]), удосконалення яких здійснюється в основному застосуванням різноманітних змішувальних елементів, якими споряджаються як черв'як, так і циліндр.

Останнім часом, незважаючи на більш складну конструкцію й вартість, широкого поширення набувають двочерв'ячні екструдери, які стають основним обладнанням для високопродуктивних ліній одержання різноманітних ТпМ [137].

Значна кількість двочерв'ячних екструдерів обладнано набірними черв'яками, геометрія яких забезпечується набором встановлюваних на осердях черв'яків втулкових елементів. Основна перевага таких екструдерів – можливість змінювання й регулювання геометрії їх черв'яків, а отже і можливість ефективної переробки найрізноманітних ТпМ.

За останні роки провідні розробники полімерпереробного обладнання (Battenfeld, Barmag, Berstorff (ФРН), Buss (Швейцарія), Mitsubishi Petrochemical (Японія), Egan, John Brown (Великобританія), Sterling Extruder Corp., Davis-Standard (США) та ін.) освоїли випуск двочерв'ячних екструдерів, які істотно відрізняються конструктивними параметрами й технологічними можливостями [138–147]. Отже, під час розробки технологічних ліній для виробництва конкретної продукції з певного матеріалу перед проектувальниками постає завдання за всієї різноманітності екструзійного устаткування вибрати саме ту конструкцію, яка для заданої продуктивності забезпечить необхідну якість переробки при найменших енерговитратах [148–172].

I, нарешті, ще одним з важливих видів обладнання технологічних ліній є охолодні пристрої, які зазвичай виконують у вигляді рольгангів (у разі повітряного охолодження) або ванн охолодження (у разі водяного охолодження).

Як показали дослідження й лабораторні випробування, проведені спеціалістами кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв НТУУ «КПІ», а також промислова експлуатація екструзійного обладнання, розробленого та виготовленого ВАТ «НВП „Більшовик”» та УкрНДІпластмаш (м. Київ), найбільш доцільним для виробництва виробів з ТпМ з точки зору співвідношення «продуктивність – якість виробів – ціна» є використання екструзійних ліній на основі одно- і двочерв’ячних екструдерів, а також ліній на основі змішувально-валкового обладнання.

#### **1.4. Аналіз моделювання обладнання та процесів переробки термопластичних матеріалів**

Широке застосування полімерів спричинило інтенсивні наукові дослідження особливостей їх переробки у вироби, результатом яких стала значна кількість монографій, підручників і навчальних посібників [7, 8, 14, 16, 18–20, 22–25, 31, 35, 41, 59–61, 78, 82, 85, 88, 90–93, 97, 98, 101–103, 111, 115–119, 173–189 та ін.], дисертаційних праць [72, 73, 1906–203 та ін.], численних статей, патентних і нормативних документів, а також інших матеріалів.

Номенклатура сучасних термопластів дуже велика. Як було показано в підрозд. 1.2, параметри обладнання та процесів переробки ТпМ з використанням вторинної сировини, і в першу чергу вторинних полімерів, можуть істотно відрізнитися від параметрів обладнання та процесів переробки первинних полімерів, які характеризуються стабільними і прогнозованими властивостями. При цьому однією з основних особливостей ТпМ з використанням вторинної сировини є їх знижена термічна й механічна стабільність [23, 29, 204], що передбачає особливо ретельного дотримання умов їх переробки. При цьому майже кожний перероблюваний матеріал потребує певної конструкції робочих органів обладнання та/або режимів переробки, за яких досягається необхідна якість одержуваної продукції. У зв’язку з цим зростає значення математичного моделювання обладнання та процесів переробки ТпМ з використанням вторинної сировини, адже «Математичне моделювання є найбільш досконалим та ефективним методом моделювання, що відкриває шлях для застосування сучасних потужних методів математичного аналізу, обчислювальної математики і програмування під час дослідження та оптимізації технологічних процесів (переклад з російської мій. – І.М.) [205, с. 8]»\*. Математичне моделювання є дієвим засобом збереження та ефективного використання ба-

---

\* Гун Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением : учеб. пособие для вузов / Г. Я. Гун. — М. : Металлургия, 1983. — 352 с.

гатьох видів ресурсів: сировинних, енергетичних, людських, часових та ін.

Розглянемо більш докладно особливості математичного моделювання кожного з основних видів обладнання, яке визначає якість одержуваної продукції.

#### 1.4.1. Переробка в роторних змішувачах

Роторні змішувачі зазвичай входять до складу вальцьово-каландрових ліній для попереднього приготування перероблюваної композиції. Корпус роторного змішувача містить камеру, що в поперечному перерізі має форму вісімки, у кожній частині якої назустріч один одному обертаються два ротори у вигляді трансформованого овалу, внаслідок чого закриті роторні змішувачі також називають змішувачами з овальними роторами [117, 180, 189, 206] (рис. 1.10).

Робочий об'єм камери змішувача умовно можна поділити на чотири характерних зони: серпоподібну область I ефективного змішування, яка утворюється стінкою однієї з півкамер і лобовою поверхнею відповідного ротора, затилкову область II, у яку потрапляє матеріал після проходження ним області III мінімального проміжку між стінкою півкамери і гребенем ротора, а також область IV між роторами, у якій здійснюється перерозподіл оброблюваної композиції між півкамерами.

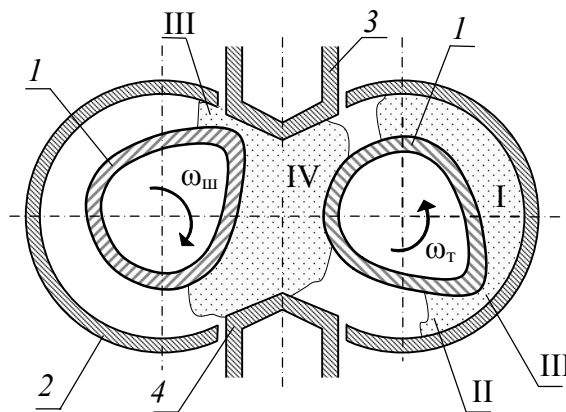


Рис. 1.10. Схема обробки композиції в камері змішувача: 1 – ротори; 2 – робоча камера; 3, 4 – верхній і нижній затвори; I–IV – характерні області деформування композиції;  $\omega_{ш}$  і  $\omega_{т}$  – кутові швидкості швидкохідного й тихохідного роторів

У більшості моделях переробки композицій у змішувачі з овальними роторами приймають такі припущення [101, 102, 118, 119, 206, 207]: перероблюваний матеріал нестисливий; його рух усталений і одновимірний; глибина робочих проміжків у діаметральному перерізі роторів достатньо мала порівняно з радіусом роторів і півкамер; масові та інерційні сили незначні порівняно з

силами в'язкості; аналіз течії матеріалу виконують розгортанням на площину робочої поверхні ротора й камери на ділянці серпоподібного проміжку (рис. 1.11).

Ці методики зазвичай орієнтовані на переробку ТпМ, течія яких описується степеневим реологічним рівнянням (1.8) [118, 206, 207]. У працях же [119, 102] перероблюваний матеріал розглядають як рідину ньютонівської поведінки, що дає можливість із задовільною точністю аналізувати процес переробки в серпоподібному проміжку ТпМ, що проявляє властивості, відмінні від поведінки рідин, течія яких описується степеневим реологічним рівнянням.

У праці [102] розглядається дуже спрощена модель, у якій серпоподібний проміжок замінюється двома послідовними проміжками різної висоти та усередненої швидкості поверхні ротора, кожний з яких утворений паралельними стінками. Подібний підхід (згаданий проміжок розбивається на сукупність коротких «сходинок» з паралельними стінками), але з більшою кількістю ділянок, застосовується і в праці [101] для розгляду переробки рідин, течія яких описується степеневим реологічним рівнянням.

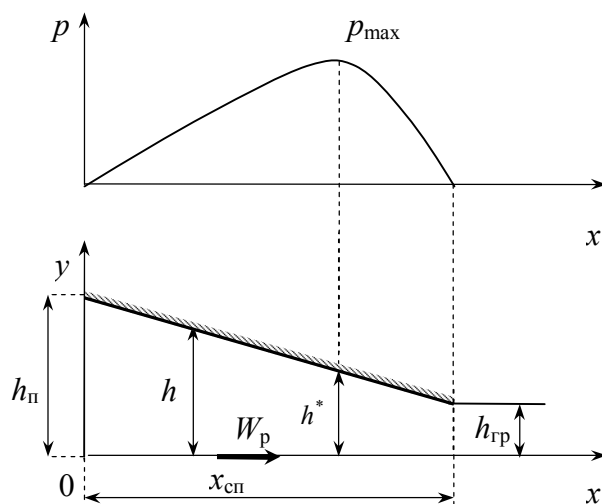


Рис. 1.11. Схема серпоподібного каналу роторного змішувача після його розгортання на площину і розподіл вздовж нього тиску:  $x, y$  – поточні координати вздовж і поперек каналу;  $x_{\text{сп}}$  – довжина серпоподібного проміжку;  $h_p, h, h_{\text{гр}}$  – максимальна, поточна й мінімальна висоти каналу;  $W_p$  – лінійна швидкість робочої поверхні ротора;  $p, p_{\max}$  – поточний і максимальний тиск у каналі

Також у працях [118, 206] запропоновані розрахункові залежності, отримані з урахуванням експериментальних даних з переробки обмеженого класу матеріалів (гум, використовуваних у шинному виробництві), що значно звужує область їх застосування на практиці.

При цьому найбільш прийнятна методика розрахунку роторних змішувачів, розроблена Торнером Р. В. та Акутіним М. С. [119], враховує ізотерміч-

ну переробку одержуваних ТпМ лише в серпоподібних проміжках, нехтуючи при цьому впливом на процес мінімальних проміжків, в яких реалізуються найбільші напруження зсуву.

Майже у всіх зазначених працях процес у роторному змішувачі розглядається з точки зору визначення гідродинамічної картини перероблюваного матеріалу і майже зовсім не стосується питання визначення тривалості змішування (існуючі ж спроби розрахунку відрізняються істотною складністю та/або невисокою точністю [118, 119]), від якого залежить не лише якість одержуваного ТпМ, а і продуктивність змішувача [208–211].

Таким чином, натепер відсутня комплексна методика розрахунку роторного змішувача, яка б забезпечила визначення енергосилових параметрів процесу (зусилля, що діють на ротори, потужність, необхідна для обертання роторів, параметри системи охолодження робочих органів) з урахуванням взаємного впливу серпоподібного і мінімального проміжків, залежності швидкості поверхні роторів від радіуса, а також зміни температури матеріалу під час його переробки, що має особливе значення в разі переробки термомеханочутливих ТпМ з використанням вторинної сировини. Також відсутня прийнятна для практичного використання методика розрахунку тривалості змішування в роторному змішувачі.

#### **1.4.2. Переробка на валкових машинах**

Вальці й каландри, які належать до базового обладнання вальцюво-каландрових ліній для виробництва рулонних і плівкових матеріалів, є досить матеріало- та енергоємним устаткуванням, тому питанням моделювання й дослідження процесів переробки матеріалів на цьому обладнанні, а також розробки і вдосконалення методик їх розрахунку приділяли і приділяють увагу багато дослідників, таких як Воронін Л. Г., Доброногова С. І., Лукач Ю. Ю., Маленко К. С., Ружинська Л. І., Бекин Н. Г., Красовский В. Н., Торнер Р. В., Тябин Н. В., Gaskell R. E., Luther S., Tadmor Z., Unkrüer W. та ін. [78, 88, 101, 102, 115, 117–119, 177, 179, 180, 183, 192, 194–196, 212–220].

Основними зонами переробки ТпМ на валкових машинах є один (у вальцях, рідше в каландрах) або декілька (у каландрах) міжвалкових проміжків і ділянки поза зазначеними проміжками.

Для розрахунку процесу теплообміну ТпМ поза міжвалковими проміжками можна скористатися методиками, наведеними, наприклад, у працях [78, 212]. Основними же зонами, що впливають на енергосилові параметри вальцювання і каландрування, а також якість одержуваної продукції, є міжвалкові проміжки валкових машин, схему течії нестисливої рідини в одному з яких наведено на рис. 1.12.

В останні півсторіччя були здійснені досить досконалі експериментальні й теоретичні дослідження течії матеріалу в міжвалковому проміжку. При цьому перероблюваний матеріал розглядають як неньютонівську псевдопластичну або ньютонівську рідину [31, 78, 101, 102, 115, 117–119, 177, 183, 192, 194–196, 206, 207, 220]. У цьому разі аналіз поведінки перероблюваного матеріалу як ньютонівської рідини дає можливість отримати параметри процесу переробки матеріалів, течію яких неможливо описати степеневим реологічним рівнянням.

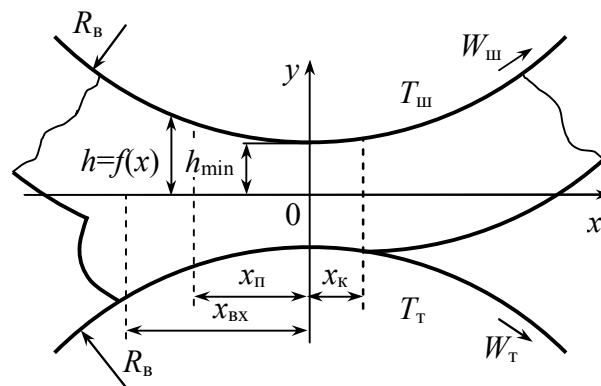


Рис. 1.12. Схема течії матеріалу в міжвалковому проміжку:  $x, y$  – координати, спрямовані вздовж і поперек міжвалкового проміжку;  $x_{вх}, x_{п}, x_{к}$  – координати входу матеріалу в міжвалковий проміжок, початку й кінця зони деформування;  $R_B$  – радіус валка;  $W_{ш}, W_{т}$  – колові швидкості швидкохідного й тихохідного валків;  $h, h_{min}$  – половина поточної й мінімальної величин міжвалкового проміжку;  $T_{ш}, T_{т}$  – температури швидкохідного й тихохідного валків

На відміну від теорії симетричного вальцювання (каландрування) полімерів, яка розроблена як для ньютонівських, так і для неньютонівських рідин, течія яких описується степеневим реологічним рівнянням, у теорії несиметричного вальцювання (каландрування) відомі декілька підходів, однією з відмінностей яких є використання коефіцієнта, що зв'язує між собою колові швидкості бочок швидкохідного й тихохідного валків.

У праці [118] для аналізу несиметричного процесу пропонується застосовувати залежності, отримані для симетричного процесу, і в які підставляють середню швидкість валків, що утворюють міжвалковий проміжок. Але такий підхід дає результати, які в більшості випадків незадовільно узгоджуються з експериментальними даними.

У більшості праць, наприклад [78, 88, 115, 117, 177, 183, 195, 207, 220], під час дослідження несиметричного вальцювання і каландрування використовують поняття фрикції  $f$  – відношення колових швидкостей швидкохідного й тихохідного валків. Значення фрикції при цьому змінюється від одиниці (симетричний процес) до нескінченності (асиметричний процес, тобто граничний випадок несиметричного процесу за умови нерухомого тихохідного валка). За умови же  $f \rightarrow \infty$  існуючі залежності й методики розрахунку стають непридатними.

Коректніше на наш погляд використовувати величину, що лежить в діапазоні від нуля до одиниці, як, наприклад, у праці [101], де застосовують коефіцієнт  $\zeta = (W_{\text{ш}} - W_{\text{т}})/(W_{\text{ш}} + W_{\text{т}})$ , який змінюється від нуля (симетричний процес) до одиниці (асиметричний процес). Характер зміни коефіцієнта  $\zeta$  – гіперболічний.

Більш зручним представляється коефіцієнт фрикції  $\psi = 1/f = W_{\text{т}}/W_{\text{ш}}$ , який змінюється лінійно – від нуля (асиметричний процес) до одиниці (симетричний процес), але відповідні дослідження були виконані лише для матеріалів, течія яких описується степеневим реологічним рівнянням [196, 212].

При цьому майже у всіх зазначених працях процес вальцювання розглядається з точки зору визначення гідродинамічної картини перероблюваного матеріалу і майже не стосується питання визначення тривалості змішування, від якого залежить як якість одержуваного ТпМ, так і продуктивність вальців (при цьому існуючі методики визначення тривалості вальцювання [88, 119, 180, 213] відрізняються значною складністю, внаслідок чого їх досить важко застосовувати на практиці).

Також одним з різновидів валкового обладнання є гладильні каландри, призначені для забезпечення остаточних розмірів, структури та якості поверхні екструдованих листів [78, 108, 122, 194, 214, 215].

Попередньо сформована в плоскошліпінній головці черв'ячного екструдера листова заготовка калібрується в одному чи декількох міжвалкових проміжках гладильного каландра (рис. 1.13).

Валки гладильного каландра мають температуру меншу від температури твердіння перероблюваного матеріалу (зазвичай це температура твердіння полімерної матриці ТпМ). На каландр листова заготовка надходить у в'язкоплинному стані. Стикаючись з робочими поверхнями валків, лист охолоджується й поблизу обох його поверхонь поступово утворюються шари затверділого матеріалу (області А1 та А2 на рис. 1.13), між якими залишається прошарок в'язкоплинного матеріалу (область Б).

З метою попередніх розрахунків процесів переробки ТпМ на гладильному каландрі можна скористатися методиками, придатними для плівкових і листувальних каландрів, в яких температура робочої поверхні валків перевищує температуру плавлення (твердіння) перероблюваного матеріалу [78, 101, 102, 196, 207, 212]. Проте переробка матеріалів на гладильному каландрі передбачає часткове твердіння листа по його товщині з боку валків, температура яких менша за температуру твердіння перероблюваного матеріалу. Унаслідок цього дійсні параметри процесів калібрування листів на гладильному каландрі можуть істотно відрізнятися від розрахованих за методиками, придатними для традиційного каландрування. Для уточнених розрахунків доцільно користуватися методиками, безпосередньо призначеними для дослідження зазначеного процесу [78, 194, 214, 215]. Але зазначені методики придатні лише для дослі-

дження переробки на гладильному каландрі матеріалів, течія яких описується степеневим реологічним рівнянням (1.8).

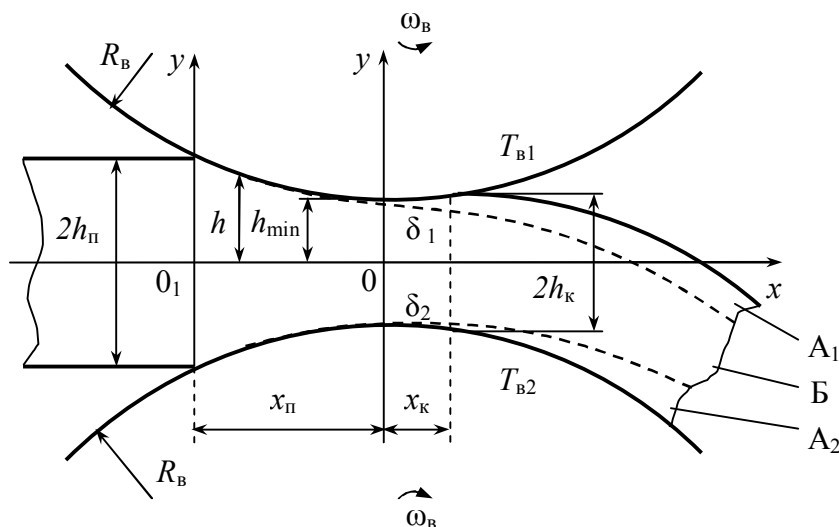


Рис. 1.13. Схема течії матеріалу в міжвалковому проміжку гладильного каландра:  
 $h_{\Pi}$ ,  $h_K$  – половина товщини листа на вході в міжвалковий проміжок і на виході з нього;  
 $\delta_1$  і  $\delta_2$  – величини шарів розплаву від центра листа в бік відповідного валка (відстані від центра листа до відповідної поверхні «розплав – затверділий матеріал»);  
 $T_{B1}$ ,  $T_{B2}$  – температури валків;  $\omega_B$  – кутова швидкість валків

Крім того, найбільш ґрунтовні дослідження зазначеного процесу [78, 194, 215] передбачають симетричний розподіл швидкостей розплаву (не робочих поверхонь валків, а саме розплаву) всередині охолоджуваного листа, хоча внаслідок у загальному випадку різних умов охолодження матеріалу з протилежних боків (перепад температур між валками, що утворюють міжвалковий калібрувальний проміжок, досягає 35 °С [216]) товщини приповерхневих шарів твердого матеріалу будуть різними, а отже і розподіл швидкостей розплаву між цими шарами буде несиметричний.

Таким чином, на сьогодні відсутня методика розрахунку неізотермічного процесу переробки ТпМ, течію яких не можна описати степеневим реологічним рівнянням, у міжвалковому проміжку валкових машин, яка б дозволила визначати енергосилові параметри цього процесу за швидкісних і температурних умов переробки в широкому діапазоні їх значень, а також тривалість вальцювання (як безперервного, так і періодичного), що має особливе значення під час дослідження термомеханочутливих ТпМ з використанням вторинної сировини.

### 1.4.3. Переробка в черв'ячних екструдерах

Як показав аналіз, проведений у підрозд. 1.3, найпоширенішим типом технологічного обладнання для формування ТпМ є одно- і двочерв'ячні екструдери, теоретичному та експериментальному дослідженню яких присвячено

численні праці [18–20, 31, 88, 101–103, 116–119, 139, 140, 143–164, 166–174, 178, 180, 182, 185–190, 197–203, 221–236 та ін.].

Екструзійні методи знайшли широке застосування для переробки полімерів і композиційних матеріалів на їх основі, сільськогосподарської сировини, харчових продуктів, відходів переробки м'яса і шкіри, а також як реактори-полімеризатори. Поширення екструдерів можна пояснити тим, що в них можливе створення таких умов переробки, які неможливо реалізувати в іншому технологічному обладнанні: регульований тиск, температурний режим, механічні навантаження, а також відносно невеликий тривалість перебування в активній зоні перероблюваної маси та відсутність її контакту з оточуючим середовищем. В екструдерах здійснюється переробка високов'язких середовищ, у них можуть мати місце фазові, хімічні та біохімічні перетворення (прикладом таких процесів може бути переробка спінених полімерів, коли в об'єм маси вводять спінювальний компонент, і в екструдері відбуваються фазові перетворення [203]), а тому тепловий режим процесу екструзії визначається в основному не зовнішніми системами теплопостачання, як це має місце в більшості традиційного технологічного обладнання, а інтенсивністю дисипативних джерел енергії у всьому об'ємі перероблюваної маси. Інтенсивність дисипації визначається в'язкістю ТпМ, геометрією і частотою обертання черв'яків. Так, у лініях для виробництва труб енергія дисипації вводиться в полімер на довжині черв'яка зазвичай до трьох метрів, а відводиться в охолодних ваннах завдовжки в десятки метрів. Оскільки кожний перероблюваний матеріал, і в першу чергу з використанням вторинної сировини, має визначені властивості, то для його переробки необхідна певні геометрія робочих органів і режим переробки.

З'являється багато нових матеріалів, які потребують відповідної конструкції екструдерів. Цим зокрема пояснюється велика різноманітність екструзійного обладнання, яке пропонується різними фірмами. При цьому непоодинокі випадки, коли навіть найсучасніше обладнання вже під час зміни виробника одного й того самого полімеру перестає забезпечувати необхідну якість переробки, у зв'язку з чим моделюванню процесів переробки протягом тривалого часу приділяється значна увага. Це дає можливість, з одного боку обґрунтовано проектувати робочі органи екструдерів, а з іншого – здійснювати вибір існуючого обладнання для переробки певного матеріалу.

Класична теорія екструзії, розроблена та опублікована у відомих працях Тадмора Д., Мак-Келві М.Д., Бернхардта Е., Шенкеля Г., Лукача Ю.Ю., Торнера Р.В., Басова М.І., Кіма В.С. та інших дослідників, базується на розв'язанні математичних моделей аналітичними методами для так званої оберненої плоскопаралельної моделі з нерухомим черв'яком і обертовим циліндром [116–119, 152, 158, 167, 168, 176, 178, 101–103, 182, 185–190, 221–224, 226, 227, 229, 230, 233, 234], яка дає можливість привести задачу до прямокутної (рідше – до цилі-

ндричної [229, 230]) системи координат, вважаючи черв'як нерухомим і розгорнутим на площині, а циліндр – таким, що рухається відносно каналу черв'яка й теж розгорнутим на площині. При цьому окремо розглядають та аналізують зони подавання, плавлення й гомогенізації, які послідовно проходить перероблюваний матеріал. Ці моделі уточнювались із врахуванням можливостей комп'ютерної техніки з метою дослідження факторів, не врахованих у спрощених класичних моделях. При цьому в значній кількості праць вводяться коефіцієнти, отримання яких для розрахунку відповідних обладнання та процесів досить ускладнене і які врешті-решт майже не впливають на кінцевий результат, що показує порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними [186]. У той же час ускладнення моделей для інженерних розрахунків часто є недоцільним, оскільки реальні властивості перероблюваних матеріалів не завжди повною мірою можуть бути враховані в теоретичних моделях.

У літературі існує досить мало інформації щодо використання розроблених моделей для розрахунку процесу черв'ячної екструзії в цілому. Але саме такі моделі, які розглядають екструдер як єдине ціле із врахуванням взаємного зв'язку всіх зон, можуть надати інструмент для правильного проектування або вибору існуючого обладнання для переробки певного матеріалу.

Такі моделі екструзії розроблялися на кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв НТУУ «КПІ» у співпраці з ВАТ «НВП „Більшовик”» та УкрНДІпластмаш (м. Київ) ще у 80-і роки минулого століття [237–242]. Метою при цьому було створення моделей екструзії двох типів:

1) модель пошуку геометрії черв'яка (глибини нарізки в його різних зонах) і частоти обертання черв'яка, за яких для даної продуктивності забезпечується задана середньомасова (інтегральна) температура розплаву на виході екструдера;

2) модель пошуку частоти обертання черв'яка, за якої для даних геометрії черв'яка та продуктивності забезпечується заданий тиск на виході екструдера.

Для розв'язання задачі пошуку геометрії необхідне формулювання умов, які ця геометрія має задовольняти в кожній зоні екструдера. Для зони подачі такою умовою прийнято умову, за якої глибина нарізки в зоні плавлення забезпечує задану питому (на один оберт черв'яка) продуктивність. Відповідно для зони гомогенізації умовою вибору глибини нарізки було прийнято рівність нулю градієнта тиску на виході екструдера.

Для реалізації цих моделей вибрані модифіковані класичні моделі процесів подавання, плавлення й гомогенізації, на базі яких розроблені програми розрахунку одночерв'ячних, комбінованих і дискових екструдерів [186]. Виконані за цими програмами розрахунки майже всіх найбільш поширених типорозмірів екструдерів з діаметром черв'яків від 20 до 250 мм довели перспективність розробленого підходу до моделювання. Для перевірки адекватності моделей використовували дані, одержані експериментально на лабораторному

або промислового обладнанні (властивості полімеру, продуктивність, кінцева температура розплаву). Порівняння обчисленої та реальної геометрії черв'яків показали їх задовільну відповідність.

У той же час аналіз розрахунків, а також експериментальних і практичних даних [24] показав і недоліки розроблених моделей і програм, які полягають у такому.

Оскільки класичні розв'язки одержані для плоскопаралельної моделі з нерухомим черв'яком і обертовим циліндром, то процеси, що в дійсності мають місце біля поверхні обертового черв'яка, умовно переносяться до стінки нерухомого циліндра (рис. 1.14). Це не має істотного значення при розрахунку гідродинаміки й визначенні продуктивності, а також під час обчислення інтенсивності дисипації та інтегрального значення температури, але такий підхід може призвести до суттєвих похибок, якщо необхідно враховувати теплообмін із зовнішніми системами термостабілізації. Так, на рис. 1.15 наведено залежності інтенсивності дисипації  $q_{\text{дис}}$  від безрозмірної висоти нарізки для плоскопаралельної моделі з обертовим циліндром (1) та обертовим черв'яком (2), обчислені для ньютонівської моделі рідини (тут  $y$  – поточна координата по висоті каналу,  $H$  – загальна висота каналу).

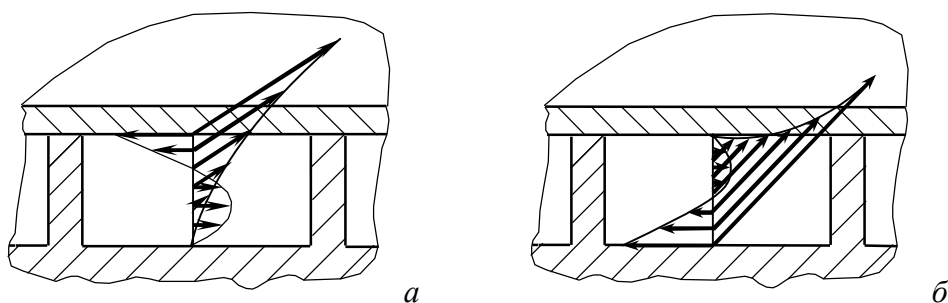


Рис. 1.14. Профілі швидкостей розплаву ТпМ у каналі черв'яка для плоскопаралельної моделі при обертовому циліндрі (а) і обертовому черв'яку (б)

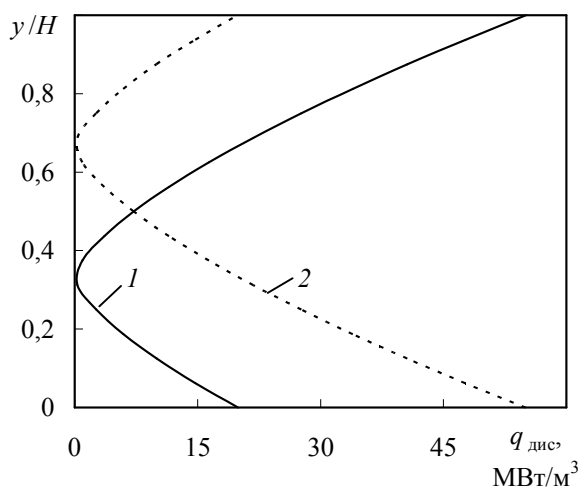


Рис. 1.15. Зміна потужності дисипації по безрозмірній висоті каналу черв'яка при обертовому циліндрі (1) і обертовому черв'яку (2)

З рис. 1.15 видно, що порівняно з моделлю з обертовим циліндром інтенсивність дисипації для моделі з обертовим черв'яком більша біля поверхні черв'яка. Це необхідно враховувати під час розрахунку процесу теплообміну з поверхнями черв'яка й циліндра, якщо енергія, що підводиться від зовнішніх нагрівників, є значною порівняно з енергією дисипації, що особливо важливо під час переробки ТпМ з низькою в'язкістю або підвищеною вологістю. Збільшення частки енергії зовнішніх нагрівників потребує для її передачі збільшення поверхні теплообміну, тобто довжини черв'яка, або зменшення продуктивності екструдера, а тому для заданої довжини черв'яка істотно звужується діапазон режимів переробки, за яких досягається необхідна якість продукції. Таким чином, все це потребує розробки нового підходу для моделювання процесів черв'ячної екструзії.

Якщо моделювання одночерв'ячних і комбінованих екструдерів розглянуте досить докладно (наприклад, [21, 101, 102, 116–119, 166–168, 173, 174, 176, 178–182, 186, 187, 190, 197, 199, 200–203, 221, 223, 224, 226, 227, 229]), то моделюванню двочерв'ячних екструдерів уваги приділялося значно менше (наприклад, [18, 103, 118, 119, 150, 152, 182, 198]).

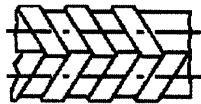
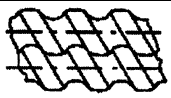



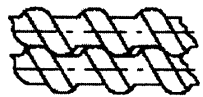

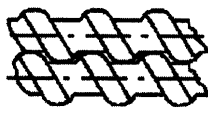
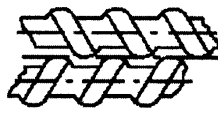

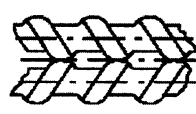
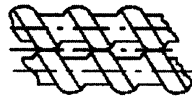
Беручи до уваги значну кількість принципових схем двочерв'ячної екструзії (табл. 1.2 [155]), стає зрозумілим, що неабиякого значення набуває моделювання процесу екструзії з черв'яками різної конструкції і при різних режимах переробки, що дає можливість істотно скоротити експериментальні дослідження й вибрати необхідний екструдер.

Як зазначалось вище, розроблені в ранніх працях методики розрахунку базуються на аналітичних розв'язках системи рівнянь, що описують процес екструзії, а тому не дають можливості з достатньою точністю врахувати як змінні реологічні та теплофізичні властивості, так і повною мірою геометрію робочих органів. Крім того, значна кількість праць з теоретичного дослідження двочерв'ячної екструзії за аналогією з одночерв'ячною екструзією ґрунтуються на оберненій моделі черв'яків з усіма притаманними їй недоліками. Застосування комп'ютерної техніки, як і у випадку одночерв'ячної екструзії, дає можливість розв'язувати значно складніші моделі, але при цьому слід враховувати таке: значне ускладнення математичних моделей з одного боку дає можливість оцінити вплив ряду факторів на процес екструзії, а з іншого – у багатьох випадках не приводить до істотного уточнення результатів. Тому для розробки методик інженерних розрахунків доцільно проаналізувати вплив тих чи інших факторів і вибрати серед них тільки ті, які найбільш істотно впливають на процес. При цьому слід мати на увазі точність визначення теплофізичних і реологічних параметрів, а також таких величин, як, наприклад, коефіцієнти тертя та їх залежність від змінних параметрів процесу екструзії. Отже, для інженерних розрахунків процесу екструзії ТпМ з використанням вторинної сировини доцільно розробити такі методики, які за мінімально необхідних ви-

хідних даних дають результати розрахунку, що із врахуванням існуючого практичного досвіду задовольняють вимогам проектувальника.

Таблиця 1.2

Класифікація двочерв'ячних екструдерів за взаємним розміщенням черв'яків

Наявність зачеплення черв'яків		Схема зачеплення черв'яків		Обертання черв'яків у протилежних напрямках	Обертання черв'яків в одному напрямі
черв'яки, що перебувають у взаємному зачепленні	повне зачеплення	закриті в поздовжньому й поперечному напрямках			теоретично неможливо
		відкриті в поздовжньому й закриті в поперечному напрямках		теоретично неможливо	черв'яки 
		відкриті в поздовжньому й поперечному напрямках		теоретично можливо, але майже не реалізується	кулачки 
	часткове зачеплення	відкриті в поздовжньому й закриті в поперечному напрямках			теоретично неможливо
		відкриті в поздовжньому й поперечному напрямках			
					
черв'яки без взаємного зачеплення	відкриті в поздовжньому й поперечному напрямках	з контактом вершин гребенів черв'яків			
		без контакту вершин гребенів черв'яків			

#### 1.4.4. Термообробка

Формування виробів зазвичай здійснюють з попередньо одержаних гранул. Найбільш поширеними методами гранулювання є гарячий і холодний [24]. За недостатнього охолодження можливе злипання гранул під час їх пакування. Крім того, для кристалічних полімерів структура матеріалу, яка формується в процесі охолодження стренг або гранул і залежить від режиму охолодження, визначає і структуру (кристалічну або аморфну) одержуваних з них

виробів, а тому дослідження процесів охолодження має важливе значення для проектування технологічного та допоміжного обладнання [29, 31, 188]. Особливого ж значення цей процес відіграє для ТпМ з використанням вторинної сировини, властивості продукції з яких ще більше залежать від режиму термообробки [23].

Процеси охолодження гранул або стренг описуються рівняннями нестационарної теплопровідності, для розв'язання якого зазвичай використовують граничні умови першого [31] або третього [243] роду, тобто вважається відомими температура поверхні полімеру, яка зазвичай приймається рівною температурі охолодного середовища, або коефіцієнт тепловіддачі до цього середовища. Теоретичне розв'язання задач нестационарної теплопровідності для тіл простої форми є класичною задачею математичної фізики і наводиться в багатьох підручниках та іншій літературі. У той же час теоретичні розв'язки цього рівняння не враховують залежності теплофізичних властивостей від температури, що призводить до значних похибок, оскільки полімер охолоджується від в'язкоплинного до твердого стану і при цьому має місце суттєва зміна його властивостей. Крім цього внаслідок малих розмірів гранул і діаметра стренг визначення коефіцієнта тепловіддачі є проблематичним з точки зору чисто експериментальних досліджень.

Таким чином, для ефективного й коректного аналізу необхідна розробка математичних моделей охолодження гранул і стренг, у яких усувалась би необхідність визначення коефіцієнтів тепловіддачі і при числовому розв'язанні задачі враховувалась залежність теплофізичних властивостей від температури.

Крім процесів охолодження, які мають місце під час гранулоутворення, ще більше значення для одержання якісної продукції з ТпМ мають процеси охолодження виробу або напівфабрикату від температури формування до температури в зоні приймального пристрою. Про значення пристрою для термообробки на якість виробу можна зробити висновок, беручи до уваги, що довжина такого пристрою може досягати ста метрів [244].

Основними видами пристроїв для термообробки безперервних і погонних матеріалів є конвективні пристрої (рольганги і транспортери для охолодження жорсткого листового матеріалу, ванни та короби для термообробки профільних погонних матеріалів, плівок і труб в умовах вимушеної та/або вільної конвекції з однієї або обох сторін), а також пристрої барабанного й комбінованого типу для обробки гнучких матеріалів при їх контакті з поверхнею барабана з однієї сторони та охолодження в умовах конвекції з іншої [78, 118, 245, 246] (рис. 1.16).

Як видно з рис. 1.16, процес термообробки на пристрої будь-якого типу можна розглядати як обробку матеріалу або виробу на сукупності послідовно розташованих типових ділянок: горизонтальних, похилих, вертикальних та криволінійних (як при контакті виробу з твердим тілом, так і вільно розташо-

ваних в теплоносії). При цьому основні матеріали і вироби, які піддаються обробці (однорідні або шаруваті листові, плівкові, трубчасті, стрижневі), можна поділити на три типи: прямокутного, кільцевого та кругового поперечного перерізу. Відповідно розглядають і основні розрахункові схеми процесу.

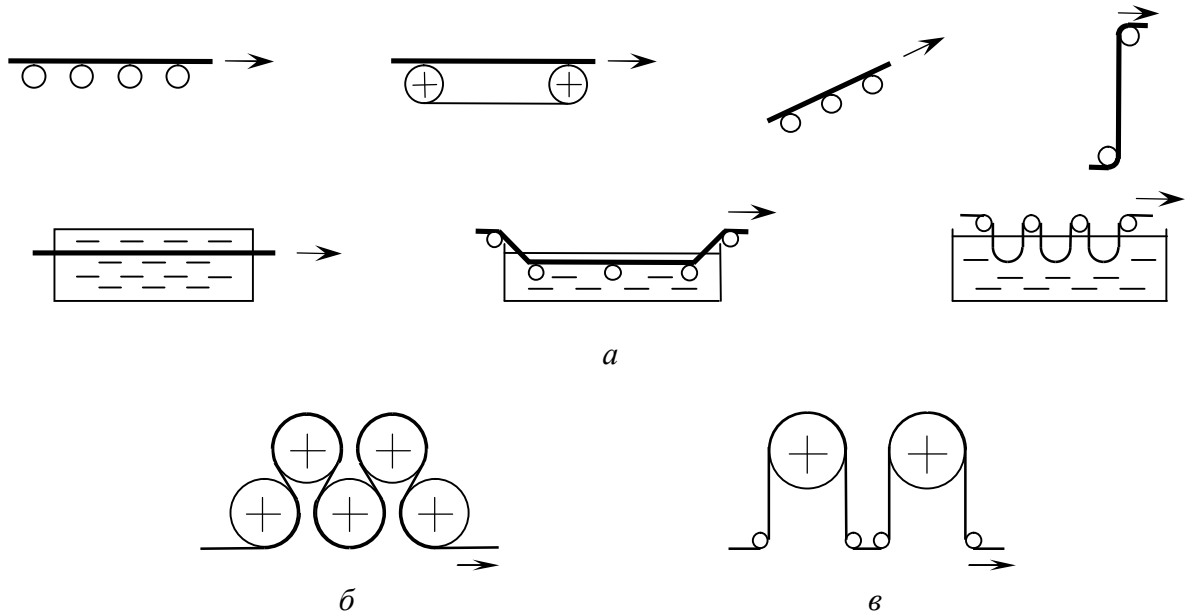


Рис. 1.16. Основні типи пристроїв для термообробки безперервних і погонних ТпМ: *а* – конвективні (рольганг, транспортер, ванни різних видів); *б* – барабанний; *в* – комбінований

Існуючі методики розрахунку придатні для аналізу процесу термообробки гомогенних матеріалів [78, 247–252] або багат шарових тонких матеріалів-покриттів твердих тіл [253]. У праці [254] зазначену проблему розглянуто в постановочному вигляді у відриві від конструкцій конкретного охолодного обладнання. Сучасні погонні матеріали можуть мати значні розміри і складну будову: листи виготовляють завтовшки до 100 мм [255]), а труби – зовнішнім діаметром від 10 мм до 3050 мм [256] (при цьому кількість шарів листових і плівкових матеріалів коливається від двох–трьох [244, 257] до семи й більше [258, 259], а трубчастих – від двох до чотирьох і більше [260]). Під час аналізу термообробки таких матеріалів наявні методики розрахунку можуть давати суттєві відхилення від реального процесу. У першу чергу це стосується багат шарових матеріалів і виробів, що характерно для переробки ТпМ з використанням вторинної сировини щонайменше в одному з його шарів – основному або зі спеціальними властивостями (декоративний, теплоізоляційний та ін.).

Таким чином, для ефективного аналізу необхідна розробка універсальної методики розрахунку процесу охолодження й нагрівання безперервних і погонних гомо- й гетерогенних ТпМ з використанням вторинної сировини у найбільш поширених у промисловості пристроях для термообробки.

## 1.5. Висновки й завдання досліджень

На основі наведеного огляду та аналізу тенденцій розвитку методів, обладнання та процесів переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини можна зробити такі висновки.

1. Світовий обсяг застосування полімерних матеріалів щорічно зростає на 5,3 % і до 2010 року перевищить 300 млн т. Особливо високі темпи виробництва, споживання та переробки полімерів спостерігаються у країнах Центральної та Східної Європи, у тому числі в Україні.

Широке використання полімерних матеріалів робить надзвичайно актуальним утилізацію полімерних відходів. При цьому найбільш доцільним методом утилізації полімерних відходів у сучасних умовах є їх рециклінг – повторне застосування з використанням притаманних відповідним матеріалам властивостей.

2. Суттєве збільшення номенклатури термопластичних полімерів і матеріалів на їх основі потребує розробки нових та вдосконалення існуючих процесів, обладнання та режимів його експлуатації.

Найбільш поширеним, продуктивним та універсальним видом полімерпереробного обладнання є одно- і двочерв'ячні екструдери, змішувально-валкове обладнання: роторні змішувачі, вальці й каландри, а також обладнання для термообробки.

3. Вторинні полімерні матеріали характеризуються різними формами й ступенями деструкції (хімічної, фізичної, механічної), які залежать від умов попередньої переробки, експлуатації та зберігання цих матеріалів. Властивості вторинних полімерів можуть істотно відрізнятися від відповідних властивостей первинних матеріалів, при цьому одним з основних їх недоліків часто є знижена термомеханічна стійкість.

Внаслідок зміни властивостей вторинних полімерних матеріалів, а також складнощами розпізнавання полімерів у полімервмісних відходах зазначені матеріали доцільно утилізувати через одержання термопластичних композиційних матеріалів. Властивості знову одержуваних термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини істотно залежать від їх якісного й кількісного складу, структури і передісторії.

4. Одержання продукції з термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини внаслідок в першу чергу їх зниженої термомеханічної стійкості передбачає розробку відповідних процесів їх переробки, обладнання та відпрацювання раціональних режимів його експлуатації. Внаслідок цього, а також значної енерго- і матеріалоємності полімерпереробного обладнання істотного значення набуває математичне моделювання відповідних обладнання та процесів.

5. Теорія, а також питання моделювання найбільш поширених процесів переробки полімерів: екструзії, змішування, вальцювання, каландрування, термообробки, а також відповідного обладнання, достатньо повно розроблені

для первинних термопластичних полімерів зі стабільними і прогнозованими властивостями.

Крім того, майже відсутні питання комплексного аналізу технологічних ліній для переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини, що унеможливує коректні проектування, модернізацію і вибір енергоресурсоефективного та екологічно безпечного обладнання або режимів його експлуатації. Існуючі підходи до зазначеного питання потребують проведення значного обсягу теоретичних та експериментальних робіт, що є економічно невиправданим і недоцільним.

З метою створення наукових засад розробки ресурсоенергоефективних обладнання та процесів переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини, що забезпечує заощадження енергетичних і матеріальних ресурсів, а також зменшення забруднення навколишнього середовища були сформульовані такі завдання:

1. Проаналізувати та узагальнити методи утилізації промислових і побутових полімерних відходів, обґрунтувати доцільність їх рециклінгу для одержання ТпМ із заданими властивостями.

2. Розробити загальні засади моделювання і науково обґрунтованого вибору обладнання та процесів для переробки ТпМ з використанням вторинної сировини.

3. Визначити вплив конструктивних і технологічних параметрів обладнання на показники процесу переробки ТпМ, а також необхідність і ступінь врахування кожного з них під час розробки відповідних математичних моделей.

4. Розробити узагальнену математичну модель процесу черв'ячної екструзії ТпМ з урахуванням їх складу, внутрішніх джерел енергії, а також умов теплообміну на поверхнях робочих органів екструдерів.

5. На основі узагальненої моделі процесу черв'ячної екструзії розробити математичні моделі та алгоритми розрахунку одно- і двочерв'ячних екструдерів (за умови як різноспрямованого, так і односпрямованого обертання черв'яків).

6. Розробити математичні моделі обладнання та процесів одержання і первинного формування ТпМ, а саме роторних змішувачів і валкового обладнання, з урахуванням складу ТпМ.

7. Розробити математичні моделі процесу термообробки безперервних ТпМ і виробів із них з урахуванням їх складу і структури (у тому числі багаточарових), а також процесу теплообміну під час гранулювання ТпМ.

8. Експериментально дослідити обладнання та процеси переробки ТпМ з використанням вторинної сировини.

9. Розробити рекомендації із впровадження енергоефективних екологічно безпечних заходів під час одержання й переробки ТпМ.

Основні наукові результати розділу 1 опубліковані в працях [2, 12, 24, 26, 30, 33, 39, 81, 96, 107, 108, 123–126, 130, 261–274].

## 2. ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ

### 2.1. Вибір обладнання для комплектування технологічних ліній

Переробка термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини містить у собі три групи процесів: підготовчі, формоутворювальні та заключні [103, 118, 180] (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Схема класифікації процесів переробки ТпМ з використанням вторинної сировини

Найбільш поширеними термопластами, які як у чистому вигляді, так і у складі ТпМ переробляють у промислових масштабах, тривалий час залиша-

ються поліетилен (ПЕ), поліпропілен (ПП), полівінілхлорид (ПВХ), поліетилентерефталат (ПЕТФ) і полістирол (ПС). Так, у 2005 році в Європі частка споживання термопластів становила: ПЕ – 29 %, ПП – 19 %, ПВХ – 14 %, ПЕТФ – 7 % і ПС – 4 %, при цьому майже половину з них складають поліолефіни. Такий розподіл по видах термопластів очікується і до 2010 року, загальний обсяг споживання яких в Європі за прогнозом перевищить 60 млн т [3].

Як засвідчує півстолітня промислова переробка ПЕ, ПП, ПВХ, ПЕТФ, ПС і ТпМ на їх основі, найбільш прогресивними, універсальними й високопродуктивними залишаються технологічні лінії на базі черв'ячних екструдерів і каландрів, які реалізують основні процеси переробки ТпМ (див. рис. 2.1): адже більше половини термопластів, перероблюваних у країнах Європи, припадає саме на екструзію й каландрування [3], а з урахуванням того, що видувне формування, вакуум- і пневмоформування також зазвичай ґрунтуються на цих процесах, то їх частка зростає ще більше [15, 18, 79, 255, 275].

Технологічні лінії на базі екструзійного і валкового обладнання містять багато одиниць різноманітного устаткування і пристроїв, але в будь-якому разі вони комплектуються обладнанням, яке в кінцевому підсумку визначає їх продуктивність: екструдерами, змішувачами (у першу чергу роторними), вальцями, каландрами та пристроями для термообробки (див. рис. 1.6–1.9).

Технологія продукції з термопластичних матеріалів залежить у першу чергу від властивостей ТпМ, його якісного й кількісного складу, заданої продуктивності та необхідних показників якості. При цьому питання продуктивності та якості зазвичай є альтернативними [79], тому раціональна організація переробки ТпМ передбачає забезпечення заданої продуктивності за умови досягнення потрібної якості продукції.

Незважаючи на різноманітність процесів, характерних для технології кожного окремого виробу, якість одержуваної продукції в першу чергу визначають процеси підготовки ТпМ, його формування в певний вид продукції, а також подальша її термообробка (зазвичай охолодження і термостатування).

У процесі одержання продукції з ТпМ перероблюваний матеріал послідовно змінює свій стан: від твердої вихідної сировини до розплаву під час формування, пластичної відформованої заготовки і твердого готового виробу. Таким чином, переробка ТпМ пов'язана в першу чергу з підведенням і відведенням енергії до кожної одиниці технологічного обладнання та більшості одиниць допоміжного устаткування і пристроїв, що забезпечує одержання продукції із заданими властивостями [78]. При цьому режими переробки навіть у межах однієї одиниці обладнання можуть істотно відрізнятися на різних ділянках. Таким чином, процеси переробки термопластів є неізотермічними.

З точки зору поведінки макрооб'ємів перероблюваного матеріалу під час проходження ним певного виду обладнання або його окремої ділянки їх можна поділити на два типи: до першого з них належить обладнання або його

частина, в яких відбувається плинність шарів ТпМ один відносно одного, а до другого – в яких попередньо відформований ТпМ виріб рухається як суцільне тверде тіло. Процеси першого типу відбуваються в основному полімерпереробному обладнанні: змішувальному, екструзійному, валковому, а процеси другого типу переважно в допоміжному полімерпереробному обладнанні або на окремих ділянках основного (наприклад, поза межами міжвалкових проміжків валкових машин).

Таким чином, відповідно до конструктивних особливостей технологічних ліній та їх обладнання можна виділити такі основні моделі неізотермічних процесів переробки ТпМ: у зонах деформування ТпМ і поза цих зон.

Рівняння теплоенергетичного балансу неізотермічного процесу переробки ТпМ у робочих органах машин з урахуванням його деформування (закон збереження енергії в інтегральній формі) має вигляд

$$G_M i_{\text{п}} \pm Q_{\text{зовн}} + Q_V = G_M i_{\text{к}} + Q_{\text{в}}, \quad (2.1)$$

де  $G_M$  – масова продуктивність обладнання;  $i_{\text{п}}$  та  $i_{\text{к}}$  – масова ентальпія ТпМ відповідно на вході в обладнання (або її розрахункову ділянку) і на виході з нього (неї);  $Q_{\text{зовн}}$  – теплова енергія, яку потрібно підвести (знак «+») або відвести (знак «-») у процесі переробки (зовнішні джерела термостабілізації);  $Q_V$  – енергія внутрішніх джерел, до яких можна віднести енергію перетворень  $Q_{\text{пер}}$  та енергію дисипації  $Q_{\text{дис}}$ , одержану матеріалом у результаті необоротної деформації зсуву в зонах деформування;  $Q_{\text{вт}}$  – теплові втрати в навколишнє середовище.

У рівнянні (2.1) не враховані витрати енергії на підвищення тиску, які зазвичай не перевищують 3–5 % загальних витрат потужності привода [78].

Продуктивність обладнання у формулі (2.1) зазвичай визначається продуктивністю обмежної, або лімітувальної, стадії (процесу) технологічної лінії і під час розрахунку решти одиниць обладнання може вважатися заданою, а теплові втрати – за відомими рівняннями теплообміну [276] або відповідною методикою розрахунку [277]. Ентальпія же матеріалу найчастіше визначається технологічним регламентом процесу залежно від його заданої початкової та допустимої кінцевої температури. При цьому чим менша допустима кінцева температура, тим менші енерговитрати процесу, проте якість переробки залежить від якості змішування, яка зв'язана з деформацією зсуву, а отже і дисипацією енергії в об'ємі перероблюваного матеріалу.

Як вже було зазначено в розділі 1, процеси переробки ТпМ характеризуються значними дисипативними тепловиділеннями, які можуть істотно перевищувати кількість теплоти, що підводиться в обладнанні до перероблюваного матеріалу або відводиться від нього зовнішніми системами термостабілізації. Так, під час приготування ПВХ-композиції в роторному змішувачі 250/22–44 потужність дисипації в кінці процесу змішування становить понад 500 кВт. Під час остаточного приготування цієї ж композиції на змішувально-

підігрівальних вальцях СМ-Пд 2100(660/660) тепловий потік, що відводиться системою термостабілізації валків, становить менше 50 % потужності дисипації, яка досягає майже 80 кВт. Під час формування підготовленої на зазначених вальцях композиції на каландрі КП4-710-1800 загальна потужність дисипації перевищує 70 кВт, а тепловий потік, що підводиться системою термостабілізації валків, – 40 кВт (майже 60 % від потужності дисипації).

Таким чином, найбільший інтерес представляють величини  $Q_{\text{зовн}}$  і  $Q_{\text{дис}}$ , які можна визначити на підставі розв'язку узагальненої математичної моделі з урахуванням певних крайових умов.

Основні принципи моделювання найпоширенішого в практиці переробки ТпМ екструзійного обладнання сформульовані Л. Б. Радченком [228], чи не основним з яких є врахування взаємного зв'язку і взаємного впливу окремих зон екструдера одна на одну. Такий підхід дає можливість визначити обмежну стадію процесу екструзії та адекватно аналізувати цей процес у цілому. Розроблена узагальнена схема алгоритму розрахунку екструдерів ґрунтується на модульному принципі, відповідно до якого розрахунок елементів окремих функційних зон розглядається як стандартний модуль-підпрограма, що визначає конструктивну схему процесу екструзії.

Для реалізації цього підходу Л. Б. Радченком під час аналізу черв'ячної екструзії застосовані модифіковані класичні моделі процесів, що побудовані на основі оберненої плоскопаралельної моделі черв'яка (див. п. 1.4.3). Розроблені ним моделі досить точні в разі аналізу процесів переробки, близьких до адіабатичних (автогенних), але вони дають суттєві похибки під час спроби врахування теплообміну із зовнішніми системами термостабілізації, що знаходять широке застосування в сучасному технологічному обладнанні та особливо у високопродуктивних двочерв'ячних екструдерах. Крім цього, в зазначених моделях і програмах здійснюється аналіз інтегральних параметрів, наприклад, таких як середньомасова температура, що не дає можливості оцінити температурну неоднорідність перероблюваного матеріалу, яка істотно впливає на якість одержуваної продукції. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки уточнених моделей, які базуються на припущеннях, більш наближених до реального процесу, що надасть можливість враховувати умови теплообміну на обмежних поверхнях.

Необхідно також відзначити принципову особливість переробки ТпМ як високов'язких матеріалів, яка полягає у вирішальному значенні дисипативної складової теплового балансу обладнання в процесі переробки (так, наприклад у виробництві полімерних труб на довжині черв'яка, що зазвичай не перевищує декількох метрів, у матеріал внаслідок дисипації вводиться така кількість енергії, для відведення якої внаслідок теплопровідності потрібна довжина охолодної ванни досягає десятків метрів).

Під час розрахунку процесів в обладнанні періодичної, або циклічної, дії

(роторні змішувачі, вальці) моделювання на сьогодні зводиться, власне, до визначення потужності привода і систем термостабілізації робочих органів. У той же час не менш важливим є визначення тривалості перебування матеріалу в обладнанні за даних умов переробки, від якого залежить його продуктивність.

У періодичних процесах переробки основна частка енергії надходить у перероблюваний матеріал дисипацією, що може здійснюватися за менший час підвищенням потужності привода й кутової швидкості робочих органів (збільшення швидкості деформації). Проте підвищення кутової швидкості робочих органів призводить до зростання неоднорідності швидкісних полів в об'ємі матеріалу і, відповідно, неоднорідності температурних полів, яка впливає на якість переробки. Ту саму кількість енергії можна підвести до ТпМ також за більший час при зменшених потужності привода й кутової швидкості робочих органів, що сприятиме підвищенню якості переробки, але зменшуватиме продуктивність обладнання. Отже, під час переробки певного матеріалу існують раціональні співвідношення між потужністю привода, кутовою швидкістю робочих органів і тривалістю переробки, за яких досягається необхідна якість одержуваного виробу. Зв'язок між цими параметрами має бути врахований під час математичного моделювання відповідного обладнання.

## 2.2. Узагальнена математична модель процесів переробки

У загальному випадку для опису неізотермічних процесів переробки ТпМ використовують сформульовану для суцільних середовищ систему рівнянь збереження маси, енергії та імпульсу, а також кінетичні рівняння хімічних, фазових та інших перетворень у разі їх наявності в об'ємі перероблюваного ТпМ [24, 101, 187].

Загальний закон збереження можна сформулювати так: швидкість приросту фізичної величини у виділеному об'ємі дорівнює сумі швидкості надходження її крізь поверхню цього об'єму і швидкості виділення цієї величини в об'ємі від внутрішніх джерел. Тоді для одиниці об'єму в системі координат Ейлера рівняння збереження маси  $i$ -го компонента у векторно-тензорній формі має вигляд

$$\frac{\partial \bar{c}_i}{\partial t} = -\nabla q_i + q_{V_i}, \quad (2.2)$$

де  $\bar{c}_i$  – масова концентрація  $i$ -го компонента ТпМ;  $t$  – час;  $q_i$  – густина потоку маси крізь поверхню об'єму  $i$ -го компонента ТпМ;  $q_{V_i}$  – інтенсивність внутрішніх джерел маси в об'ємі  $i$ -го компонента ТпМ.

Густина потоку маси  $q_i$  у загальному випадку є сумою дифузійного, конвективного й турбулентного потоків. При цьому необхідно зазначити, що внаслідок значної в'язкості ТпМ турбулізація потоку відсутня, а тому рівняння (2.2) можна записати у вигляді

$$\frac{\partial \bar{c}_i}{\partial t} = \nabla[\nabla(D_i T)] - \nabla(\bar{c}_i w) + q_{V_i}, \quad (2.3)$$

де  $D_i$  – коефіцієнт дифузії  $i$ -го компонента ТпМ;  $T$  – температура;  $w$  – швидкість.

Під час переробки ТпМ взаємні перетворення компонентів у більшості випадків відсутні, а тому рівняння (2.3) для нестискої рідини зводиться до свого часткового випадку – рівняння нерозривності

$$\nabla w = 0. \quad (2.4)$$

Рівняння збереження енергії в системі координат Ейлера для одиниці об'єму у векторно-тензорній формі має вигляд

$$\rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}} \frac{dT}{dt} = -\nabla q + q_V, \quad (2.5)$$

де  $\rho_{\text{ТпМ}} = \sum_{i=1}^N \bar{c}_i$  або  $\rho_{\text{ТпМ}} = \left( \sum_{i=1}^N \frac{\bar{x}_i}{\rho_i} \right)^{-1}$  – густина ТпМ;

$N$  – кількість компонентів ТпМ;  $\bar{x}_i$  – масова частка  $i$ -го компонента ТпМ;  $q$  – густина теплового потоку крізь поверхню об'єму;  $q_V$  – об'ємна густина теплового потоку внутрішніх джерел енергії.

Оскільки об'ємна густина теплового потоку (або тепловий потік у цілому) за відсутності турбулентного переносу є сумою потоків теплопровідності і конвекції, то рівняння (2.5) можна записати у вигляді [21]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\nabla(a_{\text{ТпМ}} T)] - \nabla(wT) + \frac{q_V}{\rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}}}. \quad (2.6)$$

Теплофізичні властивості перероблюваного ТпМ ( $\rho_{\text{ТпМ}}$ ,  $\lambda_{\text{ТпМ}}$ ,  $c_{\text{ТпМ}}$ ,  $a_{\text{ТпМ}}$ ) визначають залежно від його температури, якісного і кількісного складу (див. п. 1.2.2).

У процесах переробки можуть мати місце фазові перетворення перероблюваного ТпМ. Якщо такі перетворення стосуються всієї маси ТпМ, то зазвичай теплота фазових перетворень враховується в теплоємності ТпМ, яка є функцією температури. Якщо ж фазові перетворення стосуються лише окремих компонентів ТпМ, наприклад, під час введення в одержувані теплозвукоізоляційні ТпМ спінювальних домішок [203], то врахувати теплоту фазових переходів цих компонентів можна введенням у рівняння (2.6) замість температури  $T$  умовної температури  $T_{\text{ум}}$  [278] – температури, яку мав би перероблюваний ТпМ за відсутності перетворень:

$$T_{\text{ум}} = T + \frac{1}{\rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}}} \sum_{i=1}^k \bar{c}_i r_i, \quad (2.7)$$

де  $r_i$  – питома теплота фазового перетворення  $i$ -го компонента ТпМ;  $k$  – кількість компонентів, які зазнають фазові перетворення.

Під час вибору теплофізичних властивостей у цьому разі після

обчислення умовної температури  $T_{\text{ум}}$  необхідно здійснювати перерахунок дійсної температури  $T$ , скориставшись залежністю (2.7).

Для визначення швидкісних полів та інтенсивності дисипації  $q_{\text{дис}}$  для рівнянь збереження маси та енергії необхідно додати рівняння збереження кількості руху, яке у векторно-тензорній формі для системи координат Лагранжа має вигляд

$$\frac{d(\rho_{\text{ТпМ}} w)}{dt} = \rho_{\text{ТпМ}} g - \nabla p + \nabla[\tau]', \quad (2.8)$$

$g$  – прискорення вільного падіння;  $[\tau]'$  – девіатор тензора напружень.

Необхідно зазначити, що в переробному обладнанні внаслідок високої в'язкості ТпМ силами інерції й тяжіння зазвичай нехтують, вважаючи, що в потоці матеріалу сили тиску зрівноважуються тільки поверхневими силами (силами в'язкості). Тоді рівняння (2.8) набуває вигляду

$$\nabla[\tau]' - \nabla p = 0. \quad (2.9)$$

При цьому градієнти тиску мають бути вибрані такими, щоб задовольнялося рівняння нерозривності (2.4).

Компоненти напружень у рівнянні (2.9) залежать від в'язкості й компонент тензора швидкостей деформації. Цю залежність описують реологічним рівнянням, яке необхідно додати до системи рівнянь збереження. ТпМ з використанням вторинної сировини є реологічно складними середовищами й належать до класу неньютонівських рідин, в'язкість яких є функцією не лише температури, а й інших факторів, найважливішим з яких є швидкість зсуву. У більшості реологічних рівнянь, що набули поширення для практичних розрахунків, враховують лише залежність в'язкості від швидкості зсуву й температури. Для складних течій, які характерні для зазначеного переробного обладнання, швидкість зсуву  $\dot{\gamma}$  виражається залежністю [24, 101, 102]

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} I_2},$$

де  $I_2$  – другий інваріант тензора швидкостей деформації, який у декартовій  $(x, y, z)$  і циліндричній  $(r, \theta, z)$  системах координат має вигляд [24]:

$$\begin{aligned} I_2 &= 4 \left[ \left( \frac{\partial w_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \\ &+ 2 \left[ \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right)^2 \right]; \\ I_2 &= 4 \left[ \left( \frac{\partial w_r}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial w_r}{\partial \theta} + \frac{w_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \end{aligned}$$

$$+ 2 \left[ \left( r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{w_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_r}{\partial \theta} \right) \right)^2 + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial w_z}{\partial \theta} + \frac{\partial w_\theta}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_r}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial r} \right)^2 \right].$$

Залежність в'язкості від швидкості зсуву визначають експериментально. При цьому необхідно зауважити, що в разі складних течій експериментальне визначення складових другого інваріанта є досить проблематичним, а тому більшість експериментальних даних одержано для простих віскозиметричних течій, коли відмінною від нуля є лише одна складова інваріанта  $I_2$ . У реальному переробному обладнанні рух зазвичай не є одновимірним, а тому застосування рівнянь, одержаних для простих течій, призводить до певних похибок, які необхідно оцінювати в кожному конкретному випадку.

ТпМ з використанням вторинної сировини є реологічно складними середовищами й належать до класу неньютонівських рідин, в'язкість яких залежить від якісного і кількісного складу матеріалу, умов попередньої переробки, експлуатації та зберігання компонентів ТпМ, температури переробки, швидкості зсуву під час переробки та ряду інших факторів. При цьому одним з основних недоліків таких матеріалів є їх знижена термомеханічна стійкість (див. п. 1.2.2). Тому питання визначення реологічних властивостей перероблюваних ТпМ з використанням вторинної сировини набувають особливого значення.

Незважаючи на наявність значної кількості методів і залежностей для визначення реологічних властивостей ТпМ, основні з яких розглянуто в розд. 1, найбільш доцільним є метод визначення, що ґрунтується на експериментальному дослідженні реологічних властивостей ТпМ безпосередньо на переробному обладнанні, що дає можливість максимально врахувати особливості переробки на певному виді обладнання (див. п. 1.2.2). Для апроксимації дослідних даних, що істотно полегшує їх використання під час математичного моделювання, можна скористатися степеневим реологічним рівнянням (1.8) [78, 186].

З іншого боку, під час розробки математичних моделей певних процесів необхідно аналізувати необхідність і доцільність використання для практичних розрахунків складних математичних моделей, які дають можливість якісного аналізу, але не вносять суттєвих коректив у результати, одержані з використанням більш простих моделей. Це підтверджується вже тим, що в багатьох працях теоретичні розрахунки, виконані як на основі простих, так і на основі досить складних моделей, за твердженням авторів відповідних праць узгоджуються з експериментальними даними з майже однаковою точністю, достатньою для інженерних розрахунків.

За аналогією з рівнянням Арреніуса залежність в'язкості від температури враховують експонентою  $K_0 \exp[-\beta(T - T_0)]$ , де  $K_0$  і  $\beta$  – експериментальні коефіцієнти, а  $T_0$  – температура, за якою визначене значення  $K_0$ .

Тоді для в'язкості можна записати

$$\mu(\dot{\gamma}, T) = K_0 \mu(\dot{\gamma}) \exp[-\beta(T - T_0)]. \quad (2.10)$$

Для нестискних неньютонівських рідин за аналогією з ньютонівськими із врахуванням рівняння (2.10) зв'язок між девіатором тензорів напружень і швидкостей деформації, тобто реологічне рівняння, у загальному вигляді можна записати так:

$$[\tau]' = K_0 \mu(\dot{\gamma}) \exp[-\beta(T - T_0)] [\dot{\gamma}]'$$

Розкриваючи далі вирази тензорів  $[\tau]'$  і  $[\dot{\gamma}]'$ , за аналогією з ньютонівськими рідинами можна записати рівняння, що зв'язують компоненти тензорів і швидкостей деформації, підстановка яких у рівняння (2.9) дозволить виключити з нього компоненти напружень. Так, у декартовій системі координат вирази для компонент напружень мають вигляд [24]:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu(\dot{\gamma}, T) \frac{\partial w_x}{\partial x}, \\ \tau_{yy} &= 2\mu(\dot{\gamma}, T) \frac{\partial w_y}{\partial y}, \\ \tau_{zz} &= 2\mu(\dot{\gamma}, T) \frac{\partial w_z}{\partial z}, \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu(\dot{\gamma}, T) \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right), \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = \mu(\dot{\gamma}, T) \left( \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right), \\ \tau_{zy} &= \tau_{yz} = \mu(\dot{\gamma}, T) \left( \frac{\partial w_z}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial z} \right). \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Визначення швидкісних полів дає можливість обчислити об'ємну густину теплового потоку дисипативних джерел енергії  $q_{\text{дис}}$ , що входить у рівняння (2.6). У декартовій прямокутній системі координат вираз для обчислення величини  $q_{\text{дис}}$  має вигляд

$$\begin{aligned} q_{\text{дис}} &= \tau_{xx} \frac{\partial w_x}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial w_y}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w_z}{\partial z} + \\ &+ \tau_{xy} \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) + \tau_{xz} \left( \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) + \tau_{yz} \left( \frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Компоненти напружень, які входять до рівняння (2.12), визначають за реологічними рівняннями (2.10) і (2.11).

Якщо в об'ємі ТпМ мають місце хімічні, фазові або інші перетворення, то до системи рівнянь необхідно додати також рівняння збереження маси [24].

Для визначення теплофізичних, реологічних та інших залежностей, одержаних експериментально, застосовують різні типи наближень, найбільш по-

ширеним з яких є метод найменших квадратів, а для обчислення визначених інтегралів у рівняннях і залежностях через неможливість їх аналітичного обчислення – числові методи інтегрування, наприклад, метод Сімпсона [78, 104].

Залежність теплофізичних властивостей від температури, а також в'язкості від температури і швидкості зсуву потребує застосування ітераційних методів під час обчислення швидкісних і температурних полів, а також тиску та інтенсивності дисипації.

Математичні моделі, що описують розподіл температурних полів у робочих органах багатьох видів обладнання для переробки ТпМ, являють собою крайові задачі з лінійними диференціальними рівняннями в частинних похідних 2-го порядку (найчастіше параболічного типу). Найбільш розповсюдженим методом розв'язання таких рівнянь є метод скінченних різниць (метод сіток) за неявною схемою [279, 280].

Рівняння, що описують температурне поле в обладнанні для переробки ТпМ, можна привести до загального виду [78, 280]

$$C(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial y} \right] - A(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial y} = f(T, x, y) \quad (2.13)$$

у розглядуваній області ( $x_{\text{п}} \leq x \leq x_{\text{к}}$ ,  $y_{\text{п}} \leq y \leq y_{\text{к}}$ ) з крайовими умовами

$$T(t_{\text{п}}, y) = \varphi(y), \quad (2.14)$$

$$\alpha_1(x)T(x, y_{\text{п}}) + \beta_1(x) \frac{\partial T(x, y_{\text{п}})}{\partial y} = \varphi_1(x), \quad (2.15)$$

$$\alpha_2(x)T(x, y_{\text{к}}) + \beta_2(x) \frac{\partial T(x, y_{\text{к}})}{\partial y} = \varphi_2(x). \quad (2.16)$$

У разі наявності області складної форми, наприклад міжвалкового проміжку, доцільно здійснити перехід до безрозмірних координат [78, 118, 119, 195, 207], які дають можливість замінити зазначену криволінійну область прямокутною областю, що апроксимується вузлами скінченнорізницевої сітки  $x_m = ml$  ( $m=1, 2, 3, \dots$ ),  $y_i = ih$  ( $i=0, 1, 2, \dots, N$ ), де  $l$  – крок сітки по змінній  $x$ ;  $h = (y_{\text{к}} - y_{\text{п}})/N$  – крок сітки по змінній  $y$ ;  $N$  – задане число розбиття інтервалу  $[y_{\text{п}}, y_{\text{к}}]$ .

Значення функцій від неперервних аргументів  $x$  і  $y$  замінюють значеннями у вузлах сітки, а похідні – скінченними різницями за формулами [78, 279]:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_i^{m+1} - T_i^m}{l}; \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_{i+1}^{m+1} - T_i^{m+1}}{h}; \quad \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i+1}^{m+1} - 2T_i^{m+1} + T_{i-1}^{m+1}}{h^2},$$

де  $T_i^{m+1}$  – значення шуканої функції в  $i$ -му вузлі  $(m+1)$ -го шару області.

Значення невідомої функції на  $(m+1)$ -му шарі зв'язані неявно системою алгебричних рівнянь, обумовлених рівняннями (2.13)–(2.16) у вузлах сітки. Систему одержуваних різницевих рівнянь на кожному шарі розв'язують методом прогонки [281].

Таким чином, для числового розв'язання диференціальних рівнянь можна застосувати, наприклад, один з поширених методів – метод скінченних різниць, який докладно описаний у працях [279–282].

Розв'язок на кожному шарі по координаті  $x$  уточнюють за допомогою ітераційного процесу. При цьому як початкове значення розв'язку на поточному шарі задають значення розв'язку на попередньому шарі.

Залежно від умов переробки ТпМ коефіцієнти  $C(T, x, y)$ ,  $k(T, x, y)$ ,  $A(T, x, y)$  і  $f(T, x, y)$  рівняння (2.13) набувають різних значень. Коефіцієнти  $\alpha_1, \beta_1, \varphi_1$  та  $\alpha_2, \beta_2, \varphi_2$  граничних умов (2.15) і (2.16) також залежать від умов у відповідному обладнанні або на його ділянці.

Початковий розподіл температури визначається розподілом температури по товщині виробу на виході з попередньої одиниці обладнання або попередньої ділянки даного обладнання (початкова умова (2.14)).

Залежність (2.13) та її розв'язання в загальному вигляді разом з крайовими умовами (2.14)–(2.16) дає можливість розробити уніфікований обчислювальний модуль для числового дослідження температурного поля ТпМ у різних видах обладнання за різних умов проведення процесу переробки.

Також у ряді випадків специфічні особливості перероблюваних матеріалів і конструкції робочих органів для розв'язання рівнянь збереження дають можливість застосовувати координати Ейлера і Лагранжа. Так, під час моделювання черв'ячного екструдера можна виділити об'єм, що дорівнює об'єму одного витка нарізки черв'яка, який рухається відносно нерухомої стінки координат, зв'язаної з екструдером (координати Лагранжа). Швидкість руху такого об'єму дорівнює

$$V_L = \frac{L}{t} = \frac{G}{\rho_{\text{ТпМ}} f}, \quad (2.17)$$

де  $L$  – координата вздовж осі черв'яка;  $f$  – площа перерізу потоку.

У межах об'єму процес можна розглядати як нестационарний у системі координат Ейлера. Тоді рівняння (2.6) із врахуванням (2.17) матиме вигляд

$$V_L \frac{\partial T}{\partial L} = \nabla[\nabla(a_{\text{ТпМ}} T)] - \nabla(wT) + \frac{q_V}{\rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}}}. \quad (2.18)$$

У координатах Ейлера ліва частина рівняння (2.18) описує нестационарність процесу, а  $w$  – швидкісне поле в межах виділеного об'єму.

### 2.3. Основні принципи розв'язання узагальненої математичної моделі процесів переробки

Наведена узагальнена математична модель процесу переробки ТпМ видозмінюється залежно від особливостей певного обладнання та режимів його

роботи. Проте підхід до її розв'язання може бути загальним.

Узагальнену математичну модель процесу переробки зазвичай можна спростити для певного процесу переробки ТпМ, залишивши в ній тільки ті складові, які найсуттєвіше впливають на даний процес. Після цього необхідно сформулювати умови однозначності, до яких належать: геометричні (задаються форма й розміри простору, в якому відбувається процес), фізичні (задаються фізичні властивості перероблюваного ТпМ, теплоносія тощо) і крайові, які містять початкові і граничні умови. Початкові умови (розподіл швидкостей, концентрацій, температур у початковий момент часу) задають для розв'язання нестационарних задач. Граничні умови формулюють для меж розглядуваного простору [24, 187].

Для розв'язання гідродинамічних задач як граничні умови часто задають умови симетрії потоку, а також умови прилипання, згідно з якими рідке середовище, що контактує з твердою поверхнею, має швидкість цієї поверхні. Для розв'язання рівняння енергії залежно від умов на обмежувальних поверхнях задають граничні умови першого, другого, третього або четвертого роду [24].

Спрощена на основі аналізу моделі система рівнянь разом з умовами однозначності є математичною моделлю певного процесу переробки ТпМ, розв'язання якої полягає в послідовності певних дій [78, 187].

Спочатку в ізотермічному наближенні за відповідних початкових і граничних умов розв'язують рівняння нерозривності й руху. Це дає можливість одержати швидкісні поля, тиск та основні силові параметри обладнання.

Після цього в неізотермічному наближенні визначають вид функції дисипації та градієнт швидкості деформації. Далі за відповідних початкових і граничних умов з метою визначення температурного поля в зоні переробки розв'язують рівняння енергії.

Потім по об'єму перероблюваного ТпМ, що перебуває в зоні деформування, інтегрують функцію дисипації (при визначеній у кожній точці температурі матеріалу, розрахованій відповідно до температурного поля). Це дає можливість (з урахуванням відповідного к.к.д.) визначити потужність привода обладнання й крутних моментів, прикладених до обертових робочих органів.

Далі з урахуванням визначених температурних полів уточнюють швидкісні поля, після чого зазначений ітераційний процес продовжують до досягнення заданої точності.

Така послідовність розрахунку обладнання та процесів переробки ТпМ з використанням вторинної сировини визначається в першу чергу підвищеною чутливістю зазначених матеріалів до термічних і механічних навантажень (див. п. 1.2.1), які під час їх переробки залежать одне від одного і можуть істотно відрізнятися в різних точках об'єму перероблюваного ТпМ.

У разі наявності в обладнанні систем термостабілізації конвективного типу на підставі інтегрального рівняння теплоенергетичного балансу (2.1) ви-

значають параметри зовнішніх систем термостабілізації, які разом з енергією внутрішніх джерел забезпечують необхідний температурний режим переробки.

Під час розв'язання математичної моделі певного процесу переробки ТпМ дуже істотного значення набуває коректний вибір граничних умов по температурі.

Якщо системи зовнішньої термостабілізації обладнання працюють в односторонньому режимі (наприклад за наявності електронагрівників), тобто здійснюється тільки підведення енергії, тоді цілком виправдано для розв'язання математичної моделі приймати граничні умови першого або другого роду (задається температура або тепловий потік на поверхні робочого органа). При цьому необхідно мати на увазі, що в ряді випадків потужність електронагрівників може бути недостатньою і, незважаючи на те, що вони працюють, потрібна температура на поверхні робочого органа не досягається.

Якщо в системі зовнішньої термостабілізації використовують рідкі теплоносії, які забезпечують роботу обладнання в режимі підведення або відведення енергії, то процес теплообміну доцільно розглядати з урахуванням граничних умов третього роду з боку зазначених теплоносіїв і застосовувати граничні умови четвертого роду на обмежувальній поверхні з ТпМ. Так, наприклад під час моделювання черв'ячної екструзії температура стінки циліндра задається і підтримується системою регулювання, а при заданні температури поверхні черв'яка виникають певні труднощі, оскільки вона невідома. Тому в цьому разі необхідно вводити певні припущення щодо цієї температури, які внесуть відповідну похибку в результати розрахунку. З іншого боку, за наявності системи термостабілізації черв'яка, задаючи температуру його поверхні, можна визначити кількість теплоти, яку має підвести (або відвести) ця система й відповідним чином виконувати розрахунок умов теплообміну цієї системи.

## **2.4. Основні засади побудови і моделювання технологічних ліній**

### **2.4.1. Загальні положення**

У більшості праць з технології ТпМ розглянуто окремі із стадій процесу переробки, що реалізується в окремій одиниці обладнання, без урахування їх стикування одна з одною, що не дає можливості здійснювати комплексний аналіз технологічної лінії [31, 101, 118, 188, 207 та ін.]. Лише в небагатьох працях, наприклад у [78, 228], для окремих видів обладнання застосовано підхід, який дає можливість аналізувати вплив кожної зі стадій процесу переробки на інші.

Складність моделювання технологічних ліній полягає не лише в тому, що матеріал послідовно проходить значну кількість різноманітного обладнан-

ня, процес переробки ТпМ у кожному з яких описується різними математичними моделями, а і в тому, що подібна ситуація часто має місце навіть у одній, окремо взятій, одиниці обладнання. Наприклад, моделювання черв'ячної екструзії як сукупності послідовних процесів, що відбуваються на ділянках подавання, плавлення й гомогенізації [101, 102, 188], може бути істотно ускладнене навіть у межах однієї ділянки гомогенізації внаслідок її оригінального конструктивного оформлення [160, 185, 188].

Під час аналізу технологічної лінії або її обладнання можливі два основні види розрахунку. Перший з них передбачає за відомою продуктивністю визначення розмірів та енергосилових параметрів окремих видів обладнання й лінії в цілому. Згідно з другим видом розрахунку за відомими геометричними розмірами і параметрами встановлених на обладнанні теплоенергосилових систем і пристроїв (вид, температура й витрати теплоносіїв, потужність електричних нагрівачів, потужність приводів і забезпечувані ними швидкості робочих органів технологічного й допоміжного обладнання) передбачається визначення максимально можливої продуктивності (для виробу певного поперечного перерізу – його швидкості на «холодному» кінці лінії, тобто в місці розміщення приймального пристрою, або на виході з окремої одиниці обладнання технологічної лінії).

Оскільки будь-який виріб з ТпМ у переважній більшості випадків майже неможливо одержати на окремій одиниці обладнання, його виробництво можливе лише із застосуванням певної технологічної лінії, яка є сукупністю технологічного й допоміжного обладнання. На практиці це ставить завдання для заданої продуктивності лінії й певного матеріалу визначити геометрію робочих органів обладнання та режими його роботи, тобто має місце перший із зазначених основних видів розрахунку.

Таким чином, модель технологічної лінії можна розглядати як сукупність її складових елементів (одиниць обладнання), які певним чином сполучені між собою і в яких відбуваються процеси, що впливають на якість одержуваної продукції. Такий підхід передбачає необхідність розробки в першу чергу математичних моделей окремих одиниць обладнання.

Запропоновані засади моделювання надають можливість ефективно застосовувати існуючі й нові методики розрахунку як певних видів обладнання, так і окремих стадій переробки в ньому ТпМ з використанням вторинної сировини, особливо таких, досвід одержання яких недостатній або взагалі відсутній [260].

#### **2.4.2. Алгоритми розрахунку основного обладнання**

На підставі розглянутого в п. 2.4.1 підходу до побудови й моделювання технологічних ліній з переробки ТпМ з використанням вторинної сировини розроблено укрупнені алгоритми розрахунку основного технологічного й до-

поміжного обладнання: роторного змішувача, вальців, каландра, черв'ячного екструдера та пристрою для термообробки.

Схеми зазначених алгоритмів складаються з модулів, кожний з яких визначає певні параметри й характеристики технологічних ліній чи обладнання в цілому або їх окремих ділянок.

**2.4.2.1. Алгоритм розрахунку роторного змішувача.** Схему алгоритму параметричного й теплового розрахунку роторного змішувача з овальними роторами наведено на рис. 2.2.

Вихідними даними для розрахунку є: радіуси гребеня та основи ротора; ширина гребеня ротора; глибина каналу між гребенем ротора й стінкою камери; довжина змішувальної камери і дуги лопаті ротора; вільний об'єм і коефіцієнт завантаження змішувальної камери; кутові швидкості швидко- і тихохідного роторів; початкова температура вихідної сировини; максимально допустима температура одержуваного ТпМ; реологічні й теплофізичні (густина, масова теплоємність, теплопровідність) властивості одержуваного ТпМ як функції температури (або відповідні властивості компонентів ТпМ, а також його якісний і кількісний склад).

На підставі вихідних даних здійснюється розрахунок координати ділянки деформування серпоподібного проміжку, визначаються тиск і розпірні зусилля, розраховується енергія дисипації в серпоподібному й мінімальному проміжках, визначаються величина накопиченої в ТпМ деформації і тривалість змішування. Якщо поточне значення накопиченої в ТпМ деформації менше від рекомендованого значення, то продовжується визначення накопиченої деформації і уточнюється тривалість змішування.

Далі визначаються параметри системи термостабілізації робочих органів (роторів і змішувальної камери) і розраховується середня температура ТпМ. Якщо зазначена температура більше за допустиме значення, то змінюються вихідні дані (при цьому зазвичай необхідно зменшити кутові швидкості роторів).

Потім розраховується потужність привода роторів. Якщо розраховане значення потужності привода більше за значення встановленої потужності, то вихідні дані також необхідно змінити (у цьому разі також зазвичай необхідно зменшити кутові швидкості роторів).

Після виведення результатів розрахунку здійснюється їх аналіз.

**2.4.2.2. Алгоритми розрахунку валкових машин.** Схему алгоритму параметричного і теплового розрахунку *вальців періодичної дії* наведено на рис. 2.3.

Вихідними даними для розрахунку є: тип приводу валків (загальний; індивідуальний); тип валків (з периферійними каналами; з центральною порожниною); радіус бочки валка та його маса; мінімальна величина міжвалкового проміжку; відстань між обмежувальними стрілами; швидкість швидкохідного

валка; коефіцієнт фрикції в міжвалковому проміжку; температури швидко- і тихохідного валків; початкова і максимально допустима температура  $T_{пМ}$ ; тип теплоносія (вода; високотемпературний органічний теплоносій); реологічні й теплофізичні (густина, масова теплоємність, теплопровідність) властивості одержуваного  $T_{пМ}$  як функції температури (або відповідні властивості компонентів  $T_{пМ}$ , а також його якісний і кількісний склад); безрозмірні координати виходу  $T_{пМ}$  з міжвалкового проміжку і входу  $T_{пМ}$  у міжвалковий проміжок.

На підставі вихідних даних здійснюється розрахунок швидкості тихохідного валка, визначається початкова координата ділянки деформування міжвалкового проміжку, розраховуються температурні поля  $T_{пМ}$  у міжвалковому проміжку й поза ним. Якщо локальна температура  $T_{пМ}$  більше за допустиме значення, то змінюються вихідні дані (при цьому зазвичай необхідно зменшити кутові швидкості валків, температури валків або величину міжвалкового проміжку, змінити коефіцієнт фрикції).

Далі визначаються величина накопиченої в  $T_{пМ}$  деформації і тривалість вальцювання. Якщо поточне значення накопиченої в  $T_{пМ}$  деформації менше від рекомендованого значення, то продовжується визначення накопиченої деформації і уточнюється тривалість вальцювання.

Потім розраховуються розпірні зусилля, що діють на валки. Якщо розпірні зусилля більші за допустиме значення, то вихідні дані також необхідно змінити (при цьому зазвичай необхідно зменшити кутові швидкості валків, температури валків або величину міжвалкового проміжку, змінити коефіцієнт фрикції).

Аналогічно діям під час визначення розпірних зусиль розраховують потужність привода валків.

Після цього визначається потужність дисипації в міжвалковому проміжку і параметри системи термостабілізації валків (температура і витрата теплоносія в кожному з валків). Якщо один або декілька параметрів системи термостабілізації валків перевищує допустиме значення, то змінюються вихідні дані (при цьому зазвичай необхідно змінити кутові швидкості валків, величину міжвалкового проміжку, коефіцієнт фрикції, температури валків або тип теплоносія).

Після виведення результатів розрахунку здійснюється їх аналіз.

Схему алгоритму параметричного й теплового розрахунку *вальців безперервної дії* наведено на рис. 2.4.

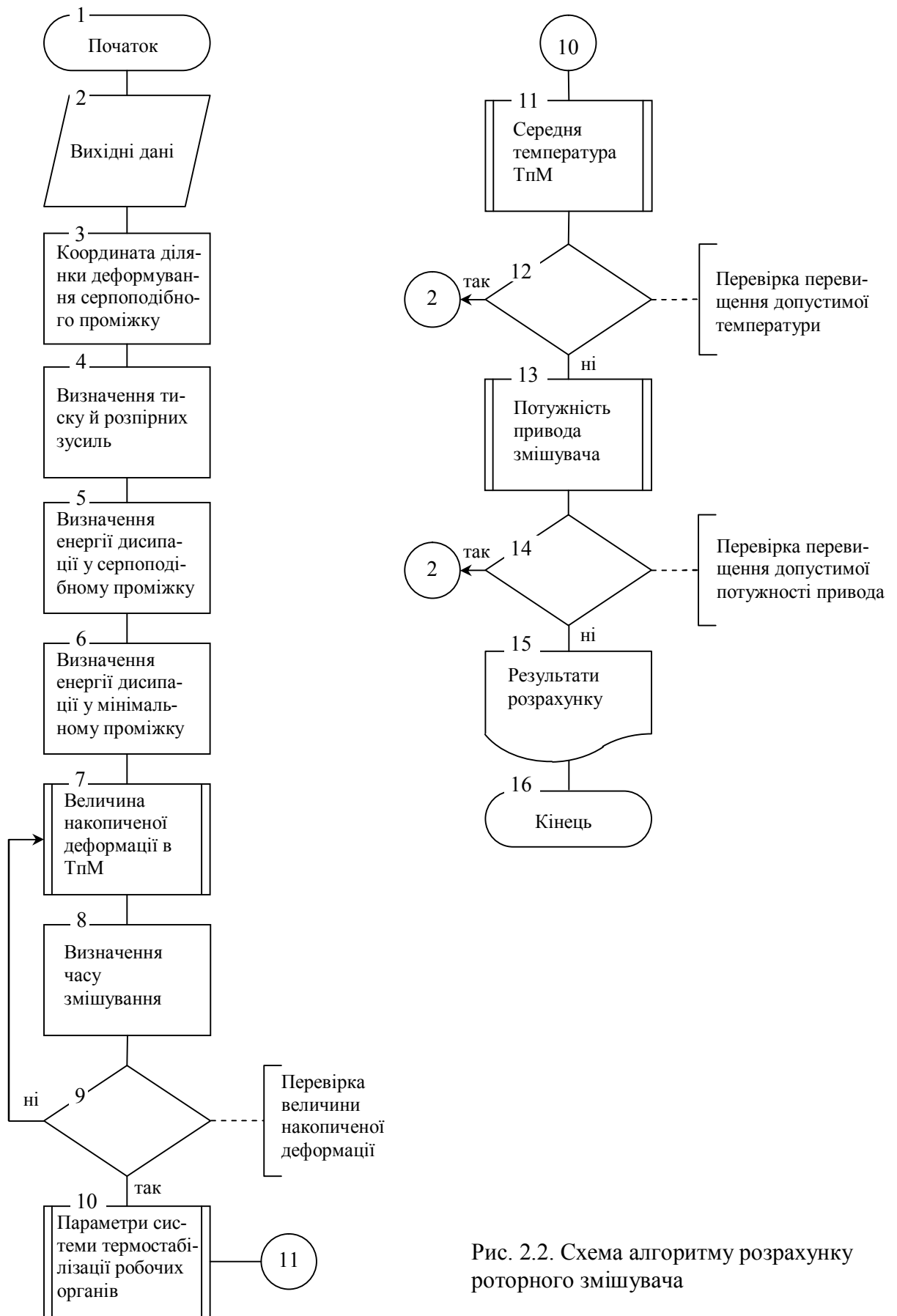


Рис. 2.2. Схема алгоритму розрахунку роторного змішувача

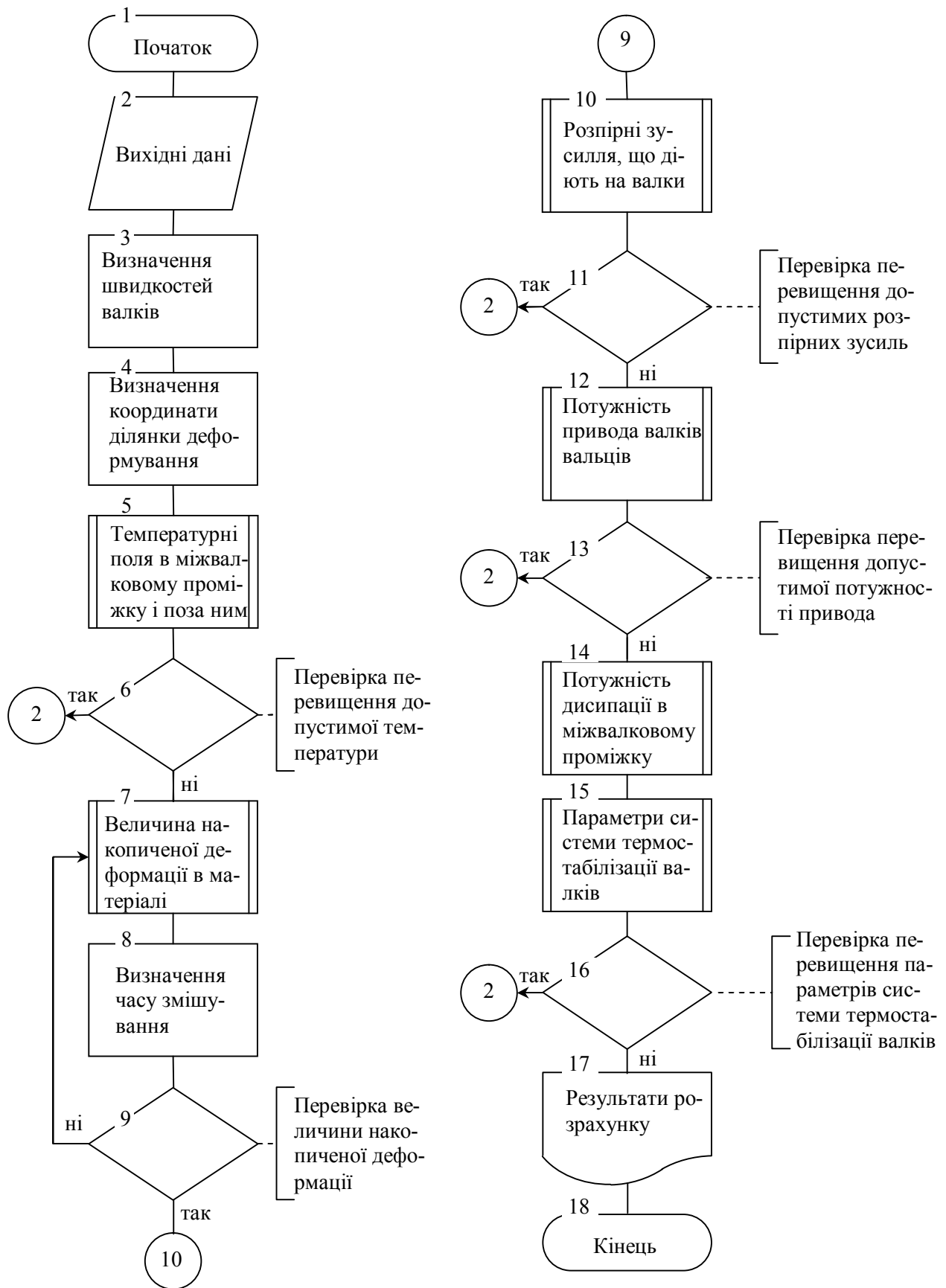


Рис. 2.3. Схема алгоритму розрахунку вальців періодичної дії

Вихідними даними для розрахунку є: схема завантаження і знімання ТпМ з вальців (завантаження з одного кінця валків, знімання безперервної стрічки ТпМ з іншого кінця; завантаження з обох кінців валків, знімання безперервної стрічки ТпМ посередині валків; завантаження посередині валків, знімання безперервної стрічки ТпМ з обох кінців валків); тип приводу валків (загальний; індивідуальний); тип валків (з периферійними каналами; з центральною порожниною); радіус бочки валка та його маса; мінімальна величина міжвалкового проміжку; відстань між обмежувальними стрілами; ширина безперервної стрічки ТпМ, що знімається з вальців; швидкість швидкохідного валка; коефіцієнт фрикції в міжвалковому проміжку; температури швидко- і тихохідного валків; початкова і максимально допустима температура ТпМ; тип теплоносія (вода; високотемпературний органічний теплоносій); реологічні й теплофізичні (густина, масова теплоємність, теплопровідність) властивості одержуваного ТпМ як функції температури (або відповідні властивості компонентів ТпМ, а також його якісний і кількісний склад); безрозмірні координати виходу ТпМ з міжвалкового проміжку і входу ТпМ у міжвалковий проміжок.

На підставі вихідних даних здійснюється розрахунок швидкості тихохідного валка, визначається початкова координата ділянки деформування міжвалкового проміжку, розраховуються температурні поля ТпМ у міжвалковому проміжку й поза ним (тривалість вальцювання визначається відстанню між обмежувальними стрілами та шириною безперервної стрічки ТпМ, що знімається з вальців).

Якщо локальна температура ТпМ більше за допустиме значення, то змінюються вихідні дані (при цьому зазвичай необхідно зменшити кутові швидкості валків, температури валків або величину міжвалкового проміжку, змінити коефіцієнт фрикції).

Потім розраховуються розпірні зусилля, що діють на валки. Якщо розпірні зусилля більші за допустиме значення, то вихідні дані також необхідно змінити (при цьому зазвичай необхідно зменшити кутові швидкості валків, температури валків або величину міжвалкового проміжку, змінити коефіцієнт фрикції).

Аналогічно діям під час визначення розпірних зусиль розраховують потужність приводу валків.

Після цього визначається потужність дисипації в міжвалковому проміжку і параметри системи термостабілізації валків (температура і витрата теплоносія в кожному з валків). Якщо один або декілька параметрів системи термостабілізації валків перевищує допустиме значення, то змінюються вихідні дані (при цьому зазвичай необхідно змінити кутові швидкості валків, величину міжвалкового проміжку, коефіцієнт фрикції, температури валків або тип теплоносія).

Після виведення результатів розрахунку здійснюється їх аналіз.

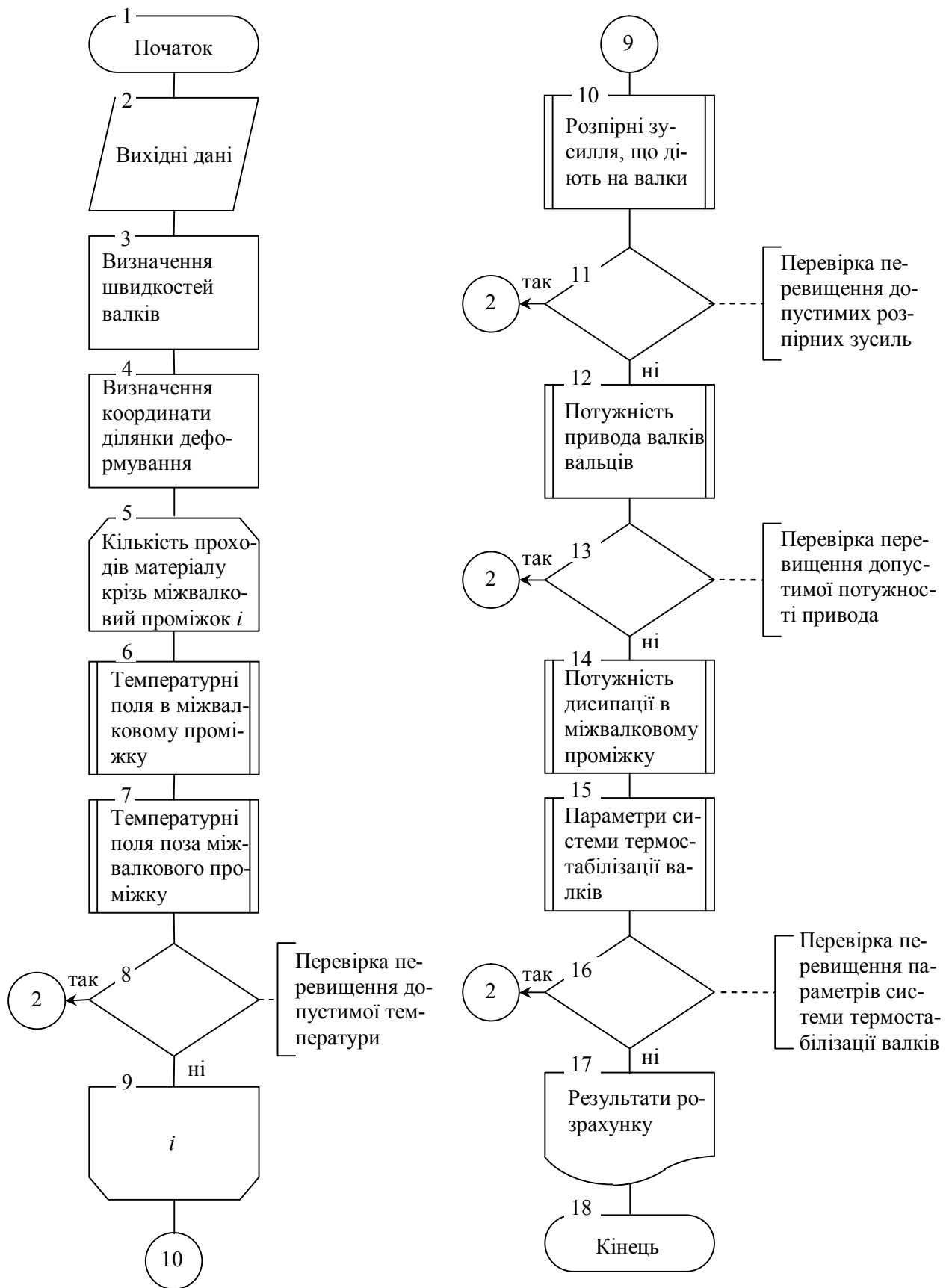


Рис. 2.4. Схема алгоритму розрахунку вальців безперервної дії

Схему алгоритму параметричного й теплового розрахунку *каландра* наведено на рис. 2.5.

Вихідними даними для розрахунку є: тип каландра і схема розміщення його валків; схема руху ТпМ по валках каландра; місце знімання ТпМ з каландра (номер валка) і кут, під яким до горизонталі знімається відформований ТпМ; тип приводу валків (загальний; індивідуальний); тип валків (з периферійними каналами; з центральною порожниною); радіус бочки валка та його маса; товщина і ширина готового полотна ТпМ; швидкість знімання полотна; коефіцієнти фрикції в міжвалкових проміжках; температури валків; початкова і максимально допустима температура ТпМ; тип теплоносія (вода; високотемпературний органічний теплоносіє); реологічні й теплофізичні (густина, масова теплоємність, теплопровідність) властивості одержуваного ТпМ як функції температури (або відповідні властивості компонентів ТпМ, а також його якісний і кількісний склад); безрозмірні координати виходу ТпМ з міжвалкового проміжку і входу ТпМ у міжвалкові проміжки.

На підставі вихідних даних здійснюється розрахунок швидкостей валків, величини міжвалкових проміжків, а також початкові координати ділянок деформування в міжвалкових проміжках, після чого визначаються координати ділянок поза межами міжвалкових проміжків і розраховуються температурні поля ТпМ як у міжвалкових проміжках, так і поза ними.

Якщо локальна температура ТпМ більше за допустиме значення, то змінюються вихідні дані (при цьому зазвичай необхідно зменшити кутові швидкості валків або їх температури).

Потім розраховуються розпірні зусилля, що діють на валки. Якщо розпірні зусилля більші за допустиме значення, то вихідні дані також необхідно змінити (при цьому зазвичай необхідно зменшити кутові швидкості валків, температури валків або величину міжвалкового проміжку, змінити коефіцієнт фрикції).

Аналогічно діям під час визначення розпірних зусиль розраховують потужність привода (загальний привід) або приводів (індивідуальний привід) валків.

Після цього визначається потужність дисипації в міжвалкових проміжках і параметри системи термостабілізації валків (температура і витрата теплоносія в кожному з валків). Якщо один або декілька параметрів системи термостабілізації валків перевищує допустиме значення, то змінюються вихідні дані (при цьому зазвичай необхідно змінити кутові швидкості, температури валків, тип теплоносія).

Після виведення результатів розрахунку здійснюється їх аналіз.

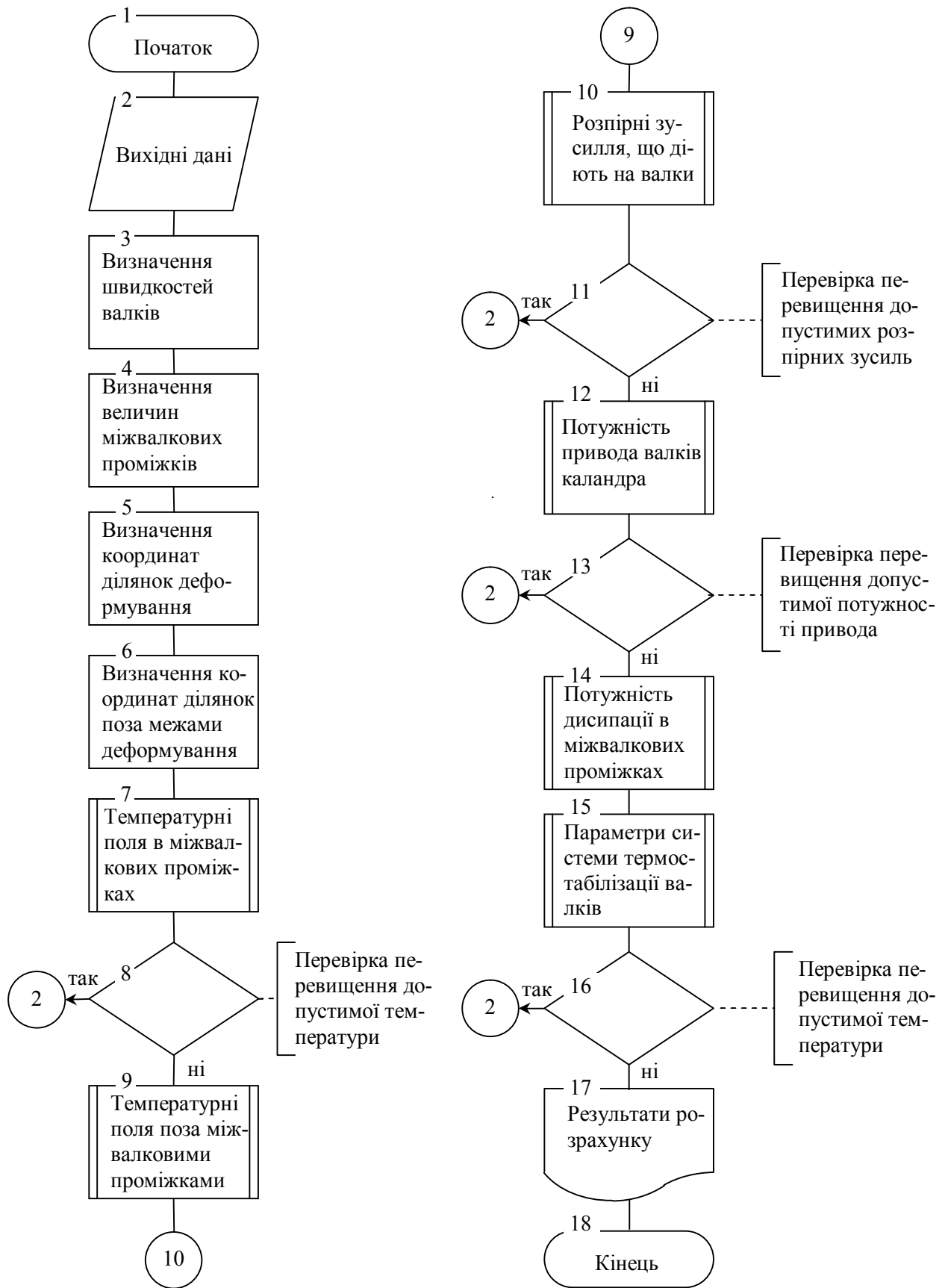


Рис. 2.5. Схема алгоритму розрахунку каландра

**2.4.2.3. Алгоритми розрахунку черв'ячних екструдерів.** Узагальнену схему алгоритму розрахунку *одночерв'ячного екструдера* за відомою геометрією робочих органів наведено на рис. 2.6 [187, 228].

Вихідними даними для розрахунку є: діаметр і крок гвинтової нарізки черв'яка; ширина гребеня витка нарізки черв'яка; координати початку й кінця конічної частини черв'яка; робоча довжина черв'яка; коефіцієнт тертя  $T_{пМ}$  по матеріалу циліндра; відношення коефіцієнтів тертя  $T_{пМ}$  по матеріалу циліндра й матеріалу черв'яка; масова продуктивність екструдера; температура плавлення термопластичного полімеру  $T_{пМ}$ ; найменша й найбільша температура стінки циліндра; реологічні й теплофізичні (густина, масова теплоємність, теплопровідність, ентальпія) властивості одержуваного  $T_{пМ}$  як функції температури (або відповідні властивості компонентів  $T_{пМ}$ , а також його якісний і кількісний склад).

Задається частота обертання черв'яка і вводяться вихідні дані зони подавання екструдера: довжина зони подавання, глибина каналу черв'яка в зоні подавання, тиск на початку зони подавання, насипна густина вихідного  $T_{пМ}$  і початкова ентальпія  $T_{пМ}$ .

На підставі вихідних даних здійснюється розрахунок зони подавання.

Розраховується зона подавання. Якщо умови стикування зон подавання і плавлення не дотримуються, то здійснюється перерахунок зони подавання.

Далі вводяться вихідні дані зони плавлення: тиск та ентальпія  $T_{пМ}$  на початку зони плавлення.

Розраховується зона плавлення. Якщо умови стикування зон плавлення і гомогенізації не дотримуються, то здійснюється перерахунок зони плавлення.

Далі вводяться вихідні дані зони гомогенізації: глибина каналу черв'яка в зоні гомогенізації, тиск на початку зони гомогенізації, опір екструзійної формувальної головки, ентальпія  $T_{пМ}$  на початку зони гомогенізації.

Розраховується зона гомогенізації доти, поки поточна розрахункова довжина черв'яка не перевищить його робочу довжину.

Наприкінці виконується порівняння: якщо остаточна температура  $T_{пМ}$  не перевищує допустиме значення, то розрахунок закінчено, інакше необхідно змінити вихідні дані (наприклад, зменшити частоту обертання черв'яка).

Після виведення результатів розрахунку здійснюється їх аналіз.

**2.4.2.4. Алгоритм розрахунку пристрою для термообробки.** Схему алгоритму перевірного і проектного розрахунків пристрою для термообробки наведено на рис. 2.7.

Вихідними даними для розрахунку є: тип розрахунку (перевірний; проектний); умови термообробки (вільна або вимушена конвекція); тип теплоносія (вода, повітря); напрям руху виробу (горизонтальне; вертикальне; під кутом до горизонту); початкова температура виробу; швидкість руху виробу; визна-

чальні розміри виробу (товщина рулонного виробу, діаметр круглого стрижня, діаметр і товщина стінки трубчастого виробу тощо); крок розрахунку за часом; температура теплоносія; властивості теплоносія (теплопровідність, кінематична в'язкість, характеристичне число Прандтля) як функції температури; теплофізичні властивості оброблюваного ТпМ (густина, масова теплоємність, теплопровідність) як функції температури (або відповідні властивості компонентів ТпМ, а також його якісний і кількісний склад); якщо конвекція вимушена, то швидкість руху теплоносія і напрям його руху відносно виробу; якщо розрахунок перевірний, то довжина ділянки термообробки, а якщо розрахунок проектний, то допустима кінцева температура ТпМ.

Якщо розрахунок перевірний, то визначається загальна тривалість і поточний час термообробки, а якщо розрахунок проектний, то визначається поточна довжина ділянки термообробки.

Далі на поточному кроці розрахунку визначається температурне поле ТпМ.

У разі перевірного розрахунку якщо поточний час менше від загальної тривалості термообробки або в разі проектного розрахунку якщо поточна середня (або локальна) температура більше за допустиму кінцеву температуру, то продовжується визначення температурного поля ТпМ на наступному кроці розрахунку.

Після виведення результатів розрахунку здійснюється їх аналіз: якщо в разі перевірного розрахунку визначена кінцева середня (або локальна) температура ТпМ або в разі проектного розрахунку якщо визначена довжина ділянки термообробки більші за відповідне допустиме значення, то змінюються вихідні дані (при цьому зазвичай необхідно змінити температуру та/або режим руху теплоносія, тип теплоносія або швидкість виробу), після чого розрахунок розпочинають заново.

### **2.4.3. Алгоритм розрахунку технологічної лінії на базі змішувально-валкового обладнання**

Розглянемо алгоритм розрахунку однієї з типових технологічних ліній для переробки ТпМ з використанням вторинної сировини, а саме лінії на базі змішувально-валкового обладнання.

Перша одиниця обладнання цієї лінії – роторний змішувач – характеризується певними геометричними характеристиками робочих органів (форма й розміри роторів і змішувальної камери). Тому для забезпечення необхідних параметрів процесу (тривалість змішування, кінцева температура одержуваного ТпМ) необхідно визначити швидкості обертання роторів і параметри системи термостабілізації робочих органів. При цьому час змішування визначає продуктивність змішувача і, можливо, лінії в цілому.

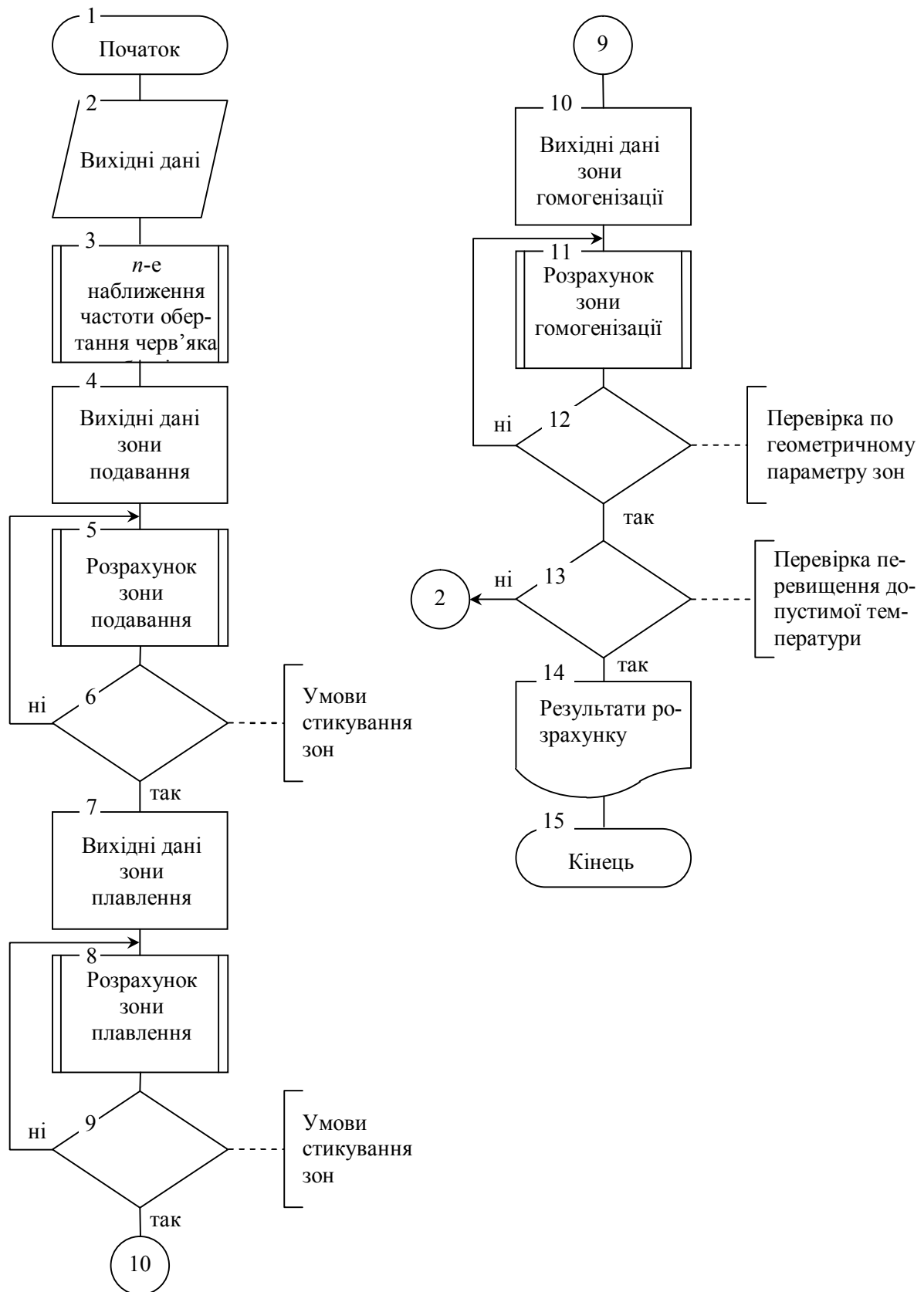


Рис. 2.6. Схема алгоритму розрахунку черв'ячного екструдера

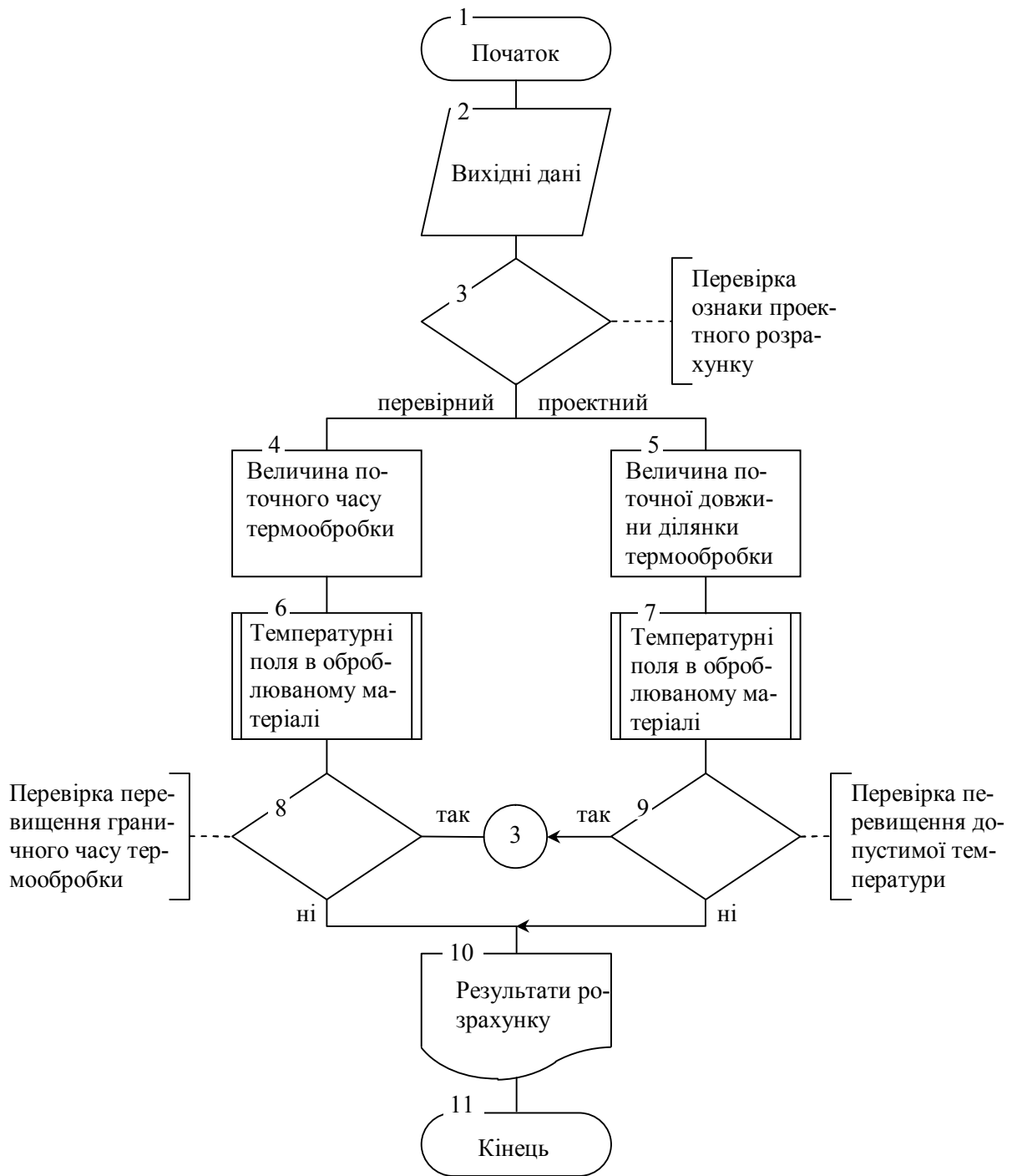


Рис. 2.7. Схема алгоритму розрахунку пристрою для термообробки

У той же час наступні за процесом змішування стадії вальцювання й каландрування мають більше величин для регулювання кінцевих параметрів одержуваної продукції, зокрема його температури: швидкості обертання валків, коефіцієнт фрикції в міжвалкових проміжках, параметри системи термостабілізації валків. При цьому для вальців, особливо періодичної дії, необхідно розрахувати тривалість вальцювання, що визначатиме продуктивність вальців, яка

може не відповідати продуктивності попередньої одиниці обладнання – роторного змішувача, що передбачає змінювання вихідних даних для розрахунку одного або обох видів обладнання (уточнення режимів процесів, кількості та/або типорозмірів обладнання та ін.). Зрозуміло, що зі збільшенням одиниць технологічного й допоміжного обладнання відповідні уточнення зростатимуть.

Що стосується ділянки термообробки продукції, то тут можливі два варіанти:

1) за умови певної довжини ділянки термообробки та необхідності забезпечення потрібної температури виробу на «холодному» кінці лінії необхідно підібрати параметри системи термообробки та/або максимально можливу швидкість виробу, яка може визначати загальну продуктивність лінії;

2) за умови певної швидкості виробу (загальної продуктивності лінії) та необхідності забезпечення потрібної температури виробу на «холодному» кінці лінії необхідно підібрати параметри системи термообробки та/або довжину ділянки термообробки.

Схему алгоритму технологічної лінії на базі змішувально-валкового обладнання наведено на рис. 2.8.

Вихідними даними для розрахунку лінії є: продуктивність лінії; форма й розміри виробу; початкова температура компонентів перероблюваного ТпМ; максимально допустима температура ТпМ; реологічні й теплофізичні (густина, масова теплоємність, теплопровідність) властивості одержуваного ТпМ як функції температури (або відповідні властивості компонентів ТпМ, а також його якісний і кількісний склад).

Вихідні дані для розрахунку роторного змішувача наведені в п. 2.4.2.1. Після задання значення змінюваного параметра роторного змішувача (найчастіше кутових швидкостей роторів) здійснюється його розрахунок (див. п. 2.4.2.1).

Якщо значення щонайменше одного з контрольованих параметрів роторного змішувача перевищує допустиме значення, то змінюються вихідні дані роторного змішувача (при цьому уточнюються значення його змінюваного параметра) або вихідні дані всієї лінії (при цьому уточнюються значення щонайменше одного змінюваного параметра лінії).

Аналогічно розрахунку роторного змішувача здійснюється розрахунок наступних одиниць обладнання лінії: вальців, каландра і пристрою для термообробки. Після виведення результатів розрахунку здійснюється їх аналіз.

Результати моделювання за розробленими алгоритмами використано під час проектування, модернізації та експлуатації змішувального, валкового, екструзійного обладнання та обладнання для термообробки ТпМ з використанням вторинної сировини (ВАТ «НВП „Більшовик”», ВАТ «Київхімволокно», ВКФ «ПоліЕк», НВП «Пластотехніка», ТОВ «Ековторполімер», ПП «НВП „Укрсклопром”», м. Київ; ЗАО «Средневожский завод полимерных изделий», м. Тольятті, Російська Федерація).

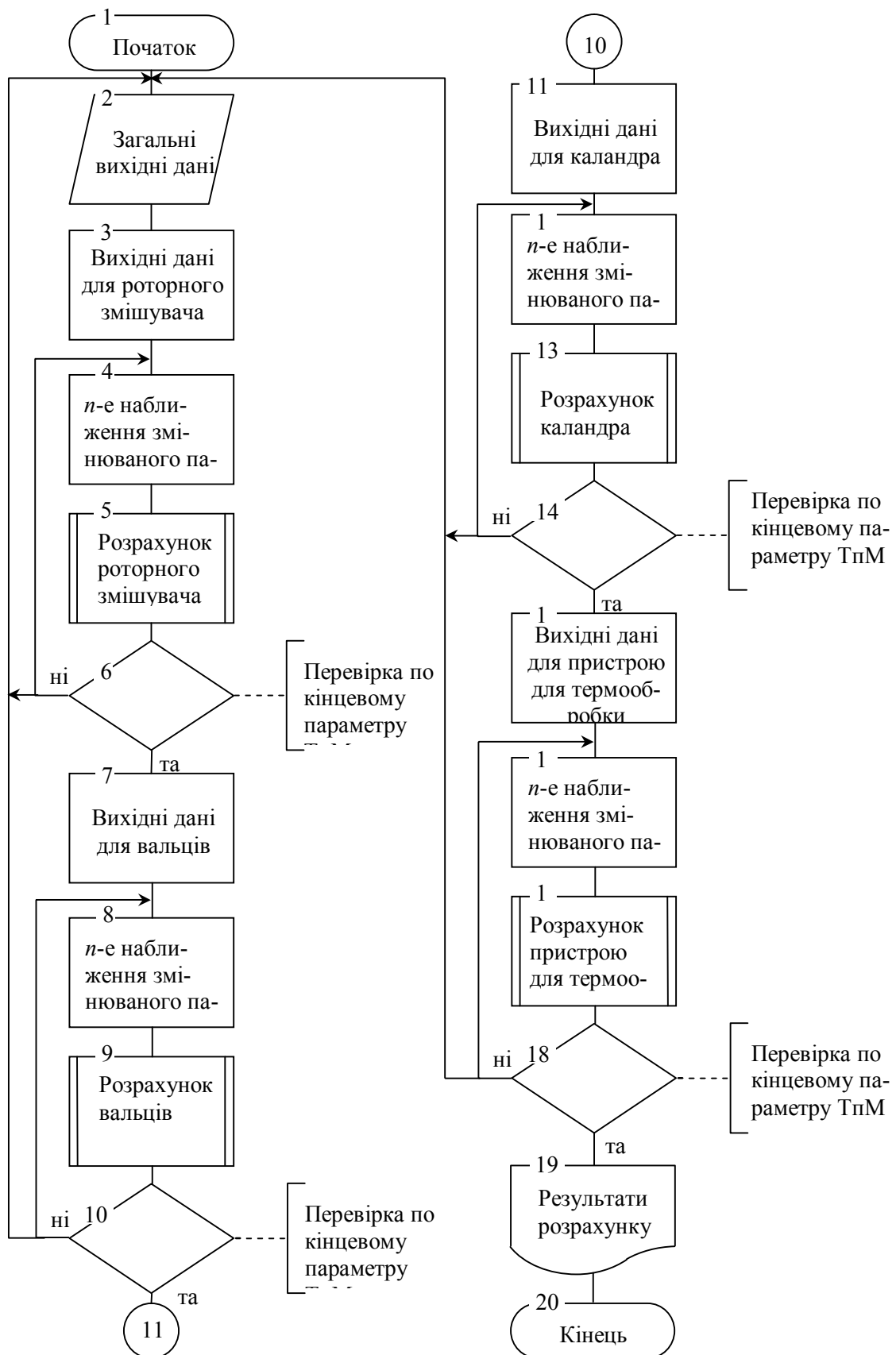


Рис. 2.8. Схема алгоритму розрахунку лінії на базі змішувально-валкового обладнання

## 2.5. Висновки

Відповідно до проведених досліджень можна зробити такі висновки.

1. Показано, що суттєве значення для одержання високоякісної продукції з термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини має дисипативна складова енергетичного балансу обладнання або його функціональної ділянки, яка залежить від якісного і кількісного складу перероблюваного матеріалу, умов попередньої переробки, експлуатації та зберігання компонентів ТпМ, температури переробки та швидкості зсуву матеріалу під час переробки.

2. Удосконалено узагальнену математичну модель процесів переробки термопластів, яку поширено на новий клас матеріалів – ТпМ з використанням вторинної сировини і яка враховує дисипативні джерела енергії, джерела енергії, пов'язані з перетвореннями в об'ємі маси, реальні умови теплообміну на обмежувальних поверхнях робочих органів обладнання, а також залежність теплофізичних і реологічних властивостей перероблюваного матеріалу від його температури, якісного й кількісного складу. Розроблено основні принципи розв'язання узагальненої математичної моделі із врахуванням загальних особливостей процесів переробки.

3. Показано, що під час побудови і моделювання технологічних ліній розрахунок усіх її компонентів зазвичай проводиться для заданої продуктивності та певного термопластичного матеріалу. При цьому кожен технологічну лінію необхідно розглядати як сукупність сполучених між собою у визначеній послідовності одиниць певного обладнання, в кожній з яких відбуваються процеси, що впливають на якість одержуваної продукції. Такий підхід до моделювання технологічних ліній передбачає необхідність моделювання процесів, які відбуваються в кожній одиниці обладнання.

4. Розроблено укрупнені алгоритми розрахунку технологічної лінії для безперервної переробки ТпМ з використанням вторинної сировини та її основного обладнання: роторних змішувачів, вальців, каландрів, екструдерів та пристроїв для термообробки ТпМ, напівфабрикатів і виробів з них.

5. Розроблено укрупнений алгоритм розрахунку технологічної лінії для переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини залежно від складу певної технологічної лінії (комплектності та послідовності сполучення одиниць обладнання лінії між собою) на основі розроблених алгоритмів розрахунку окремих видів обладнання. При цьому вхідними параметрами для кожної одиниці обладнання, що входить до складу технологічної лінії, є два види величин. До перших з них належать незмінювані параметри, властиві певній одиниці обладнання (наприклад, геометричні розміри її робочих органів), а до другої – змінювані параметри, які є вихідними параметрами попередньої або наступної (за ходом перероблюваного ТпМ) одиниці обладнання.

6. Запропоновано та обґрунтовано доцільність попереднього аналізу особливостей технологічного процесу переробки ТпМ з використанням вторинної сировини і можливість змінювання розробленого підходу до моделювання певної технологічної лінії. Зокрема, процес термообробки часто виявляється обмежною стадією всього технологічного процесу, тому першою з досліджуваних одиниць обладнання лінії доцільно брати саме пристрій для термообробки, який і визначатиме продуктивність лінії в цілому. З цією метою для кожної одиниці обладнання, а за необхідності і для її окремих ділянок, мають бути сформульовані відповідні вимоги, зокрема граничні значення певного параметра.

Основні наукові результати розділу 2 опубліковані в працях [125, 284–287].

---

### **3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСТРУЗІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ**

#### **3.1. Класифікація екструзійного обладнання і загальні засади математичного моделювання черв'ячних екструдерів**

Екструзійне обладнання можна класифікувати за різними показниками: типом робочих органів, їх кількістю та геометрією, функціональним призначенням екструдерів, режимом роботи, термодинамікою процесу переробки, співвідношенням довжини до діаметра робочих органів тощо (див., наприклад, [116, 119, 178 та ін.]). При цьому найбільш характерною класифікацією можна вважати поділ екструдерів за конструктивними ознаками (рис. 3.1; також див. табл. 1.2).

Як зазначалося в підрозд. 1.3, серед конструкцій екструдерів домінують машини з обертовими робочими органами або їх окремими ділянками у вигляді черв'яків, які характеризуються універсальністю й забезпечують достатню продуктивність при задовільному змішувальному ефекті (продуктивність одночерв'ячного екструдера досягає 40 т/год [136], а продуктивність двочерв'ячних екструдерів – 25 т/год, при цьому існує тенденція до її зростання [137]). Класифікацію основних робочих органів черв'ячних екструдерів – черв'яків – наведено на рис. 3.2.

Найбільшого поширення в промисловості переробки ТпМ набули одночерв'ячні екструдери з циліндричними черв'яками з постійним кроком і змінною глибиною каналу, а також двочерв'ячні екструдери з різно- та односпрямованим обертанням циліндричних черв'яків із зачепленням їх між собою, у зв'язку з чим подальші дослідження стосуватимуться саме цих машин.

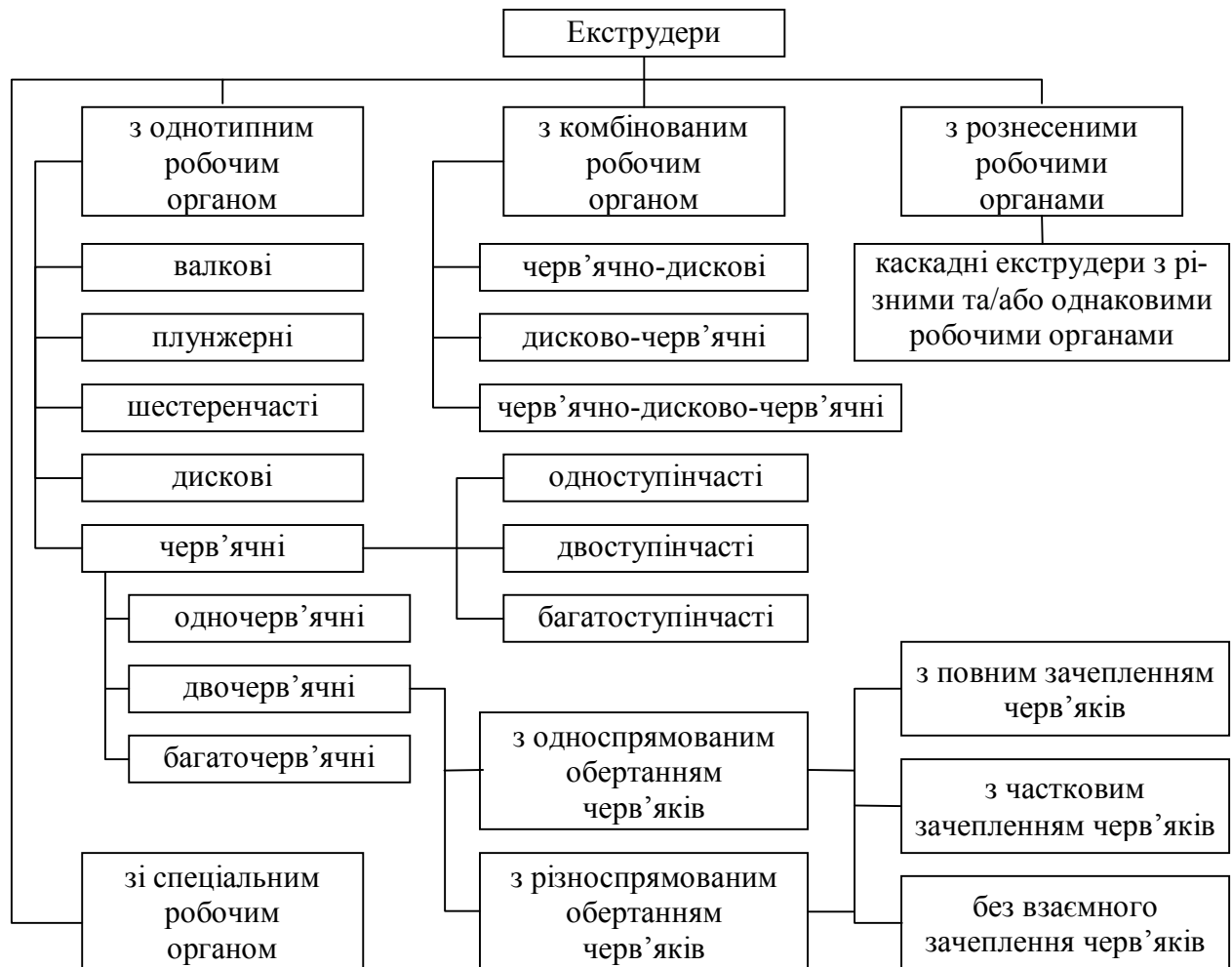


Рис. 3.1. Схема класифікації екструдерів за конструктивними ознаками

Як було зазначено в п. 1.4.3, класична теорія екструзії, що розроблена такими дослідниками як Басов М. І., Кім В.С.-Х., Лукач Ю. Ю., Радченко Л. Б., Торнер Р. В., Bernhardt E. С., McKelvey J. М., Tadmor Z., Schenkel G. та ін., базується на розв'язанні запропонованих ними математичних моделей аналітичними методами для оберненої плоскопаралельної моделі з нерухомим черв'яком і обертовим циліндром, розгорнутими на площину. У їхніх працях окремо, без врахування взаємного зв'язку і впливу одна на одну, розглядаються зони подавання, плавлення й гомогенізації традиційного черв'яка. Для одержання достовірної інформації, необхідної для проектування екструдерів, процес екструзії потрібно розглядати як сукупність послідовних процесів, які відбуваються в каналі черв'яка (зазвичай, це процеси подавання, плавлення й гомогенізації), побудувавши при цьому математичну модель екструзії в цілому. Дійсно, для забезпечення повного заповнення робочого каналу черв'яка потенційно можлива продуктивність зон подавання і плавлення має бути більшою, ніж продуктивність зони гомогенізації, яка і визначає продуктивність

екструдера в цілому. Побудова такої моделі дозволить аналізувати процес екструзії із врахуванням взаємного впливу окремих зон. Саме така модель, що розглядає екструдер як єдине ціле із врахуванням взаємного зв'язку всіх його функціональних зон, може забезпечити ефективне проектування нового або правильний вибір існуючого екструзійного обладнання для переробки певного ТпМ з використанням вторинної сировини.

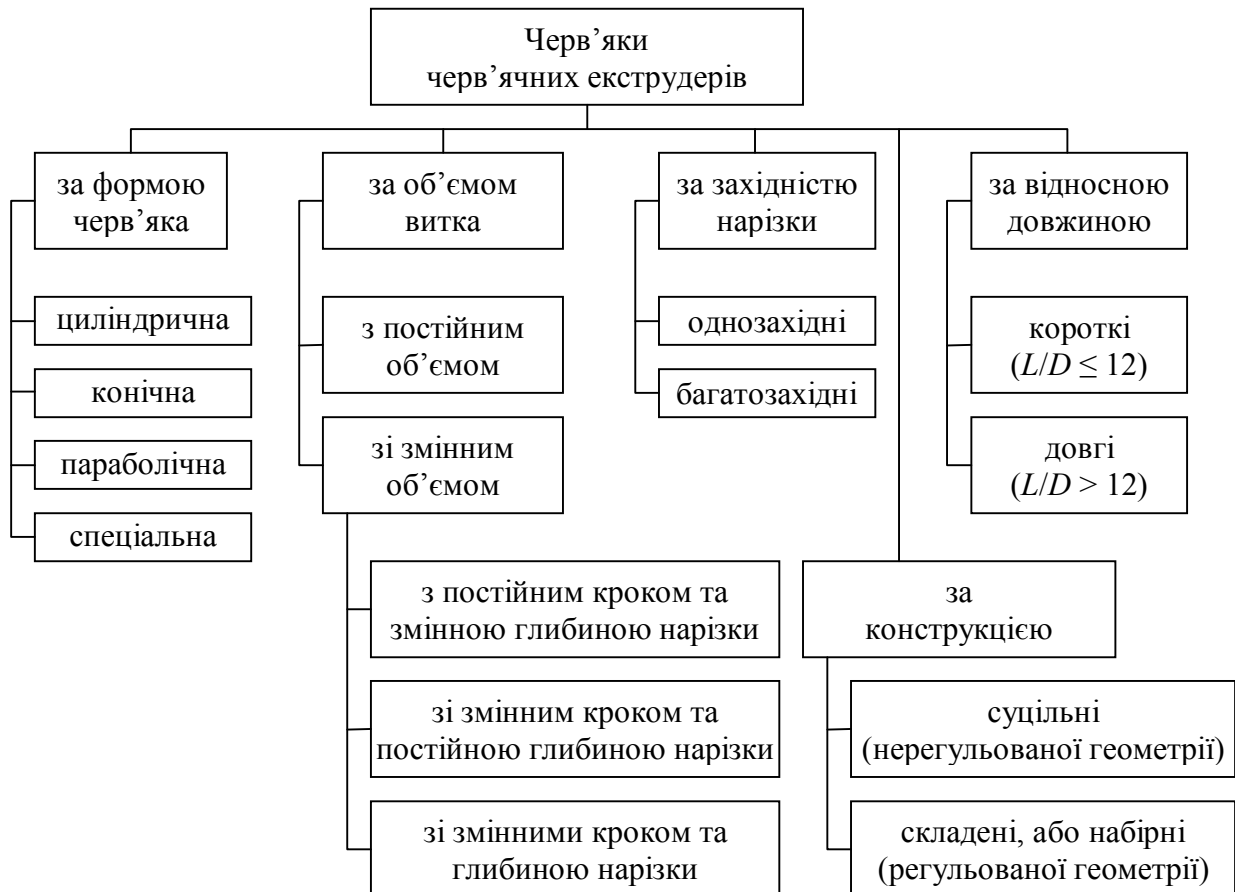


Рис. 3.2. Схема класифікації черв'яків черв'ячних екструдерів

## 3.2. Узагальнена математична модель черв'ячної екструзії

### 3.2.1. Гідродинаміка і теплообмін в об'ємі одного витка нарізки черв'яка

Під час розробки моделі екструзії вважатимемо, що, як і в реальному процесі, обертається черв'як, а циліндр залишається нерухомим. Крім того, на відміну від плоскопаралельної моделі задачу розв'язуватимемо в циліндричній системі координат (рис. 3.3,*a*). Також виділимо об'єм, що відповідає об'єму одного кроку гвинтової нарізки, і умовно zdeформуємо його, повернувши на величину кута нахилу  $\varphi_ч$  нарізки черв'яка.

Спочатку розглянемо виділений об'єм для випадку одночерв'ячного екструдера, а також процес теплообміну в цьому об'ємі, який після його умовної деформації набуває форми кільцевого циліндра (для випадку двочерв'ячного екструдера виділений об'єм при цьому матиме С-подібну форму (рис. 3.3,б і рис. 3.3,в,г, відповідно)).

Для формулювання математичного опису процесу теплообміну скористаємося одночасно системами координат Лагранжа та Ейлера.

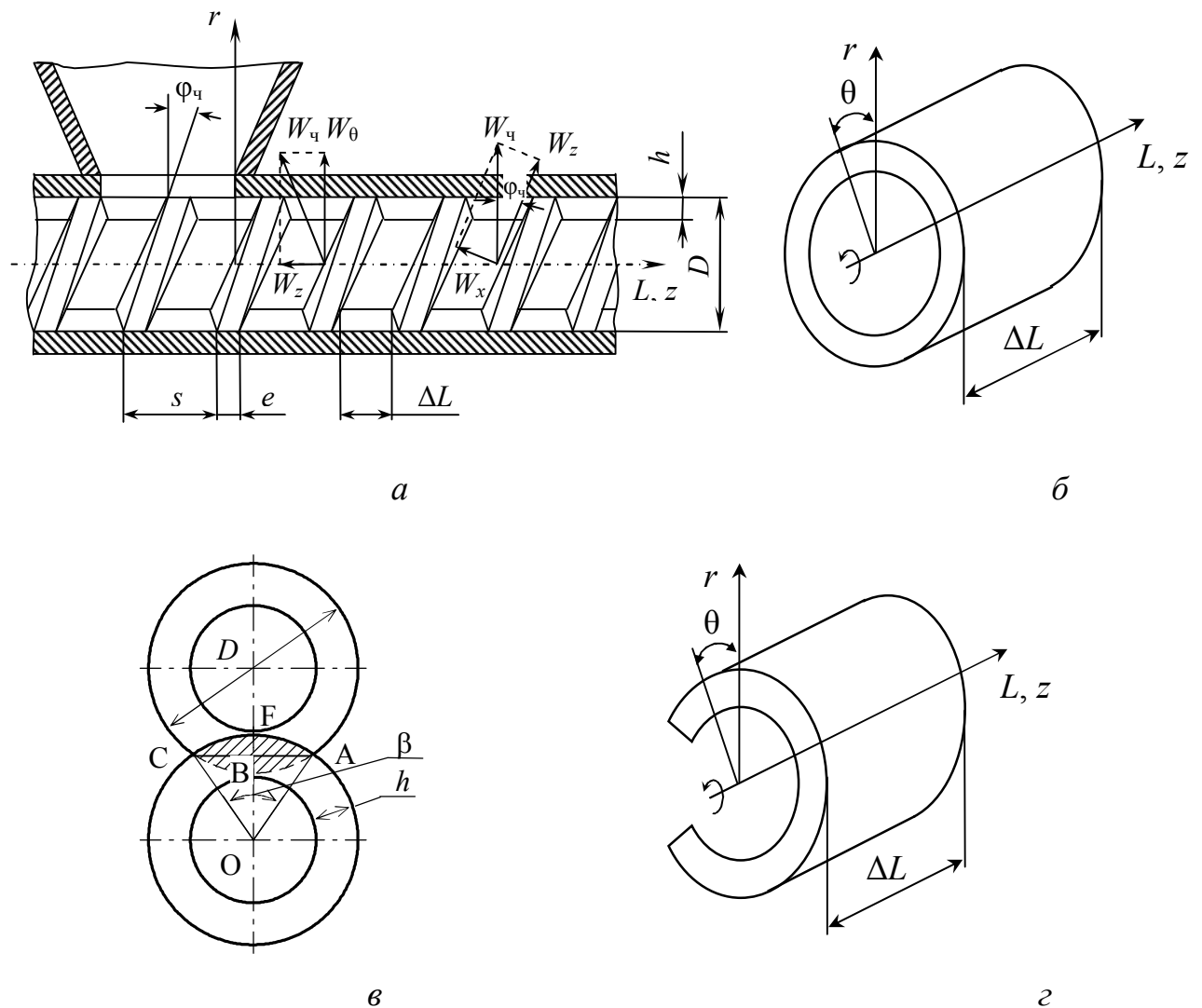


Рис. 3.3. До формулювання математичної моделі черв'ячної екструзії: *a* – модель процесу екструзії в циліндричній системі координат; *б* – об'єм, що дорівнює одному кроку гвинтової нарізки одночерв'ячного екструдера; *в* – поперечний переріз каналу двочерв'ячного екструдера; *г* – С-подібний об'єм секції двочерв'ячного екструдера;  $D$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $\Delta L$  – діаметр, висота і ширина гребеня, а також ширина каналу в осьовому напрямі черв'яка;  $\beta$  – кут сполучення черв'яків

У координатах Лагранжа виділений об'єм рухається вздовж осі черв'яка зі швидкістю  $w_L$ , яку можна визначити за залежністю [187]:

$$w_L = \frac{G_M}{\rho_{\text{ТпМ}} S_{\text{ч}}} = \frac{G_M}{\rho_{\text{ТпМ}} \left\{ \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2h)^2] - \frac{eh}{\text{tg } \varphi_{\text{ч}}} \right\}}$$

де  $S_{\text{ч}}$  – площа діаметрального перерізу каналу черв'яка.

У межах виділеного об'єму також виберемо рухому циліндричну систему координат  $r$ ,  $\vartheta$  і  $z$  – систему координат Ейлера (див. рис. 3.3,б). Ураховуючи, що час  $t$  переміщення виділеного об'єму вздовж координати  $L$  визначається залежністю  $t = L/w_L$ , рівняння збереження енергії (2.6) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}} w_L \frac{\partial T}{\partial L} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_{\text{ТпМ}} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left( \lambda_{\text{ТпМ}} \frac{\partial T}{\partial \vartheta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{\text{ТпМ}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \\ - \rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}} \left( w_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} w_{\vartheta} \frac{\partial T}{\partial \vartheta} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_V, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де  $w_r$ ,  $w_{\vartheta}$  і  $w_z$  – компоненти швидкості у виділеному об'ємі.

Проаналізуємо гідродинаміку двох моделей черв'ячної екструзії: плоскопаралельної моделі з обертовим циліндром (див. рис. 3.3,а, права епюра швидкостей) і прийнятої моделі виділеного об'єму (див. рис. 3.3,а, ліва епюра швидкостей).

Якщо  $W_{\text{ч}}$  – колова швидкість черв'яка ( $W_{\text{ч}} = \pi D n_{\text{ч}}$ , де  $n_{\text{ч}}$  – частота обертання черв'яка, об/с), то її проекції на координатні осі становлять (див. рис. 3.3,а):  $W_x = W_{\text{ч}} \sin \varphi_{\text{ч}}$  і  $W_z = W_{\text{ч}} \cos \varphi_{\text{ч}}$  для плоскопаралельної моделі та  $W_z = W_{\text{ч}} \sin \varphi_{\text{ч}}$  і  $W_{\vartheta} = W_{\text{ч}} \cos \varphi_{\text{ч}}$  для моделі виділеного об'єму.

Отже, для визначення складових швидкості  $w_{\vartheta}$  і  $w_z$  перероблюваного ТпМ у виділеному об'ємі запропонованої моделі можна скористатися відомими розв'язками рівнянь гідродинаміки, одержаними для плоскопаралельної моделі, дзеркально розвернувши їх по висоті каналу (при цьому потрібно також узгодити між собою системи координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  та  $r$ ,  $\vartheta$ ,  $z$ ). Складовою швидкості  $w_r$  можна знехтувати, оскільки вона набагато менша від складових швидкості  $w_{\vartheta}$  і  $w_z$ .

У виділеному об'ємі матеріал обертається під дією складової  $W_{\vartheta}$  і циркулює в поперечному напрямі під дією складової  $W_z$ . Таким чином, процес у виділеному об'ємі можна вважати вісесиметричним.

У зонах подавання і плавлення, де перероблюваний ТпМ повністю або частково перебуває у твердому стані, циркуляційна складова швидкості  $w_z$  і дисипація енергії в об'ємі твердого ТпМ відсутні. У разі переробки висок'язких матеріалів температура в кожній точці об'єму визначається переважно інтенсивністю дисипації [288], яка у свою чергу залежить від швидкості

зсуву в цій точці. Тому складову  $w_z(\partial T/\partial z)$  у рівнянні (3.1) можна не враховувати і в разі необхідності вплив перемішування враховувати коефіцієнтом еквівалентної теплопровідності  $\lambda_{\text{ТпМ екв}} = \varepsilon \lambda_{\text{ТпМ}}$ , де  $\varepsilon \geq 1$  [24].

Із врахуванням зазначених спрощень рівняння (3.1) збереження енергії у виділеному об'ємі перероблюваного ТпМ набуває вигляду:

$$\rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}} w_L \frac{\partial T}{\partial L} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_{\text{ТпМ екв}} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{\text{ТпМ екв}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_V. \quad (3.2)$$

При цьому в зоні подавання й гомогенізації рівняння (3.2) можна спростити, знехтувавши похідною по координаті  $z$ , і розв'язувати методом прогонки. У зоні плавлення похідні другого порядку можна апроксимувати за схемою Кранка–Ніколсона і розв'язати методом прогонки за змінними напрямками. Також необхідно зазначити, що в областях наявності твердого полімеру (зони живлення та плавлення) за відсутності перетворень значення величини  $q_V$  дорівнює нулю.

Залежність для визначення інтенсивності дисипації з урахуванням прийнятих припущень матиме вигляд [24, 101]:

$$q_{\text{дис}} = \tau_{r\vartheta} \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{w_\vartheta}{r} \right) \right] + \tau_{rz} \frac{\partial w_z}{\partial r}. \quad (3.3)$$

Величини напружень  $\tau_{r\vartheta}$  і  $\tau_{rz}$  у залежності (3.3) визначають за допомогою відповідних реологічних рівнянь.

Умови переробки ТпМ, що мають місце у функціональних зонах екструдера, мають певні особливості. Так, у зоні подавання перероблюваний ТпМ рухається як тверда стислива пробка без наявності шарів розплаву термопластичного полімеру біля поверхонь робочих органів, у зоні плавлення зазначена тверда пробка рухається в оточенні розплаву, а в зоні гомогенізації має місце течія ТпМ. Відповідно в цих зонах відрізнятимуться і граничні умови.

Зазначений підхід приймаємо і для аналізу процесу двочерв'ячної екструзії.

У випадку двочерв'ячної екструзії в межах кожного черв'яка також виділяємо об'єм, що відповідає об'єму одного кроку гвинтової нарізки черв'яків, після чого виділений об'єм умовно деформуємо й повертаємо на величину кута нахилу  $\varphi_n$  нарізки черв'яків за аналогією з одночерв'ячною екструзією (при цьому, на відміну від форми кільцевого циліндра для одночерв'ячного екструдера, для двочерв'ячного екструдера зазначений об'єм має С-подібну форму).

Певну різницю в розподілі швидкості  $w_\vartheta$  для екструдерів з різноспрямованим та односпрямованим обертанням черв'яків (рис. 3.4) можна пояснити різним впливом елементів (осердя і гребенів) сусіднього черв'яка на С-подібний об'єм ТпМ даного черв'яка [289, 290].

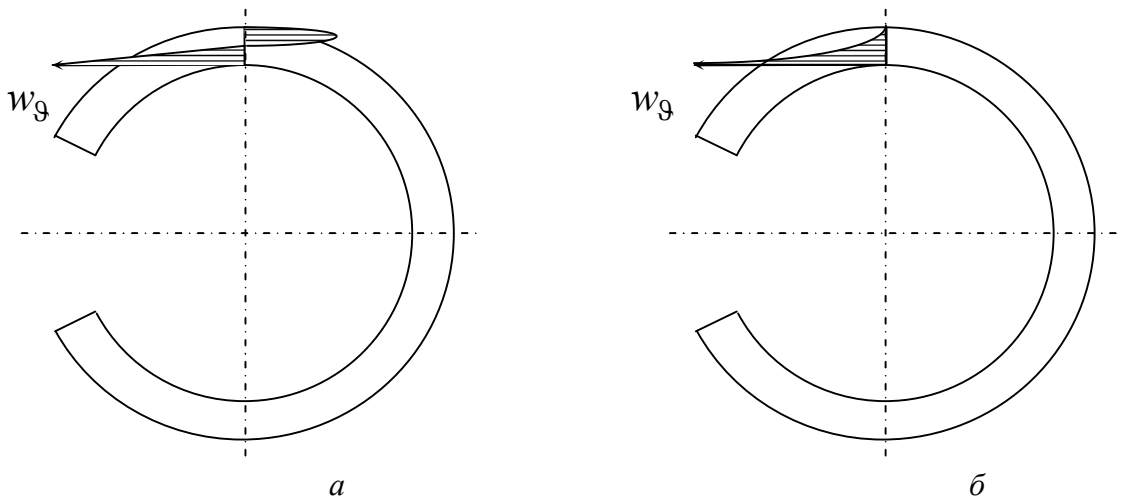


Рис. 3.4. Схеми руху ТпМ у поперечному перерізі С-подібних секцій двочерв'ячних екструдерів з різно- (а) та односпрямованим (б) обертанням черв'яків

Алгоритми розрахунку процесу черв'ячної екструзії розроблятимемо як послідовність алгоритмів розрахунку окремих процесів, що відбуваються в екструдері і які послідовно проходить виділений об'єм (кільцевий для одночерв'ячного екструдера і С-подібний для двочерв'ячного), рухаючись вздовж циліндра.

Розглянемо процес теплообміну у виділеному об'ємі (рис. 3.5).

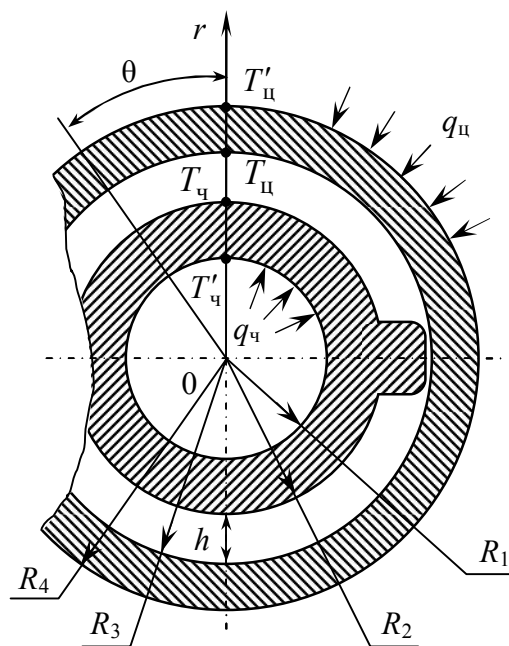


Рис. 3.5. Розрахункова схема виділеного об'єму:  $T'_ч$  і  $T_ч$  – температури поверхонь черв'яка з боку охолодної води і ТпМ;  $T'_ц$  і  $T_ц$  – температури поверхонь циліндра з боку охолодної води і ТпМ;  $R_1$  і  $R_2$  – радіуси осьового отвору черв'яка та його осердя;  $R_3$  і  $R_4$  – внутрішній і зовнішній радіуси циліндра;  $q_ч$  і  $q_ц$  – поверхневі густини теплових потоків від поверхонь черв'яка й циліндра

Екструдери в більшості випадків по їх довжині мають різний об'єм робочого каналу з метою забезпечення ущільнення матеріалу. Перші секції мають більший об'єм, а тому вони не повністю заповнені перероблюваного ТпМ, що забезпечується дозованим живленням. У двочерв'ячних екструдерах, наприклад, зменшення об'єму секцій зазвичай досягають трьома основними способами: зменшенням кроку нарізки, застосуванням конічних черв'яків або збільшенням ширини гребенів нарізки [24, 118]. Таким чином, розрахунок продуктивності екструдера потрібно здійснювати за розмірами останнього витка черв'яка (черв'яків).

Як показали дослідження [118, 291–293], незалежно від ступеня заповнення каналу черв'яків двочерв'ячного екструдера плавлення полімеру починається при досягненні ним координати, де температура стінки циліндра стає рівною температурі плавлення. При цьому плавлення відбувається як біля поверхні циліндра, так і в проміжках між черв'яками, а тому розплав швидко заповнює проміжки між гранулами і на ділянці, що дорівнює  $0,5 \dots 1,0$  кроку нарізки, полімер монолітизується і переходить до в'язкоплинного стану. Розплав заповнює проміжки між нерозплавленими частинками і в ньому виникають деформації зсуву. Валковий проміжок між осердями і гребенями черв'яків сприяє перемішуванню розплаву й нерозплавлених частинок, а тому в екструдері майже відсутня явно виражена зона плавлення, в якій розплав і твердий полімер рухаються окремо, як це має місце в одночерв'ячних екструдерах.

Тому при розробці алгоритму розрахунку вважатимемо, що на всій довжині екструдера ТпМ являє собою суцільне реологічно складне середовище з дисипативними тепловиділеннями в усьому його об'ємі.

Як видно з рис. 3.5, характер циркуляційного руху в напрямі координати  $\vartheta$  за виключенням відносно невеликих зон в області валкового проміжку приблизно однаковий, а тому похідними по координаті  $\vartheta$  у рівнянні (3.1) можна знехтувати. Крім того, оскільки в межах виділеного об'єму його розмір у напрямі осі  $z$  значно більший за глибину каналу  $h$ , теплопровідністю в напрямі цієї координати також можна знехтувати. Із врахуванням цих спрощень рівняння (3.1), як і випадку одночерв'ячної екструзії, набуває вигляду (3.2).

Перенесення енергії крізь стінки черв'яка й циліндра описується рівнянням стаціонарної теплопровідності [24]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (3.4)$$

Крайові умови для розв'язання рівнянь (3.2) і (3.4) мають вигляд:

$$T|_{L=0} = T_0; \quad (3.5)$$

$$-\lambda_{\text{ч}} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_1} = q_{\text{ч}}; \quad (3.6)$$

$$T_{\text{ТпМ}}|_{r=R_2} = T_{\text{ч}}|_{r=R_2}; \quad -\lambda_{\text{ТпМ екв}} \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_2} = -\lambda_{\text{ч}} \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_2} = q_{\text{ч}}; \quad (3.7)$$

$$T_{\text{ТпМ}}|_{r=R_3} = T_{\text{ц}}|_{r=R_3}; \quad -\lambda_{\text{ТпМ екв}} \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_3} = -\lambda_{\text{ц}} \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_3} = q_{\text{ц}}; \quad (3.8)$$

$$-\lambda_{\text{ц}} \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_4} = q_{\text{ц}}, \quad (3.9)$$

де  $T_0$  – початкова температура ТпМ;  $\lambda_{\text{ч}}$  і  $\lambda_{\text{ц}}$  – теплопровідність матеріалу стінок черв'яка й циліндра.

Величини поверхневих густин теплових потоків  $q_{\text{ч}}$  і  $q_{\text{ц}}$  визначають за значеннями коефіцієнтів тепловіддачі в разі рідинного (парового) обігріву [276] або за потужністю нагрівників в разі електрообігріву.

Система рівнянь (3.2) і (3.4)–(3.9) описує процес теплообміну в черв'ячному екструдері (при цьому рівняння (3.2) і (3.4) є окремими випадками рівнянням загального виду (2.13)), що дає можливість застосовувати її під час розробки математичних моделей процесів окремих функціональних зон (подавання, плавлення й гомогенізації), на основі яких розроблено алгоритми і програми розрахунку одно- і двочерв'ячних екструдерів [24, 294–297].

До рівняння збереження енергії (3.2) входить об'ємна густина теплового потоку внутрішніх джерел енергії  $q_V$ , яка враховує об'ємну густина теплового потоку перетворень  $q_{\text{пер}}$  та об'ємну густина теплового потоку енергії дисипації  $q_{\text{дис}}$ . У разі наявності в об'ємі перероблюваного ТпМ хімічних, фазових та інших перетворень для визначення температури  $T$  необхідно застосувати умовну температуру  $T_{\text{ум}}$ , обчислювану за залежністю (2.7). Друга складова величини  $q_V$ , а саме інтенсивність енергії дисипації  $q_{\text{дис}}$ , притаманна переробці реологічно складних середовищ, до яких належать і ТпМ з використанням вторинної сировини, а тому зупинимося на її аналізі докладніше.

У працях [102, 118, 291, 292 та ін.] зроблені спроби розв'язання системи рівнянь гідродинаміки з тим чи іншим ступенем точності, які пояснюють характер течії і дають можливість визначити швидкісні поля на окремих ділянках виділеного об'єму, проте складність процесу екструзії утруднює використання цих розв'язків для його розрахунків, особливо двочерв'ячної екструзії, оскільки досить складно об'єднати в одне ціле математичні розв'язки течії розплаву в С-подібному об'ємі, міжвалковому та інших проміжках. З іншого боку, за наявності такої інформації необхідно було б розв'язувати рівняння збереження енергії в тривимірній постановці і з врахуванням циркуляційних конвективних потоків у виділеному об'ємі. Проте з точки зору практичного застосування доцільність такого ускладнення досить сумнівна. Дійсно, в теорії екструзії існує велика кількість праць, у яких процес одно- і двочерв'ячної екструзії описується як спрощеними, так і ускладненими математичними моделями, але в обох випадках переважна більшість авторів відзначає узгодження з

достатньою для інженерних розрахунків точністю теоретичних і експериментальних результатів. Це свідчить про те, що прості моделі, які є елементами більш складних, з достатньою точністю описують процес екструзії. Аналіз швидкісних полів на основі ускладнених моделей дає можливість оцінювати процеси перемішування в екструдері, але для розрахунку рівняння збереження енергії мають значення не самі швидкості, а швидкості їх зміни в об'ємі, зв'язані з дисипативними тепловиділеннями. Розв'язання рівнянь гідродинаміки у випадку двочерв'ячних екструдерів ускладнюється ще й тим, що канали черв'яків у своїй більшості не повністю заповнені матеріалом, а тому досить проблематичним є формулювання граничних умов і визначення градієнтів тиску. Крім того, у двочерв'ячних екструдерах великої продуктивності, якими комплектують технологічні лінії з виробництва відповідальної продукції, комплекти черв'яків виконують з максимально можливим зачепленням черв'яків (при цьому мінімізують об'єм проміжків між гребенями одного і осердя іншого черв'яка, між бічними поверхнями гребенів, а також між гребенями витків черв'яків і стінкою циліндра), оскільки саме такі екструдери забезпечують стабільну продуктивність, яка майже не залежить від коливань і пульсацій тиску [24, 118].

Розглянемо докладніше вплив процесів у проміжках на процес екструзії взагалі. У праці [298] наведені результати експериментальних досліджень впливу проміжку між стінкою циліндра й поверхнею гребеня витка черв'яка для одночерв'ячного екструдера. Величину проміжку змінювали від 0,06 до 0,75 мм. Результати досліджень показали, що його вплив значно менший від теоретично прогнозованого. Пояснити це можна таким чином. Припустимо, що діаметр циліндра зменшився на величину цього проміжку. Тоді в рівняння для визначення продуктивності потрібно підставити зменшену на величину проміжку глибину нарізки  $i$ , відповідно, одержимо зменшене значення продуктивності. Але поверхня гребеня витка має осьову складову швидкості, спрямовану в напрямі формувальної головки, а отже розплав, що міститься в кільцевому проміжку між гребенем витка черв'яка й циліндром, також буде рухатиметься в тому самому напрямі під дією цієї складової, збільшуючи тим самим продуктивність, визначену для зменшеної на величину проміжку глибини нарізки.

Оцінимо продуктивність, спричинену лише наявністю градієнта тиску, крізь проміжок, величина якого менше міліметра. Розрахунки показують, що ця продуктивність дуже мала порівняно з продуктивністю екструдера, оскільки для продавлювання розплаву крізь такий проміжок, враховуючи високу в'язкість перероблюваного матеріалу, необхідне створення великого градієнта тиску, який у реальних умовах не реалізується. Отже, наявність реального градієнта тиску дуже мало впливає на профіль швидкості в зазначеному проміжку й тому течію можна розглядати як течію між нерухомою й рухомою повер-

хнями і градієнтом тиску при цьому знехтувати.

Розглянемо тепер умови теплообміну в проміжку між поверхнею гребеня витка і стінкою циліндра. Оскільки величина проміжку мала, то в ньому виникають значні швидкості деформації і, відповідно, дисипативні тепловиділення. Але об'єм ТпМ у проміжку набагато менший від об'єму ТпМ у каналі черв'яка. У теоретичних працях не враховується той факт, що ТпМ у проміжку контактує зі стінкою циліндра, товщина якої значно перевищує величину проміжку, а теплопровідність на два порядки більша за теплопровідність розплаву. Отже, енергія дисипації в проміжку відводиться стінкою циліндра і залежно від заданого значення температури цієї стінки віддається нею або розплаву за межами проміжку (в об'єм каналу черв'яка), або охолодному циліндру середовищу. Таким чином, у граничних умовах задачі теплообміну у виділеному об'ємі значення теплового потоку від стінки циліндра слід розглядати як суму теплового потоку зовнішньої термостабілізації та теплового потоку дисипації в проміжку, яка внаслідок високої теплопровідності передається циліндром.

Проаналізуємо вплив  $q_{\text{дис}}$  на параметри процесу двочерв'ячної екструзії для ньютонівської моделі рідини.

Гвинтовий канал двочерв'ячного екструдера розбивається на ряд ізольованих С-подібних секцій (рис. 3.3,в), довжина яких менша від довжини одного розгорнутого витка (перетоками крізь проміжки знехтуємо). Отже, за один оберт черв'яків у формувальну головку незалежно від її опору потрапляє два С-подібних об'єми, що забезпечує практичну рівність тривалості перебування матеріалу в екструдері. Залежності, що описують гідродинаміку течії розплаву, можуть мати різний вигляд залежно від граничних умов, які задають для розв'язання рівнянь руху. Якщо для визначення інтегральних величин це особливого значення не має, то для теплових розрахунків із врахуванням теплообміну зі стінками циліндра і черв'яка та розрахунком температурних полів суттєве значення має інтенсивність дисипації  $q_{\text{дис}}$ , а також її розподіл в об'ємі.

Розглянемо й порівняємо гідродинаміку розплаву в С-подібному ізольованому об'ємі, нехтуючи при цьому потоками перетікання через гребені черв'яків і крізь валковий проміжок, для трьох моделей: плоскопаралельної оберненої (черв'як нерухомий, обертається циліндр), плоскопаралельної (циліндр нерухомий, обертається черв'як) і пластинчасто-рамкової («розгорнуті» на площину гребені та осердя черв'яків, а також циліндр екструдера утворюють певну сукупність «пластин» і «раму» [102]). Процес при цьому розглядатимемо в декартовій прямокутній системі координат, вісь  $x$  якої спрямована перпендикулярно гребеню нарізки, вісь  $y$  – по висоті каналу, а вісь  $z$  – вздовж каналу черв'яка.

Тоді для нестисливої ньютонівської рідини рівняння руху матимуть вигляд:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{\text{тпм}} \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} = 0; \quad (3.10)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu_{\text{тпм}} \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} = 0. \quad (3.11)$$

Оскільки С-подібний об'єм замкнений, то сумарні витрати в напрямках  $x$  і  $z$  дорівнюють нулю і тому рівняння нерозривності набувають вигляду:

$$\int_0^h w_x dy = 0; \quad (3.12)$$

$$\int_0^h w_z dy = 0. \quad (3.13)$$

Вигляд функцій, що є розв'язком системи рівнянь (3.10)–(3.13), залежить від граничних умов, які для зазначених моделей можуть бути задані таким чином:

– плоскопаралельна обернена модель:

$$w_x|_{y=0} = 0, \quad w_z|_{y=0} = 0; \quad (3.14)$$

$$w_x|_{y=h} = W_x, \quad w_z|_{y=h} = W_z; \quad (3.15)$$

– плоскопаралельна модель:

$$w_x|_{y=0} = W_x, \quad w_z|_{y=0} = W_z; \quad (3.16)$$

$$w_x|_{y=h} = 0, \quad w_z|_{y=h} = 0; \quad (3.17)$$

– пластинчасто-рамкова модель:

$$w_x|_{y=0} = 0, \quad w_z|_{y=0} = W_s = W_L / \sin \varphi_{\text{ч}}; \quad (3.18)$$

$$w_x|_{y=h} = W_L \cos \varphi_{\text{ц}}, \quad w_z|_{y=h} = W_L \sin \varphi_{\text{ц}}, \quad (3.19)$$

де  $W_L = sn$  – швидкість руху С-подібного об'єму вздовж осі черв'яка (за один оберт об'єм переміщується на відстань, що дорівнює кроку нарізки);

$W_s$  – швидкість руху черв'яка відносно С-подібного об'єму;

$\varphi_{\text{ч}}$  і  $\varphi_{\text{ц}}$  – кут підйому гвинтової нарізки черв'яка біля осердя й вершини гребеня черв'яка, відповідно.

Розв'язання рівнянь (3.10)–(3.13) за граничних умов (3.14) і (3.15) дає такі вирази для складових швидкості  $w_x$  і  $w_z$ :

$$w_x = W_x \left( \frac{3y^2}{h^2} - \frac{2y}{h} \right), \quad (3.20)$$

$$w_z = W_z \left( \frac{3y^2}{h^2} - \frac{2y}{h} \right). \quad (3.21)$$

Одержані розв'язки наводяться в багатьох працях з теорії одно-

черв'ячної екструзії [102, 103, 116–118, 173, 174, 176, 179 та ін.], причому рівняння (3.21) записане для умови закритого виходу екструдера, коли продуктивність дорівнює нулю. У цьому разі С-подібну секцію двочерв'ячного екструдера можна розглядати як одночерв'ячний екструдер із закритим виходом, довжина якого дорівнює одному кроку нарізки. Проте при розв'язанні задачі теплообміну зі стінкою циліндра використання рівнянь (3.20) і (3.21) для розрахунку  $q_V$  може призвести до суттєвих похибок, оскільки в дійсності обертається черв'як, а не циліндр.

Складові швидкості на стінці циліндра визначають за рівняннями

$$W_x = W_{\text{ч}} \sin \varphi_{\text{ч}} = \pi D n_{\text{ч}} \sin \varphi_{\text{ч}} \quad \text{і} \quad W_z = W_{\text{ч}} \cos \varphi_{\text{ч}} = \pi D n_{\text{ч}} \cos \varphi_{\text{ч}}.$$

Диференціювання рівнянь (3.20) і (3.21) дає такі вирази для визначення швидкості деформації:

$$\dot{\gamma}_x = \frac{\partial w_x}{\partial y} = W_x \left( \frac{6y}{h^2} - \frac{2}{h} \right), \quad (3.22)$$

$$\dot{\gamma}_z = \frac{\partial w_z}{\partial y} = W_z \left( \frac{6y}{h^2} - \frac{2}{h} \right). \quad (3.23)$$

Розглянемо тепер випадок, коли циліндр нерухомий, а обертається черв'як, тобто мають місце граничні умови (3.16) і (3.17). У результаті розв'язання рівнянь (3.10)–(3.13) за цих умов одержимо вирази для складових швидкості:

$$w_x = W_x \left( 1 - \frac{4y}{h} + \frac{3y^2}{h^2} \right);$$

$$w_z = W_z \left( 1 - \frac{4y}{h} + \frac{3y^2}{h^2} \right).$$

Тоді компоненти швидкості деформації дорівнюватимуть:

$$\dot{\gamma}_x = \frac{\partial w_x}{\partial y} = \frac{2W_x}{h} \left( \frac{3y}{h} - 2 \right), \quad (3.24)$$

$$\dot{\gamma}_z = \frac{\partial w_z}{\partial y} = \frac{2W_z}{h} \left( \frac{3y}{h} - 2 \right). \quad (3.25)$$

Розв'язання рівнянь (3.10)–(3.13) за граничних умов (3.18) і (3.19) для пластинчасто-рамкової моделі дає так вирази для складових швидкості [102]:

$$w_x = W_L \cos \varphi_{\text{ч}} \left( \frac{3y^2}{h^2} - \frac{2y}{h} \right),$$

$$w_z = W_L \sin \varphi_{\text{ч}} \left( \frac{3y^2}{h^2} - \frac{2y}{h} \right) + W_s \left( 1 - \frac{4y}{h} + \frac{3y^2}{h^2} \right).$$

Відповідно компоненти швидкості деформації дорівнюють:

$$\dot{\gamma}_x = \frac{\partial w_x}{\partial y} = \frac{W_L}{h} \cos \varphi_{\text{ц}} \left( \frac{6y}{h} - 2 \right), \quad (3.26)$$

$$\dot{\gamma}_z = \frac{\partial w_z}{\partial y} = \frac{W_L}{h} \sin \varphi_{\text{ц}} \left( \frac{6y}{h} - 2 \right) + \frac{W_s}{h} \left( -4 + \frac{6y}{h} \right). \quad (3.27)$$

На рис. 3.6 наведені криві зміни потужності дисипації, обчисленої за рівнянням

$$q_{\text{дис}} = \mu_{\text{ТПМ}}(\dot{\gamma}) (\dot{\gamma}_x^2 + \dot{\gamma}_z^2) \quad (3.28)$$

залежно від безрозмірної координати  $y/h$  для всіх трьох моделей відповідно до виразів (3.22)–(3.27) (розрахунки виконано для вторинного ПЕВТ, поведінка якого під навантаженням описується реологічним рівнянням  $\mu_{\text{ТПМ}}(\dot{\gamma}) = 7038 \dot{\gamma}^{-0,534} \exp[-0,00609(T - 120)]$ ).

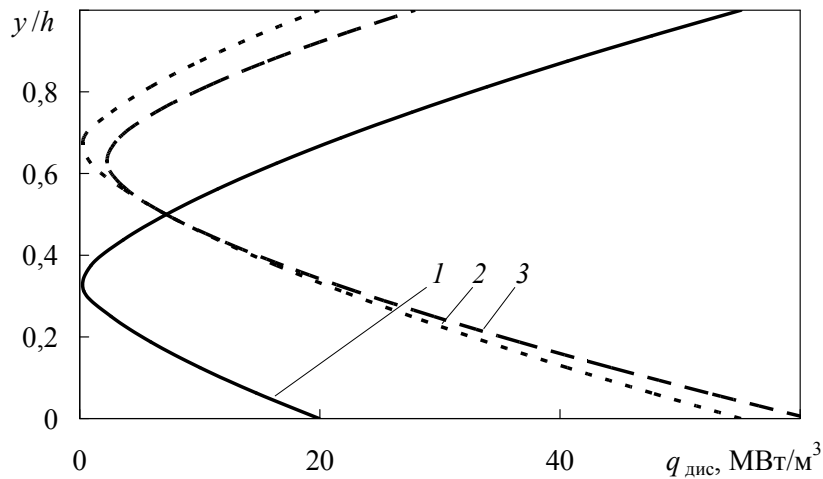


Рис. 3.6. Залежність потужності дисипації від безрозмірної координати  $y/h$  для моделей: 1 – плоскопаралельної оберненої; 2 – плоскопаралельної; 3 – пластинчасто-рамкової

Як видно з рис. 3.6, результати розрахунків достатньо близькі для пластинчасто-рамкової моделі й моделі з обертовим черв'яком, в яких максимальна інтенсивність дисипації спостерігається біля поверхні черв'яка, в той час як модель з обертовим циліндром визначає максимальну інтенсивність дисипації біля поверхні циліндра.

Автором проведено аналогічні дослідження [24, 294] також для неньютонівської моделі рідини, поведінку якої можна описати степеневим реологічним рівнянням (1.8).

На рис. 3.7 наведено обчислені для різних значень  $n$  профілі швидкості  $w_x$  у С-подібному об'ємі для плоскопаралельної моделі з обертовим черв'яком і нерухомим циліндром. З рис. 3.7 видно, що найбільш ефективною буде циркуляція розплаву при  $n=1$  (ньютонівська модель). Зі збільшенням відхилення рідини від ньютонівської поведінки циркуляція погіршується і в центрі об'єму

утворюється малорухоме ядро. Отже, для інтенсифікації змішування розплаву доцільним є установка в робочому каналі екструдера змішувальних елементів.

На рис. 3.8 наведено значення  $q_{\text{дис}}$  по безрозмірній висоті каналу  $y/h$  для різних значень  $n$  у випадку ізотермічного режиму. Видно, що інтенсивність дисипації по висоті каналу істотно змінюється, причому біля поверхні черв'яка вона максимальна. Таким чином, теоретичні розрахунки підтверджують доцільність термостабілізації черв'яка. Зі збільшенням відхилення поведінки рідини від ньютонівської нерівномірність дисипації в об'ємі збільшується.

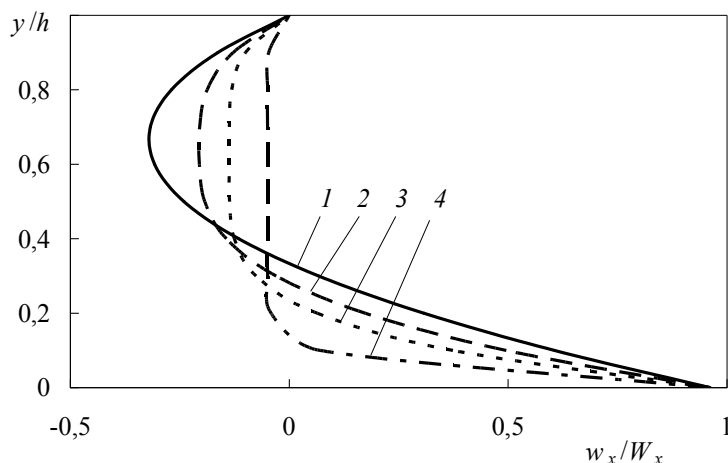


Рис. 3.7. Профілі безрозмірної швидкості  $w_x/W_x$  по висоті каналу для різних значень показника степеня реологічного рівняння  $n$ : 1 – 1; 2 – 0,5; 3 – 0,3; 4 – 0,1

Якщо розглядати загальні дисипативні енерговитрати, то відмінність моделей, що розглянуто, особливого значення не має і на середню температуру розплаву вона впливає неістотно. Але при врахуванні теплообміну зі стінкою циліндра ця відмінність набуває істотного значення. Отже, для визначення інтенсивності дисипації при розв'язанні моделі теплообміну приймаємо профілі швидкості, обчислені для моделі з обертовим черв'яком.

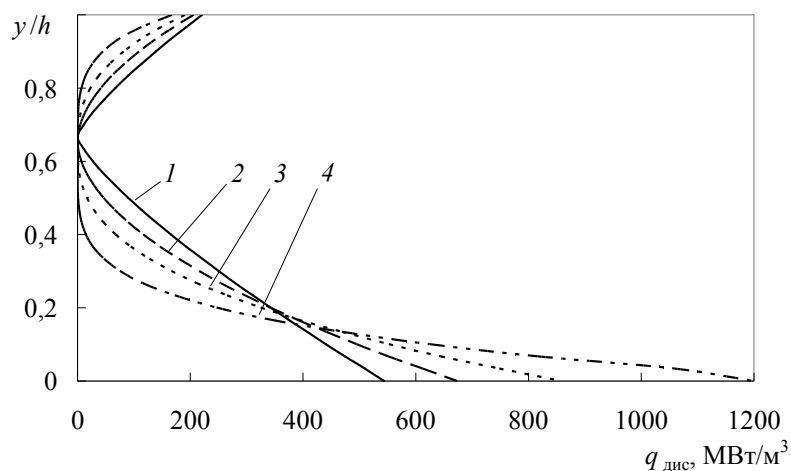


Рис. 3.8. Залежність  $q_{\text{дис}}$  від безрозмірної координати  $y/h$  для різних значень показника степеня реологічного рівняння  $n$ : 1 – 1; 2 – 0,7; 3 – 0,5; 4 – 0,3

### 3.2.2. Гідродинаміка і теплообмін у каналах змішувальних елементів двочерв'ячних екструдерів

Змішувальні конструктивні елементи черв'яків можуть мати різну геометричну форму й розміри, але для двочерв'ячних екструдерів найбільшого поширення набули кулачки овальної і трикутної форми, послідовно зміщені під певним кутом таким чином, що їх виступи імітують гвинтову нарізку, утворювану дискретними елементами. Рух ТпМ у таких елементах складний, швидкість змінюється у всіх напрямках і тому рівняння гідродинаміки і теплообміну слід було б розглядати у тривимірній постановці. При цьому виникають суттєві складнощі як під час формулювання граничних умов, так і умов стикування швидкісних і температурних полів при переході від одного елемента до іншого. Тому для інженерних розрахунків виникає необхідність у спрощенні рівнянь, яке не вносить суттєвих похибок у загальні результати розрахунку. Тобто потрібно спростити задачу таким чином, щоб загальний рівень дисипативних тепловиділень у каналі складної форми з достатньою для інженерних розрахунків точністю був таким самим, як і в еквівалентних каналах простої форми.

Розглянемо спочатку колову складову швидкості для кулачків найбільш поширеної трикутної та овальної форми (рис. 3.9).

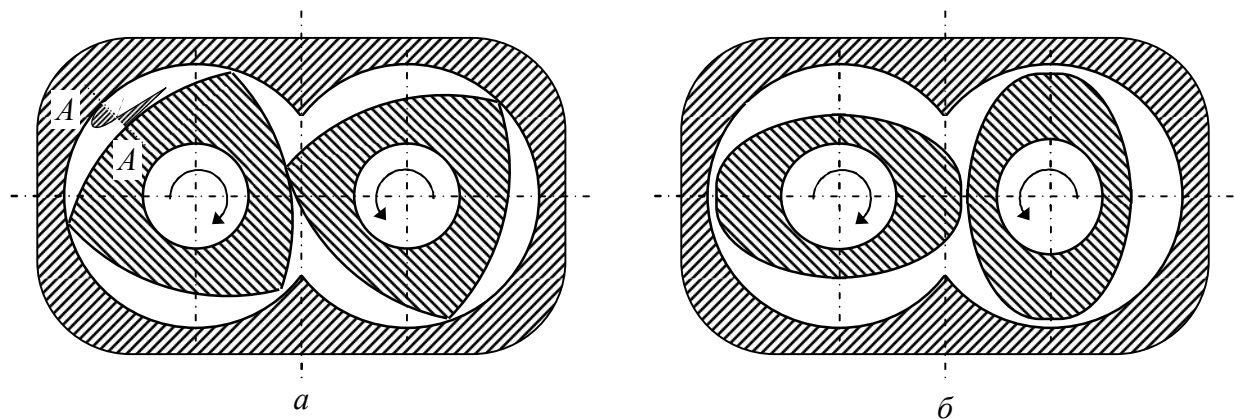


Рис. 3.9. Схема змішувальних кулачків трикутної (а) та овальної (б) форми

Поверхні кулачка й циліндра утворюють обертовий відносно нерухомого циліндра і змінної по колу висоти проміжок. В області зачеплення черв'яків потоки зустрічаються, що спричиняє виникнення циркуляції розплаву в коловому напрямі аналогічно тому, як це має місце в С-подібній секції (див. рис. 3.9).

Якщо зафіксувати в просторі переріз А-А (див. рис. 3.9), то в цьому перерізі має місце циклічна зміна профілю швидкості і, відповідно, швидкості деформації та інтенсивності дисипації внаслідок обертання кулачків, причому така зміна характерна для всіх перерізів за виключення відносно невеликої області зачеплення. Це дає можливість у рівнянні збереження енергії вважати потік умовно віссиметричним і не враховувати похідні по координаті  $\vartheta$ , а

зміну інтенсивності дисипації по висоті каналу обчислювати для усередненого в часі значення швидкості зсуву, яке можна визначити, якщо ввести еквівалентну висоту каналу  $h_{\text{екв}}$ .

Оскільки швидкість зсуву змінюється по висоті проміжку лінійно, то величину еквівалентного проміжку можна визначити за залежністю

$$h_{\text{екв}} = \frac{1}{\pi D} \left( \frac{\pi D^2}{4} - S_{\text{кул}} \right),$$

де  $S_{\text{кул}}$  – площа поверхні кулачка.

Змішувальні елементи тиск не створюють, а споживають, тобто рух ТпМ здійснюється під дією тиску, створюваного гвинтовою нарізкою черв'яків. Тому можна вважати, що об'єм проміжку повністю заповнений розплавом. Розрахунки показують, що швидкість переміщення розплаву в осьовому напрямі  $w_L$ , що входить до рівняння збереження енергії (3.2), на порядок менша від швидкості в тангенціальному напрямі, а тому вплив осьової складової швидкості на інтенсивність дисипації порівняно з тангенціальною значно менший і ним можна знехтувати при розрахунку потужності дисипації.

Таким чином, для розрахунку змішувальних елементів з достатньою для інженерних розрахунків точністю можна використати алгоритм розв'язання рівняння енергії для виділеного об'єму нарізки черв'яка, а об'ємну густину теплового потоку внутрішніх джерел обчислювати виходячи із швидкості зсуву, знайденої для еквівалентного проміжку. Такі припущення вносять певну похибку в розрахунки, але під час розрахунку процесу екструзії в цілому їх внесок у кінцеві результати знаходиться в межах, допустимих для інженерних розрахунків [289]. Це можна пояснити тим, що обчислюваний з цими спрощеннями рівень дисипативних тепловиділень у цілому відповідає дійсним швидкостям деформації.

Таким чином, розв'язання математичних моделей процесів, що відбуваються у виділеному об'ємі нарізки черв'яка послідовно розміщених функціональних зон і в каналах змішувальних елементів двочерв'ячного екструдера дає можливість визначити найбільш енергоефективні режими його експлуатації під час переробки певного виду термопластичного матеріалу з використанням вторинної сировини.

### **3.3. Моделювання одночерв'ячних екструдерів**

#### **3.3.1. Особливості моделювання функціональних зон**

Як зазначалося в підрозд. 3.1, у більшості праць з теорії одночерв'ячної екструзії основна увага приділяється дослідженню процесу переробки матеріалів на основі високомолекулярних сполук в окремих функціональних зонах традиційного екструдера: подавання, плавлення й гомогенізації (при цьому

прийняті в цих працях припущення істотно відрізняються від реального процесу переробки). Процесу же екструзії в цілому, як сукупності певних стадій переробки із взаємним зв'язком та їх взаємним впливом одна на одну, уваги майже не приділяється [186, 187, 228].

Особливого значення такий підхід має під час екструзії вторинної полімерної сировини у вигляді так званої «пушонки» (частинок у вигляді пластивців і лусочок, одержаних у результаті механічного або механотермічного руйнування полімерних відходів [23]), яка відрізняється значно більшим вільним об'ємом порівняно з традиційними гранулами первинного полімеру. У цьому разі навіть за умови максимального заповнення перероблюваною сировиною робочого каналу зони подавання наступні функціональні зони екструдера можуть працювати в «голодному» режимі, що призводить до пульсацій на виході з формувальної головки, а отже і одержання продукції низької якості.

Тому тільки така модель, що розглядає екструдер як єдине ціле, дає можливість ефективно проектувати або правильно вибирати екструзійне обладнання для переробки певного ТпМ з використанням вторинної сировини.

Однією з основних причин, що стримує розробку ефективної моделі одноступінчастої екструзії в цілому, є суттєві відмінності більшості існуючих математичних моделей процесів, що відбуваються в окремих функціональних зонах екструдера, між собою. У той же час, запропонована в підрозд. 3.2 модель переробки ТпМ у виділеному об'ємі одного витка нарізки черв'яка істотно полегшує питання розробки ефективного алгоритму розрахунку процесу екструзії в цілому.

На основі моделі гідродинаміки й теплообміну переробки ТпМ в об'ємі одного витка нарізки черв'яка розроблено методику розрахунку швидкісних і температурних полів перероблюваного ТпМ залежно від особливостей кожної з функціональних зон, основні параметри яких задаються у вигляді певних граничних умов [289, 290, 296, 297, 299–303].

Особливістю розробленої методики є те, що процес екструзії в цілому розглядається як послідовність станів, в яких перебуває ТпМ у виділеному об'ємі одного витка нарізки черв'яка залежно від умов на обмежувальних поверхнях цього витка: геометричних, швидкісних, температурних та ін. Зазначені умови змінюються в межах кожної функціональної зони екструдера, при цьому на границі їх стикування між собою кінцеві значення параметрів ТпМ на виході з однієї з цих зон є початковими значеннями відповідних параметрів для розрахунку наступної зони.

Оскільки об'єм окремого витка нарізки черв'яка достатньо малий порівняно з об'ємом матеріалу, що перебуває в екструдері, в межах об'єму витка ряд параметрів приймаємо незмінними. При цьому зміна зазначених параметрів здійснюється як на границі послідовно розміщених функціональних зон екструдера, так і в межах певної його функціональної зони. Таким чином, не-

перервна монотонна зміна параметрів по довжині екструдера замінюється послідовністю дискретних значень цих параметрів, що спрощує розрахункові залежності і в той же час забезпечує необхідну для інженерних розрахунків точність розрахунку [187] (при цьому в межах виділеного об'єму перероблюваного матеріалу залежно від його координати вздовж осі екструдера також має місце зміна певних параметрів, наприклад, швидкості ТпМ, швидкості його зсуву, температури по висоті каналу черв'яка).

Розрахункову схему одночерв'ячного екструдера наведено на рис. 3.10, а розрахунок за розробленою моделлю виділеного кільцевого об'єму можна проводити за узагальненими алгоритмами, наведеними у працях [186, 228].

У класичному одночерв'ячному екструдері виділяють три функціональних зони: подавання, плавлення й гомогенізації.

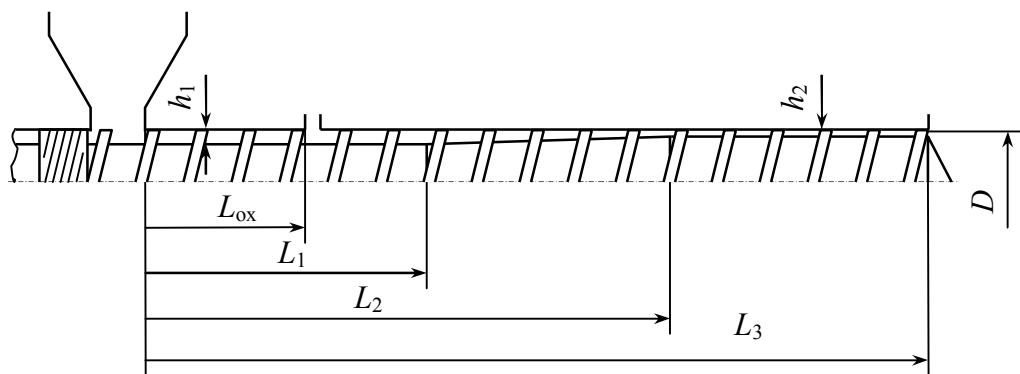


Рис. 3.10. Розрахункова схема одночерв'ячного екструдера:  $L_{ox}$  – координата кінця зони охолодження циліндра;  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  – координати кінця конструктивних зон черв'яка (початкової циліндричної, кінцевої й кінцевої циліндричної);  $h_1$ ,  $h_2$  – глибина каналу черв'яка в початковій циліндричній і кінцевій циліндричній зонах черв'яка

Особливістю зони подавання є те, що перероблюваний ТпМ перебуває в ній у твердому стані. Для генерування тиску вздовж черв'яка і стабільної роботи наступних зон екструдера зону подавання інтенсивно охолоджують. Оскільки охолодження робочих органів зазвичай здійснюють рідким теплоносієм, то в цьому випадку з боку поверхонь циліндра і черв'яка, протилежних робочому каналу, доцільно застосовувати граничні умови третього роду.

Як початкову умову приймаємо, що температура ТпМ дорівнює температурі  $T_n$  сировини, що надходить в екструдер ( $T_{|L=0} = T_n$ ). Крім того, для зони подавання приймаємо такі припущення: переміщення частинок ТпМ одна відносно одної відсутнє і ТпМ рухається як суцільне тверде тіло; має місце проковзування матеріалу по поверхнях черв'яка й циліндра з коефіцієнтами тертя  $f_ч$  і  $f_ц$ ; внутрішні джерела енергії відсутні ( $q_V = 0$ ).

Теплові потоки, що виділяються внаслідок тертя перероблюваного матеріалу об поверхні черв'яка й циліндра в зоні подавання, витрачаються як на нагрівання ТпМ, так і на нагрівання рідини, що охолоджує черв'як і циліндр (див.

рис. 3.5). При цьому граничні умови (3.7) і (3.8) набувають вигляду [297]:

$$\lambda_{\text{ТпМ}} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R_2} = \alpha_{\text{ч}} \left[ \left( T_{\text{ч}} + \frac{R_2 \alpha_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{ч}}} \ln \frac{R_2}{R_1} T_{\text{орч}} \right) \left( 1 + \frac{R_2 \alpha_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{ч}}} \ln \frac{R_2}{R_1} \right)^{-1} - T_{\text{орч}} \right] - q_{\text{ч}};$$

$$\lambda_{\text{ТпМ}} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R_3} = \alpha_{\text{ц}} \left[ \left( T_{\text{ц}} + \frac{R_4 \alpha_{\text{ц}}}{\lambda_{\text{ц}}} \ln \frac{R_4}{R_3} T_{\text{орц}} \right) \left( 1 + \frac{R_4 \alpha_{\text{ц}}}{\lambda_{\text{ц}}} \ln \frac{R_4}{R_3} \right)^{-1} - T_{\text{орц}} \right] - q_{\text{ц}},$$

де  $\alpha_{\text{ч}}$  і  $\alpha_{\text{ц}}$  – коефіцієнти тепловіддачі від стінок черв'яка й циліндра до охолодної рідини;  $T_{\text{орч}}$  і  $T_{\text{орц}}$  – температура охолодної рідини черв'яка й циліндра.

Теплові потоки на поверхнях черв'яка й циліндра визначаються за залежностями [297]:

$$q_{\text{ч}} = p K_p f_{\text{ч}} W_{\text{ч}}; \quad q_{\text{ц}} = p K_p f_{\text{ц}} W_{\text{ц}},$$

а тиск на довжині виділеного об'єму можна обчислити за формулою

$$p_i|_{z=s} = p_i|_{z=0} \exp \left\{ \frac{\pi D f_{\text{ц}} K_p \Delta L}{bh} \left[ \cos(\omega + \varphi_{\text{ч}}) - f_{\text{ч}} \sin(\omega + \varphi_{\text{ч}}) - \frac{f_{\text{ч}}}{f_{\text{ц}}} \left( 1 - \frac{2h}{D} \right) \right] \right\},$$

де  $p$  – тиск в осьовому напрямі;  $K_p$  – коефіцієнт бокового тиску;  $W_{\text{ц}}$  і  $W_{\text{ч}}$  – швидкості проковзування ТпМ відносно черв'яка й циліндра;  $\omega$  – кут між вектором сили тертя ТпМ об циліндр і вектором кутової швидкості черв'яка [297].

В основу моделі зони плавлення покладено модель [102, 190, 296], що передбачає плавлення полімеру на поверхнях тертя з подальшим утворенням і накопиченням шарів в'язкоплинного ТпМ біля цих поверхонь. Під час екструзії розплав ТпМ зрізується переднім (штовхальним) заплечиком гребеня витка та поступово оточує щільну «пробку» твердого ТпМ з трьох боків (рис. 3.11): біля поверхонь черв'яка й циліндра, а також з боку переднього заплечика гребеня витка (при цьому «пробка» твердого ТпМ притискається до заднього (затилкового) заплечика гребеня, наступного вздовж осі черв'яка).

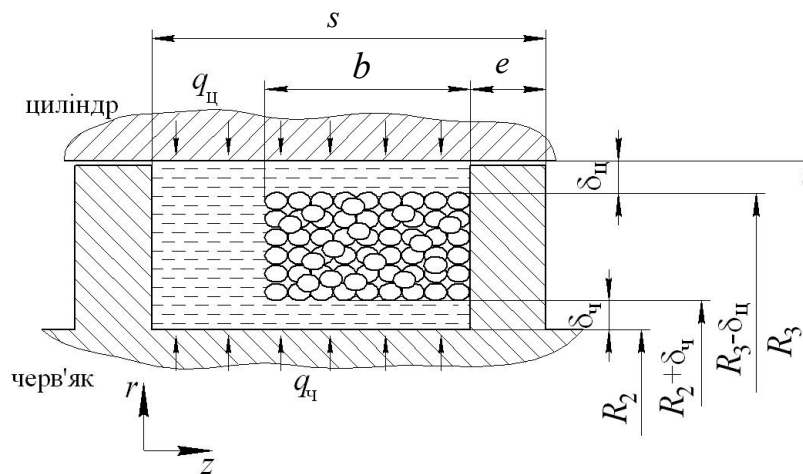


Рис. 3.11. Схема до розрахунку зони плавлення:  $b$  – ширина пробки твердого ТпМ;  $\delta_{\text{ч}}$  і  $\delta_{\text{ц}}$  – товщина плівки в'язкоплинного ТпМ біля поверхонь черв'яка й циліндра

За рахунок теплоти, що надходить від поверхонь в'язкоплинного ТпМ до твердого ТпМ, відбувається нагрівання і плавлення певної кількості твердого полімеру з підвищенням його ентальпії на величину  $(i_{\text{гє}} - i_{\text{аδ}})$ , де  $i_{\text{пл}}$  і  $i_{\text{вх}}$  – ентальпія за температури  $T_{\text{пл}}$  і  $T_{\text{вх}}$ , відповідно.

Температура ТпМ для областей в'язкоплинного і твердого ТпМ описується рівнянням (3.2) (при цьому в об'ємі твердого матеріалу  $q_V = 0$ ).

Крайові умови для області твердого ТпМ мають вигляд [296]:

$$T|_{L=L_1} = T_{\text{п}}; \quad T|_{z=(s-e)-b} = T_{\text{пл}}; \quad T|_{z=s-e} = T_{\text{пл}}; \\ T|_{r=R_2+\delta_{\text{ч}}} = T_{\text{пл}}; \quad T|_{r=R_3-\delta_{\text{ц}}} = T_{\text{пл}}.$$

Умови для області розплаву з боку штовхального заплечика гребеня витка:

$$T|_{L=L_1} = T_{\text{п}}; \quad T|_{z=0} = T_{\text{ч}}; \quad T|_{z=(s-e)-b} = T_{\text{пл}}; \\ T|_{r=R_2} = T_{\text{ч}}; \quad T|_{r=R_3} = T_{\text{ц}}.$$

Для шару в'язкоплинного ТпМ біля черв'яка можна записати:

$$-\lambda_{\text{ч}} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \mu_{\text{тпм}}|_{r=R_2} \left( \frac{V_{\text{ч}}}{\delta_{\text{ч}}} \right)^2; \\ T|_{r=R_2} = T_{\text{ч}}; \quad T|_{r=R_2+\delta_{\text{ч}}} = T_{\text{пл}}.$$

Для шару в'язкоплинного ТпМ біля циліндра:

$$-\lambda_{\text{ц}} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \mu_{\text{тпм}}|_{r=R_3} \left( \frac{V_{\text{ц}}}{\delta_{\text{ц}}} \right)^2; \\ T|_{r=R_3-\delta_{\text{ц}}} = T_{\text{пл}}; \quad T|_{r=R_3} = T_{\text{ц}}.$$

Для зони подавання прийнято такі припущення: область твердого ТпМ являє собою суцільне тіло; твердий ТпМ оточено шаром розплаву завтовшки  $\delta_{\text{ч}}$  і  $\delta_{\text{ц}}$  біля поверхонь черв'яка й циліндра; у шарі в'язкоплинного ТпМ має місце дисипація енергії; в об'ємі твердого ТпМ внутрішні джерела енергії відсутні; область твердого ТпМ у перетині має форму правильного прямокутника; температура на межі області твердого ТпМ дорівнює температурі плавлення полімеру; глибина каналу вважається постійною в межах одного кроку нарізки черв'яка і змінюється східчасто по його довжині; швидкість у плівках розплаву змінюється лінійно.

Обчислення поля температури в зоні плавлення дає можливість при моделюванні екструдера здійснювати перехід від зони плавлення до зони гомогенізації: вважаємо, що зазначений перехід має місце, коли частка розплаву складає понад 90 % загальної маси полімеру в об'ємі витка (при цьому поздовжня координата становить  $L_2^*$ ).

Для розв'язання рівнянь (3.2) і (3.4) у зоні гомогенізації сформульовано граничні умови другого роду: відомі теплові потоки на поверхні

черв'яка  $q_{\text{ч}}$  і циліндра  $q_{\text{ц}}$ , які у випадку електричного обігріву визначають через потужність нагрівників, а у випадку рідинної термостабілізації – через коефіцієнти тепловіддачі й температуру рідини.

Крайові умови в зоні гомогенізації:

$$\begin{aligned} T|_{L=L_2^*} &= T_{\text{п}}; & T|_{z=0} &= T_{\text{ч}}; & T|_{z=s-e} &= T_{\text{ч}}; \\ -\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_1} &= q_{\text{ч}}; & -\lambda_{\text{тпм}} \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_2} &= -\lambda_{\text{ч}} \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_2} &= q_{\text{ч}}; \\ -\lambda_{\text{тпм}} \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_3} &= -\lambda_{\text{ц}} \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_3} &= q_{\text{ц}}; & -\lambda_{\text{ц}} \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_4} &= q_{\text{ц}}. \end{aligned}$$

Початкова умова означає, що поле температури, розраховане для останнього кроку зони плавлення, є початковим для зони гомогенізації.

Рівняння (3.2) разом з крайовими умовами (3.5–3.9) і функціями, які враховують залежність теплофізичних властивостей полімеру від температури, описують процес теплообміну. Рівняння (3.2) є двовимірним квазілінійним рівнянням параболічного типу по координаті  $L$ . Розв'язання здійснене методом скінченних різниць із застосуванням схеми розщеплення, відповідно до якої двовимірна задача перетворюється на послідовність одновимірних (по кожній з просторових координат) [24, 203]. Основою побудови такої схеми є перехід від  $n$ -го до  $(n+1)$ -го кроку по  $L$  розбиттям цього кроку на два етапи. На першому з них похідна по  $r$  апроксимується неявно для кроку  $n+1$ , а похідна по  $z$  апроксимується явно для  $n$ -го кроку, температури для якого відомі. Рівняння (3.2) перетворюється на систему алгебраїчних рівнянь із тридіагональною матрицею. На наступному етапі неявно апроксимуємо похідну по  $z$ , а для похідної по  $r$  використовуємо значення температури, обчислені на попередньому етапі. Для розв'язання систем рівнянь з тридіагональною матрицею використовуємо алгоритм методу прогонки.

Під час прогонки по координаті  $r$  ( $i = \overline{1, n}$ ) використовуються значення температури  $(j-1)$ ,  $j$  та  $(j+1)$  попереднього  $n$ -го кроку по  $L$  ( $j = \overline{1, m}$ ). Відповідно прогонка по координаті  $z$ , здійснюється з використанням обчислених при прогонці по  $r$  значень температури в точках  $(i-1)$ ,  $i$  та  $(i+1)$  [203, 296].

### 3.3.2. Числове моделювання одночерв'ячних екструдерів

Екструзійна переробка вторинних полімерів зазвичай передбачає застосування певних цільових домішок, наприклад, стабілізаторів, антиоксидантів, агентів сумісності вторинних і первинних полімерів, барвників та ін., рівномірний розподіл яких у ТпМ забезпечується його інтенсивним перемішуванням. Перемішування супроводжується дисипацією енергії, що сприяє підвищенню температури перероблюваного ТпМ і може призвести до деструкції термомеханолабільних компонентів і погіршенню якості одержуваної продукції. Сис-

тема охолодження корпусу, з одного боку сприяє відведенню теплоти від ТпМ, а з іншого призводить до інтенсифікації дисипативної складової енергетичного балансу екструдера. Так, наприклад, зменшення температури поліпропілену (Армлен ПП-СВ 30-1) на 30 °С (від 230 до 200 °С) за інших однакових умов призводить до підвищення потужності дисипації у 2,4 рази, а зменшення температури поліаміду на 20 °С (від 180 до 160 °С) – у 2,8 рази. Оскільки теплопровідність ТпМ невелика, то система охолодження екструдера змінює температуру матеріалу переважно в пристінному шарі, а в об'ємі перероблюваного ТпМ його температура визначається інтенсивністю дисипації. При цьому числове моделювання екструдера дає можливість здійснювати обґрунтований вибір режимів переробки термомеханолабільних ТпМ з використанням вторинної сировини.

З метою перевірки адекватності розробленої математичної моделі екструзії проведені числові та експериментальні дослідження процесу переробки поширених марок поліолефінів і стиропластів на екструдері ЧП 63×32 з тризонним черв'яком.

Геометрія черв'яка досліджуваного екструдера (див. рис. 3.10):  $D=63$  мм,  $L_{\text{ох}}=320$  мм ( $15D$ ),  $L_1=440$  мм ( $7D$ ),  $L_2=1385$  мм ( $22D$ ),  $L_3=2015$  мм ( $32D$ ),  $h_1=9$  мм,  $h_2=4$  мм. Місця розміщення термопар (від завантажувальної горловини):  $l_1=500$  мм ( $8D$ ),  $l_2=880$  мм ( $14D$ ),  $l_3=1450$  мм ( $23D$ ),  $l_4=1750$  мм ( $28D$ ).

У процесі роботи відпрацьовували технологічні режими, за яких забезпечується задовільна якість продукції, зокрема листів (табл. 3.1).

Аналіз кількості теплоти, яку потрібно підводити/відводити для забезпечення заданої температури на стінці циліндра екструдера, показує (рис. 3.12), що черв'як заданої геометрії найбільш придатний для переробки поліпропілену, оскільки потребує найменших витрат енергії системи термостатування.

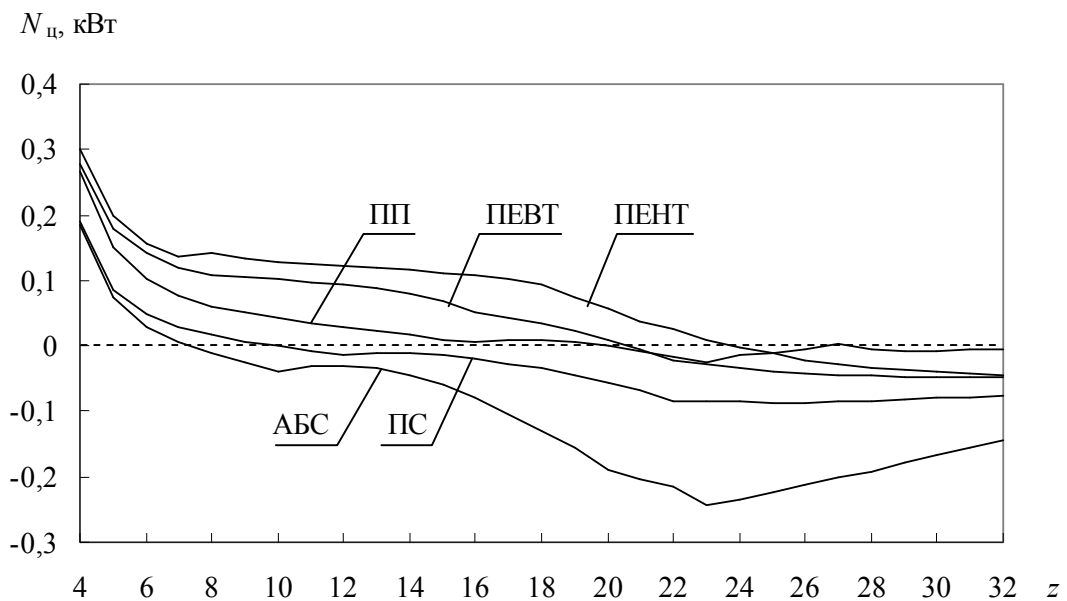


Рис. 3.12. Теплота, яку необхідно підвести або відвести від циліндра по його довжині

Таблиця 3.1

## Результати експериментальних досліджень екструдера ЧП 63×32

Матеріал	Температури, °С						Товщина листа, мм	Масова продуктивність, кг/год	Частота обертання черв'яка, об/хв
	екструдер*				перехідних	голівка**			
	1 (8D)	2 (14D)	3 (23D)	4 (28D)					
ABS (білий)	<u>170</u> 170	<u>185</u> 205	<u>170</u> 180	<u>187</u> 187	195	210	3,0	79	72
ABS Samsung Starex	<u>180</u> 140	<u>175</u> 195	<u>140</u> 150	<u>175</u> 175	200	200	2,2	70	64,8
ПС АТОFINA	<u>120</u> 140	<u>150</u> 195	<u>165</u> 175	<u>187</u> 190	195	195	2,0	80	96
ПС DOKI 472 EZ020212	<u>90</u> 130	<u>157</u> 180	<u>177</u> 180	<u>215</u> 215	215	217	0,7	65	59
ПС STYRON 678E	<u>176</u> 186	<u>188</u> 190	<u>195</u> 195	<u>206</u> 206	206	206	0,4	43	32,4
ПП LIPOL A4-71K	<u>165</u> 165	<u>190</u> 210	<u>200</u> 200	<u>215</u> 215	225	225	2,0	75	111
ПП LIPOL A5-71K	<u>110</u> 170	<u>140</u> 195	<u>175</u> 180	<u>234</u> 234	240	235	2,5	50	111
ПЕНТ 276-73	<u>130</u> 140	<u>175</u> 175	<u>200</u> 200	<u>190</u> 190	190	190	1,0	95	118
ПЕНТ 276-73	<u>110</u> 160	<u>163</u> 175	<u>200</u> 203	<u>232</u> 232	232	232	2,0	86	82
ПЕВТ 10204-003	<u>140</u> 145	<u>175</u> 160	<u>190</u> 200	<u>200</u> 205	200	200	3,4	100	115
ПЕВТ 15803-020	<u>83</u> 95	<u>120</u> 125	<u>130</u> 130	<u>165</u> 145	185	185	1,5	81	65

\* У чисельнику вказана задана температура, а в знаменнику – дійсна за усталеного процесу екструзії.

\*\* Значення середньої температури (за показаннями шести термопар).

Потрібно відзначити, що для всіх досліджених матеріалів на останніх витках черв'яка процес переробки відбувається більш стабільно і витрати енергії прямують до нуля, що можна пояснити зменшенням дисипативної складової в повністю розплавленому і прогрітому матеріалі. Результати експерименту (див. табл. 3.1) показують, що різниця між заданою та дійсною температурою в зоні гомогенізації також найменша.

Суттєвий перегрів стиропластів можна пояснити значними дисипатив-

ними виділеннями теплоти (див. рис. 3.12). Отже для ефективної переробки цих матеріалів доцільно використовувати екструдери з меншою відносною довжиною черв'яка.

Швидкий прогрів стиропластів доводять і результати обчислення середньої температури перероблюваних ТпМ і відносної ширини (у частках ширини нарізки черв'яка) пробки твердого матеріалу (рис. 3.13 і 3.14).

Розрахункові значення масової продуктивності екструдера ЧП 63×32 від частоти обертання черв'яка (рис. 3.15) показують задовільну збіжність з результатами експерименту (див. табл. 3.1).

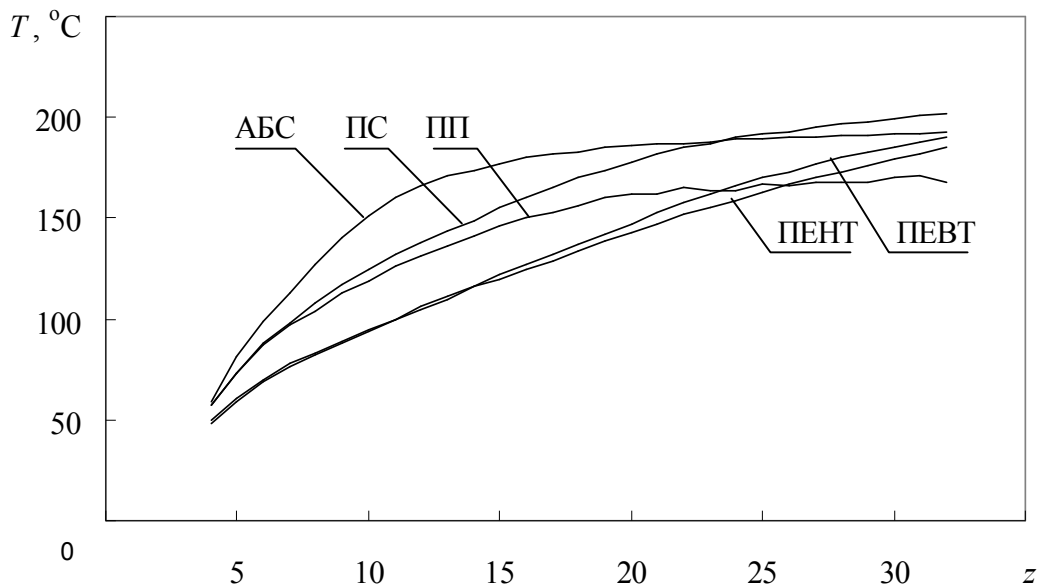


Рис. 3.13. Залежність середньої температури ТпМ вздовж екструдера

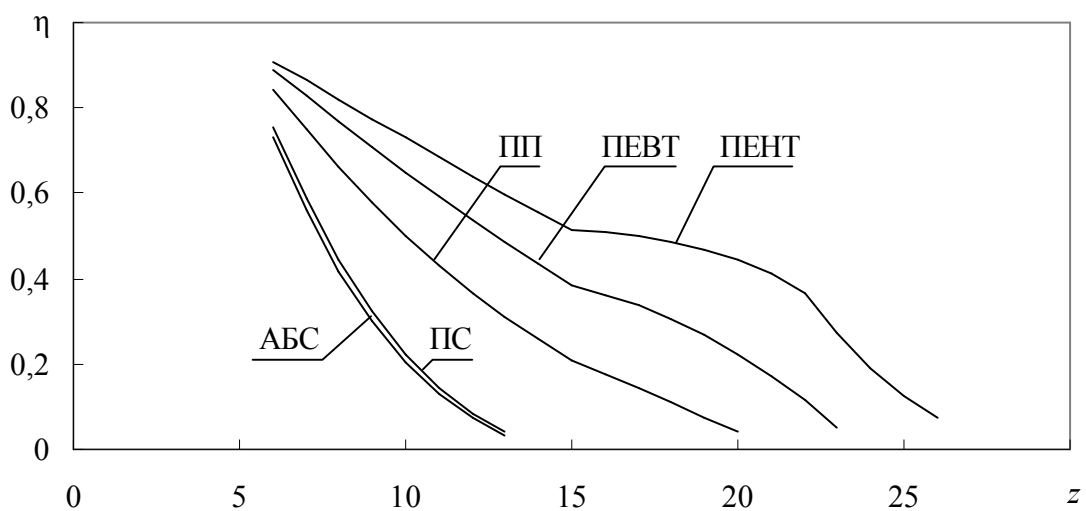


Рис. 3.14. Залежність ширини пробки твердого ТпМ вздовж екструдера

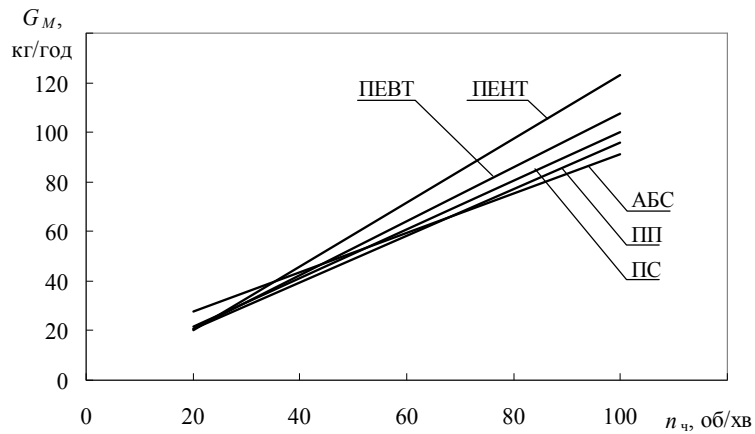


Рис. 3.15. Залежність масової продуктивності екструдера від частоти обертання черв'яка під час переробки різних ТпМ

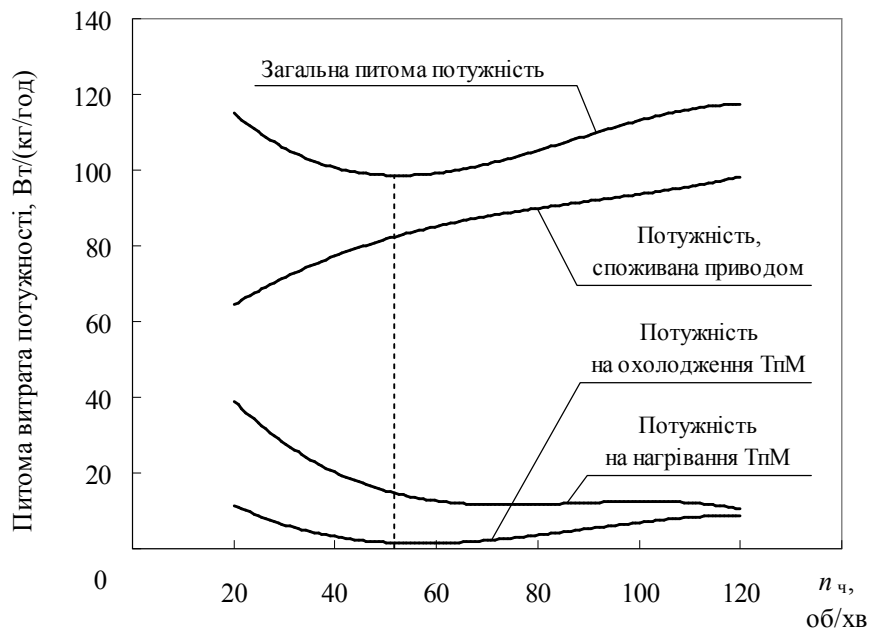


Рис. 3.16. Залежність питомої потужності під час переробки поліпропілену

Проведений розрахунок енерговитрат під час переробки поліпропілену для різної частоти обертання черв'яка (рис. 3.16, 3.17) дає можливість визначити раціональні режими роботи даного екструдера. Так, для даного черв'яка мінімальні енерговитрати відповідають частоті обертання черв'яка 52 об/хв.

Аналіз результатів числового моделювання процесу переробки різних ТпМ на одночерв'ячному екструдері ЧП 63×32 дав можливість надати рекомендації щодо вибору раціональних параметрів екструдера і режимів його роботи (табл. 3.2).

Наведені результати дають можливість зробити висновок про адекватність розробленої моделі одночерв'ячної екструзії реальним режимам переробки термопластичних матеріалів широкої номенклатури.





## 3.4. Моделювання двочерв'ячних екструдерів

### 3.4.1. Загальні положення

Особливістю двочерв'ячних екструдерів є те, що гвинтові канали черв'яків являють собою ряд практично ізольованих одна від одної С-подібних секцій, у кожній з яких міститься відповідний С-подібний об'єм перероблюваного ТпМ (рис. 3.18).

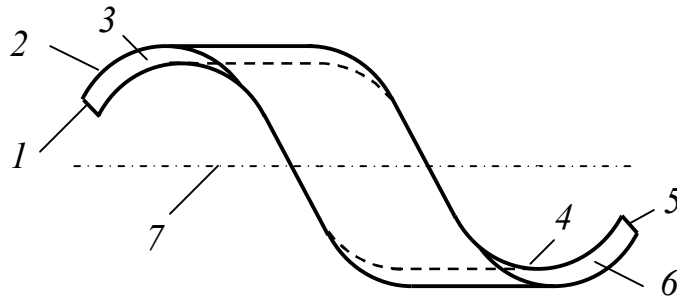


Рис. 3.18. С-подібний об'єм перероблюваного ТпМ у каналі черв'яка двочерв'ячного екструдера: 1, 5 – поверхні С-подібного об'єму, обмежені відповідним об'ємом сусіднього черв'яка; 2 – поверхня, обмежена циліндром; 3, 6 – поверхні, обмежені заплечиками гребенів нарізки черв'яка; 4 – поверхня, обмежена осердям черв'яка; 7 – поздовжня вісь черв'яка

Матеріал, що потрапляє в С-подібну чекцію, транспортується під час обертання черв'яків у напрямі формувальної головки і за один оберт крізь неї видавлюються два С-подібних об'єми майже незалежно від опору формувальної головки [24, 118]. При цьому продуктивність екструдера не залежить від цього опору, а глибина каналу може бути відносно великою, що зменшує швидкість деформації і, відповідно, інтенсивність дисипації, а отже і збільшує частку теплоти, що підводиться від стінки циліндра. Повне видавлювання С-подібних об'ємів забезпечує рівність тривалості перебування матеріалу в каналах черв'яків, що особливо важливо під час переробки термочутливої сировини, до якої належать у першу чергу вторинні полімери. Слід зазначити, що наявність проміжків між черв'яками та між черв'яком і корпусом призводить до зменшення продуктивності, а з іншого боку сприяє кращому перемішуванню ТпМ. Перехід матеріалу з одного С-подібного об'єму в інший залежить від перепаду тиску між об'ємами і, зрештою, є функцією опору формувальної головки. Такі проміжки існують між гребенями одного і осердям сусіднього черв'яка (валковий проміжок)  $\delta_{г-о}$ , між бічними поверхнями гребенів  $\delta_{г-г}$ , а також між гребенями витків і стінкою циліндра  $\delta_{г-ц}$  (рис. 3.19) [103].

При різноспрямованому обертанні черв'яків відносна швидкість поверхонь у проміжках  $\delta_{г-г}$  приблизно дорівнює нулю, а тому їх вплив на інтенсивність дисипації незначний. При односпрямованому обертанні відносна швидкість бічних поверхонь гребенів  $\delta_{г-г}$  приблизно дорівнює подвоєній швидкості

гребенів черв'яків, а тому ТпМ у цих проміжках інтенсивно деформується, що збільшує дисипативні тепловиділення.

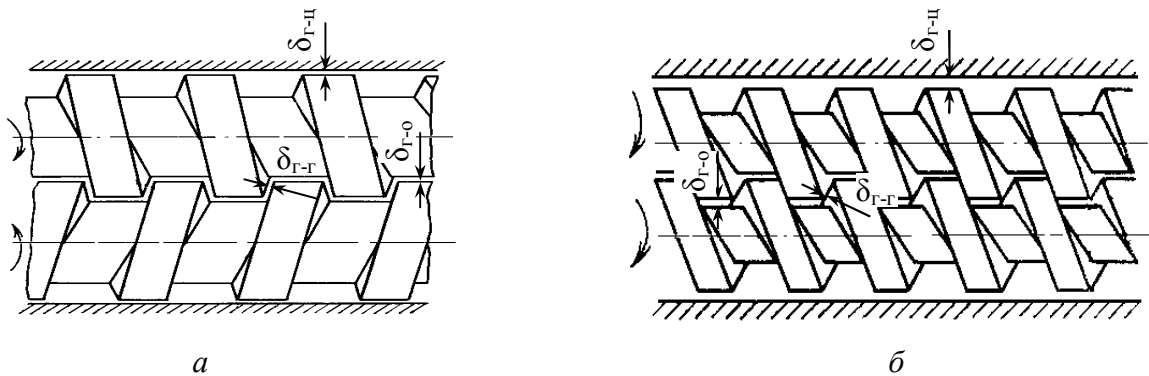


Рис. 3.19. Характер зачеплення черв'яків двочерв'ячного екструдера за умови різноспрямованого (а) та односпрямованого (б) обертання черв'яків

Обертання черв'яків в одному напрямі дає можливість підвищити їх частоту обертання, виключаючи можливе заклинювання черв'яків, і, відповідно, збільшувати продуктивність при якісному змішуванні компонентів ТпМ і самоочищенні черв'яків. Екструдери з черв'яками із взаємним зачепленням, що обертаються у протилежних напрямках, забезпечують високий змішувальний ефект при значній продуктивності. Однак потрібно зауважити, що радіальні (розпірні) зусилля, які виникають у двочерв'ячних екструдерах, призводять до підвищеного зношення робочих органів (у першу чергу циліндра).

Ущільнення ТпМ у двочерв'ячному екструдері здійснюється за рахунок зменшення об'єму замкнутого С-подібного об'єму. При цьому необхідно враховувати, що при різних значеннях ступеня стиснення черв'яків можливе переущільнення матеріалу на виході з екструдера і, як наслідок, їх заклинювання. Отже, двочерв'ячні екструдери повинні мати дозоване живлення.

З точки зору математичного моделювання двочерв'ячні екструдери набагато складніші, ніж одночерв'ячні, а тому довгий час розробка геометрії і вибір режимів переробки базувались на практичному досвіді та експериментальних даних і, крім цього, вони мали обмежене застосування внаслідок більш складної конструкції та експлуатації [173]. Перші спроби теоретичного опису базувались на аналітичних розв'язках спрощених рівнянь і були спрямовані на визначення продуктивності й потужності приводу [102, 117, 118, 149, 152, 173, 225, 291, 292]. Теоретично об'ємна продуктивність без врахування перетоків може бути визначена як добуток двох С-подібних об'ємів на виході екструдера на частоту обертання черв'яків [118, 173].

Продуктивність двочерв'ячних екструдерів із врахуванням перетоків також досліджувалась теоретично та експериментально, наприклад, у працях [291, 292]. При цьому відзначалось, що теоретичні залежності дають істотно більші значення продуктивності порівняно з практичними даними, що можна

пояснити наявність дозаторів і необхідністю досягнення високої якості переробки. Отже, теоретичні дані дають тільки верхнє обмеження продуктивності. З іншого боку, при дозованому живленні продуктивність екструдера визначається продуктивністю дозатора, а тому її обчислення не має істотного значення для подальшого розрахунку екструдера, якщо ця продуктивність не перевищує максимально можливої для заданої геометрії черв'яків та їх частоти обертання.

Як уже зазначалось, аналітичні розв'язки системи рівнянь, що описують процес екструзії, базуються на спрощених моделях і не враховують таких факторів, як залежність реологічних і теплофізичних властивостей ТпМ від якісного й кількісного складу ТпМ і температури, яка є змінною по висоті каналу, а також того, що під час екструзії ТпМ послідовно проходить ряд стадій, які відрізняються температурними і деформаційними режимами. Оскільки перероблюваний ТпМ зазвичай має низьку теплопровідність, для описання процесу її переробки потрібно здійснити розрахунок температурних полів, що дозволить оцінити можливу температурну неоднорідність і вибрати конструктивні елементи черв'яків для її зменшення. При переробці термочутливих матеріалів необхідно також оцінювати співвідношення між енергією дисипації та енергією, що підводиться від нагрівників циліндра. Цю задачу можна вирішувати, якщо для розрахунку температурних полів скористатися гідродинамікою, що найбільш наближена до реального процесу (див. підрозд. 3.2).

### 3.4.2. Екструдери з різноспрямованим обертанням черв'яків

Двочерв'ячні екструдери працюють у режимі дозованого живлення з повним заповненням лише декількох останніх С-подібних секцій, об'єм яких зазвичай найменший. Визначимо максимально можливу за цих умов продуктивність екструдера, якщо частота обертання черв'яків дорівнює  $n_{\text{ч}}$ . Для цього розглянемо поперечний переріз екструдера в площині, перпендикулярній поздовжнім осям черв'яків (див. рис. 3.3,в) [24, 118, 294].

За кожний оберт черв'яків з екструдера виходить подвоєний С-подібний об'єм ТпМ з поперечним перерізом у вигляді кільця площею  $\pi(D^2 - (D - 2h)^2)/4$  за винятком заштрихованої на рис. 3.3,в площі довжиною  $(s - je)$ , де  $j$  – кількість заходів нарізки. Площа сегмента  $ABCF$  дорівнює площі сектора  $O AFC$  за виключенням площі трикутника  $OAC$ :

$$F_{ABCF} = F_{O AFC} - F_{OAC}.$$

Визначимо ці площі:

$$F_{O AFC} = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\beta}{2\pi} = \frac{D^2 \beta}{8}; \quad F_{OAC} = \frac{1}{2} |OB| \cdot |AC|;$$

$$|OB| = \frac{D - h}{2}; \quad |AC| = 2 \frac{D}{2} \sin \frac{\beta}{2} = D \sin \frac{\beta}{2}.$$

Тоді маємо

$$F_{OAC} = \frac{D}{2} \left( \frac{D-h}{2} \right) \sin \frac{\beta}{2} \quad \text{і} \quad F_{ABCF} = \frac{D^2\beta}{8} - \frac{D}{2} \left( \frac{D-h}{2} \right) \sin \frac{\beta}{2}.$$

Площа поперечного перерізу каналів двох черв'яків дорівнює

$$S_{\text{ч}} = \frac{1}{2} \left\{ \pi \left[ D^2 - (D-2h)^2 \right] - D \left[ \frac{D\beta}{2} - (D-h) \sin \frac{\beta}{2} \right] \right\}$$

або

$$S_{\text{ч}} = 2\pi h(D-h) - \frac{D}{2} \left[ \frac{D\beta}{2} - (D-h) \sin \frac{\beta}{2} \right],$$

тоді об'єм двох С-подібних секцій дорівнюватиме

$$V_{\text{с}} = S_{\text{ч}}(s - je) = \left\{ 2\pi h(D-h) - \frac{D}{2} \left[ \frac{D\beta}{2} - (D-h) \sin \frac{\beta}{2} \right] \right\} (s - je). \quad (3.29)$$

Ураховуючи (3.29), масова продуктивність екструдера становить

$$G_M = \rho_{\text{тпм}} V_{\text{с}} n_{\text{ч}} = \rho_{\text{тпм}} (s - je) n_{\text{ч}} \left\{ 2\pi h(D-h) - \frac{D}{2} \left[ \frac{D\beta}{2} - (D-h) \sin \frac{\beta}{2} \right] \right\}. \quad (3.30)$$

Кут  $\beta$  сектора  $OAC$  дорівнює (див. рис. 3.3,в):

$$\beta = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{|AB|}{|OB|} \right) = 2 \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sqrt{\left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( \frac{D-h}{2} \right)^2}}{\frac{D-h}{2}} \right].$$

Після відповідних перетворень маємо

$$\beta = 2 \operatorname{arctg} \sqrt{\left( 1 - \frac{h}{D} \right)^{-2} - 1}.$$

Також зазначений кут (див. рис. 3.3,в) можна визначити із залежності

$$\beta = 2 \arccos \left( \frac{D-h}{D} \right).$$

Під час розрахунку неповністю заповнених матеріалом С-подібних секцій ступінь їх заповнення можна визначити як відношення продуктивності останньої секції до продуктивності повністю заповненої розглядуваної секції, яку обчислюють за формулою (3.30). При цьому в дійсності внаслідок зустрічного обертання черв'яків канал на вході у валковий проміжок буде заповнений повністю, а незаповненою залишиться тільки протилежна частина С-подібної секції (на виході з валкового проміжку).

Площу поперечного перерізу об'єму ТпМ у неповністю заповнених секціях можна визначити із залежності (3.30), якщо відома продуктивність, що забезпечується дозатором

$$S_{\text{ч}} = \frac{G_M}{\rho_{\text{ТПМ}} n_{\text{ч}} (s - je)}. \quad (3.31)$$

З іншого боку, площа  $S_{\text{ч}}$  дорівнює різниці площ секторів з радіусами  $R_3$  і  $R_2$  (див. рис. 3.5) і кутом  $(2\pi - \beta_1)$ , де  $\beta_1$  – центральний кут кільцевого простору, не заповненого перероблюваним матеріалом.

Тоді для двох черв'яків маємо

$$S_{\text{ч}} = 2 \left[ \frac{(2\pi - \beta_1) R_3^2}{2} - \frac{(2\pi - \beta_1) R_2^2}{2} \right] = (2\pi - \beta_1) (R_3^2 - R_2^2)$$

або

$$S_{\text{ч}} = (2\pi - \beta_1) (D - h) h. \quad (3.32)$$

Прирівнюючи (3.31) і (3.32) і розв'язуючи одержаний вираз відносно кута  $\beta_1$ , одержимо

$$\beta_1 = 2\pi - \frac{G_M}{\rho_{\text{ТПМ}} n_{\text{ч}} (s - je) (D - h) h}.$$

Визначимо сумарну потужність дисипації в об'ємі двох С-подібних секцій. Ураховуючи, що за прийнятих припущень інтенсивність дисипації  $q_{\text{дис}}$  змінюється тільки по радіусу, за формулою числового інтегрування Сімпсона [78] одержимо

$$\Delta Q_{\text{дис}} = \frac{2}{3} (2\pi - \beta_1) \Delta r (s - je) \left( q_{\text{дис}0} R_2 + q_{\text{дис}m} R_3 + 4 \sum_{i=1}^{m-1} q_{\text{дис}i} r_i + 2 \sum_{j=2}^{m-2} q_{\text{дис}j} r_j \right),$$

або

$$\Delta Q_{\text{дис}} = \frac{2}{3} (2\pi - \beta_1) \Delta r (s - je) \times \left( q_{\text{дис}0} \left( \frac{D}{2} - h \right) + q_{\text{дис}m} \frac{D}{2} + 4 \sum_{i=1}^{m-1} q_{\text{дис}i} r_i + 2 \sum_{j=2}^{m-2} q_{\text{дис}j} r_j \right), \quad (3.33)$$

де  $i = 1, 3, \dots, m-1$ ;  $j = 2, 4, \dots, m-2$ ;  $r_i$  і  $r_j$  – радіуси відповідних елементів  $\Delta r$ .

Значення  $q_{\text{дис}i}$  і  $q_{\text{дис}j}$ , що входять у рівняння (3.33), обчислюють за формулою (3.28) з урахуванням формул (3.24) і (3.25) для визначення компонентів швидкостей деформації, а також залежності координати  $y$  від поточного радіуса  $r$  циліндричної системи координат:  $y = r - (D/2 - h)$  [24, 294].

Крім цього потужність приводу витрачається на деформування розплаву в проміжках  $\delta_{\text{Г-Ц}}$ ,  $\delta_{\text{Г-О}}$  і  $\delta_{\text{Г-Г}}$  (див. рис. 3.19). Оскільки обертання черв'яків різноспрямоване, то деформації зсуву в бічних проміжках зачеплення  $\delta_{\text{Г-Г}}$  майже відсутні, а тому їх не враховуватимемо. Витрати потужності у валковому проміжку  $\delta_{\text{Г-О}}$ , як показали виконані розрахунки за методикою розрахунку валкових машин, також істотного впливу на результати інженерних розрахунків не

мають [24]. Найбільші витрати потужності мають місце в радіальному проміжку  $\delta_{г-ц}$  між гребенем витка і стінкою циліндра. Як уже зазначалося, внаслідок малої величини цього проміжку вплив градієнта тиску на профіль швидкості незначний і течію в проміжку можна розглядати як течію між нерухомою й рухомою поверхнями з лінійним розподілом швидкості. Тоді швидкість зсуву в цьому проміжку дорівнює  $\dot{\gamma} = W_{ч}/\delta_{г-ц}$ , а потужність дисипації визначиться за залежністю [24]

$$q_{\text{дис } г-ц} = \mu_{\text{ТпМ}}(\dot{\gamma}_{г-ц}, T_{г-ц}) \dot{\gamma}_{г-ц}^2 = \mu_{\text{ТпМ}}(\dot{\gamma}, T_{г-ц}) \left( \frac{W_{ч}}{\delta_{г-ц}} \right)^2,$$

де  $T_{г-ц}$  – середня температура ТпМ у проміжку між гребенем черв'яка й циліндром, яку можна приймати рівною температурі ТпМ біля поверхні циліндра.

Тоді витрати потужності в проміжках двох С-подібних секцій дорівнюють

$$\Delta Q_{\text{дис } г-ц} = 2q_{\text{дис } г-ц} (2\pi - \beta_1)(D - h)e\delta_{г-ц}.$$

Проаналізуємо виконані за розробленим алгоритмом результати розрахунку процесу переробки ТпМ на двочерв'ячному екструдері з різноспрямованим обертанням черв'яків діаметром 125 мм і робочою довжиною  $30D$  для продуктивності 500 кг/год і частоти обертання черв'яків 50 об/хв. Розрахунки виконували для двох варіантів: за заданої температури поверхонь черв'яка і циліндра, а також за відсутності теплообміну з поверхнями черв'яка і циліндра (адіабатичний режим). Показник степеня  $n$  реологічного рівняння (1.8) у розрахунках брали рівним 0,3 і 1.

Залежність температури від безрозмірної висоти каналу  $y/h$  для трьох поперечних перерізів на першому, п'ятнадцятому і тридцятому витках черв'яків при значеннях показника степеня  $n = 1$  і  $n = 0,3$  для адіабатичного режиму наведено на рис. 3.20, з якого видно, що більш інтенсивне нагрівання ТпМ має місце біля поверхні черв'яка, а температурна неоднорідність ТпМ може досягати 30...50 °С. У той же час зі збільшенням відхилення від ньютонівської поведінки має місце зниження температурного рівня переробки, що пов'язане зі зменшенням інтенсивності циркуляційного руху розплаву.

Зміну температури по безрозмірній висоті  $y/h$  за граничних умов першого роду (задані температури поверхонь) для зазначених перерізів черв'яків наведено на рис. 3.21, з якого видно, що на перших витках для підтримання заданої температури потрібне нагрівання ТпМ, а потім навпаки: поверхні черв'яка й циліндра необхідно охолоджувати. Це видно з рис. 3.22 і 3.23, на яких наведено криві зміни теплових потоків по довжині екструдера ( $Z$  – номер витків черв'яків), які необхідно підвести або відвести від поверхонь черв'яка й циліндра для підтримання заданих температур. За цими кривими можна визначити й підібрати необхідний температурний режим переробки. Певні «сплески» теплових потоків на 5-му, 13-му і 19-му витках спричинені особливістю геометрії черв'яків.

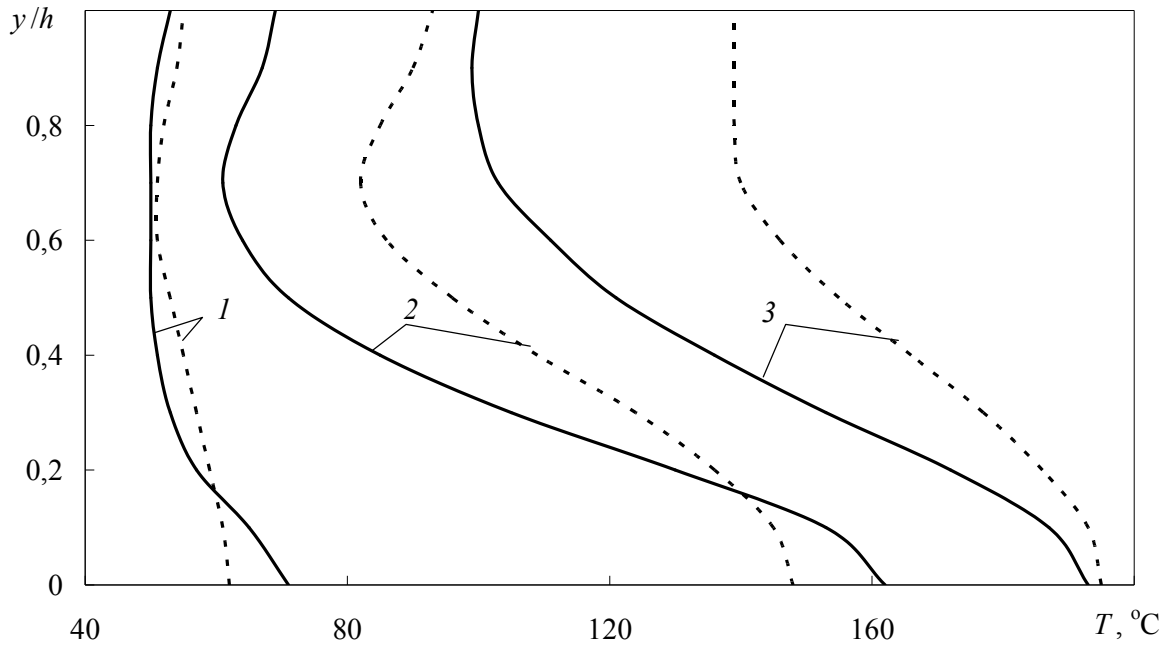


Рис. 3.20. Зміна температури по висоті каналу черв'яків для адіабатичного режиму за значень  $n = 0,3$  (суцільні лінії) і  $n = 1$  (штрихові лінії) по довжині черв'яків:  
 1 – на початку; 2 – у середині; 3 – у кінці

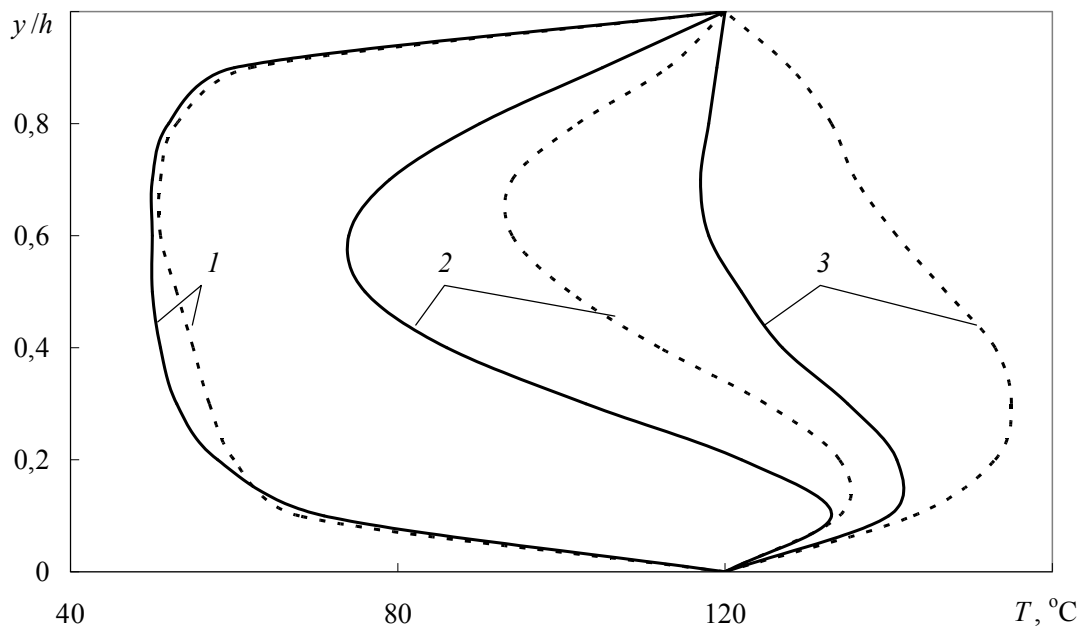


Рис. 3.21. Зміна температури по висоті каналу черв'яків для заданих температур черв'яка і циліндра за значень  $n = 0,3$  (суцільні лінії) і  $n = 1$  (штрихові лінії) по довжині черв'яків:  
 1 – на початку; 2 – у середині; 3 – у кінці

На рис. 3.24 і 3.25 наведено температурні поля в екструдері для адіабатичного режиму й режиму, коли задано температури поверхонь черв'яка й циліндра (граничні умови першого роду).

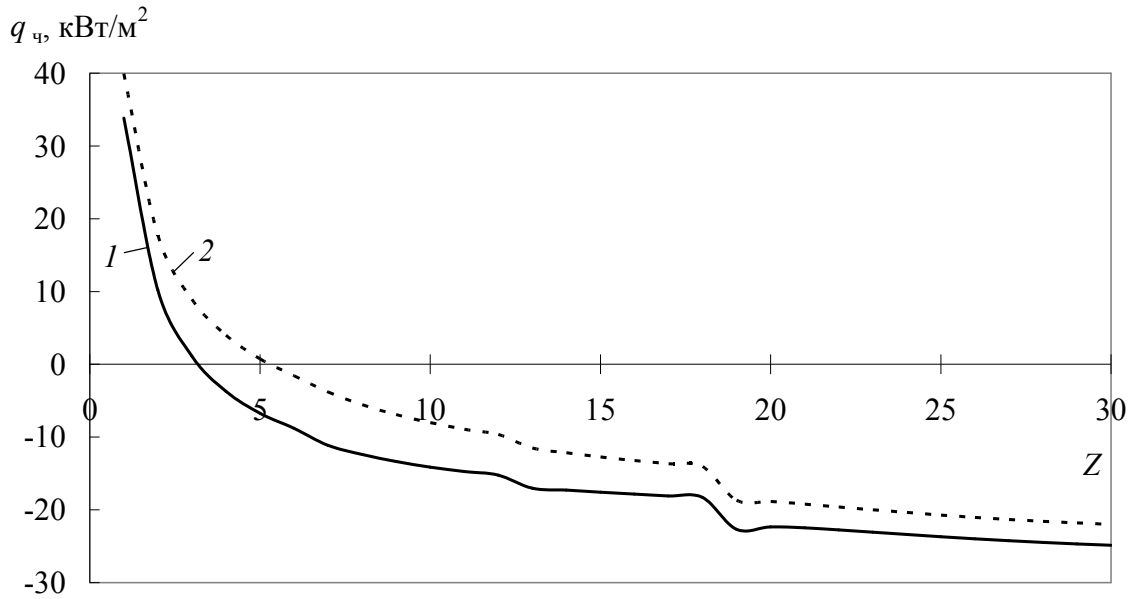


Рис. 3.22. Тепловий потік, який необхідно підвести або відвести від черв'яка по його довжині за значень  $n = 0,3$  (1) і  $n = 1$  (2)

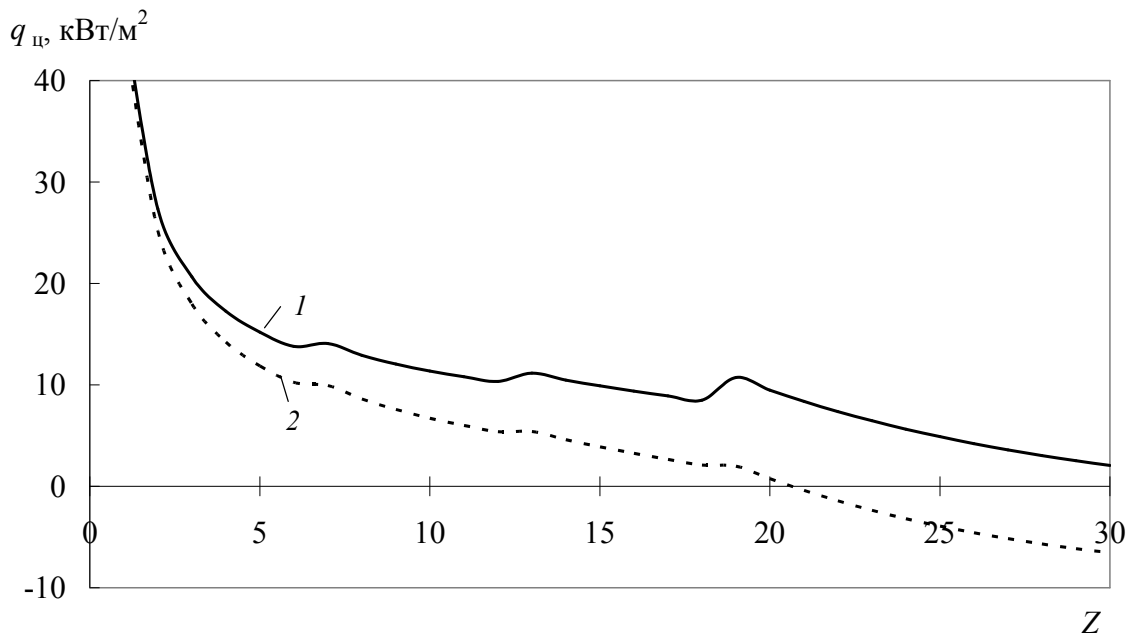


Рис. 3.23. Тепловий потік, який необхідно підвести або відвести від циліндра по його довжині за значень  $n = 0,3$  (1) і  $n = 1$  (2)

На рис. 3.26 наведено зміну температури  $T_{\text{пМ}}$  по безрозмірній висоті  $y/h$  для трьох поперечних перерізів на початку, у середині та в кінці черв'яків для продуктивності 200 кг/год в умовах адіабатичного режиму для двох значень еквівалентної теплопровідності: звичайної та подвоєної, тобто для різних режимів перемішування.

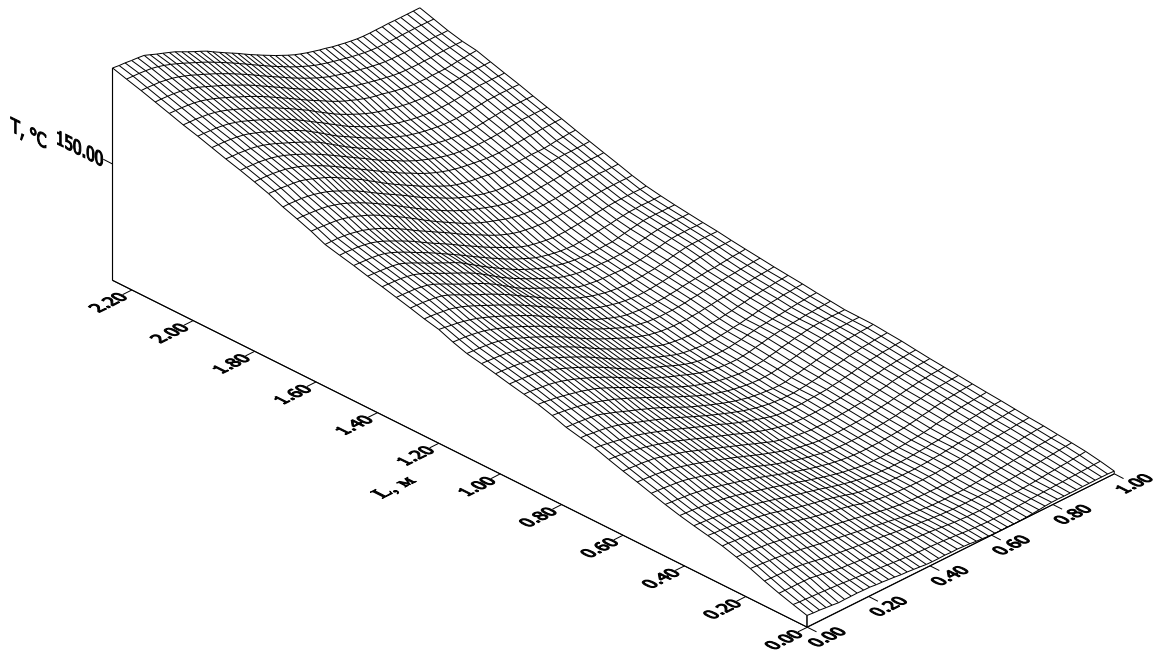


Рис. 3.24. Температурні поля в екструдері для адіабатичного режиму переробки

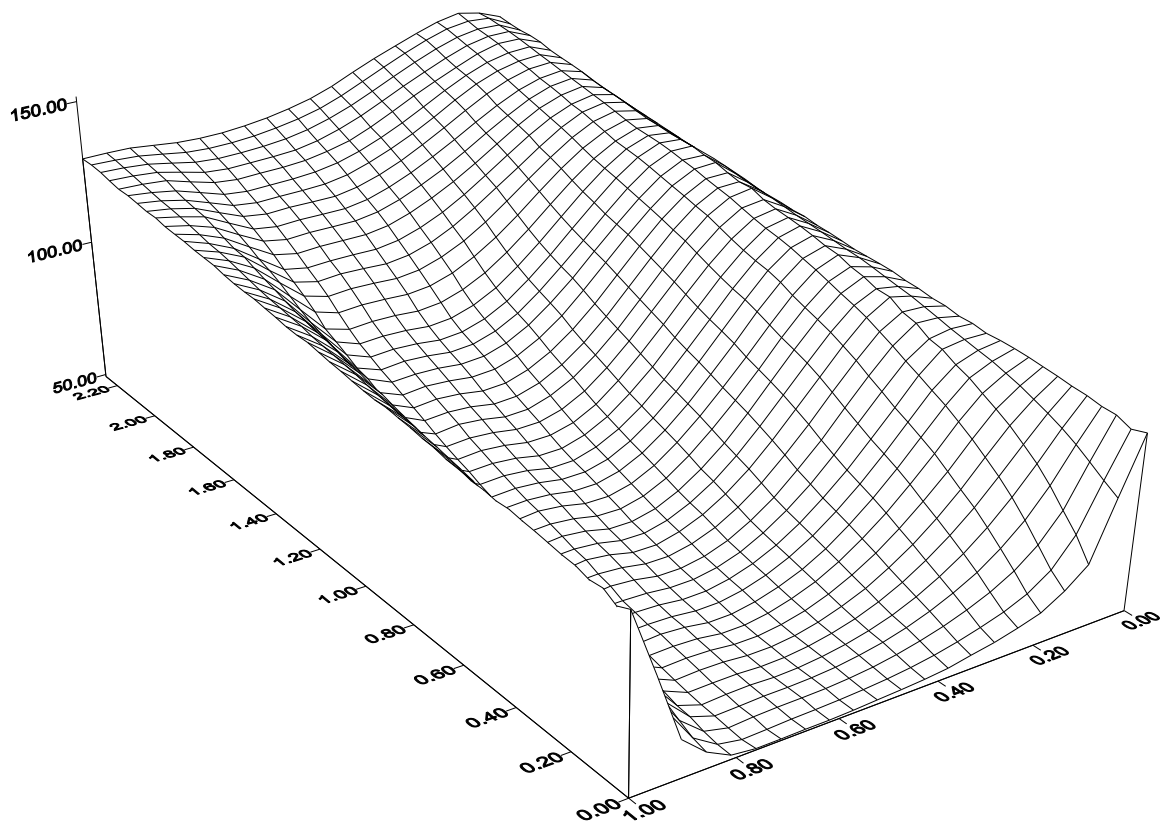


Рис. 3.25. Температурні поля в екструдері для граничних умов першого роду на робочих поверхнях черв'яка й циліндра

З рис. 3.26 видно, що залежності в певних місцях по довжині екструдера для різних значень еквівалентної теплопровідності досить близькі одна до одної, а отже температурні поля визначаються переважно інтенсивністю дисипації в певних точках об'єму ТпМ. Це підтверджує і подібність температурних полів, отриманих у результаті розрахунків для адіабатичного режиму (рис. 3.27).

Необхідно відзначити, що на перших витках потрібне підведення значної кількості теплоти для підтримання заданого температурного режиму поверхонь черв'яка й циліндра, що не завжди можливо, оскільки поверхня теплообміну робочих органів обмежена. Тому спочатку доцільно виконувати розрахунок для випадку граничних умов другого роду, за результатами якого вибрати значення температур на поверхнях.

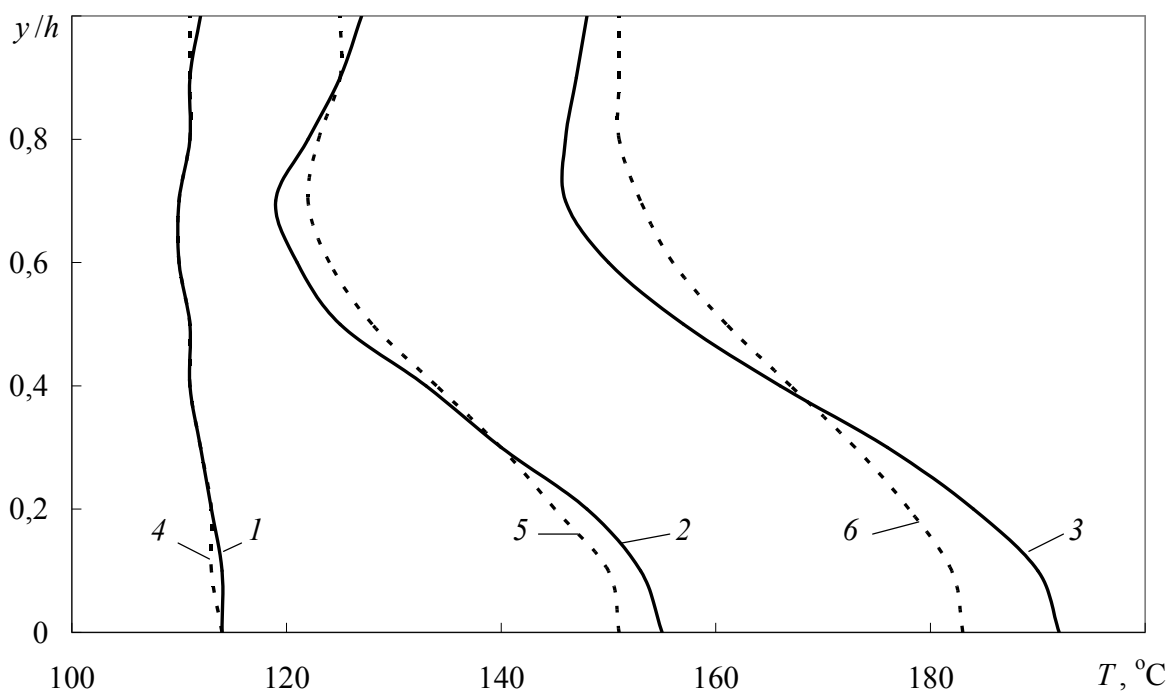
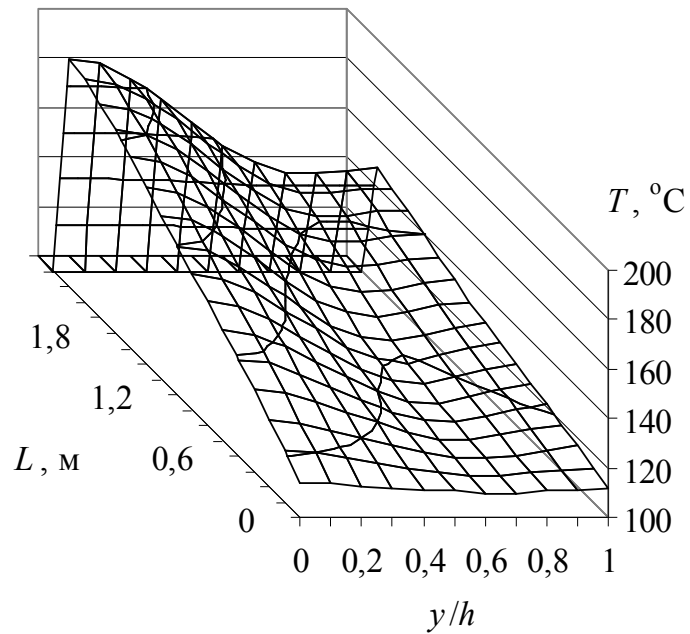


Рис. 3.26. Залежність температури розплаву від глибини каналу черв'яка на початку (1, 4), у середині (2, 5) та в кінці (3, 6) черв'яка для різних значень еквівалентної теплопровідності — звичайної (1–3) і подвоєної (4–6)

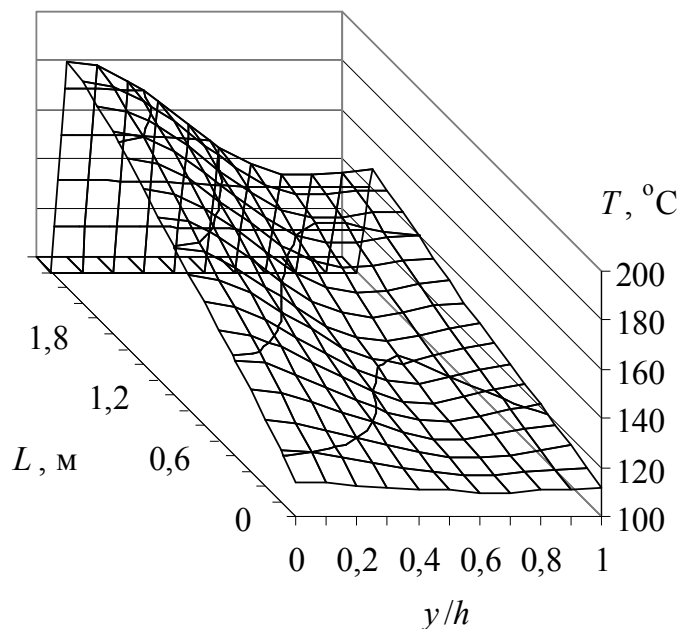
Математична модель двочерв'ячної екструзії та алгоритм проектного розрахунку двочерв'ячного екструдера з різноспрямованим обертанням черв'яків дають можливість для заданої продуктивності й кінцевої температури розплаву визначати основні параметри обладнання та процесу: геометрію робочих органів, частоту обертання черв'яків, мінімально необхідну потужність приводу та оцінювати температурну неоднорідність розплаву. Це особливо важливо для ТпМ з використанням вторинної сировини, що мають підвищену чутливість до теплових і механічних навантажень. Під час перевірного розрахунку для заданої

геометрії черв'яків можна здійснювати обґрунтований вибір частоти обертання черв'яків і теплових режимів робочих органів екструдера.

При цьому слід відзначити, що для зменшення спричиненої гідродинамікою температурної неоднорідності розплаву ТпМ доцільно застосування в робочому каналі екструдера змішувальних елементів (див. п. 3.2.2).



*a*



*б*

Рис. 3.27. Температурні поля для адіабатичного режиму процесу екструзії при звичайній (а) і подвоєній (б) теплопровідності розплаву

### 3.4.3. Екструдери з односпрямованим обертанням черв'яків

У двочерв'ячному екструдері з односпрямованим обертанням черв'яків забезпечується самоочищення черв'яків, що особливо важливо при переробці термочутливих ТпМ. У багатьох випадках черв'яки виготовляють багатозахідними з напівкруглим профілем нарізки, що сприяє кращому перерозподілу потоків ТпМ та його перемішуванню. Розглянемо тризахідний черв'як з кроком нарізки  $s$  (рис. 3.28).

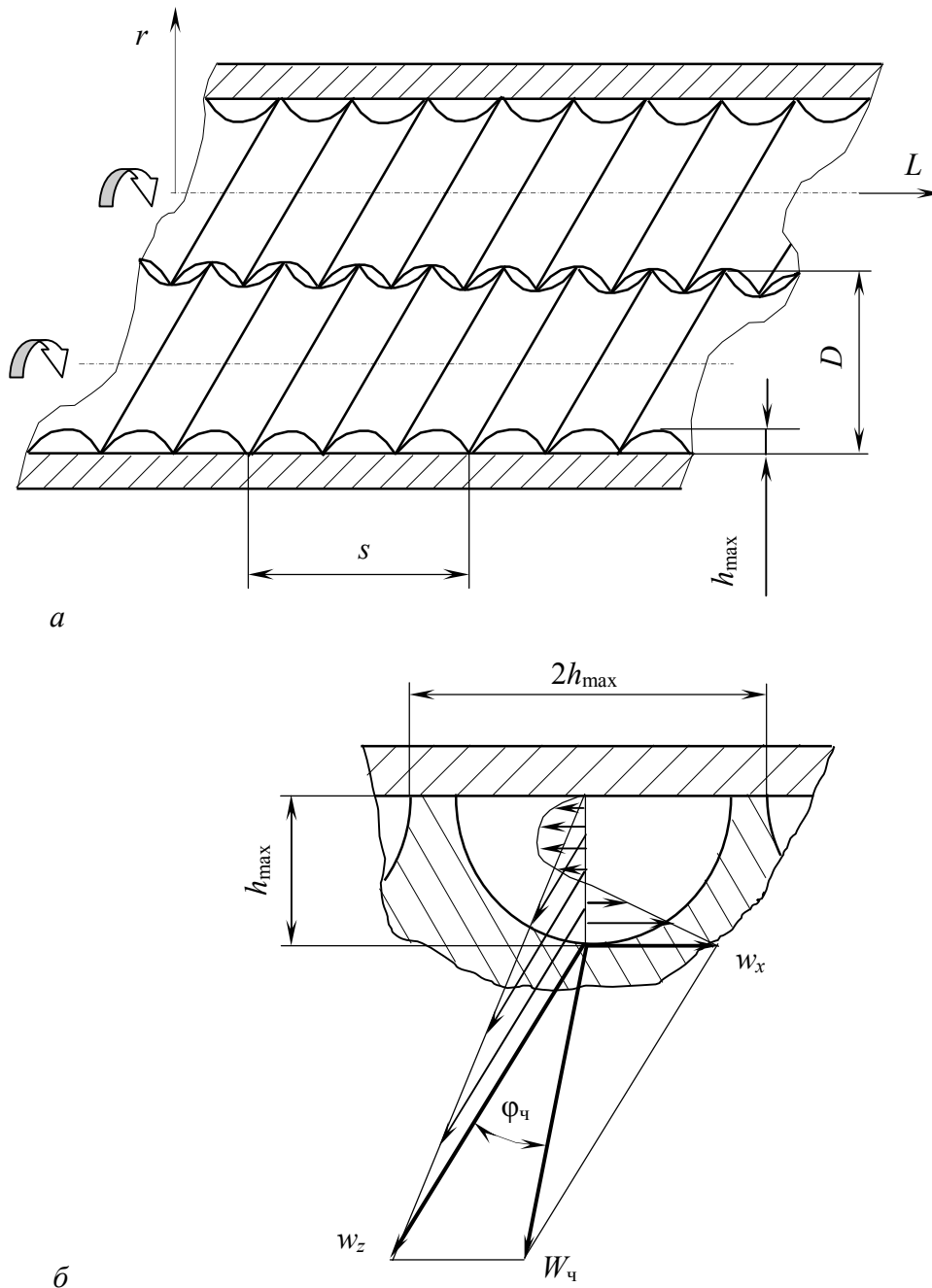


Рис. 3.28. Схема екструдера з односпрямованим обертанням черв'яків

З рис. 3.28 видно, що потік ТпМ у місці контакту черв'яків перерозподіляється між сусідніми каналами їх нарізок, а для решти довжини каналів рух ТпМ аналогічний руху в одночерв'ячному екструдері. Як уже було зазначено в п. 3.2.1, двочерв'ячні екструдери працюють за умови дозованого живлення, а тому повністю заповненими є лише декілька останніх витків черв'яка, які утворюють необхідний кінцевий тиск. Об'єм каналів черв'яка зменшується вздовж його осі як за рахунок зменшення глибини, так і за рахунок зменшення кроку нарізки, причому найчастіше таке зменшення відбувається ступінчасто по довжині черв'яка у місцях контакту декількох конструктивних зон черв'яка між собою. У зв'язку з тим, що потік ТпМ безперервно перерозподіляється й розплав у зоні плавлення змішується з твердим полімером, вважатимемо, що як і в екструдері з різноспрямованим обертанням чітко вираженої зони плавлення немає, а деформація зсуву в усьому об'ємі ТпМ має місце по всій довжині черв'яків [24, 136].

На відміну від екструдерів з різноспрямованим обертанням черв'яків, у даному випадку об'єм С-подібної секції не є ізольованим (див. рис. 3.28,а). Проте останні секції нарізки завдяки наявності опору формувальної головки заповнені ТпМ повністю, а тому швидкість його осьового руху в цих секціях можна визначити з рівняння масової витрати [24]:

$$G_M = \rho_{\text{ТпМ}} S_k W_L, \quad (3.34)$$

де  $W_L$  – швидкість осьового руху ТпМ.

Ураховуючи, що профіль каналу напівкруглий з радіусом нарізки  $h_{\text{max}}$ , для двох черв'яків із  $j$ -західною нарізкою маємо

$$S_k = 2j \frac{\pi h_{\text{max}}^2}{2 \sin \varphi_{\text{ч}}}. \quad (3.35)$$

Підставляючи (3.35) у (3.34) і розв'язуючи його відносно  $W_L$ , одержимо

$$W_L = \frac{G_M \sin \varphi_{\text{ч}}}{j \rho_{\text{ТпМ}} \pi h_{\text{max}}^2}, \quad (3.36)$$

при цьому кут нахилу гвинтової нарізки визначають за формулою

$$\varphi_{\text{ч}} = \arctg\left(\frac{s}{\pi D}\right).$$

Обчислену за рівнянням (3.36) середню швидкість переміщення для останніх секцій при розрахунку решти секцій уточнюватимемо множенням на відношення кроку нарізки розглядуваної секції до кроку нарізки останньої секції.

Визначимо еквівалентну глибину каналу напівкруглої форми, замінивши її прямокутною за умови рівності площ їх поперечних перерізів (рис. 3.28,б)

$$\frac{\pi h_{\text{max}}^2}{2} = 2h_{\text{max}}h,$$

звідки еквівалентна глибина каналу становить

$$h = \frac{\pi h_{\max}}{4}.$$

За наявності змішувальних кулачків еквівалентну глибину каналу можна визначити аналогічно.

Еквівалентна нарізка в поперечному перерізі утворює неповністю заповнений ТпМ кільцевий простір, площа якого для двох черв'яків приблизно дорівнює

$$S_k = 2(2\pi - \beta_1)h \frac{D - h}{2}, \quad (3.37)$$

де  $\beta_1$  – кут незаповненої матеріалом об'єму С-подібної секції.

Підставляючи вираз (3.37) у рівняння для масової продуктивності (3.34) і розв'язуючи одержаний вираз відносно кута  $\beta_1$ , одержимо

$$\beta_1 = 2\pi - \frac{G_M}{\rho_{\text{тпм}} W_L (D - h) h}.$$

Продуктивність екструдера за умови дозованої подачі дорівнює продуктивності дозатора, але вона не може перевищувати максимальної продуктивності, яка визначається частотою обертання черв'яків і геометрією повністю заповнених останніх секцій. Оскільки в разі односпрямованого обертання С-подібні секції не повністю ізольовані одна від одної, а тому для визначення продуктивності останніх секцій скористаємось теорією одночерв'ячної екструзії. Для плоскопаралельної моделі черв'яка за градієнта тиску, близького до нульового значення, продуктивність дорівнює [24, 186]

$$G_{\max} = j\rho_{\text{тпм}} \frac{\pi h_{\max}^2 G_M W_z}{2}, \quad (3.38)$$

де  $W_z = \pi D n_{\text{ч}} \cos \varphi_{\text{ч}}$  – складова швидкості вздовж розгорнутого на площину каналу черв'яка.

Підставляючи цей вираз у рівняння (3.38), маємо

$$G_{\max} = \frac{1}{2} \pi^2 j \rho_{\text{тпм}} h_{\max}^2 D n_{\text{ч}} \cos \varphi_{\text{ч}}.$$

Для визначення інтенсивності дисипації  $q_{\text{дис}}$  в об'ємі ТпМ необхідно обчислити швидкість деформації у вузлових точках. Для цього як і у випадку різноспрямованого обертання черв'яків скористаємось розв'язками, одержаними для плоскопаралельної моделі. Для циркуляційної складової значення швидкості деформації  $\dot{\gamma}_x$  у вузлових точках можна виконати за алгоритмом, зображеним на рис. 7.10 [24] (блоки 1–9). При визначенні складової  $\dot{\gamma}_z$  необхідно врахувати, що в даному випадку С-подібні секції не замкнені і в них відсутня циркуляція в повздовжньому напрямі, як це має місце при різноспрямованому обертанні черв'яків. Але для незаповнених секцій градієнт тиску в напрямі  $z$  близький до нульового значення, тому можна припустити, що шви-

дкість по висоті каналу змінюється приблизно лінійно, а швидкість деформації відповідно становить

$$\dot{\gamma}_z = \frac{V_z}{h} = \frac{\pi D n_{\text{ч}} \cos \varphi_{\text{ч}}}{h}. \quad (3.39)$$

Таким чином, для даного випадку в алгоритмі розрахунку гідродинаміки, зображеному на рис. 7.10 [24], необхідно видалити блоки 10–18, а в блок 21 у якості  $\dot{\gamma}_{zi}$  підставити постійне значення компоненти швидкості деформації, що обчислюють за залежністю (3.39).

Потужність дисипації визначимо інтегруванням інтенсивності дисипації  $q_{\text{дис}}$  по об'єму ТпМ, який знаходиться в розглядуваній секції

$$\Delta Q_{\text{дис}} = 2 \int_0^{2\pi - \beta_1} \int_0^s \int_{(D-2h)/2}^{D/2} q_{\text{дис}} dr dL d\theta. \quad (3.40)$$

Оскільки  $q_{\text{дис}}$  залежить тільки від радіуса, то вираз (3.40) набуває вигляду

$$\Delta Q_{\text{дис}} = 2(2\pi - \beta_1) s \int_{(D-2h)/2}^{D/2} q_{\text{дис}} dr. \quad (3.41)$$

Інтеграл у рівнянні (3.41) обчислимо за формулою числового інтегрування Сімпсона

$$\Delta Q_{\text{дис}} = \frac{2}{3} (2\pi - \beta_1) s \Delta r \left( q_{\text{дис}0} R_2 + q_{\text{дис}m} R_3 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} q_{\text{дис}i} r_i + 4 \sum_{j=2}^{m-2} q_{\text{дис}j} r_j \right),$$

де  $i = 1, 3, \dots, m - 1$ ;

$j = 2, 4, \dots, m - 2$ ;

$r_i$  і  $r_j$  – радіуси відповідних елементів  $\Delta r$ .

Значення  $q_{\text{дис}i}$  і  $q_{\text{дис}j}$  у вузлових точках визначається в алгоритмі розрахунку теплообміну, зображеному на рис. 7.2 [24].

На відміну від екструдера з різноспрямованим обертанням черв'яків, профіль нарізки має форму сегмента, а тому деформування в проміжках  $\delta_{\Gamma-0}$ ,  $\delta_{\Gamma-\Gamma}$  і  $\delta_{\Gamma-\Pi}$  для розрахунку потужності приводу істотного значення не мають. Похибку їх неврахування можна зменшити, інтегруючи інтенсивність дисипації по всьому заповненому перероблюваним матеріалом об'єму С-подібної секції.

Перевірка розробленої моделі здійснювалася під час вибору й відпрацювання режимів переробки ТпМ на основі поліетилену з наповнювачем (до 60 % (за масою)) і спеціальними добавками, що використовують для одержання самозатухаючої електричної ізоляції для кабельної продукції. Результати числового моделювання порівнювали з експериментальними даними, одержаними при гранулюванні цієї композиції у ВАТ «Київхімволокно» на двочерв'ячному екструдері з діаметром черв'яків 83 мм і робочою довжиною 30D [295]. Набірні черв'яки комплектувались тризахідними секціями кроками 120,

90 і 60 мм з напівкруглим профілем нарізки радіусами 12, 8 і 6 мм відповідно, а також змішувальними кулачками трикутної форми (див. рис. 3.9). Експерименти проводили за продуктивності 50 кг/год для частоти обертання черв'яків 40 і 25 об/хв. Температуру стінки циліндра підтримували рідинною системою термостабілізації з чотирма автономними зонами. У ході експериментів безперервно фіксували значення температури стінки циліндра, температури ТпМ на виході екструдера, продуктивність і частоту обертання черв'яків.

Як приклад на рис. 3.29 наведено розраховані профілі температури по безрозмірній висоті каналу на 7, 14, 21 і 28 витках для продуктивності 50 кг/год і частоти обертання черв'яків 40 об/хв. Температура стінки циліндра в зонах становила 160, 160, 180 і 180 °С, підтримувалась системою термостабілізації, а при розрахунках вважалась заданою.

З рис. 3.29 видно, що температура в пристінному шарі біля поверхні циліндра різко падає до заданого значення, що дає можливість припустити, що тепловий потік, який відводиться системою термостабілізації, значний. Температура розплаву на виході екструдера становила 220 °С, що близько до розрахованого значення. У той же час співставлення результатів розрахунку з термограмою температури стінки показало, що реальна температура (приблизно 210 °С) близька до середньої температури розплаву й перевищувала задане значення (рис. 3.30). Це свідчить про те, що система термостабілізації за даного режиму переробки не може відводити теплоту дисипації в необхідному обсязі.

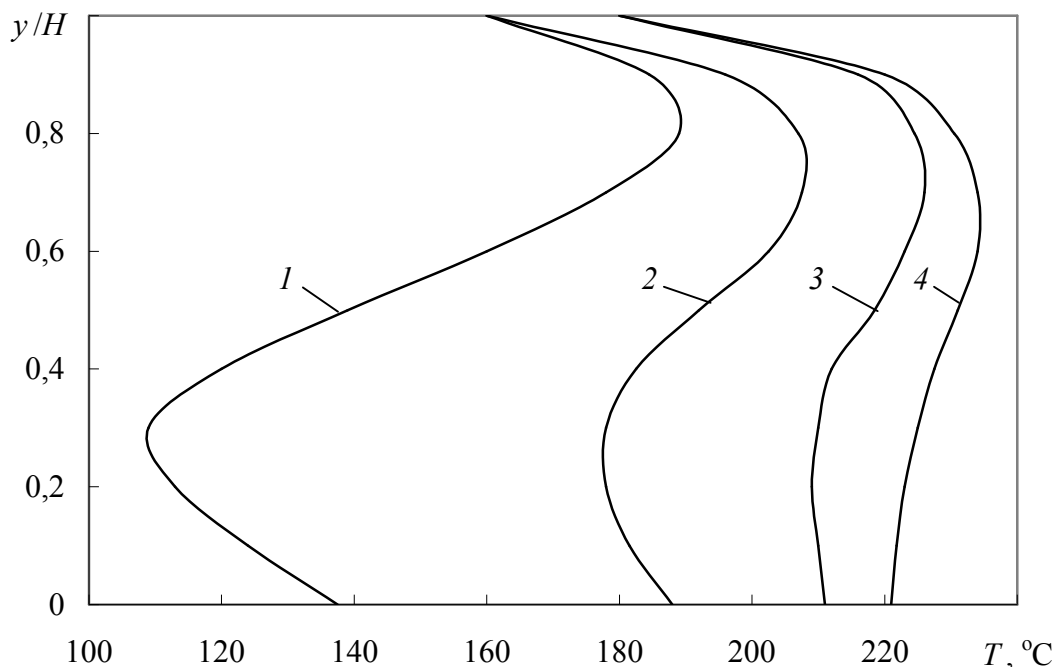


Рис. 3.29. Профілі температури по висоті каналу для  $n_{\text{ч}}=40$  об/хв (1–4 – на довжині черв'яка, що відповідає номерам витків нарізки № 7, 14, 21 і 28)

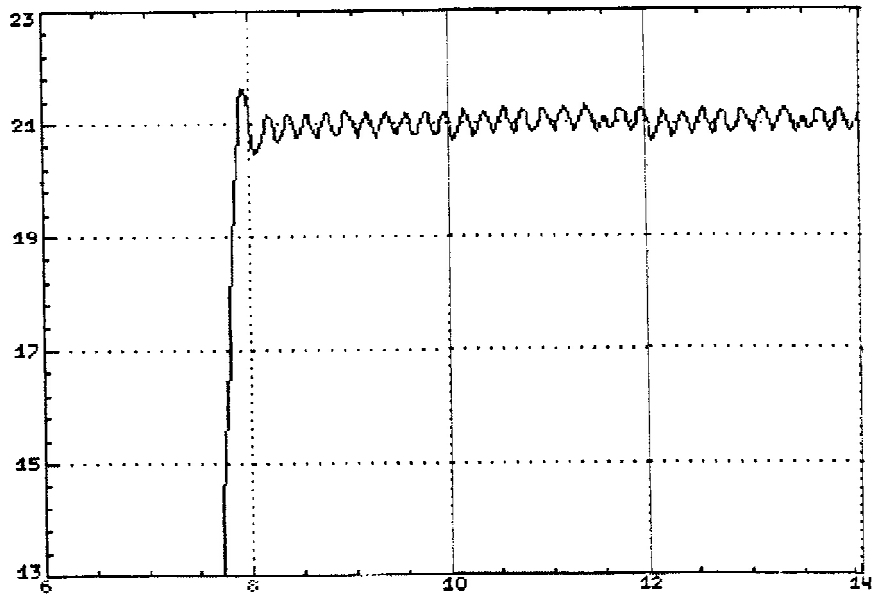


Рис. 3.30. Залежність температури стінки циліндра в часі (термограма самопису для  $n=40 \text{ хв}^{-1}$ ): по горизонталі – час у хвиликах, по вертикалі – температура в десятках градусів Цельсія.

На рис. 3.31 наведені аналогічні залежності, одержані для тієї самої продуктивності, але при зниженій до 25 об/хв частоті обертання й заданій температурі стінки циліндра в зонах відповідно 140, 140, 140 і 160 °С, а на рис. 3.32 – температурне поле ТпМ для граничних умов першого роду при температурі стінки циліндра по зонах 140, 140, 160 і 160 °С.

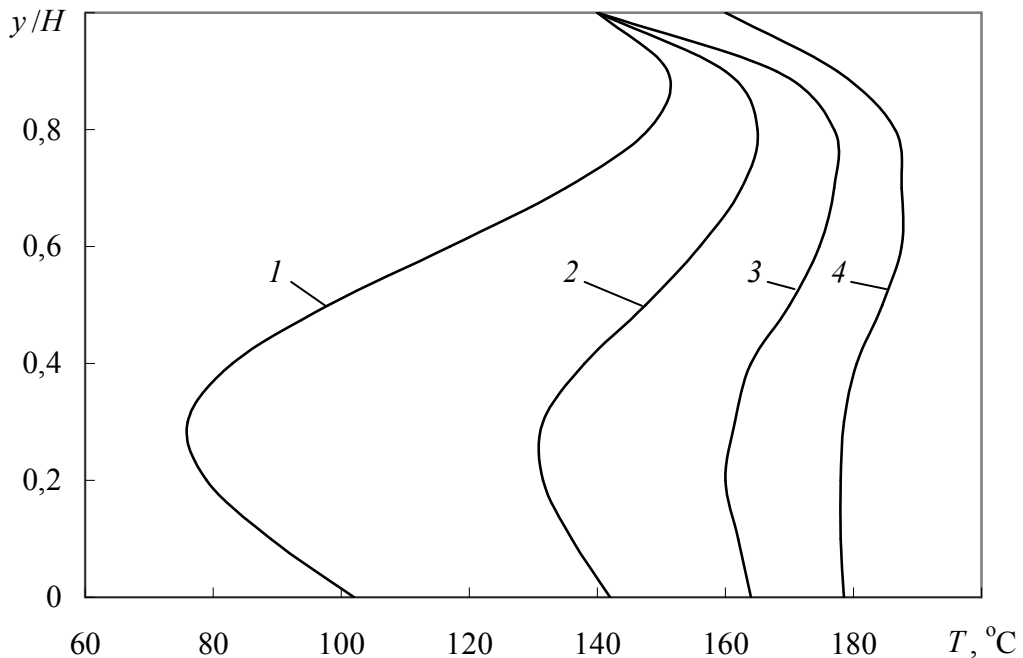


Рис. 3.31. Профілі температури по висоті каналу для  $n_q=25 \text{ об/хв}$  (1–4 – на довжині черв'яка, що відповідає номерам витків нарізки № 7, 14, 21 і 28).

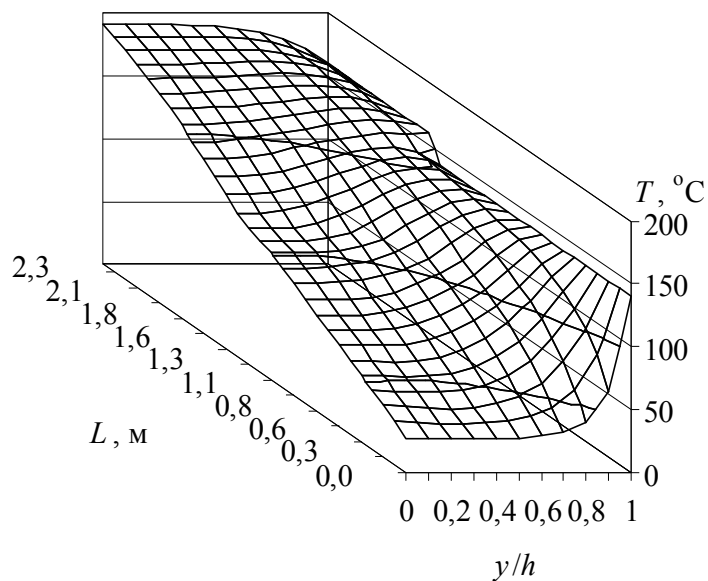


Рис. 3.32. Температурні поля в каналі двочерв'ячного екструдера при граничних умовах першого роду

Порівняння теоретичних результатів та експериментальних значень температури стінки циліндра показує, що в перших трьох зонах система охолодження відводить теплоту, необхідну для підтримання заданих температур стінки, а значна амплітуда регулювання свідчить, що температура  $T_{пМ}$  у цілому вища за задану температуру стінки. У четвертій зоні, де температура стінки становила  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , амплітуда коливань регулювання менша, отже температура стінки ближче до температури  $T_{пМ}$ . Обчислене значення температури матеріалу  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  близьке до експериментального значення температури стінки в цій зоні.

Запропоновані математична модель та алгоритм розрахунку двочерв'ячного екструдера з односпрямованим обертанням черв'яків дають можливість для заданої продуктивності й температури розплаву на виході з екструдера визначити основні параметри обладнання та процесу: геометрію робочих органів, частоту обертання черв'яків, мінімально необхідну потужність приводу та оцінювати можливу температурну неоднорідність розплаву. Під час перевірного розрахунку розроблена програма розрахунку дає можливість для заданої геометрії черв'яків здійснювати обґрунтований вибір частоти обертання черв'яків і теплових режимів робочих органів екструдера.

### 3.8. Висновки

Відповідно до проведених досліджень можна зробити такі висновки.

1. Розроблено узагальнену математичну модель процесу черв'ячної екструзії  $T_{пМ}$  з використанням вторинної сировини, яка враховує дійсні геомет-

ричні, швидкісні й температурні параметри робочих органів, склад перероблюваних ТпМ, наявність дисипативних джерел, фазових перетворень, теплообміну з обмежувальними поверхнями, а також розглядає процес у системі координат, що рухається разом з виділеним для аналізу об'ємом, обмеженим одним витком нарізки черв'яка. Це дозволило досліджувати процес як нестационарну двовимірну задачу.

Запропонована модель забезпечує залежно від умов у кожній окремій функціональній зоні екструдера можливість використання розробленої моделі для аналізу процесу в екструдері в цілому, враховуючи умови стикування зазначених зон між собою.

2. Проаналізовано гідродинаміку і теплообмін у виділеному об'ємі, обмеженому одним витком нарізки черв'яка. Показано, що в запропонованій моделі з обертовим черв'яком максимальна інтенсивність дисипації спостерігається біля поверхні черв'яка, в той час як традиційна модель з обертовим циліндром («плоскопаралельна обернена модель») визначає максимальну інтенсивність дисипації біля поверхні циліндра. При цьому зі збільшенням відхилення поведінки перероблюваного матеріалу від ньютонівської, що характерно для ТпМ з використанням вторинної сировини, нерівномірність дисипації по висоті робочого каналу екструдера збільшується. Під час переробки зазначених матеріалів, які характеризуються підвищеною термочутливістю, ця особливість розробленої моделі набуває визначального значення.

3. На основі узагальненої математичної моделі черв'ячної екструзії розроблено математичні моделі та алгоритми розрахунку двочерв'ячних екструдерів з одно- і різноспрямованим обертанням черв'яків, в яких враховано реальні умови на обмежувальних поверхнях робочих органів, уточнено методику визначення дисипативних джерел енергії, а також джерел енергії, пов'язаних з перетвореннями в об'ємі маси.

4. Визначено та досліджено вплив зазначених факторів на енергосилові параметри процесу екструзії. Показано, що з відхиленням поведінки перероблюваного матеріалу від ньютонівської поведінки в робочому каналі черв'яків необхідно використовувати змішувальні елементи. Також доведено, що температурні поля в об'ємі перероблюваного матеріалу визначаються в першу чергу інтенсивністю дисипації енергії в певних точках об'єму.

Теоретично доведено та експериментально підтверджено, що на відміну від одночерв'ячної екструзії ТпМ з використанням вторинної сировини, під час їх переробки на двочерв'ячних екструдерах для підтримання належних умов процесу спочатку необхідне інтенсивне зовнішнє підведення енергії з поступовим наступним охолодженням черв'яка й циліндра.

5. Створені за розробленими моделями алгоритми апробовані для розрахунку лабораторних і промислових екструдерів. Спроектвані й виготовлені з урахуванням результатів розрахунку черв'яки впроваджені у промислових лі-

нях переробки ТпМ з використанням вторинної сировини. Надані рекомендації щодо енергоефективних режимів процесу черв'ячної екструзії забезпечили підвищення продуктивності і зменшення енергоємності відповідного обладнання, а також поліпшило якість одержуваних матеріалів і виробів (ВАТ «НВП „Більшовик”», ВАТ «Київхімволокно», ВКФ «ПоліЕк», НВП «Пластотехніка», ТОВ «Ековторполімер», ПП «НВП „Укрсклопром”», ТОВ «Ізофол», м. Київ; ЗАТ «Средневожский завод полимерных изделий», м. Тольятті, Російська Федерація, та ін.).

Основні наукові результати розділу 3 опубліковані в працях [24, 124, 125, 289, 290, 294–307].

---

---

## **4. МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІШУВАЛЬНОГО І ВАЛКОВОГО ОБЛАДНАННЯ**

### **4.1. Класифікація змішувального обладнання і вибір показників якості процесу змішування**

Однією зі стадій одержання виробів з ТпМ з використанням вторинної сировини, що визначають їх якість, є процес змішування – технологічний процес, який застосовують для введення в ТпМ одного або декількох компонентів, що цілеспрямовано змінюють його властивості.

Змішувачі для високов'язких середовищ (середовища, ефективна в'язкість яких зазвичай перевищує 0,01 МПа·с [119]), до яких належить більшість ТпМ у в'язкоплинному стані, класифікують за різними показниками [103, 117, 119, 180, 199 та ін.]. Узагальнену класифікацію таких змішувачів наведено на рис. 4.1.

Як зазначалося в підрозд. 1.3, серед змішувального обладнання найбільшого поширення у високопродуктивних технологічних лініях з переробки ТпМ з використанням вторинної сировини набули роторні змішувачі й вальці, які відрізняються високою продуктивністю, універсальністю та достатньою ефективністю.

Основне призначення змішувального обладнання – забезпечення одержуваної термопластичної композиції необхідної якості змішення, яка пов'язана з кількісним описом стану суміші. У більшості випадків кожний з розподілених у полімерної матриці компонентів суміші можна уявити як множину умовних частинок певного розміру [33]. Для аналізу складу суміші такий підхід дає можливість застосовувати методи статистичного аналізу. Оцінка якості змішення за

допомогою статистичних критеріїв здійснюється обробленням даних, отриманих під час аналізу проб, відібраних у масі готової суміші [88].

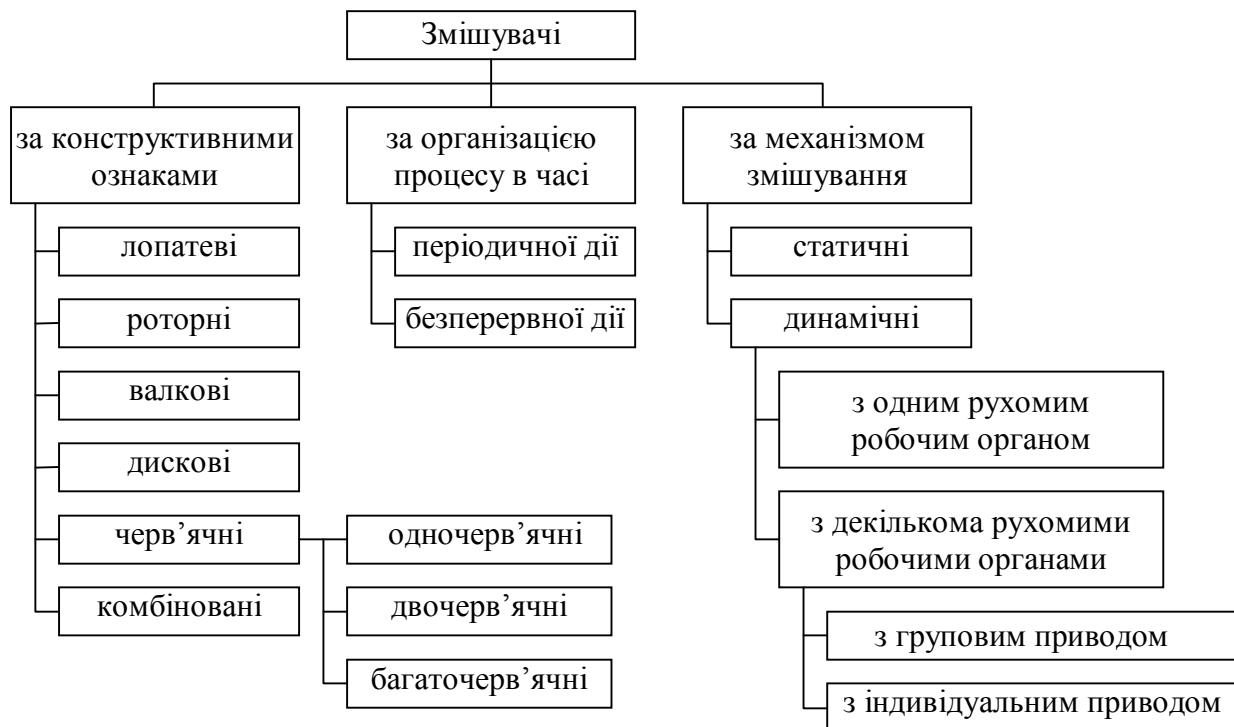


Рис. 4.1. Схема класифікації змішувачів

Як міру відхилення реальної суміші від стану ідеальної використовують такі критерії як індекс змішення, критерій Лейсі, інтенсивність розділу та коефіцієнт неоднорідності [88]. За допомогою перших двох критеріїв визначають ступінь наближення до граничного технологічно можливого стану випадкової суміші, одержуваної за умови нескінченно тривалого оброблення. Два же останні критерії представляють собою порівняння з ідеальним станом суміші – системою з рівномірно розподіленими компонентами.

Застосування статистичних критеріїв потребує виконання вимірювань на реальних сумішах і не дає можливості безпосередньо за їх участі прогнозувати результат змішування теоретично. Тому особливого значення набуває використання нестатистичних критеріїв, які ґрунтуються на визначенні деформації, накопиченої розплавом, температурної неоднорідності розплаву та ін. [180, 189, 308].

Одним з найпоширеніших нестатистичних критеріїв є загальна (накопичена сумішшю протягом змішування) деформація зсуву  $\gamma_{\Sigma}$ , яка дорівнює добутку середньої швидкості зсуву  $\bar{\gamma}$  на тривалість зсуву  $t$  [189, 210]:

$$\gamma_{\Sigma} = \bar{\gamma}t.$$

Більшість методик визначення загальної деформації зсуву сумішей, одержуваних у роторних змішувачах і на вальцях [88, 119, 180, 213], відрізняються

значною складністю, внаслідок чого їх досить важко застосовувати на практиці, що потребує розробки методик, зручних для практичного використання.

## 4.2. Моделювання роторних змішувачів

### 4.2.1. Загальні особливості моделювання

Схему процесу деформування одержуваної композиції в робочій камері змішувача з овальними роторами наведено на рис. 1.10.

З метою спрощення моделювання процесу приймаємо припущення відповідно до п. 1.4.1 [101, 102, 117–119, 206, 207], при цьому аналіз течії матеріалу виконуємо розгортанням на площину робочої поверхні ротора на ділянках послідовно розташованих максимального (утворюваного основою ротора й стінкою змішувальної камери), серпоподібного й мінімального проміжків (рис. 4.2, також див. рис. 1.11).

Оскільки під час усталеного процесу змішування коефіцієнт завантаження змішувача становить 0,47...0,85 [117], то інтенсивного деформування одержуваної композиції в максимальному проміжку (див. рис. 1.10, 4.2) не відбувається, а активна дія роторів на композицію здійснюється лише в серпоподібному й мінімальному проміжках.

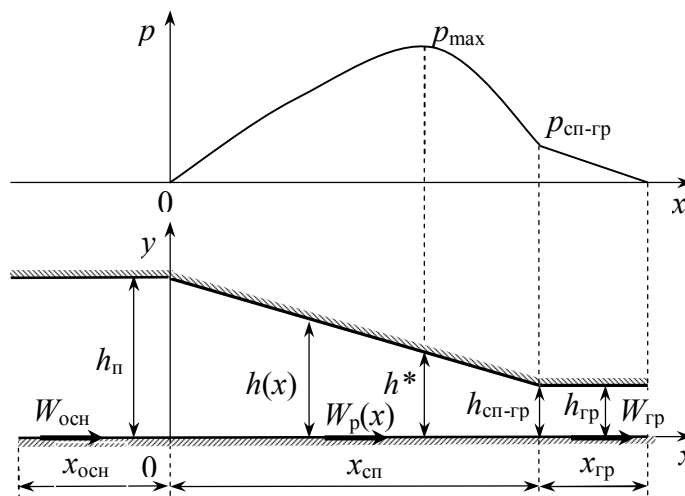


Рис. 4.2. Схема максимального, серпоподібного й мінімального проміжків після розгортання:  $x_{\text{гр}}$ ,  $x_{\text{осн}}$  – довжина мінімального й максимального проміжків;  $W_{\text{гр}}$ ,  $W_{\text{осн}}$  – лінійні швидкості гребеня та основи ротора;  $h_{\text{сп-гр}}$ ,  $p_{\text{сп-гр}}$  – висота проміжку і тиск у місці переходу серпоподібного проміжку в мінімальний

### 4.2.2. Ньютонівська модель рідини

З урахуванням прийнятих припущень рівняння, що описують процес течії матеріалу, поведінка якого описується законом внутрішнього тертя Ньютона, в серпоподібному й мінімальному проміжках між поверхнями ротора й

робочої камери (рівняння руху, нерозривності, а також реологічне рівняння), набувають вигляду:

$$-\frac{dp}{dx} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad (4.1)$$

$$G_V = \int_0^h w_x dy; \quad (4.2)$$

$$\tau_{xy} = \mu_{\text{ТПМ}} \frac{\partial w_x}{\partial y}, \quad (4.3)$$

де  $G_V$  – об’ємна витрата ТПМ крізь одиницю ширини проміжку;  $w_x$  – складова швидкості елементарного об’єму перероблюваного ТПМ;  $\mu_{\text{ТПМ}}$  – ефективна в’язкість ТПМ.

Граничні умови по швидкості в серпоподібному й мінімальному проміжках:

$$w_x|_{y=0} = W_p(x); \quad w_x|_{y=h} = 0; \quad (4.4)$$

$$w_x|_{y=0} = W_{\text{ГР}}; \quad w_x|_{y=h} = 0. \quad (4.5)$$

Інтегруючи рівняння (4.1) з урахуванням умов (4.4) і (4.5), отримаємо вирази для складової швидкості вздовж каналу, утвореного послідовно розташованими серпоподібним і мінімальним проміжками:

$$w_x = W_p(x) \left(1 - \frac{y}{h}\right) - \frac{1}{2\mu_{\text{ТПМ}}} \frac{dp}{dx} (yh - y^2); \quad (4.6)$$

$$w_x = W_{\text{ГР}} \left(1 - \frac{y}{h}\right) - \frac{1}{2\mu_{\text{ТПМ}}} \frac{dp}{dx} (yh - y^2). \quad (4.7)$$

Спочатку розглянемо серпоподібний проміжок.

Згідно з гідродинамічною теорією мащення диференціальне рівняння тиску в шарі деформованого матеріалу має вигляд [309]

$$\frac{d}{dx} \left( h^3 \frac{dp}{dx} \right) = 6\mu_{\text{ТПМ}} W_p(x) \frac{dh}{dx}.$$

Після інтегрування отримаємо

$$h^3 \frac{dp}{dx} = 6\mu_{\text{ТПМ}} W_p(x) h + C,$$

де  $C$  – стала інтегрування.

Позначимо висоту проміжку, що відповідає максимальному тиску  $p_{\text{max}}$ , через  $h^*$  (див. рис. 4.2):

$$\frac{dp}{dx} \Big|_{h=h^*} = 0. \quad (4.8)$$

Тоді, враховуючи (4.8), матимемо

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6\mu_{\text{тпм}}W_p(x)}{h^2} \left(1 - \frac{h^*}{h}\right). \quad (4.9)$$

Підставляючи (4.9) у (4.6), отримаємо

$$w_x = W_p(x) \left(1 - \frac{y}{h}\right) \left[1 - \frac{3y}{h} \left(1 - \frac{h^*}{h}\right)\right]. \quad (4.10)$$

Оскільки

$$h = h_{\text{п}} - mx, \quad (4.11)$$

де  $m = (h_{\text{п}} - h_{\text{гр}})/x_{\text{сп}}$  (див. рис. 4.2),

то рівняння (4.9) для градієнта тиску набуває вигляду

$$\frac{dp}{dh} = -\frac{6\mu_{\text{тпм}}W_p(x)}{mh^2} \left(1 - \frac{h^*}{h}\right). \quad (4.12)$$

Граничні умови по тиску в серпоподібному проміжку:

$$p|_{h=h_{\text{п}}} = 0; \quad p|_{h=h_{\text{сп-гр}}} = p_{\text{сп-гр}}.$$

За цих умов

$$h^* = \frac{2h_{\text{п}}^2h_{\text{гр}}^2}{h_{\text{п}}^2 - h_{\text{гр}}^2} \left( \frac{1}{h_{\text{гр}}} - \frac{1}{h_{\text{п}}} - \frac{mp_{\text{сп-гр}}}{6\mu_{\text{тпм}}W_p(x)} \right). \quad (4.13)$$

Ураховуючи (4.12), можна визначити розподіл тиску в серпоподібному проміжку залежно від його поточної висоти  $h$

$$p_{\text{сп}} = \frac{6\mu_{\text{тпм}}W_p(x)}{m} \left[ \frac{1}{h} - \frac{1}{h_{\text{п}}} - \frac{h^*}{2} \left( \frac{1}{h^2} - \frac{1}{h_{\text{п}}^2} \right) \right] \quad (4.14)$$

або

$$p_{\text{сп}} = \frac{6\mu_{\text{тпм}}W_p(x)}{m} \left[ \frac{1}{h} - \frac{1}{h_{\text{гр}}} - \frac{h^*}{2} \left( \frac{1}{h^2} - \frac{1}{h_{\text{гр}}^2} \right) \right] + p_{\text{сп-гр}}. \quad (4.15)$$

Об'ємна витрата матеріалу крізь одиницю ширини каналу визначається залежністю (4.2). З іншого боку, враховуючи умови (4.4) і (4.8), матимемо

$$G_V = \frac{h^* W_p|_{h=h^*}}{2}. \quad (4.16)$$

Для першого наближення під час аналізу процесу змішування можна прийняти  $h^* = 2h_{\text{п}}h_{\text{гр}}/(h_{\text{п}} + h_{\text{гр}})$  [309].

Тепер розглянемо мінімальний проміжок.

Вираз для складової швидкості вздовж мінімального проміжку має вигляд (4.7), тоді із врахуванням (4.2) об'ємна витрата матеріалу крізь одиницю ширини проміжку становитиме

$$G_V = \int_0^{h_{\text{гр}}} w_x dy = \frac{W_{\text{гр}} h_{\text{гр}}}{2} - \frac{h_{\text{гр}}^3}{12\mu_{\text{ТПМ}}} \frac{dp}{dx}. \quad (4.17)$$

Беручи до уваги (4.17) і сталість витрати крізь послідовно розташовані проміжки, з урахуванням (4.16) отримуємо вираз для градієнта тиску вздовж мінімального проміжку

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6\mu_{\text{ТПМ}}}{h_{\text{гр}}^3} (h_{\text{гр}} W_{\text{гр}} - h^* W_p|_{h=h^*}). \quad (4.18)$$

Граничні умови по тиску в мінімальному проміжку:

$$p|_{x=0} = p_{\text{сп-гр}}; \quad p|_{x=x_{\text{гр}}} = 0.$$

Оскільки тиск на початку мінімального проміжку становить  $p_{\text{сп-гр}}$ , а в його кінці надлишковий тиск відсутній, знайдемо вираз для визначення тиску на межі серпоподібного й мінімального проміжків:

$$p_{\text{сп-гр}} = \frac{6\mu_{\text{ТПМ}}}{h_{\text{гр}}^3} (h_{\text{гр}} W_{\text{гр}} - h^* W_p|_{h=h^*}) x_{\text{гр}}. \quad (4.19)$$

У вирази (4.14), (4.15) і (4.19) входить величина  $h^*$ , яка сама залежить від тиску  $p_{\text{сп-гр}}$  (див. (4.13)), тому тиск на межі серпоподібного й мінімального проміжків визначають методом послідовних наближень.

Тепер розглянемо характер навантаження ротора.

Сила тиску, що діє на одиницю ширини лопаті по нормалі до поверхні ротора з боку композиції, оброблюваної в серпоподібному проміжку, становить

$$F_{\text{сп}} = \int_0^{x_{\text{сп}}} p_{\text{сп}}(x) dx = -\frac{1}{m} \int_{h_{\text{п}}}^{h_{\text{гр}}} p_{\text{сп}}(h) dh.$$

Беручи до уваги вираз (4.14), отримаємо

$$F_{\text{сп}} = \frac{6\mu_{\text{ТПМ}} W_p(x)}{m^2} \left[ \ln \frac{h_{\text{п}}}{h_{\text{гр}}} - \frac{h_{\text{п}} - h_{\text{гр}}}{h_{\text{п}}} \left( 1 + \frac{h^*(h_{\text{п}} - h_{\text{гр}})}{2h_{\text{п}} h_{\text{гр}}} \right) \right]. \quad (4.20)$$

За аналогією питома сила тиску, що діє по нормалі на ротор з боку композиції, оброблюваної в мінімальному проміжку:

$$F_{\text{гр}} = \int_0^{x_{\text{гр}}} p_{\text{гр}}(x) dx.$$

Беручи до уваги вираз (4.18), отримаємо

$$F_{\text{гр}} = \frac{6\mu_{\text{ТПМ}}}{h_{\text{гр}}^3} (h_{\text{гр}} W_{\text{гр}} - h^* W_p|_{h=h^*}) x_{\text{гр}}^2. \quad (4.21)$$

Враховуючи (4.3) і (4.6), напруження зсуву на рухомій поверхні серпо-

подібного проміжку (при  $y=0$ ) становитимуть

$$\tau_{\text{сп}}|_{y=0} = -\frac{\mu_{\text{тпм}} W_p(x)}{h} - \frac{h}{2} \frac{dp}{dx}.$$

Скориставшись залежностями (4.9) і (4.10), матимемо [309]

$$\tau_{\text{сп}}|_{y=0} = -\frac{\mu_{\text{тпм}} W_p(x)}{h} \left( 4 - \frac{3h^*}{h} \right). \quad (4.22)$$

Сила тертя, що діє на одиницю ширини лопаті дотично до поверхні ротора з боку композиції, оброблюваної в серпоподібному проміжку, становитиме

$$P_{\text{сп}} = \int_0^{x_{\text{сп}}} \tau_{\text{сп}}|_{y=0} dx = -\frac{1}{m} \int_{h_{\text{п}}}^{h_{\text{гр}}} \tau_{\text{сп}}|_{y=0} dh.$$

Після інтегрування попереднього виразу з урахуванням (4.22) отримаємо

$$P_{\text{сп}} = -\frac{\mu_{\text{тпм}} W_p(x)}{m} \left( 4 \ln \frac{h_{\text{п}}}{h_{\text{гр}}} - \frac{3h^* (h_{\text{п}} - h_{\text{гр}})}{h_{\text{п}} h_{\text{гр}}} \right). \quad (4.23)$$

Питому силу тертя, що діє на ротор з боку композиції, оброблюваної в мінімальному проміжку, визначимо скориставшись залежністю (4.22). Беручи до уваги, що  $h = h_{\text{гр}}$ , отримаємо:

$$P_{\text{гр}} = -\frac{\mu_{\text{тпм}} W_{\text{гр}}}{h_{\text{гр}}} \left( 4 - \frac{3h^*}{h_{\text{гр}}} \right) x_{\text{гр}}. \quad (4.24)$$

Для зручності розрахунків сили, що діють на кожну лопать обох роторів можна замінити статично еквівалентною системою сил: результуючими поперечними силами  $F_{\Sigma_{\text{дш}}}$ ,  $F_{\Sigma_{\text{кш}}}$ ,  $F_{\Sigma_{\text{дт}}}$  і  $F_{\Sigma_{\text{кт}}}$ , а також результуючими моментами  $M_{\Sigma_{\text{ш}}}$  і  $M_{\Sigma_{\text{т}}}$ , враховуючи при цьому відповідно до (4.20), (4.21), (4.23) і (4.24) питомі поперечні й дотичні сили, масу ротора, а також довжини короткої  $L_{\text{к}}$  і довгої  $L_{\text{д}}$  лопатей ротора (індекси «д» і «к» стосуються довгої й короткої лопатей як швидкохідного («ш»), так і тихохідного («т») роторів).

Точки прикладання зазначених результуючих сил до ротора визначаються положенням центра тяжіння площі, що обмежена віссю координати  $x$  і кривою відповідного питомого навантаження (тиску, дотичних напружень) у зоні деформування [207]. Координати зазначених точок можна визначити за методикою, наведеною в праці [310]. Напрями дії результуючих сил визначаються формою поверхні ротора в місці їх прикладення.

Крутні моменти  $M_{\Sigma_{\text{ш}}}$  і  $M_{\Sigma_{\text{т}}}$ , необхідні для обертання швидко- і тихохідного роторів, визначають як суму добутків поперечних сил (з урахуванням напрямку дії кожної сили), що діють на обидві лопаті відповідного ротора, і плечей цих сил:

$$\begin{aligned}
M_{\Sigma_{\text{ш}}} &= \left( F_{\text{сп}} r_{F_{\text{сп}}} + P_{\text{сп}} r_{P_{\text{сп}}} + F_{\text{гр}} r_{F_{\text{гр}}} + P_{\text{гр}} r_{P_{\text{гр}}} \right)_{\text{кш}} L_{\text{к}} + \\
&+ \left( F_{\text{сп}} r_{F_{\text{сп}}} + P_{\text{сп}} r_{P_{\text{сп}}} + F_{\text{гр}} r_{F_{\text{гр}}} + P_{\text{гр}} r_{P_{\text{гр}}} \right)_{\text{дш}} L_{\text{д}}; \\
M_{\Sigma_{\text{т}}} &= \left( F_{\text{сп}} r_{F_{\text{сп}}} + P_{\text{сп}} r_{P_{\text{сп}}} + F_{\text{гр}} r_{F_{\text{гр}}} + P_{\text{гр}} r_{P_{\text{гр}}} \right)_{\text{кт}} L_{\text{к}} + \\
&+ \left( F_{\text{сп}} r_{F_{\text{сп}}} + P_{\text{сп}} r_{P_{\text{сп}}} + F_{\text{гр}} r_{F_{\text{гр}}} + P_{\text{гр}} r_{P_{\text{гр}}} \right)_{\text{дт}} L_{\text{д}},
\end{aligned}$$

де  $r_i$  – плечі поперечних сил відносно поздовжньої осі відповідного ротора.

Тоді потужність, необхідна для обертання обох роторів, становитиме

$$N_{\text{пр}} = \frac{M_{\Sigma_{\text{ш}}} \omega_{\text{ш}} + M_{\Sigma_{\text{т}}} \omega_{\text{т}}}{\eta_{\text{пр}}},$$

де  $N_{\text{пр}}$  – потужність привода роторів;

$\eta_{\text{пр}}$  – к.к.д. привода роторів.

У наведених вище залежностях для визначення енергосилових параметрів процесу змішування зроблено припущення про сталість в'язкості у відповідному проміжку каналу. При цьому в'язкість залежить у першу чергу від абсолютної величини середньої швидкості зсуву. Знайдемо вираз для середньої швидкості зсуву перероблюваного матеріалу в серпоподібному  $\bar{\gamma}_{\text{сп}}$  і мінімальному  $\bar{\gamma}_{\text{гр}}$  проміжках.

Для будь-якого поперечного перерізу серпоподібного проміжку з поточною поздовжньою координатою  $x$  швидкість зсуву визначається залежністю (див. (4.10))

$$\dot{\gamma}_{\text{сп}} = \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)_{\text{сп}} = -\frac{W_{\text{р}}(x)}{h} \left[ 1 + 3 \left( 1 - \frac{h^*}{h} \right) \left( 1 - \frac{2y}{h} \right) \right],$$

причому поточну висоту проміжку визначають за залежністю (4.11).

Тоді абсолютна величина середньої швидкості зсуву  $\bar{\gamma}_{\text{сп}}$  у серпоподібному проміжку становитиме

$$\bar{\gamma}_{\text{сп}} = \frac{1}{x_{\text{сп}}} \int_0^{x_{\text{сп}}} \int_0^h \frac{1}{h} |\dot{\gamma}_{\text{сп}}| dy dx.$$

Абсолютну величину середньої швидкості зсуву  $\bar{\gamma}_{\text{гр}}$  у мінімальному проміжку можна визначити за формулою

$$\bar{\gamma}_{\text{гр}} = \frac{W_{\text{гр}}}{h_{\text{гр}}}.$$

Також середню в'язкість можна визначити як функцію швидкості зсуву й координати  $y$  (по висоті каналу), після чого використовувати усереднене значення в розглядуваному перерізі каналу [311].

### 4.2.3. Неньютонівська степенева модель рідини

З урахуванням прийнятих у п. 4.2.1 припущень рівняння, що описують процес течії матеріалу, поведінка якого описується степеневим реологічним законом (1.8), у проміжку між поверхнями ротора й робочої камери, матимуть вигляд (4.1), (4.2) з урахуванням реологічного рівняння (1.8), яке для даного випадку набуває вигляду

$$\tau_{yx} = K \left| \frac{\partial w_x}{\partial y} \right|^n \operatorname{sign} \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} \right). \quad (4.25)$$

Граничні умови по швидкості відповідають виразам (4.4) і (4.5).

Після підстановки залежності (4.25) у рівняння руху (4.2) і подальшого його інтегрування з урахуванням граничних умов (4.4) і (4.5) для серпоподібного й мінімального проміжків матимемо

$$w_x = W_p(x) \left( 1 - \frac{y}{h} \right) - \left( \frac{1}{K} \frac{dp}{dx} \right)^{1/n} \frac{n}{1+n} (yh^{1/n} - y^{1/n+1}); \quad (4.26)$$

$$w_x = W_{\text{гр}} \left( 1 - \frac{y}{h} \right) - \left( \frac{1}{K} \frac{dp}{dx} \right)^{1/n} \frac{n}{1+n} (yh^{1/n} - y^{1/n+1}). \quad (4.27)$$

Розглянемо спочатку серпоподібний проміжок.

Беручи до уваги (4.2) і (4.26), отримаємо

$$G_V = \int_0^h \left[ W_p(x) \left( 1 - \frac{y}{h} \right) - \left| \frac{1}{K} \frac{dp}{dx} \right|^{1/n} \frac{n}{1+n} (yh^{1/n} - y^{1/n+1}) \right] dy,$$

а після інтегрування:

$$G_V = \frac{1}{2} W_p(x) h - \left| \frac{1}{K} \frac{dp}{dx} \right|^{1/n} \frac{nh^{1/n+2}}{2(1+n)(1+2n)}. \quad (4.28)$$

Уведемо безрозмірні аналоги змінних  $x$  і  $y$ , які перетворюють серпоподібний проміжок у прямокутний [311]:

$$\xi = \frac{xm}{h_{\Pi}}, \quad \varepsilon = \frac{y}{h}. \quad (4.29)$$

У новій системі координат висота проміжку  $h$  на відстані  $x$  від початку серпоподібного проміжку (див (4.11)), визначається залежністю  $h = h_{\Pi}(1 - \xi)$ .

З урахуванням залежностей (4.29) рівняння (4.28) набуває вигляду:

$$G_V = \frac{1}{2} W_p(\xi) h_{\Pi} (1 - \xi) - \frac{h_{\Pi}^{1/n+2} n}{2K^{1/n} (1+n)(1+2n)} (1 - \xi)^{1/n+2} \left| \frac{m}{h_{\Pi}} \frac{dp}{d\xi} \right|^{1/n}.$$

Тоді градієнт тиску дорівнюватиме

$$\frac{dp}{d\xi} = \frac{K(1+n)^n (1+2n)^n}{mn^n h_{\Pi}^{2n} (1-\xi)^{2n+1}} \left| h_{\Pi} (1-\xi) W_p(\xi) - 2G_V \right|^n \operatorname{sign} [h_{\Pi} (1-\xi) W_p(\xi) - 2G_V]. \quad (4.30)$$

Підставляючи вираз (4.30) у рівняння (4.26) і використовуючи заміну змінних (4.29), отримаємо залежність для визначення швидкісного поля в серпоподібному проміжку:

$$w_x = W_p(\xi) \left( 1 - \varepsilon - \varepsilon \left( 1 - \varepsilon^{1/n} \right) \frac{h_{\Pi}(1 - \xi) - 2G_V/W_p(\xi)(1 + 2n)}{h_{\Pi}(1 - \xi)} \right).$$

Тоді градієнт швидкості  $\partial w_x / \partial y$  становитиме

$$\frac{\partial w_x}{\partial y} = \frac{W_p(\xi)}{h_{\Pi}(1 - \xi)} \left[ -1 - \frac{(1 + 2n)}{h_{\Pi}(1 - \xi)} \left( h_{\Pi}(1 - \xi) - \frac{2G_V}{W_p(\xi)} \right) \left( 1 - \left( \frac{1 + n}{n} \right) \varepsilon^{1/n} \right) \right]. \quad (4.31)$$

Інтегруючи рівняння (4.30) у межах  $[0; \xi]$ , можна визначити розподіл тиску в серпоподібному проміжку:

$$p = \frac{K(1 + n)^n(1 + 2n)^n}{mn^n h_{\Pi}^{2n}} \times \int_0^{\xi} \left| h_{\Pi}(1 - \xi)W_p(\xi) - 2G_V \right| \text{sign} \left[ h_{\Pi}(1 - \xi)W_p(\xi) - 2G_V \right] \frac{1}{(1 - \xi)^{2n+1}} d\xi. \quad (4.32)$$

Аналізуючи рівняння (4.30), можна показати, що при поточному значенні  $\xi$  і глибині проміжку  $h \geq 2G_V/W_p(\xi)$  тиск у проміжку збільшується, а при  $h < 2G_V/W_p(\xi)$  – зменшується.

Величину  $h^*$  для аналізу процесу в роторному змішувачі (переважно за умови  $n \leq 0,25$ ) можна приблизно визначити із залежністю [101]

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{(1+n)/n} \left( \frac{h_{\Pi}}{h_{\kappa}} - \frac{1+2n}{2n} \right) + \frac{2^n}{1+2n} \left[ 1 - \left( \frac{2h_{\kappa}}{h^*} - 1 \right)^{-n} \right] +}{+ \frac{2^n n}{1+2n} \left[ \left( \frac{1+n}{n} \right)^n - 1 \right] - \frac{2^{1+n} n^{2+n}}{(1+n)(1+2n)^{1+n}} \left[ \left( \frac{1+n}{n} \right)^{1+n} - 1 \right]} = 0. \end{aligned}$$

або за формулами  $h^* = 2h_{\Pi}h_{\Gamma p}/(h_{\Pi} + h_{\Gamma p})$  [309] чи  $h^* = 1,67h_{\Gamma p}$  [101, 312].

Тепер розглянемо мінімальний проміжок.

Крізь одиницю ширини мінімального проміжку, утвореного гребенем ротора і стінкою півкамери, внаслідок нерозривності потоку матеріал проходить з об'ємною витратою, яка дорівнює об'ємній витраті матеріалу крізь серпоподібний проміжок. Беручи до уваги (4.2) і (4.27), отримаємо

$$G_V = \frac{1}{2} W_{\Gamma p} h_{\Gamma p} - \left| \frac{1}{K} \frac{dp}{dx} \right|^{1/n} \frac{nh_{\Gamma p}^{1/n+2}}{2(1+n)(1+2n)}.$$

Тоді градієнт тиску вздовж мінімального проміжку становитиме

$$\frac{dp}{dx} = \frac{K}{h_{\text{гр}}^{1+2n}} \left( \frac{(1+n)(1+2n)}{n} \right)^n |W_{\text{гр}} h_{\text{гр}} - 2G_V|^n \text{sign}(W_{\text{гр}} h_{\text{гр}} - 2G_V). \quad (4.33)$$

Оскільки тиск на вході ТпМ у мінімальний проміжок становить  $p_{\text{сп-гр}}$ , а на його виході надлишковий тиск відсутній, то вираз для визначення тиску на межі серпоподібного й мінімального проміжків матиме вигляд

$$p_{\text{сп-гр}} = \frac{K}{h_{\text{гр}}^{1+2n}} \left( \frac{(1+n)(1+2n)}{n} \right)^n |W_{\text{гр}} h_{\text{гр}} - 2G_V|^n x_{\text{гр}}.$$

При цьому необхідно зауважити, що умовою стикування двох послідовних проміжків – мінімального й серпоподібного – є рівність тисків на виході з першого і на вході у другий ( $p = p_{\text{сп-гр}}$ ), тому довжину активного деформування матеріалу в серпоподібному проміжку  $x_{\text{сп}}$  визначають методом послідовних наближень.

Визначимо розпирні зусилля, що діють на даний ротор і стінку відповідної півкамери з боку матеріалу, оброблюваного як у серпоподібному, так і в мінімальному проміжках.

Для визначення розпирних зусиль, що діють у серпоподібному проміжку на одиниці довжини лопаті ротора, зінтегруємо вираз (4.30) по його робочій поверхні:

$$F_{\text{сп}} = \int_0^{x_{\text{сп}}} p(x) dx = \frac{h_{\text{п}}}{m} \int_0^{\xi_{\text{к}}} p(\xi) d\xi.$$

Підставляючи у цей вираз залежність (4.32), отримаємо:

$$F = \frac{K(1+n)^n(1+2n)^n}{m^2 n^n h_{\text{п}}^{2n-1}} \int_0^{\xi_{\text{к}}} \int_0^{\xi} |h_{\text{п}}(1-\xi)W_{\text{п}}(\xi) - 2G_V|^n \frac{1}{(1-\xi)^{2n+1}} d\xi d\xi.$$

За аналогією визначимо розпирні зусилля, що діють у мінімальному проміжку, скориставшись для цього залежністю (4.33):

$$F_{\text{гр}} = \frac{K}{2h_{\text{гр}}^{1+2n}} \left( \frac{(1+n)(1+2n)}{n} \right)^n |W_{\text{гр}} h_{\text{гр}} - 2G_V|^n x_{\text{гр}}^2.$$

Сила тертя, що діє з боку композиції в серпоподібному проміжку на одиницю довжини лопаті ротора дотично до його поверхні, з урахуванням (4.25) і (4.31) становить

$$\begin{aligned} P_{\text{сп}} &= \int_0^{x_{\text{сп}}} \tau_{\text{сп}|y=0} dx = \frac{h_{\text{п}}}{m} \int_0^{\xi_{\text{сп}}} \tau_{\text{сп}|\varepsilon=0} d\xi = \\ &= -\frac{K}{mh_{\text{п}}^{n-1}} \int_0^{\xi_{\text{сп}}} \left| -W_{\text{п}}(\xi) - \frac{(1+2n)}{h_{\text{п}}(1-\xi)} (h_{\text{п}}(1-\xi)W_{\text{п}}(\xi) - 2G_V) \right|^n \times \end{aligned}$$

$$\times \text{sign} \left( -W_p(\xi) - \frac{(1+2n)}{h_{\Pi}(1-\xi)} (h_{\Pi}(1-\rho)W_p(\xi) - 2G_V) \right) \frac{1}{(1-\xi)^n} d\xi.$$

Силу тертя, що діє з боку композиції в мінімальному проміжку на ротор дотично до поверхні його гребеня, з достатнім ступенем точності можна визначити за залежністю

$$P_{\text{гр}} = \int_0^{x_{\text{гр}}} \tau_{\text{гр}}|_{y=0} dx = Kx_{\text{гр}} \frac{W_{\text{гр}}^n}{h_{\text{гр}}^n}.$$

Повні розпірні зусилля, що діють на кожний з роторів, можна визначити за методикою, що розглянута в п. 4.2.2.

Питома потужність дисипації, значення якої необхідне для розрахунку систем охолодження роторів і камери, визначається виразом

$$q_{\text{дис}} = \tau_{yx} \left| \frac{\partial w_x}{\partial y} \right|. \quad (4.34)$$

З урахуванням (4.31) для серпоподібного проміжку

$$q_{\text{дис сп}} = \frac{KW_p(\xi)^{n+1}}{h_{\Pi}^{n+1}(1-\xi)^{n+1}} \left| -1 - (1+2n) \left( 1 - \frac{2G_V}{h_{\Pi}W_p(\xi)(1-\xi)} \right) \left( 1 - \frac{1+n}{n} \varepsilon^{1/n} \right) \right|^{n+1}. \quad (4.35)$$

Інтегруючи це рівняння по всьому об'єму матеріалу, що деформується в серпоподібному проміжку, можна визначити загальну потужність дисипації в серпоподібному проміжку:

$$Q_{\text{дис сп}} = \int_0^{L_p} \int_0^h \int_0^{x_{\text{сп}}} q_{\text{дис сп}} dx dy dz,$$

де  $L_p$  – довжина робочої поверхні ротора вздовж його поздовжньої осі.

З урахуванням виразу (4.34) і (4.35) отримаємо:

$$Q_{\text{дис сп}} = \frac{L_p K}{mh_{\Pi}^{n-1}} \int_0^1 \int_0^1 \left| -W_p(\xi) - \frac{(1+2n)}{h_{\Pi}(1-\xi)} (h_{\Pi}(1-\xi)W_p(\xi) - 2G_V) \left( 1 - \left( \frac{1+n}{n} \right) \varepsilon^{1/n} \right) \right|^{n+1} \times \\ \times \frac{1}{(1-\xi)^n} d\xi d\varepsilon. \quad (4.36)$$

Розподіл величини потужності дисипації в серпоподібному проміжку між ротором і камерою (для подальшого розрахунку їх систем охолодження) можна здійснити, якщо вираз (4.36) інтегрувати по координаті  $\xi$  у проміжках  $[0; 0,5]$  і  $[0,5; 1]$  відповідно.

У мінімальному проміжку потужність, що витрачається на деформацію матеріалу, з достатнім ступенем точності можна визначити за залежністю

$$Q_{\text{дис гр}} = L_p K x_{\text{гр}} \frac{W_{\text{гр}}^{n+1}}{h_{\text{гр}}^n}.$$

При цьому величина  $Q_{\text{дис гр}}$  розподіляється між відповідними ротором і півкамерою змішувальної камери рівномірно:  $Q_{\text{дис гр р}} = Q_{\text{дис гр зк}} = Q_{\text{дис гр}}/2$ .

Загальні значення потужності дисипації з боку роторів (швидко- і тихохідного) і камери становлять:

$$\begin{aligned} Q_{\text{дис } \Sigma \text{ ш}} &= Q_{\text{дис сп ш}} + Q_{\text{дис гр ш}}; \\ Q_{\text{дис } \Sigma \text{ т}} &= Q_{\text{дис сп т}} + Q_{\text{дис гр т}}; \\ Q_{\text{дис } \Sigma \text{ зк}} &= (Q_{\text{дис сп к}} + Q_{\text{дис гр к}})_{\text{ш}} + (Q_{\text{дис сп к}} + Q_{\text{дис гр к}})_{\text{т}}; \end{aligned}$$

Потужність привода роторів змішувача можна визначити за залежністю

$$N_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{дис } \Sigma \text{ ш}} + Q_{\text{дис } \Sigma \text{ т}} + Q_{\text{дис } \Sigma \text{ зк}}}{\eta_{\text{пр}}}.$$

Аналогічно можна визначити і потужність привода роторів змішувача для ньютонівської моделі рідини (див. п. 4.2.2).

З метою перевірки адекватності розробленої математичної моделі роторного змішувача було зроблено розрахунок процесу приготування композиції в змішувачах 250/40 ГОСТ 11996 (РСВД-140-40 [117]) і 250/20 ГОСТ 11996 (РСВД-140-20 [117]) і порівняння його результатів з результатами розрахунку за іншими відомими методиками [102, 179, 180, 206], а також результатами вимірювання потужності приводного двигуна безпосередньо в промислових умовах [117].

Основні параметри змішувачів:

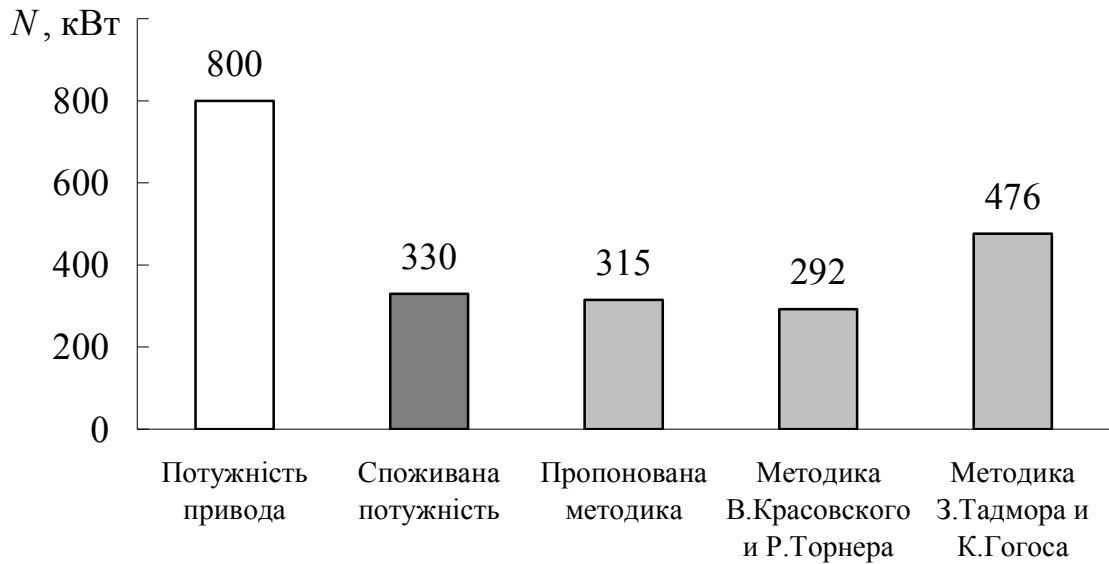
– змішувач 250/40 ГОСТ 11996: вільний об'єм змішувальної камери 250 дм<sup>3</sup>, робочий об'єм 140 дм<sup>3</sup>; номінальні частоти обертання роторів 40 об/хв і 33,5 об/хв; потужність електродвигуна приводу роторів 800 кВт;

– змішувач 250/20 ГОСТ 11996: вільний об'єм змішувальної камери 250 дм<sup>3</sup>, робочий об'єм 140 дм<sup>3</sup>; номінальні частоти обертання роторів 20 об/хв і 17 об/хв; потужність електродвигуна приводу роторів 315 кВт.

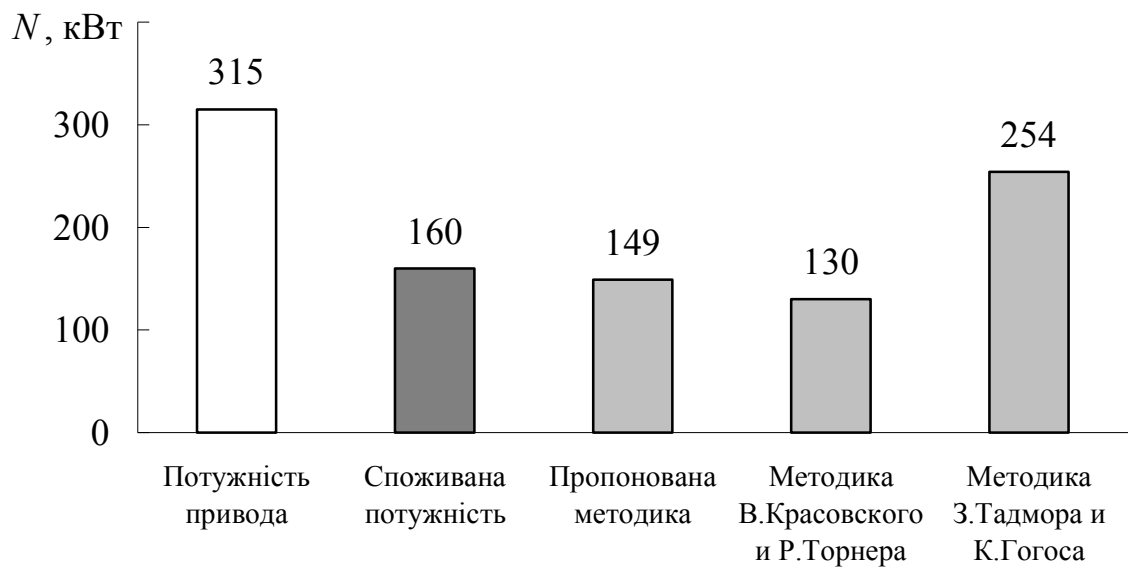
Аналіз проводили для гумової суміші шинного виробництва з такими властивостями:  $K_0 = 80000 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ ;  $n = 0,2$ ;  $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_p = 1850 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ ;  $\lambda = 0,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  [88, 179] (рис. 4.3).

Як видно з рис. 4.3 для змішувача 250/40 похибка визначення потужності привода за запропонованою методикою становить 4,5 %, у той час як розрахована за методикою В. Красовського і Р. Торнера [179, 180, 206] вона дорівнює 11,5 %, а за методикою З. Тадмора і К. Гогоса [102] – 30,7 %. Для змішувача 250/20 зазначені величини мають такі значення: 6,9 %, 18,8 % і 37 %, відповідно.

Таким чином, порівняння теоретичних та експериментальних даних, дає можливість зробити висновок про адекватність розробленої математичної моделі результатам експлуатації промислового обладнання.



*a*



*б*

Рис. 4.3. Порівняння результатів розрахунку роторного змішувача за методиками різних авторів з даними експлуатації промислових змішувачів:  
*a* – 250/40; *б* – 250/20

#### 4.2.4. Визначення тривалості змішування

Як було зазначено в п. 4.1, одним з критеріїв якості змішення термопластичної композиції є загальна деформація зсуву  $\gamma_{\Sigma}$ , оптимальна величина якої, що забезпечує одержання в змішувачі суміші високої якості і встановлено численними дослідями, становить 2000–2500 [88, 189].

Тоді тривалість змішування  $t$ , необхідний для накопичення деформації  $\gamma_{\Sigma}$  матеріалом загальною масою  $M_{\Sigma}$ , що перебуває у змішувачі, становить [313]

$$t = \frac{M_{\Sigma} \gamma_{\Sigma}}{M \bar{\gamma}},$$

де  $M_{\Sigma} = \varphi_{зк} V_{зк} \rho_{тпм}$ ;  $\varphi_{зк}$  – коефіцієнт завантажування змішувальної камери;  $V_{зк}$  – вільний об'єм змішувальної камери;  $M$  – маса матеріалу, що активно деформується в дану мить часу в серпоподібному і мінімальному проміжках обох півкамер ( $M_{ш}$  і  $M_{т}$  відповідно):

$$M = M_{ш} + M_{т} = [(V_{сп} + V_{гр}) \rho_{тпм}]_{т} + [(V_{сп} + V_{гр}) \rho_{тпм}]_{ш} = 2L \rho_{тпм} (S_{сп} + S_{гр}),$$

де  $V_{сп}$  і  $V_{гр}$  – об'єми серпоподібного й мінімального проміжків;  $S_{сп}$  і  $S_{гр}$  – площі поперечного перерізу серпоподібного й мінімального проміжків.

Середні швидкості зсуву в півкамерах швидкохідного й тихохідного роторів визначатимемо за залежностями:

$$\bar{\gamma}_{ш} = \left( \frac{\bar{\gamma}_{сп} S_{сп} + \bar{\gamma}_{гр} S_{гр}}{S_{сп} + S_{гр}} \right)_{ш}; \quad \bar{\gamma}_{т} = \left( \frac{\bar{\gamma}_{сп} S_{сп} + \bar{\gamma}_{гр} S_{гр}}{S_{сп} + S_{гр}} \right)_{т},$$

а середню швидкість зсуву  $\bar{\gamma}$  у змішувальній камері – як середнє арифметичне величин  $\bar{\gamma}_{ш}$  і  $\bar{\gamma}_{т}$ :

$$\bar{\gamma} = \frac{\bar{\gamma}_{ш} + \bar{\gamma}_{т}}{2}.$$

Тривалість повного циклу змішування, від якого залежить продуктивність змішувача, визначається з урахуванням тривалості допоміжних операцій.

На рис. 4.4–4.6 наведено результати числового дослідження впливу зміни швидкості обертання роторів та величини мінімального проміжку на енергосилові параметри процесу в роторному змішувачі з вільним об'ємом змішувальної камери 250 дм<sup>3</sup>.

Як видно з рис. 4.4 збільшення швидкості обертання швидкохідного ротора  $W_{гр ш}$  приводить до зростання потужності приводу. Вплив величини мінімального проміжку  $h_{гр}$  має протилежний характер. Проте якщо при швидкостях  $W_{гр ш}$  приблизно до 1 м/с величина  $h_{гр}$  впливає на потужність приводу неістотно (біля 10 кВт/мм), то при швидкостях понад 1 м/с ця залежність має більш інтенсивний характер (біля 50 кВт/мм). Таким чином, під час експлуатації швидкохідних змішувачів, за величиною потужності, споживаної приводом роторів, можна мати уявлення про величину зносу гребенів роторів.

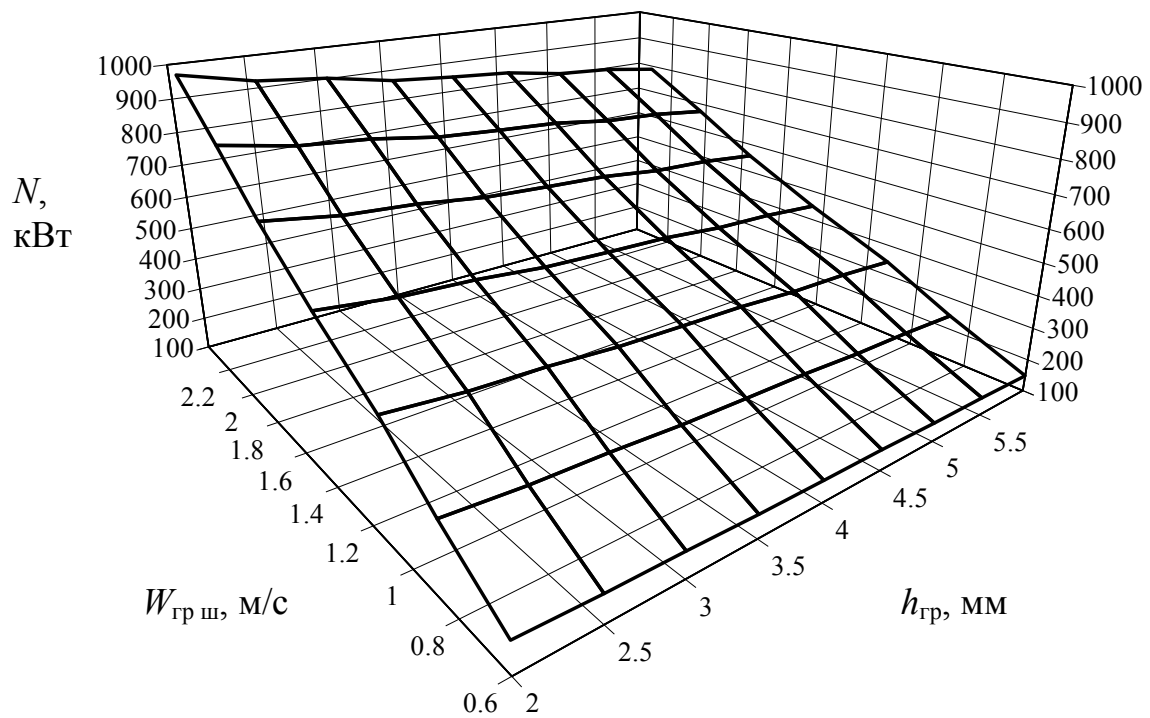


Рис. 4.4. Залежність потужності приводу змішувача від глибини мінімального проміжку та швидкості обертання швидкохідного ротора

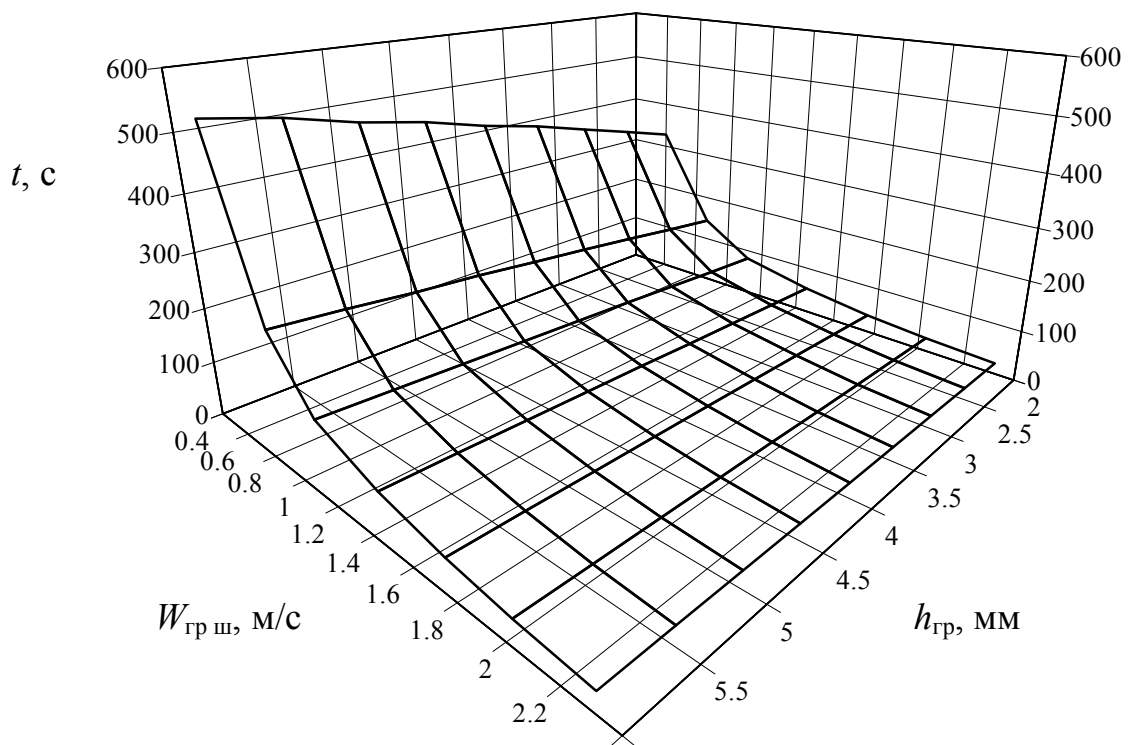


Рис. 4.5. Залежність тривалості змішування від глибини мінімального проміжку та швидкості обертання швидкохідного ротора

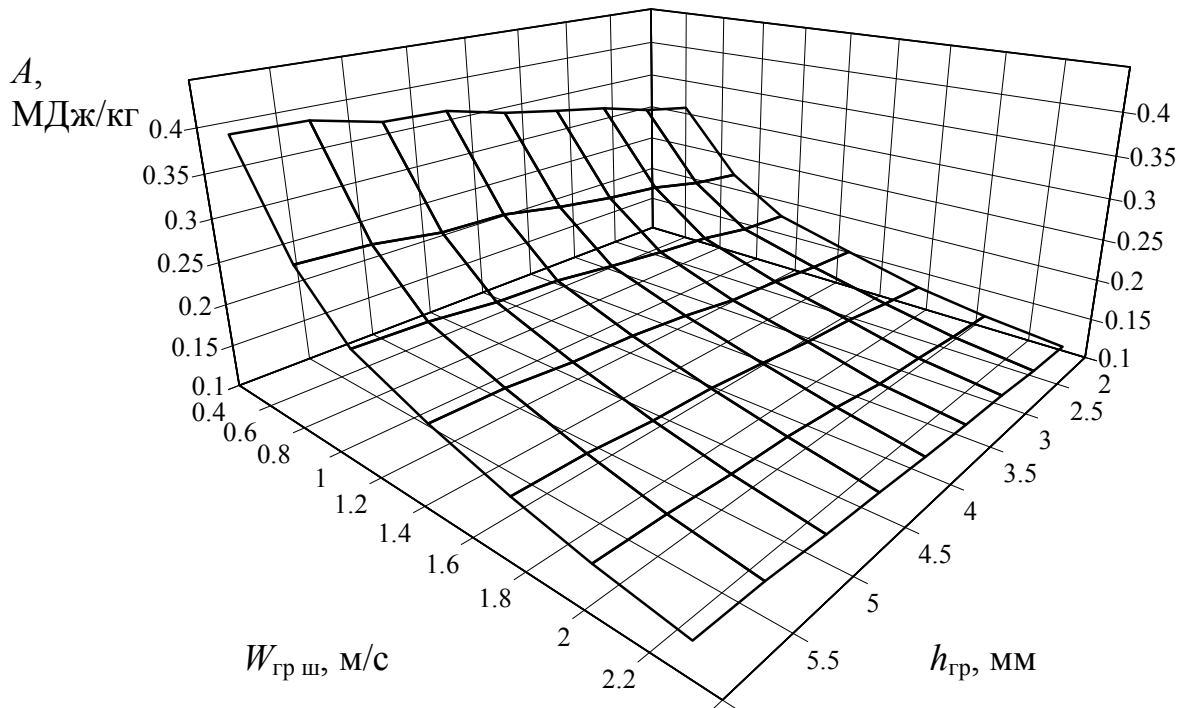


Рис. 4.6. Залежність питомої роботи змішування від глибини мінімального проміжку та швидкості обертання швидкохідного ротора

Тривалість змішування зі збільшенням величини мінімального проміжку зростає (див. рис. 4.5), але, на відміну від характеру зміни потужності приводу від  $W_{гр\ ш}$  і  $h_{гр}$ , при підвищених швидкостях переробки тривалість змішування від величини мінімального проміжку змінюється неістотно.

Одним з узагальнювальних показників процесу змішування можна вважати питому роботу змішувача  $A$  (робота, витрачена для змішування 1 кг ТпМ за час приготування суміші) [189]. На рис. 4.6 наведено залежність  $A = f(W_{рш}, h_{гр})$ , яка має характер, аналогічний залежності  $t = f(W_{рш}, h_{гр})$  (див. рис. 4.5).

На рис. 4.7 наведено теоретичну та експериментальну [314] залежності тривалості змішування від швидкості швидкохідного ротора. Дані наведені для гумової суміші з показником степеня реологічного рівняння  $n=0,2$  і коефіцієнтом консистенції  $K=85000 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$ .

Як видно з рис. 4.7 час, розрахований за розробленою методикою, в середньому на 60 с менше від значень, отриманих під час експлуатації промислового змішувача [314]. Зазначену різницю теоретичних та експериментальних даних можна пояснити тим, що на практиці часто реалізують не лише гомогенізувальне, а й диспергувальне змішування. Крім того, на практиці зазвичай збільшують тривалість змішування для забезпечення гарантованої якості готової композиції [313, 314].

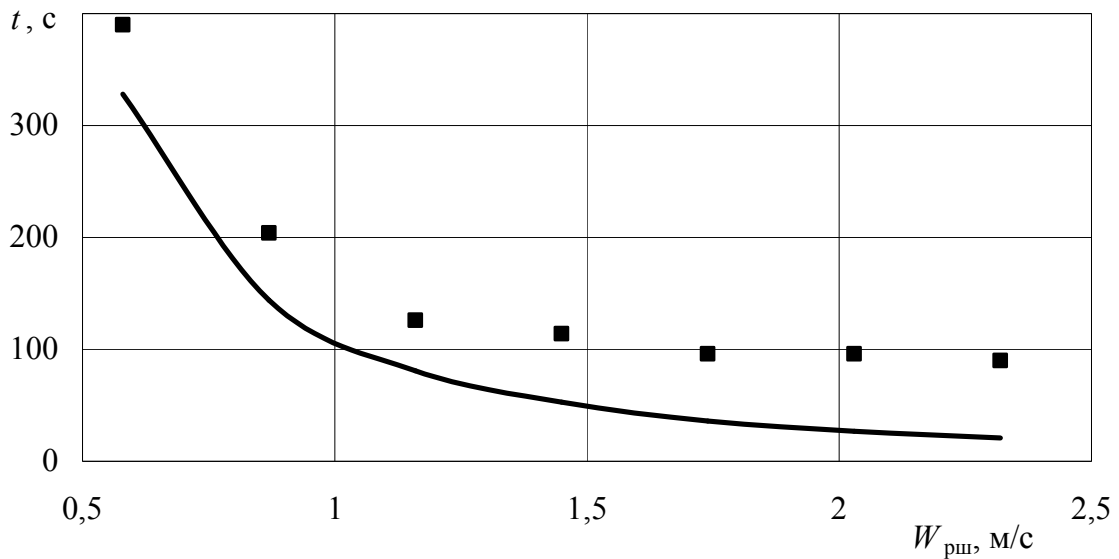


Рис. 4.7. Порівняння результатів моделювання (лінія) з даними експлуатації промислового змішувача (■)

Таким чином, порівняння теоретичних та експериментальних результатів дає підставу для ствердження про адекватність розробленої математичної моделі результатам експлуатації промислового обладнання.

#### 4.2.5. Тепловий розрахунок змішувача

Особливістю теплового розрахунку роторного змішувача є те, що його поверхня теплообміну визначається в результаті конструювання основних вузлів, тому цей розрахунок має бути перевірним. Метою теплового розрахунку змішувача є визначення температури суміші, яка не повинна перевищувати допустимого значення [311].

Зазвичай у сучасних змішувачах з форсованим режимом тривалість циклу змішування менше часу, протягом якого утворюється стабілізований (рівноважний) температурний режим, тому методика теплового розрахунку ґрунтується на закономірностях нестационарного теплового режиму, за якого температура  $T_{пМ}$  неперервно збільшується. У цьому разі завданням розрахунку є визначення залежності між температурою матеріалу  $t_{тпМ}$ , коефіцієнтом теплопередачі  $K_{то}$  від  $T_{пМ}$  до охолодної води й витратою охолодної води  $G_{в}$ . При цьому розглядають кінцеві відрізки часу, досить малі, щоб можна було скористатися середньою арифметичною різницею температур за умови  $\Delta t_{кi}/\Delta t_{пi} < 2$ , де  $\Delta T_{кi}$  і  $\Delta T_{пi}$  – різниця температур  $T_{пМ}$  та охолодної води на початку і в кінці відрізка часу  $\Delta t_i$ .

Уся тривалість змішування поділяється на  $n$  однакових відрізків часу  $\Delta t_i$ . Температура суміші в кінці  $i$ -го відрізка часу становить:

$$T_{\text{тпм } i} = \frac{Q_{\text{дис } i} - Q_{\text{в } i}}{M_{\Sigma} c_{\text{тпм}}} + T_{\text{тпм } i-1}, \quad (4.37)$$

де  $Q_{\text{дис } i}$  – потужність дисипації за час  $\Delta t_i$  ( $Q_{\text{дис } i} = N_{\text{пр}} \eta_{\text{пр}} \Delta \tau_i$ );

$Q_{\text{в } i}$  – теплота, відведена від матеріалу за час  $\Delta t_i$  охолодною водою:

$$Q_{\text{в } i} = K_{\text{то}} S_{\text{зк}} \Delta \tau_i (T_{\text{тпм } i} - T_{\text{в } i}),$$

$S_{\text{зк}}$  – площа теплопередавальної поверхні змішувальної камери (з достатнім ступенем точності можна прийняти  $S_{\text{зк}} \approx 7\pi(R_{\text{гр}} + h_{\text{гр}})$ ), тут  $R_{\text{гр}}$  – радіус гребеня ротора;

$T_{\text{м } i}$  і  $T_{\text{в } i}$  – середня температура матеріалу та охолодної води протягом часу  $\Delta t_i$ .

Після перетворювань залежність (4.37) матиме вигляд:

$$T_{\text{тпм } i} = \left(1 - \frac{K_{\text{то}} S_{\text{зк}} \Delta t_i}{M_{\Sigma} c_{\text{тпм}}}\right) T_{\text{м } i-1} + \frac{Q_{\text{дис } i} \Delta t_i}{M_{\Sigma} c_{\text{тпм}}} + \frac{K_{\text{то}} S_{\text{зк}} \Delta t_i}{M_{\Sigma} c_{\text{тпм}}} T_{\text{вп}}, \quad (4.38)$$

де  $T_{\text{вп}}$  – початкова температура охолодної води.

Якщо багаточлени в рівнянні (4.38) позначити літерами  $A$  і  $B$ , то ця залежність для першого відрізка часу матиме вигляд

$$T_{\text{тпм } 1} = A + B T_{\text{тпм } \Pi},$$

де  $T_{\text{тпм } \Pi}$  – початкова температура сировини під час завантаження змішувача;

для другого відрізка часу:

$$T_{\text{тпм } 2} = A + A B + B^2 T_{\text{тпм } \Pi};$$

для  $n$ -го відрізка часу:

$$T_{\text{тпм } n} = A(B^0 + B^1 + B^2 + \dots + B^{n-1}) + B^n T_{\text{тпм } \Pi}.$$

Температура матеріалу  $t_{\text{тпм } n}$  у кінці процесу змішування не повинна перевищувати допустимого значення, яке залежить від властивостей ТпМ та його компонентів.

Розроблені методики параметричного й теплового розрахунків роторного змішувача дає можливість визначити раціональні параметри й режими експлуатації обладнання під час переробки ТпМ, які належать як до ньютонівської, так і до неньютонівської моделей рідини.

## 4.3. Моделювання валкових машин

### 4.3.1. Загальні особливості моделювання

Схему течії нестисливої рідини в проміжку між валками, що обертаються один назустріч одному з різними коловими швидкостями, наведено на рис. 1.12.

Для аналізу зазначеного процесу зазвичай роблять такі припущення: перероблюваний матеріал нестисливий і прилипає до робочих поверхонь валків,

рух матеріалу усталений та одновимірний, вага матеріалу несуттєва порівняно із силами тиску [31, 78, 101, 102, 115, 117–119, 177, 183, 192, 194, 195, 206, 207].

Процес переробки ступеневої рідини докладно описаний, наприклад, у працях [78, 195, 212], тому проаналізуємо течію матеріалу, поведінка якого описується законом внутрішнього тертя Ньютона.

### 4.3.2. Ньютонівська модель рідини

Система рівнянь, що описує процес течії матеріалу в міжвалковому проміжку, складається з рівнянь (4.1)–(4.3), а також рівняння енергії

$$\rho_{\text{ТПМ}} c_{\text{ТПМ}} w_x \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{\text{ТПМ}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_{\text{дис}}. \quad (4.39)$$

Початкова умова по температурі

$$T|_{x=x_{\text{П}}} = T_{\text{П}}(y). \quad (4.40)$$

Граничні умови по швидкості (див. рис. 1.12):

$$w_x|_{y=-h} = W_{\text{Т}} = \psi W_{\text{Ш}}; \quad (4.41)$$

$$w_x|_{y=h} = W_{\text{Ш}}, \quad (4.42)$$

а по температурі:

$$T|_{y=-h} = T_{\text{ВТ}}; \quad T|_{y=h} = T_{\text{ВШ}}. \quad (4.43)$$

Інтегруючи рівняння (4.1) з урахуванням залежностей (4.3), (4.41) і (4.42), отримуємо вираз для складової швидкості вздовж проміжку

$$w_x = W_{\text{Ш}} \left( 1 - \frac{(1-\psi)}{2} \left( 1 - \frac{y}{h} \right) \right) - \frac{h^2}{2\mu_{\text{ТПМ}}} \left( 1 - \frac{y^2}{h^2} \right) \frac{dp}{dx}. \quad (4.44)$$

Внаслідок нерозривності потоку об'ємна витрата матеріалу крізь одиницю ширини проміжку становитиме

$$Q = W_{\text{Ш}} (1 + \psi) h_{\text{к}}. \quad (4.45)$$

Підставляючи (4.44) у залежність (4.2) і прирівнюючи рівняння (4.2) і (4.45), з урахуванням безрозмірних координат  $\xi$  і  $\varepsilon$  [78, 101, 102, 119, 207]

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{2R_{\text{В}} h_{\text{мін}}}}; \quad \varepsilon = \frac{y}{h}, \quad \text{де } h = h_{\text{мін}} (1 + \xi^2), \quad (4.46)$$

які спрямляють міжвалковий проміжок, можна отримати вираз для визначення градієнта тиску вздовж проміжку:

$$\frac{dp}{d\xi} = \frac{3\mu_{\text{ТПМ}} \sqrt{2R_{\text{В}} h_{\text{мін}}} W_{\text{Ш}} (1 + \psi) (\xi^2 - \xi_{\text{К}}^2)}{2h_{\text{мін}}^2 (1 + \xi^2)^3}. \quad (4.47)$$

З урахуванням (4.47) вираз (4.44) набуває вигляду

$$w_x = W_{\text{ш}} \left( 1 - \frac{3(1+\psi)(\xi^2 - \xi_K^2)}{4(1+\xi^2)} (1-\varepsilon^2) - \frac{(1-\psi)(1-\varepsilon)}{2} \right). \quad (4.48)$$

Тоді градієнт складової швидкості  $w_x$  становитиме

$$\frac{\partial w_x}{\partial y} = \frac{W_{\text{ш}}}{2h_{\text{min}}} \left( \frac{3(1+\psi)(\xi^2 - \xi_K^2)}{(1+\xi^2)^2} \varepsilon + \frac{1-\psi}{1+\xi^2} \right). \quad (4.49)$$

Інтегруючи рівняння (4.47), отримуємо вираз для визначення розподілу тиску в міжвалковому проміжку:

$$p(\xi) = \frac{3\mu_{\text{тпм}} \sqrt{2R_{\text{в}} h_{\text{min}}} W_{\text{ш}} (1+\psi)}{16h_{\text{min}}^2} [f_1(\xi, \xi_K) + f_2(\xi_K)], \quad (4.50)$$

де функції  $f_1(\xi, \xi_K)$  і  $f_2(\xi_K)$  визначають залежностями [119]:

$$f_1(\xi, \xi_K) = \frac{\xi(\xi^2 - 3\xi^2\xi_K^2 - 5\xi_K^2 - 1)}{(1+\xi^2)^2} + (1 - 3\xi_K^2) \arctg \xi;$$

$$f_2(\xi_K) = \frac{1 + 3\xi_K^2}{1 + \xi_K^2} \xi_K - (1 - 3\xi_K^2) \arctg \xi_K.$$

На початку і в кінці зони деформування перероблюваного матеріалу в міжвалковому проміжку надлишковий тиск дорівнює нулю, тобто  $p(\xi_{\text{п}}) = 0$  і  $p(\xi_K) = 0$ . Таким чином, приймаючи  $\xi = \xi_{\text{п}}$ , підставляючи це значення у вираз (4.50) і прирівнюючи останній нулю, можна обчислити величину  $\rho_{\text{п}}$  через величину  $\rho_K$ , яку визначають експериментально [78, 101, 102, 119, 207]. З достатнім ступенем точності в діапазоні  $0,20 \leq \xi_K \leq 0,45$  можна запропонувати таку залежність для визначення  $\xi_{\text{п}}$  [315]:

$$\xi_{\text{п}} = 5,91 - 67,14\xi_K + 231,47\xi_K^2 - 271,77\xi_K^3.$$

Максимальне значення тиску (за умови  $\xi = -\xi_K$  (див. залежність (4.47)) становитиме

$$p_{\text{max}} = \frac{3\mu \sqrt{2R_{\text{в}} h_{\text{min}}} v_{\text{ш}} (1+\varphi)}{8h_{\text{min}}^2} f_2(\rho_K).$$

Питоме розпірне зусилля (зусилля на 1 м ширини міжвалкового проміжку), що діє на валок, визначають з рівняння

$$F = \int_{x_{\text{п}}}^{x_K} p(x) dx.$$

При переході до безрозмірної координати  $\xi$  (4.46) з урахуванням (4.50) отримуємо

$$F = \sqrt{2R_B h_{\min}} \int_{\xi_{\Pi}}^{\xi_K} p(\xi) d\xi = \frac{3\mu_{\text{ТПМ}} R_B W_{\text{Ш}} (1 + \psi)}{8 h_{\min}} \int_{\xi_{\Pi}}^{\xi_K} [f_1(\xi, \xi_K) + f_2(\xi_K)] d\xi.$$

Остаточню, розпiрне зусилля становитиме

$$F = \frac{3\mu_{\text{ТПМ}} R_B W_{\text{Ш}} (1 + \psi)}{8 h_{\min}} f_3(\xi_{\Pi}, \xi_K),$$

де

$$f_3(\xi_{\Pi}, \xi_K) = 1 + \frac{\xi_K (1 + \xi_{\text{PK}}^2)(\xi_K - \xi_{\Pi})}{1 + \xi_K^2} - \frac{1 + \xi_K^2}{1 + \xi_{\Pi}^2} + \xi_{\Pi} (1 - 3\xi_K^2)(\arctg \xi_K - \arctg \xi_{\Pi}).$$

Оскiльки мiж границями зони деформування iснує однозначна залежнiсть, функцiю  $f_3(\xi_{\Pi}, \xi_K)$  можна виразити лише через  $\xi_K$  [315]. З достатнiм ступенем точностi можна запропонувати таку залежнiсть для визначення функцiї  $f_3$ :

$$f_3(\xi_{\Pi}, \xi_K) = f_4(\xi_K) = -0,10044 + 1,9771\xi_K - 12,4564\xi_K^2 + 29,112\xi_K^3.$$

Тепер визначимо напруження зсуву в промiжку й моменти опору обертанню валкiв з боку перероблюваного матерiалу.

Розподiл напружень зсуву в промiжку з урахуванням (4.49) становить

$$\tau_{xy} = \mu_{\text{ТПМ}} \frac{\partial w_x}{\partial y} = \frac{\mu_{\text{ТПМ}} W_{\text{Ш}}}{2 h_{\min}} \left( \frac{3(1 + \psi)(\xi^2 - \xi_K^2)}{(1 + \xi^2)^2} \varepsilon + \frac{1 - \psi}{1 + \xi^2} \right). \quad (4.51)$$

Крутнi моменти, що дiють на валки, можна визначити за залежнiстю [118]

$$M = L_B R_B \int_{x_{\text{BK}}}^{x_K} \tau_{xy} \Big|_{y=\pm h} dx = L_B R_B \sqrt{2R_B h_{\min}} \int_{\xi_{\text{BK}}}^{\xi_K} \tau_{xy} \Big|_{\varepsilon=\pm 1} d\xi,$$

де  $L_B$  – ширина мiжвалкового промiжку (довжина бочки валка).

Тодi моменти опору обертанню швидкодiдного й тиходiдного валкiв з боку перероблюваного матерiалу, становлять:

$$M_{\text{Ш}} = \mu_{\text{ТПМ}} W_{\text{Ш}} L_B R_B \sqrt{\frac{R_B}{2 h_{\min}}} \int_{\xi_{\text{BK}}}^{\xi_K} \left( \frac{3(1 + \psi)(\xi^2 - \xi_K^2)}{(1 + \xi^2)^2} + \frac{1 - \psi}{1 + \xi^2} \right) d\xi; \quad (4.52)$$

$$M_{\text{T}} = -\mu_{\text{ТПМ}} W_{\text{Ш}} L_B R_B \sqrt{\frac{R_B}{2 h_{\min}}} \int_{\xi_{\text{BK}}}^{\xi_K} \left( -\frac{3(1 + \psi)(\xi^2 - \xi_K^2)}{(1 + \xi^2)^2} + \frac{1 - \psi}{1 + \xi^2} \right) d\xi. \quad (4.53)$$

У результатi iнтегрування рiвнянь (4.52) i (4.53) вирази для розрахунку зазначених моментiв набувають вигляду:

$$M_{\text{Ш(Т)}} = \pm \mu_{\text{ТПМ}} L_B R_B W_{\text{Ш}} \sqrt{\frac{R_B}{2 h_{\min}}} \left[ \pm \frac{3(1 + \psi) (\xi_{\text{BK}} - \xi_K)(1 - \xi_{\text{BK}} \xi_K)}{2 (1 + \xi_{\text{BK}}^2)} + \left( \pm \frac{3(1 + \psi)}{2} (1 - \xi_K^2) + 1 - \psi \right) (\arctg \xi_K - \arctg \xi_{\text{BK}}) \right]. \quad (4.54)$$

У виразі (4.54) знак «плюс» відноситься до швидкохідного валка ( $\varepsilon = 1$ ), а знак «мінус» – до тихохідного ( $\varepsilon = -1$ ).

Потужність, що витрачається на деформування ТпМ у міжвалковому проміжку, становитиме

$$\begin{aligned} N_{\text{тпм}} &= N_{\Sigma \text{ ш}} + N_{\Sigma \text{ т}} = \frac{M_{\text{ш}} W_{\text{ш}}}{R_{\text{в}}} + \frac{M_{\text{т}} W_{\text{т}}}{R_{\text{в}}} = \frac{W_{\text{ш}}}{R_{\text{в}}} (M_{\text{ш}} + \psi M_{\text{т}}) = \\ &= \mu_{\text{тпм}} L_{\text{в}} W_{\text{ш}}^2 \sqrt{\frac{R_{\text{в}}}{2 h_{\text{мін}}}} \left[ \frac{3(1+\psi)^2}{2} \frac{(\xi_{\text{вх}} - \xi_{\text{к}})(1 - \xi_{\text{вх}} \xi_{\text{к}})}{1 + \xi_{\text{вх}}^2} + \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{3(1+\psi)^2}{2} (1 - \xi_{\text{к}}^2) + (1 - \psi)^2 \right) (\arctg \xi_{\text{к}} - \arctg \xi_{\text{вх}}) \right]. \end{aligned}$$

З боку перероблюваного матеріалу крім розпірного зусилля, спричиненого тиском у міжвалковому проміжку, на валок діє сила  $P_{\text{ш(т)}}$ , дотична до поверхні його бочки. Для зручності розрахунків дотичну до кожного валка силу замінюють статично еквівалентною системою сил: поперечною силою  $P_{\text{ш(т)}}$ , прикладеною до осі валка, і моментом  $M_{\text{ш(т)}} = P_{\text{ш(т)}} R_{\text{в}}$ .

Таким чином, зазначені сили з урахуванням (4.52) і (4.53) можна визначити за залежністю  $P_{\text{ш(т)}} = M_{\text{ш(т)}} / R_{\text{в}}$ . При цьому напрям дії сили залежить від знака крутного моменту: при позитивному моменті вона спрямована протилежно осі  $x$ , а при негативному – вздовж осі  $x$ .

З достатнім для інженерних розрахунків ступенем точності можна вважати, що розпірні зусилля діють поперек міжвалкового проміжку в площині, що проходить через поздовжні осі валків, а сили  $P_{\text{ш(т)}}$  – нормально до цієї площини. Тоді результуюче поперечне зусилля  $F_{\Sigma \text{ ш}}$  або  $F_{\Sigma \text{ т}}$ , що діє на відповідний валок, можна визначити як векторну суму розпірного зусилля  $F$ , сили  $P_{\text{ш}}$  або  $P_{\text{т}}$  і ваги валка.

Крутний момент, необхідний для обертання швидко- або тихохідного валка, визначають за залежністю

$$M_{\Sigma \text{ ш(т)}} = M_{\text{ш(т)}} + M_{\text{підш ш(т)}},$$

де  $M_{\text{підш ш(т)}}$  – момент тертя в підшипниках відповідного валка.

Потужності індивідуальних приводів валків вальців можна визначити за залежностями:

$$N_{\text{ш}} = \frac{M_{\Sigma \text{ ш}} W_{\text{ш}}}{R_{\text{в}} \eta'_{\text{пр}}}; \quad N_{\text{т}} = \frac{M_{\Sigma \text{ т}} W_{\text{ш}} \psi}{R_{\text{в}} \eta'_{\text{пр}}},$$

де  $\eta'_{\text{пр}}$  – к.к.д. індивідуального привода валка.

Потужність групового привода валків вальців можна визначити за формулою

$$N_{\Sigma} = \frac{W_{\text{ш}}}{R_{\text{в}} \eta_{\text{пр}}} (M_{\Sigma \text{т}} + \psi M_{\Sigma \text{ш}}),$$

де  $\eta_{\text{пр}}$  – к.к.д. групового привода валків.

Визначимо вираз для середньої швидкості зсуву  $\bar{\gamma}$  перероблюваного матеріалу в проміжку. Оскільки в поперечному перерізі міжвалкового проміжку з поточною поздовжньою координатою  $\rho$  швидкість зсуву визначають залежністю (4.49). Таким чином, абсолютна величина  $\bar{\gamma}$  становитиме [316]

$$\begin{aligned} \bar{\gamma} &= \frac{1}{2 h_{\text{min}} |x_{\text{к}} - x_{\text{вх}}|} \int_{x_{\text{вх}}}^{x_{\text{к}}} \int_{-h}^h |\dot{\gamma}(x, y)| dy dx = \frac{1}{2 |\xi_{\text{вх}} - \xi_{\text{к}}|} \int_{\xi_{\text{вх}}}^{\xi_{\text{к}}} \int_{-1}^1 |\dot{\gamma}(\xi, \eta)| d\eta d\xi = \\ &= \frac{W_{\text{ш}}}{4 h_{\text{min}} |\xi_{\text{вх}} - \xi_{\text{к}}|} \int_{\xi_{\text{вх}}}^{\xi_{\text{к}}} \int_{-1}^1 \left| \frac{3(1+\psi)(\xi^2 - \xi_{\text{к}}^2)}{(1+\xi^2)^2} \varepsilon + \frac{1-\psi}{1+\xi^2} \right| d\eta d\rho. \end{aligned} \quad (4.55)$$

З урахуванням прийнятих припущень та умов однозначності функція інтенсивності дисипації визначається виразом (4.34). Тоді, беручи до уваги вирази (4.49) і (4.51), отримаємо

$$\begin{aligned} q_{\text{дис}} &= \frac{\mu_{\text{тпм}} W_{\text{ш}}^2}{4 h_{\text{min}}^2} \left( \frac{3(1+\psi)(\xi^2 - \xi_{\text{к}}^2)}{(1+\xi^2)^2} \varepsilon + \frac{1-\psi}{1+\xi^2} \right)^2; \\ Q_{\text{дис}} &= \mu_{\text{тпм}} L \sqrt{2 R_{\text{в}} h_{\text{min}}} \frac{W_{\text{ш}}^2}{4 h_{\text{min}}} \int_{\xi_{\text{к}}}^{\xi_{\text{п}}} \int_{-1}^1 \left| \frac{3(1+\psi)(\xi^2 - \xi_{\text{к}}^2)}{(1+\xi^2)^2} \varepsilon + \frac{1-\psi}{1+\xi^2} \right|^2 (1+\xi^2) d\varepsilon d\xi. \end{aligned}$$

Температурне поле з урахуванням функції інтенсивності дисипації в міжвалковому проміжку може бути розраховане з рівняння збереження енергії (4.39) за відповідних початкової (4.40) і граничних (4.43) умов:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{\text{тпм}} c_{\text{тпм}} W_{\text{ш}}}{\sqrt{2 R_{\text{в}} h_{\text{min}}}} \left( 1 - \frac{3(1+\psi)(\xi^2 - \xi_{\text{к}}^2)}{4(1+\xi^2)} (1-\varepsilon^2) - \frac{(1-\psi)(1-\varepsilon)}{2} \right) \frac{\partial T}{\partial \xi} = \\ = \frac{\lambda_{\text{тпм}}}{h_{\text{min}}^2 (1+\xi^2)^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varepsilon^2} + \frac{\mu_{\text{тпм}} W_{\text{ш}}^2}{4 h_{\text{min}}^2} \left( \frac{3(1+\psi)(\xi^2 - \xi_{\text{к}}^2)}{(1+\xi^2)^2} \varepsilon + \frac{1-\psi}{1+\xi^2} \right)^2. \end{aligned} \quad (4.56)$$

Рівняння (4.56) є квазілінійним рівнянням параболічного типу загального вигляду (2.13) з крайовими умовами (2.14)–(2.16), для розв'язання якого розроблено програмний модуль.

Порівнюючи коефіцієнти при похідних рівняння енергії (4.56) і рівняння (2.13), можна встановити, що

$$C(T, \xi, \varepsilon) = 1 - \frac{3(1+\psi)(\xi^2 - \xi_{\text{к}}^2)}{4(1+\xi^2)} (1-\varepsilon^2) - \frac{(1-\psi)(1-\varepsilon)}{2};$$

$$k(T, \xi, \varepsilon) = \frac{a_{\text{ТПМ}} \sqrt{2R_{\text{В}} h_{\text{min}}}}{W_{\text{Ш}} h_{\text{min}}^2 (1 + \xi^2)^2};$$

$$A(T, \xi, \varepsilon) = 0;$$

$$f(T, \xi, \varepsilon) = \frac{\mu_{\text{ТПМ}} W_{\text{Ш}} \sqrt{2R_{\text{В}}}}{4\rho_{\text{ТПМ}} c_{\text{ТПМ}} h_{\text{min}}^{3/2}} \left( \frac{3(1 + \psi)(\xi^2 - \xi_{\text{К}}^2)}{(1 + \xi^2)^2} \varepsilon + \frac{1 - \psi}{1 + \xi^2} \right)^2.$$

Якщо коефіцієнти граничних умов (2.15) і (2.16) рівняння (2.13) прийняти:

$$\alpha_1(\xi) = 1, \quad \beta_1(\xi) = 0, \quad \varphi_1(\xi) = T_{\text{ВТ}};$$

$$\alpha_2(\xi) = 1, \quad \beta_2(\xi) = 0, \quad \varphi_2(\xi) = T_{\text{ВШ}},$$

то ці граничні умови відповідатимуть вигляду граничних умов рівняння (4.56).

Границі змінювання змінної  $\xi$  рівняння (2.13):  $\xi_{\text{П}} = \xi_{\text{К}}$  і  $\xi_{\text{К}} = \xi_{\text{П}}$ , а змінної  $\varepsilon$ :  $\varepsilon_{\text{П}} = -1$ ,  $\varepsilon_{\text{К}} = 1$ .

На рис. 4.8 наведено розраховані за наведеною моделлю температурні поля деревнополімерного ТпМ у міжвалковому проміжку валкової машини ( $R_{\text{В}}=0,33$  м;  $W_{\text{В}}=0,5$  м/с;  $2h_{\text{min}}=0,001$  м;  $T_{\text{ВШ}}=150$  °С;  $T_{\text{ВТ}}=150$  °С;  $T_0=150$  °С).

Як видно з рис. 4.8, зі зменшенням коефіцієнта фрикції в міжвалковому проміжку температура ТпМ зростає, причому найбільша інтенсивність зростання температури спостерігається біля поверхонь валків, і особливо – біля поверхні тихохідного валка, де мають місце найбільші напруження зсуву.

Процес теплообміну ТпМ на валках валкових машин поза межами міжвалкових проміжків докладно описаний, наприклад, у праці [78].

Беручи до уваги, що товщина ТпМ на валку вальців або каландра істотно менша від його ширини, диференціальне рівняння теплопровідності матиме вигляд

$$\rho_{\text{ТПМ}} c_{\text{ТПМ}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{ТПМ}} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_{\text{ТПМ}}}{r} \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (4.57)$$

Початковою умовою по температурі буде розподіл температури по товщині ТпМ на виході з міжвалкового проміжку

$$T|_{t=0} = T_0(r), \quad (4.58)$$

а граничні умови матимуть вигляд:

$$T|_{r=R_{\text{В}}} = T_{\text{В}}; \quad \lambda_{\text{ТПМ}} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{В}}+\delta} = \alpha_{\text{ос}} (T - T_{\text{ос}}), \quad (4.59)$$

де  $\alpha_{\text{ос}}$  – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні полотна ТпМ на валку до оточуючого середовища;

$T_{\text{ос}}$  – температура оточуючого середовища;

$\delta$  – товщина полотнища ТпМ на валку.

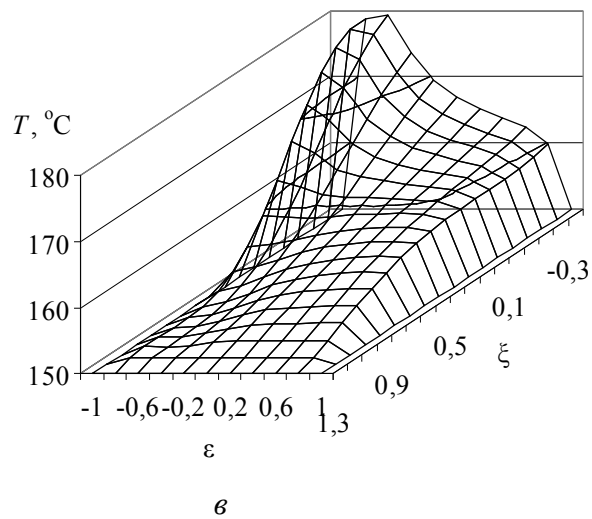
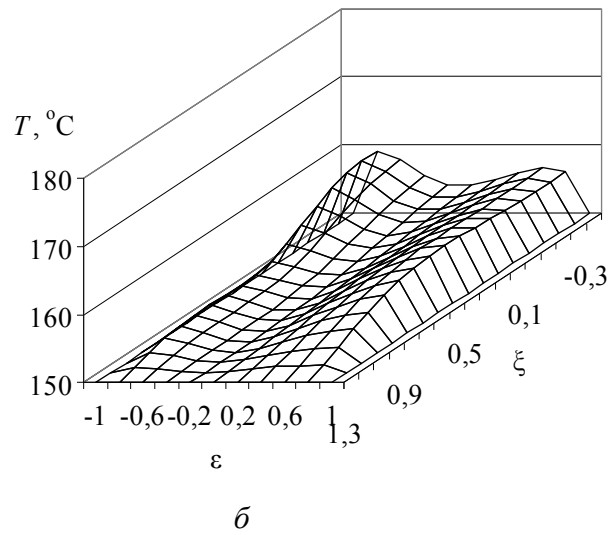
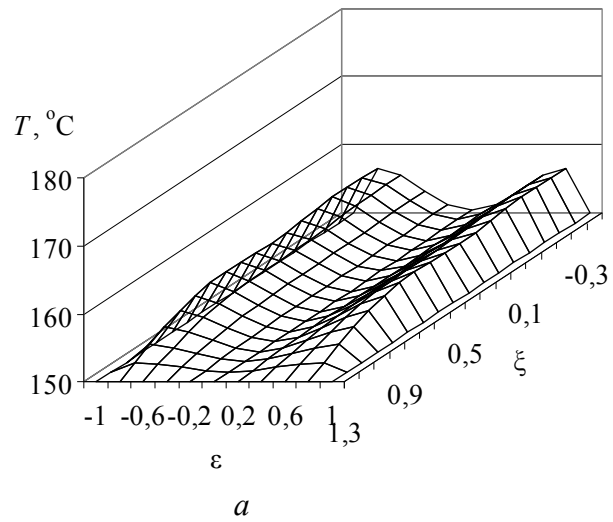


Рис. 4.8. Зміна температури ТпМ у міжвалковому проміжку залежно від коефіцієнта фрикції:  $\psi = 1$  (а);  $\psi = 0,5$  (б);  $\psi = 0,1$  (в)

Приводячи рівняння (4.57) і крайові умови (4.58) і (4.59) до загального вигляду, отримуємо коефіцієнти при похідних і праву частину рівняння (2.13):

$$\begin{aligned} C(T, t, r) &= \rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}}; \\ k(T, t, r) &= \lambda_{\text{ТпМ}}; \\ A(T, t, r) &= \frac{\lambda_{\text{ТпМ}}}{r}; \\ f(T, t, r) &= 0. \end{aligned}$$

Якщо коефіцієнти граничних умов (2.15) і (2.16) рівняння (2.13) прийняти рівними

$$\begin{aligned} \alpha_1(t) &= 1, & \beta_1(t) &= 0, & \varphi_1(t) &= T_{\text{в}}; \\ \alpha_2(t) &= \alpha_{\text{ос}}, & \beta_2(t) &= \lambda_{\text{ТпМ}}, & \varphi_2(t) &= \alpha_{\text{ос}} T_{\text{ос}}, \end{aligned}$$

то ці граничні умови відповідатимуть вигляду граничних умов рівняння (4.59).

Границі змінювання змінних рівняння (2.13):  $r_{\text{п}} = R_{\text{в}}$ ,  $r_{\text{к}} = R_{\text{в}} + \delta$ ;  $t_{\text{п}} = 0$ ,  $t_{\text{к}} = t_{\text{к}}$ , де тривалість перебування ТпМ на валку можна визначити за методикою, наведеною. наприклад, у праці [78].

#### 4.3.3. Визначення тривалості вальцювання

Оскільки між  $\xi_{\text{п}}$  і  $\xi_{\text{к}}$  існує однозначна залежність (див. п. 4.3.2), то значення подвійного інтеграла  $In$  у виразі (4.55) можна визначити за залежністю [315]

$$\begin{aligned} In &= \left( -0,1673642 + 3,306271\xi_{\text{к}} - 0,0815208\varphi + 1,604852\xi_{\text{к}}\psi - 20,45623\xi_{\text{к}}^2 - \right. \\ &\quad - 0,1089296\psi^2 + 0,9795921\xi_{\text{к}}\psi^2 - 2,104278\xi_{\text{к}}^2\psi + 15,16004\xi_{\text{к}}^2\psi^2 + \\ &\quad \left. + 41,8704\xi_{\text{к}}^3 + 0,2266403\psi^3 - 2,414715\xi_{\text{к}}\psi^3 - 15,81008\xi_{\text{к}}^3\psi \right)^{19/30}. \end{aligned}$$

Оптимальна величина загальної деформації зсуву  $\gamma_{\Sigma}$  становить 2000–2500 (див. п. 4.2.4). Тоді тривалість циклу періодичного вальцювання  $t_{\text{ц}}$  становитиме

$$t_{\text{ц}} = \frac{M_{\Sigma} \gamma_{\Sigma}}{G_M \bar{\gamma}},$$

де  $M_{\Sigma}$  – загальна маса ТпМ на вальцях;

$G_M$  – масова витрата матеріалу крізь міжвалковий проміжок [212]:

$$G_M = W_{\text{ш}} h_{\text{min}} L_{\text{в}} \rho_{\text{ТпМ}} (1 + \psi) (1 + \xi_{\text{к}}^2).$$

Оскільки в процесі вальцювання оброблюваний матеріал зазвичай перебуває на передньому тихохідному валку, то кількість обертів  $n_{\Sigma\text{ц}}$  тихохідного валка до набуття матеріалом деформації  $\gamma_{\Sigma}$  становить

$$n_{\Sigma\text{ц}} = n_{\text{т}} t_{\text{ц}},$$

де  $n_{\text{т}}$  – частота обертання тихохідного валка, об/с.

Для вальців періодичної дії об'єм одноразового завантаження  $V_{\text{л}}$ , вимірюваний у літрах (літраж вальців), залежить від оброблюваного матеріалу і зазвичай становить [88, 117]

$$V_{\text{л}} = (60 \dots 85) D_{\text{в}} L_{\text{в}},$$

де  $D_{\text{в}}$  – діаметр бочки валка.

Тоді маса одноразового завантаження становитиме  $M_{\Sigma} = 0,001 V_{\text{л}} \rho_{\text{тпм}}$ .

Визначимо залежність між шириною обертового запасу, величину  $B$  якого досить легко контролювати під час вальцювання і вільна поверхня якого максимально наближена до циліндричної [317], та об'ємом одноразового завантаження (рис. 4.9).

На виході з міжвалкового проміжку відформоване полотно ТпМ продовжує рухатися разом з тихохідним валком без проковзування по його поверхні з лінійною швидкістю  $W_{\text{т}} = \psi W_{\text{ш}}$ . Тоді товщина шару матеріалу на валку становитиме  $\delta_{\text{т}} = h_{\text{min}} (1 + \xi_{\text{к}}^2) (1 + \psi) / \psi$ .

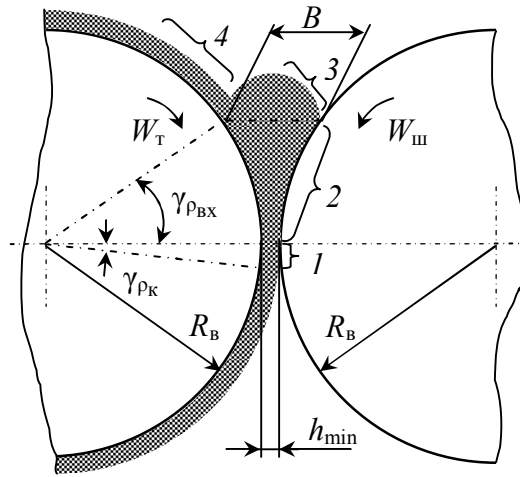


Рис. 4.9. До визначення об'єму ТпМ на вальцях періодичної дії:

1–4 – ділянки оброблюваного матеріалу;  $\gamma_{\rho_{\text{вх}}}$  і  $\gamma_{\rho_{\text{к}}}$  – центральні кути, які визначають координати входу ТпМ у міжвалковий проміжок і виходу ТпМ з міжвалкового проміжку

Площа  $S_1$  поперечного перерізу ділянки 1, обмеженої прямою, що проходить через осі валків, і місцем виходу ТпМ з міжвалкового проміжку, становить [318]

$$S_1 = 2h_{\text{min}} R_{\text{в}} (1 + \xi_{\text{к}}^2) \sin \gamma_{\rho_{\text{к}}} - \frac{R_{\text{в}}^2}{2} [2\gamma_{\rho_{\text{к}}} - \sin(2\gamma_{\rho_{\text{к}}})].$$

Площа  $S_2$  поперечного перерізу ділянки 2, обмеженої прямою, що проходить через осі валків, і місцем входу матеріалу в проміжок, становить

$$S_2 = B R_{\text{в}} \sin \gamma_{\rho_{\text{вх}}} - \frac{R_{\text{в}}^2}{2} [2\gamma_{\rho_{\text{вх}}} - \sin(2\gamma_{\rho_{\text{вх}}})].$$

Площа  $S_3$  поперечного перерізу ділянки 3, що являє собою півкруг діаметром  $B$ , становить

$$S_3 = \pi B^2 / 8.$$

Площа  $S_4$  поперечного перерізу ділянки 4, що відповідає шару відформованого матеріалу на валку, становить

$$S_4 = R_B h_{\min} (2\pi - \gamma_{\rho_{\text{вх}}} - \gamma_{\rho_{\text{к}}}) \frac{1 + \psi}{\psi}.$$

Центральні кути  $\gamma_{\rho_{\text{вх}}}$  і  $\gamma_{\rho_{\text{к}}}$  (див. рис. 4.9) можна визначити за залежностями

$$\gamma_{\rho_{\text{вх}}} = \arccos \left( 1 + \frac{h_{\min} - B/2}{R_B} \right); \quad \gamma_{\rho_{\text{к}}} = \arcsin \left( \rho_{\text{к}} \sqrt{\frac{2h_{\min}}{R_B}} \right).$$

Тоді об'єм одноразового завантаження (у кубометрах) становитиме

$$V_{\text{ц}} = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4) L_B.$$

Для вальців безперервної дії, на яких матеріал зазвичай завантажується з одного краю бочок валків і у вигляді безперервної стрічки знімається з протилежного, він проходить крізь міжвалковий проміжок  $n_{\Sigma}$  разів:

$$n_{\Sigma} = \frac{L_B}{l_{\text{нс}}},$$

де  $l_{\text{нс}}$  – ширина безперервної стрічки, що знімається з вальців.

При цьому матеріал набуває деформації

$$\gamma_{\Sigma} = \bar{\gamma} t_1 n_{\Sigma},$$

де  $t_1$  – тривалість перебування оброблюваного матеріалу в міжвалковому проміжку при одноразовому його проходженні.

Оскільки безперервне вальцювання зазвичай здійснюють без обертового запасу на вході в міжвалковий проміжок, один оберт тихохідного валка відбувається за  $1/n_T = 2\pi R_B / (\psi W_{\text{ш}})$  секунд, а частка оберту, протягом якої матеріал деформується у проміжку дорівнює  $(\gamma_{\rho_{\text{п}}} + \gamma_{\rho_{\text{к}}}) / (2\pi)$ , то величина  $t_1$  становитиме

$$t_1 = \frac{R_B (\gamma_{\rho_{\text{п}}} + \gamma_{\rho_{\text{к}}})}{\psi W_{\text{ш}}}.$$

На рис. 4.10 наведено розраховані за формулою (4.55) залежності середньої деформації зсуву від величини міжвалкового проміжку  $2h_{\min}$  і швидкості обертання швидкохідного валка  $R_B$ .

Як видно з рис. 4.10, зменшення коефіцієнта фрикції в міжвалковому проміжку приводить до збільшення середньої деформації зсуву під час вальцювання, а отже сприяє якості змішування.

З іншого боку, під час вальцювання оброблюваний ТпМ зазвичай знаходиться на передньому (тихохідному) валку, біля поверхні якого наявні найбільш інтенсивні дисипативні виділення теплоти в ТпМ (особливо за низьких значень коефіцієнта фрикції). При цьому для забезпечення перебування ТпМ на передньому валку його температуру необхідно забезпечити більшою за температуру заднього валка.

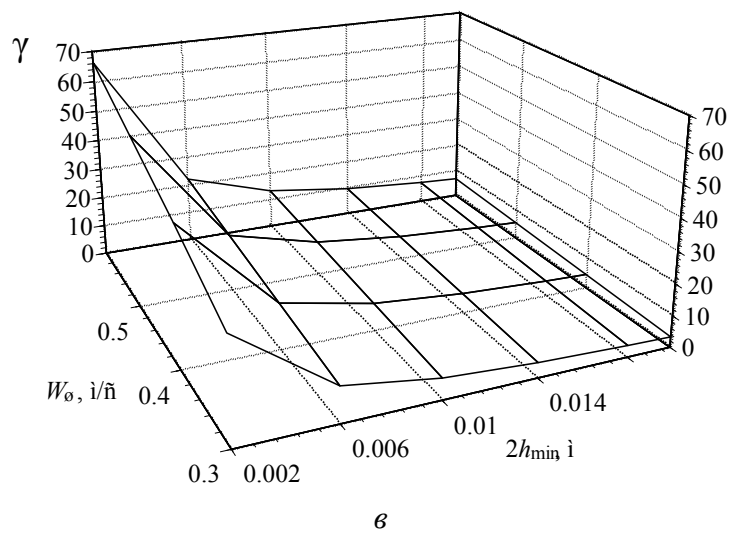
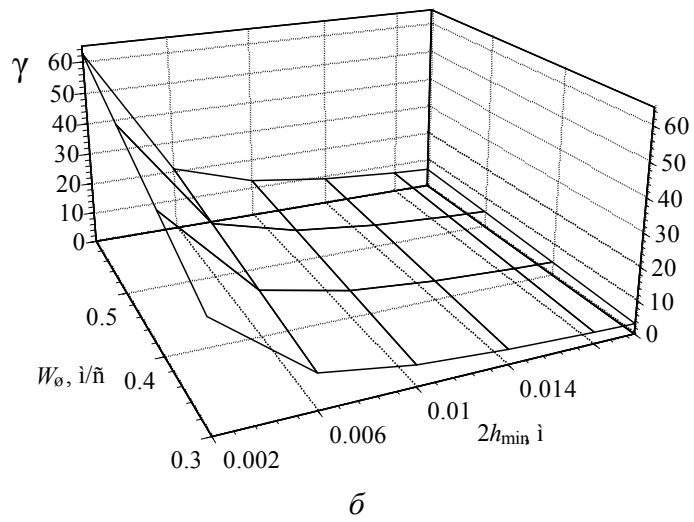
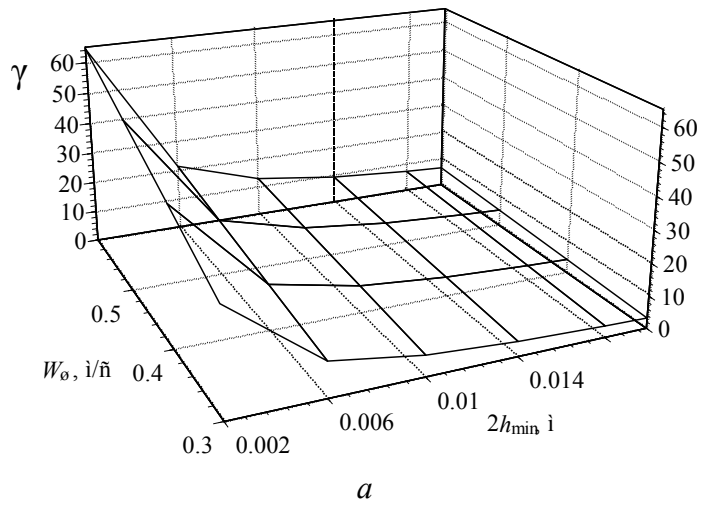


Рис. 4.10. Зміна середньої деформації зсуву ТпМ у міжвалковому проміжку залежно від величини міжвалкового проміжку  $2h_{\min}$  та швидкості обертання швидкохідного валка  $W_{\omega}$ , за різних значень коефіцієнта фрикції:  $\psi = 1$  (а);  $\psi = 0,8$  (б);  $\psi = 0,6$  (в)

Внаслідок цього градієнт температури по товщині полотна істотно зростає. Охолодження вальцьованого полотна ТпМ поза межами міжвалкового проміжку за рахунок його контакту з оточуючим середовищем відбувається з боку менш прогрітих шарів ТпМ, що призводить до ще більшого градієнта температури по товщині полотна, а отже і погіршує якість одержуваної продукції.

Таким чином, процес вальцювання високов'язких ТпМ доцільно здійснювати за значень коефіцієнта фрикції, не менше ніж 0,70...0,75.

#### 4.3.4. Моделювання переробки на гладильному каландрі

Оскільки процес переробки неньютонівських рідин, поведінка яких під навантаженням описується степеневим законом, досліджено достатньо докладно (див. п. 1.4.3), проаналізуємо переробку в міжвалковому проміжку гладильного каландра матеріалів, поведінка яких під навантаженням описується законом внутрішнього тертя Ньютона (4.3).

У міжвалковому проміжку гладильного каландра наявні три області перероблюваного ТпМ (див. рис. 1.13): два шари затверділого ТпМ, які контактують з поверхнями валків, що обертаються з однаковими швидкостями, а також розташований між ними прошарок ТпМ, що перебуває у в'язкоплинному стані.

У міру проходження термопластичним матеріалом міжвалкового проміжку товщина шарів затверділого ТпМ внаслідок його охолодження з боку валків збільшується, а товщина прошарку ТпМ відповідно зменшується.

Температурне поле в областях затверділого матеріалу описується рівнянням нестационарної теплопровідності виду [319]

$$\rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{\text{ТпМ}} \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (4.60)$$

Початкова умова

$$T|_{t=0} = T_{\text{п}}(y). \quad (4.61)$$

Граничні умови по температурі:

$$\left. \begin{aligned} T|_{y=h} &= T_{\text{В1}}, \\ T|_{y=-h} &= T_{\text{В2}}; \end{aligned} \right\} \quad (4.62)$$

$$T \Big|_{\substack{y=h-\delta_1 \\ y=-h+\delta_2}} = T_{\text{ТВ}}, \quad (4.63)$$

де  $\delta_1$  і  $\delta_2$  – товщина шарів затверділого ТпМ з боку відповідного валка (див. рис. 1.13);  $T_{\text{ТВ}}$  – температура твердіння ТпМ.

Умова  $t = 0$  відповідає входу листової заготовки у міжвалковий проміжок.

Температурне поле в області в'язкоплинного матеріалу визначають, розв'язуючи систему рівняння руху (4.1), реологічного рівняння (4.3), рівняння енергії (4.39), а також рівняння нерозривності:

$$G_V = \int_{-h+\delta_2}^{h-\delta_1} w_x dy. \quad (4.64)$$

Початкові умови мають вигляд:

$$T|_{x=x_{\Pi}} = T_{\Pi}(y); \quad (4.65)$$

$$w_x|_{x=x_{\Pi}} = w_{\Pi}, \quad (4.66)$$

а граничні умови:

$$T \Big|_{\substack{y=h-\delta_1 \\ y=-h+\delta_2}} = T_{\text{ТВ}}; \quad (4.67)$$

$$\left. \begin{aligned} w_x|_{y=h-\delta_1} &= \omega_B(R_B + h - \delta_1), \\ w_x|_{y=-h+\delta_2} &= \omega_B(R_B + h - \delta_2). \end{aligned} \right\} \quad (4.68)$$

де  $w_{\Pi}$  – швидкість листової заготовки ТпМ на вході в міжвалковий проміжок.

Визначимо розподіл швидкостей ТпМ, градієнта швидкості й тиску в міжвалковому проміжку.

У рівняння (4.3) і (4.39) входять складова швидкості вздовж міжвалкового проміжку  $w_x$  і градієнт цієї складової поперек проміжку  $\partial w_x / \partial y$ . Для визначення складової швидкості  $w_x$  в області розплаву ( $-h + \delta_2 \leq y \leq h - \delta_1$ ) необхідно розв'язати рівняння руху (4.1) з урахуванням реологічного рівняння (4.3) і граничних умов (4.68). Інтегруючи рівняння (4.1) з урахуванням зазначених залежностей, остаточно отримаємо

$$w_x = \omega_B(R_B + h - \delta_1) - \frac{\omega_B(\delta_2 - \delta_1)}{\delta_1 + \delta_2}(\delta_1 - y) - \frac{1}{2\mu_{\text{ТпМ}}} \frac{dp}{dx}(\delta_1^2 - y^2). \quad (4.69)$$

Об'ємна витрата ТпМ у в'язкоплинному стані крізь одиницю ширини міжвалкового проміжку становить

$$\begin{aligned} G_V &= 2w_K h_K - [(h - \delta_1)w_{\text{ТВ1}} + (h - \delta_2)w_{\text{ТВ2}}] = \\ &= \omega_B \left\{ 2R_B h_K - \frac{1}{2} [(2R_B + h - \delta_1)(h - \delta_1) + (2R_B + h - \delta_2)(h - \delta_2)] \right\}, \quad (4.70) \end{aligned}$$

де  $w_K$  – швидкість листа на виході з міжвалкового проміжку;

$w_{\text{ТВ1}}$  і  $w_{\text{ТВ2}}$  – середні швидкості шарів затверділого матеріалу:

$$w_{\text{ТВ1}} = \omega_B \left( R_B + \frac{h - \delta_1}{2} \right); \quad w_{\text{ТВ2}} = \omega_B \left( R_B + \frac{h - \delta_2}{2} \right).$$

Підставляючи (4.69) у залежність (4.64) і прирівнюючи після цього рівняння (4.64) і (4.70), отримаємо вираз для визначення градієнта тиску вздовж проміжку

$$\frac{dp}{dx} = 2\mu_{\text{ТПМ}}\omega_{\text{В}}f(h, \delta_1, \delta_2), \quad (4.71)$$

$$\begin{aligned} \text{де } f(h, \delta_1, \delta_2) = & \left( \frac{2\delta_1^3}{3} + \delta_1^2\delta_2 - \frac{\delta_2^3}{3} \right)^{-1} \times \\ & \times \left\{ \frac{1}{2} [(2R_{\text{В}} + h - \delta_1)(h - \delta_1) + (2R_{\text{В}} + h - \delta_2)(h - \delta_2)] + \right. \\ & \left. + \left( R_{\text{В}} + h - \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \right) (\delta_1 + \delta_2) - 2R_{\text{В}}h_{\text{К}} \right\}. \end{aligned}$$

З урахуванням (4.71) вираз (4.69) матиме вигляд

$$w_x = \omega_{\text{В}} \left[ (R_{\text{В}} + h - \delta_1) - \frac{(\delta_2 - \delta_1)(\delta_1 - y)}{\delta_1 + \delta_2} - (\delta_1^2 - y^2) f(h, \delta_1, \delta_2) \right]. \quad (4.72)$$

Тоді градієнт складової швидкості  $w_x$  поперек проміжку (швидкість зсуву  $\dot{\gamma}$ ) становитиме

$$\frac{\partial w_x}{\partial y} = \dot{\gamma} = \omega_{\text{В}} \left[ \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1 + \delta_2} + 2y f(h, \delta_1, \delta_2) \right]. \quad (4.73)$$

Для випадку симетричного калібрування листа ( $T_{\text{В}1} = T_{\text{В}2}$  і  $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ ) вирази (4.71)–(4.73) набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dx} \Big|_{\text{сим}} &= \frac{3\mu_{\text{ТПМ}}\omega_{\text{В}}}{2\delta^3} [(2R_{\text{В}} + h - \delta)(h - \delta) + 2\delta(R_{\text{В}} + h - \delta) - 2R_{\text{В}}h_{\text{К}}]; \\ w_x \Big|_{\text{сим}} &= \omega_{\text{В}}(R_{\text{В}} + h - \delta) - 3\omega_{\text{В}}(\delta^2 - y^2) \times \\ &\times \frac{1}{4\delta^3} [(2R_{\text{В}} + h - \delta)(h - \delta) + 2\delta(R_{\text{В}} + h - \delta) - 2R_{\text{В}}h_{\text{К}}]; \\ \frac{\partial w_x}{\partial y} \Big|_{\text{сим}} &= \frac{3\omega_{\text{В}}y}{2\delta^3} [(2R_{\text{В}} + h - \delta)(h - \delta) + 2\delta(R_{\text{В}} + h - \delta) - 2R_{\text{В}}h_{\text{К}}]. \end{aligned}$$

У рівняннях (4.71)–(4.73) величини  $\delta_1$  і  $\delta_2$  характеризують положення поверхонь «розплав – затверділий матеріал», координати яких визначають під час розрахунку температурного поля в міжвалковому проміжку, виходячи з умови (4.67).

Для розрахунку температурного поля й координат розташування поверхонь «розплав – затверділий матеріал» рівняння (4.60) приводять до змінних  $x$  і  $y$ . Якщо середня швидкість руху затверділого матеріалу становить  $w_{\text{ТВ}}$ , то залежність між змінними  $t$ ,  $x$  і швидкістю руху затверділого матеріалу матиме вигляд  $x = t w_{\text{ТВ}}$ .

Тоді рівняння (4.60) у змінних  $x$  і  $y$  набуде вигляду

$$\rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}} w_{\text{ТВ}} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{\text{ТпМ}} \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (4.74)$$

де  $w_{\text{ТВ}} = w_{\text{ТВ1}}$  – для шару затверділого ТпМ з боку першого валка і  $w_{\text{ТВ}} = w_{\text{ТВ2}}$  – для шару затверділого ТпМ з боку другого валка.

З метою спрямлення міжвалкового проміжку та спрощення подальших розрахунків, введемо безрозмірні координати  $\xi$  і  $\varepsilon$  (4.46).

Розмістимо початок системи координат  $\xi_0$  у перерізі входу листової заготовки в міжвалковий проміжок (тобто в точку на відстані  $\xi_{\text{п}}$  від мінімального перерізу міжвалкового проміжку) і запишемо рівняння (4.74) у змінних  $\xi$  і  $\varepsilon$ :

$$\rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}} \frac{w_{\text{ТВ}}}{\sqrt{2R_{\text{в}} h_{\text{мін}}}} \frac{\partial T}{\partial \xi} = \frac{1}{\left( h_{\text{мін}} \left[ 1 + (\xi - \xi_{\text{п}})^2 \right] \right)^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left( \lambda_{\text{ТпМ}} \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \right). \quad (4.75)$$

Початкова і граничні умови (4.61)–(4.63) у цьому разі набудуть вигляду:

$$T|_{\xi=0} = T_{\text{п}}(\varepsilon);$$

$$T|_{\varepsilon=1} = T_{\text{В1}}; \quad T|_{\varepsilon=-1} = T_{\text{В2}}; \quad T \Big|_{\substack{\varepsilon=(h-\delta_1)/h \\ \varepsilon=(-h+\delta_2)/h}} = T_{\text{ТВ}}.$$

Рівняння енергії (4.39) з умовами (4.67) і (4.68) у змінних  $\xi$  і  $\varepsilon$  матиме вигляд

$$\begin{aligned} & \rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}} \frac{w_{\xi, \varepsilon}}{\sqrt{2R_{\text{в}} h_{\text{мін}}}} \frac{\partial T}{\partial \xi} = \\ & = \frac{1}{\left( h_{\text{мін}} \left[ 1 + (\xi - \xi_{\text{п}})^2 \right] \right)^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left( \lambda_{\text{ТпМ}} \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \right) + \frac{\tau_{\xi, \varepsilon}}{h_{\text{мін}} \left[ 1 + (\xi - \xi_{\text{п}})^2 \right]} \frac{\partial w_{\xi, \varepsilon}}{\partial \varepsilon}. \end{aligned} \quad (4.76)$$

Початкові й граничні умови (4.65)–(4.67) у цьому разі:

$$T|_{\xi=0} = T_{\text{п}}(\varepsilon); \quad w_x|_{\xi=0} = w_{\text{п}};$$

$$T \Big|_{\substack{\varepsilon=(h-\delta_1)/h \\ \varepsilon=(-h+\delta_2)/h}} = T_{\text{ТВ}}.$$

Диференційні рівняння (4.75) і (4.76) належать до квазілінійних рівнянь параболічного типу. Для їх розв'язання вибрано метод скінченних різниць. Оскільки матеріал надходить в міжвалковий проміжок у в'язкоплинному стані з температурою  $T > T_{\text{ТВ}}$ , то на другому за початковим шаром, якому відповідає координата  $\xi = 0$ , температуру розраховують за рівнянням (4.76). Потім за умовою  $T = T_{\text{ТВ}}$  визначають координати  $\varepsilon_1 = (h - \delta_1)/h$  і  $\varepsilon_2 = (-h + \delta_2)/h$ , які відповідають безрозмірним координатам розташування поверхонь «розплав – затверділий матеріал». Уточнення температурного поля на цьому же шарі

проводять за рівнянням (4.75) для областей затверділого матеріалу та (4.76) для області розплаву. Також на поверхнях з координатами  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  перевіряють виконання граничної умови четвертого роду

$$\lambda_{\text{ТВ}} \frac{\partial T_{\text{ТВ}}}{\partial \varepsilon} = \lambda_{\text{Р}} \frac{\partial T_{\text{Р}}}{\partial \varepsilon},$$

де  $\lambda_{\text{ТВ}}$ ,  $\lambda_{\text{Р}}$ ,  $T_{\text{ТВ}}$  і  $T_{\text{Р}}$  – теплопровідності й температури ТпМ в областях затверділого матеріалу й розплаву відповідно.

Розрахунок температурного поля й положення поверхонь «розплав – затверділий матеріал» проводять послідовно шар за шаром до перерізу виходу листа з міжвалкового проміжку.

Оскільки рівняння (4.75) і (4.76) належать до квазілінійних диференціальних рівнянь параболічного типу (2.13), то, приводячи їх до загального вигляду, отримуємо коефіцієнти при похідних і праві частини рівнянь (4.75) і (4.76):

– для рівняння (4.75) (область затверділого ТпМ):

$$C(T, \xi, \varepsilon) = \rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}} \frac{w_{\text{ТВ}}}{\sqrt{2R_{\text{В}} h_{\text{мін}}}} \left( h_{\text{мін}} \left[ 1 + (\xi - \xi_{\text{П}})^2 \right] \right)^2;$$

$$k(T, \xi, \varepsilon) = \lambda_{\text{ТпМ}};$$

$$A(T, \xi, \varepsilon) = 0;$$

$$f(T, \xi, \varepsilon) = 0;$$

– для рівняння (4.76) (область розплаву ТпМ):

$$C(T, \xi, \varepsilon) = \rho_{\text{ТпМ}} c_{\text{ТпМ}} \frac{w_{\xi, \varepsilon}}{\sqrt{2R_{\text{В}} h_{\text{мін}}}} \left( h_{\text{мін}} \left[ 1 + (\xi - \xi_{\text{П}})^2 \right] \right)^2;$$

$$k(T, \xi, \varepsilon) = \lambda_{\text{ТпМ}};$$

$$A(T, \xi, \varepsilon) = 0;$$

$$f(T, \xi, \varepsilon) = \tau_{\xi, \varepsilon} h_{\text{мін}} \left[ 1 + (\xi - \xi_{\text{П}})^2 \right].$$

При цьому коефіцієнти граничних умов (2.15) і (2.16) матимуть вигляд:

$$\alpha_1(\xi) = 1, \quad \beta_1(\xi) = 0, \quad \varphi_1(\xi) = T_{\text{В1}};$$

$$\alpha_2(\xi) = 1, \quad \beta_2(\xi) = 0, \quad \varphi_2(\xi) = T_{\text{В2}}.$$

Нижче наведено результати числового моделювання температурного поля в міжвалковому проміжку гладильного каландра (індекс 593920, вузол 593920-02.00.000) лінії виробництва деревнополімерних листів ЛДПЛ–1200 (індекс 101566), що випускає ВАТ «НВП „Більшовик”», м. Київ. При цьому досліджували деревнополімерний ТпМ на основі поліетилену низької густини марки 10803-020 ГОСТ 16337 з наповнювачем у вигляді дубової тирси з середнім розміром частинок 0,001 м (масова частка дубової тирси в ТпМ – 47 %).

Вихідними даними для розрахунку є: радіус бочок валків; мінімальний розмір міжвалкового проміжку; товщина листової заготовки на вході в міжва-

лковий проміжок і на виході з нього; температури бочок валків; початкова температура листової заготовки; колова швидкість бочок валків; реологічні й теплофізичні властивості перероблюваного ТпМ.

Перероблюваний ТпМ належить до наповнених композиційних матеріалів, тому його теплофізичні й реологічні властивості залежать від властивостей компонентів, складу і структури матеріалу (див. п. 1.2.2).

Залежності теплофізичних властивостей ПЕВТ марки 10803-020 від температури у вигляді поліномів мають такий вигляд [203]:

– густина:

а) при  $T \leq 105$  °С  $\rho_{\text{тп}} = -4,2644 \cdot 10^{-4} T^3 + 6,5652 \cdot 10^{-2} T^2 - 3,7412 T + 911,33$ ;

б) при  $105 < T \leq 107$  °С  $\rho_{\text{тп}} = 1,3984 \cdot 10^{-3} T^2 - 5,5859 \cdot 10^{-1} T + 778,85$ ;

в) при  $T > 107$  °С  $\rho_{\text{тп}} = 1,3984 \cdot 10^{-3} T^2 - 5,5859 \cdot 10^{-1} T + 778,85$ ;

– теплопровідність:

а) при  $T \leq 105$  °С  $\lambda_{\text{тп}} = -8,3612 \cdot 10^{-4} T + 0,43187$ ;

б) – при  $T > 105$  °С  $\lambda_{\text{тп}} = 2,9002 \cdot 10^{-5} T^2 - 9,9868 \cdot 10^{-3} T + 1,0733$ ;

– масова теплоємність:

а) при  $T \leq 105$  °С  $c_{\text{тп}} = 0,29002 T^2 - 19,849 T + 3910,9$ ;

б) при  $105 < T \leq 107$  °С  $c_{\text{тп}} = 7250 T - 7,5575 \cdot 10^5$ ;

в) при  $107 < T \leq 117$  °С  $c_{\text{тп}} = -19,329 T^3 + 6,7583 \cdot 10^3 T^2 - 7,8771 \cdot 10^5 T + 3,0608 \cdot 10^7$ ;

г) при  $T > 117$  °С  $c_{\text{тп}} = -4,7857 \cdot T + 2734,6$ .

Теплофізичні властивості дубової тирси становлять [320]:  $\rho_{\text{н}} = 800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_{\text{н}} = 0,285$  Вт/(м·К);  $c_{\text{н}} = 1760$  Дж/(кг·К).

Беручи до уваги розміри й форму наповнювача перероблюваного ТпМ, густину ТпМ визначали за залежністю (1.4), теплопровідність – за залежністю (1.1), а масову теплоємність – за залежністю (1.3).

Реологічні властивостей перероблюваного ТпМ досліджені в праці [198]:  $K_{\dot{\gamma} \leq 30} = 10200$  Па·с<sup>n</sup>,  $n_{\dot{\gamma} \leq 30} = 0,794$ ;  $K_{\dot{\gamma} > 30} = 83000$  Па·с<sup>n</sup>,  $n_{\dot{\gamma} > 30} = 0,216$ :

$$K = 14000 \exp\left(-7,62 \frac{T-180}{180}\right), \text{ де } K_0 = 14000 \text{ Па} \cdot \text{с}^n; T_0 = 180 \text{ °С}; \beta = 7,62.$$

На рис. 4.11 наведено залежність розподілу температури по товщині листа від температури валків, на рис. 4.12 – те саме, але від колової швидкості валків, а на рис. 4.13 – розподіл температури по товщині листа залежно від його товщини. З рис. 4.11–4.13 видно, що зі зменшенням температури і швидкості валків, а також товщини листової заготовки швидкість її охолодження збільшується.

Під час калібрування листової заготовки, яке супроводжується її охолодженням, на відміну від процесів вальцювання і традиційного каландрування (див. рис. 4.8), помітного підвищення температури перероблюваного ТпМ не

спостерігається. Це можна пояснити значно більшою величиною міжвалкового проміжку, невеликими швидкостями переробки і відповідно меншою об'ємною густиною теплового потоку дисипації.

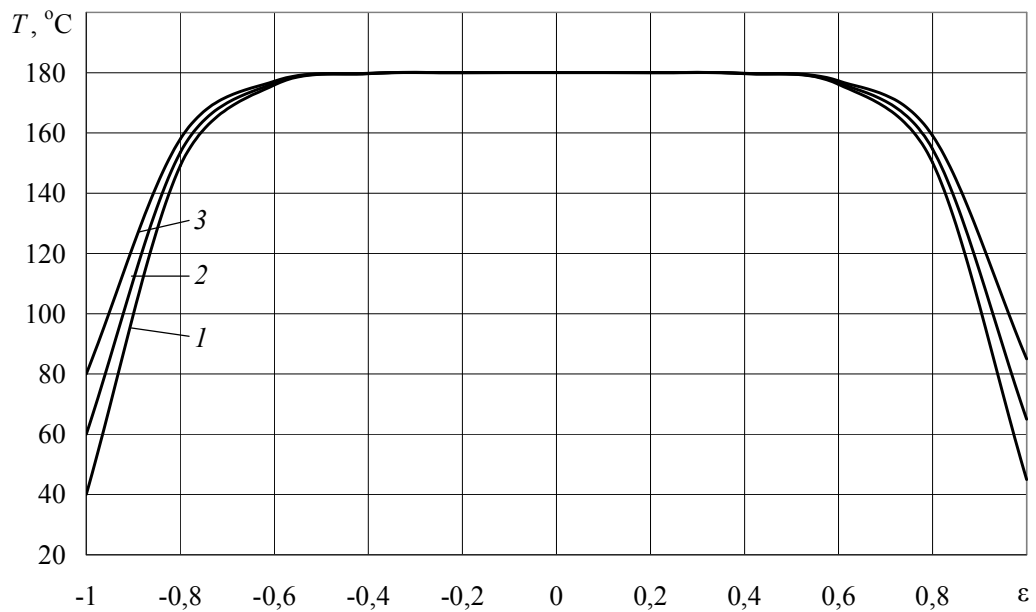


Рис. 4.11. Розподіл температури по товщині листа залежно від температури валків ( $W_B = 0,08$  м/с;  $\delta = 3$  мм): 1 –  $T_{B1} = 40$  °С;  $T_{B2} = 45$  °С; 2 –  $T_{B1} = 80$  °С;  $T_{B2} = 85$  °С; 3 –  $T_{B1} = 120$  °С;  $T_{B2} = 125$  °С

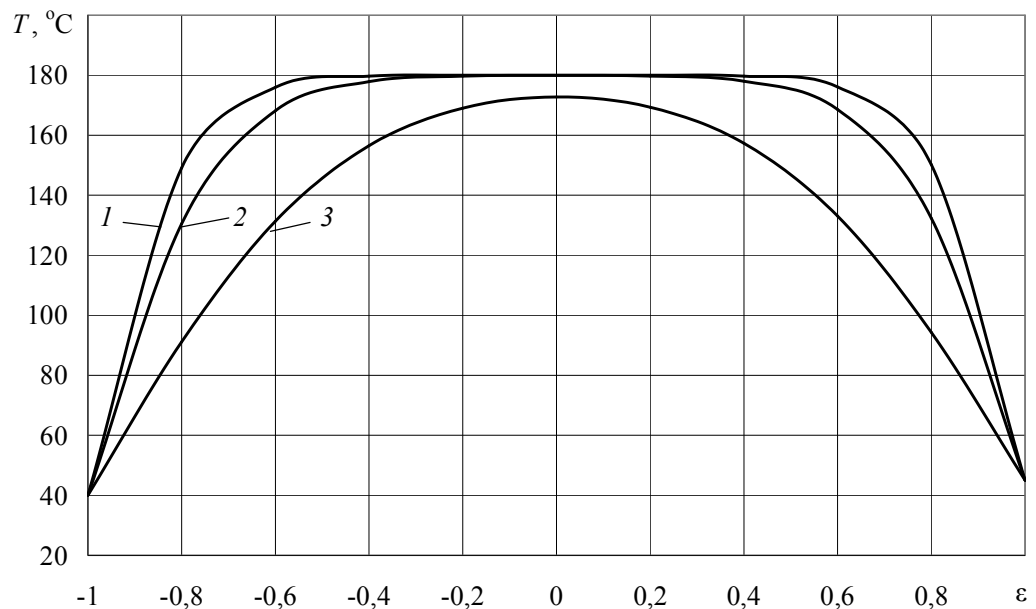


Рис. 4.12. Розподіл температури по товщині листа залежно від колдової швидкості валків ( $T_{B1} = 40$  °С;  $T_{B2} = 45$  °С;  $\delta = 3$  мм): 1 –  $W_B = 0,08$  м/с; 2 –  $W_B = 0,04$  м/с; 3 –  $W_B = 0,01$  м/с

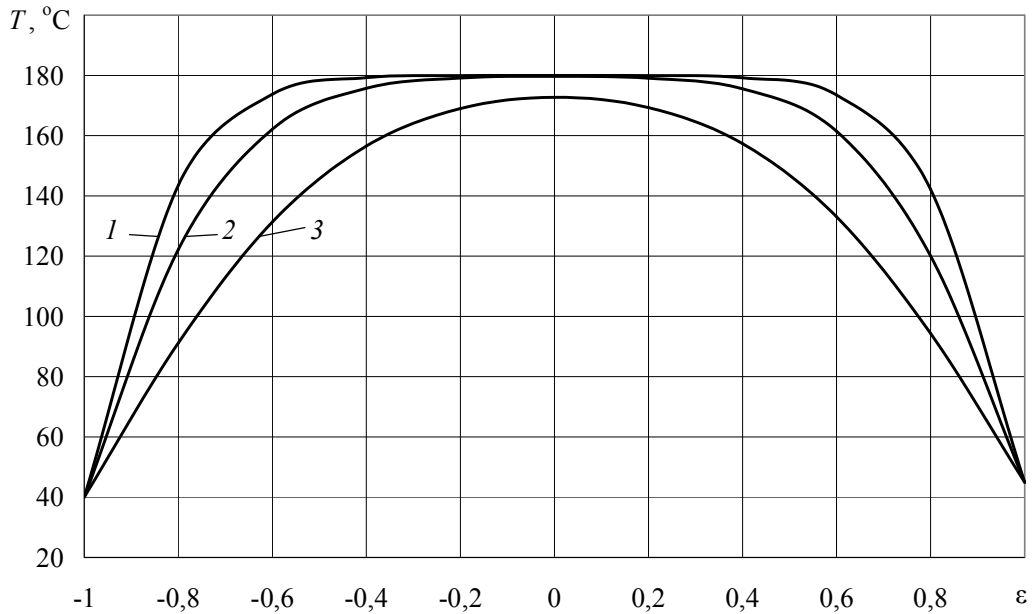


Рис. 4.13. Розподіл температури по товщині листа залежно від його товщини ( $W_B = 0,01$  м/с;  $T_{B1} = 40$  °С;  $T_{B2} = 45$  °С): 1 –  $\delta = 10$  мм; 2 –  $\delta = 6$  мм; 3 –  $\delta = 3$  мм

Зменшення температури і швидкості валків, а також товщини листової заготовки (див. рис. 4.12, 4.13) може призвести до передчасного твердіння матеріалу по всій його товщині. Отже під час калібрування листів на гладильно-му каландрі необхідно враховувати співвідношення цих величин.

Тепер визначимо величини розпирних зусиль, що діють на валки.

Розпірне зусилля, що діє на валок з боку перероблюваного матеріалу та спричинене тиском розплаву ТпМ, визначають як інтеграл функції розподілу тиску вздовж зони деформації міжвалкового проміжку. Довжина зони деформації визначається розмірами листової заготовки на вході в міжвалковий проміжок, розмірами листа на виході з проміжку, а товщина – поверхнями «валок – розплав ТпМ» або «затверділий ТпМ – розплав» (залежно від наявності з боку відповідного валка області затверділого ТпМ у даному поперечному перерізі міжвалкового проміжку).

Питоме розпірне зусилля, що діє на валок, визначають з рівняння

$$F = \int_{x_{\Pi}}^{x_K} p(x) dx = \int_{x_{\Pi}}^{x_K} \int_{x_{\Pi}}^x \frac{dp(x)}{dx} dx dx .$$

При переході до безрозмірної координати  $\xi$  (4.46) з урахуванням (4.71) отримаємо

$$F = \sqrt{2R_B h_{\min}} \int_{\xi_{\Pi}}^{\xi_K} p(\xi) d\xi = 2R_B h_{\min} \int_{\xi_{\Pi}}^{\xi_K} \int_{\xi_{\Pi}}^{\xi} \frac{dp}{dx} d\xi d\xi =$$

$$= 4\omega_B R_B h_{\min} \mu_{\text{ТПМ}} \int_{\xi_{\Pi}}^{\xi_K} \int_{\xi} f(h, \delta_1, \delta_2) d\xi d\xi .$$

У системі координат  $\xi O_1 \epsilon$  величини  $\xi_{\Pi}$  і  $\xi_K$  обчислюють за формулами (див. рис. 1.13):

$$\xi_{\Pi} = \sqrt{\frac{R_B^2 - (R_B - h_{\Pi} + h_{\min})^2}{2R_B h_{\min}}};$$

$$\xi_K = \sqrt{\frac{R_B^2 - (R_B - h_K + h_{\min})^2}{2R_B h_{\min}}}.$$

Розподіл напружень зсуву в проміжку з урахуванням (4.3) і (4.73) становить

$$\tau_{xy} = \mu_{\text{ТПМ}} \omega_B \left[ \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1 + \delta_2} + 2y f(h, \delta_1, \delta_2) \right].$$

Питомі крутні моменти, що діють на валки, можна визначити за залежностями:

$$M_1 = \int_{x_{\Pi}}^{x_K} (R_B + \delta_1) \tau_{xy} \Big|_{y=h-\delta_1} dx = \sqrt{2R_B h_{\min}} \int_{\xi_{\Pi}}^{\xi_K} (R_B + \delta_1) \tau_{xy} \Big|_{y=h-\delta_1} d\xi;$$

$$M_2 = \int_{x_{\Pi}}^{x_K} (R_B + \delta_2) \tau_{xy} \Big|_{y=-h+\delta_2} dx = -\sqrt{2R_B h_{\min}} \int_{\xi_{\Pi}}^{\xi_K} (R_B + \delta_2) \tau_{xy} \Big|_{y=-h+\delta_2} d\xi.$$

Тоді моменти опору обертанню валків з боку перероблюваного матеріалу становлять:

$$M_1 = \omega_B L_B \sqrt{2R_B h_{\min}} \int_{\xi_{\Pi}}^{\xi_K} \mu_{\text{ТПМ}} (R_B + \delta_1) \left[ \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1 + \delta_2} + 2\delta_1 f(h, \delta_1, \delta_2) \right] d\xi; \quad (4.77)$$

$$M_2 = -\omega_B L_B \sqrt{2R_B h_{\min}} \int_{\xi_{\Pi}}^{\xi_K} \mu_{\text{ТПМ}} (R_B + \delta_2) \left[ \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1 + \delta_2} - 2\delta_2 f(h, \delta_1, \delta_2) \right] d\xi. \quad (4.78)$$

Потужність, що витрачається на деформування матеріалу в міжвалковому проміжку, становитиме

$$N_{\text{ТПМ}} = N_1 + N_2 = \omega_B (M_1 + M_2),$$

де  $N_1, N_2$  – потужності, що підводяться до відповідного валка.

З боку перероблюваного матеріалу крім розпірного зусилля, спричиненого тиском у міжвалковому проміжку, на валок діє сила  $P_{1(2)}$ , дотична до поверхні «затверділий ТпМ – розплав». Для зручності розрахунків дотичну до кожного валка силу замінюють статично еквівалентною системою сил: поперечною силою  $P_{1(2)}$ , прикладеною до осі валка, і моментом  $M_{1(2)}$ , що визначають за формулою (4.77) або (4.78).

Зазначені сили, що діють на валки, які утворюють міжвалковий проміжок, можна визначити за залежностями:

$$P_1 = \omega_B L_B \sqrt{2R_B h_{\min}} \int_{\xi_{\Pi}}^{\xi_K} \mu_{\text{ТпМ}} \left[ \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1 + \delta_2} - 2\delta_1 f(h, \delta_1, \delta_2) \right] d\xi;$$

$$P_2 = -\omega_B L_B \sqrt{2R_B h_{\min}} \int_{\xi_{\Pi}}^{\xi_K} \mu_{\text{ТпМ}} \left[ \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1 + \delta_2} - 2\delta_2 f(h, \delta_1, \delta_2) \right] d\xi.$$

Крутний момент, необхідний для обертання відповідного валка, визначають за залежністю

$$M_{\Sigma 1(2)} = M_{1(2)} + M_{\text{підш } 1(2)},$$

тоді потужність групового приводу валків можна визначити за формулою

$$N_{\text{пр}} = \frac{\omega_B (M_{\Sigma 1} + M_{\Sigma 2})}{\eta_{\text{пр}}}.$$

Для обчислення в'язкості матеріалу необхідно визначити величину середньої швидкості зсуву  $\bar{\gamma}$  у міжвалковому проміжку. У поперечному перерізі міжвалкового проміжку з поточною поздовжньою координатою  $\rho$  швидкість зсуву визначають залежністю (4.73). Тоді абсолютна величина  $\bar{\gamma}$  становитиме

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{|x_K - x_{\Pi}|} \int_{x_{\Pi-h+\delta_2}}^{x_K} \int_{h-\delta_1}^{h-\delta_2} \left| \frac{\dot{\gamma}(x, y)}{(\delta_1 + \delta_2)} \right| dy dx =$$

$$= \frac{\omega_B}{|\xi_{\Pi} - \xi_K|} \int_{\xi_{\Pi-h+\delta_2}}^{\xi_K} \int_{h-\delta_1}^{h-\delta_2} \left| \frac{1}{(\delta_1 + \delta_2)} \left[ \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1 + \delta_2} + 2y f(h, \delta_1, \delta_2) \right] \right| dy d\xi.$$

Середню температуру матеріалу в міжвалковому проміжку з достатнім ступенем точності можна взяти як середнє арифметичне ТпМ на вході в проміжок і на виході з нього:  $\bar{t} = (t_{\Pi} + t_K)/2$ . При цьому температура матеріалу на вході в проміжок  $t_{\Pi}$  зазвичай відома, а температуру на виході з проміжку  $t_K$ , яка змінюється внаслідок теплообміну перероблюваного матеріалу з поверхнями валків і дисипативних виділень в об'ємі розплаву ТпМ, обчислюють як середню на виході з міжвалкового проміжку за рівняннями (4.75) і (4.76).

Промислова експлуатація технологічних ліній з виготовлення листів з ТпМ (поліолефіни з деревними частинками) дають підстави щодо можливості застосування запропонованих рівнянь для теоретичного аналізу процесу калібрування листів на гладильному каландрі.

#### 4.4. Висновки

Відповідно до проведених досліджень можна зробити такі висновки.

1. Розроблено математичні моделі роторного змішувача для неньюто-

нівської і для ньютонівської моделей перероблюваних ТпМ з використанням вторинної сировини, у яких враховано вплив на процес переробки як серпоподібних проміжків, утворюваних передніми поверхнями роторів і стінкою змішувальною камери, так і мінімальних проміжків, утворюваних гребенями роторів і стінкою змішувальною камери.

Досліджено вплив геометричних і швидкісних параметрів змішувача на енергосилові характеристики процесу змішування. Показано, що за величиною потужності, споживаної приводом змішувача, для певного матеріалу можна контролювати знос гребенів ротора і поверхні змішувальної камери. Встановлено, що ефективна експлуатація роторного змішувача можлива до досягнення мінімальним проміжком величини 4,5...5,5 мм, після чого робочі органи (зазвичай гребені роторів) необхідно відновлювати.

Удосконалено методику визначення тривалості приготування ТпМ у роторних змішувачах.

Розроблені методики використано під час розрахунку роторних змішувачів 250/22-44 виробництва ВАТ «НВП „Більшовик”», м. Київ (індекси 522015, 522018).

2. Удосконалено математичну модель неізотермічного процесу переробки ТпМ ньютонівської моделі в міжвалковому проміжку валкових машин у широкому діапазоні співвідношення швидкостей валків, а також методику визначення тривалості безперервного і періодичного вальцювання ТпМ.

Досліджено вплив умов переробки на температурні поля ТпМ певного складу в міжвалковому проміжку. Показано, що зі зменшенням коефіцієнта фрикції температура високонаповнених ТпМ у міжвалковому проміжку зростає, причому локальна температура може збільшуватися на 25–30 °С, що має велике значення під час переробки схильних до термічної деструкції ТпМ з використанням вторинної сировини.

Розроблені методики використано під час розрахунку вальців ВПСм-Пд 2400-850/850 і ВПСм-Пд 2100-660/660, (індекси 502071, 502072, 502074, 502075), а також каландрів КП4-850-2400 (індекс 504018) і КП4-710-1800 (індекс 504016) виробництва ВАТ «НВП „Більшовик”», м. Київ.

3. Розроблено математичну модель неізотермічного процесу переробки ТпМ ньютонівської моделі в міжвалковому проміжку гладильного каландра. Отримано аналітичні залежності для визначення енергосилових параметрів процесу та досліджено залежність температурного поля ТпМ від параметрів переробки.

Показано, що під час калібрування листової заготовки, на відміну від процесу традиційного каландрування, внаслідок значно більшої величини міжвалкових проміжків, невеликих швидкостей переробки і відповідно меншої об'ємної густини теплового потоку дисипації помітного підвищення температури перероблюваного ТпМ не спостерігається.

Встановлено, що зменшення температури і швидкості валків, а також товщини листової заготовки може призвести до передчасного твердіння матеріалу по всій його товщині, а отже під час калібрування листів на гладильному каландрі необхідно враховувати співвідношення цих величин.

Розроблену методику використано під час розрахунку гладильного каландра (індекс 593920) лінії для виробництва деревнополімерних листів ЛДПЛ–1200 (індекс 101566) виробництва ВАТ «НВП „Більшовик”», м. Київ.

4. На підставі аналізу впливу характеристик і режимів експлуатації змішувального обладнання на параметри процесу переробки ТпМ з використанням вторинної сировини розроблено конструкцію роторного змішувача, захищена патентом України на корисну модель № 34562 [321].

Основні наукові результати розділу 4 опубліковані в працях [126, 311–313, 315, 316, 318, 319, 321–327].

---

## **5. МОДЕЛЮВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕРМООБРОБКИ**

### **5.1. Класифікація обладнання для термообробки і загальні засади моделювання термообробки**

Термообробка є однією з відповідальних стадій одержання виробів з ТпМ з використанням вторинної сировини, що істотно впливає як на якість продукції, так і на її енерго- і матеріалоемність обладнання (див. підрозд. 1.3).

Узагальнену класифікацію обладнання для термообробки [78, 245, 246, 249 та ін.] наведено на рис. 5.1.

За способом дії на оброблюваний виріб найбільшого поширення набули пристрої для термообробки, в яких реалізується конвективний і променевий теплообмін, а також їх комбінація, а за характером дії – охолодні пристрої. При цьому спосіб організації теплового потоку в пристроях зазвичай визначається формою, розмірами і властивостями оброблюваного ТпМ.

Шуканою величиною під час моделювання пристроїв для термообробки за умови відомої продуктивності технологічної лінії та заданої кінцевої температури оброблюваного виробу є довжина зони термообробки, а за умови заданої довжини цієї зони – кінцева температура оброблюваного виробу та/або режим термообробки, що забезпечує зазначену температуру.

У загальному випадку процес термообробки описують рівнянням енергії (2.5) спільно з умовами однозначності. Оскільки форма й розміри перерізу виробу, що рухається в зоні термообробки, у більшості випадків майже не змінюється, то функцією дисипації в цьому разі можна знехтувати. Крім того, ві-

дмінною від нуля можна вважати лише одну зі складових швидкості (спрямована в напрямі руху виробу), яка в більшості випадків постійна для всіх точок перерізу виробу й визначається з рівняння заданої масової витрати. Тоді рівняння енергії в декартовій прямокутній системі координат матиме вигляд

$$\rho_{\text{тпм}} c_{\text{тпм}} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + W_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \nabla(\lambda_{\text{тпм}} \nabla T), \quad (5.1)$$

де  $W_z$  – швидкість руху безперервного або погонного виробу.

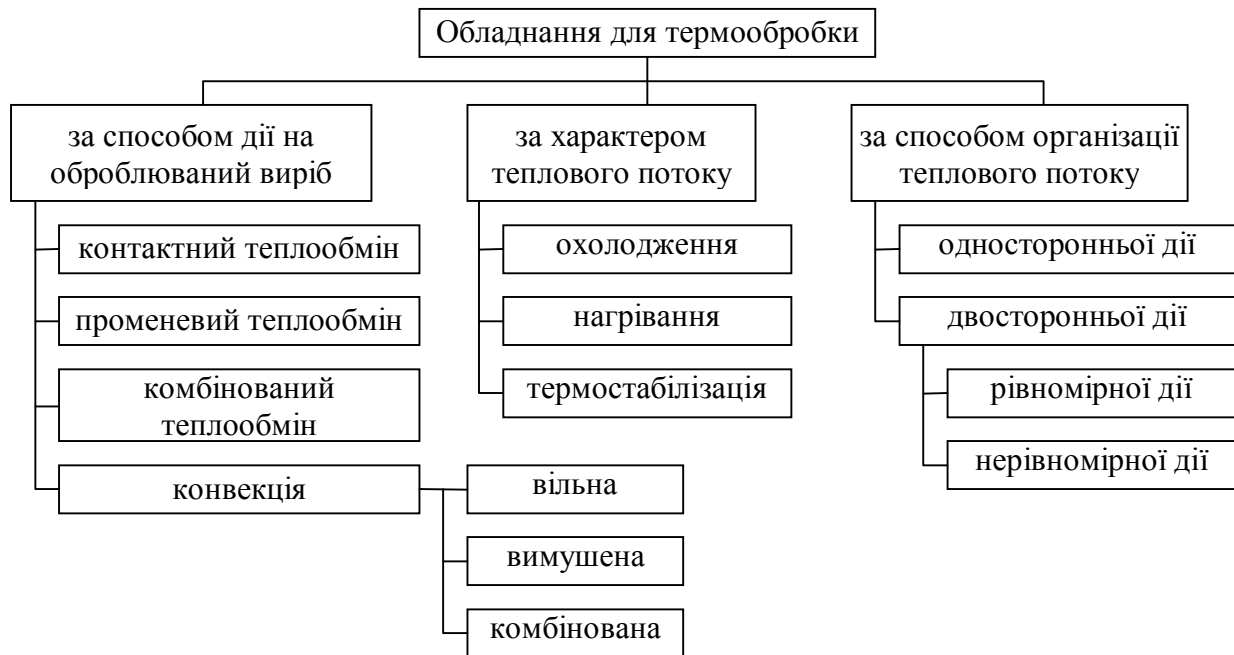


Рис. 5.1. Схема класифікації обладнання для термообробки

Оскільки основні процеси формування продукції – екструзія та каландрування – процеси безперервні, то для нерухомої системи координат рівняння (5.1) набуде вигляду

$$\rho_{\text{тпм}} c_{\text{тпм}} W_z \frac{\partial T}{\partial z} = \nabla(\lambda_{\text{тпм}} \nabla T), \quad (5.2)$$

а для рухомої, зв'язаної з оброблюваним виробом (враховуючи, що  $W_z = z/t$ ):

$$\rho_{\text{тпм}} c_{\text{тпм}} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_{\text{тпм}} \nabla T). \quad (5.3)$$

Рівняння (5.2) і (5.3) зазвичай розв'язують при граничних умовах першого або третього роду як за допомогою методів подібності, так і числовими методами [78, 243, 250, 254, 278, 320, 328, 329], які для процесу термообробки термопластичних матеріалів є більш доцільними, оскільки дають можливість враховувати залежність теплофізичних властивостей і коефіцієнтів тепловіддачі від температури.

Для безперервних процесів переробки ТпМ з використанням вторинної сировини найбільш поширеними є одержання безперервних (погонних) виробів, напівфабрикатів і матеріалів, а також одержання гранул цих матеріалів, тому розглянемо ці процеси докладніше.

## 5.2. Моделювання термообробки безперервних матеріалів і виробів

Розрахунок температурного поля по поперечному перерізу виробу в кожній точці пристрою для термообробки можливий у результаті розв'язання математичної моделі процесу термообробки, що складається з диференціального рівняння теплопровідності, початкових і граничних умов, які визначаються конструкцією пристрою і параметрами процесу. У загальному випадку процес термообробки відбувається в широкому діапазоні температур, тому необхідно враховувати залежність теплофізичних властивостей матеріалів як окремих структурних компонентів, так і матеріалу виробу в цілому від температури [108]. При цьому крім вже зазначених припущень вважатимемо, що в місці контакту двох сусідніх шарів багатшарового матеріалу реалізовані граничні умови четвертого роду.

Математичну модель процесу термообробки (далі для спрощення математичного опису розглядатиме найпоширеніший серед процесів термообробки процес охолодження) листового і плівкового матеріалу, розташованого в площині (горизонтальній, вертикальній, похилій) доцільно розглядати в прямокутній системі координат (рис. 5.2). При цьому процес термообробки виробу на транспортері також можна розглядати як термообробку матеріалу в пристрої конвективного типу.

Оскільки ширина таких матеріалів у десятки й сотні разів перевищує їх товщину, то рівняння нестационарної теплопровідності (5.3) для  $i$ -го шару шаруватого ТпМ у цьому разі матиме вигляд

$$\rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (5.4)$$

де  $\rho_i$ ,  $c_i$  і  $\lambda_i$  – густина, масова теплоємність і теплопровідність матеріалу  $i$ -го шару шаруватого ТпМ (у разі обробки одношарового ТпМ  $\rho_1 = \rho_{\text{ТпМ}}$ ;  $c_1 = c_{\text{ТпМ}}$ ;  $\lambda_1 = \lambda_{\text{ТпМ}}$ ).

Початкова умова

$$T|_{t=0} = T(x).$$

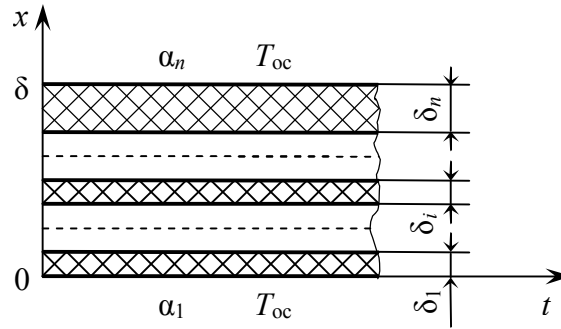


Рис. 5.2. Схема термообробки листового матеріалу в пристрої конвективного типу:  $x$  – координата, спрямована поперек ТпМ;  $\delta_1, \delta_i, \delta_n, \delta$  – товщина  $i$ -го шару ТпМ ( $i = \overline{1, n}$ ) і ТпМ у цілому;  $\alpha_1, \alpha_n$  – коефіцієнти тепловіддачі від поверхонь ТпМ до оточуючого середовища

Граничні умови:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1(T - T_{oc}) - \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0, \\ \alpha_n(T - T_{oc}) + \lambda_n \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} &= 0, \\ T_i \Big|_{x=\sum_i \delta_i} &= T_{i+1} \Big|_{x=\sum_i \delta_i}, \\ \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\sum_i \delta_i} &= \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\sum_i \delta_i}. \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

Рівняння (5.4) є квазілінійним рівнянням параболічного типу загального вигляду (2.13) з крайовими умовами (2.14)–(2.16).

Приводячи рівняння (5.4) і граничні умови (5.5) до загального вигляду, отримаємо коефіцієнти при похідних і праву частину рівняння (2.13):

$$C(T, t, x) = \rho_i c_i; \quad k(T, t, x) = \lambda_i; \quad A(T, t, x) = 0; \quad f(T, t, x) = 0.$$

Якщо коефіцієнти граничних умов (2.15) і (2.16) рівняння (2.13) прийняти рівними

$$\begin{aligned} \alpha_1(t) &= \alpha_1, & \beta_1(t) &= -\lambda_1, & \varphi_1(t) &= \alpha_1 T_{oc}; \\ \alpha_2(t) &= \alpha_2, & \beta_2(t) &= \lambda_n, & \varphi_2(t) &= \alpha_2 T_{oc}, \end{aligned}$$

то ці граничні умови відповідатимуть вигляду граничних умов (5.5) рівняння (5.4).

У випадку охолодження обох поверхонь ізотропного матеріалу з однакою інтенсивністю ( $\alpha_1 = \alpha_n = \alpha$ ) задачу можна розглядати як симетричну (рис. 5.3), і граничні умови матимуть вигляд:

$$\alpha_1(T - T_{oc}) - \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-\delta/2} = 0 \quad (5.6)$$

або

$$\alpha_n(T - T_{oc}) + \lambda_n \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta/2} = 0; \quad (5.7)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (5.8)$$

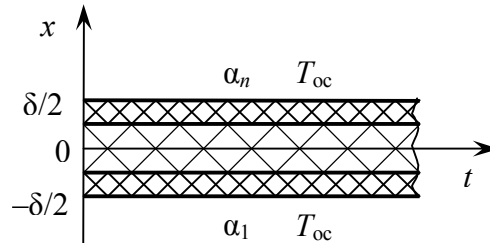


Рис. 5.3. Схема симетричного охолодження листового ізотропного матеріалу в пристрої конвективного типу ( $\alpha_1 = \alpha_n$ )

Тоді коефіцієнти граничних умов (2.15) і (2.16) рівняння (2.13) матимуть вигляд:

– для умов (5.6) і (5.8):

$$\begin{aligned} \alpha_1(t) &= \alpha, & \beta_1(t) &= -\lambda_1, & \varphi_1(t) &= \alpha T_{oc}; \\ \alpha_2(t) &= 0, & \beta_2(t) &= 1, & \varphi_2(t) &= 0; \end{aligned}$$

– для умов (5.7) і (5.8):

$$\begin{aligned} \alpha_1(t) &= \alpha, & \beta_1(t) &= \lambda_n, & \varphi_1(t) &= \alpha T_{oc}; \\ \alpha_2(t) &= 0, & \beta_2(t) &= 1, & \varphi_2(t) &= 0. \end{aligned}$$

Математичну модель процесу охолодження листового і плівкового матеріалу на пристрої барабанного типу доцільно розглядати в циліндричній системі координат (рис. 5.4).

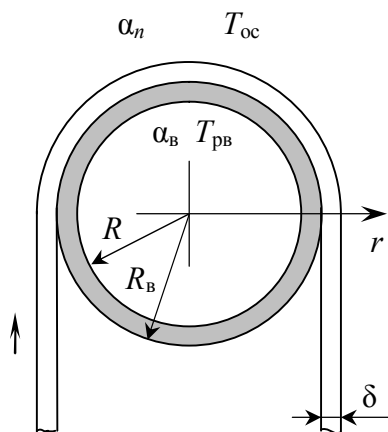


Рис. 5.4. Схема термообробки листового або плівкового матеріалу на пристрої барабанного типу:  $r, R, R_B$  – поточний радіус, радіус внутрішньої й зовнішньої поверхонь барабана (валка);  $T_{pв}$  – температура рідини в барабані;  $\alpha_в$  – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні обичайки барабана до рідини

У цьому разі рівняння нестационарної теплопровідності виду матиме вигляд

$$\rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_i}{r} \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (5.9)$$

Початкова умова

$$T|_{t=0} = T(r). \quad (5.10)$$

За умови гарантованого і стабільного забезпечення температури на поверхні барабана задають такі граничні умови: на поверхні ТпМ, що стикається з барабаном, – умови першого роду, а на вільній поверхні ТпМ – умови третього роду:

$$T_{r=R_B} = T_B; \quad (5.11)$$

$$\alpha_n (T - T_{oc}) + \lambda_n \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_B + \sum_i \delta_i} = 0; \quad (5.12)$$

$$T_i \Big|_{x=\sum_i \delta_i} = T_{i+1} \Big|_{x=\sum_i \delta_i}; \quad \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_B + \sum_i \delta_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_B + \sum_i \delta_i}. \quad (5.13)$$

Приводячи рівняння (5.9) до загального вигляду, отримуємо коефіцієнти при похідних і праву частину рівняння (2.13):

$$C(T, t, r) = \rho_i c_i; \quad k(T, t, r) = \lambda_i; \quad A(T, t, r) = \lambda_i / r; \quad f(T, t, r) = 0.$$

З урахуванням (5.11) і (5.12) коефіцієнти граничних умов (2.15) і (2.16) рівняння (2.13) матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} \alpha_1(t) &= 1, & \beta_1(t) &= 0, & \varphi_1(t) &= T_B; \\ \alpha_2(t) &= \alpha_n, & \beta_2(t) &= \lambda_n, & \varphi_2(t) &= \alpha_n T_{oc}. \end{aligned}$$

Розглянута модель обробки матеріалу на пристрої барабанного типу передбачає надійну систему термостабілізації температури на поверхні барабана, яка забезпечує при цьому значну витрату теплоносія, що часто буває економічно недоцільним. Для вибору найбільш ефективного теплоносія та його параметрів, які би забезпечили необхідну температуру на поверхні барабана, необхідно розв'язати задачу охолодження матеріалу з урахуванням параметрів теплоносія (див. рис. 5.4).

У цьому разі задають такі граничні умови: на внутрішній поверхні обичайки барабана і на вільній поверхні виробу – умови третього роду, а на поверхні виробу, що стикається з барабаном, – четвертого роду. При цьому в рівнянні (5.9) перший шар ( $i=1$ ) відповідатиме обичайці барабана ( $\delta_1 = R_B - R$ ), а решта – оброблюваному матеріалу.

Таким чином до граничних умов (5.12) і (5.13) необхідно додати умови

$$\alpha_B (T - T_{PB}) - \lambda_B \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0; \quad (5.14)$$

$$T_B = T_1; \quad \lambda_B \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_B} = \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_B}.$$

Крім того, до початкової умови по товщині ТпМ (5.10) додають початкову умову по товщині обичайки барабана

$$T|_{t=0} = T_B(r).$$

У разі розв'язання рівняння (5.9) для обичайки барабана коефіцієнти при похідних і права частину рівняння (2.13) набудуть вигляду:

$$C(T, t, r) = \rho_B c_B; \quad k(T, t, r) = \lambda_B; \quad A(T, t, r) = \lambda_B/r; \\ f(T, t, r) = 0.$$

З урахуванням (5.12) і (5.14) коефіцієнти граничних умов (2.15) і (2.16) рівняння (2.13) матимуть вигляд:

$$\alpha_1(t) = \alpha_B, \quad \beta_1(t) = -\lambda_B, \quad \varphi_1(t) = \alpha_B T_{PB}; \\ \alpha_2(t) = \alpha_n, \quad \beta_2(t) = \lambda_n, \quad \varphi_2(t) = \alpha_n T_{oc}.$$

Математичну модель процесу охолодження трубчастого матеріалу також доцільно розглядати в циліндричній системі координат (рис. 5.5).

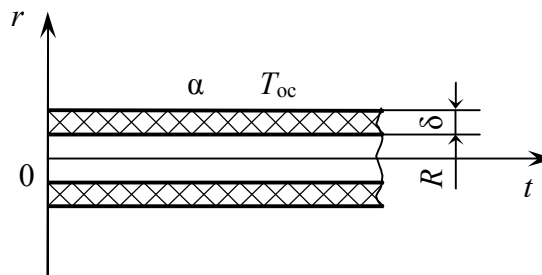


Рис. 5.5. Схема термообробки трубчастого матеріалу в пристрої конвективного типу:  
 $r, R$  – поточний радіус і радіус внутрішньої поверхні трубчастого матеріалу

Рівняння нестационарної теплопровідності в цьому разі матиме вигляд (5.9), початкова умова – (5.10), а граничні умови:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0; \tag{5.15}$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha(T - T_{oc}) + \lambda_n \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R+\delta} &= 0, \\ T_i \Big|_{x=\sum_i \delta_i} &= T_{i+1} \Big|_{x=\sum_i \delta_i}, \\ \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R+\sum_i \delta_i} &= \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R+\sum_i \delta_i}. \end{aligned} \right\} \tag{5.16}$$

Тоді з урахуванням (5.15) і (5.16) коефіцієнти граничних умов (2.15) і (2.16) рівняння (2.13) матимуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1(t) &= \alpha, \\ \beta_1(t) &= -\lambda_n, \\ \varphi_1(t) &= \alpha T_{oc}, \\ \alpha_2(t) &= 0, \\ \beta_2(t) &= 1, \\ \varphi_2(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

Математичну модель процесу охолодження стрижневого матеріалу (наприклад, електричного проводу або кабелю з щонайменше одним шаром ізоляції з ТпМ з використанням вторинної сировини) також доцільно розглядати в циліндричній системі координат (рис. 5.6).

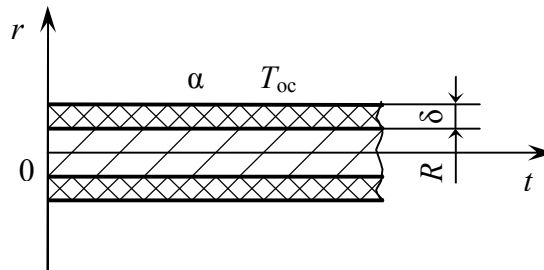


Рис. 5.6. Схема термообробки стрижневого матеріалу в пристрої конвективного типу:  
 $r$ ,  $R$  – поточний радіус і зовнішній радіус осердя

Рівняння нестационарної теплопровідності в цьому разі має вигляд (5.9), початкова умова – (5.10), а до граничних умов (5.16) додають умову

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (5.18)$$

З урахуванням (5.16) і (5.18) коефіцієнти граничних умов (2.15) і (2.16) рівняння (2.13) матимуть вигляд (5.17).

Коефіцієнти тепловіддачі  $\alpha_1$ ,  $\alpha_n$ ,  $\alpha$  та  $\alpha_b$  визначають за відповідними залежностями [276].

Розподіл температур за поточний час розраховують числовими методами (наприклад, методом сіток), розв'язуючи системи рівнянь, наведені вище для кожного типу оброблюваного матеріалу.

На рис. 5.7 наведено розрахований за наведеною методикою розподіл температури по товщині деревнонаповненого поліетиленового листа завтовшки 5 мм після його охолодження на рольгангу лінії для виробництва деревно-полімерних листів ЛДПЛ–1200 [108], а на рис. 5.8 – розподіл температури  $T$  по радіусу  $r$  проводу з мідною жилою діаметром 1 мм і ПВХ ізоляцією завтовшки 2 мм після проходження ним модернізованого охолодного пристрою

лінії для нанесення ізоляції з пластмас на проводи й кабелі типу ЛЕК–63 виробництва ВАТ «НВП „Більшовик”», м. Київ [330, 331].

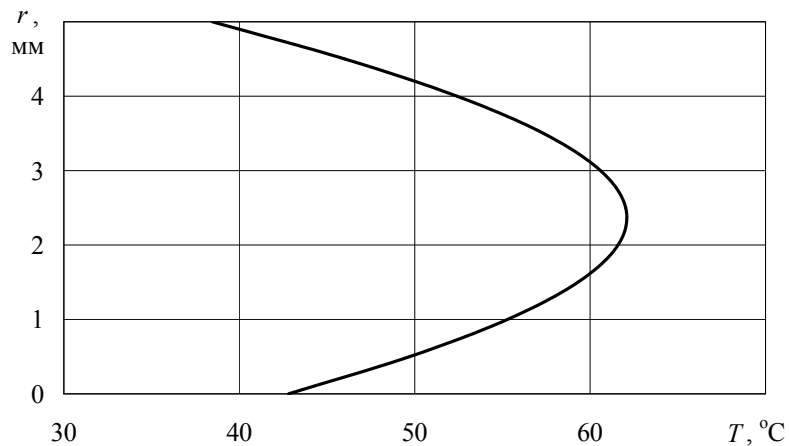


Рис. 5.7. Розподіл температури по товщині листа з наповненого ТпМ після його охолодження на рольгангу

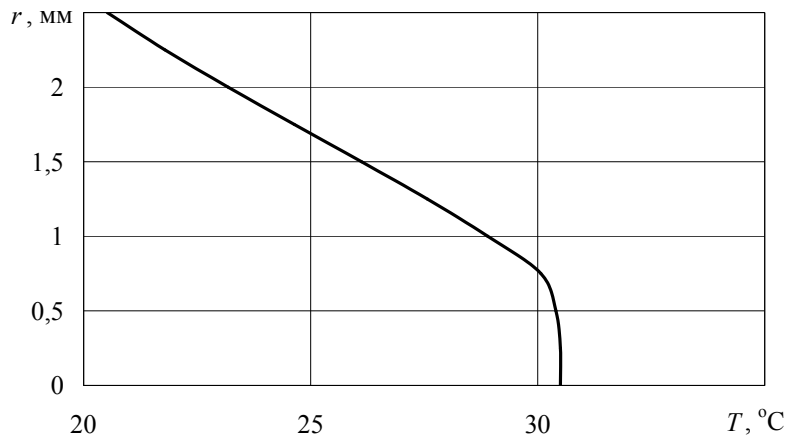


Рис. 5.8. Розподіл температури по радіусу проводу з мідним осердям і ПВХ ізоляцією після його охолодження у ванні

Промислова експлуатація технологічних ліній з виготовлення різноманітної продукції з ТпМ (однорідних деревнополімерних листів і деревнополімерних листів з одностороннім декоративним покриттям, профільних деревнополімерних погонних матеріалів, а також електричних проводів і кабелів з одно- і багат шаровим покриттям) підтверджують адекватність запропонованої методики реальному процесу термообробки.

### 5.3. Моделювання теплообміну в процесах гранулювання

#### 5.3.1. Процес охолодження гранул

Спочатку розглянемо характерний для гарячого методу гранулювання процес охолодження гранул сферичної форми в потоці повітря або рідини (рис. 5.9).

Процес теплообміну в об'ємі сферичної гранули описують рівнянням нестационарної теплопровідності, яке у сферичній системі координат має вигляд

$$\rho_{\text{тпм}} c_{\text{тпм}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{тпм}} r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda_{\text{тпм}} \sin \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left( \lambda_{\text{тпм}} \frac{\partial T}{\partial \vartheta} \right) + q_V, \quad (5.19)$$

де  $r, \varphi, \vartheta$  – сферичні координати.

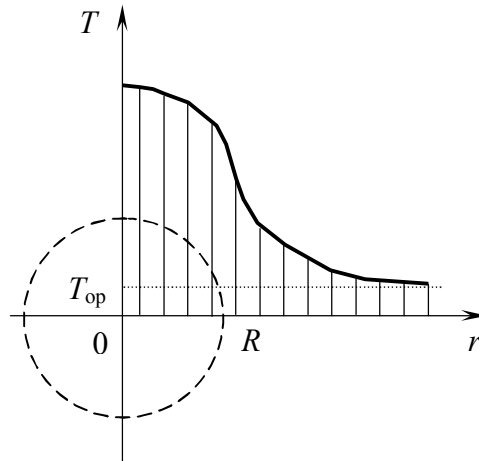


Рис. 5.9. Розрахункова схема процесу охолодження сферичної гранули:  
 $R$  – радіус гранули;  $T_{\text{оп}}$  – температура охолодної рідини

Аналіз процесу дає можливість зробити припущення, які істотно спрощують рівняння (5.8). Оскільки гранули майже не деформуються, а хімічні перетворення в їх об'ємі відсутні, то внутрішні джерела енергії дорівнюють нулю. Крім того, процес охолодження можна вважати симетричним відносно центра гранул (вісесиметричним), а тому рівняння теплопровідності (5.19) у сферичних координатах набуває вигляду

$$\rho_{\text{тпм}} c_{\text{тпм}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{тпм}} r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (5.20)$$

Оскільки гранули ТпМ транспортуються в потоці повітря або води, то можна припустити, що переміщення гранул відносно теплоносія (далі – рідини) незначне і ним можна знехтувати. Тоді відповідно до прийнятих припущень температурне поле в рідині також вісесиметричне, а тому рівняння збереження енергії для оточуючої гранулу рідини аналогічне рівнянню (5.20):

$$\rho_{\text{ор}} c_{\text{ор}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{ор}} r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (5.21)$$

де  $\rho_{\text{ор}}, c_{\text{ор}}$  і  $\lambda_{\text{ор}}$  – густина, масова теплоємність і теплопровідність охолодної рідини.

Початкові умови для розв'язання рівнянь (5.20) і (5.21):

$$\left. \begin{aligned} T|_{t=0} &= T_{\text{п}}, \\ 0 \leq r \leq R \\ T|_{t=0} &= T_{\text{ор}}, \\ R < r \leq \infty \end{aligned} \right\} \quad (5.22)$$

де  $T_{\text{п}}$  – початкова температура гранули.

Оскільки процес охолодження вісесиметричний, то в центрі гранули граничною умовою є умова симетрії (5.18).

На поверхні контакту гранули ТпМ з рідиною приймаємо, що температура ТпМ і рідини однакова і, крім цього, зберігається сталість теплового потоку, що відводиться від ТпМ і приймається рідиною:

$$\left. \begin{aligned} T|_{r=R-0} &= T|_{r=R+0}, \\ \lambda_{\text{тпм}} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R-0} &= \lambda_{\text{ор}} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R+0} \end{aligned} \right\} \quad (5.23)$$

На достатній відстані від поверхні контакту ( $r/R \rightarrow \infty$ ) температура охолодної рідини стає рівною  $T_{\text{ор}}$ . За числових розрахунків такою відстанню можна взяти відстань, на якій температура  $T$  відрізняється від  $T_{\text{ор}}$  на задане значення, наприклад на  $1 \dots 2$  °С.

Розв'язання сформульованої моделі числовими методами дає можливість визначити тривалість охолодження гранули ТпМ та оцінити зміну температури рідини навколо гранули. Якщо в модель замість теплопровідності рідини  $\lambda_{\text{ор}}$  ввести еквівалентну теплопровідність  $\lambda_{\text{ор екв}}$ , то можна зробити оцінку впливу зовнішніх факторів на час охолодження.

### 5.3.2. Процеси охолодження стренг

Процес охолодження стренг за умови холодного гранулювання також розглянемо в циліндричній системі координат. Із врахуванням очевидних спрощень рівняння нестационарної теплопровідності в цій системі координат матиме вигляд

$$\rho_{\text{тпм}} c_{\text{тпм}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{тпм}} r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (5.24)$$

Стренги рухаються у ванні охолодження з постійною швидкістю  $W_z$ , яку можна визначити з рівняння масової витрати  $G_M$  (рис. 5.10):

$$W_z = \frac{4G_M}{\pi d^2 n \rho_{\text{тпм}}},$$

де  $d$  – діаметр стренг;  $n$  – кількість стренг.

Якщо через  $z$  позначити величину переміщення стренги у ванні, то час  $t$  зв'язаний з цим переміщенням залежністю  $t = z/W_z$ . Із врахуванням цього ви-

разу рівняння (5.24) набуває вигляду

$$\rho_{\text{тпм}} c_{\text{тпм}} W_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{тпм}} r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (5.25)$$

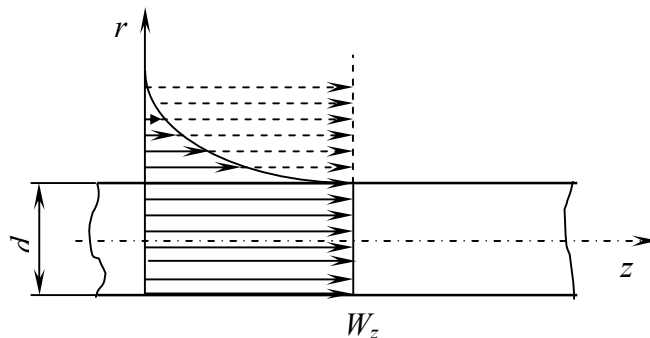


Рис. 5.10. Швидкісні поля стренги й рідини (суцільні лінії швидкості для рідини – випадок, коли рідина відносно стренги рухома, а штрихові – коли рідина відносно стренги нерухома):  $z$  – координата, спрямована вздовж осі стренги

Розглянемо тепер процес теплообміну у ванні охолодження.

Рухаючись з постійною швидкістю  $W_z$ , стренга тягне за собою певний шар рідини, швидкість якого на поверхні контакту стренги з водою змінюється від  $W_z$  до нуля на деякій відстані (примежовий шар). При цьому теплообмін у рідині не є ідентичним теплообміну при набіганні рідини на тверду поверхню (стренга нерухома, рідина рухається), оскільки теплообмін вздовж координати  $z$  залежить від умов охолодження в наступних шарах по координаті  $z$ .

Оцінку відносного руху охолодної рідини і стренги на процес охолодження стренги можна зробити, якщо розглянути два граничні випадки: рідина рухома відносно стренги, тобто нерухома відносно охолодної ванни, а також рідина нерухома відносно стренги, тобто рухається разом з охолоджуваною стренгою зі швидкістю  $W_z$  (див. рис. 5.10). У першому випадку в нерухомій системі координат для рідини  $W_z = 0$ , а для другого –  $W_z \neq 0$ .

Рівняння збереження енергії для охолодної рідини має вигляд

$$\rho_{\text{оп}} c_{\text{оп}} W_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{оп}} r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (5.26)$$

Початкові умови для розв'язання рівнянь (5.25) і (5.26) описуються залежностями (5.22), граничну умову в центрі стренги визначає рівняння (5.18), а решту граничних умов аналогічні випадку охолодження сферичних гранул і описують залежностями (5.23).

Розв'язання сформульованих моделей охолодження гранул і стренг дає можливість визначити час охолодження і за заданої продуктивності екструдера розміри охолоджувальних пристроїв. При цьому числове моделювання дає можливість оцінити вплив зовнішніх факторів на процес охолодження і визначити

доцільність врахування цих факторів у методиці інженерного розрахунку. Враховуючи низьку теплопровідність ТпМ, а також проведені розрахунки й порівняння результатів з результатами експерименту показали, що розроблені моделі можуть бути використані для практичних розрахунків.

### 5.3.3. Числове моделювання процесу охолодження гранул

Вихідними даними для розрахунку процесу охолодження гранул є: діаметр гранули; початкова температура гранули; температура охолодної рідини; кінцева температура, до якої охолоджується центр гранули; якісний і кількісний склад ТпМ (див. п. 1.2.2), а також функції, що апроксимують залежність теплофізичних властивостей рідини і компонентів ТпМ від температури.

Дослідження процесу охолодження здійснюємо для вторинного ПЕВТ марки 15803-020.

Перевагою розробленої математичної моделі процесу охолодження є те, що в ній відсутній коефіцієнт тепловіддачі від поверхні гранули до охолодної рідини, визначення якого потребує проведення спеціальних експериментальних досліджень. Модель розв'язується за припущення, що перенесення теплоти від поверхні гранули до рідини здійснюється тільки теплопровідністю. Потоки повітря або води, з якими рухається гранула, в загальному випадку турбулентні. Вплив турбулентного переносу можна оцінити, застосувавши коефіцієнт еквівалентної теплопровідності, який враховує турбулентний перенос. Еквівалентну теплопровідність визначаємо за залежністю  $\lambda_{\text{ор екв}} = \eta \lambda_{\text{ор}}$ , де  $\eta \geq 1$  – коефіцієнт, який враховує турбулентний перенос. Слід зазначити, що значення  $\eta$  у потоці не постійне, оскільки поблизу поверхні розділу в рідині утворюється примежовий шар, в якому перенесення енергії здійснюється переважно теплопровідністю. У цьому шарі значення  $\eta$  близьке до одиниці біля поверхні гранули і збільшується до максимуму в ядрі потоку.

Для аналізу процесу охолодження виконано обчислення температурних полів в об'ємі гранули діаметром 3 мм і в оточуючому повітрі. На рис. 5.11 і 5.12 наведено зміну температури вздовж радіуса для різних значень часу охолодження і коефіцієнтів  $\eta$ . При цьому зміна значення  $\eta$  по радіусу не враховується (для певного розрахунку значення  $\eta$  беремо постійним). З рис. 5.11 і 5.12 видно, що швидкість зміни температури в об'ємі гранули зростає зі збільшенням  $\eta$ .

Вплив турбулізації потоку на процес охолодження видно з рис. 5.13, на якому наведено зміну температури центра гранули в часі при значеннях  $\eta=1$  і  $\eta=5$ .

Спочатку має місце швидке зниження температури, після чого його інтенсивність зменшується. В області температури плавлення полімеру ТпМ криві охолодження центра гранули майже горизонтальні, що пояснюється значним збільшенням теплоємності ТпМ у цій області. За значеннями температури центра гранули швидкість зміни температури зі збільшенням тривалості охолодження незначна і для невеликого зменшення температури необхідний значний

проміжок часу. Це свідчить про те, що потрібні тривалість охолодження і довжину охолодної зони можна вибрати після побудування кривої охолодження. З рис. 5.13 також випливає, що турбулізація потоку в області температур, до яких необхідно охолодити центр гранул, мало впливає на час охолодження.

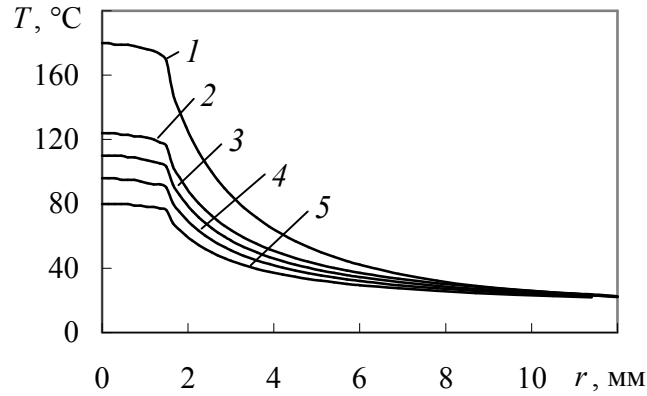


Рис. 5.11. Зміна температури по радіусу для гранули, охолоджуваної повітрям ( $\eta=1$ ) для часу  $t$ : 1 – 1 с; 2 – 20 с; 3 – 40 с; 4 – 60 с; 5 – 78 с

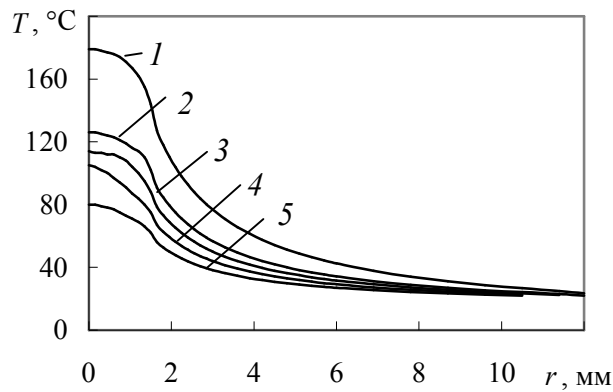


Рис. 5.12. Зміна температури по радіусу для гранули, охолоджуваної повітрям ( $\eta=5$ ) для часу  $t$ : 1 – 1 с; 2 – 6 с; 3 – 11 с; 4 – 14 с; 5 – 21 с

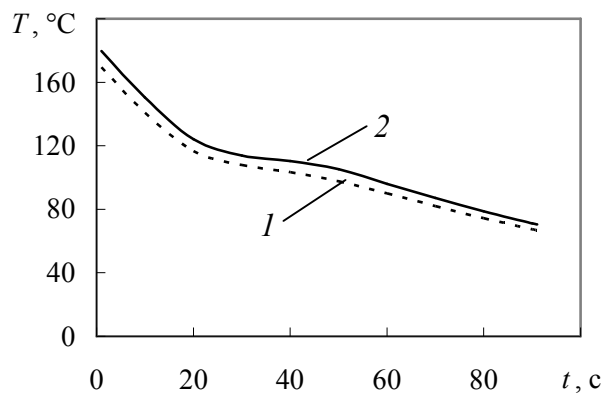


Рис. 5.13. Залежність температури центра гранули від часу охолодження в повітрі для  $\eta=1$  (1) і  $\eta=5$  (2)

Температурне поле гранули діаметром 3 мм та оточуючого її повітря (до відстані 13 мм від центра гранули) наведено на рис. 5.14.

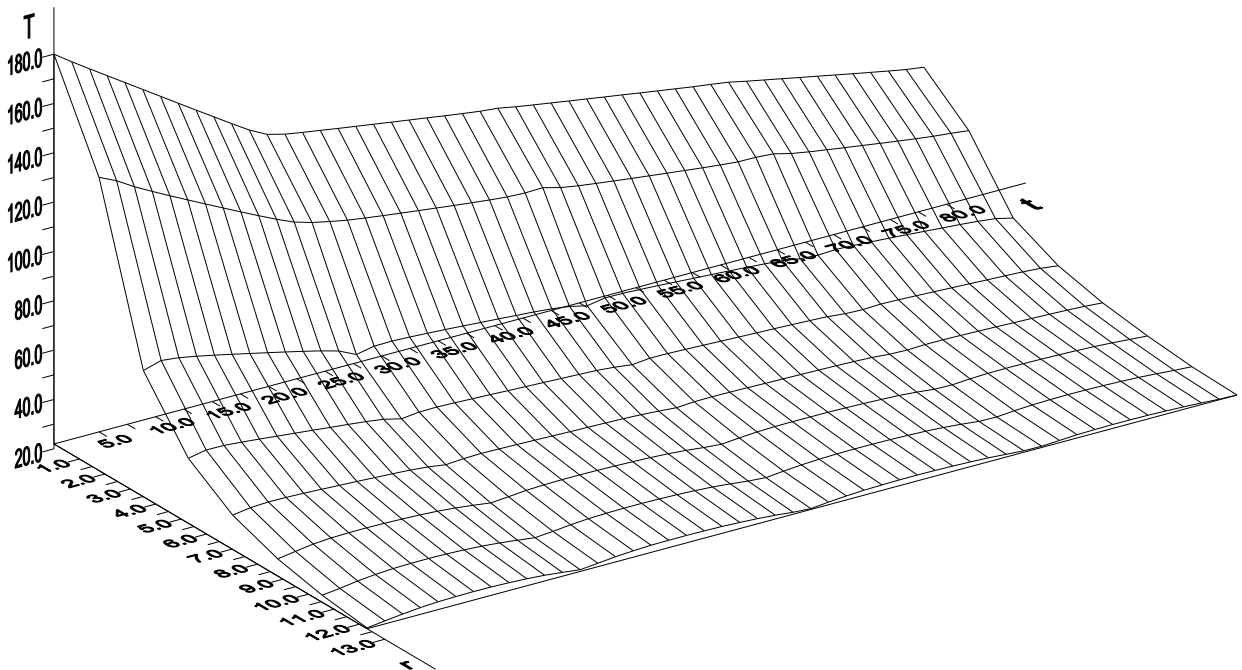


Рис. 5.14. Температурне поле гранули та оточуючого повітря.

Аналогічні розрахунки виконані і для випадку охолодження сферичної гранули діаметром 4 мм у потоці води. На рис. 5.15 наведено криві зміни температури по радіусу для різних значень часу.

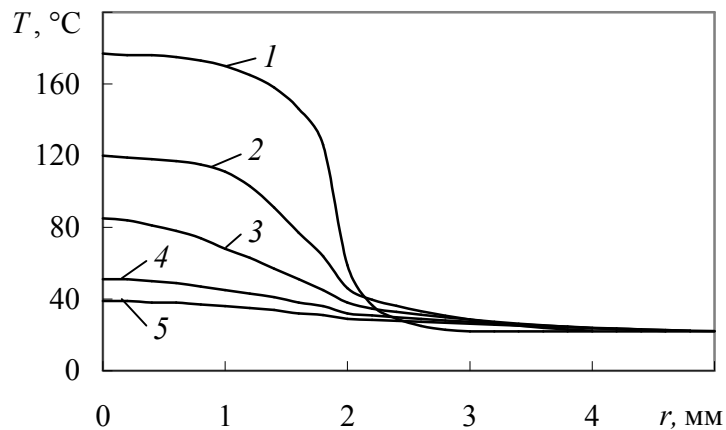


Рис. 5.15. Зміна температури по радіусу гранули під час її охолодження в потоці води для часу  $t$ : 1 – 1 с; 2 – 7 с; 3 – 14 с; 4 – 21 с; 5 – 27 с

З рис. 5.15 видно, що у випадку водяного охолодження температура води біля поверхні гранули зменшується майже до температури  $T_{op}$  на відстані менше 1 мм, тобто в межах малорухомого примежового шару навколо гранули. Криві охолодження центра і поверхні гранули для  $\eta=1$  і  $\eta=5$  зображені на рис. 5.16.

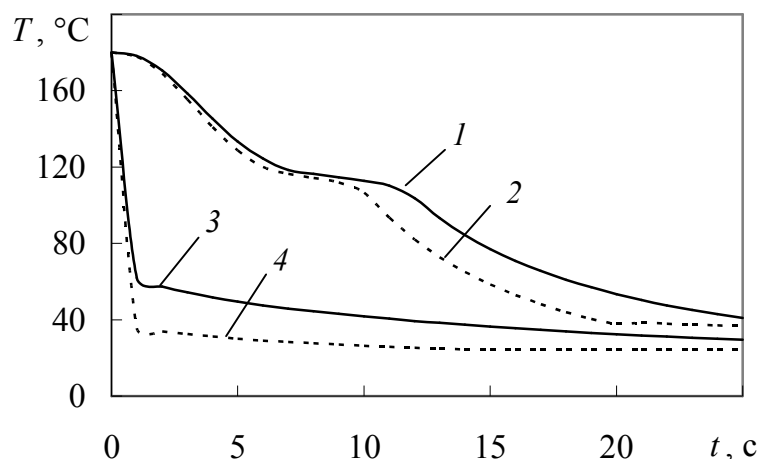


Рис. 5.16. Залежність температури центра (1, 2) і поверхні (3, 4) гранули від часу охолодження у воді для  $\eta=1$  (1, 3) і  $\eta=5$  (2, 4)

Як видно з рис. 5.16, турбулізація потоку мало впливає на швидкість охолодження гранули у воді. Це пояснюється високими значеннями теплоємності й густини охолодної води. Турбулентність потоку у значно більшій мірі впливає на процес охолодження гранули в повітрі, ніж у воді. В останньому випадку процес охолодження більше обмежує внутрішня задача, тобто швидкість підведення теплоти з об'єму гранули до її поверхні. Це добре видно з рис. 5.17, на якому наведено залежність тривалості охолодження центра гранули від ступеня турбулентності (значення  $\eta$ ) у потоці повітря і води. Проте слід зазначити, що під час числового моделювання значення  $\eta$  брали однаковим для всього потоку і його зміну по товщині прилежового шару не враховували. Таким чином, для гарантованого охолодження під час вибору охолодних пристроїв необхідно розрахунки здійснювати для значень  $\eta$ , близьких до одиниці. Для інженерних розрахунків доцільно будувати криву охолодження і вибирати тривалість охолодження, враховуючи зменшення швидкості охолодження в часі.

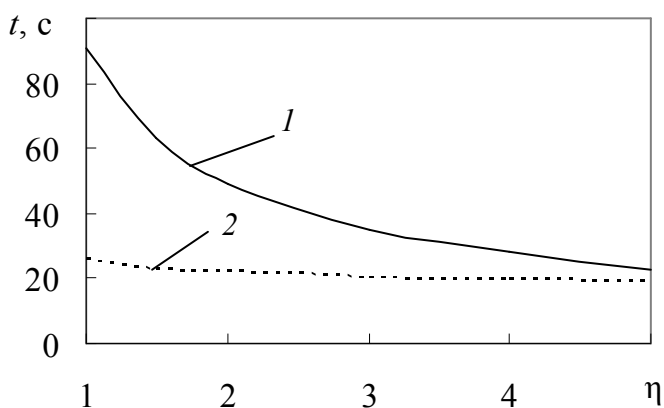


Рис. 5.17. Залежність часу охолодження  $t$  гранули від  $\eta$ : 1 – охолодження повітрям; 2 – охолодження водою

### 5.3.4. Числове моделювання процесу охолодження стренг

Числове моделювання процесу охолодження стренг діаметром 4 мм здійснене також для вторинного ПЕВТ марки 15803-020. Вихідними даними для розрахунку процесу охолодження стренг є: діаметр стренг; масова продуктивність; кількість стренг, що виходять з екструзійної головки; початкова температура стренг; температура охолодної води; кінцева температура центра стренги; якісний і кількісний склад ТпМ, а також функції, що апроксимують залежність теплофізичних властивостей рідини і компонентів ТпМ від температури.

З рис. 5.18 і 5.19 видно, що у випадку рухомої (відносно стренги) води товщина утворюваного теплового примежового шару менша, а отже інтенсивність теплообміну зростає. Як уже зазначалось, обидва зазначені випадки є граничними, а реальний процес охолодження знаходиться між ними. Для порівняння на рис. 5.20 наведено криві зміни температури поверхні й центра стренги по довжині зони охолодження для цих граничних випадків.

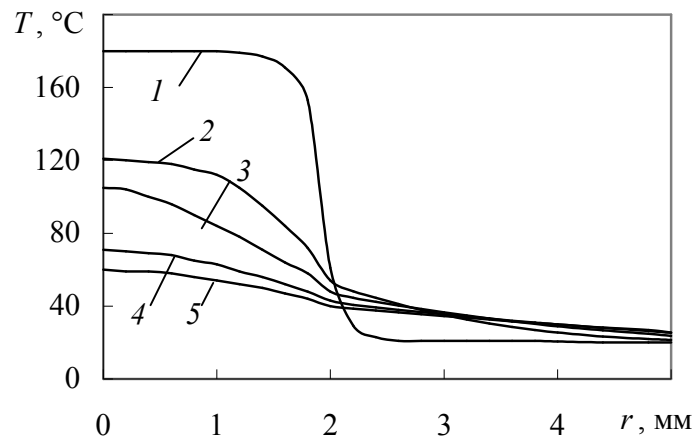


Рис. 5.18. Залежність температури по радіусу стренги для випадку, коли вода відносно стренги нерухома, від довжини  $z$ : 1 – 0,05 м; 2 – 2 м; 3 – 4 м; 4 – 6 м; 5 – 7,15 м

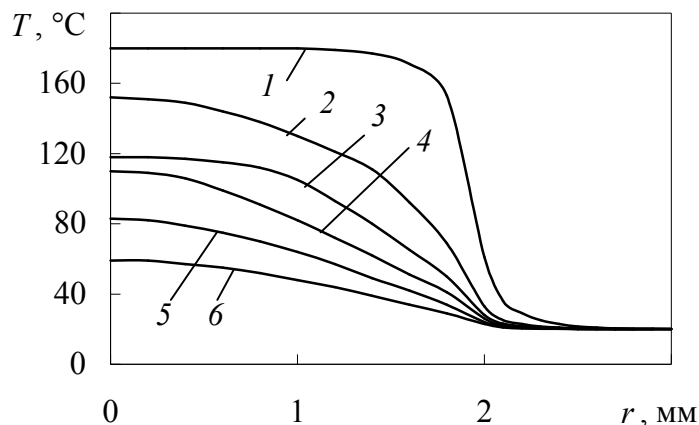


Рис. 5.19. Залежність температури по радіусу стренги для випадку, коли вода відносно стренги рухома, від довжини  $z$ : 1 – 0,05 м; 2 – 1 м; 3 – 2 м; 4 – 3 м; 5 – 4 м; 6 – 5,1 м

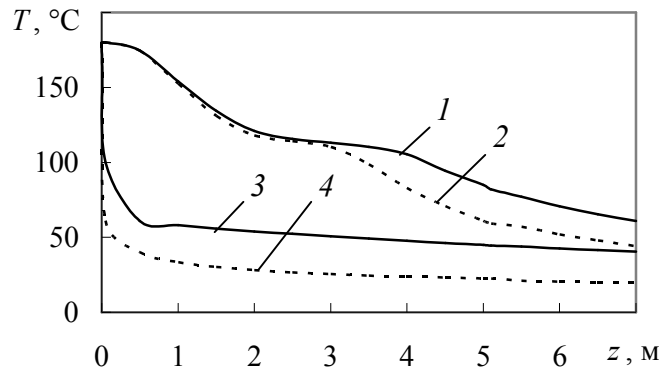


Рис. 5.20. Залежність температури центра (1, 2) і поверхні (3, 4) стренги від часу охолодження для нерухомої (1, 3) і рухомої (2, 4) води

Суттєві відхилення результатів розрахунку починаються при досягненні стренгою температури, близької до температури плавлення полімеру, а далі відповідні криві розташовуються майже еквідистантно (див. рис. 5.20). Як і у випадку охолодження гранул, значення  $\eta$  у розрахунках брали постійним, хоча в дійсності ці значення змінюються від одиниці на поверхні стренги до максимуму в ядрі потоку.

Температурні поля стренги діаметром 4 мм при охолодженні в потоці рухомої і нерухомої рідини зображені на рис. 5.21 і 5.22 відповідно.

За реальних умов охолодження рідина в охолодній ванні малорухома і турбулізація потоку майже відсутня. При високих швидкостях руху можлива тільки турбулізація примежового шару, але досягнення таких швидкостей у процесах гранулювання малоімовірно.

Для оцінки впливу стану рідини на реальний процес здійснені розрахунки товщини примежового шару при набіганні ламінарного потоку рідини на плоску пластину за рівнянням, наведеним у праці [329]:

$$\frac{\delta}{z} = \frac{4,64}{\sqrt{\text{Re}_x}}, \quad (5.27)$$

де  $z$  – координата в напрямі потоку;  $\text{Re}_z = W_\infty \delta / \nu_{\text{op}}$  – характеристичне число Рейнольдса;  $W_\infty$  – швидкість у ядрі потоку;  $\nu_{\text{op}}$  – кінематична в'язкість рідини.

На рис. 5.23 наведені криві зміни товщини примежового шару по довжині пластини, обчислені за рівнянням (5.27) для різних значень швидкості потоку, що набігає на стренгу [332].

Порівнюючи значення товщини примежового шару з кривими зміни температури біля поверхні стренги (див. рис. 5.18 і 5.19), можна зробити висновок, що товщина теплового примежового шару не перевищує товщини гідродинамічного примежового шару. Отже, для розрахунку реального процесу охолодження можна припустити, що він більше наближається до випадку, коли рідина рухається разом зі стренгою.

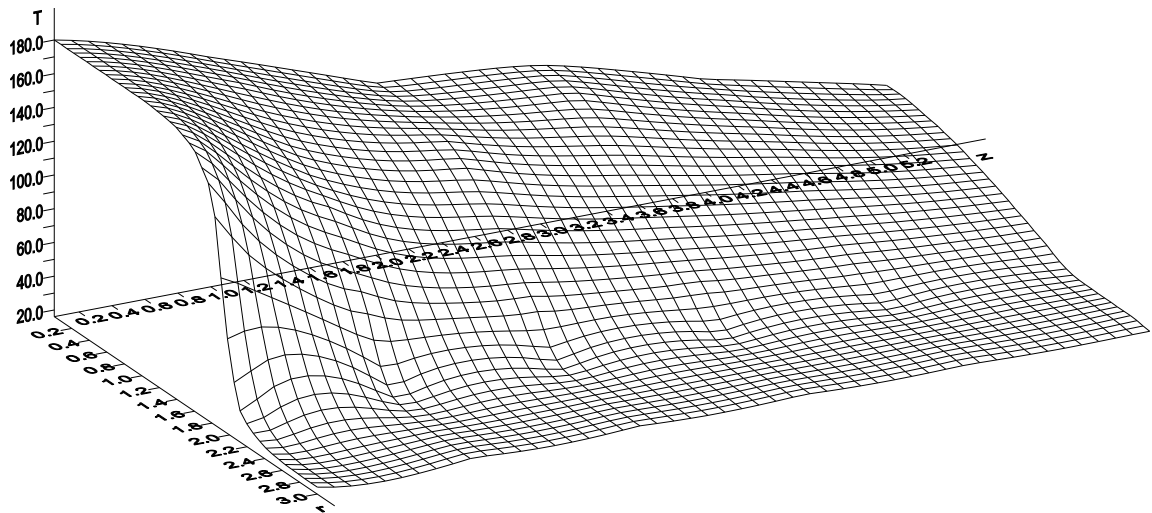


Рис. 5.21. Температурне поле стренги при охолодженні в потоці рухомої води.

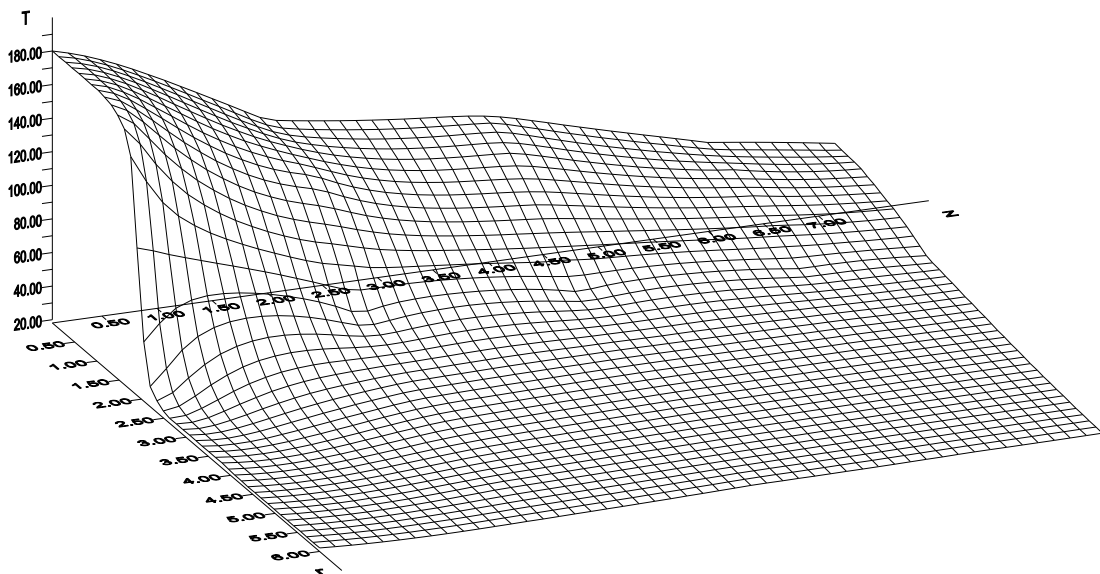


Рис. 5.22. Температурне поле стренги при охолодженні в потоці нерухомої води

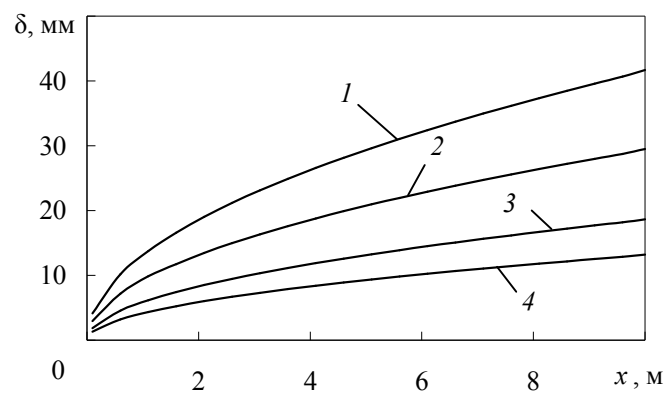


Рис. 5.23. Зміна товщини примежового шару по довжині пластини залежно від швидкості потоку: 1 – 0,1 м/с; 2 – 0,2 м/с; 3 – 0,5 м/с; 4 – 1 м/с

Також запропонована уточнена методика розрахунку процесу охолодження стренг з урахуванням дійсної товщини теплового й динамічного примежових шарів (як суми ламінарного й турбулентного підшарів) [331]. Проте, як показує порівняльний аналіз зазначених моделей, застосування більш складної моделі на практиці не виправдовується.

Таким чином, у результаті числових досліджень процесу охолодження полімерних гранул у потоці повітря встановлено, що вплив турбулентності потоку на швидкість охолодження більш значний у початковий період охолодження і зі зменшенням температури поверхні гранули зменшується. Аналіз процесу охолодження гранул у воді показує, що процес охолодження в цьому разі обмежується швидкістю підведення теплоти з об'єму гранули до її поверхні (внутрішня задача), а тому турбулізація потоку мало впливає на процес.

Розроблена методика розрахунку процесу охолодження стренг у ванні дає можливість виконувати розрахунки процесу охолодження для двох граничних випадків: за умови нерухомої води (відсутній гідродинамічний примежовий шар) і за умови руху води разом зі стренгою (товщина гідродинамічного примежового шару прямує до нескінченості). Реальний процес охолодження обмежений цими граничними випадками. Аналіз результатів числового моделювання показує, що товщина гідродинамічного примежового шару істотно перевищує товщину теплового примежового шару, а отже реальний процес охолодження більше наближається до випадку, коли рідина рухається разом зі стренгою. Тому для інженерних розрахунків доцільно користуватись алгоритмом розрахунку процесу охолодження стренг у потоці рухомої рідини. Для інтенсифікації процесу доцільно встановлювати в охолодній ванні перегородки (наприклад, гумові для запобігання пошкодженню стренг) з отворами для проходження стренг, які руйнують нагрітий примежовий шар рідини [333].

### **5.3.5. Експериментальні дослідження процесу охолодження стренг**

Під час гранулювання однією з причин отримання продукції низької якості, зокрема утворення в тарному мішку агломератів і грудок гранул, непридатних без додаткової обробки для подальшого живлення полімерпереробного обладнання, і в першу чергу екструзійного, є нагрівання поверхні гранул та їх взаємне злипання. Це відбувається внаслідок поступового вирівнювання температури гранул по радіусу в умовах, коли внаслідок взаємного контакту великої кількості гранул матеріалу з низькою теплопровідністю майже відсутній їх теплообмін з оточуючим повітрям. Крім того, після закупорювання заповненого гранулами тарного мішку наявна на гранулах волога не випаровується в оточуюче середовище, а залишається на поверхні гранул, що також знижує їх якість і часто передбачає необхідність додаткового підсушування гранул перед їх використанням.

Таким чином відносно низька температура поверхні стренг під час їх гранулювання є необхідною, але недостатньою умовою одержання якісних гранул. Тому потрібно враховувати в першу чергу середню температуру гранул і стренг після їх охолодження.

Результати числового моделювання процесу охолодження стренг були перевірені під час гранулювання відходів виробництва ПЕВТ марки 10803-020 ГОСТ 16337 на екструзійній лабораторній лінії кафедри МАХНВ (рис. 5.24, табл. 5.1).

Оскільки дослідження процесу охолодження гранул пов'язано з певними труднощами (у першу чергу через складність визначення середньої температури гранул), то відповідні дослідження здійснювали лише для стренг. При цьому оскільки безпосереднє визначення температури стренги в часі (по довжині ділянки охолодження) внаслідок її малого діаметра також ускладнено, то адекватність розробленої математичної моделі було перевірено через середню температуру стренги на холодному кінці лінії (у зоні приймального пристрою).

Приймальний пристрій екструзійної лабораторної лінії (див. рис. 5.24) під час проведення дослідів було виконано у вигляді теплоізольованої ємності, заповнюваної певною кількістю води.

Порівняння теоретичних та експериментальних значень середньої температури стренги здійснювали за такою методикою.

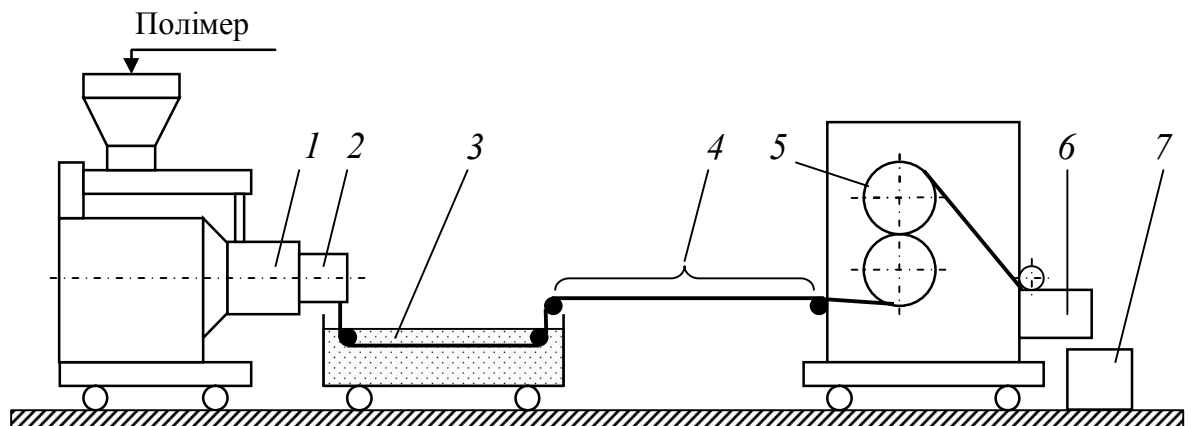


Рис. 5.24. Екструзійна лабораторна лінія для гранулювання ТпМ: 1 – дисково-черв'ячний екструдер; 2 – формувальна стренгова головка; 3 – ванна водяного охолодження; 4 – ділянка повітряного охолодження; 5–7 – тяговий, гранулювальний і приймальний пристрої

Спочатку розглянемо порядок визначення теоретичного значення середньої температури.

Залежність розподілу температури по радіусу стренги на вході в приймальний пристрій розраховували за методикою, наведеною в п. 5.3.4, залежно від початкової температури стренги (приймали, що вона дорівнювала середній температурі розплаву на виході з формувальної головки), температури води у

ванні охолодження та довжини ділянки водяного охолодження, температури оточуючого повітря та довжини ділянки повітряного охолодження, швидкості руху і діаметра стренги.

Таблиця 5.1

Технічна характеристика екструзійної лабораторної лінії для гранулювання ТпМ

Параметр	Характеристика
Продуктивність, кг/год	до 200
Параметри каналів формувальної стренгової головки	
діаметр, мм	6
кількість, шт	24
Розмір одержуваних гранул, мм	3–5
Електропостачання – мережа трифазного струму:	
напруга, В	380/220
частота, Гц	50
Водопостачання:	
тиск, МПа	0,2–0,6
об’ємна витрата при температурі 20 °С, м <sup>3</sup> /год, не більше	2
Потужність, кВт:	
електродвигунів	42,3
нагрівників	10,2
Габаритні розміри (довжина × ширина × висота), м	5600×860×2000
Маса суха, кг	3440

Розподіл температури стренги по її поперечному перерізу визначали для  $m$  точок ( $i = \overline{1, m}$ ), перша з яких відповідала центру стренги, а остання – її поверхні. Оскільки питомий об’єм матеріалу (або частка площі поперечного перерізу), що відповідає обчисленій температурі на певному радіусі, збільшується від центра стренги до її периферії, то середню теоретичну температуру стренги в певному поперечному перерізі визначали в такій послідовності.

1. Площа центральної кругової ділянки поперечного перерізу стренги, що відповідає максимальній температурі (середній між  $T_1$  і  $T_2$ ), становить

$$F_1 = \frac{\pi}{4} (2dr)^2,$$

де  $dr$  – крок розрахунку по радіусу стренги ( $dr = d/[2(m-1)]$ ).

2. Площа першої (від центра стренги) кільцевої ділянки поперечного перерізу стренги:

$$F_2 = \frac{\pi}{4} [(4dr)^2 - (2dr)^2].$$

3. Площа кожної наступної кільцевої ділянки поперечного перерізу стренги:

$$F_i = \frac{\pi}{4} \left[ (2i dr)^2 - (2(i-1)dr)^2 \right]$$

або

$$F_i = \pi dr^2 (2i - 1). \quad (5.28)$$

При цьому залежність (5.28) справедлива для будь-якого значення  $i$ .

4. Беручи до уваги, що площа поперечного перерізу стренги дорівнює  $F = \pi[(m-1)dr]^2$ , значення середньої теоретичної температури стренги в певному поперечному перерізі становитиме

$$T_{\text{п}} = \frac{1}{2(m-1)^2} \sum_{i=1}^{m-1} (T_i + T_{i+1})(2i-1). \quad (5.29)$$

Тепер розглянемо методику визначення експериментального значення середньої температури стренги.

1. Теплота, закумуляована водою, що міститься в приймальному пристрої

$$Q_{\text{в}} = M_{\text{в}} c_{\text{в}} T_{\text{в}}, \quad (5.30)$$

де  $M_{\text{в}}$  – маса води в приймальному пристрої (масу визначали на вагах ВНЦ-2М, діапазон вимірювань 0–2000 г, границя допустимої похибки 1 г у діапазоні зважування від 10 до 1000 г);

$c_{\text{в}}$  – масова теплоємність води при температурі  $T_{\text{в}}$  (температуру визначали за допомогою термоелектричного перетворювача ТХК–259 (НСХ  $L$ , діапазон вимірювання 0–400 °С), у комплекті з автоматичним потенціометром типу А-565-001-01 з класом точності 0,15/0,05, діапазоном вимірювання від мінус 50 до плюс 800 °С і ступенем дискретизації цифрового відліку 0,1 °С).

2. Теплота, закумуляована полімерними гранулами, що потрапили в приймальний пристрій

$$Q_{\text{п}} = M_{\text{п}} c_{\text{п}} T_{\text{п}}, \quad (5.31)$$

де  $M_{\text{п}}$  – маса гранул в приймальному пристрої (масу визначали на вагах ВНЦ-2М після їх вилучення з приймального пристрою і висушування на лабораторній дослідній установці кафедри МАХНВ);

$c_{\text{п}}$  – масова теплоємність матеріалу гранул при температурі  $T_{\text{п}}$ .

3. Теплота, закумуляована системою «вода–гранули» в приймальному пристрої

$$Q_{\text{в-п}} = Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}}. \quad (5.32)$$

4. Маса системи «вода–гранули»

$$M_{\text{в-п}} = M_{\text{в}} + M_{\text{п}}. \quad (5.33)$$

5. Масову теплоємність системи «вода–гранули»  $c_{\text{в-п}}$  обчислюють за залежністю (1.3).

6. Середня температура системи «вода–гранули»

$$T_{\text{в-п}} = \frac{Q_{\text{в-п}}}{M_{\text{в-п}} c_{\text{в-п}}} . \quad (5.34)$$

Відповідно до наведеної методики експериментальне значення середньої температури стренг здійснювали в такому порядку.

Після експериментального визначення величин  $T_{\text{в-п}}$ ,  $M_{\text{в}}$ ,  $M_{\text{п}}$ , величини  $M_{\text{в-п}}$  за формулою (5.33), а також обчислення при температурі  $T_{\text{в-п}}$  значення  $c_{\text{в-п}}$  визначали температуру системи «вода–гранули» (за залежністю (5.34)). Потім за формулою (5.30) обчислювали теплоту, закумульовану водою, а за залежністю (5.32) – теплоту, закумульовану полімерними гранулами. Після цього за залежністю (5.31) обчислювали експериментальне значення середньої температури стренг  $T_{\text{п}}$  (за необхідності здійснювали уточнення значення масової теплоємності матеріалу стренг залежно від обчисленої температури і методом послідовних наближень остаточно визначали значення температури  $T_{\text{п}}$ ).

Визначене таким чином експериментальне значення середньої температури стренг порівнювали з теоретично розрахованим за формулою (5.29).

Нижче наведено приклад порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень середньої температури стренги на холодному кінці лінії.

Було проаналізовано процес охолодження стренги діаметром 4 мм із вторинного ПЕВТ марки 15803-020. Початкова температура стренги на виході з формувальної стренгової головки становила 170 °С (див. рис. 5.24). Маса води в приймальному пристрої дорівнювала 1,5 кг, її температура 20,8 °С, маса полімерних гранул у приймальному пристрої 0,53 кг, а температура системи «вода–гранули» – 24,1 °С.

У результаті обчислення за методикою, наведеною в п. 5.3.4, наприкінці ділянки охолодження для 11 точок по радіусу стренги (крок розрахунку по радіусу становить  $dr=0,2$  мм) отримано такий розподіл температури, °С: 59; 58,5; 57; 55; 52; 48; 44; 39; 34; 29; 23. Середня теоретична температура стренги, обчислена за залежністю (5.29), становить 39,6 °С (для порівняння середнє арифметичне значення температури дорівнює 45,3 °С).

Далі обчислимо експериментальне значення середньої температури стренг.

Маса системи «вода–гранули» становить  $M_{\text{в-п}} = M_{\text{в}} + M_{\text{п}} = 1,5 + 0,53 = 2,03$  кг. Масова теплоємність матеріалу гранул при температурі системи «вода–гранули» дорівнює 2268 Дж/(кг·К) [94], тоді теплоємність системи «вода–гранули» становить  $c_{\text{в-п}} = c_{\text{в}} M_{\text{в}}/M_{\text{в-п}} + c_{\text{п}} M_{\text{п}}/M_{\text{в-п}} = 4190 \cdot 1,5/2,03 + 2268 \cdot 0,53/2,03 = 3688$  Дж/(кг·К), а теплота, закумульована цією системою, –  $Q_{\text{в-п}} = M_{\text{в-п}} c_{\text{в-п}} T_{\text{в-п}} = 2,03 \cdot 3688 \cdot 24,1 = 180428$  Дж.

Теплота, закумульована водою:  $Q_{\text{в}} = M_{\text{в}} c_{\text{в}} T_{\text{в}} = 1,5 \cdot 4190 \cdot 20,8 = 130728$  Дж, а теплота, закумульована полімерними гранулами:  $Q_{\text{п}} = Q_{\text{в-п}} - Q_{\text{в}} = 180443 -$

$-130728 = 49700$  Дж. Тоді експериментальне значення середньої температури стренг у першому наближенні:  $T_{\text{п}} = Q_{\text{п}} / (M_{\text{п}} c_{\text{п}}) = 49700 / (0,53 \cdot 2268) = 41,3$  °С. Після уточнення значення масової теплоємності матеріалу стренг залежно від обчисленої температури остаточно визначають експериментальне значення середньої температури стренг, яке становить 36,5 °С, що відрізняється від теоретичного значення (45,3 °С) на 7,8 %.

Порівняння експериментальних і розрахункових даних показує їх задовільну збіжність (розбіжність не перевищувала 15 %), що підтверджує адекватність розробленої математичної моделі процесу охолодження гранул термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини реальному процесу.

При цьому числове моделювання дало можливість обґрунтувати доцільність улаштування повітряної ділянки на виході з ванни водяного охолодження, а також параметри процесу як водяного, так і повітряного охолодження.

## 5.5. Висновки

Відповідно до проведених досліджень можна зробити такі висновки.

1. Удосконалено математичні моделі пристроїв конвективного, барабанного і комбінованого типів для термообробки ТпМ з використанням вторинної сировини, в яких враховано якісний і кількісний склад оброблюваного ТпМ, а також залежність теплофізичних властивостей ТпМ від температури.

Зазначені моделі дають можливість визначити раціональні енергоощадні умови і режими термообробки ТпМ з використанням вторинної сировини і продукції з них залежно від їх форми, розмірів, структури і властивостей.

Розроблені на основі зазначених математичних моделей методики розрахунку пристроїв для охолодження безперервних і погонних термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини забезпечили підвищення продуктивності та зменшення енергоємності відповідних ліній на базі екструдерів і каландрів (ВАТ «НВП „Більшовик”», НВП «Пластотехніка», ТОВ «Ековторполімер», ПП «НВП „Укрсклопром”», ТОВ «Ізофол», м. Київ; ЗАО «Средневожский завод полимерных изделий», м. Тольятті, Російська Федерація).

2. Розроблено математичні моделі процесів охолодження гранул і стренг під час гранулювання ТпМ з використанням вторинної сировини, які враховують якісний і кількісний склад ТпМ, а також залежність теплофізичних властивостей ТпМ від температури і не передбачають визначення коефіцієнтів тепловіддачі від поверхні гранул і стренг до охолодного середовища.

3. Проведено числові дослідження процесу охолодження гранул ТпМ у потоці повітря з метою визначення впливу турбулентності потоку на швидкість охолодження. Установлено, що зазначений вплив більш значний у початковий період і зі зменшенням температури поверхні гранули також зменшу-

ється. Визначено, що під час охолодження гранул у воді процес охолодження обмежується швидкістю підведення теплоти з об'єму гранули до її поверхні, а тому турбулізація потоку мало впливає на процес.

4. Установлено, що під час охолодження стренг у ванні товщина гідродинамічного примежового шару істотно перевищує товщину теплового примежового шару, а отже реальний процес охолодження наближено до випадку, коли рідина рухається разом зі стренгою. Тому для інженерних розрахунків рекомендується використовувати алгоритм розрахунку процесу охолодження стренг у потоці нерухомої відносно них рідини, а для інтенсифікації процесу в охолодній ванні доцільно встановлювати перегородки, що руйнують примежовий шар рідини. Відповідне технічне рішення захищено патентом України на корисну модель № 18744 [333].

5. Експериментально досліджено процес охолодження стренг із вторинного ПЕВТ. Якісний і кількісний аналіз даних експерименту підтвердив адекватність розробленої математичної моделі процесу охолодження стренг під час гранулювання термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини.

Основні наукові результати розділу 5 опубліковані в працях [126, 330–336].

---

## **6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ**

### **6.1. Завдання експериментальних досліджень**

Мета досліджень – експериментальна перевірка адекватності розроблених математичних моделей процесів переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини реальним процесам їх одержання, формування та термообробки.

Експериментальні дослідження процесів виробництва листових ТпМ з використанням вторинної сировини здійснювали на базі полімерпереробного обладнання кафедри МАХНВ і ВАТ «НВП „Більшовик”» під час виконання держбюджетних НДР «Створення концепції конструктивного оформлення процесу виготовлення рулонних та інших погонажних матеріалів з використанням відходів легкої та інших промисловостей» (д/б № 2173, № ДР 0197U005334) [123] і «Розроблення теоретичних засад проектування обладнання ліній для переробки промислових і побутових відходів полімерів» (№ 2921, № ДР 0106U002132) [126].

## 6.2. Опис технологічної лінії та її основного обладнання

### 6.2.1. Склад технологічної лінії

Експериментальна технологічна лінія призначена для дослідження процесу одержання листових матеріалів з використанням термопластичних полімерів (зазвичай поліолефінів, у тому числі і вторинних) і різних наповнювачів, у першу чергу целюлозовмісних (деревні стружка та борошно, подрібнена макулатура тощо).

Виготовлення листового матеріалу на лінії може бути реалізовано в такі способи залежно від методу одержання листової заготовки (рис. 6.1):

1) змішуванням наповнювача та одержуваного в дисковому екструдері 3 розплаву полімеру, а також подальшим формуванням ТпМ за допомогою однокерв'ячного екструдера 6 та екструзійної головки 7;

2) змішуванням наповнювача та одержуваного в дисковому екструдері 3 розплаву полімеру, а також подальшим формуванням ТпМ за допомогою змішувально-підігрівальних вальців (валкової установки) 1;

3) змішуванням наповнювача і полімеру, а також подальшим формуванням ТпМ за допомогою змішувально-підігрівальних вальців 1 [337].

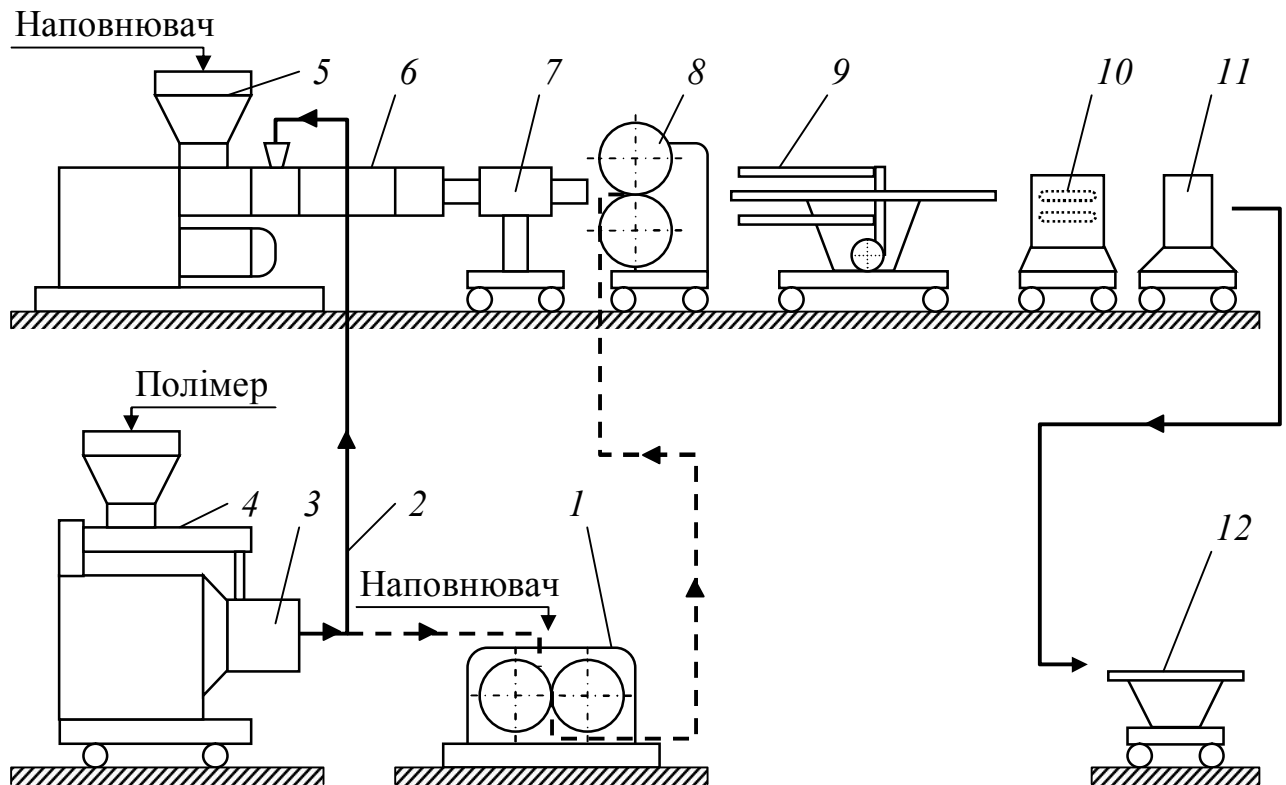


Рис. 6.1. Схема експериментальної технологічної лінії: 1 – змішувально-підігрівальні вальці; 2 – розплавопровід; 3 – дисковий екструдер; 4 – живильник полімеру; 5 – дозатор наповнювача; 6 – однокерв'ячний екструдер; 7 – екструзійна головка; 8 – гладильний каландр; 9 – охолодний пристрій; 10 – тягнучий пристрій; 11 – пристрій поперечного різання; 12 – нагрмаджувальний пристрій

За умови реалізації першого або другого методів одержання листової заготовки (підготовку розплаву полімеру здійснюють у дисковому екструдері) гранули або одержані після подрібнення вторинної полімерної сировини частинки полімеру дозують у дисковий екструдер. Потім одержаний розплав за допомогою розплавопроводу подають до одночерв'ячного екструдера після ділянки дозування в нього наповнювача (перший метод) або в міжвалковий проміжок змішувальних вальців (другий метод).

У першому випадку розплав полімеру під тиском надходить в об'єм наповнювача, обволікає його частинки та ефективно розподіляється в робочому каналі одночерв'ячного екструдера, що сприяє одержанню високогомогенізованого ТпМ, який у в'язкоплинному стані за допомогою екструзійної головки формують у листову заготовку. У другому випадку розплав полімеру потрапляє в міжвалковий проміжок змішувально-підігрівальних вальців, куди також дозується і наповнювач; листову заготовку при цьому одержують після вальцювання ТпМ.

За умови реалізації третього методу одержання листової заготовки (підготовку розплаву полімеру здійснюють безпосередньо на змішувально-підігрівальних вальцях) гранули або частинки полімеру та наповнювач одночасно дозують у міжвалковий проміжок. За рахунок теплообміну з обертовими валками та енергії дисипації полімер плавиться і поступово змішується з наповнювачем. Після досягнення необхідної однорідності матеріалу листову заготовку одержують відокремленням сформованого ТпМ від поверхні відповідного валка.

Листова заготовка, незалежно від методу її одержання, потрапляє на двовалковий гладильний каландр, потім на охолодний і тягнучий пристрій. Після цього охолоджену безперервну заготовку на пристрої поперечного різання розрізають на мірні листи, які потім надходять у нагромаджувальний пристрій.

### **6.2.2. Екструзійна установка**

Каскадна екструзійна установка складається з дискового екструдера з двощілинним обертовим диском і шнековим живильником полімеру, а також одночерв'ячним екструдером зі шнековим дозатором наповнювача і плоскощілинною екструзійною головкою. Обидва екструдери споряджені двигунами постійного струму [338].

Для підтримання заданого температурного режиму дисковий та одночерв'ячний екструдери споряджені автоматичними системами електрообігрівання. Електронагрівники дискового екструдера призначені тільки для початкового розігрівання, тому після його виходу на заданий температурний режим нагрівання припиняють і він продовжує працювати в адіабатичному режимі (табл. 6.1).

Технічна характеристика каскадної екструзійної установки

Параметр	Живильник полімеру	Дисковий екструдер	Дозатор наповнювача	Одночерв'ячний екструдер
Продуктивність, кг/год: за полімером за наповнювачем за ТпМ	6–30	25	1–20 1–15	6–20
Встановлена потужність, кВт: електродвигунів електронагрівників	0,6 –	42 2	0,55 –	8 4
Робочі органи: діаметр $D$ , мм співвідношення $L/D$ частота обертання, об/хв	63 8 4–20	200 0,6 0–120	63 4,5 0–30	90 5 0–120

Головним призначенням одночерв'ячного екструдера (рис. 6.2) є одержання і гомогенізація ТпМ. Необхідна для цього енергія підводиться як від зовнішнього нагрівника 3 крізь циліндричну стінку корпусу 5, так і за рахунок дисипації в об'ємі перероблюваного матеріалу. Зважаючи на те, що для досягнення потрібної якості одержуваної композиції необхідно забезпечити певні температурні режими, в екструдері передбачено регулювання температури.

Корпус екструдера являє собою циліндр з внутрішнім каналом для розміщення черв'яка 4 діаметром 90 мм. Черв'як має однозахідну нарізку з кроком 60 мм, глибина якої змінюється від 10 мм у зоні подавання до 3 мм у зоні гомогенізації. Обертання черв'яка забезпечується електродвигуном 6 постійного струму через редуктор 1. Для підтримання потрібної продуктивності передбачено контур регулювання частоти обертання черв'яка (табл. 6.2).

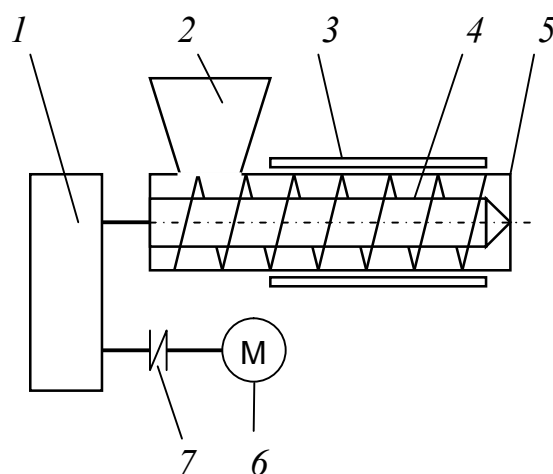


Рис. 6.2. Схема одночерв'ячного екструдера: 1 – редуктор; 2 – завантажувальний отвір; 3 – електронагрівник; 4 – черв'як; 5 – корпус; 6 – електродвигун; 7 – муфта

Технічна характеристика одночерв'ячного екструдера

Параметр	Характеристика
Геометричні параметри черв'яка:	
діаметр, мм	90
крок нарізки, мм	60
глибина нарізки в зоні подавання, мм	10
глибина нарізки в зоні гомогенізації, мм	3
відношення довжини черв'яка до його діаметра	6
Швидкість екструзії, м/с	0,01
Кількість зон нагрівання	4
Максимальна температура корпусу екструдера (за зонами), °С	210 (4 зони)
Електродвигун привода:	
потужність, кВт	4
частота обертання ротора, об/с	3,3–26,7
Габаритні розміри (довжина × ширина × висота), м	1,43 × 0,93 × 1,17

### 6.2.3. Валкова установка

Експериментальні дослідження калібрування та охолодження листової заготовки (за умови реалізації першого або другого методів одержання листової заготовки), а також одержання листової заготовки і подальшого її калібрування та охолодження (за умови реалізації третього методу одержання листової заготовки) проводили на двовалковій машині з довжиною і діаметром бочки 0,25 м і 0,2 м, відповідно (табл. 6.3, рис. 6.3) [194, 195].

Валкова установка, яку змонтовано на зварній основі 8, містить дві станини 2 із встановленими на них механізмами 10 переміщення переднього валка 13. У стягнутих траверсах станинах розміщено корпуси валкових підшипників ковзання. Нерухомі корпуси підшипників заднього валка 3 впираються в месдозу 11, які сприймають розпірні зусилля, що діють на валок під час роботи установки. Розпірні зусилля, що діють на передній валок, також передаються месдозам.

У торців бочок валків 3 і 13 на траверсах 2 встановлено обмежувальні стріли 12, які виключають витікання оброблюваного матеріалу за межі міжвалкового проміжку. Робочу поверхню валків загартовано, шліфовано та поліровано. Привід валків складається з електродвигуна 5, вал якого з'єднано через муфту 6 з редуктором 7. Крутний момент від редуктора передається через приводну зубчасту пару 9 на задній валок, а потім – через пару фрикційних шестерень 1 – на передній валок. Контроль частоти обертання ротора електродвигуна здійснюють за допомогою тахогенератора 4. Валки обігрівають за допомогою індукційних нагрівників, розташованих у периферійних каналах, які просвердлено в бочках валків. Електричний струм до нагрівників підводять через колектор 14. Керування температурою робочих поверхонь валків забезпечують швидкодійними безконтактними системами з пропорційними законами регулювання.

Технічна характеристика двовалкової машини

Параметр	Характеристика
Кількість валків	2
Розташування валків	горизонтальне
Розміри бочок валків: довжина × діаметр, мм	250 × 200
Обігрів валків	
тип	індукційний
потужність, кВт	8,8
максимальна температура поверхні валка, °С	350
Величина міжвалкового проміжку, мм	0–10
Колова швидкість швидкохідного валка, м/с	0,038–0,272
Електродвигун приводу:	
потужність, кВт	6
частота обертання ротора, об/с	3,3–26,7
Коефіцієнт фрикції в міжвалковому проміжку	1,00; 0,92; 0,84; 0,77; 0,70; 0,65; 0
Габаритні розміри (довжина × ширина × висота), м	1,43 × 0,93 × 1,17

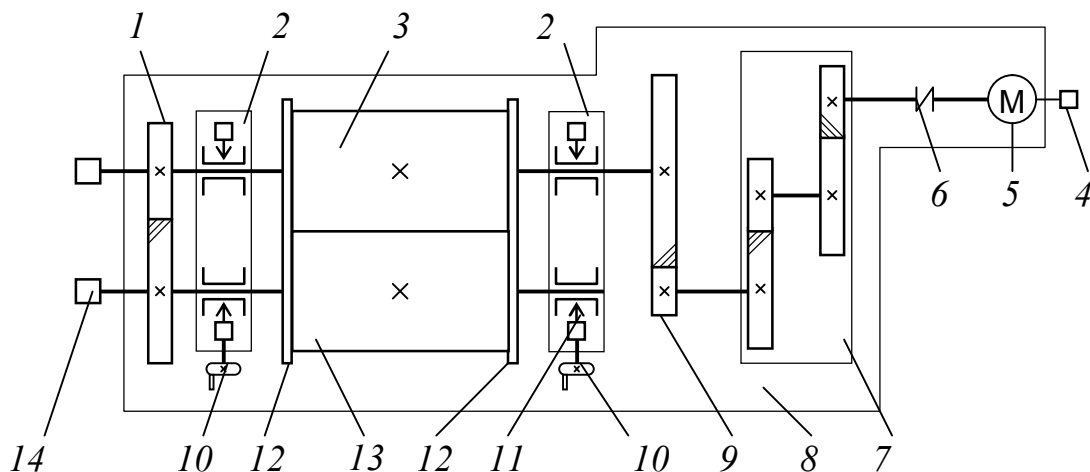


Рис. 6.3. Схема валкової установки: 1 – фрикційні шестерні; 2 – станини; 3 – задній валок; 4 – тахогенератор; 5 – привідний електродвигун; 6 – муфта; 7 – редуктор; 8 – зварна основа; 9 – приводна зубчаста передача; 10 – механізми переміщення переднього валка; 11 – месдози; 12 – обмежувальні стріли; 13 – передній валок; 14 – колектор підведення електричного струму до нагрівників валка

На шийках валків для вимірювання крутних моментів наклеєно тензодатчики, сигнали від яких через ртутні струмознімачі надходять на тензостанцію.

#### 6.2.4. Охолодний пристрій

Після валкової установки лист ТпМ потрапляє на охолодний пристрій, який являє собою набір паралельних сталевих роликів, змонтованих на зварній основі з можливістю вільного обертання. Пристрій споряджено знімним кожухом, сполученим з нагнітальною магістраллю повітряного вентилятора.

### 6.3. Контрольовані фізичні величини і засоби їх вимірювань

Під час створення експериментальної установки та розробки методики експериментальних досліджень процесу комплексної переробки ТпМ з використанням вторинної сировини було поставлено завдання передбачити можливість змінення і контролювання параметрів процесу переробки зазначених матеріалів 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 [339].

Для досягнення поставленого завдання на основі аналізу особливостей процесу переробки ТпМ встановлено необхідність контролювати такі параметри.

Для каскадної екструзійної установки визначали:

а) частоту обертання черв'яка екструдера та шнека живильника за допомогою лазерного портативного цифрового тахометра АКІП-9202 з діапазоном вимірювання частоти обертання 0,6–25000 об/хв і похибкою вимірювання 0,1 об/хв (для частоти обертання від 0,6 до 10000 об/хв);

б) масову продуктивність установки за масою матеріалу, відібраного за певний проміжок часу, що визначався за допомогою секундоміра механічного СОСпр-2б-2-000 з класом точності 2, допустима похибка 0,6 с за 600 с. Зважування здійснювалося на вагах ВНЦ-2М, діапазон вимірювань 0–2000 г, границя допустимої похибки 1 г у діапазоні зважування від 10 до 1000 г;

в) споживану потужність електродвигунів за допомогою вимірювального комплексу К-50 з класом точності 0,5;

г) температуру корпусу дискового екструдера та циліндра одночерв'ячного екструдера за допомогою термоелектричних перетворювачів ТХК-259 і ТХК-539 (НСХ L, діапазон вимірювання 0–400 °С), у комплекті з автоматичними потенціометрами типу А-565-001-01 з класом точності 0,15/0,05, діапазоном вимірювання від мінус 50 до плюс 800 °С і ступенем дискретизації цифрового відліку (величиною найменшого розряду відлікового пристрою) 0,1 °С;

д) температуру розплаву на виході з розплавлювача й температуру композиції на виході з одночерв'ячного екструдера за допомогою термоелектричних перетворювачів голчастого типу К1 (аналог ТП174, НСХ L, діапазон вимірювання від мінус 40 до 200 °С), у комплекті з автоматичними потенціометрами типу А100-Н-1 з класом точності 0,5, діапазоном вимірювання 0–200 °С і ступенем дискретизації цифрового відліку 0,1 °С;

е) тиск на вході в екструзійну головку одночерв'ячного екструдера манометром загального призначення МПЗ-У з класом точності 1,0, ціною поділки шкали 0,5 МПа і діапазоном вимірювання 0–16 МПа. Для запобігання потраплянню перероблюваного ТпМ у манометр його споряджено проміжною трубкою, заповненою силіконовим мастилом [198].

Для валкової установки визначали:

а) колову швидкість валків за допомогою лазерного портативного цифрового тахометра АКІП-9202 з діапазоном вимірювання лінійної швидкості 0,6–2500 м/с і ступенем дискретизації цифрового відліку 0,1 м/хв;

б) споживану потужність електродвигуна за допомогою вимірювального комплексу К-50 з класом точності 0,5;

в) температуру валків за допомогою вбудованих у валок на відстані 1 мм від поверхні термоелектричних перетворювачів ТХК-259 і ТХК-539 (НСХ L, діапазон вимірювання 0–400 °С), у комплекті з автоматичними потенціометрами типу А-565-001-01 з класом точності 0,15/0,05, діапазоном вимірювання від мінус 50 до плюс 800 °С і ступенем дискретизації цифрового відліку 0,1 °С;

г) температуру перероблюваного матеріалу за допомогою термоелектричних перетворювачів ТХК-2688 (НСХ L, діапазон вимірювання від мінус 40 до 200 °С), у комплекті з автоматичним потенціометром типу А100-Н-01 з класом точності 0,5, діапазоном вимірювання 0–200 °С і ступенем дискретизації цифрового відліку 0,1 °С;

д) величину розпірних зусиль і крутних моментів на основі методу тензометрії. Для реєстрації сигналів з датчиків використано універсальну тензометричну установку УТС-ВТ-12, що складається з дванадцятиканальної тензостанції типу УТС-12-35, блоку живлення В-12 і тарувального пристрою Т-12. Як реєструвальний пристрій використовували світловий осцилограф Н071.4М;

е) величину міжвалкового проміжку, яку попередньо задавали за лімбами регулювальних механізмів і контролювали прокатуванням свинцевих пластин з подальшим визначенням їх товщини за допомогою мікрометра ГОСТ 6507 з ціною поділки шкали 0,01 мм і діапазоном вимірювання 0–25 мм;

ж) координату входу ТпМ у міжвалковий проміжок в абсолютних величинах визначали за допомогою лінійки вимірювальної металевої ГОСТ 427 з ціною поділки шкали 1 мм і діапазоном вимірювання 1–500 мм.

Для охолодного пристрою визначали:

а) товщину листового матеріалу за допомогою мікрометра ГОСТ 6507 з ціною поділки шкали 0,01 мм і діапазоном вимірювання 0–25 мм;

б) температуру листового матеріалу по його товщині за допомогою термоелектричних перетворювачів ТХК-2688 (НСХ L, діапазон вимірювання від мінус 40 до 200 °С), у комплекті з автоматичним потенціометром типу А100-Н-01 з класом точності 0,5, діапазоном вимірювання 0–200 °С і ступенем дискретизації цифрового відліку 0,1 °С.

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.

## 6.4. Склад досліджуваних матеріалів

Експериментальні дослідження здійснювали для вторинних поліолефінів: поліетилену високого тиску (ПЕВТ) (поліетилену низької густини (ПЕНГ)) ГОСТ 16337, поліетилену низького тиску (ПЕНТ) (поліетилену високої густини (ПЕВГ)) ГОСТ 16338 і поліпропілену (ПП) ГОСТ 26996.

Як наповнювач було взято фракціоновану на ситах (відповідно до ДСТУ ГОСТ ІСО 2591-1:2004 [340]) деревну тирсу з розміром частинок до 1 мм, а також папір поверхневої густини  $75 \text{ г/м}^2$  з розміром частинок до 2,5 мм. Вміст наповнювача в перероблюваному ТпМ змінювали від 21 до 60 % (за масою). Вхідний контроль целюлозовмісних наповнювачів здійснювали також за їх вологовмістом.

## 6.5. Дослідження екструзійної установки

### 6.5.1. Дослідження продуктивності

Для надійної роботи екструзійної установки необхідно, щоб масові продуктивності живильника полімеру  $G_{ж\text{тп}}$ , дискового екструдера  $G_{де}$ , дозатора наповнювача  $G_{жн}$  та одночерв'ячного екструдера  $G_{че}$  відповідали співвідношенням  $G_{ж\text{тп}} = G_{де}$  і  $G_{че} = G_{де} + G_{жн}$ , за виконання яких забезпечується захоплення сировини, плавлення полімеру, змішування компонентів ТпМ та його стабільне подавання в екструзійну головку (рис. 6.4 і 6.5).

З наведених залежностей видно, що продуктивність живильника і дозатора прямо пропорційна частоті обертання шнеків і залежить від виду й густини сировини. При цьому для забезпечення рівномірності густини розпушеного наповнювача необхідно попереджати його ущільнення безперервним перемішуванням.

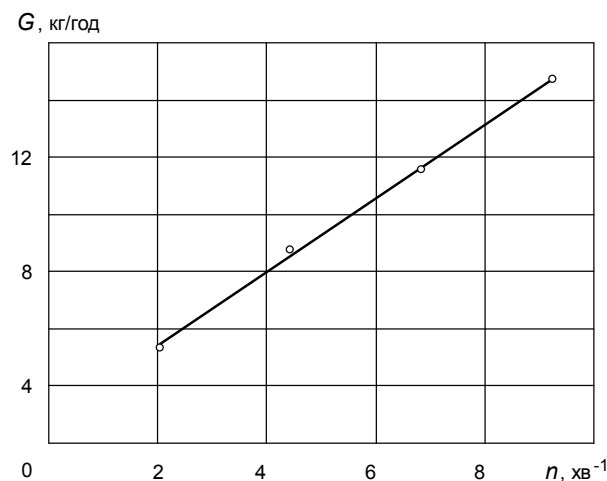


Рис. 6.4. Залежність продуктивності живильника полімеру (ПЕВТ) від частоти обертання його шнека

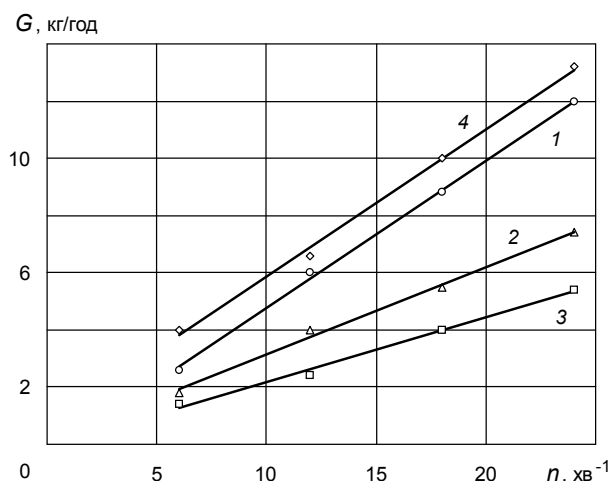


Рис. 6.5. Залежність продуктивності дозатора наповнювача від частоти обертання його шнека: 1 – суміш тирси та ПЕВТ (1:1); 2 – деревна тирса густиною 110 кг/м<sup>3</sup>; 3 – подрібнений папір; 4 – деревна тирса густиною 165 кг/м<sup>3</sup>

Продуктивність дискового екструдера прямо пропорційна швидкості обертання диска, але для запобігання перегріву розплаву дисковий розплавлювач повинен працювати в режимі «голодного» живлення, тобто за меншої продуктивності, ніж теоретично забезпечується за даної частоти обертання диска.

Аналіз процесу черв'ячної екструзії здійснюємо для ТпМ на основі ПЕВТ марки 15803-020 ГОСТ 16337 і дубової тирси для масової продуктивності 15 кг/год. При цьому частка тирси  $x$  у ТпМ становила 0, 21, 47 % (мас.).

Реологічні властивості дослідженого ТпМ описані степеневим законом (1.8) і представлені в табл. 6.4 [198].

Таблиця 6.4

Реологічні властивості дослідженого ТпМ ( $T_0=180\text{ }^\circ\text{C}$ )

Параметри реологічного рівняння	Масова частка наповнювача, %				
	0	21 ( $\dot{\gamma} \leq 30\text{ c}^{-1}$ )	21 ( $\dot{\gamma} \geq 30\text{ c}^{-1}$ )	47 ( $\dot{\gamma} \leq 30\text{ c}^{-1}$ )	47 ( $\dot{\gamma} \geq 30\text{ c}^{-1}$ )
$K_0$	2100	2300	1900	10200	83000
$n$	0,75	0,914	0,478	0,794	0,216
$\beta$	1,27	2,78		7,62	

В умовах експерименту продуктивність задавали в межах 10–15 кг/год. Для композиції на основі паперу продуктивність обмежувалася продуктивністю дозатора наповнювача. Одночерв'ячний екструдер працював в області, близькій до області «голодного» живлення.

З рис. 6.6 видно, що за постійної частоти обертання черв'яка зі збільшенням ступеня наповнення ТпМ масова продуктивність екструдера незначно

знижується, що можна пояснити незначним зменшенням густини ТпМ і частковим ущільненням наповнювача під час екструзії.

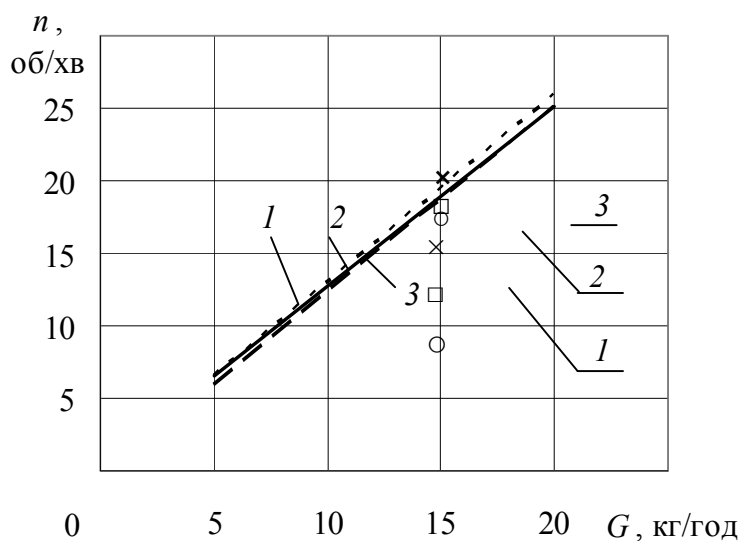


Рис. 6.6. Залежність продуктивності черв'ячного екструдера від частоти обертання черв'яка за різного значення  $x$ , % (мас.): 1 – 0; 2 – 21; 3 – 47;  $\circ$ ,  $\square$ ,  $\times$  – експериментальні дані для  $x = 0, 21, 47$  % (мас.), відповідно

### 6.5.2. Дослідження тиску на виході з черв'ячного екструдера

Тиск, що розвивається в екструдері з певною геометрією робочого каналу, залежить у першу чергу від продуктивності, протитиску екструзійної головки і в'язкості перероблюваного матеріалу. При незмінній екструзійній головці і постійній продуктивності (15 кг/год) зі збільшенням ступеня наповнення ТпМ спостерігається зростання тиску, обумовлене збільшенням в'язкості ТпМ (рис. 6.7).

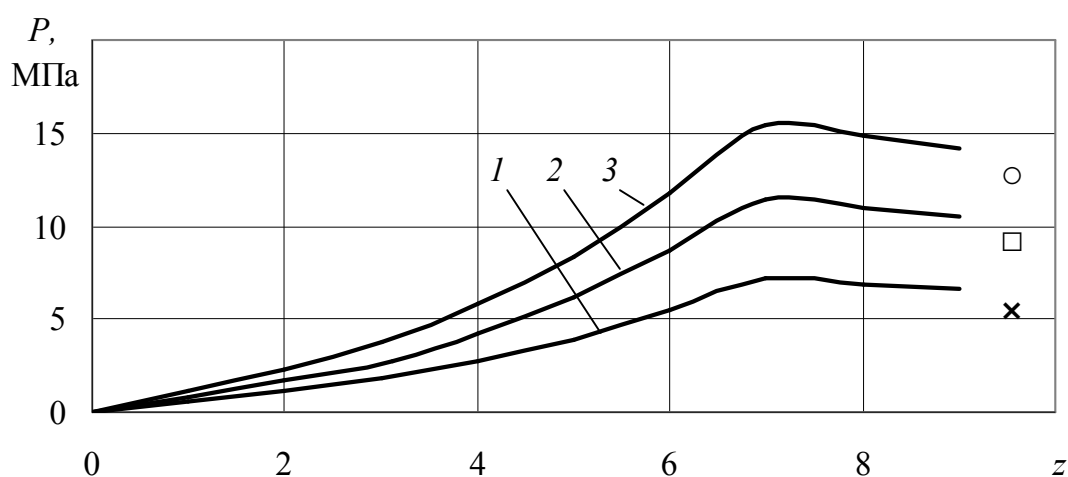


Рис. 6.7. Залежність тиску вздовж черв'ячного екструдера за різного значення  $x$ , % (мас.): 1 – 0; 2 – 21; 3 – 47;  $\times$ ,  $\square$ ,  $\circ$  – експериментальні дані для  $x = 0, 21, 47$  % (мас.), відповідно

Для всіх досліджених ступенів наповнення ТпМ теоретичне значення туну дещо перевищує експериментальні дані (див. рис. 6.7). Це можна пояснити в першу чергу тим, що штуцер манометра було встановлено не безпосередньо на виході з черв'ячного екструдера, а після перехідної ділянки на вході в екструзійну головку.

### 6.5.3. Дослідження споживаної потужності

На рис. 6.8 і 6.9 наведено залежності споживаної потужності дискового та одночерв'ячного екструдерів від їх продуктивності.

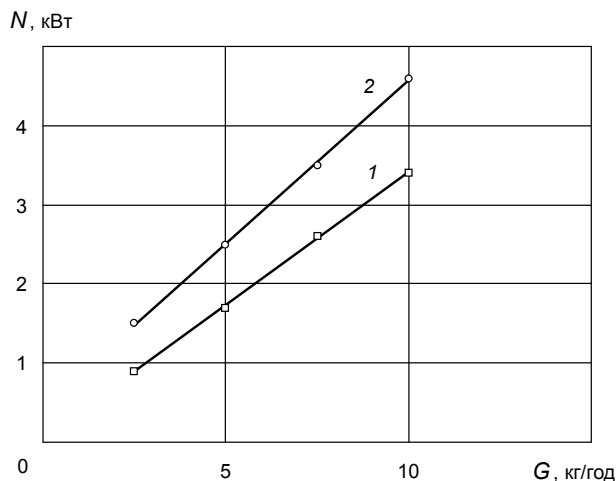


Рис. 6.8. Залежність потужності дискового екструдера від його продуктивності: 1 – ПЕВТ; 2 – ПП

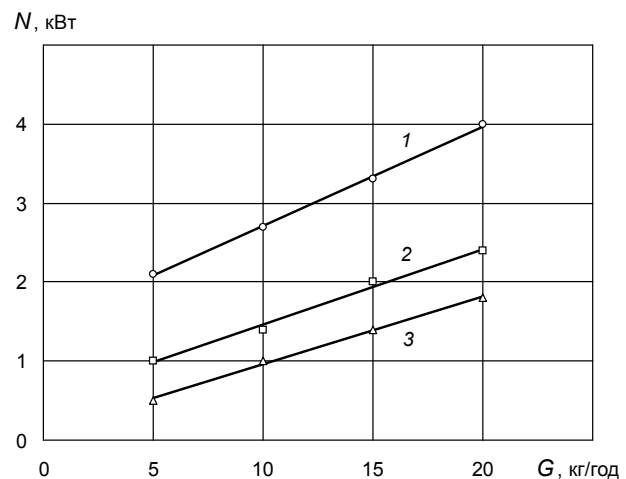


Рис. 6.9. Залежність потужності одночерв'ячного екструдера від його продуктивності: 1 – ПЕВТ – 50 %, папір – 50 % (тиск 10 МПа); 2 – ПЕВТ – 50 %, тирса – 50 % (тиск 8 МПа); 3 – ПЕВТ – 60 %, тирса – 40 % (тиск 8 МПа)

Експериментально показано, що значення потужності приводів обертових робочих органів обох екструдерів знаходиться в прямій залежності від їх продуктивності та вмісту наповнювача в ТпМ [123].

Витрати енергії під час екструзії ТпМ зростають зі збільшенням ступеня його наповнення (рис. 6.10).

Певну розбіжність теоретичних та експериментальних результатів для ТпМ з  $x=47$  % (мас.) можна пояснити тим, що реологічні властивості були досліджені саме для цієї композиції, а експерименти проводили для  $x=50$  % (мас.). Так, при малих значеннях продуктивності експериментальні значення потужності на черв'яку дещо перевищують теоретичні, що пояснюється більшим значенням в'язкості ТпМ з  $x=50$  % (мас.), а при великих – тим, що підвищені дисипативні тепловиділення спричиняють певне зниження в'язкості, а отже і споживаної потужності.

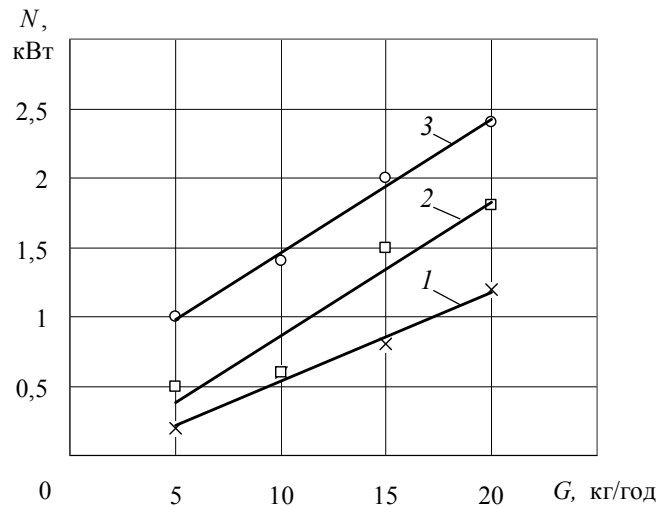


Рис. 6.10. Зміна потужності приводу черв'яка від частоти обертання черв'яка за різного значення  $x$ , % (мас.): 1 – 0; 2 – 21; 3 – 47;  
 $\times$ ,  $\square$ ,  $\circ$  – експериментальні дані для  $x = 0, 21, 47$  % (мас.), відповідно

#### 6.5.4. Визначення температурного режиму переробки

Температурний режим переробки залежить від виду полімеру та ступеня його наповнення. Зі збільшенням масової частки наповнювача до 30–60 % потрібно збільшувати температуру розплаву на 10–30 °С (частоту обертання диска на 20–30 об/хв) для забезпечення збільшення температури ТпМ над температурою плавлення полімеру на 10–20 °С. Результати визначення температурного режиму переробки ТпМ різного складу за масової продуктивності 15 кг/год наведено в табл. 6.5.

Таблиця 6.5

Температурні режими переробки ТпМ за продуктивності 15 кг/год

Композиційний матеріал			Температура, °С					
полімер	наповнювач	масова частка наповнювача	дисковий екструдер			черв'ячний екструдер		
			корпус	диск	розплав	корпус	головка	розплав
ПЕВТ	тирса	0,5	160	180	185	170	180	185
ПЕНТ	тирса	0,4	170	190	190	180	190	195
ПП	тирса	0,3	180	190	195	180	195	195
ПЕВТ	папір	0,5	160	180	185	175	185	185
ПЕВТ	папір	0,5	160	180	185	170	180	185

Подальший аналіз температурного режиму переробки ТпМ робили за умови підтримання постійної температури стінки циліндра (170 °С) і реалізації граничних умов третього роду на поверхні черв'яка. З рис. 6.11 і 6.12 видно, що середня і локальна температури ТпМ зростають зі збільшенням ступеня його наповнення, що пояснюється більш інтенсивною дисипацією енергії.

При цьому на початку черв'яка спостерігається часткове зниження температури ТпМ (див. рис. 6.11), спричинене взаємодією одержаного в дисково-

му екструдері розплаву з корпусом черв'ячного екструдера, що мають температуру 185 і 170 °С, відповідно.

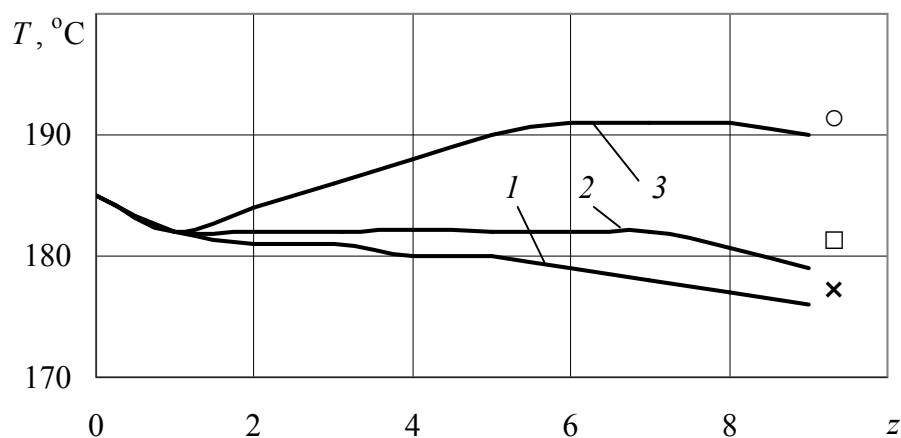


Рис. 6.11. Залежність середньої температури від номера витка черв'яка  $z$  за різного значення  $x$ , % (мас.): 1 – 0; 2 – 21; 3 – 47;  $\times$ ,  $\square$ ,  $\circ$  – експериментальні дані для  $x = 0, 21, 47$  % (мас.), відповідно

Зі збільшенням ступеня наповнення ТпМ спостерігається значна температурна неоднорідність матеріалу: так, різниця локальних температур для композиції з 47 % (за масою) наповнювача становить 48 °С (при цьому середня температура ТпМ зростає приблизно на 13 °С), у той час, як для ненаповненого полімеру – лише 20 °С (рис. 6.12).

Значне зростання температури під час експерименту підтверджувалося наявністю в готовому матеріалі потемнілих деревних частинок, що свідчить про їх часткову термічну деструкцію.

З метою визначення раціональних режимів процесу екструзії було проведено аналіз температурних режимів за різних значень температури корпусу циліндра (при  $x=21$  % (мас.)). Розрахований профіль температури по висоті каналу показує, що він має найбільш рівномірний характер за умови, якщо температура стінки корпусу циліндра в чотирьох його зонах поступово зростає від 170 до 200 °С (з різницею 10 °С). При такому режимі максимальна різниця локальних значень температури становить 40 °С на відміну від варіанта з постійною температурою стінки циліндра у 170 °С (зазначена різниця 70 °С) і 200 °С (різниця 50 °С). Крім того, за такого режиму порівняно з режимом, що характеризується температурою стінки циліндра 170 °С, зменшується не лише потужність на черв'яку, а і кількість теплоти, що необхідно підводити або відводити для забезпечення заданої температури стінки циліндра. І хоча зазначені енергетичні витрати більші за режиму, що відповідає постійній у всіх зонах температурі стінки циліндра 200 °С, останній режим є недоцільним через недопустимий перегрів матеріалу.

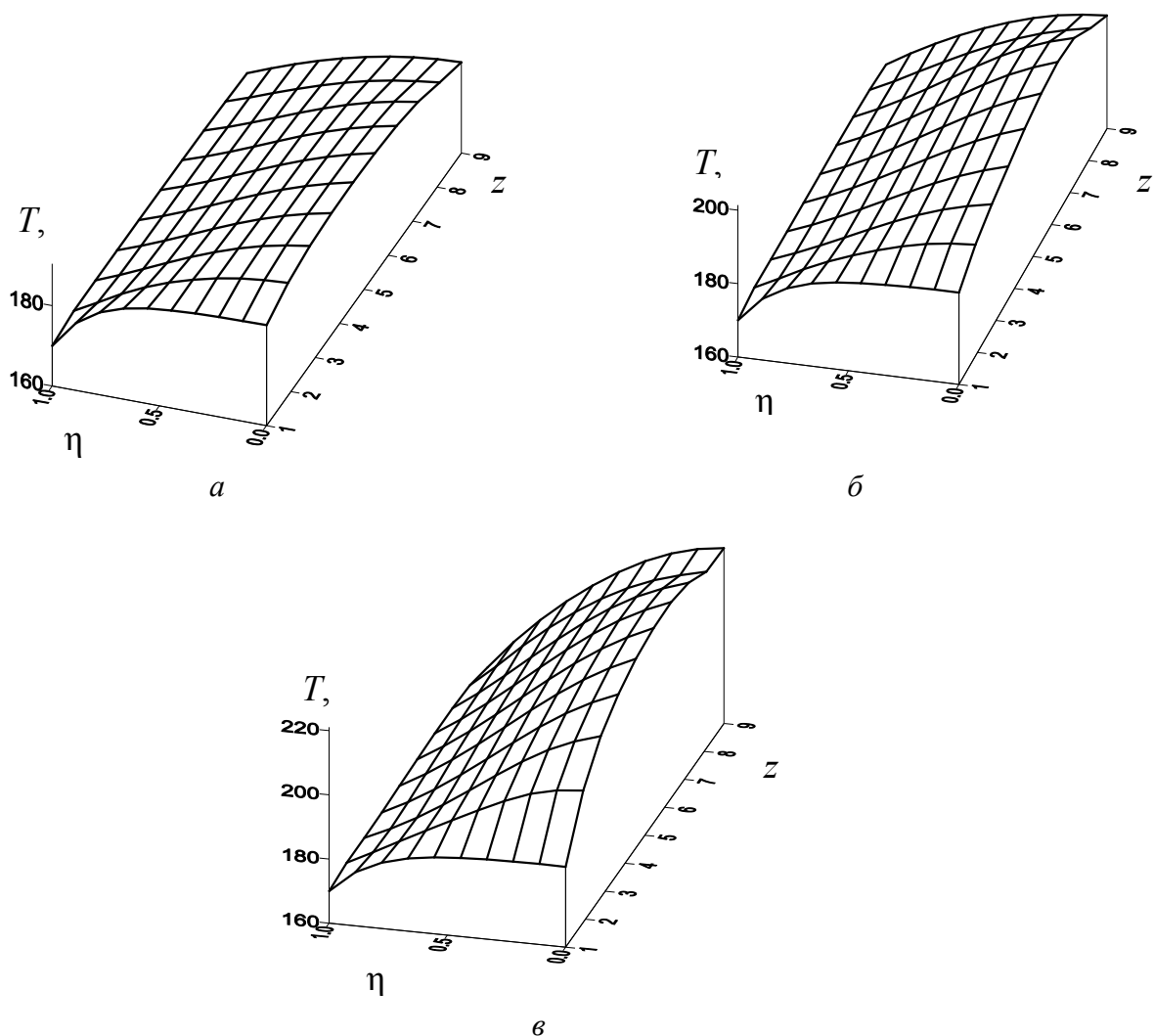


Рис. 6.12. Розрахункова залежність температури ТпМ по безрозмірній висоті каналу вздовж черв'яка ( $z$  – номер витка черв'яка) за різного значення  $x$ , % (мас.):  $a$  – 0;  $b$  – 21;  $v$  – 47

## 6.6. Дослідження процесу одержання ТпМ на валковій установці

### 6.6.1. Методика проведення досліджень

У разі змішування компонентів ТпМ на валковій установці (другий і третій методи одержання ТпМ відповідно до п. 6.2.1) листову заготовку одержують відокремленням її від поверхні відповідного валка після вальцювання.

Враховуючи тривалий час прогріву тензометричної апаратури, у першу чергу вмикають тензометричну станцію. Потім вмикають привод валків, забезпечуючи мінімальну швидкість обертання заднього (швидкохідного) валка, після чого датчиками потенціометрів ПСР1-08 встановлюють необхідний рівень температури поверхонь валків, після досягання якої вмикають осцилог-

раф Н071.4М і перевіряють справність термодатчиків, а також тензодатчиків розпірних зусиль і крутних моментів.

Тарування розпірних зусиль, крутних моментів, а також міжвалкового проміжку здійснюють за методикою, наведеною в працях [194, 195].

Далі реєструють характеристики холостого ходу валкової установки. Для цього встановлюють необхідну колову швидкість швидкохідного валка і записують показання приладів, що реєструють потужність приводу валків, потужність системи нагріву і температури валків. Вмикають запис розпірних зусиль і крутних моментів, і на осцилограмі реєструють їх нульові значення.

Після досягнення необхідного ступеня однорідності одержуваного матеріалу здійснюють запис показань вимірювальних приладів, які характеризують температуру поверхонь валків, колову швидкість швидкохідного валка, потужність приводного електродвигуна і потужність систем теплопостачання валків.

Середню температуру  $T_{пМ}$  на вході в міжвалковий проміжок заміряють голковою термодаткою. Показання тензодатчиків розпірних зусиль і крутних моментів реєструють протягом всього досліду.

Товщину одержуваної листової заготовки визначають таким чином. Вмикають привод валків, після чого бронзовим ножом підрізають листову заготовку вздовж твірної бочки валка, вмикають привод і на мінімальній швидкості її знімають з валка. Товщину одержаної листової заготовки вимірюють у декількох точках і визначають як середнє арифметичне отриманих значень.

### 6.6.2. Оброблення експериментальних даних

Середнє значення розпірного зусилля, що діє на валок, визначали після розшифрування осцилограми за залежністю

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 F_i,$$

де  $F_i$  – зусилля, що діє на  $i$ -ту месдозу (визначають за тарувальним графіком) [194, 195].

Значення крутного моменту, що діє на відповідний валок, одержують після розшифрування осцилограми як різницю крутних моментів, що діють на валок у місці розміщення двох тензодатчиків: поблизу приводної і фрикційної шестерень для заднього валка, а також поблизу фрикційної шестерні і вільного кінця переднього валка.

Координату входу  $T_{пМ}$  у міжвалковий проміжок в абсолютних величинах визначали за допомогою закріпленого на обмежувальних стрілах пристрою, а також лінійки вимірювальної металевої ГОСТ 427 з ціною поділки шкали 1 мм і діапазоном вимірювання 1...500 мм.

Після цього абсолютне значення координати входу ТпМ у міжвалковий проміжок за залежністю (4.46) перераховували в безрозмірне. Також за цією залежністю через товщину листової заготовки, яку визначали як середнє арифметичне значення результатів трьох замірів по її ширині, обчислювали значення безрозмірної координати виходу ТпМ з міжвалкового проміжку.

Середнє значення поверхні кожного з валків визначали як середнє арифметичне показань чотирьох термопар відповідного валка, а середню температуру ТпМ у міжвалковому проміжку – як середнє арифметичне значень температури валків, а також температури ТпМ на вході в міжвалковий проміжок і на виході з нього.

### 6.6.3. Визначення властивостей перероблюваних матеріалів

Дослідження проводили для таких композицій (за масою):

- 1) вторинний ПЕВТ – 60 % і дубова тирса – 40 %;
- 2) вторинний ПЕНТ – 60 % і дубова тирса – 40 %;
- 3) вторинний ПЕВТ – 30 %, вторинний ПЕНТ – 30 % і дубова тирса – 40 %.

Реологічні властивості полімерів досліджуваних композицій, які проводили методом капілярної віскозиметрії [79] на приладі типу ИИРТ–3, такі:

- 1) вторинний ПЕВТ:  $T = 160^{\circ}\text{C}; K = 1,15 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}^n; n = 0,38;$   
 $T = 180^{\circ}\text{C}; K = 3,38 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}^n; n = 0,72;$
- 2) вторинний ПЕНТ:  $T = 160^{\circ}\text{C}; K = 2,69 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}^n; n = 0,23;$   
 $T = 180^{\circ}\text{C}; K = 6,96 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}^n; n = 0,96.$

Що стосується реологічних властивостей одержуваних ТпМ, які можуть істотно відрізнятися від властивостей полімерів, що утворюють матрицю ТпМ [95, 198], то, як було зазначено в п. 1.2.2, на практиці доцільно застосовувати результати дослідів, проведених безпосередньо на відповідному переробному обладнанні. Враховуючи зазначене, реологічні властивості одержуваних ТпМ були визначені в результаті обробки експериментальних даних процесу вальцювання [88, 341], які наведено в табл. 6.6.

Ефективну в'язкість перероблюваного ТпМ визначали за залежністю [342]

$$\mu_{\text{ТпМ}} = \frac{Fh_{\text{min}}\delta}{2R_{\text{в}}LW_{\text{в}}(\delta - 2h_{\text{min}})},$$

де  $F$  – розпірні зусилля, що діють на валки;  $W_{\text{в}}$  – середня колова швидкість валка;  $\delta$  – товщина ТпМ на виході з міжвалкового проміжку.

Середня швидкість зсуву в міжвалковому проміжку становить [201]

$$\dot{\gamma} = \frac{W_{\text{в}}}{h_{\text{min}}}.$$





Індекс течії ступеневої рідини і величину коефіцієнта консистенції  $K$  визначають з кривої плинності  $\tau = f(\dot{\gamma})$  [78, 194].

У результаті обробки експериментальних даних отримані такі реологічні властивості досліджених ТпМ (за масою):

1) вторинний ПЕВТ – 60 % і дубова тирса – 40 %:

$$T = 117^\circ\text{C}; K = 1,34 \cdot 10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}^n; n = 0,245;$$

$$T = 137^\circ\text{C}; K = 6,35 \cdot 10^4 \text{ Па}\cdot\text{с}^n; n = 0,345;$$

2) вторинний ПЕНТ – 60 % і дубова тирса – 40 %:

$$T = 131^\circ\text{C}; K = 1,11 \cdot 10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}^n; n = 0,305;$$

$$T = 147^\circ\text{C}; K = 2,74 \cdot 10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}^n; n = 0,103;$$

3) вторинний ПЕВТ – 30 %, вторинний ПЕНТ – 30 % і дубова тирса – 40 %:

$$T = 143^\circ\text{C}; K = 5,54 \cdot 10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}^n; n = 0,027;$$

$$T = 157^\circ\text{C}; K = 4,86 \cdot 10^4 \text{ Па}\cdot\text{с}^n; n = 0,484.$$

Як видно, реологічні характеристики наповнених ТпМ з використанням вторинної сировини істотно відрізняються від характеристик первинних полімерів.

Досліджені матеріали належать до наповнених ТпМ, тому їх теплофізичні властивості залежать від властивостей компонентів, складу і структури матеріалу (див. п. 1.2.2).

Залежності теплофізичних властивостей відповідних полімерів від температури [77, 94, 95] були апроксимовані у вигляді поліномів за методом найменших квадратів [78], а теплофізичні властивості дубової тирси наведені в п. 4.3.4.

Беручи до уваги розміри й форму наповнювача перероблюваного ТпМ, густину ТпМ визначали за залежністю (1.4), теплопровідність – за залежністю (1.1), а масову теплоємність – за залежністю (1.3).

#### 6.6.4. Результати експерименту та їх аналіз

Процес одержання ТпМ на валковій установці здійснювали в такій послідовності.

Після встановлення мінімального проміжку величиною приблизно 0,5 мм, завантаження полімеру й подальшого його розплавлення додавали наповнювач у кількості, необхідній для одержання певного масового співвідношення компонентів ТпМ. Після завершення процесу змішування здійснювали заміри необхідних величин (див. табл. 6.6).

З табл. 6.6 видно, що основні енергосилові параметри процесу вальцювання – питомі (на одиницю довжини бочки валків) розпірні зусилля і потужність – зростають зі збільшенням колових швидкостей валків і зі зменшенням середньої температури ТпМ у міжвалковому проміжку незалежно від виду перероблюваного матеріалу.

Порівняння експериментальних і теоретичних даних визначення вели-

чин розпірних зусиль і потужностей, що витрачаються на процес вальцювання (див. табл. 6.6), підтверджує їх достатню збіжність, а отже і адекватність розробленої математичної моделі вальцювання ТпМ з використанням вторинної сировини реальному процесу.

### **6.7. Дослідження процесу калібрування листового ТпМ на валковій установці**

Для визначення температури в центрі (по товщині) листового ТпМ у нього закладали термоелектричний перетворювач (з цією метою термоелектричний перетворювач розміщували між двома листовими заготовками, які потім сплавляли між собою). Листову заготовку, одержану або формуванням крізь екструзійну головку (перший метод одержання ТпМ відповідно до п. 6.2.1), або на валковій установці (другий і третій методи), нагрівали в термошафі до температури закінчення її формування, а потім пропускали крізь міжвалковий проміжок. При цьому заміряли температуру в центрі досліджуваного зразка, розпірні зусилля, а також крутні моменти, що діють на валки.

Досліджуваний матеріал – композиція (за масою) вторинний ПЕВТ – 60 % і дубова тирса – 40 % (див. п. 6.6.3).

Під час калібрування листової заготовки в міжвалковому проміжку завдяки відповідній температурі валків здійснюється охолодження ТпМ у міжвалковому проміжку з одночасним твердненням її поверхневих шарів.

З табл. 6.7, у якій наведено режими процесу калібрування, видно, що питомі розпірні зусилля зростають зі збільшенням колових швидкостей валків і зменшенням товщини вихідної заготовки (величини міжвалкового проміжку). При цьому питома потужність, що витрачається в міжвалковому проміжку, також зростає зі збільшенням колових швидкостей валків і майже не змінюється в діапазоні досліджених величин товщини вихідної заготовки. Останній факт можна пояснити тим, що за умови зменшення мінімальної товщини оброблюваного листа зменшується зона деформування ТпМ у міжвалковому проміжку (як по ширині, так і по довжині). При цьому збільшення товщини листа приводить з одного боку до збільшення споживаної потужності (за рахунок збільшення довжини зони деформування), а з другого – до її зменшення (за рахунок зменшення швидкості зсуву по ширині проміжку). Також під час калібрування порівняно з процесом вальцювання (див. табл. 6.6) відсутній обертовий запас на вході в міжвалковий проміжок. Крім того, зі зменшенням товщини листа зростає відносна частка товщини затверділого матеріалу зростає.

Порівняння експериментальних і теоретичних даних визначення величин розпірних зусиль і потужностей, що витрачаються на процес калібрування (див. табл. 6.7), підтверджує їх достатню збіжність, а отже і адекватність розробленої математичної моделі калібрування на гладильному каландрі ТпМ з використанням вторинної сировини реальному процесу.



## 6.8. Дослідження процесу охолодження відкаліброваного листового ТпМ в охолодному пристрої

Були досліджені листові зразки, одержані на валковій установці після їх калібрування, співвідношення ширини й довжини яких до їх товщини перевищувало 10, що давало можливість нехтувати перенесенням теплоти по ширині й довжині зразків і розглядати процес охолодження як одновимірний [193].

Експериментальні значення температури листа (склад матеріалу листа (за масою): 60 % вторинний ПЕВТ і 40 % тирси) визначали за допомогою термоелектричних перетворювачів, розміщених на глибині 0,5 мм від поверхні листа (температура  $T_1$ ), а також по його центру (температура  $T_2$ ).

Після виходу зразків номінальної товщини 6 і 10 мм з міжвалкового проміжку гладильного каландра й подальшого охолодження на відкритому повітрі температура поверхневих шарів листа спочатку збільшувалась за рахунок перенесення теплоти з його внутрішніх шарів, після чого охолодження поверхневих і внутрішніх шарів відбувалося синхронно (табл. 6.8, рис. 6.13, 6.14).

На графіках зміни температури ТпМ у часі (див. рис. 6.13 і 6.14) наявна майже горизонтальна ділянка, яка відповідає процесу твердіння полімеру ТпМ, після якої характер процесу охолодження зберігається, як і до неї.

Для інтенсифікації охолодження листових матеріалів завтовшки понад 6 мм процес можна здійснювати в умовах вимушеної конвекції, наприклад, обдуванням повітрям у пристрої тунельного типу.

З рис. 6.13 і 6.14 також видно, що під час охолодження відносно товстих листів (зазвичай більше 8–10 мм) перепад температури між внутрішніми й поверхневими шарами може перевищувати 30–40 °С.

У свою чергу це може призвести до різних умов структуроутворення листового ТпМ у різних його шарах і, як наслідок, до нерівномірності властивостей готового листа, зокрема до виникнення надмірних залишкових деформацій, що негативно впливає на експлуатаційні показники виробу.

Таким чином, інтенсифікація процесу охолодження товстостінних листів сприяє зменшенню тривалості охолодження, але може негативно вплинути на якісні показники готової продукції і бути недоцільною.

Порівняння експериментальних і розрахункових даних показує їх задовільну збіжність, що підтверджує адекватність розробленої математичної моделі термообробки термопластичних композиційних матеріалів з використанням вторинної сировини реальному процесу.





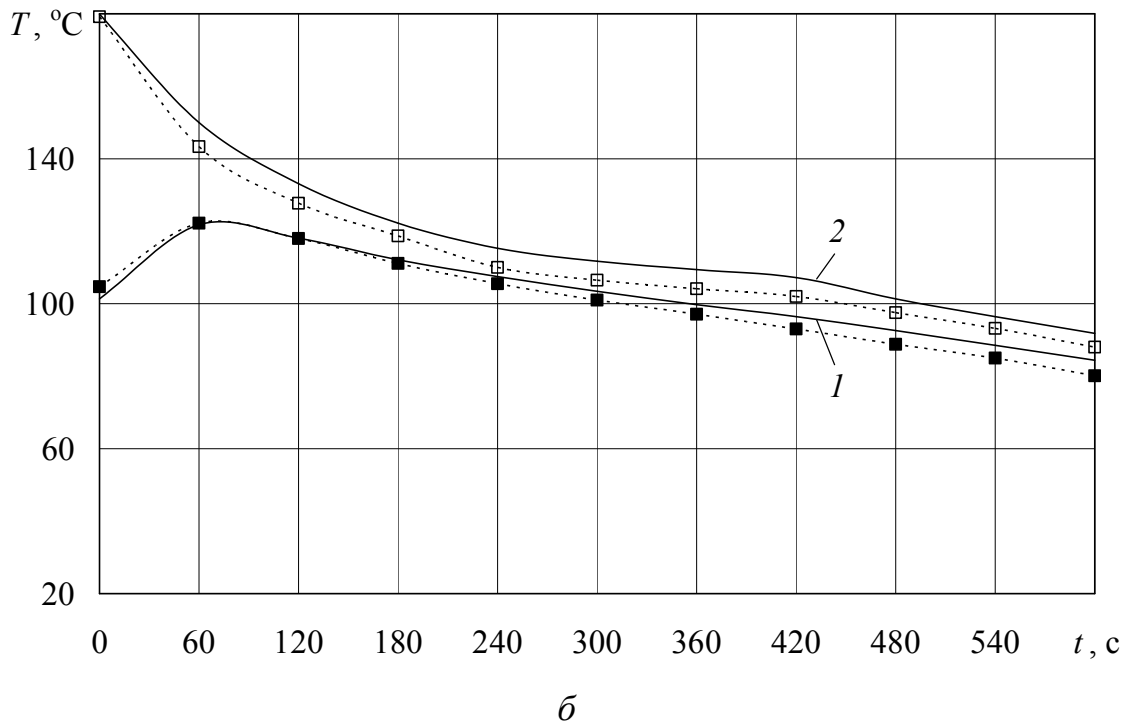
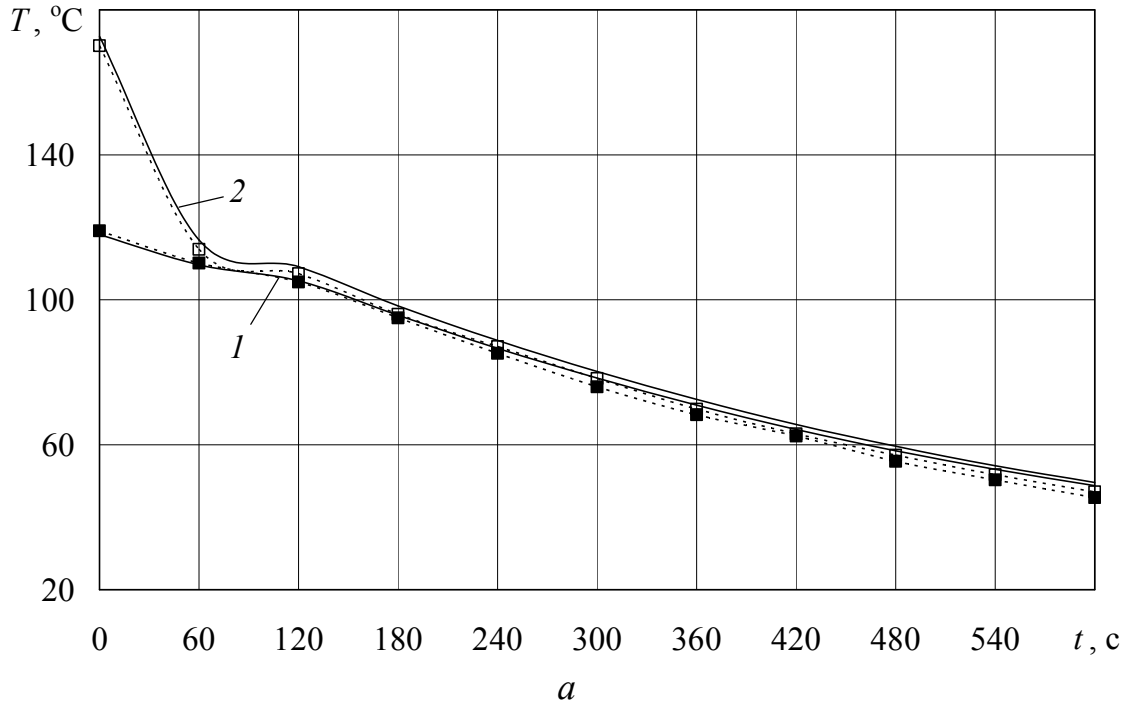


Рис. 6.13. Зміна температури листового ТпМ завтовшки 3 мм (а), 6 мм (б) і 10,1 мм (в) по його товщині в часі на відкритому повітрі в умовах вільної конвекції:  
 1 – поверхневий шар (розрахунок); 2 – центр зразка (розрахунок);  
 ■ – поверхневий шар (експеримент); □ – центр зразка (експеримент)

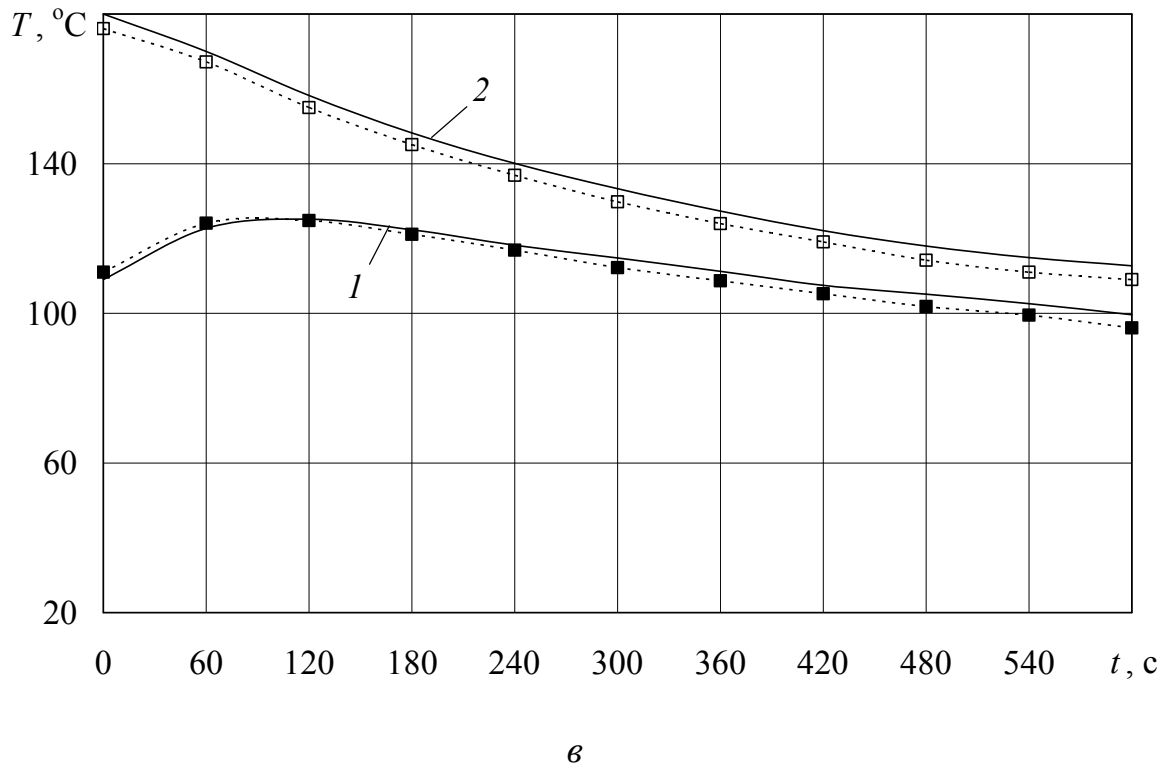


Рис. 6.13, аркуш 2.

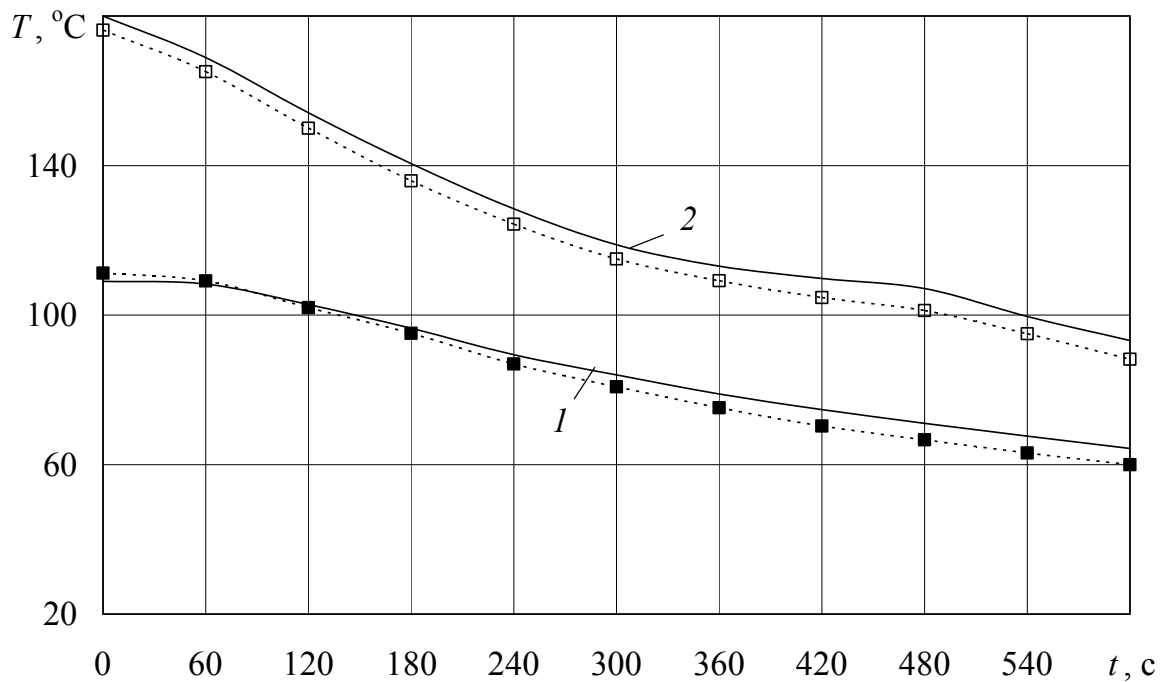


Рис. 6.14. Зміна температури листового ТпМ завтовшки 10,1 мм по його товщині в часі на відкритому повітрі в умовах вимушеної конвекції:  
 1 – поверхневий шар (розрахунок); 2 – центр зразка (розрахунок);  
 ■ – поверхневий шар (експеримент); □ – центр зразка (експеримент)

## 6.9. Показники якості зразків одержаних листових ТпМ

Контроль якості продукції, одержуваної з ТпМ у результаті експериментальних досліджень, здійснювали за зовнішнім виглядом та експлуатаційними показниками [79] відповідно до ТУ 559/46-13555662-01–95 [343].

Згідно з вимогами до зовнішнього вигляду виробів з ТпМ мають бути без тріщин, пузирів, відколів, здутин, темних плям та інших дефектів поверхні.

Визначення експлуатаційних показників зразків виробів з ТпМ були здійснені відповідно до міждержавних стандартів [123, 198]: ГОСТ 11262 – на розтяг [344], ГОСТ 4647 – на ударну в'язкість [345], ГОСТ 4648 – на згин [346], ГОСТ 4650 – на водовбирання (метод А) [347], ГОСТ 12.1.044 – на мозаймання [348].

Склад досліджених ТпМ наведено в табл. 6.9, технологічні режими одержання з них на екструзійній установці листових зразків – у табл. 6.10, а результати випробувань одержаних зразків – у табл. 6.11.

Для всіх досліджених зразків листових ТпМ незалежно від ступеня наповнення (див. табл. 6.9) і режимів переробки на екструзійній установці (див. табл. 6.10) випадків виявлення дефектів поверхні виявлено не було.

Таблиця 6.9

Склад досліджених ТпМ

Зразок	Масова частка компонентів			
	ПЕВТ	ПП	тирса деревна (дубова)	папір подрібнений
№ 1	0,60	–	0,40	–
№ 2	0,50	–	0,50	–
№ 3	0,45	–	0,55	–
№ 4	0,50	–	–	0,50
№ 5	0,40	–	0,60	–
№ 6	0,40	0,10	0,50	–

Таблиця 6.10

Технологічні режими одержання ТпМ на екструзійній установці

Зразок	Частота обертання черв'яка, об/хв	Температура, °С			Тиск у формувальній головці, МПа
		розплаву	циліндра черв'яка	формувальної головки	
№ 1	40	160	160	170	5,0
№ 2	40	180	170	175	5,2
№ 3	40	180	170	175	5,1
№ 4	40	180	170	185	6,0
№ 5	40	180	170	175	5,1
№ 6	40	200	185	200	4,6

## Фізико-механічні властивості листових ТпМ

Показник	Значення для зразка					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Середня міцність на розтяг, МПа						
уздовж волокон	–	5,8	4,1	3,5	–	14,4
поперек волокон	–	2,8	3,2	–	–	9,3
Ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>	6,2	5,2	4,7	–	4,0	2,0
Середня міцність на згин, МПа	20,3	11,8	10,5	10,6	–	–
Модуль пружності під час розтягу, МПа	870	–	–	–	–	1200
Водовбирання, % (за масою)	0,52	5	3	7	–	–
Самозаймання, °С	–	350	–	420	–	350

Міцність на розтяг зразків з ПЕВТ і деревної тирси, вирізаних з листового матеріалу вздовж напрямку його формування, вища за міцність зразків, вирізаних поперек зазначеного напрямку: у 1,3–2,1 рази залежно від ступеня наповнення ТпМ і при цьому зазначене співвідношення знижується зі збільшенням ступеня наповнення. Наповнення же понад 50 % (за масою) призводить до істотного зменшення міцності зразків.

Додавання до ПЕВТ поліпропілену (зразок № 6) приблизно втричі збільшує міцність листового ТпМ на розтяг (порівняно зі зразком № 2 з таким самим співвідношенням «полімер–наповнювач»), проте у 2,6 рази зменшує його ударну в'язкість.

Підвищення вмісту наповнювача понад 40 % (за масою) призводить до істотного збільшення водовбирання, тому експлуатація високонаповнених ТпМ може бути рекомендована за низької вологості оточуючого повітря або за умови наявності на таких ТпМ захисного чи декоративно-захисного покриття.

Крім того зниження експлуатаційних показників високонаповнених ТпМ під час їх одержання істотно збільшується їх енергоємність [123, 198].

## 6.10. Висновки

Відповідно до проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Експериментально доведена можливість переробки композицій на основі поліолефінів з деревними і паперовими наповнювачами у листові матеріали на технологічній лінії на базі екструзійно-валкового обладнання, зокрема на базі каскадного екструдера, що складається з дискового екструдера-розплавлювача та одночерв'ячного екструдера-змішувача. Остаточне калібрування одержуваного листового матеріалу доцільно здійснювати на гладильному каландрі з подальшим охолодженням повітрям.

2. Досліджено реологічні характеристики наповнених ТпМ з використанням вторинної полімерної сировини. Показано, що для визначення реоло-

гічних характеристик зазначених ТпМ, які істотно відрізняються від характеристик первинних полімерів, на практиці доцільно застосовувати результати дослідів, проведених безпосередньо на відповідному переробному обладнанні.

Це підтверджує доцільність переробки вторинної полімерної сировини безпосередньо в місцях її утворення, коли є необхідна кількість сировини із визначеними властивостями. Ефективна переробка вторинної полімерної сировини невизначеного складу і властивостей є досить ускладненою, тому зазначену сировину доцільно застосовувати як добавку до полімерної сировини з певними властивостями в кількості, що істотно на них не впливає.

3. Установлено адекватність використаних залежностей для визначення теплофізичних властивостей досліджених ТпМ (густина – за залежністю (1.4), теплопровідність – за залежністю (1.1), а масову теплоємність – за залежністю (1.3).

4. Установлено, що температурний режим переробки досліджених ТпМ на черв'ячному екструдері залежить від виду полімеру та ступеня його наповнення. Зі збільшенням масової частки наповнювача від 30 до 60 % (за масою) температуру розплаву необхідно збільшувати на 10–30 °С.

Зі збільшенням ступеня наповнення ТпМ спостерігається значна температурна неоднорідність матеріалу: так, різниця локальних температур для композиції з 47 % (за масою) наповнювача становить 48 °С (при цьому середня температура ТпМ зростає приблизно на 13 °С), у той час, як для ненаповненого полімеру – лише 20 °С. Значне зростання температури під час експерименту підтверджувалося наявністю в готовому матеріалі потемнілих деревних частинок, що свідчить про їх часткову термічну деструкцію. При цьому за постійної частоти обертання черв'яка зі збільшенням ступеня наповнення ТпМ масова продуктивність екструдера майже не змінюється.

Визначено раціональні режими процесу екструзії деревнонаповненого поліетилену, зокрема для ступеня наповнення 21 % (за масою) доцільним є такий температурний режим: початкова температура розплаву 185 °С і температура чотирьох зон циліндра одночерв'ячного екструдера 170, 180, 190, 200 °С.

5. Установлено, що під час процесу калібрування на гладильному каландрі питома потужність, що витрачається в міжвалковому проміжку, зростає зі збільшенням колових швидкостей валків і майже не змінюється в діапазоні досліджених величин товщини вихідної заготовки. Це можна пояснити тим, що за умови зменшення мінімальної товщини оброблюваного листа зменшується зона деформування ТпМ у міжвалковому проміжку (як по ширині, так і по довжині). При цьому збільшення товщини листа приводить з одного боку до збільшення споживаної потужності (за рахунок збільшення довжини зони деформування), а з іншого – до її зменшення (за рахунок зменшення швидкості зсуву по ширині проміжку). Також під час калібрування порівняно з процесом вальцювання відсутній обертовий запас на вході в міжвалковий проміжок.

Крім того, зі зменшенням товщини листа зростає відносна частка товщини за-тверділого матеріалу зростає.

6. Установлено, що під час охолодження відносно товстих листів перепад температури між внутрішніми й поверхневими шарами може перевищувати 30–40 °С, що може призвести до різних умов структуроутворення листового ТпМ у різних його шарах і, як наслідок, до нерівномірності властивостей готового листа, зокрема до виникнення надмірних залишкових деформацій. Таким чином, інтенсифікація процесу охолодження товстостінних листів з одного боку зменшує тривалість охолодження, але в той же час може негативно вплинути на якісні показники готової продукції і виявитися недоцільною.

7. Досліджено фізико-механічні властивості одержаних листів. Установлено, що властивості ТпМ із вмістом наповнювача біля 40 % (за масою) майже не відрізняються від властивостей відповідних полімерів. Зі збільшенням вмісту наповнювача істотно знижуються фізико-механічні властивості листів, а також збільшуються витрати енергії на процес переробки.

8. Порівняння експериментальних і теоретичних даних окремих процесів одержання листових матеріалів з композицій на основі поліолефінів з целюлозовмісними наповнювачами підтверджує їх достатню збіжність, а отже і адекватність розроблених математичних моделей черв'ячної екструзії, вальцювання, калібрування на гладильному каландрі, а також термообробки термопластичних композиційних матеріалів з використанням вторинної сировини реальним процесам.

Основні наукові результати розділу 6 опубліковано в працях [123, 126, 261, 337, 338, 349–352].

---

## **7. РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ОБЛАДНАННЯ ТА ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ**

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

### **7.1. Обладнання для утилізації полімервмісних відходів**

**7.1.1.** Одним з розповсюджених видів полімерпереробного обладнання є валкові машини, і в першу чергу вальці, які, на відміну від каландрів, мо-

жуть працювати незалежно від іншого технологічного устаткування. Але якщо процес традиційного вальцювання досліджено досить повно [78, 115, 177 та ін.], то комплексній переробці термопластичних матеріалів, однією зі стадій якого є плавлення полімеру, на валковому обладнанні уваги майже не приділялося [353].

Метою відповідних досліджень було обґрунтування принципової можливості утилізації термопластів, у тому числі і процесу одержання термопластичних композиційних матеріалів, на вальцях безперервної дії.

Принципову схему зазначеного процесу наведено на рис. 7.1. Гранули або частинки полімеру неправильної форми розігріваються за рахунок їх контакту з нагрітими валками, сусідніми гранулами, а також дисипації механічної енергії в утворюваному шарі розплаву, що деформується в міжвалковому проміжку.

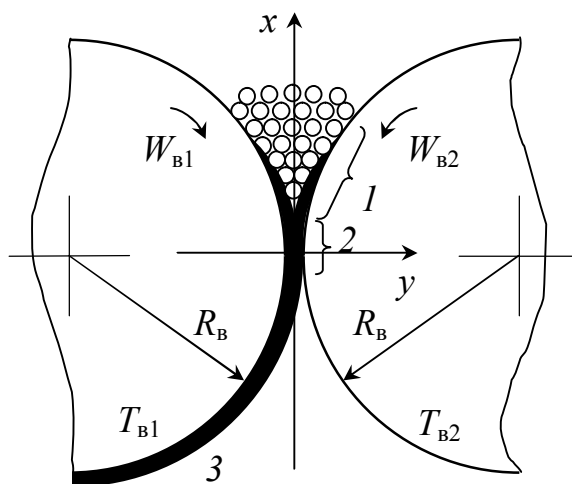


Рис. 7.1. Схема плавлення полімеру в міжвалковому проміжку: 1 – зона плавлення полімеру; 2 – зона деформування розплаву; 3 – зона теплообміну полімеру на валку

Режим переробки вибирають таким чином, щоб забезпечити шар розплавленого полімеру на виході з міжвалкового проміжку, товщина якого була би близькою до величини проміжку, що унеможливило би випадання нерозплавлених гранул або частинок полімеру крізь міжвалковий проміжок. Після часткового розплавлення полімеру утворюваний шар розплаву рухається разом з обертовим валком. Завдяки силам внутрішнього тертя розплав захоплює залишки нерозплавленого полімеру і вся маса починає втягуватись у проміжок. При цьому безпосередньо на ділянці подачі вихідного матеріалу на вальці можна виділити дві зони: зону завантаження, розігрівання та плавлення гранул, а також зону деформування розплаву полімеру (іноді із залишками твердих частинок). Після цього полімер багаторазово проходить крізь міжвалковий проміжок, що забезпечує його остаточне плавлення і сприяє гомогенізації одержуваного розплаву.

Загальна математична модель переробки полімеру складається з трьох математичних моделей: плавлення твердого полімеру, плинності розплаву полімеру в міжвалковому проміжку, а також теплообміну полімеру на валку.

Температурне поле в зоні плавлення полімеру з достатнім ступенем точності можна визначити, розв'язуючи рівняння нестационарної теплопровідності виду

$$\rho_{\text{тп}} c_{\text{тп}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{\text{тп}} \frac{\partial T}{\partial y} \right).$$

Початкова й граничні умови:

$$T|_{t=0} = T_0(y); \quad T \Big|_{\substack{y=h-\delta_1 \\ y=-h+\delta_2}} = T_{\text{пл}}; \quad w_x \Big|_{\substack{y=h-\delta_1 \\ y=-h+\delta_2}} = 0,$$

де  $T_0$ ,  $T_{\text{пл}}$  – початкова температура полімеру й температура шару розплаву полімеру;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – товщина шарів розплаву полімеру з боку відповідного валка.

Для розгляду процесу в другій і третій зонах можна скористатися відомими математичними моделями, розглянутими, наприклад, у праці [78].

Теоретичний аналіз процесу переробки було зроблено для ПВХ композиції (температура плавлення 130 °С, теплопровідність 0,15 Вт/(м·К), масова теплоємність 1950 Дж/(кг·К), густина 1250 кг/м<sup>3</sup>), перероблюваної на вальцях Ø 660×2100 мм при постійній величині міжвалкового проміжку (2 мм) в умовах симетричного процесу, а також змінних швидкості валків і початкової температури завантажуваного полімеру.

На рис. 7.2 наведено розподіл температури в матеріалі по ширині половини міжвалкового проміжку (оскільки задача симетрична) при температурі завантажуваного полімеру  $T_0=100$  °С, швидкості валків  $W_{\text{в1}} = W_{\text{в2}} = W_{\text{в}}=0,3$  м/с і температурі їх робочих поверхонь  $T_{\text{в1}} = T_{\text{в2}} = 140$  °С.

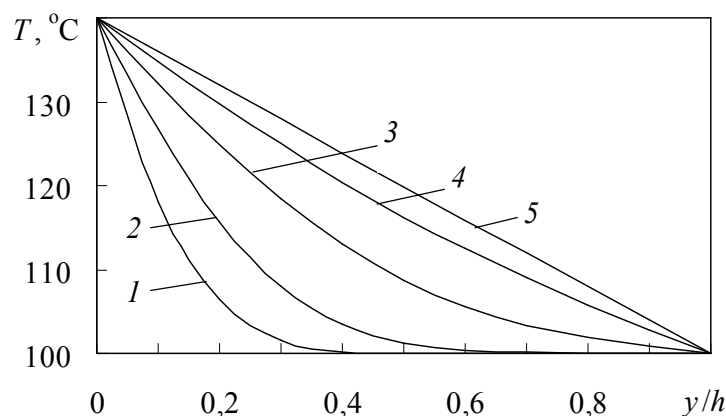


Рис. 7.2. Розподіл температури в полімері по ширині половини міжвалкового проміжку на відстані від центра міжвалкового проміжку:

1 – 0,133 м; 2 – 0,13 м; 3 – 0,125 м; 4 – 0,115 м; 5 – 0,08 м

З графіків, наведених на рис. 7.3, видно, що під час вищезазначеного режиму переробки та при  $T_0=80\text{ }^\circ\text{C}$  товщина шару розплав становить 0,205 мм, при  $T_0=100\text{ }^\circ\text{C}$  – 0,284 мм, а при  $T_0=120\text{ }^\circ\text{C}$  – 0,522 мм. При цьому зміна колової швидкості валків майже не впливає на товщину розплаву, оскільки, незважаючи на збільшення величини дисипації механічної енергії при підвищенні швидкості валків, тривалість перебування полімеру в міжвалковому проміжку зменшується.

Відповідні розрахунки були також зроблені при температурі поверхні валків  $T_B=150\text{ }^\circ\text{C}$ , швидкості обертання валків  $W_B=0,3\text{ м/с}$  і початковій температурі полімеру  $T_0=80\dots 120\text{ }^\circ\text{C}$ . У цьому разі товщина шару розплаву при температурі  $T_0$ , що дорівнювала 80, 100 і  $120\text{ }^\circ\text{C}$ , становить 0,319 мм, 0,428 мм і 0,682 мм відповідно.

Таким чином, можна зробити висновок, що при збільшенні температури валка на 7,1 % (зі 140 до  $150\text{ }^\circ\text{C}$ ) товщина шару розплаву збільшується на 30,7 % (з 0,522 до 0,682 мм), тому можна запропонувати конструкцію валка з регульованою (наприклад, за рахунок електрообігрівання) температурою завантажувальної ділянки вальців.

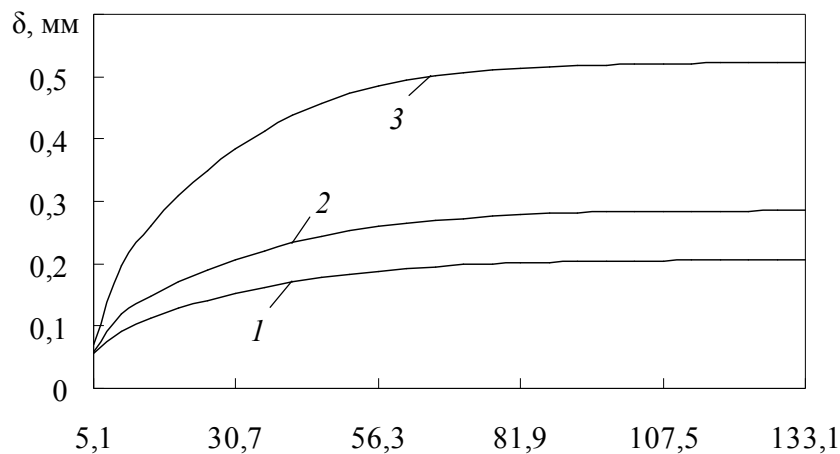


Рис. 7.3. Залежність товщини шару розплаву полімеру  $\delta$  від координати  $x$  при температурі  $T_0$ : 1 –  $80\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $120\text{ }^\circ\text{C}$

На рис. 7.4 наведено графік залежності масової густини теплового потоку дисипації  $q_{\text{дис}}$  від температури завантажуваного полімеру  $T_0$ , з якого видно, що зі збільшенням початкової температури матеріалу і температури валків масова густина теплового потоку дисипації зменшується, а з підвищенням швидкості обертання валків – збільшується.

До полімеру можна додавати різні домішки, забезпечуючи таким чином одержання термопластичних композиційних матеріалів, при цьому залежно від місця введення в полімер кожної з домішок (по довжині міжвалкового проміжку) можна регулювати тривалість дії на неї валків. Дослідження, про-

ведені на лабораторних вальцях  $\varnothing 200 \times 250$  мм (див. п. 6.2.3) показали можливість суміщення процесів плавлення, змішування та одержання напівфабрикату у вигляді безперервної стрічки наповненого композиційного матеріалу на одній машині.

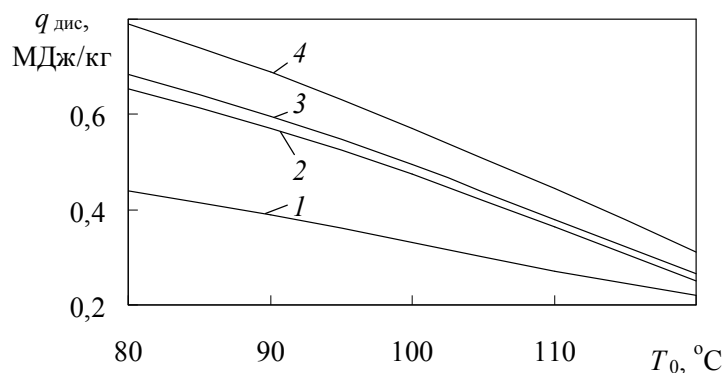


Рис. 7.4. Графік залежності масової густини теплового потоку дисипації від температури завантаження: 1 –  $W_B=0,3$  м/с,  $T_B=150$  °C; 2 –  $W_B=0,2$  м/с,  $T_B=140$  °C; 3 –  $W_B=0,3$  м/с,  $T_B=140$  °C; 4 –  $W_B=0,4$  м/с,  $T_B=140$  °C

Таким чином, результати теоретичних та експериментальних досліджень довели принципову можливість практичної реалізації процесу формування стрічки з термопластичних композиційних матеріалів на вальцях безперервної дії, що дає можливість застосовувати продуктивне валкове обладнання для утилізації полімервмісних промислових і побутових відходів. Зазначене технічне рішення також надає можливість регулювати тривалість перебування окремих компонентів композиції вибором місця їх завантаження в міжвалковий проміжок по його довжині [337].

За результатами досліджень було розроблено конструкцію вальців для утилізації полімерних відходів, захищену патентом України на корисну модель № 13230 [354].

**7.1.2.** Одним зі шляхів утилізації відходів на основі високомолекулярних сполук є їх перетворення на порошок і крихту, які могли би бути використані як в чистому вигляді для одержання невідповідальних або маловідповідальних виробів, так і для одержання композицій з іншими компонентами [202].

Незважаючи на значну кількість методів переробки зазначених відходів [26, 107], одним з найважливіших залишається механічне дроблення й подрібнення через найбільш повне збереження первісної структури і властивостей матеріалів, які містяться у відходах. Крім того, тверді тіла залежно від умов дроблення й подрібнення акумулюють від 8 до 30 % підведеної енергії [355]. Закумульована енергія значно активізує подрібнені частинки, що підвищує інтенсивність та ефективність багатьох процесів подальшої переробки цих частинок, наприклад, під час їх використання як наповнювачів ТпМ.

При цьому полімервмісні матеріали за своїми властивостями та механізмом руйнування істотно відрізняються від низькомолекулярних речовин, зокрема твердої мінеральної сировини, оскільки на відміну від останніх більшість полімерів та еластомерів мають пружні властивості. З метою заощадження енергії руйнування пружних тіл проводять як при низьких (криогенних) температурах, так і при підвищених (зазвичай за температури 80–150 °С).

Продукт, одержаний криогенним подрібненням, зазвичай має гладку поверхню, що сприяє задовільній сипкості і змішуваності під час його введення в одержувані композиції. Перевагами цього методу також є відсутність термічної деструкції продукту та пожежо- й вибухобезпечність процесу. Основні недоліки – значна вартість холодоагенту та низька питома поверхня продукту (рис. 7.5, а).

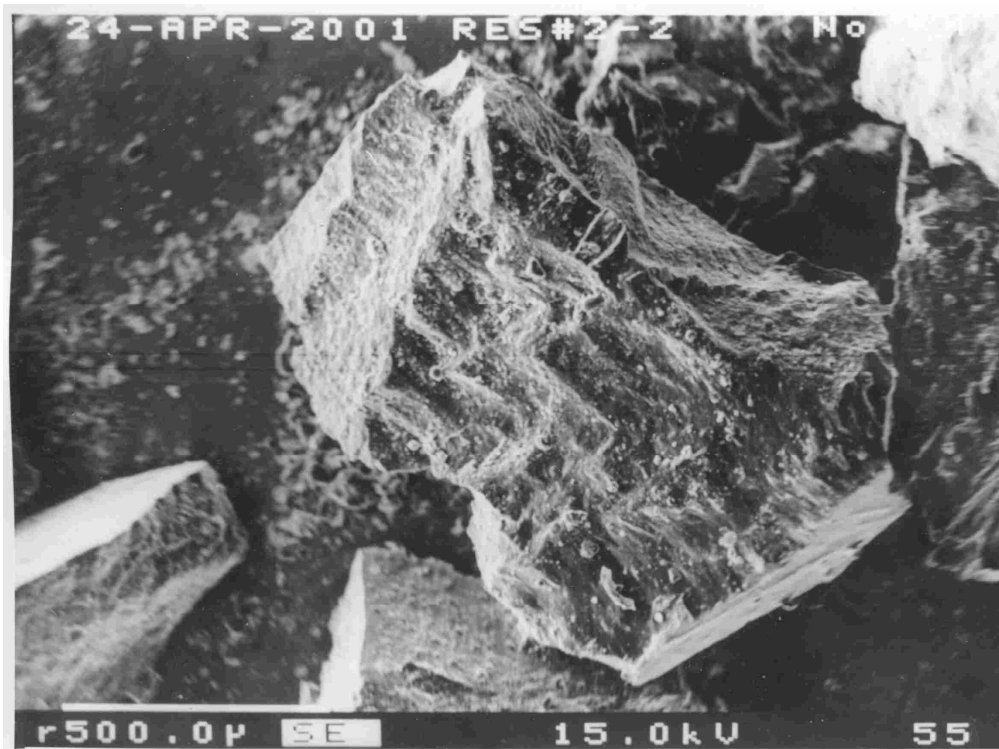
Одним з найбільш ефективних методів подрібнення при позитивній температурі є пружнодеформаційний метод [129, 134, 202, 356], за якого руйнування здійснюють стисканням з одночасним зсувом і стиранням.

Цей метод реалізують у роторних подрібнювачах зазвичай з циліндричним і рідше конічним обертовим робочим органом (ротором), розташованим в корпусі з невеликим проміжком [357].

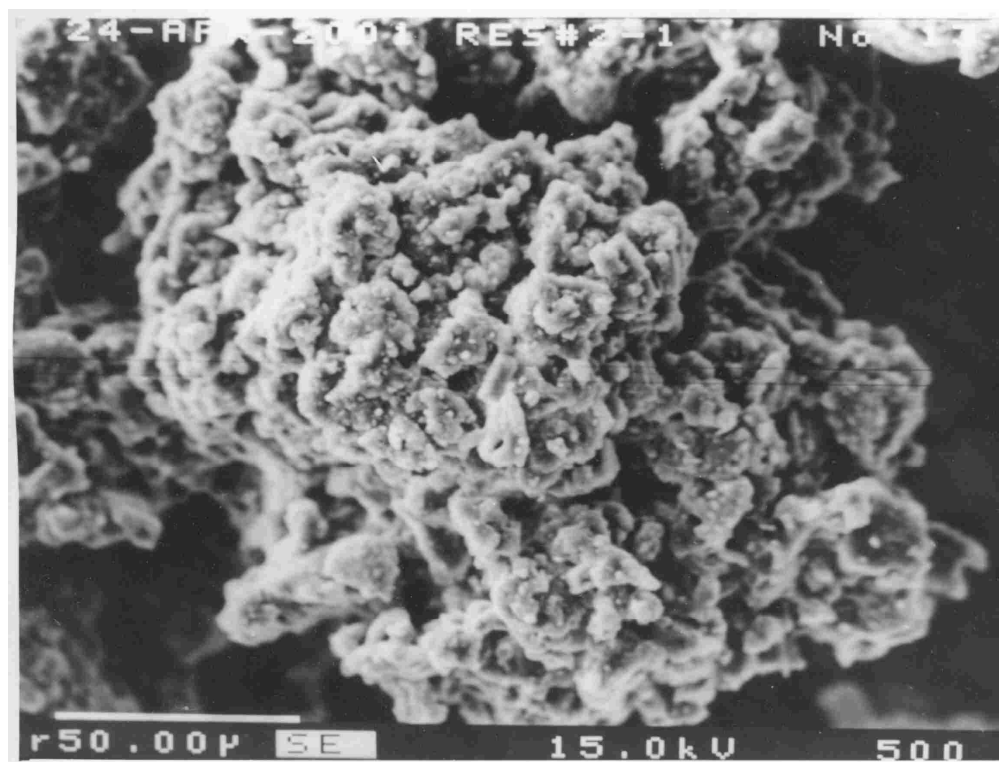
Робочі поверхні ротора й корпусу зазвичай споряджені рифлями. У цьому разі руйнування матеріалів здійснюють за рахунок стирання між виступами рифлів ротора й корпусу, зсуву й подальшого розривання (рідше розрізання) великих частинок, що потрапили у западини між рифлями ротора й корпусу або між іншими частинками. Ці процеси відбуваються в умовах значного стиску, створюваного нарізкою ротора, виконаною між місцем завантаження вихідного матеріалу й ділянкою подрібнення. Ротор і корпус подрібнювача зазвичай охолоджують (рис. 7.6). Перевага роторних подрібнювачів – задовільна продуктивність, широка номенклатура перероблюваних матеріалів, одержання продукту зі значною активованою питоною поверхнею (рис. 7.5, б), а недоліки – складність конструкції та експлуатації, можливість агломерування частинок, необхідність ретельного підбирання робочих режимів залежно від властивостей перероблюваного матеріалу.

Енергоємність процесу подрібнення гумовмісних відходів при цьому можна істотно зменшити за умови обробки подрібнюваних відходів розчинником каучуку, що входить до їх складу.

Одержана таким чином крихта може бути використана як наповнювач термопластичних композицій.



*a*



*б*

Рис. 7.5. Вигляд гумової крихти, одержаної кріогенним (*a*) і пружнодеформаційним (*б*) методами подрібнення

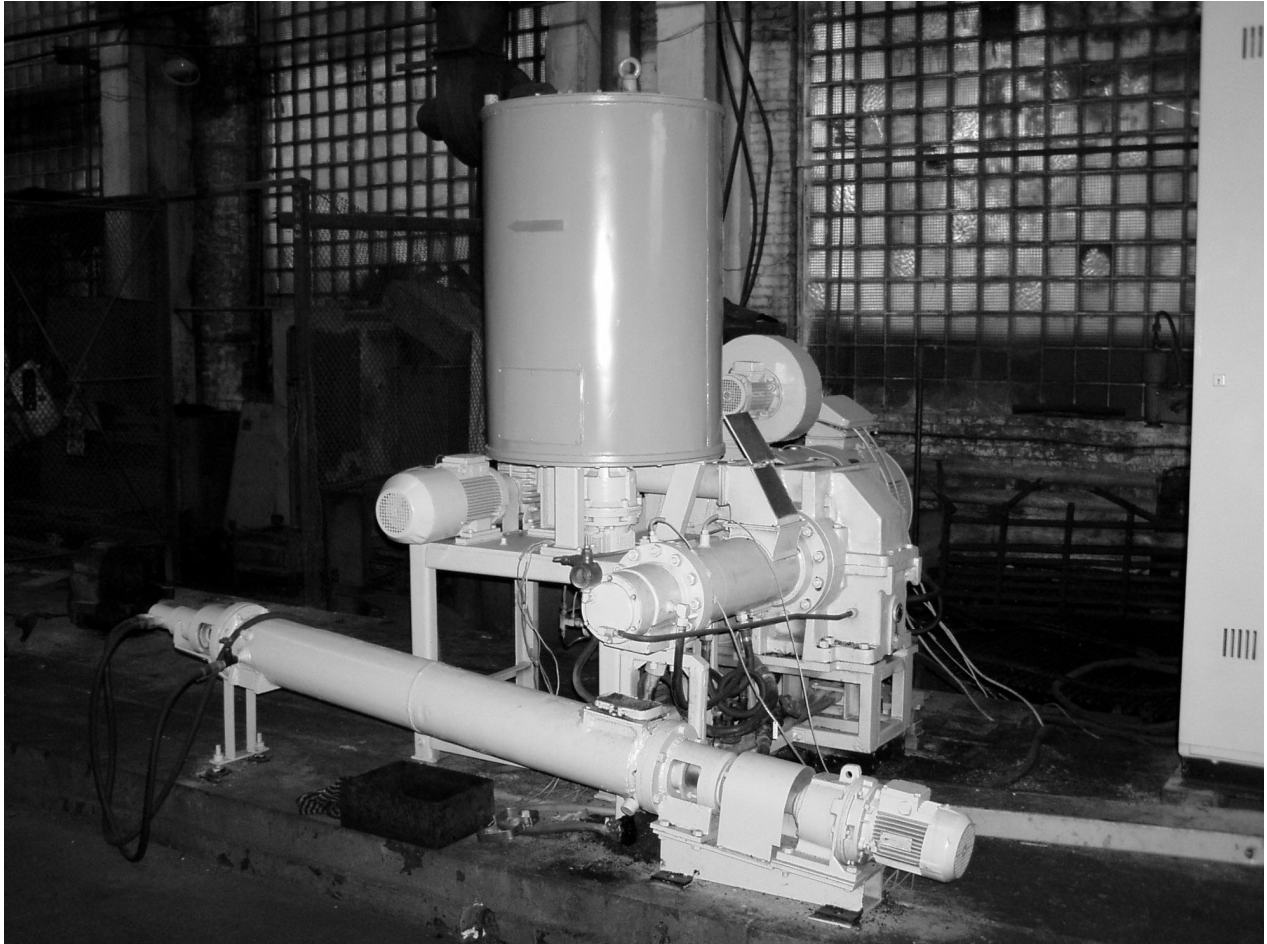


Рис. 7.6. Фотознімок черв'ячно-роторного диспергатор-екструдера ДЕКЧЕР-150 (індекс 514112), розробленого й виготовленого ВАТ «НВП „Більшовик”», м. Київ

За результатами досліджень були розроблені й виготовлені ВАТ «НВП „Більшовик”», м. Київ, ефективні черв'ячно-роторні диспергатор-екструдери ДЕКЧЕР-150 (індекс 514112, див. рис. 7.6) і ДЕКЧЕР-230 (індекс 514114), які експлуатуються в ДНДІ «Еластик» (м. Київ), НВФ «МПП „АМА»» (м. Біла Церква) та інших організаціях. Відповідні технічні рішення захищені патентами України на винаходи № 53728 і 54588 та корисні моделі № 1673 і 28974 [358–361].

**7.1.3.** Починаючи з кінця минулого століття в будівництві, транспортно-му машинобудуванні та інших галузях промисловості широкого поширення набули конструкційні, декоративні та оздоблювальні матеріали і вироби на основі термопластичних полімерів (зазвичай ПЕ та ПП, у тому числі і вторинних) і целюлозовмісних наповнювачів (деревні стружка й борошно, подрібнені макулатура, багат шарові й комбіновані матеріали тощо) [22, 108, 110, 122, 184, 362].

Традиційна технологія одержання продукції з таких матеріалів включає сортування відходів, їх подрібнення, мийку, класифікування, сушіння, підго-

товку розплаву полімеру, змішування компонентів композиції, формування виробу та їх охолодження [22, 110, 184].

У результаті проведених досліджень запропоновано більшість зазначених операцій суміщати в одній одиниці обладнання – черв'ячному екструдері.

У разі застосування одночерв'ячного екструдера вихідна полімерна сировина надходить на першу ділянку робочої частини черв'яка, де захоплюється його нарізкою і поступово плавиться. На другу ділянку черв'яка подають целюлозовмісний наповнювач, де він також захоплюється нарізкою черв'яка, доподрібнюється, розігрівається, внаслідок чого з нього видаляються залишки вологи і далі надходить на третю ділянку, куди крізь розплавопровід, обминаючи ділянку підготовки наповнювача, подають розплав полімеру, що під тиском рівномірно розподіляється між частинками наповнювача. На останній, четвертій, ділянці відбувається змішування композиції, після чого здійснюється її формування.

У разі застосування двочерв'ячного екструдера операція підготовки розплаву відбувається в окремому компактному дисковому або одночерв'ячному екструдері (це істотно зменшує довжину екструдера), решта операцій аналогічна описаним вище.

Така реалізація технології істотно зменшує енергоємність одержуваної продукції, оскільки остаточне подрібнення й сушіння наповнювача здійснюються безпосередньо в черв'ячному екструдері без застосування додаткового обладнання. Крім того, теплота, отримана наповнювачем під час руху в екструдері, зменшує ступінь охолодження розплаву полімеру при їх взаємному контакті.

За результатами досліджень були розроблені й виготовлені ВАТ «НВП „Більшовик”», м. Київ, черв'ячний розплавлювач (індекс 593892), двочерв'ячний прес (індекс 513141), каландр гладильний (індекс 593920, вузол 593920-02.00.000), рольганг (індекс 593920, вузол 593920-03.00.000) та пристрій охолодний (індекс 593892, вузол 593892-08.00.000) лінії виробництва деревнополімерних листів ЛДПЛ–1200 (індекс 101566), а також відповідне обладнання лінії для одержання листів і погонних виробів з деревно- і паперонаповнених полімерів (індекс 591171). Зазначені лінії експлуатуються у ВФ «Композит» Житомирського облпостача (Україна), ЗАТ «Средневожский завод полимерных изделий», м. Тольятті (Росія) та інших організаціях. Відповідні технічні рішення захищені патентами України на винаходи № 22568, 31011, 31919, 40481, 42546 і 42573 та корисну модель № 1241 [350, 351, 363–367].

**7.1.4.** Одним з найбільш поширених способів термостабілізації поверхонь робочих органів технологічного обладнання є застосування текучих теплоносіїв: рідин (води, олив) і водяної пари. З метою забезпечення циркуляції таких теплоносіїв в обертових робочих органах (у першу чергу черв'яках, валках, роторах екструзійного, валкового, змішувального обладнання) викорис-

товують спеціальні вузли, основним елементом яких є розміщена в порожнині обертового органа металева труба для подавання теплоносія (вибір матеріалу здійснюється з міркувань міцності й жорсткості цього елемента). Така труба має незначний термічний опір, що призводить до перегріву теплоносія, що надходить до робочого органу, у випадку його охолодження та переохолодження у випадку нагрівання. Крім того, металеві поверхні труби сприяють утворенню на них відкладень, що спричинює додаткові витрати енергії.

У результаті проведених досліджень запропоновано щонайменше на одну бокову поверхню металевої труби наносити полімерне покриття, що забезпечує збільшення термічного опору стінки труби, зменшення тертя між теплоносієм і поверхнею труби, а також запобігає утворенню відкладень на поверхнях труби, що сприяє заощадженню теплової та електричної енергії, а також збільшенню терміну служби як самої труби, так і вузла в цілому.

Так, наприклад, нанесення на трубу  $\varnothing 57 \times 3,5$  мм і довжиною 2000 мм відповідного вузла валка  $\varnothing 850 \times 2400$  мм каландра полімерного покриття з політетрафторетилену завтовшки 0,5 мм забезпечує заощадження енергії майже 1,8 кВт.

За результатами досліджень був розроблений ВАТ «НВП „Більшовик”», м. Київ, вузол підведення теплоносія до обертового порожнистого органа обладнання для переробки полімерних і гумових матеріалів (індекс замовлення 514113). Відповідне технічне рішення захищене патентом України на корисну модель № 1672 [368].

## **7.2. Способи одержання та переробки термопластичних матеріалів**

**7.2.1.** Під час приготування наповнювача подрібненням твердих відходів, особливо органічних (наприклад, полімери, гума, природна та штучна шкіра та ін.), температура одержуваних подрібнених частинок підвищується, іноді істотно, порівняно з температурою оточуючого середовища. Так, після подрібнення гуми або природної шкіри їх температура досягає  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  і більше. Зазвичай подрібнений матеріал після цього охолоджують, фасують у тару й відправляють на склад або споживачеві. У разі подальшого використання як компонента ТпМ після певного періоду часу його подають на установку приготування композиції з подальшим формуванням з них виробів, напівфабрикатів тощо. Такі композиції формують за температури не меншої від температури плавлення полімеру, що передбачає значні витрати енергії на підігрівання всіх компонентів суміші, у тому числі й наповнювача. У той же час використання пропонованого винаходу, відповідно до якого нагрітий у результаті подрібнення наповнювач або матеріал матриці одержуваного ТпМ при контакті з іншими компонентами композиції передає їм певну частку теплоти, зменшує енергоємність одержання композиції порівняно з традиційною технологією.

Пропонований спосіб було застосовано під час утилізації поліетиленової пакувальної плівки додаванням до первинного поліетилену низької густини марки 15802-020. Після подрібнення полімерної плівки одержані частинки не охолоджували, а подавали безпосередньо в черв'ячний екструдер, у який також надходили гранули первинного полімеру. При продуктивності екструдера по одержуваній композиції 180 кг/год і масовій частці 50 % розігрітого до 80 °С вторинного поліетилену ці заходи дозволили заощадити майже 3 кВт.

Відповідне технічне рішення захищене патентом України на винахід № 55829 [369] і впроваджене в ТОВ «Ековторполімер» і ПП «НВП „Укрсклопром”» (м. Київ).

**7.2.2.** Переробка ТпМ внаслідок їх високої в'язкості супроводжується значними тепловиділеннями. З метою запобігання перегріву матеріалу й можливої його термодеструкції елементи технологічного обладнання інтенсивно охолоджують. Охолоджують не тільки робочі органи обладнання (корпуси і черв'яки черв'ячних екструдерів, ротори і камери змішувачів, валки валкових машин та ін.), а і привідні електродвигуни, потужність яких досягає десятків і сотень кіловатів.

Зазначене охолодження здійснюють водою або повітрям. При цьому, якщо воду зазвичай застосовують циркуляційну, а не проточну, то повітря для охолодження беруть безпосередньо з атмосфери і після використання скидають у нього же. Таким чином разом з відпрацьованим повітрям втрачається і певна частка теплоти.

Нами запропоновано спосіб переробки термопластичних полімерів і матеріалів на їх основі, під час реалізації якого сировину завантажують у технологічне обладнання, пластично її деформують і потім формують, при цьому перед завантажуванням у технологічне обладнання сировину або щонайменше один з її компонентів обробляють підігрітим повітрям, одержаним після охолодження одного або декількох елементів обладнання.

Завдяки зазначеному технічному рішенню підігріте повітря застосовують для попередньої обробки сировини в цілому або одного чи кількох її компонентів. Це дає можливість попередньо підігріти сировину і зменшити витрати теплоти, необхідні для розплавлення полімеру, його перемішування або змішування компонентів суміші й подальшого одержання виробів, напівфабрикатів, гранул тощо, порівняно з традиційною технологією, яка передбачає підігрівання сировини в технологічному обладнанні від температури навколишнього середовища до температури переробки й формування. Крім того, попередня обробка компонентів сировини приготовлюваної й перероблюваної композиції поліпшує її властивості: наприклад, попереднє підігрівання деревної тирси під час переробки деревнополімерних композицій сприяє видаленню з неї надлишкової вологи, а отже одержанню виробів високої якості.

Так, під час одержання у двочерв'ячному екструдері ЧВП2Сп90×15 лінії ЛДПЛ–1000 (виробник ВАТ «НВП „Більшовик”», індекс 101566) деревнополімерної (на основі поліпропілену) композиції й формування з неї листів деревну тирсу обробляють повітрям, одержаним після охолодження приводного електродвигуна й корпусу екструдера, після чого вологість тирси зменшується у два–три рази. Це дає можливість підвищити якість одержуваної продукції, зменшити довжину циліндра черв'ячного екструдера на 180 мм і споживану потужність до 8 %.

Під час одержання на змішувально-підігрівальних вальцях періодичної дії з валками  $\varnothing 660 \times 2100$  мм (виробник ВАТ «НВП „Більшовик”», індекс 502062) гумополімерної композиції (на основі поліетилену низької густини марки 15802-020) компоненти приготовлюваної композиції (гранули полімеру й гумову крихту, одержану після подрібнення спрацьованих автомобільних шин) обробляють протягом 12 хвилин повітрям, одержаним після охолодження приводного електродвигуна, після чого оброблені таким чином компоненти завантажують на вальці в наступному циклі вальцювання, що дає можливість зменшити витрати енергії безпосередньо під час приготування композиції.

Запропоноване технічне рішення захищене патентом України на корисну модель № 24319 [370] і впроваджене в Товаристві з обмеженою відповідальністю «Ізофол» (м. Київ), однією зі спеціалізацій якого є виробництво рукавної полімерної пакувальної плівки загального призначення із вторинної сировини (вторинного ПЕНТ, вторинного ПЕВТ, їх суміші та ін. (рис. 7.7)).

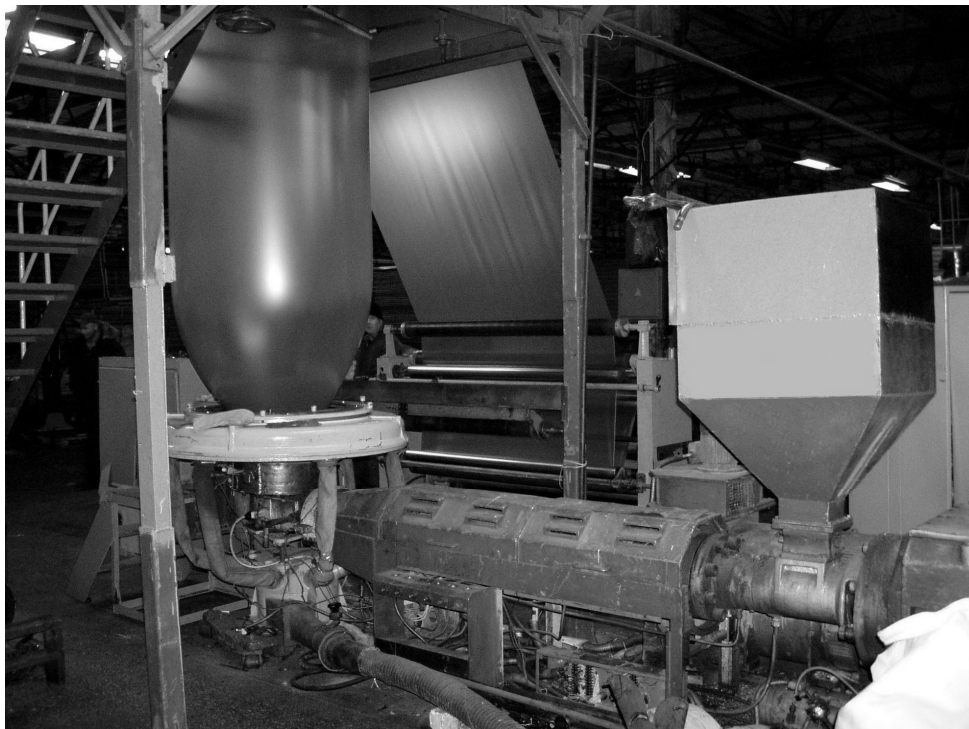


Рис. 7.7. Фотознімок лінії УРП 1500-3М на базі черв'ячного екструдера  $\varnothing 90 \times 30$ , впровадженої у ТОВ «Ізофол» (м. Київ)

### 7.3. Обладнання для термообробки безперервних і погонних матеріалів і виробів

Оскільки полімери й композиційні матеріали на їх основі зазвичай характеризуються низькою теплопровідністю, а їх охолодження часто здійснюють водою, при якому досягають значних значень коефіцієнта тепловіддачі, то процес зміни температури охолоджуваного тіла визначається його фізичними властивостями й розмірами, тобто має місце так звана «внутрішня» задача.

При цьому температура поверхні охолоджуваного тіла майже одразу після контакту з оточуючою водою стає рівною її температурі, а градієнт температури в тілі по його товщині або радіусу стає досить значним, що за умови істотної залежності фізичних властивостей (зокрема коефіцієнтів лінійного та об'ємного розширення) однорідного матеріалу або істотної різниці цих властивостей для різних компонентів композиційного матеріалу від температури може призвести до утворення зовнішніх і внутрішніх дефектів аж до порушення суцільності матеріалу.

З огляду на зазначене для забезпечення належних умов охолодження (створення «м'якого», а не «ударного» режиму охолодження) таких матеріалів і виробів, наприклад, електричних проводів і кабелів після накладання на металеве осердя полімерної ізоляції, їх обробляють декількома послідовними потоками води з температурою, що поступово зменшується. При цьому загальна довжина ванни охолодження досягає десятків метрів.

Розглянемо охолодження електричного кабелю діаметром 10 мм з ПВХ ізоляцією завтовшки 3,5 мм і мідною жилою діаметром 3 мм, який рухається зі швидкістю 0,3 м/с у тризонній ванні охолодження лінії типу ЛЭК-63 виробництва ВАТ «НВП „Більшовик”» (м. Київ), і проаналізуємо різні умови охолодження одержуваного виробу відповідно до методик, наведених у працях [330, 331]. Довжина першої зони становить 3 м, температура води в ній 90 °С, другої – відповідно 3 м і 60 °С, а третьої – 24 м (вісім секцій по 3 м кожна) і 20 °С. Таким чином кабель, температура якого на вході у ванну становить 170 °С, проходить усі три зони ванни (загальна довжина 30 м) за 100 с.

При цьому необхідно зауважити, що інтенсивність охолодження у водяній ванні буде дещо меншою від теоретично розрахованої згідно з відомими залежностями [276] у зв'язку з тим, що охолоджуваний виріб, рухаючись у водяній ванні, 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, внаслідок чого, як показують теоретичні та експериментальні дослідження [330, 371], коефіцієнт тепловіддачі від охолоджуваного виробу до води у ванні зменшується по її довжині майже на третину, а саме від 700–1000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) до 500–700 Вт/(м<sup>2</sup>·К) [371]. Зазначене зменшення  $\alpha$  по довжині кожної із зон було

враховано у проведених розрахунках.

На рис. 7.8 наведено залежність зміни температури виробу по довжині охолодної ванни із зазначеними параметрами (базовий варіант), а на рис. 7.9 – розподіл температури по радіусу кабелю і довжині ванни.

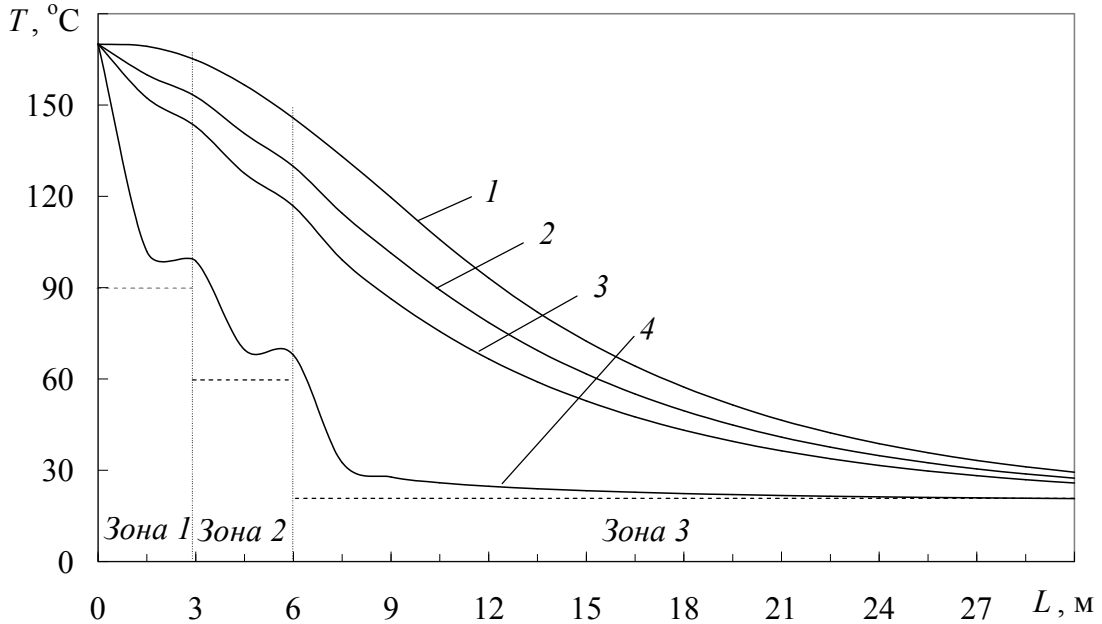


Рис. 7.8. Зміна температури по довжині ванни охолодження (базовий варіант): 1 – поверхня жили; 2 – середня кабелю; 3 – середня ізоляції; 4 – поверхня ізоляції

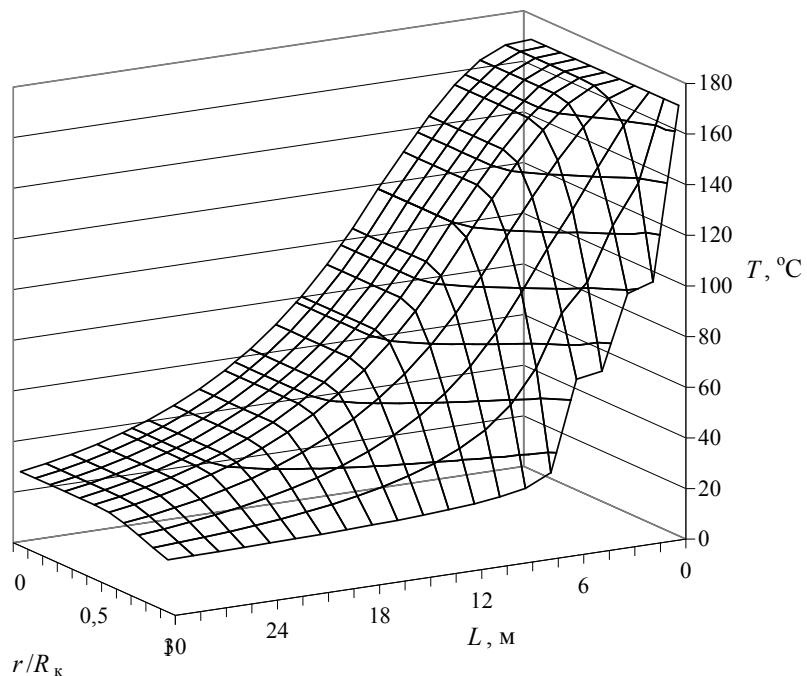


Рис. 7.9. Зміна температури кабелю по його радіусу  $r$  і довжині ванни  $L$  охолодження (базовий варіант)

Оскільки значення коефіцієнта температуропровідності для міді на три порядки більше за відповідне значення для ПВХ, температура мідної жили майже не змінюється по її діаметру і майже дорівнює температурі в місці її контакту з ізоляцією. Таким чином, як видно з рис. 7.8, перепад температури по товщині ізоляції досягає 66 °С і 87 °С в середній частині першої і другої зон і 100 °С на початку третьої зони (середній градієнт температури досягає майже 30 °С/мм).

На рис. 7.10 і 7.11 наведено залежності, аналогічні залежностям, представленим на рис. 7.8 і 7.9, але для випадку, коли третя зона ванни розділена на п'ять послідовних ділянок завдовжки 6, 3, 6, 3 і 6 м, при цьому на триметрових ділянках охолодження здійснюють повітрям в умовах вільної конвекції, а на рис. 7.12 і 7.13 – другий варіант комбінованого водно-повітряного охолодження в третій зоні ванни, розділеній на чотири послідовні ділянки завдовжки 3, 6, 3 і 12 м, при цьому на триметрових ділянках охолодження також здійснюють повітрям в умовах вільної конвекції (такі умови комбінованого охолодження можливо реалізувати перекриттям подачі води у відповідні триметрові секції третьої зони ванни).

Аналізуючи рис. 7.8–7.13, можна зробити висновок, що чергування в третій зоні охолодження водяних і повітряних ділянок не лише зменшує градієнт температури по товщині виробу (а отже і ймовірність виникнення дефектів у виробі), а і зменшує в цій зоні витрату води на 25 %. Середня температура кабелю на виході з охолодної ванни для трьох наведених прикладів майже однакова і відповідно становить 27,4; 29,6 і 30,5 °С, але при цьому найдоцільнішим є другий варіант комбінованого охолодження (див. рис. 7.12, 7.13), оскільки він крім заощадження води забезпечує і найменший градієнт температури по радіусу виробу [372].

Експериментальні дослідження процесу одержання таких безперервних матеріалів і виробів як електричні проводи, кабелі, труби, листи та погонні профілі в лабораторних умовах і в умовах промислового виробництва підтверджують наведені розрахунки.

Технічні рішення, які стосуються пристроїв для реалізації комбінованого водно-повітряного охолодження безперервних ТпМ і виробів з них, захищені авторськими свідоцтвами СРСР № 1722852 і 1735036 [373, 374] та патентами України на корисні моделі № 1324 і 6595 [375, 376] і впроваджені в НВП «Пластотехніка» (м. Київ, рис. 7.14).

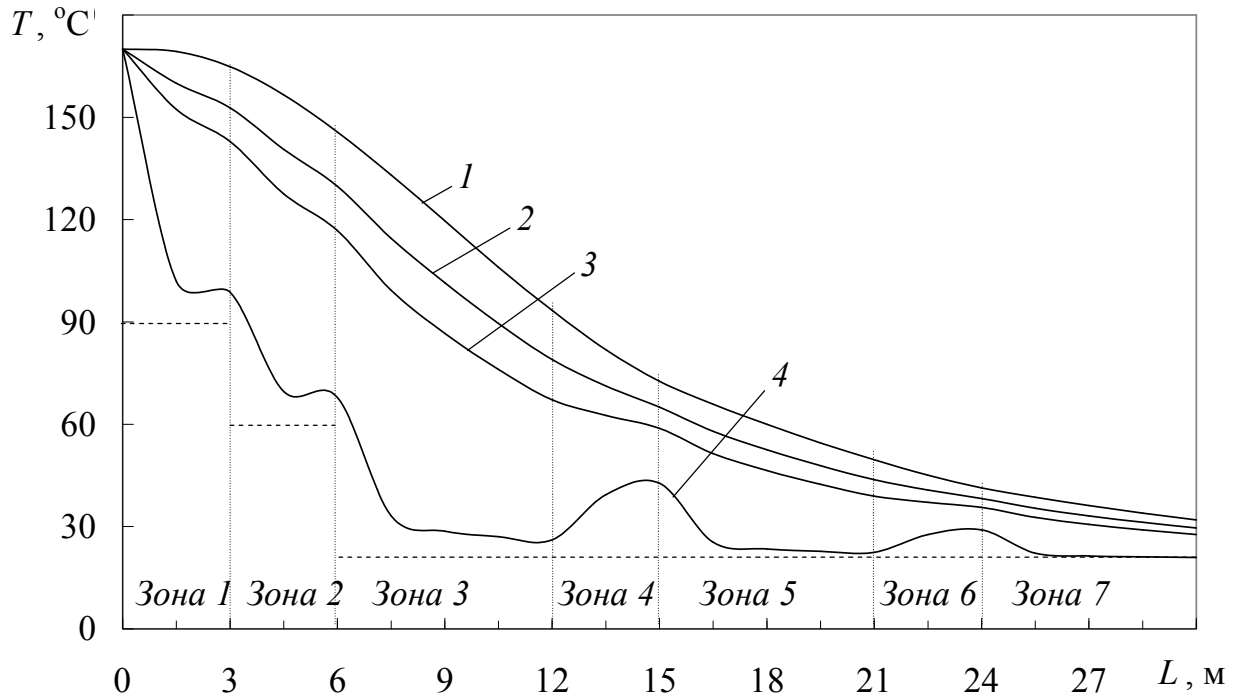


Рис. 7.10. Зміна температури по довжині ванни охолодження (комбіноване водно-повітряне охолодження в третій зоні ванни, перший варіант):  
 1 – поверхня жили; 2 – середня кабелю; 3 – середня ізоляції; 4 – поверхня ізоляції

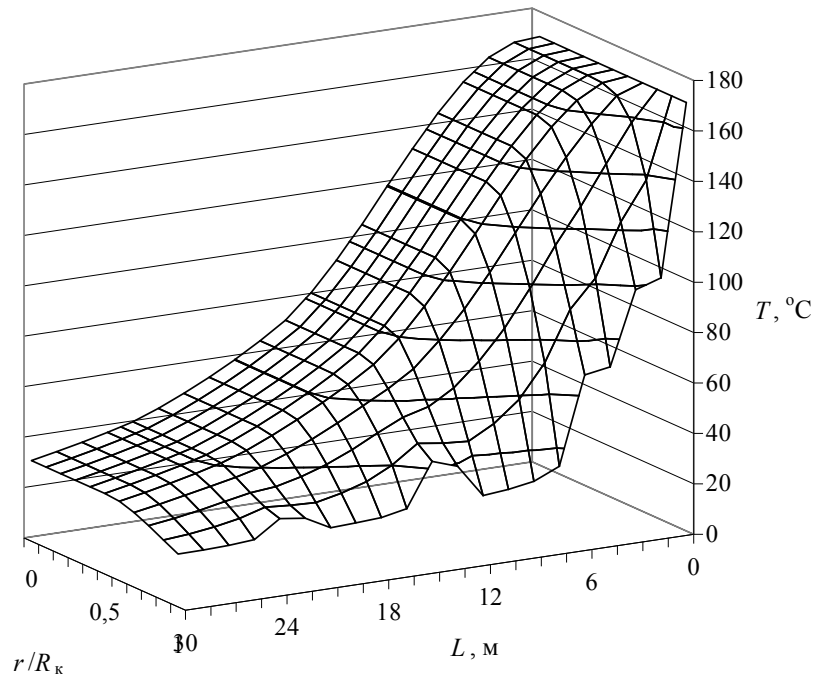


Рис. 7.11. Зміна температури кабелю по його радіусу  $r$  і довжині ванни  $L$  охолодження (водно-повітряне охолодження в третій зоні ванни, перший варіант)

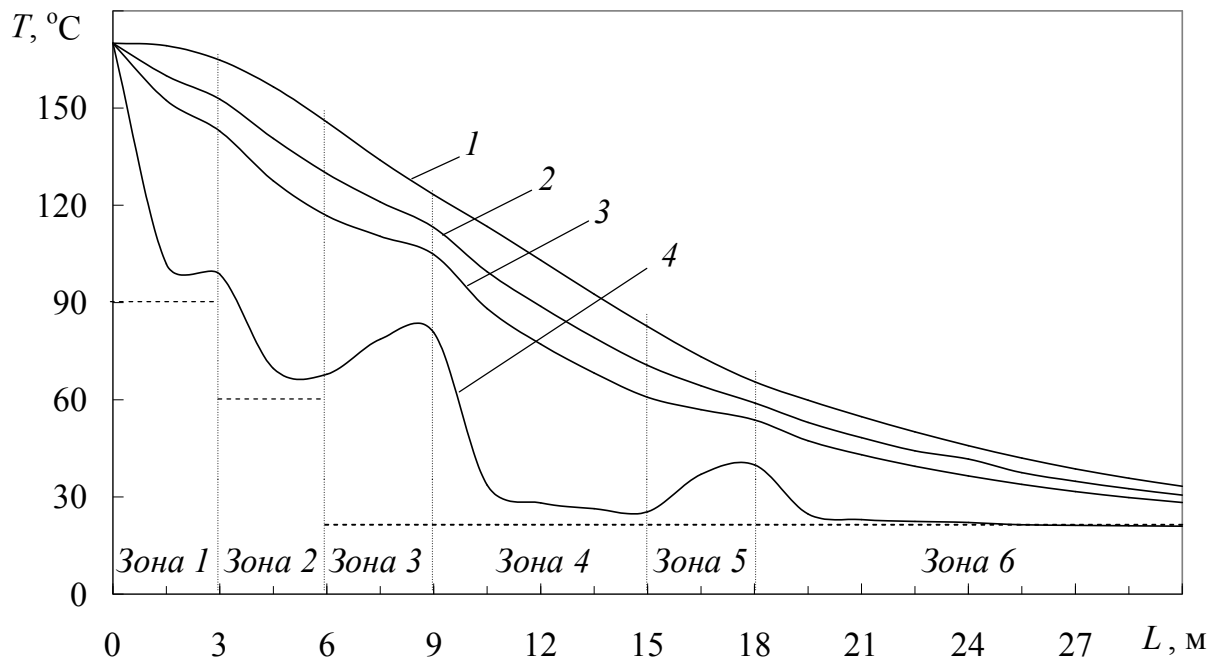


Рис. 7.12. Зміна температури по довжині ванни охолодження (комбіноване водно-повітряне охолодження в третій зоні ванни, другий варіант): 1 – поверхня жили; 2 – середня кабелю; 3 – середня ізоляції; 4 – поверхня ізоляції

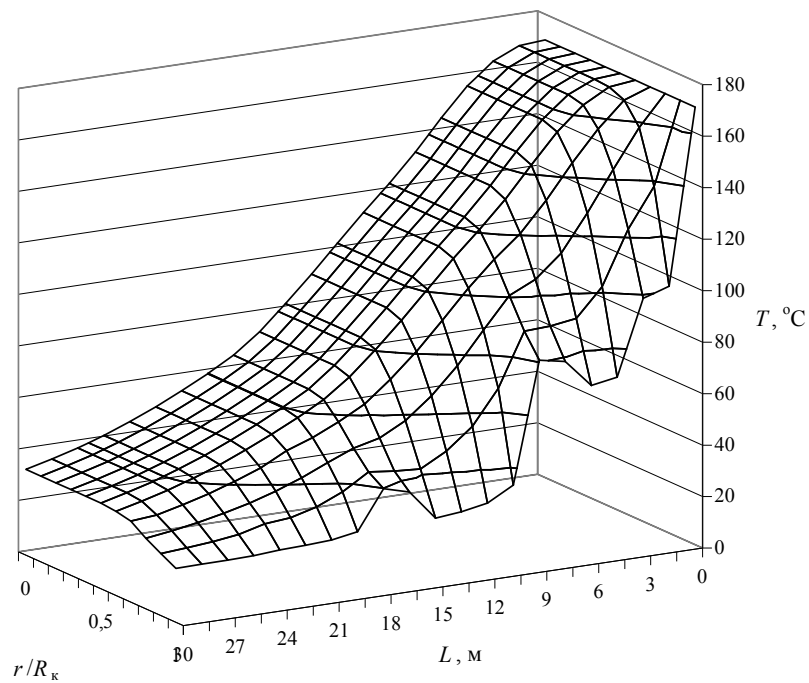


Рис. 7.13. Зміна температури кабелю по його радіусу  $r$  і довжині ванни  $L$  охолодження (водно-повітряне охолодження в третій зоні ванни, другий варіант)

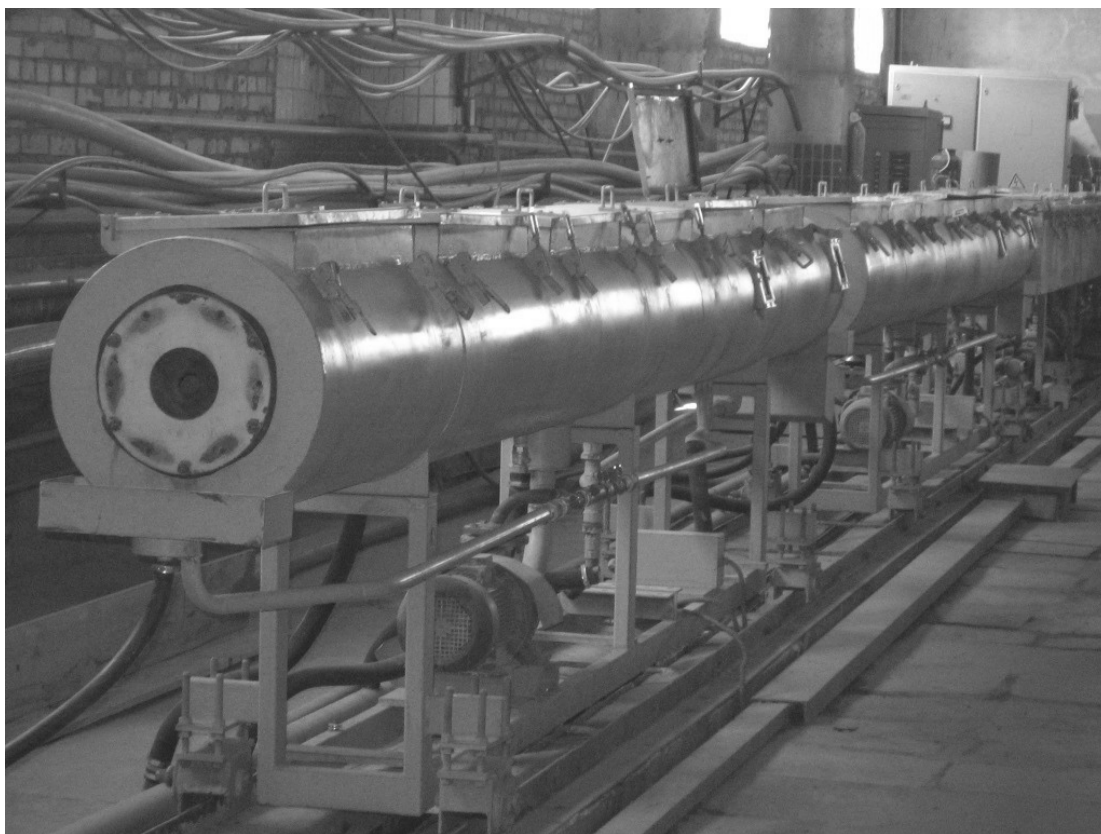


Рис. 7.14. Фотознімок ванни охолодження технологічної лінії виготовлення полімерних труб, впровадженої у НВП «Пластотехніка» (м. Київ)

#### **7.4. Висновки**

Відповідно до проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Теоретично обґрунтовано і доведено на практиці можливість утилізації полімерних відходів безперервним вальцюванням з одержанням стрічки з ТпМ. Розроблено відповідну конструкцію вальців для утилізації полімерних відходів, яку захищено патентом України на корисну модель № 13230.

2. Розроблено та впроваджено диспергатор-екструдери черв'ячно-роторні ДЕКЧЕР-150 (індекс 514112) і ДЕКЧЕР-230 (індекс 514114), виготовлені ВАТ «НВП „Більшовик”», м. Київ, для утилізації відходів на основі високомолекулярних сполук перетворенням їх на високоякісні порошок і крихту, які можуть бути використані як в чистому вигляді, так і для одержання композицій з іншими компонентами. Відповідні технічні рішення захищено патентами України на винаходи № 53728 і 54588 та патентами України на корисні моделі № 1673 і 28974 та експлуатуються в ДНДІ «Еластик» (м. Київ), НВФ «МПП „АМА»» (м. Біла Церква) та інших організаціях.

3. Розроблено та впроваджено енергоресурсоефективні технологічні лінії та екструзійне обладнання для виробництва матеріалів і виробів на основі

термопластичного полімеру й целюлозовмісних наповнювачів: черв'ячний розплавлювач (індекс 593892), двочерв'ячний прес (індекс 513141) лінії для виробництва деревнополімерних листів ЛДПЛ-1200 (індекс 101566), лінія для одержання листів і погонних виробів з деревно- і паперонаповнених полімерів (індекс 591171), що випускає ВАТ «НВП „Більшовик”», м. Київ. Технічні рішення захищено патентами України на винаходи № 22568, 31011, 40481, 42546 і 42573 та корисну модель № 1241 та експлуатуються на підприємствах України та Росії (ВФ «Композит» Житомирського облпостача, ЗАТ «Средневожский завод полимерных изделий», м. Тольятті та ін.).

4. Розроблено та впроваджено енергоефективний спосіб одержання ТпМ із застосуванням щонайменше одного з його компонентів у вигляді подрібнених відходів. Відповідне технічне рішення захищено патентом України на винахід № 55829 і впроваджено в ТОВ «Ековторполімер» і ПП «НВП „Укрсклопром”» (м. Київ).

5. Теоретично обґрунтовано, розроблено та впроваджено доцільність комбінованого водно-повітряного охолодження безперервних ТпМ і виробів з них. Розроблено технічні рішення для реалізації зазначеного способу, що забезпечує «м'які» умови охолодження та істотно зменшує ймовірність утворення механічних дефектів в одержуваній продукції. Відповідні технічні рішення захищено авторським свідоцтвом СРСР № 1735036 і патентом України на корисну модель № 1324 і впроваджено в НВП «Пластотехніка» (м. Київ).

6. Розроблено та впроваджено енергоефективний спосіб переробки термопластичних полімерів і матеріалів на їх основі. Під час реалізації цього способу сировину завантажують у технологічне обладнання, пластично її деформують і потім формують, при цьому перед завантаженням у технологічне обладнання сировину або щонайменше один з її компонентів обробляють підігрітим повітрям, одержаним після охолодження одного або декількох елементів обладнання. Відповідне технічне рішення захищено патентом України на корисну модель № 24319 і впроваджено в ТОВ «Ізофол» (м. Київ).

Основні наукові результати розділу 7 опубліковано в працях [39, 130, 261, 262, 264, 266, 267, 337, 349, 350, 354, 357–361, 363–370, 372–378].

## ВИСНОВКИ

Головний науковий результат монографії – вирішення важливої науково-технічної проблеми створення наукових засад розробки та вдосконалення обладнання та процесів комплексної переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини, що забезпечує можливість визначення раціональних конструктивних параметрів обладнання та режимів його роботи, а отже – заощадження енергетичних і матеріальних ресурсів та зменшення забруднення навколишнього середовища.

1. Установлено, що існуючі моделі та методики розрахунку обладнання та процесів переробки ТпМ стосуються переважно первинних полімерів і не забезпечують можливості ефективно розробки та вдосконалення обладнання та процесів для комплексної переробки ТпМ з використанням вторинної сировини, властивості яких визначаються не лише природою компонентів та кількісним і якісним складом, а й різними формами і ступенями деструкції, які залежать від умов попередньої переробки, експлуатації та зберігання цих матеріалів.

2. Виконано класифікацію методів утилізації полімерних відходів, класифікацію ТпМ, а також обладнання для їх переробки. Удосконалено узагальнену математичну модель процесів переробки термопластів, яку поширено на новий клас матеріалів – ТпМ з використанням вторинної сировини і яка враховує дисипативні джерела енергії, джерела енергії, пов'язані з перетвореннями в об'ємі маси, реальні граничні умови на поверхні об'єму перероблюваного ТпМ, а також залежність технологічних властивостей перероблюваного матеріалу від його температури, якісного й кількісного складу.

3. Розроблено узагальнені алгоритми розрахунку технологічної лінії для безперервної переробки ТпМ з використанням вторинної сировини та її основного обладнання: роторних змішувачів, вальців, каландрів, екструдерів та пристроїв для термообробки ТпМ і виробів з них.

4. Розроблено узагальнену математичну модель процесу черв'ячної екструзії ТпМ з використанням вторинної сировини, яка враховує дійсні геометричні, швидкісні й температурні параметри робочих органів, склад перероблюваних ТпМ, а також розглядає процес у системі координат, що рухається разом з виділеним для аналізу об'ємом, обмеженим одним витком нарізки черв'яка. Це дозволило досліджувати процес як нестационарну двовимірну задачу.

Показано, що застосування традиційної плоскопаралельної моделі черв'ячного екструдера може призвести до істотних похибок під час дослідження процесу переробки ТпМ з використанням вторинної сировини.

5. На основі узагальненої математичної моделі черв'ячної екструзії розроблено математичні моделі та алгоритми розрахунку двочерв'ячних екструдерів з одно- і різноспрямованим обертанням черв'яків, уточнено методику визначення дисипативних джерел енергії, а також джерел енергії, пов'язаних з

перетвореннями в об'ємі маси.

Визначено та досліджено вплив параметрів екструдера на енергосилові параметри процесу переробки. Показано, що з відхиленням поведінки перероблюваного матеріалу від ньютонівської моделі в робочому каналі екструдера необхідно використовувати змішувальні елементи. Також показано, що температурні поля в об'ємі перероблюваного матеріалу визначаються в першу чергу інтенсивністю дисипації енергії в певних точках об'єму.

6. Розроблено математичні моделі роторного змішувача для неньютонівської і ньютонівської моделей перероблюваних ТпМ, у яких враховано вплив на процес переробки як серпоподібних проміжків, утворюваних передніми поверхнями роторів і стінкою змішувальною камери, так і мінімальних проміжків, утворюваних гребенями роторів і стінкою змішувальною камери. Удосконалено методику визначення тривалості приготування ТпМ у роторних змішувачах.

Досліджено вплив геометричних і швидкісних параметрів змішувача на енергосилові характеристики процесу змішування. Показано, що ефективна експлуатація роторного змішувача можлива до досягнення мінімальним проміжком величини 4,5...5,5 мм, після чого робочі органи необхідно відновлювати.

7. Удосконалено математичну модель неізотермічного процесу переробки ТпМ ньютонівської моделі в міжвалковому проміжку валкових машин у широкому діапазоні співвідношення швидкостей валків, а також методику визначення тривалості безперервного і періодичного вальцювання. Досліджено вплив умов переробки на температурні поля ТпМ певного складу в міжвалковому проміжку. Показано, що зі зменшенням коефіцієнта фрикції локальна температура ТпМ у міжвалковому проміжку може зрости на 25–30 °С.

8. Розроблено математичну модель неізотермічного процесу переробки ТпМ ньютонівської моделі в міжвалковому проміжку гладильного каландра. Отримано аналітичні залежності для визначення енергосилових параметрів процесу та досліджено залежність температури ТпМ від параметрів переробки.

Встановлено, що зменшення температури і швидкості валків, а також товщини листової заготовки може призвести до передчасного твердіння матеріалу по всій його товщині, а отже під час калібрування листів на гладильному каландрі необхідно враховувати співвідношення цих величин.

9. Удосконалено математичні моделі пристроїв термообробки ТпМ залежно від їх форми і структури. Досліджено вплив умов термообробки на ефективність її проведення. Доведена доцільність комбінованого рідинно-повітряного охолодження безперервних ТпМ і виробів з них. Аналіз процесу охолодження електричного кабелю з полімерною ізоляцією дозволив зробити висновок, що чергування в певній зоні охолодження водяних і повітряних ділянок не лише знижує градієнт температури по радіусу кабелю (а отже і ймовірність виникнення дефектів у виробі), а і зменшує в цій зоні витрату води на 25 %.

10. Розроблено математичні моделі процесів охолодження гранул і стренг під час гранулювання ТпМ, які враховують залежність теплофізичних властивостей ТпМ від температури і не передбачають визначення коефіцієнтів тепловіддачі від поверхні гранул і стренг до охолодного середовища. Проведено числові дослідження процесу охолодження гранул ТпМ у потоці повітря з метою визначення впливу турбулентності потоку на швидкість охолодження. Установлено, що зазначений вплив більш значний у початковий період і зі зменшенням температури поверхні гранули також зменшується. Визначено, що під час охолодження гранул у воді процес охолодження обмежується швидкістю підведення теплоти з об'єму гранули до її поверхні, а тому турбулізація потоку мало впливає на процес.

Установлено, що під час охолодження стренг у ванні товщина гідродинамічного примежового шару істотно перевищує товщину теплового примежового шару, а отже процес охолодження наближається до випадку, коли рідина рухається разом зі стренгою. Тому для інженерних розрахунків доцільно використовувати алгоритм розрахунку процесу охолодження стренг у потоці нерухомої відносно них рідини, а для інтенсифікації процесу в охолодній ванні доцільно встановлювати перегородки, що руйнують примежовий шар рідини.

11. У результаті експериментальних досліджень, а також порівняння одержаних результатів з результатами інших дослідників отримано підтвердження адекватності розроблених математичних моделей. Відхилення результатів розрахунків та експерименту для різних процесів не перевищує 8–15 %.

Експериментально встановлено, що фізико-механічні властивості одержаних листів на основі поліолефінів і целюлозовмісних наповнювачів із вмістом наповнювача до 50 % (за масою) не поступаються властивостям відповідних полімерів. Зі збільшенням вмісту наповнювача понад 50 % (за масою) не лише істотно знижуються фізико-механічні властивості листів, а і збільшуються тривалість змішування компонентів та витрати енергії на процеси переробки.

12. Проведені в лабораторних і виробничих умовах дослідження підтвердили доцільність застосування низки розроблених ресурсоенергоєфективних заходів з переробки ТпМ з використанням вторинної сировини. Результати досліджень захищені охоронними документами на винаходи і корисні моделі, десять з яких впроваджені у виробництво.

13. Результати роботи впроваджені в практику проектування та експлуатації обладнання для переробки ТпМ. У ряді вітчизняних і зарубіжних організацій впроваджені методики з вибору принципів схем, конструктивного оформлення, а також алгоритмів і програм розрахунку параметрів і режимів роботи зазначеного обладнання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Balsam M. Kunststoff – der Werkstoff des 21 Jahrhunderts / M. Balsam, C.-J. Simon // Kunststoffe. — 2001. — Bd 91, N 8. — S. 46.*
2. *Рябцев Г. Л. Полімерні пакувальні матеріали (стан та шляхи вдосконалення) / Г. Л. Рябцев, І. О. Мікульонок // Упаковка. — 2006. — № 1. — С. 42—47.*
3. *Мировой и европейский рынок пластмасс // Plastics Review (Ukraine Edition). — 2005. — С. 4—8.*
4. *Рынок пластмасс и изделий из пластмасс в Украине // Международные новости мира пластмасс. — 2006. — № 11—12. — С. 4, 6, 8—10, 12—14.*
5. *Отходы и материальные потоки 2004: Европа, Кавказ и Центральная Азия // Ресурсосберегающие технологии : экспресс-информ. — М. : ВИНТИ, 2005. — Вып. 6. — С. 3—51.*
6. *Про відходи : Закон України від 05.03.1998, № 187/98 ВР // Відомості Верховної Ради України (ВВР). — К. : Верховна Рада України. — 1998. — № 36—37. — Ст. 242. — (Зі змінами, внесеними згідно із Законами України від 07.03.2002, № 3073-III // ВВР. — 2002. — № 31. — Ст. 214 і від 23.12.2004, № 2290-IV // ВВР. — 2005. — № 6. — Ст. 140).*
7. *Твердые бытовые отходы. Проблемы и решения. Технологии, оборудование : учеб. пособие / А. М. Касимов, В. Т. Семенов, А. Н. Александров, А. М. Коваленко. — Х. : ХНАГХ, 2006. — 301 с.*
8. *Любарская М. А. Стратегическое управление процессом обращения твердых отходов в регионе / М. А. Любарская. — СПб. : СПбГИЭУ, 2004. — 182 с.*
9. *Програма поводження з твердими побутовими відходами : затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 04.03.2004 р., № 265 // Урядовий кур'єр. — 2004. — 24 берез. (№ 55). — С. 8—9.*
10. *Взаимодействие Дании со странами Восточной Европы в области окружающей среды. Национальная стратегия управления твердыми отходами Украины: отчет об оценках сценариев // Ресурсосберегающие технологии : экспресс-информ. — М. : ВИНТИ, 2005. — Вып. 19. — С. 19—49.*
11. *Инвентаризация существующей информации о рециклинге селективных материалов отходов // Ресурсосберегающие технологии : экспресс-информ. — М. : ВИНТИ, 2005. — Вып. 22. — С. 3—40.*
12. *Ринок полімерів: чому не виправдовуються прогнози / Г. Л. Рябцев, С. В. Сапегін, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок // Упаковка. — 2007. — № 1. — С. 8—10.*
13. *Запропоновано нові пріоритети управління відходами // Євробюлетень : інформ. видання Представництва Європ. комісії в Україні. — 2008. — № 11. — С. 21.*
14. *Симонов-Емельянов И. Д. Основы создания композиционных материалов : учеб. пособие / И. Д. Симонов-Емельянов, В. Н. Кулезнев. — М. : МИХМ, 1986. — 86 с.*
15. *Пахаренко В. А. Наполненные термопласты : справочник / В. А. Пахаренко, В. Г. Зверлин, Е. М. Кириенко ; под общ. ред. акад. Ю. С. Липатова. — К. : Техніка, 1986. — 182 с.*
16. *Принципы создания композиционных полимерных материалов / Ал. Ал. Берлин, С. А. Вольфсон, В. Г. Ошмян, Н. С. Ениколопов. — М. : Химия, 1990. — 240 с.*
17. *Вольфсон С. А. Вторичная переработка полимеров / С. А. Вольфсон // Высокомолекулярные соединения. Серия С. — 2000. — Т. 42, № 11. — С. 2000—2014.*
18. *Пахаренко В. А. Переработка полимерных композиционных материалов : учеб. пособие [для вузов] / В. А. Пахаренко, Р. А. Яковлева, А. В. Пахаренко. — К. : Воля, 2006. — 552 с.*

19. *Суберляк О. В.* Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / О. В. Суберляк, П. І. Баштанник. — Львів : Растр-7, 2007. — 376 с.
20. *Дядичев В. В.* Переработка отходов полимерных материалов методом соэкструзии : монография / В. В. Дядичев. — Луганск : Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2003. — 220 с.
21. *Пластмассы – основа прогресса. Динамический рост промышленности отрасли.* К Всемирному форуму практических инноваций «К 2004» в Дюссельдорфе : обзор // Пластические массы. — 2004. — № 4. — С. 12—15.
22. *Володин В. П.* Экструзия профильных изделий из термопластов / В. П. Володин. — СПб. : Профессия, 2005. — 480 с.
23. *Вторичная переработка пластмасс* / Ф. Ла Мантия (ред.) ; пер. с англ. под ред. Г. Е. Заикова. — СПб. : Профессия, 2007. — 400 с.
24. *Мікульонок І. О.* Переробка вторинної сировини екструзією : монографія / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко. — К. : ІВЦ «Видавництво „Політехніка”», 2006. — 184 с.
25. *Лотош В. Е.* Экология природопользования / В. Е. Лотош. — Екатеринбург : Изд-во Ур. гос. эконом. ун-та, 2000. — 540 с.
26. *Мікульонок І. О.* Основні методи і шляхи використання полімервмісних відходів / І. О. Мікульонок, Г. Л. Рябцев // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 2. — С. 135—147.
27. *Сировина полімерна вторинна.* Порядок збирання, зберігання і перероблення відходів : ДСТУ 2731–94. — [Чинний від 1995-07-01]. — К. : Держстандарт України, 1994. — 13 с. — (Національний стандарт України).
28. *Ресурси матеріальні вторинні.* Терміни та визначення : ДСТУ 2102–92. — [Чинний від 1993-07-01]. — К. : Держстандарт України, 1993. — 12 с. — (Національний стандарт України).
29. *Калинчев Э. Л.* Научно-технические основы и опыт создания технологических линий стадии конфекционирования конструкционных полимеров. Ч. 1 / Э. Л. Калинчев, М. Б. Саковцева // Пластические массы. — 2003. — № 11. — С. 27—33.
30. *Полімерні композитні матеріали й вироби з них.* Одержання, перероблення та властивості : термінол. слов. / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко. — К. : ІВЦ «Видавництво „Політехніка”», 2005. — 179 с.
31. *Основы технологии переработки пластмасс : учебник для вузов* / [С. В. Власов, Э. Л. Калинчев, Л. Б. Кандырин и др.] ; под ред. В. Н. Кулезнёва и В. К. Гусева. — М. : Химия, 2004. — 596 с.
32. *Fiber-reinforced plastic market to cross 2.6 billion by 2007* // Polym. News. — 2002. — Vol. 27, N 11. — P. 388—389.
33. *Мікульонок І. О.* Термопластичні композитні матеріали та їх наповнювачі. Класифікація та загальні відомості / І. О. Мікульонок // Хімічна промисловість України. — 2005. — № 5. — С. 30—39.
34. *Симонов-Емельянов И. Д.* Принципы создания и переработки полимерных композиционных материалов дисперсной структуры / И. Д. Симонов-Емельянов // Пластические массы. — 2005. — № 1. — С. 11—16.
35. *Наполнители для полимерных композиционных материалов : справ. пособие* / [Дж. Милевски, Г. Кац, Т. Х. Ферригно и др.] ; под ред. Г. С. Каца, Д. В. Милевски ; пер. с англ. С. В. Бухарова и др. ; под ред. П. Г. Бабаевского. — М. : Химия, 1981. — 736 с.
36. *Быков Е. А.* Современные наполнители – важный фактор повышения конкурентоспособности композитов / Е. А. Быков, В. В. Дегтярёв // Пластические массы. — 2006. — № 1. — С. 32—36.
37. *Химическая энциклопедия* : в 5 т. / редкол. : Кнунянц И. Л. (гл. ред.) и др. — М. :

Большая Российская энцикл., 1988—1998.

Т. 3 : Меди — Полимерные. — 1992. — 639 с.

38. Дроздовский В. Ф. Получение резиновой крошки из амортизованных шин при низких температурах : [обзор. информ.] / В. Ф. Дроздовский. — М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1990. — 62 с. — (Серия «Производство шин» ; вып. 7).

39. Мікульонок І. О. Обладнання для механічного руйнування полімер- та еластомервмісних відходів / І. О. Мікульонок // Вісник КНУТД. Напрямок «Хімія та хімічні технології». — 2003. — № 1. — С. 131—134.

40. Taha M. In-situ thermoset polyurethane coating of glass beads dispersed in polystyrene by reactive extrusion / M. Taha, J. F. Gerard, A. Maazouz // J. Mater. Sci. — 1999. — Vol. 34, N 17. — P. 4341—4346.

41. Брык М. Т. Деструкция наполненных полимеров / М. Т. Брык. — М. : Химия, 1989. — 192 с.

42. Шиц Е. Ю. Исследование и разработка полимерных композиционных материалов с использованием природных алмазных порошков : автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.02.01 «Материаловедение» / Е. Ю. Шиц. — Якутск, 2000. — 21 с.

43. Пат. 2255945 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> C08L 1/02. Полимерная композиция, формованные изделия и способ их получения / Ш. Цикели (АТ), Т. Эндл (АТ), М. Г. Мартл (DE) ; патентообладатель Циммер АГ (DE). — № 2002125112/04 ; заявл. 08.01.01 ; опубл. 10.07.05, Бюл. № 19 ; приоритет 21.02.00, № 10007794.3 (DE).

44. Вахтинская Т. Н. Шунгитонаполненные термопласты / Т. Н. Вахтинская, Л. Н. Гуринович, Т. И. Андреева // Пластические массы. — 2003. — № 11. — С. 33—35.

45. Шаов А. Х. Последние достижения в области создания огнестойких полимерных материалов : обзор. Ч. 1 / А. Х. Шаов, З. З. Аларханова // Пластические массы. — 2005. — № 6. — С. 7—20.

46. Головкин Г. С. Волоконная технология производства и переработки в изделия термопластичных композиционных материалов / Г. С. Головкин // Пластические массы. — 2003. — № 9. — С. 35—39.

47. Разработка самосмазывающихся композитов на основе политетрафторэтилена для узлов трения сельскохозяйственной техники / Е. М. Иванова, И. И. Злотников, В. А. Смуругов [и др.] // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. — 2004. — № 1. — С. 20—25.

48. Перспективные виды полиолефиновых композитных материалов, способы их получения и основные области применения : [обзор. информ.] / А. С. Джафаров, Л. Н. Эфендиева, М. Д. Насибова, Н. А. Акперов. — М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1991. — 112 с. — (Серия «Нефтехимия и сланцепереработка» ; вып. 4—5).

49. Кербер М. Л. Термопластичные композиционные материалы для автомобилестроения / М. Л. Кербер, Т. П. Кравченко // Пластические массы. — 2000. — № 9. — С. 46—48.

50. Effect of CaCO<sub>3</sub>/LiCO<sub>3</sub> on the HCl generation of PVC during combustion / S. Zhu, Y. Zhang, Y. Zhang, C. Zhang // Polym. Test. — 2003. — Vol. 22, N 5. — P. 539—543.

51. Заявка 10334889 Німеччина, МПК<sup>7</sup> C 08 K 3/30. Flame-retardant polymethyl methacrylate molding made by bulk polymerization in casting cell, used in building, furniture, space-, air- or water-craft or land vehicle, contains fine ammonium sulfate powder as flame retardant / P. Stein, J. Scherble, T. Hasskerl, C. Schuetz, N. Brand, H. Lichtenstein, G. Ittmann ; applicant Roehm GmbH. — № DE10334889 ; application date 29.07.03 ; publication date 24.02.05 ; priority 29.07.03, № 20031034889 (DE).

52. Барштейн Г. Р. Технологические свойства термопластов с минералоорганическими наполнителями : [обзор. информ.] / Г. Р. Барштейн, О. Ю. Сабсай. — М. : НИИТЭ-

ХИМ, 1988. — 43 с. — (Серия «Переработка пластмасс»).

53. *Tolinski M.* Glass fiber meets stiffer competition / M. Tolinski // *Plast. Eng.* — 2005. — Vol. 61, N 3. — P. 18—20.

54. *Заявка 1541629* ЕПВ, МПК<sup>7</sup> C 08 L 1/00. Biodegradable resin composition / K. Itabashi (JP). — № EP1541629 ; application date 21.08.03 ; publication date 15.06.05 ; priority 21.08.03, № 2003JP10557 (WO) ; 22.08.02, № 20020242027 (JP).

55. *Thermoplastic* polymers reinforced with fibrous agricultural residues / S. Th. Georgopoulos, P. A. Tarantili, E. Avgerinos [et al.] // *Polym. Degrad. and Stab.* — 2005. — Vol. 90, N 2. — P. 303—312.

56. *Перепелкин К. Е.* Полимерные волокнистые композиты, их основные виды, принципы получения и свойства. Ч. 1 : Основные компоненты волокнистых композитов, их взаимодействие и взаимовлияние / К. Е. Перепелкин // *Химические волокна.* — 2005. — № 4. — С. 7—22.

57. *Перепелкин К. Е.* Полимерные волокнистые композиты, их основные виды, принципы получения и свойства. Ч. 3 : Основные виды полимерных волокнистых композитов, их свойства и применение / К. Е. Перепелкин // *Химические волокна.* — 2006. — № 1. — С. 41—50.

58. *Пат. 2293092* Российская Федерация, МПК(2006.01) C08J 5/16. Композиционный триботехнический материал / В. Г. Мельников, В. В. Терентьев ; патентообладатель Иван. гос. хим.-технолог. ун-т. — № 2005141380/04 ; заявл. 28.12.05 ; опубл. 10.02.07, Бюл. № 4.

59. *Физикохимия* многокомпонентных полимерных систем : в 2-х т. / под общ. ред. Ю. С. Липатова. — К. : Наук. думка, 1986.

Т. 1 : Наполненные полимеры / В. Ф. Бабич, М. Т. Брык, Р. А. Веселовский [и др.], 1986. — 376 с.

60. *Забашта В. Ф.* Полімерні композиційні матеріали конструкційного призначення / В. Ф. Забашта, Г. О. Кривов, В. Г. Бондар. — К. : Техніка, 1993. — 160 с.

61. *Дементьев А. Г.* Структура и свойства пенопластов / А. Г. Дементьев, О. Г. Тараканов. — М. : Химия, 1983. — 171 с.

62. *Основные* способы переработки полимерных отходов в строительный материал / Р. А. Тороян, А. К. Микитаев, А. Ю. Беданокоев [и др.] // *Пластические массы.* — 2008. — № 1. — С. 53—56.

63. *Свешникова Е. С.* Использование отходов сельскохозяйственного производства для наполнения полимеров / Е. С. Свешникова, И. А. Чельшева, Л. Г. Панова // *Пластические массы.* — 2008. — № 1. — С. 29—31.

64. *Carotenuto G.* Polymer-based nanocomposites: New potentialities for polymers / G. Carotenuto // *Polym. News.* — 2000. — Vol. 25, N 6. — P. 190—199.

65. *Beyer G.* Nanocomposites – a new concept for flame retardant polymers / G. Beyer // *Polym. News.* — 2001. — Vol. 26, N 11. — P. 370—378.

66. *Пат. 2281960* Российская Федерация, МПК(2006.01) C08J 5/16. Антифрикционная полимерная композиция / А. А. Охлопкова, С. Н. Попов, С. А. Слепцова, Е. Г. Аввакумов, О. Б. Винокурова, А. А. Гусев ; патентообладатель Ин-т неметаллических материалов СО РАН. — № 2005107970/04 ; заявл. 21.03.05 ; опубл. 20.08.06, Бюл. № 23.

67. *Hohenberger W.* Funktionelle Füllstoffe / W. Hohenberger // *Kunststoffe.* — 2005. — Bd 95, N 10. — S. 187—192.

68. *Ениколопян Н. С.* Полимерные композиционные материалы. Состояние и перспективы / Н. С. Ениколопян // *Журнал ВХО им. Д. И. Менделеева.* — 1989. — Т. 34, № 5. — С. 435—437.

69. *Несиоловская Т. Н.* Коротковолокнистые наполнители. Способы получения, свойства и области применения : [темат. обзор.] / Т. Н. Несиоловская, Е. М. Соловьев. — М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1992. — 71 с. — (Серия «Производство РТИ и АТИ» ; вып. 3).
70. *Ефанова В. В.* Исследование абразиво- и износостойкости базальтополимерного покрытия барьерного типа / В. В. Ефанова // Энергосбережение и водоподготовка. — 2001. — № 2. — С. 53—58.
71. *Жарин Д. Е.* Конструкционные металлонаполненные полимерные композиты / Д. Е. Жарин, О. Ю. Селиванов, А. Ф. Гумеров // Пластические массы. — 2002. — № 6. — С. 37—38.
72. *Березненко Н. М.* Розробка технології одержання композиційних матеріалів з полімерних сумішей та відходів шерсті : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.06 «Технологія полімерних та композиційних матеріалів» / Н. М. Березненко. — К., 2005. — 18 с.
73. *Ефанова В. В.* Фізико-хімічні перетворення в процесах одержання базальтових наповнювачів і полімерних композиційних матеріалів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.17.06 «Технологія полімерних та композиційних матеріалів» / В. В. Ефанова. — К., 2008. — 35 с.
74. *Фомин В. А.* Биоразлагаемые полимеры, состояние и перспективы развития / В. А. Фомин, В. В. Гузеев // Пластические массы. — 2001. — № 2. — С. 42—46.
75. *Данилов А. Ю.* Полимерные композиционные материалы с сегнетоэлектрическими и ферромагнитными наполнителями / А. Ю. Данилов, Р. М. Гречишкин, П. М. Пахомов // Проблемы теоретической и экспериментальной химии : 15-я Российская студен. науч. конф., (Екатеринбург, 19—22 апр. 2005 г.) : тез. докл. — Екатеринбург : Изд-во Ур. гос. ун-та. — 2005. — С. 285—286.
76. *Харченко Н. В.* Теплообменное оборудование для аккумулирования тепловой энергии : [обзор. информ.] / Н. В. Харченко, Л. Н. Никонова. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1989. — 41 с. — (Серия ХМ-1 «Химическое и нефтеперерабатывающее машиностроение»).
77. *Пивень А. Н.* Теплофизические свойства полимерных материалов : справочник / А. Н. Пивень, Н. А. Гречаная, И. И. Чернобыльский. — К. : Выща шк., 1976. — 180 с.
78. *Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимеров* / [Ю. Е. Лукач, Л. Г. Воронин, Л. И. Ружинская и др.]. — К. : Техніка, 1988. — 208 с.
79. *Калинчев Э. Л.* Свойства и переработка термопластов : справ. пособие / Э. Л. Калинчев, М. Б. Саковцева. — Л. : Химия, 1983. — 288 с.
80. *Марков А. В.* Теплопроводность полимеров, наполненных дисперсными частицами. Модель / А. В. Марков // Высокомолекулярные соединения. Серия А. — 2008. — 50, № 4. — С. 709—719.
81. *Мікульонок І. О.* Полімерні композиційні матеріали. Визначення теплофізичних властивостей / І. О. Мікульонок // Хімічна промисловість України. — 2003. — № 5. — С. 25—28.
82. *Пивень А. Н.* Методы расчета тепло- и температуропроводности полимерных материалов / А. Н. Пивень, В. В. Новиков. — К. : УМК ВО, 1989. — 108 с.
83. *Харитонов В. В.* Теплофизика полимеров и полимерных композиций / В. В. Харитонов. — Минск : Вышэйш. шк., 1983. — 162 с.
84. *Привалко В. П.* Основы теплофизики и реофизики полимерных материалов / В. П. Привалко, В. В. Новиков, Ю. Г. Яновский. — К. : Наук. думка, 1991. — 231 с.
85. *Липатов Ю. С.* Физико-химические основы наполнения полимеров / Ю. С. Липатов. — М. : Химия, 1991. — 259 с.
86. *Перепелкин К. Е.* Полимерные волокнистые композиты, их основные виды,

принципы получения и свойства. Ч. 4 : Функциональные свойства полимерных волокнистых композитов и их оценка / К. Е. Перепелкин // Химические волокна. — 2006. — № 3. — С. 35—47.

87. *Механика композитов* : в 12 т. / под общ. ред. А. Н. Гузя. — К. : Наук. думка : А.С.К., 1993—2003.

Т. 3 : Статистическая механика и эффективные свойства материалов / Л. П. Хорошун, Б. П. Маслов, Е. Н. Шикула, Л. В. Назаренко ; под ред. Л. П. Хорошун. — К. : Наук. думка, 1993. — 389 с.

88. *Красовский В. Н.* Примеры и задачи по технологии переработки эластомеров : учеб. пособие для вузов / В. Н. Красовский, А. М. Воскресенский, В. М. Харчевников. — Л. : Химия, 1984. — 240 с.

89. *К вопросу* расчета коэффициента теплопроводности многокомпонентных эластомерных систем / А. Н. Гайдадин, И. П. Петрюк, В. Ф. Каблов, В. В. Вебер // Каучук и резина. — 2006. — № 5. — С. 30—33.

90. *Милдман С.* Течение полимеров / С. Милдман ; пер. с англ. Ю. Н. Панова ; под ред. А. Я. Малкина. — М. : Мир, 1971. — 264 с.

91. *Виноградов Г. В.* Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. — М. : Химия, 1977. — 440 с.

92. *Яхно О. М.* Гідравліка неньютонівських рідин : навч. посіб. / О. М. Яхно, В. І. Желяк. — К. : Вища шк., 1995. — 199 с.

93. *Малкин А. Я.* Реология: концепции, методы, приложения / А. Я. Малкин, А. И. Исаев. — СПб. : Профессия, 2007. — 560 с.

94. *Теплофизические* и реологические характеристики полимеров : справочник / [А. И. Иванченко, В. А. Пахаренко, В. П. Привалко и др.]. — К. : Наук. думка, 1977. — 244 с.

95. *Теплофизические* и реологические характеристики и коэффициенты трения наполненных термопластов : справочник / [В. А. Пахаренко, В. Г. Зверлин, В. П. Привалко и др.]. — К. : Наук. думка, 1983. — 290 с.

96. *Мікульонок І. О.* Полімерні композиційні матеріали. Визначення реологічних властивостей / І. О. Мікульонок // Хімічна промисловість України. — 2003. — № 6. — С. 58—61.

97. *Урьев Н. Б.* Высококонцентрированные дисперсные системы / Н. Б. Урьев. — М. : Химия, 1980. — 319 с.

98. *Урьев Н. Б.* Текучесть суспензий и порошков / Н. Б. Урьев, А. А. Потанин. — М. : Химия, 1992. — 256 с.

99. *Равичев Л. В.* Математическое моделирование вязкостных свойств суспензий полифракционного состава / Л. В. Равичев, А. В. Беспалов, В. Я. Логинов // Химическая промышленность. — 2000. — № 9. — С. 45—49.

100. *Residence time distribution in extruders determined by in-line ultrasonic measurements* / R. Gendron, L. E. Daigneault, J. Tatibouët, M. M. Dumoulin // Adv. Polym. Technol. — 1996. — Vol. 15, N 2. — P. 111—125.

101. *Торнер Р. В.* Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р. В. Торнер. — М. : Химия, 1977. — 464 с.

102. *Тадмор З.* Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос ; пер. с англ. под ред. Р. В. Торнера. — М. : Химия, 1984. — 632 с.

103. *Техника* переработки пластмасс / под ред. Н. И. Басова и В. М. Броя. — М. : Химия, 1985. — 528 с.

104. *Корн Г.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Определения, теоремы, формулы. — [6-е изд., стер.] / Г. Корн, Т. Корн. — СПб. : Изд-во

«Лань», 2003. — 832 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

105. *Петухов А. Д.* Исследования основных экструзионно-реологических характеристик при высокоскоростной экструзии полиэтилена низкой плотности / А. Д. Петухов, Ю. Е. Лукач // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. — К. : Техніка, 1966. — Вып. 4. — С. 50—55.

106. *Лукашова В. В.* Дослідження реології розплаву полімеру з пороутворюючими наповнювачами / В. В. Лукашова, О. Г. Зубрій, Л. Б. Радченко // Промышленная теплотехника. — 2004. — Т. 26, № 6. — С. 45—49.

107. *Мікульонок І. О.* Основні методи використання гумовмісних відходів / І. О. Мікульонок // Хімічна промисловість України. — 2001. — № 5. — С. 53—58.

108. *Виробництво* листових і лінійних виробів з полімернаповнених композиційних матеріалів / Ю. Ю. Лукач, П. М. Магазій, І. О. Мікульонок, Г. Л. Рябцев // Хімічна промисловість України. — 1999. — № 5. — С. 29—33.

109. *Оборудование* для вторичной переработки пластмасс : проспект ООО «Балитех». — М. : Балитех, [2006?]. — 6 с.

110. *Миани М.* Оборудование для производства полимерных листов и плит из полиолефинов с наполнением древесной мукой / М. Миани : семинар «Итальянское оборудование по переработке пластика и резины», (Киев, 18.05.1993) : доклад. — К. : Отдел по развитию торгового обмена Посольства Италии в Украине, 1993. — 18 с.

111. *Вторичное* использование полимерных материалов / под. ред. Е. Г. Любешкиной. — М. : Химия, 1989. — 192 с.

112. *Дроздовский В. Ф.* Использование изношенных шин в качестве энергоносителей / В. Ф. Дроздовский // Каучук и резина. — 1997. — № 1. — С. 43—47.

113. *Тимошевский Б. Г.* Энергия из отходов упаковки / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач // Упаковка. — 2000. — № 2. — С. 46—49.

114. *Рециркуляция* отходов // Ресурсосберегающие технологии : экспресс-информ. — М. : ВИНТИ, 2003. — Вып. 7. — С. 16—22.

115. *Лукач Ю. Е.* Валковые машины для переработки пластмасс и резиновых смесей / Ю. Е. Лукач, Д. Д. Рябинин, Б. Н. Метлов. — М. : Машиностроение, 1967. — 296 с.

116. *Лукач Ю. Е.* Червячные машины для переработки резиновых смесей и пластических масс / Ю. Е. Лукач, Д. Д. Рябинин. — М. : Машиностроение, 1967. — 296 с.

117. *Рябинин Д. Д.* Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей / Д. Д. Рябинин, Ю. Е. Лукач. — М. : Машиностроение, 1972. — 272 с.

118. *Басов Н. И.* Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов : учеб. для вузов / Н. И. Басов, Ю. В. Казанков, В. А. Любартвич. — М. : Химия, 1986. — 488 с.

119. *Торнер Р. В.* Оборудование заводов по переработке пластмасс : учеб. пособие [для студентов вузов] / Р. В. Торнер, М. С. Акутин. — М. : Химия, 1986. — 400 с.

120. *Жариков В. Д.* Полимерное машиностроение: состояние и перспективы развития. Ч. 1 : [обзор. информ.] / В. Д. Жариков. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1990. — 40 с. — (Серия ХМ-2 «Оборудование для переработки пластмасс и резины»).

121. *Жариков В. Д.* Полимерное машиностроение: состояние и перспективы развития. Ч. 2 : [обзор. информ.] / В. Д. Жариков. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1990. — 51 с. — (Серия ХМ-2 «Оборудование для переработки пластмасс и резины»).

122. *Обладнання* для одержання і формування полімерних композиційних матеріалів / Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, Г. Л. Рябцев, М. В. Сезонов // Хімічна промисловість України. — 2001. — № 6. — С. 55—61.

123. *Створення* концепції конструктивного оформлення процесу виготовлення ру-

лонних та інших погонажних матеріалів з використанням відходів легкої та інших промисловостей : звіт про НДР (заключ.) : 2173 / Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т» ; кер. Ю. Ю. Лукач ; викон.: Л. Б. Радченко [та ін.]. — К., 1999. — 100 с. — № ДР 0197U005334.

124. *Дослідження енергоресурсозаощаджувальної технології та засобів формування виробів з композиційних матеріалів* : звіт про НДР (заключ.) : 2367 / Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т» ; кер. Л. Б. Радченко ; викон.: В. В. Сівецький [та ін.]. — К., 2002. — 162 с. — № ДР 0101U000402.

125. *Розроблення теоретичних засад і алгоритмізація детермінованих математичних моделей формування реологічно складних середовищ* : звіт про НДР (заключ.) : 2646 / Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т» ; кер. Л. Б. Радченко ; викон.: В. В. Сівецький [та ін.]. — К., 2005. — 215 с. — № ДР 0103U000206.

126. *Розроблення теоретичних засад проектування обладнання для переробки промислових і побутових відходів полімерів* : звіт про НДР (заключ.) : 2921 / Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т» ; кер. І. О. Мікульонок ; викон.: Л. Б. Радченко [та ін.]. — К., 2008. — 242 с. — № ДР 0106U002132.

127. *Экструзионные системы для производства полимерных пленок и плит* : каталог. — Ганновер : Berstorff, [2005?]. — 23 с.

128. *Benkreira H. Mixing of masterbatches and thermoplastics in extrusion/injection moulding machines* / H. Benkreira // Chem. Eng. Res. and Des. A. — 1994. — Vol. 72, N 6. — P. 723—727.

129. *Упругодеформационное измельчение термопластов* / Е. Л. Акопян, А. М. Кармилов, В. Г. Никольский [и др.] // Доклады АН СССР. — 1986. — Т. 291, № 1. — С. 133—136.

130. *Бондаренко В. Гумовмісні відходи як джерело економії хімічної сировини. Захист навколишнього середовища* / В. Бондаренко, І. Мікульонок, М. Сезонов // Стандартизація. Сертифікація. Якість. — 2002. — № 1. — С. 70—72.

131. *Дрібнодисперсна крихта, одержана методом високотемпературного зсувного подрібнення. Дослідження властивостей* / Т. А. Бойко, Н. В. Савельєва, Н. І. Пасько, А. П. Піднебесний // Хімічна промисловість України. — 2003. — № 4. — С. 50—54.

132. *Шаховец С. Е. Интенсивная технология регенерации резин* / С. Е. Шаховец, Б. Л. Смирнов // Каучук и резина. — 2006. — № 1. — С. 34—36.

133. *Влияние метода измельчения на структуру резиновой крошки* / Г. М. Трофимова, Д. Д. Новиков, Л. В. Компаниец [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. — 2000. — Т. 42, № 7. — С. 1238—1245.

134. *Ахметханов Р. М. Вторичная переработка отходов поливинилхлорида с использованием метода упруго-деформационного диспергирования* / Р. М. Ахметханов, Р. Г. Кадыров, К. С. Минскер // Пластические массы. — 2002. — № 4. — С. 45—46.

135. *Лабораторные и промышленные смесительные и пластицирующие машины* : проспект фирмы Werner und Pfleiderer. — [Б. м. : б. и.], 1997. — 148 с.

136. *Weltrekord bei PE-Aufbereitung* // Kunststoffe. — 2000. — Bd 90, N 3. — S. 12.

137. *Фридман М. Л. Развитие оборудования для смешения расплавов термопластов* : [обзор. информ.] / М. Л. Фридман. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1988. — 51 с. — (Серия ХМ-2 «Оборудование для переработки пластмасс и резины»).

138. *Экструдеры*. Проспект фирмы Battenfeld. — [Б. м. : б. и.], 1997. — 120 с.

139. *Jacker M. Die neue Extrudergeneration für die PVC-Verarbeitung* / M. Jacker, R. Mickley // MAN Forsch., Plan., Bauen. — 1996. — N 10. — P. 66—73.

140. *Mapleston P. Two-stage twin-screw extruder is for calendaring, compounding* /

P. Mapleston // *Mod. Plast. Int.* — 1997. — Vol. 27, N 9. — P. 151.

141. *Berstorff*. Оборудование для переработки пластмасс. Двухшнековые экструдеры ZE 90 – ZE 280 УТ. Технические данные [Электронный ресурс]. — Дата доступа : квіт. 2006 р. — Режим доступу :

[http://www.berstorff.de/servlet/control/wtk\\_page/PublicSite@ru/wtk\\_invoker/PublicSiteMenu/menuid/73180/wtk\\_status/165811](http://www.berstorff.de/servlet/control/wtk_page/PublicSite@ru/wtk_invoker/PublicSiteMenu/menuid/73180/wtk_status/165811).

142. *Coperion*. Compounding Systems. ZSK. Technical Data [Electronic resource]. — Last access : Apr. 2006. — Mode of access :

[http://www.coperion.com/\(ghyjgc45g5132cyrtq5dk45\)/Default-L1-2-26-55-24-135.aspx](http://www.coperion.com/(ghyjgc45g5132cyrtq5dk45)/Default-L1-2-26-55-24-135.aspx).

143. *Cincinnati Milacron*. Parallel und gegenlaufig // *Kunststoffe*. — 1998. — Bd 88, N 9. — S. 1460.

144. *Leistungsstarker Doppelschneckenextruder* // *Maschinenmarkt*. — 1998. — Bd 104, N 41. — S. 65.

145. *Blasformmaschine fertigt Behälter und Hohlteile für technische Anwendungen* // *Maschinenmarkt*. — 1999. — Bd 105, N 14. — S. 119.

146. *Schneider H.-P.* Mehr Durchsatz, weniger Verschleiß / H.-P. Schneider // *Kunststoffe*. — 2001. — Bd 91, N 10. — S. 150—151.

147. *Gabriele M. C.* No showdown seen for highspeed compounding / M. C. Gabriele // *Mod. Plast. Int.* — 1998. — Vol. 28, N 12. — P. 74.

148. *Sikora J. W.* Influence of the length of the plasticating system on selected characteristics of an autothermal extrusion process / J. W. Sikora, E. Sasimowski // *Adv. Polym. Technol.* — 2005. — Vol. 24, N 1. — P. 21—28.

149. *Three-dimensional flow modeling of a self-wiping corotating twin-screw extruder*. Part II: The kneading section / D. J. Van der Wal, D. Goffart, E. M. Klomp [et al.] // *Polym. Eng. and Sci.* — 1996. — Vol. 36, N 7. — P. 912—924.

150. *Bigio D.* Scale-up rules for mixing in a non-intermeshing twin-screw extruder / D. Bigio, K. Wang // *Polym. Eng. and Sci.* — 1996. — Vol. 36, N 23. — P. 2832—2839.

151. *Lawal A.* Mechanisms of mixing in single and co-rotating twin screw extruders / A. Lawal, D. M. Kalyon // *Polym. Eng. and Sci.* — 1995. — Vol. 35, N 17. — P. 1325—1338.

152. *Bawiskar S.* Melting model for modular self wiping co-rotating twin screw extruders / S. Bawiskar, J. L. White // *Polym. Eng. and Sci.* — 1998. — Vol. 38, N 5. — P. 727—740.

153. *Gale M.* Compounding with single-screw extruders / M. Gale // *Adv. Polym. Technol.* — 1997. — Vol. 16, N 4. — P. 251—262.

154. *Shearer G.* Distributive mixing profiles for co-rotating twin-screw extruders / G. Shearer, C. Tzoganakis // *Adv. Polym. Technol.* — 2001. — Vol. 20, N 3. — P. 169—190.

155. *Todd D. B.* Improving incorporation of fillers in plastics. A special report / D. B. Todd // *Adv. Polym. Technol.* — 2000. — Vol. 19, N 1. — P. 54—64.

156. *Wang Ning He.* Experiment and prediction of polymer devolatilization in screw devolatilizer / Ning He Wang, N. Hashimoto // *J. Chem. Eng. Jap.* — 2000. — Vol. 33, N 3. — P. 353—358.

157. *Lee T. H.* A new representative measure of chaotic mixing in a chaos single-screw extruder / T. H. Lee, T. H. Kwon // *Adv. Polym. Technol.* — 1999. — Vol. 18, N 1. — P. 53—68.

158. *Kim S. J.* A simple approach to determining three-dimensional screw characteristics in the metering zone of extrusion processes using a total shape factor / S. J. Kim, T. H. Kwon // *Polym. Eng. and Sci.* — 1995. — Vol. 35, N 3. — P. 274—283.

159. *Kim S. J.* Enhancement of mixing performance of single-screw extrusion processes via chaotic flows: Part I. Basic concepts and experimental study / S. J. Kim, T. H. Kwon // *Adv. Polym. Technol.* — 1996. — Vol. 15, N 1. — P. 41—54.

160. *Tadmor Z.* Machine invention, innovation, and elementary steps / Z. Tadmor // *Adv. Polym. Technol.* — 2002. — Vol. 21, N 2. — P. 87—97.
161. *Stasiek J.* Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych ślimaków układów uplastyczniających oraz warunków procesu wytłaczania na właściwości kompozytu polipropylenowego / J. Stasiek // *Polimery.* — 2005. — Vol. 50, N 11—12. — S. 881—889.
162. *High torque and speed* // *Plast. Eng.* — 2004. — Vol. 60, N 6, — P. 25.
163. *Вольфсон С. А.* Экструзионные технологии в пищевой промышленности и в переработке материалов биологического происхождения / С. А. Вольфсон, М. Н. Сахарова, В. Г. Никольский // *Пластические массы.* — 1998. — № 2. — С. 36—40.
164. *Чалая Н. М.* Экструзия: прогрессивные технологии и оборудование в производстве пластмассовой продукции : обзор науч.-техн. семинара / Н. М. Чалая // *Пластические массы.* — 2005. — № 6. — С. 4—6.
165. *Лебедев М. И.* Современные процессы экструзии и вулканизации длинномерных резиновых изделий : [темат. обзор.] / М. И. Лебедев, Л. А. Мейлахс, А. Е. Корнев. — М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1990. — 60 с. — (Серия «Производство РТИ и АТИ»).
166. *Янков В. И.* Шнековые машины с продольной циркуляцией жидкости. Сообщ. 2 : Влияние радиальных зазоров на рабочие характеристики / В. И. Янков, Е. Д. Бахмин, Е. В. Славнов, С. И. Уржунцева // *Химические волокна.* — 2003. — № 4. — С. 44—49.
167. *Славнов Е. В.* Шнековые машины с продольной циркуляцией жидкости. Сообщ. 3 : Интенсификация процессов смешения / Е. В. Славнов, В. И. Янков, С. И. Уржунцева // *Химические волокна.* — 2003. — № 5. — С. 57—60.
168. *Кузьев И. М.* Интенсификация процессов тепломассопереноса в рабочем канале червячных машин при переработке неньютоновских полимерных жидкостей / И. М. Кузьев // *Промышленная теплотехника.* — 2004. — Т. 26, № 1. — С. 25—31.
169. *Michaeli W.* Auslegung von Einschneckenextrudern / W. Michaeli, A. Imhoff // *Kunststoffe.* — 2001. — Bd 91, N 2. — С.38—41.
170. *Markarian J.* New mixing developments move single screw compounding forward / J. Markarian // *Plast., Addit. and Compound.* — 2004. — Vol. 6, N 5, — P. 50—53.
171. *Видман В.* Оптимизация параметров вращающего момента, объема и числа оборотов двухшнековых смесителей / В. Видман, П. Хайдемайер // *Пластикс.* — 2005. — № 12. — С. 57—59.
172. *Энергозатраты* при переработке наполненных термопластичных композиций на экструзионном смесителе ZSK / В. В. Пахаренко, А. А. Радчук, В. И. Тимченко [и др.] // *Пластические массы.* — 2006. — № 12. — С. 52—54.
173. *Шенкель Г.* Шнековые прессы для пластмасс. Принцип действия, конструирования и эксплуатации / Г. Шенкель ; пер. с нем. Г. П. Делекторского, И. С. Либермана, А. Н. Перфилетова ; под ред. А. Я. Шапиро. — Л. : Госхимиздат, 1962. — 467 с.
174. *Мак Келви Д. М.* Переработка полимеров / Д. М. Мак Келви. — М. : Химия, 1965. — 442 с.
175. *Козулин Н. А.* Оборудование для производства и переработки пластических масс / Н. А. Козулин, А. Я. Шапиро, Р. К. Гавурина ; под ред. Н. А. Козулина. — Л. : Химия, 1967. — 784 с.
176. *Бернхардт Э.* Переработка термопластичных материалов / Э. Бернхардт. — М. : Госхимиздат, 1968. — 748 с.
177. *Маленко К. С.* Переробка полімерних матеріалів на валкових машинах / К. С. Маленко. — К. : Техніка, 1971. — 164 с.
178. *Силин В. А.* Динамика процессов переработки пластмасс в червячных машинах /

В. А. Силин. — М. : Машиностроение, 1972. — 150 с.

179. *Красовский В. Н.* Сборник примеров и задач по технологии переработки пластических масс : [для втузов] / В. Н. Красовский, А. М. Воскресенский. — Минск : Вышэйш. шк., 1975. — 318 с.

180. *Смешение полимеров* / В. В. Богданов, Р. В. Торнер, В. Н. Красовский, Э. О. Регер. — Л. : Химия, 1979. — 192 с.

181. *Шерышев М. А.* Переработка листов из полимерных материалов / М. А. Шерышев, В. С. Ким. — Л. : Химия, 1984. — 216 с.

182. *Моделирование и оптимизация экструзии полимеров* / В. В. Скачков, Р. В. Торнер, Ю. В. Стунгур, С. В. Реутов. — Л. : Химия, 1984. — 152 с.

183. *Интенсификация процессов каландрования полимеров* / К. Колерт, А. М. Воскресенский, В. Н. Красовский, Э. О. Регер ; под ред. А. М. Воскресенского. — Л. : Химия, 1991. — 224 с.

184. *Купчинов Б. И.* Технология конструкционных материалов и изделий на основе измельченных отходов древесины / Б. И. Купчинов, Н. В. Немогай, С. Ф. Мельников ; под ред. В. А. Белого. — Минск : Навука і тэхніка, 1992. — 199 с.

185. *Раувендааль К.* Экструзия полимеров / К. Раувендааль ; пер. с англ. под ред. А. Я. Малкина. — СПб. : Профессия, 2006. — 768 с.

186. *Радченко Л. Б.* Переробка термопластів методом екструзії / Л. Б. Радченко. — К. : ІЗМН, 1999. — 220 с.

187. *Радченко Л. Б.* Основи моделювання та конструювання черв'ячних екструдерів : навч. посіб. / Л. Б. Радченко, В. І. Сівецький. — К. : ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2002. — 152 с.

188. *Ким В. С.* Теория и практика экструзии полимеров / В. С. Ким. — М. : Химия, КолосС, 2005. — 568 с. — (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений).

189. *Переработка каучуков и резиновых смесей (реологические основы, технология, оборудование)* / Е. Г. Вострокнутов, М. И. Новиков, В. И. Новиков, Н. В. Прозоровская. — [изд. 2-е, перераб.]. — М. : Максипресс, 2005. — 369 с.

190. *Петухов А. Д.* Исследование высокоскоростных червячных прессов при изготовлении труб и плёнок из полиэтилена : дис. ... канд. техн. наук : спец. 176 «Машины и оборудование химических производств» / Петухов Аркадий Демьянович. — К., 1969. — 317 с.

191. *Малиновский В. В.* Исследование процесса охлаждения изделий из полимерных материалов при производстве их непрерывным способом : автореф. дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук : спец. 176 «Машины и оборудование химических производств» / В. В. Малиновский. — К., 1969. — 21 с.

192. *Красовский В. Н.* Исследование механики процессов переработки полимеров на валковых машинах : автореф. дис. на соиск. учён. степ. д-ра техн. наук : спец. 05.17.06 «Технология и переработка пластических масс и стеклопластиков» / В. Н. Красовский. — Л., 1973. — 40 с.

193. *Новицкая Т. М.* Исследование процессов термообработки листовых материалов из термопластов : автореф. дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии» / Т. М. Новицкая. — К., 1978. — 23 с.

194. *Ружинская Л. И.* Исследование энергосиловых параметров процессов калибровки и охлаждения листов на гладильном каландре : автореф. дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии» / Л. И. Ружинская. — К., 1980. — 18 с.

195. *Рощупкин С. А.* Основные параметры неизотермического процесса каландрования : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии» / Рощупкин Сергей Александрович. — К., 1984. — 192 с.
196. *Микулёнок И. О.* Интенсификация процессов переработки полимеров на валковых машинах : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии» / Микулёнок Игорь Олегович. — К., 1991. — 171 с.
197. *Любартович С. А.* Методы расчета и конструирование вибрационного оборудования для переработки полимеров : автореф. дис. на соиск. учён. степ. д-ра техн. наук : спец. 05.04.09 «Машины и агрегаты нефтеперерабатывающих и химических производств» / С. А. Любартович. — М., 1993. — 36 с.
198. *Двойнос Я. Г.* Процессы переработки композиционных материалов экструзионным способом : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.13 «Машины и аппараты химических производств» / Двойнос Ярослав Григорьевич. — К., 1999. — 193 с.
199. *Сідоров Д. Е.* Моделювання процесів змішування полімерів при розробці змішувачів для екструзійного та литвевого обладнання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології» / Д. Е. Сідоров. — К., 2002. — 20 с.
200. *Дядичев В. В.* Соекструзійна обробка вторинних полімерних матеріалів (теорія, технологія, обладнання) : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.03.05 «Процеси і машини обробки тиском» / В. В. Дядичев. — Луганськ, 2003. — 36 с.
201. *Горбунов Д. Б.* Стационарные и нестационарные режимы процесса экструзии псевдопластичных сред на одночервячных машинах : автореф. дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» / Д. Б. Горбунов. — Томск, 2006. — 20 с.
202. *Місяць В. П.* Розвиток наукових основ проектування обладнання для подрібнення відходів термопластичних і гумових матеріалів легкої промисловості : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.05.10 «Машины легкой промышленности» / В. П. Місяць. — К., 2008. — 36 с.
203. *Лукашова В. В.* Моделювання процесу екструзії полімерних композицій зі спіноуючими наповнювачами : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології» / Лукашова Вікторія Володимирівна. — К., 2008. — 217 с.
204. *Калинчев Э. Л.* Научно-технические основы и опыт создания технологических линий стадии конфекционирования конструкционных полимеров. Ч. 2 / Э. Л. Калинчев, М. Б. Саковцева // Пластические массы. — 2004. — № 10. — С. 44—51.
205. *Гун Г. Я.* Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением : учеб. пособие для вузов / Г. Я. Гун. — М. : Металлургия, 1983. — 352 с.
206. *Оборудование и основы проектирования заводов резиновой промышленности* : учеб. пособие [для вузов] / [Н. Г. Бекин, Н. Д. Захаров, Г. К. Пеунков и др.] ; под общ. ред. Н. Д. Захарова. — Л. : Химия, 1985. — 504 с.
207. *Бекин Н. Г.* Расчет технологических параметров и оборудования для переработки резиновых смесей в изделия / Н. Г. Бекин. — Л. : Химия, 1987. — 272 с.
208. *Активирующее* смешение в процессах получения и модифицирования полимерных композиционных материалов / В. П. Бритов, В. В. Богданов, О. О. Николаев, А. Е. Туболкин // Журнал прикладной химии. — 2004. — Т. 77, Вып. 1. — С. 122—127.
209. *Богданов В. В.* Научные основы технологии приготовления эластомерных композиционных материалов / В. В. Богданов // Каучук и резина. — 1990. — № 9. — С. 14—17.
210. *Соколов М. В.* Определение суммарной величины сдвига при переработке резиновых смесей / М. В. Соколов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2006. —

№ 8. — С. 3—4.

211. *Schmahl F. A.* Process advantages by improved rotor cooling. Pt 2 / F. A. Schmahl, A. Limper, H. Keuter // *Rubber World*. — 2005. — Vol. 233, N 1. — P. 32, 34.

212. *Микулёнок И. О.* Методика параметрического и теплового расчета полимерперерабатывающих каландров / И. О. Микулёнок, Ю. Е. Лукач, Л. И. Ружинская. — К. : КПИ, 1990. — 31 с. — Деп. в УкрНИИТИ 21.02.90, № 283-Ук90.

213. *Чаплыгин А. Б.* Моделирование процесса валкового смешения / А. Б. Чаплыгин, В. Г. Шеркунов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. — 2004. — № 5. — С. 191—195.

214. *Вдовенко П. К.* Математическая модель процесса переработки кристаллизующихся термопластов на гладильном каландре / П. К. Вдовенко, А. М. Воскресенский, Р. Г. Мирзоев // *Машины и технология переработки полимеров : межвед. сб. научн. тр.* — Л. : ЛТИ, 1976. — С. 56—60.

215. *Доброногова С. И.* Математическая модель процессов калибрования и охлаждения толстых листов из термопластов в межвалковом зазоре гладильного каландра / С. И. Доброногова, Ю. Е. Лукач, Л. И. Ружинская // *Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб.* — К. : Техніка, 1976. — Вып. 24. — С. 48—51.

216. *Пат. 2129133* Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> C08L 23/02. Материал для защитных покрытий строительных сооружений и конструкций и способ его получения / А. Н. Крючков, М. И. Кнунянц, А. А. Бурбело, Г. П. Гончарук ; заявитель и патентообладатель Ин-т синтетич. полимер. материалов РАН. — № 96108551/63 ; заявл. 25.04.96 ; опубл. 20.04.99, Бюл. № 11.

217. *Маленко К. С.* Некоторые конструктивно-технологические особенности процесса каландрования полимерных материалов / К. С. Маленко // *Хімічна промисловість України*. — 1999. — № 4, додаток. — С. 129—133.

218. *Шаповал Ю. Н.* Оптимизация формования и охлаждения тонких профильных полимерных лент в экструзионно-валковом способе их производства / Ю. Н. Шаповал, В. В. Свиначев // *Пластические массы*. — 2005. — № 6. — С. 38—40.

219. *Сыкалов Г. В.* Распределение температур в процессе каландрования полимеров / Г. В. Сыкалов, В. Н. Красовский, А. М. Воскресенский // *Известия Волгоградского гос. техн. ун-та*. — 2004. — № 2. — С. 95—99.

220. *Luther S.* Berücksichtigung der freien Knetoberfläche beim Berechnen von Strömungsfeldern im Kalanderspalt : Doktor-Ingenieurin Dissertation / Luther Sabine. — Hamburg, 2003. — 102 s.

221. *Татарников А. А.* Обобщенная математическая модель производительности напорной зоны червяка / А. А. Татарников, Л. В. Буртелов // *Пластические массы*. — 2004. — № 4. — С. 50—52.

222. *Фридман М. Л.* Математическое моделирование одношнековых экструзионных машин : [обзор. информ.] / М. Л. Фридман, С. Н. Михайлов, Д. М. Мухаметгалеев. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1988. — 33 с. — (Серия ХМ-2 «Оборудование для переработки пластмасс и резины»).

223. *Скульский О. И.* Численное моделирование одночервячных экструдеров / О. И. Скульский // *Пластические массы*. — 1997. — № 8. — С. 39—44.

224. *Татарников А. А.* Влияние расхода утечки на процесс переработки резиновой смеси в напорной зоне червячной машины / А. А. Татарников, Л. В. Буртелов, Д. Б. Горбунов // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. — 2005. — № 4. — С. 7—9.

225. *Липин А. Г.* Реакционная экструзия полиметилметакрилата / А. Г. Липин, А. А. Моторин, С. В. Федосов // *Химия и химическая технология*. — 2002. — Т. 45,

Вып. 2. — С. 69—73.

226. *Щербинин А. Г.* Пространственная математическая модель одночервячного пластицирующего экструдера. Сообщ. 1 : Математическая модель процесса тепломассопереноса полимера в канале экструдера / А. Г. Щербинин, Н. М. Труфанова, В. И. Янков // Пластические массы. — 2004. — № 6. — С. 38—41.

227. *Моделирование* работы экструзионного оборудования для переработки полимерных материалов / Б. В. Бердышев, М. В. Дергачев, И. В. Скопинцев, В. К. Скуратов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2002. — № 10. — С. 3—5.

228. *Радченко Л. Б.* Моделювання неізотермічних процесів переробки термопластів методом екструзії / Л. Б. Радченко // Хімічна промисловість України. — 1999. — № 4. — С. 40—44.

229. *Силенко А. А.* Разработка математической модели движения расплава в экструдере / А. А. Силенко, Д. А. Бобров // Химия и хим. технология. — 2006. — Т. 49, Вып. 1. — С. 79—81.

230. *Yu Quanping.* Development of a helical coordinate system and its applications to analysis of polymer flow in screw extruders. Part II : A helical channel model for single screw extruders / Quanping Yu, Guo-Hua Hu // Polym. Eng. and Sci. — 1998. — Vol. 38, N 5. — P. 819—830.

231. *Zhu Linjie.* Experimental investigation of polymer pellets melting mechanisms in corotating twin-screw extrusion / Linjie Zhu, Xiaozheng Geng // Adv. Polym. Technol. — 2002. — Vol. 21, N 3. — P. 188—200.

232. *Thibault F.* A numerical model for single screw extrusion with poly(vinyl chloride) (PVC) resins / F. Thibault, P. A. Tanguy, D. Blouin // Polym. Eng. and Sci. — 1994. — Vol. 34, N 18. — P. 1377—1386.

233. *Chang Rong-Yeu.* The hybrid FEM/FDM computer model for analysis of the metering section of a single-screw extruder / Rong-Yeu Chang, Kuen-Jang Lin // Polym. Eng. and Sci. — 1995. — Vol. 35, N 22. — P. 1748—1757.

234. *Chen L.* Residence time distribution in non-intermeshing counter-rotating twin-screw extruders / L. Chen, G. H. Hu, J. T. Lindt // Polym. Eng. and Sci. — 1995. — Vol. 35, N 7. — P. 598—603.

235. *Karwe M. V.* Velocity measurements in the nip region of a co-rotating twin-screw extruder using laser doppler anemometry / M. V. Karwe, S. Bakalis, V. Sernas // Adv. Polym. Technol. — 1997. — Vol. 16, N 2. — P. 97—104.

236. *Wong A. C.-Y.* Qualitative study on untermeshing co-rotating twin screw extrusion using novel visual technique / A. C.-Y. Wong, F. Zhu, T. Liu // Plast., Rubber and Compos. Process. and Appl. — 1997. — Vol. 26, N 6. — P. 271—277.

237. *Радченко Л. Б.* Исследование экструдеров с жесткой характеристикой. Сообщ. 1 / Л. Б. Радченко, Н. П. Швед // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. — К. : Техніка, 1983. — Вып. 38. — С. 8—12.

238. *Радченко Л. Б.* Исследование экструдеров с жесткой характеристикой. Сообщ. 2 / Л. Б. Радченко, Н. П. Швед, М. Д. Шум // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. — К. : Техніка, 1983. — Вып. 38. — С. 12—16.

239. *Радченко Л. Б.* Исследование экструдеров с жесткой характеристикой. Сообщ. 3 / Л. Б. Радченко, Н. П. Швед // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. — К. : Техніка, 1984. — Вып. 39. — С. 24—26.

240. *Лукач Ю. Е.* Тенденции создания экструзионного оборудования / Ю. Е. Лукач, Л. Б. Радченко // «Полимермаш-91» : всесоюз. научн.-техн. конф., (16—19 окт. 1991 г.) : тез. докл. — К. : НПО «Большевик», 1991. — С. 6—8.

241. Лукач Ю. Е. Современные методы расчета и оптимизация машин / Ю. Е. Лукач, Л. Б. Радченко // «Реология и оптимизация процессов переработки полимеров» : всесоюз. науч.-техн. конф., (18—19 нояб. 1989 г.) : тез. докл. — Ижевск, 1989. — Ч. 2. — С. 169.
242. Радченко Л. Б. Червячный пресс с комбинированными рабочими органами / Л. Б. Радченко, П. П. Демин, Л. Б. Алтайская // Химическое и нефтяное машиностроение. — 1985. — № 2. — С. 8—10.
243. Кузьяев И. М. Моделирование процессов охлаждения гранул при пневмоэкструзионном гранулировании полимеров / И. М. Кузьяев, В. И. Сытар, В. К. Кулинич // Вопросы химии и химической технологии. — 2004. — № 1. — С. 191—197.
244. *Intenzifikace chlazení vytlačovaných trubek větších rozměrů* // *Plasty a kauč.* — 1999. — Vol. 36, N 12. — P. 369.
245. *Оборудование для охлаждения и усадки профилированных резиновых заготовок* : [обзор. информ.] / В. И. Коновалов, Л. В. Прудник, А. Г. Постернак, В. Н. Шашков. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1988. — 41 с. — Серия ХМ-2 «Оборудование для переработки пластмасс и резины»).
246. *Битюков В. К.* Подача и охлаждение полосовых полимерных материалов : [обзор. информ.] / В. К. Битюков, В. Н. Колодежнов, Л. М. Сырицын. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1990. — 40 с. — 76 с. — (Серия ХМ-2 «Оборудование для переработки пластмасс и резины»).
247. *Математическая модель процесса охлаждения полимерной пленки на барабане с переменными граничными условиями* / Л. Г. Воронин, Л. Р. Зейгермахер, Ю. Е. Лукач [и др.]. — К, 1986. — 16 с. — Деп. в УкрНИИТИ 24.11.86, № 2760-Ук96.
248. *Michaeli W.* Simulation der Abkühlung bei der Plattenextrusion / W. Michaeli, F. Ohlendorf // *Kunststoffe.* — 2000. — Bd 90, N 2. — S. 50.
249. *Битюков В. К.* Основные методы расчета современного оборудования для подачи и охлаждения полимерного материала : [обзор. информ.] / В. К. Битюков, В. Н. Колодежнов, Л. М. Сырицын. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. — 40 с. — (Серия ХМ-2 «Оборудование для переработки пластмасс и резины»).
250. *Горобець В. Г.* Спряжений теплообмін полімерних плівок, охолоджуваних на барабані / В. Г. Горобець // *Доповіді НАН України.* — 2001. — № 7. — С. 87—94.
251. *Розробка алгоритму для розв'язання задач теплопереносу при переробці полімерних матеріалів з використанням пакету MathCad* / І. М. Кузьяев, В. І. Ситар, А. М. Дудка [та ін.] // *Вопросы химии и химической технологии.* — 2003. — № 1. — С. 157—162.
252. *Лукач Ю. Е.* Алгоритм расчета устройств для термообработки изделий из термопластов : учеб. пособие / Ю. Е. Лукач, С. И. Доброногова, Л. И. Ружинская. — К. : КПИ, 1984. — 84 с.
253. *Шевчук В. А.* Моделирование и расчет теплопереноса в системе тело — многослойное покрытие [Электронный ресурс] / В. А. Шевчук // V Минск. междунар. форум по тепломассообмену, (Минск, 24—28 мая 2004 г.) : труды. — Минск : ГНУ «ИТМО им. А.В. Лыкова» НАНБ, 2004.
254. *Вендин С. В.* К расчету нестационарной теплопроводности в многослойных объектах при граничных условиях третьего рода / С. В. Вендин // *Инженерно-физ. журн.* — 1993. — 65, № 2. — С. 249—250.
255. *Переработка пластмасс* : справ. пособие / под ред. В. А. Брагинского. — Л. : Химия, 1985. — 296 с.
256. *Ануфриев В. А.* Полимерная альтернатива: преимущества без недостатков / В. А. Ануфриев // *Инженерные сети из полимерных материалов.* — № 3. — 2003. — С. 12—14.

257. *Каган Д. Ф.* Многослойные и комбинированные пленочные материалы / Д. Ф. Каган, В. Е. Гуль, Л. Д. Самарина. — М. : Химия, 1989. — 288 с.
258. *Niemeiver H.* Extrusion von Folien und Platten / H. Niemeiver // *Kunststoffe.* — 2001. — Bd 91, N 9. — S. 186—200.
259. *Пат. 6265055* США, МПК<sup>7</sup> B32B 27/32. Multilayer stretch cling film / D. Simpson, T. Jones. — № 19990419009 (US) ; application date 13.10.99 ; publication date 24.07.01 ; priority 13.10.99, № 19990419009 (US).
260. *Пат. 2186685* Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> B29D 23/00. Способ изготовления армированных трехслойных пластмассовых труб / В. Н. Никифоров, В. А. Мухаметкулов, В. Т. Бисеров, А. З. Идрисов ; заявитель ОАО «Запсибгазпром». — № 2000109399/12 ; заявл. 14.04.00 ; опубл. 20.02.02, Бюл. № 22.
261. *Використання* твердих відходів як наповнювачів полімерних композиційних матеріалів / М. В. Сезонов, Г. Л. Рябцев, І. О. Мікульонок, Ю. Ю. Лукач // *Екологія. Людина. Суспільство : II всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 11—12 трав. 2000 р.)* : зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2000. — С. 145—146.
262. *Сезонов М. В.* Утилізація гумовмісних відходів / М. В. Сезонов, І. О. Мікульонок // *Екологія. Людина. Суспільство : IV міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 14—16 трав. 2001 р.)* : зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2001. — С. 162—163.
263. *Сезонов М. В.* Утилізація полімервмісних відходів / М. В. Сезонов, І. О. Мікульонок, Г. Л. Рябцев // *Екологія. Людина. Суспільство : IV міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 14—16 трав. 2001 р.)* : зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2001. — С. 163—164.
264. *Сезонов М. В.* Обладнання для подрібнювання полімервмісних матеріалів / М. В. Сезонов, І. О. Мікульонок, Ю. Ю. Лукач // *Композиционные материалы : 2-я Междунар. науч.-техн. конф., (Киев, 5—7 июня 2001 г.)* : сб. тр. — К. : НТУУ «КПИ», 2001. — С. 113—114.
265. *Сезонов М. В.* Дослідження властивостей гумонаповнених полімерних матеріалів і виробів з них / М. В. Сезонов, І. О. Мікульонок, О. О. Вуйко [Електронний ресурс] // *Екологія. Людина. Суспільство : V міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 13—15 трав. 2002 р.)* : зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2002. — С. 547—548. — 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). — Заголовок з титул. екрану.
266. *Прогресивне* обладнання для механічного руйнування полімер- та еластомервмісних відходів / В. О. Вовк, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, М. В. Сезонов // *Екологія. Людина. Суспільство : VI міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 14—17 трав. 2003 р.)* : зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2003. — С. 113—114.
267. *Мікульонок І. О.* Ефективне обладнання для руйнування відходів на основі полімерів та еластомерів / І. О. Мікульонок, Л. П. Микитенко // *Композиционные материалы в промышленности («Славполиком»)* : 24-я междунар. конф. и выст., (Ялта, 31 мая — 4 июня 2004 г.) : материалы. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2004. — С. 58.
268. *Рябцев Г. Л.* Полімери в пакуванні: Стан та шляхи вдосконалення / Г. Л. Рябцев, І. О. Мікульонок // *«Новітні технології пакування»* : наук.-практ. конф., (Київ, 3 берез. 2005 р.) : матеріали (додаток до журналу «Упаковка»). — К. : МОН України, 2005. — С. 25—36.
269. *Кохан Г. І.* Ефективне валкове обладнання для переробки композитних термопластів / Г. І. Кохан, І. О. Мікульонок // *Екологія. Людина. Суспільство : IX міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 17—19 трав. 2006 р.)* : зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2006. — С. 90.

270. Радченко Н. Л. Ефективне екструзійне обладнання для переробки композитних термопластів / Н. Л. Радченко, І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко // Екологія. Людина. Суспільство : IX міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 17—19 трав. 2006 р.) : зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2006. — С. 118.

271. Ракицька Г. В. Тенденції утилізації полімервмісних відходів / Г. В. Ракицька, І. О. Мікульонок // Екологія. Людина. Суспільство : X міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 16—20 трав. 2007 р.) : зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2007. — С. 151.

272. Мікульонок І. О. Класифікація термопластичних композитних матеріалів та їхніх наповнювачів / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко // Композиционные материалы в промышленности («Славполиком») : 27-я междунар. конф. и выст., (Ялта, 28 мая — 1 июня 2007 г.) : материалы. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2007. — С. 146—149.

273. Микулёнок И. О. Тенденции утилизации полимерных отходов / И. О. Микулёнок, Л. Б. Радченко // Экологические проблемы промышленных мегаполисов : IV междунар. научн.-практ. конф., (Москва, 5—7 июня 2007 г.) : сб. тр. — М. : МГУИЭ, 2007. — С. 190—192.

274. Рябцев Г. Л. Світові тенденції розвитку ринку полімерних паковань: що вони означають для України / Г. Л. Рябцев, И. О. Микулёнок // Пакувальна індустрія України (стан та перспективи) : наук.-практ. конф., (Алушта, 22—25 трав. 2007 г.) : матеріали. — Додаток до часопису «Упаковка». — 2007. — № 3. — К., 2007. — С. 52—62.

275. Справочник по пластическим массам : в 2-х кн. / под ред. В. М. Катаева, В. А. Попова, Б. И. Сажина. — М. : Химия, 1975.

276. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров : справочник / Х. Уонг ; пер с англ. В. В. Яковлева и В. И. Колядина. — М. : Атомиздат, 1979. — 216 с.

277. Мікульонок І. О. Проектування теплової ізоляції обладнання хімічних виробництв : навч. посіб. — К. : Наук. думка, 1999. — 152 с.

278. Шорин С. Н. Теплопередача / С. Н. Шорин. — М. : Высш. шк., 1964. — 490 с.

279. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики / Г. И. Марчук. — М. : Наука, 1987. — 534 с.

280. Набор программ для ЭЦВМ «МИР». — К. : Наук. думка, 1973. — 107 с.

281. Демидович Б. П. Численные методы анализа / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. — М. : Наука, 1967. — 368 с.

282. 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.

283. Краскевич В. Е. Численные методы в инженерных исследованиях / В. Е. Краскевич, К. Х. Зеленский, В. И. Гречко. — К. : Вища шк., 1986. — 263 с.

284. Мікульонок І. О. Неперервні виробы з термопластичних композитних матеріалів. Основні принципи моделювання процесів одержання / І. О. Мікульонок // Хімічна промисловість України. — 2007. — № 2. — С. 36—39.

285. Мікульонок І. О. Розроблення теоретичних засад проектування технологічних ліній для переробки промислових і побутових відходів полімерів / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : 7-я междунар. пром. конф., (Славское, 12—16 февр. 2007 г.) : материалы. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2007. — С. 146—147.

286. Мікульонок І. О. Загальні принципи моделювання процесів переробки термопластичних полімерів і матеріалів на їхній основі / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко // Эф-

фективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціала в сучасних умовах : 8-я міжнарод. пром. конф., (Славське, 11—15 февр. 2008 г.) : матеріали. — К. : УІЦ «Наука. Техніка. Технологія», 2008. — С. 129—130.

287. Мікульонок І. О. Моделювання процесів та обладнання переробки термопластичних матеріалів на основі вторинної сировини / І. О. Мікульонок // Композиційні матеріали в промисловості : 28-я міжнарод. конф. і вист., (Ялта, 26—30 мая 2008 г.) : матеріали. — К. : УІЦ «Наука. Техніка. Технологія», 2008. — С. 253—254.

288. Радченко Л. Б. Метод розрахунку температурних полів під час переробки полімерних композицій в екструдері / Л. Б. Радченко, Я. Г. Двойнос, В. Ю. Шатило // Хімічна промисловість України. — 1999. — № 3. — С. 28—31.

289. Микулёнок И. О. Некоторые аспекты проектирования и моделирования червячных экструдеров / И. О. Микулёнок, Л. Б. Радченко, Н. П. Швед // Экологические и ресурсосбережение. — 2008. — № 1. — С. 68—73.

290. Микулёнок И. О. Некоторые аспекты проектирования и моделирования червячных экструдеров / И. О. Микулёнок, Л. Б. Радченко, Н. П. Швед // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : 8-я международ. пром. конф., (Славское, 11—15 февр. 2008 г.) : материалы. — К. : УІЦ «Наука. Техніка. Технологія», 2008. — С. 131—132.

291. Константинов В. Н. Определение производительности двухчервячных экструдеров / Константинов В. Н., Левин А. Н. // Химическое и нефтяное машиностроение. — 1962. — № 3. — С. 18—22.

292. Константинов В. Н. Влияние конструкции червяков на производительность многочервячных экструдеров / Константинов В. Н. // Химическое и нефтяное машиностроение. — 1964. — № 2. — С. 21—26.

293. Войтушенко П. А. Исследование течения расплава полимера в винтовых каналах двухчервячного экструдера / П. А. Войтушенко // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. — К. : Техніка, 1986. — Вып. 43. — С. 7—11.

294. Радченко Л. Б. Моделювання процесу двочерв'ячної екструзії. 1 : Екструзія в умовах різноспрямованого обертання черв'яків / Л. Б. Радченко, І. О. Мікульонок, В. О. Новік // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — № 3. — С. 75—83.

295. Моделювання процесу двочерв'ячної екструзії. 2 : Екструзія в умовах односпрямованого обертання черв'яків / О. Г. Зубрій, І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко, О. О. Радчук // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — № 5. — С. 39—43.

296. Лукашова В. В. Моделювання процесу плавлення в одночерв'ячному екструдері / В. В. Лукашова, І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко // Упаковка. — 2005. — № 4. — С. 23—27, № 5. — С. 35—37.

297. Моделювання процесу неізотермічного живлення одночерв'ячного екструдера / О. С. Будзинська, В. В. Лукашова, І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2007. — № 1. — С. 49—57.

298. Grünschloß E. Einfluss des Schneckenpiel auf die Verfahrensparameter bei Einschnecken – Plastifizier – Extrudern / E. Grünschloß // Kunststoffe. — 1987. — Bd 77, N 9. — S. 888—892.

299. Лукашова В. В. Черв'ячна екструзія. Узагальнена математична модель / В. В. Лукашова, І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко // Хімічна промисловість України. — 2007. — № 1. — С. 32—35.

300. Горовець А. В. Дослідження процесу теплообміну у двочерв'ячному екструдері / А. В. Горовець, Л. Б. Радченко, І. О. Мікульонок // Екологія. Людина. Суспільство : VIII міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 11—13 трав.

2005 р.) : зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2005. — С. 65.

301. Мікульонок І. О. Моделювання процесу одержання полімерних композитних матеріалів з дисперсним наповнювачем у каскадному дисково-двочерв'ячному екструдері / І. О. Мікульонок, В. О. Новік, Л. Б. Радченко // Композиционные материалы в промышленности («Славполиком») : 25-я междунар. конф. и выст., (Ялта, 30 мая — 3 июня 2005 г.) : материалы. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2005. — С. 134—135.

302. Мікульонок І. О. Моделювання процесів екструзійної переробки полімерних композитних матеріалів / І. О. Мікульонок, В. О. Новік, Л. Б. Радченко // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : 6-я пром. конф., (Славское, 20—24 февр. 2006 г.) : материалы. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2006. — С. 154—156.

303. Лукашова В. В. Теоретичне дослідження процесу черв'ячної екструзії / В. В. Лукашова, І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко // «Новітні технології пакування» : III наук.-практ. конф., (Київ, 1 берез. 2007 р.) : матеріали (додаток до журналу «Упаковка»). — К. : МОН України, 2007. — С. 60—68.

304. Пат. 2003466 Российская Федерация, МПК<sup>5</sup> В29В 47/52. Экструдер для переработки полимерных материалов / В. Б. Думенко, В. Л. Зайцев, О. Е. Зелинский, И. О. Микулёнок, М. Д. Тыгипко; заявитель и патентообладатель Производств.-коммер. фирма «ПолиЭк». — № 5017685/05; заявл. 20.12.91; опубл. 30.11.93, Бюл. № 43—44.

305. Пат. 2003467 Российская Федерация, МПК<sup>5</sup> В29В 47/52. Червячно-дисковый экструдер / О. Е. Зелинский, И. О. Микулёнок, А. И. Рог, А. И. Сумский, М. Д. Тыгипко ; заявитель и патентообладатель Производств.-коммер. фирма «ПолиЭк». — № 5028753/05 ; заявл. 25.02.92 ; опубл. 30.11.93, Бюл. № 43—44.

306. Пат. 15657 Україна, МПК<sup>5</sup> В29С 47/52. Экструдер для переробки полімерних матеріалів / В. Б. Думенко, В. Л. Зайцев, О. С. Зелинський, І. О. Мікульонок, М. Д. Тигіпко ; заявник і патентовласник Виробн.-комер. фірма «ПоліЕк». — № 94321622 ; заявл. 28.04.93 ; опубл. 30.06.97, Бюл. № 3.

307. Радченко Н. Л. Эффективне екструзійне обладнання для переробки композитних термопластів / Н. Л. Радченко, І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко // Екологія. Людина. Суспільство : IX міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 17—19 трав. 2006 р.) : зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2006. — С. 118.

308. Радченко Л. Б. Управление интенсивностью и качеством подготовки расплава полимера / Л. Б. Радченко, А. Д. Петухов. — К. : КПИ, 1987. — 36 с. — Деп. в УкрНИИН-ТИ 01.07.87, № 1821-Ук87.

309. Слѣзкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости / Н. А. Слѣзкин. — М. : Гостехиздат, 1955. — 519 с.

310. Ицкович Г. М. Руководство к решению задач по сопротивлению материалов : учеб. пособие для вузов / Г. М. Ицкович, Л. С. Минин, А. И. Винокуров ; под ред. Л. С. Минина. — [3-е изд., перераб. и доп.]. — М. : Высш. шк., 2001. — 592 с.

311. Мікульонок І. О. Енергосилові параметри процесу приготування полімерних композиційних матеріалів у змішувачі з овальними роторами / І. О. Мікульонок // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2004. — № 1. — С. 33—39.

312. Вознюк В. Т. Енергосилові параметри процесу приготування псевдопластичних композицій у змішувачі з овальними роторами / В.Т. Вознюк, І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко // Наукові праці ОНАХТ. — 2007. — Вип. 30, Т. 1. — С. 68—74.

313. Вознюк В. Т. Визначення часу приготування полімерних композицій у роторно-му змішувачі закритого типу / В. Т. Вознюк, І. О. Мікульонок // Вісник НТУУ «КПІ». Напрямок «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». — 2008. — № 2. — С. 27—31.

314. *Машины и аппараты резинового производства* / [Б. И. Андрашников, Л. М. Антонов, Д. М. Барсков и др.]; под ред. Д. М. Барскова. — М. : Химия, 1975. — 600 с.
315. *Мікульонок І. О.* Термопластичні композиційні матеріали у міжвалковому проміжку валкових машин. Визначення границь зони деформування / І. О. Мікульонок // *Хімічна промисловість України*. — 2004. — № 5. — С. 51—54.
316. *Мікульонок І. О.* Енергосилові параметри процесу формування термопластичних композиційних матеріалів у валкових машинах / І. О. Мікульонок // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. — 2003. — № 5. — С. 70—76.
317. *Ружинская Л. И.* Исследование геометрической формы и линейной скорости свободной поверхности вращающегося запаса при каландровании полимеров / Л. И. Ружинская, И. О. Микулёнок, В. Г. Календюк // *Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб.* — К. : Техніка, 1989. — Вып. 50. — С. 26—29.
318. *Мікульонок І. О.* Полімервмісні матеріали. Визначення часу вальцювання / І. О. Мікульонок, Г. В. Ракицька // *Хімічна промисловість України*. — 2006. — № 6. — С. 24—27.
319. *Мікульонок І. О.* Енергосилові параметри процесу калібрування листів з полімерних композиційних матеріалів у гладильному каландрі / І. О. Мікульонок, Ю. Ю. Лукач, Л. І. Ружинська // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. — 2003. — № 6. — С. 86—92.
320. *Михеев М. А.* Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. — [2-е изд., стереотип.]. — М. : Энергия, 1977. — 344 с.
321. *Пат. 34562 U* Україна, МПК(2006) В29В 7/00. Роторний змішувач / І. О. Мікульонок, В. Т. Вознюк ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u200804640 ; заявл. 10.04.08 ; опубл. 11.08.08, Бюл. № 15.
322. *Вознюк В. Т.* Модернізація роторного змішувача закритого типу / В. Т. Вознюк, І. О. Мікульонок // *Екологія. Людина. Суспільство : XI міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 13—18 трав. 2008 р.) : зб. тез доп.* — К. : НТУУ «КПІ», 2008. — С. 230—231.
323. *Мікульонок І. О.* Енергосилові параметри процесу приготування полімерних композитних матеріалів у змішувачі з овальними роторами / І. О. Мікульонок // *Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики : 13-я международная конф., (Ялта, 3—7 окт. 2005 г.) : материалы*. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2005. — С. 105—107.
324. *Voznjuk V. T.* Energy-power parameters of compositions preparation process in the blender with oval rotors / V. T. Voznjuk, I. O. Mikulyonok, L. B. Radchenko // *Problems of Industrial Heat Engineering : V-th Intern. Conf., (Kyiv, May 22—26, 2007) : abstracts*. — Kyiv : Nat. Acad. of Sciences of Ukraine, 2007. — P. 164—165.
325. *Грановська О. Б.* Формування термопластичних композиційних матеріалів у валкових машинах / О. Б. Грановська, Н. А. Шкарупа, І. О. Мікульонок // *Екологія. Людина. Суспільство : VII міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 13—15 трав. 2004 р.) : зб. тез доп.* — К. : НТУУ «КПІ», 2004. — С. 101—102.
326. *Мікульонок І. О.* Енергосилові параметри процесу калібрування листів з полімерних композиційних матеріалів у гладильному каландрі / І. О. Мікульонок, Ю. Ю. Лукач // *Композиционные материалы в промышленности («Славполиком») : 24-я международная конф. и выст., (Ялта, 31 мая — 4 июня 2004 г.) : материалы*. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2004. — С. 59—61.
327. *Мікульонок І. О.* Визначення часу вальцювання полімервмісних матеріалів / І. О. Мікульонок, Г. В. Ракицька // *Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : 7-я международная пром. конф., (Славское,*

12—16 февр. 2007 г.) : материалы. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2007. — С. 148—149.

328. *Кутателадзе С. С.* Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. — Новосибирск : Наука, 1970. — 660 с.

329. *Лыков А. В.* Тепломассообмен : справочник / А. В. Лыков. — [2-е изд., перераб. и доп.]. — М. : Энергия, 1978. — 480 с.

330. *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.

331. *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.

332. *Исследование теплообмена в процессах гранулирования полимеров* / И. О. Микулёнок, Л. Б. Радченко, Н. Л. Радченко, Н. П. Швед // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2007. — № 2. — С. 61—68.

333. *Пат. 18744 U* Україна, МПК(2006) B29C 35/00. Пристрій для охолодження довгомірних виробів / І. О. Мікульонок ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u200606030 ; заявл. 31.05.06 ; опубл. 15.11.06, Бюл. № 11.

334. *Микитенко Л. П.* Моделювання термообробки листових композиційних матеріалів / Л. П. Микитенко, І. О. Мікульонок // Екологія. Людина. Суспільство : VII міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, (Київ, 13—15 трав. 2004 р.) : зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2004. — С. 152—153.

335. *Мікульонок І. О.* Моделювання процесів екструзійної переробки полімерних композитних матеріалів / І. О. Мікульонок, Л. П. Микитенко // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : 5-я пром. конф., (Славское, 21—25 февр. 2005 г.) : материалы. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2005. — С. 253—255.

336. *Мікульонок І. О.* Дослідження теплообміну в процесах гранулювання полімерів / І. О. Мікульонок, Н. Л. Радченко, М. П. Швед // Композиционные материалы в промышленности : 26-я междунар. конф. и выст., (Ялта, 29 мая — 2 июня 2006 г.) : материалы. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2006. — С. 149—152.

337. *Буртна І. А.* Процес одержання термопластичних композитних матеріалів на вальцях неперервної дії / І. А. Буртна, І. О. Мікульонок, Л. І. Ружинська // Вісник КНУТД. — 2006. — № 2. — С. 78—83.

338. *Маракулін О. О.* Дослідна установка на базі каскадного двоцілинного черв'ячно-дискового екструдера / О. О. Маракулін, І. О. Мікульонок, М. П. Швед // Хімічна промисловість України. — 2008. — № 3. — С. 58—60.

339. *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.

340. *Ситовий* аналіз. Частина 1. Методи з використанням контрольних сит з дротяної тканини і перфорованих металевих листів : ДСТУ ГОСТ ИСО 2591-1:2004. — [Чинний від 2004-07-01]. — К. : Держспоживстандарт України, 2004. — 16 с. — (Національний стандарт України).

341. *Определение реологических констант перерабатываемого полимера на лабораторном валковой установке* / Р. Г. Мирзоев, В. Н. Красовский, Г. П. Доброхотова [и др.] // Машины и технология переработки полимеров : межвед. сб. научн. тр. — Л. : ЛТИ, 1969. — С. 56—61.

342. *Ardichvilli G.* Versuch der rationalen Bestimmung der Bombierung von Kalanderswal-

zen / G. Ardichvilli // Kautschuk. — 1938. — Bd 14, N 23. — S. 23—25.

343. *Вироби* погонажні з деревинно-полімерних матеріалів : ТУ 559/46-13555662-01-95. — [Чинні від 1995-03-01]. — Житомир : Виробнича філія «Композит» ВАТ «Житомир-головапостач», 1995. — 17 с. — (Нормативний документ. Технічні умови).

344. *Пластмассы*. Метод испытания на растяжение : ГОСТ 11262-80. — [Введ. 1980-12-01]. — М. : Изд-во стандартов, 1986. — 14 с. — (Межгосударственный стандарт).

345. *Пластмассы*. Метод определения ударной вязкости по Шарпи : ГОСТ 4647-80. — [Введ. 1980-12-25]. — М. : Изд-во стандартов, 1998. — 6 с. — (Межгосударственный стандарт).

346. *Пластмассы*. Метод испытания на статический изгиб : ГОСТ 4648-71. — [Введ. 1973-01-01]. — М. : Изд-во стандартов, 1992. — 10 с. — (Межгосударственный стандарт).

347. *Пластмассы*. Методы определения водопоглощения : ГОСТ 4650-80. — [Введ. 1980-12-01]. — М. : Изд-во стандартов, 1981. — 5 с. — (Межгосударственный стандарт).

348. *Система* стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения : ГОСТ 12.1.044-89. — [Введ. 1991-01-01]. — М. : Изд-во стандартов, 1990. — 143 с. — (Межгосударственный стандарт).

349. *Маракулін О. О.* Дослідження процесу одержання полімерних композиційних матеріалів на каскадному дисково-черв'ячному екструдері / О. О. Маракулін, І. О. Мікульонок, М. П. Швед // Композиционные материалы в промышленности («Славполиком») : 28-я междунар. конф. и выст., (Ялта, 28 мая — 1 июня 2007 г.) : материалы. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2008. — С. 250.

350. *Пат. 31011 А* Україна МПК<sup>6</sup> В29С 47/00. Лінія для виробництва листових і погонажних виробів з полімернаповнених композиційних матеріалів / Ю. Ю. Лукач, П. М. Магазій, І. О. Мікульонок, Г. Л. Рябцев ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 98073420 ; заявл. 01.07.98 ; опубл. 15.12.00, Бюл. № 7.

351. *Пат. 31919 А* Україна, МПК<sup>6</sup> В29С 47/00. Лінія для виробництва листових і погонажних виробів з полімернаповнених композиційних матеріалів / Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, М. В. Сезонов, В. П. Суханов (RU) ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 98116130 ; заявл. 19.11.98 ; опубл. 15.12.00, Бюл. № 7.

352. *Магазій П. М.* Модельні дослідження процесів переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини / П. М. Магазій, І. О. Мікульонок, Л. І. Ружинська // Наукові праці НТУУ «КПІ». — № 6. — 2008. — С. 60—67.

353. *Шашков І. В.* Валковое оборудование и технология процесса непрерывной переработки отходов плёночных термопластов : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (химическая промышленность)» / Шашков Иван Владимирович. — Тамбов, 2005. — 131 с.

354. *Пат. 13230 U* Україна, МПК(2006.01) В29В 7/56. Вальці для перероблення термопластичних матеріалів / І. О. Мікульонок, Л. І. Ружинська ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u200509568 ; заявл. 11.10.05 ; опубл. 15.03.06, Бюл. № 3.

355. *Процессы* и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование : учеб. пособие [для вузов] : в 5 т. — М. : Логос.

Т. 2 : Механические и гидромеханические процессы / [Д. А. Баранов, В. Н. Блиничев, А. В. Вязьмин и др.] ; под ред. А. М. Кутепова. — М. : Логос, 2002. — 600 с.

356. *Измельчение* отходов силоксановой резины методом упругодеформационного воздействия / О. А. Серенко, У. А. Мурадова, И. Б. Мешков [и др.] // Каучук и резина. — 2008. — № 3. — С. 24—27.

357. *Микулёнок И. О.* Особенности конструктивного исполнения роторных измельчителей для резино- и полимерсодержащих отходов (Обзор) / И. О. Микулёнок, Ю. Е. Лукач // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2007. — № 3. — С. 69—72.

358. *Пат. 53728* Україна, МПК<sup>7</sup> В29В 17/00. Пристрій для подрібнення матеріалів / В. Д. Біденко, В. М. Бондаренко, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, М. В. Сезонов ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 2000020552 ; заявл. 01.02.00 ; опубл. 17.02.03, Бюл. № 2.

359. *Пат. 54588* Україна, МПК<sup>7</sup> В29В 17/00. Пристрій для подрібнення матеріалів / О. М. Антонов, В. Д. Біденко, В. М. Бондаренко, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, М. В. Сезонов ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 2000095554 ; заявл. 28.09.00 ; опубл. 17.03.03, Бюл. № 3.

360. *Пат. 1673 U* Україна, МПК<sup>7</sup> В29В 17/00. Ротор подрібнювача / І. О. Мікульонок, А. С. Цертій ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 2002054189 ; заявл. 22.05.02 ; опубл. 17.03.03, Бюл. № 3.

361. *Пат. 28974 U* Україна, МПК(2006) В29В 17/00. Спосіб подрібнення гумових відходів / В. М. Бондаренко, І. О. Мікульонок, С. Г. Науменко ; заявники й патентовласники Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т» і ВАТ «НВП „Більшовик”». — № u200710148 ; заявл. 11.09.07 ; опубл. 25.12.07, Бюл. № 21.

362. *Малькевич Л. К.* Отходы деревообрабатывающей промышленности как наполнитель для кабельного пластиката / Л. К. Малькевич, Л. Я. Царик // ЖПХ. — 2006. — Т. 79, № 10. — С. 1715—1719.

363. *Пат. 22568 A* Україна, МПК<sup>6</sup> В29С 47/38. Екструдер для виготовлення композицій з полімерів та органічних наповнювачів / Ю. Ю. Лукач, Б. Л. Оситинський, Л. Б. Радченко, І. О. Мікульонок, Я. Г. Двойнос, П. М. Магазій ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 95010350 ; заявл. 24.01.95 ; опубл. 30.06.98, Бюл. № 3.

364. *Пат. 40481 A* Україна, МПК<sup>7</sup> В29С 47/76. Черв'ячний прес для перероблення термопластичних матеріалів / В. Д. Біденко, І. В. Бородін (RU), І. О. Мікульонок, М. В. Сезонов, В. П. Суханов (RU) ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 2001031580 ; заявл. 06.03.01 ; опубл. 16.07.01, Бюл. № 6.

365. *Пат. 42546 A* Україна, МПК<sup>7</sup> В01F 7/08. Двочерв'ячний прес / В. Д. Біденко, І. В. Бородін (RU), Н. В. Жидов (RU), І. О. Мікульонок, М. В. Сезонов, В. П. Суханов (RU) ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 2001032108 ; заявл. 30.03.01 ; опубл. 15.10.01, Бюл. № 9.

366. *Пат. 42573 A* Україна, МПК<sup>7</sup> В29С 47/38. Екструдер для виготовлення виробів з композицій на основі термопластичних полімерів і органічних наповнювачів / В. Д. Біденко, І. В. Бородін (RU), Н. В. Жидов (RU), І. О. Мікульонок, М. В. Сезонов, В. П. Суханов (RU) ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 2001042312 ; заявл. 06.04.01 ; опубл. 15.10.01, Бюл. № 9.

367. *Пат. 1241 U* Україна, МПК<sup>7</sup> В29С 47/74. Екструдер для перероблення термопластичних матеріалів / В. Д. Біденко, В. М. Бондаренко, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, М. В. Сезонов ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 2001075122 ; заявл. 18.07.01 ; опубл. 15.05.02, Бюл. № 5.

368. *Пат. 1672 U* Україна, МПК<sup>7</sup> В29В 7/82. Вузол підведення теплоносія до обертового порожнистого органа обладнання для перероблення полімер- і гумовмісних матері-

алів / І. О. Мікульонок; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 2002054187 ; заявл. 22.05.02 ; опубл. 17.03.03, Бюл. № 3.

369. Пат. 55829 А Україна, МПК<sup>7</sup> C08J 5/00. Спосіб одержання композицій на основі термопластичного полімеру й наповнювача з твердих відходів / І. О. Мікульонок, Ю. Ю. Лукач, М. В. Сезонов, В. О. Вовк. — № 2002075490 ; заявл. 04.07.2002 ; опубл. 15.04.2003, Бюл. № 4.

370. Пат. 24319 U Україна, МПК(2006) B29C 13/00. Спосіб переробки матеріалів на основі високомолекулярних сполук / І. О. Мікульонок ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u200701781 ; заявл. 20.02.07 ; опубл. 25.06.07, Бюл. № 9.

371. *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.

372. *Мікульонок І. О.* Матеріали і вироби, одержувані неперервним формуванням. Аналіз умов охолодження / І. О. Мікульонок // *Хімічна промисловість України*. — 2006. — № 4. — С. 33—37.

373. А. с. 1722852 СССР, МПК5 B29C 35/16. Устройство для охлаждения длинномерных изделий / С. А. Рошупкин, 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.

374. А. с. 1735036 СССР, МПК<sup>5</sup> B29C 47/88. Устройство для охлаждения длинномерных полимерных изделий / С. А. Рошупкин, И. О. Микулёнок, В. Д. Биденко (СССР) ; заявитель СКБполимермаш Киев. НПО «Большевик». — № 4816813/05 ; заявл. 23.04.1990 ; опубл. 23.05.1992, Бюл. № 19.

375. Пат. 1324 U Україна, МПК<sup>7</sup> B29C 35/16. Пристрій для охолодження довгомірних гнучких виробів / І. О. Мікульонок, І. М. Доценко ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 2001128362 ; заявл. 05.12.01 ; опубл. 15.07.02, Бюл. № 7.

376. Пат. 6595 U Україна, МПК<sup>7</sup> B29C 35/16. Пристрій для охолодження довгомірних виробів / І. О. Мікульонок, Л. П. Микитенко ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 20041008305 ; заявл. 13.19.04 ; опубл. 16.05.05, Бюл. № 5.

377. *Мікульонок І. О.* Моделювання термообробки погонажних композитних матеріалів / І. О. Мікульонок, Л. П. Микитенко // *Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : 5-я пром. конф., (Славское, 21—25 февр. 2005 г.) : материалы*. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2005. — С. 253—255.

378. *Мікульонок І. О.* Аналіз умов охолодження термопластичних матеріалів і виробів, одержуваних неперервним формуванням / І. О. Мікульонок // *Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики : 15-я междунар. конф., (Ялта, 1—5 окт. 2007 г.) : материалы*. — К. : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2007. — С. 32—34.

## ЗМІСТ

Вступ .....	3
Перелік умовних позначень, символів і скорочень.....	6
1. Тенденції розвитку методів, обладнання і процесів переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини.....	9
1.1. Використання полімерів та утилізація полімерних відходів .....	9
1.2. Класифікація термопластичних матеріалів та їх основні технологічні властивості.....	12
1.2.1. Класифікація термопластичних матеріалів .....	12
1.2.2. Теплофізичні й реологічні властивості термопластичних матеріалів .....	17
1.3. Аналіз основних методів рециклінгу полімерних відходів та обладнання для їх реалізації.....	23
1.4. Аналіз моделювання обладнання та процесів переробки термопластичних матеріалів .....	29
1.4.1. Переробка в роторних змішувачах .....	30
1.4.2. Переробка на валкових машинах .....	32
1.4.3. Переробка в черв'ячних екструдерах .....	35
1.4.4. Термообробка .....	40
1.5. Висновки і завдання досліджень.....	43
2. Загальні засади моделювання технологічних ліній для переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини.....	45
2.1. Вибір обладнання для комплектування технологічних ліній .....	45
2.2. Узагальнена математична модель процесів переробки.....	49
2.3. Основні принципи розв'язання узагальненої математичної моделі процесів переробки.....	55
2.4. Основні засади побудови і моделювання технологічних ліній .....	57
2.4.1. Загальні положення .....	57
2.4.2. Алгоритми розрахунку основного обладнання .....	58
2.4.3. Алгоритм розрахунку технологічної лінії на базі змішувально-валкового обладнання.....	68
2.5. Висновки .....	73
3. Моделювання екструзійного обладнання.....	74
3.1. Класифікація екструзійного обладнання і загальні засади математичного моделювання черв'ячних екструдерів .....	74
3.2. Узагальнена математична модель черв'ячної екструзії.....	76
3.2.1. Гідродинаміка і теплообмін в об'ємі одного витка нарізки черв'яка.....	76
3.2.2. Гідродинаміка і теплообмін у каналах змішувальних елементів двочерв'ячних екструдерів .....	89
3.3. Моделювання одночерв'ячних екструдерів .....	90
3.3.1. Особливості моделювання функціональних зон.....	90
3.3.2. Числове моделювання одночерв'ячних екструдерів .....	95
3.4. Моделювання двочерв'ячних екструдерів.....	102
3.4.1. Загальні положення .....	102
3.4.2. Екструдери з різноспрямованим обертанням черв'яків .....	104
3.4.3. Екструдери з односпрямованим обертанням черв'яків.....	113
3.5. Висновки .....	119
4. Моделювання змішувального і валкового обладнання.....	121
4.1. Класифікація змішувального обладнання і вибір показників якості процесу змішування .....	121
4.2. Моделювання роторних змішувачів .....	123
4.2.1. Загальні особливості моделювання.....	123
4.2.2. Ньютонівська модель рідини .....	123

4.2.3. Неньютонівська степенева модель рідини .....	129
4.2.4. Визначення тривалості змішування .....	135
4.2.5. Тепловий розрахунок змішувача .....	138
4.3. Моделювання валкових машин .....	139
4.3.1. Загальні особливості моделювання .....	139
4.3.2. Ньютонівська модель рідини .....	140
4.3.3. Визначення тривалості вальцювання .....	147
4.3.4. Моделювання переробки на гладильному каландрі .....	151
4.4. Висновки .....	160
5. Моделювання обладнання для термообробки .....	162
5.1. Класифікація обладнання для термообробки і загальні засади моделювання термообробки .....	162
5.2. Моделювання термообробки безперервних матеріалів і виробів .....	164
5.3. Моделювання теплообміну в процесах гранулювання .....	170
5.3.1. Процес охолодження гранул .....	170
5.3.2. Процес охолодження стренг .....	172
5.3.3. Числове моделювання процесу охолодження гранул .....	174
5.3.4. Числове моделювання процесу охолодження стренг .....	178
5.3.5. Експериментальні дослідження процесу охолодження стренг .....	181
5.4. Висновки .....	186
6. Експериментальні дослідження процесів переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини .....	187
6.1. Завдання експериментальних досліджень .....	187
6.2. Опис технологічної лінії та її основного обладнання .....	188
6.2.1. Склад технологічної лінії .....	188
6.2.2. Екструзійна установка .....	189
6.2.3. Валкова установка .....	191
6.2.4. Охолодний пристрій .....	192
6.3. Контрольовані фізичні величини і засоби їх вимірювань .....	193
6.4. Склад досліджуваних матеріалів .....	195
6.5. Дослідження процесу одержання ТпМ на екструзійній установці .....	195
6.5.1. Дослідження продуктивності .....	195
6.5.2. Дослідження тиску на виході з черв'ячного екструдера .....	197
6.5.3. Дослідження споживаної потужності .....	198
6.5.4. Визначення температурного режиму переробки .....	199
6.6. Дослідження процесу одержання ТпМ на валковій установці .....	201
6.6.1. Методика проведення досліджень .....	201
6.6.2. Оброблення експериментальних даних .....	202
6.6.3. Визначення властивостей перероблюваних матеріалів .....	203
6.6.4. Результати експерименту та їх аналіз .....	206
6.7. Дослідження процесу калібрування листового ТпМ на валковій установці .....	207
6.8. Дослідження процесу охолодження відкаліброваного листового ТпМ в охолодному пристрої .....	208
6.9. Показники якості одержаних зразків листових ТпМ .....	214
6.10. Висновки .....	215
7. Розробка енергоефективних обладнання та процесів для переробки термопластичних матеріалів .....	217
7.1. Обладнання для утилізації полімервмісних відходів .....	217
7.2. Способи одержання та переробки термопластичних матеріалів .....	226
7.3. Обладнання для термообробки безперервних матеріалів і виробів .....	229
7.4. Висновки .....	234
Висновки .....	236
Список використаної літератури .....	239



Наукове видання

**Мікульонок** Ігор Олегович

**ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСИ ПЕРЕРОБКИ  
ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ  
З ВИКОРИСТАННЯМ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ**

В авторській редакції

Темплан 2009 р., поз. 1-2-009