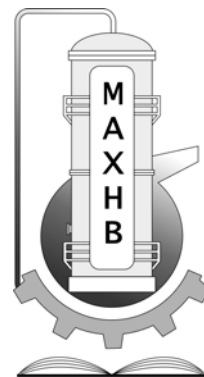


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



# ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЇ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА РУКАВНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ПЛІВКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

для студентів спеціальності  
«Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів»

Київ-2008

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

До 70-річчя інженерно-хімічного факультету  
і 80-річчя кафедри машин та апаратів  
хімічних і нафтопереробних виробництв

# **ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЇ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА РУКАВНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ПЛІВКИ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ**

для студентів спеціальності  
«Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів»

Київ  
НТУУ «КПІ»  
2008

Дослідження лінії для виробництва рукавної полімерної плівки : метод. вказівки до викон. лабораторної роботи для студентів спеціальності «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» (7.090220 і 8.090220) / Укл. : Радченко Л.Б., М. П. Швед, А. Р. Степанюк, І. О. Мікульонок. – К. : НТУУ «КПІ», 2008. – 44 с.

Навчальне видання

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЇ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА  
РУКАВНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ПЛІВКИ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

для студентів спеціальності  
«Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів»

Укладачі: *Радченко Леонід Борисович*, доктор техн. наук, професор  
*Швед Микола Петрович*, канд. техн. наук, доцент  
*Степанюк Андрій Романович*, канд. техн. наук, доцент  
*Мікульонок Ігор Олегович*, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний редактор *Я. М. Корнієнко*, д-р техн. наук, професор

Рецензент *О. Л. Сокольський*, канд. техн. наук, доцент

*За редакцією укладачів  
Надруковано з оригінал-макета замовника*

## ВСТУП

Полімерні плівки знаходять широке застосування в побуті, сільському господарстві та багатьох інших галузях промисловості. Найпоширенішим методом їх виробництва є так званий рукавний метод, за допомогою якого виробляються плівки товщиною від 5 до 200 мкм. При виробництві таких плівок значна увага приділяється процесам підготовки розплаву полімеру, формування та охолодження плівки, від яких значною мірою залежить її якість. Для регулювання цих параметрів в досліджуваній лінії застосована каскадна схема підготовки розплаву, яка включає дозатор гранул, дисковий екструдер та шестерінний насос. Всі складові схеми мають окремі приводи, що забезпечує гнучке управління процесом.

Метою дослідження лінії є вивчення її конструкції і роботи, експериментальне визначення основних параметрів підготовки розплаву, формування та охолодження плівки і порівняння цих параметрів з теоретичними розрахунками.

### 1. ПРИНЦИП РОБОТИ ЛІНІЇ

Принципова схема лінії зображена на рис.1 і включає: дисковий екструдер 7 з шнековим дозатором 6, шестерінний насос 5 типу НШ-20-К-0, кутову формуючу головку 4, кільце повітряного охолодження 3, приймально-тягнучий 2 та намотуючий пристрої, пульт управління лінією 8, шафу контролю та регулювання температур та електроавтоматики 9.

Гранули полімеру дозатором 6 подаються у воронку дискового екструдера 7, в якому здійснюється плавлення полімеру та його гомогенізація. Продуктивність лінії визначається продуктивністю дозатора, а якість переробки забезпечується зміною числа обертів та величини робочого зазору дискового екструдера. Одержаний розплав через перехідний канал подається в шестерінний насос 5, який згладжує пульсації продуктивності дискового екструдера і забезпечує стабільну подачу розплаву в формуючу головку 4 під тиском, необхідним для подолання її опору. Крім того, у насосі додатково відбувається гомогенізація розплаву.

Схема формуючої головки приведена на рис.2. Вона включає корпус 1, дорн 2, матрицю 3, регулюючі гвинти 4, фланець 5, яким головка з'єднується з перехідником насоса, нагрівач опору 6 та штуцер 7 для подачі повітря всередину рукава. Пройшовши через робочі канали, розплав полімеру формується у вигляді трубчатої заготовки з товщиною стінки 0.7мм. Під час запуску лінії до кінця трубчатої заготовки, яка з'явилась на виході головки, прив'язується тросик, попередньо пропущений між

гумованими валками тягнучого пристрою 6 (рис. 2). При включенні цих валків тросик починає підтягувати до них трубчасту заготовку, всередину якої через отвір у дорні головки розпочинають подачу повітря і одночасно включається зовнішнє охолодження повітрям, що подається вентилятором в охолоджуюче кільце 3. Після проходження кінця заготовки через валки 2 її заправляють у намотувальний пристрій 1 і, змінюючи далі подачу повітря всередину рукава, регулюють його роздув. Після досягнення заданого діаметра подача повітря всередину припиняється і в проміжку між голівкою та тягнучими валками залишається постійний його об'єм, який забезпечує роздув заготовки, що безперервно рухається, до необхідних розмірів. Охолоджений рукав складається за допомогою пластин у плоску форму, що попереджає утворення зморшок при захваті рукава тягнучими валками. При заданих продуктивності екструдера та діаметрі рукава товщина плівки регулюється шляхом зміни окружної швидкості тягнучих валків.

#### Технічна характеристика лінії.

Продуктивність при переробці поліетилену марок 15802-020,10802-020 , кг/год	до 30
Лінійна швидкість прийому рукава , м/хв	до 50
Діаметр рулона , мм	до 350
Екструдер дисковий ЕД 5,5/200	
діаметр диска , мм	200
число обертів диска , 1/хв	100 - 200
потужність двигуна , кВт	7
число заходів нарізки диска, мм	8
крок нарізки	128
Насос шестерінний НШ-20-К-0	
число обертів , 1/хв	5-30
число зубів	20
ширини зуба , мм	32
модуль , мм	2,25
потужність двигуна , кВт	2,2
Формуюча головка	
діаметр кільцевої щілини	110
кільцевий зазор , мм	0,7

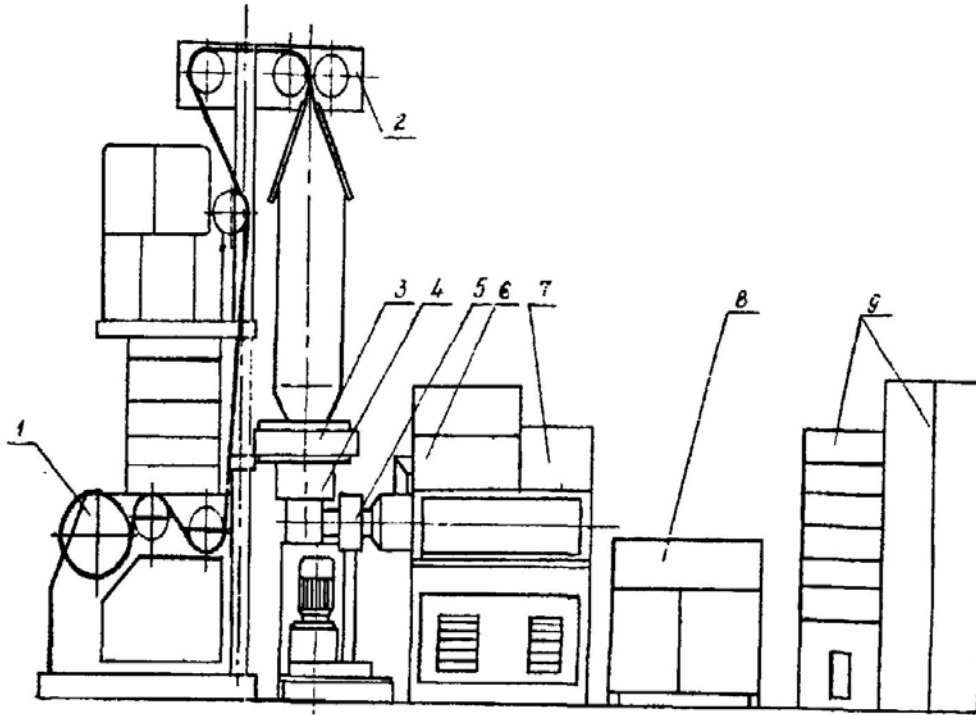


Рис.1. Принципова схема лінії для виробництва рукавної плівки

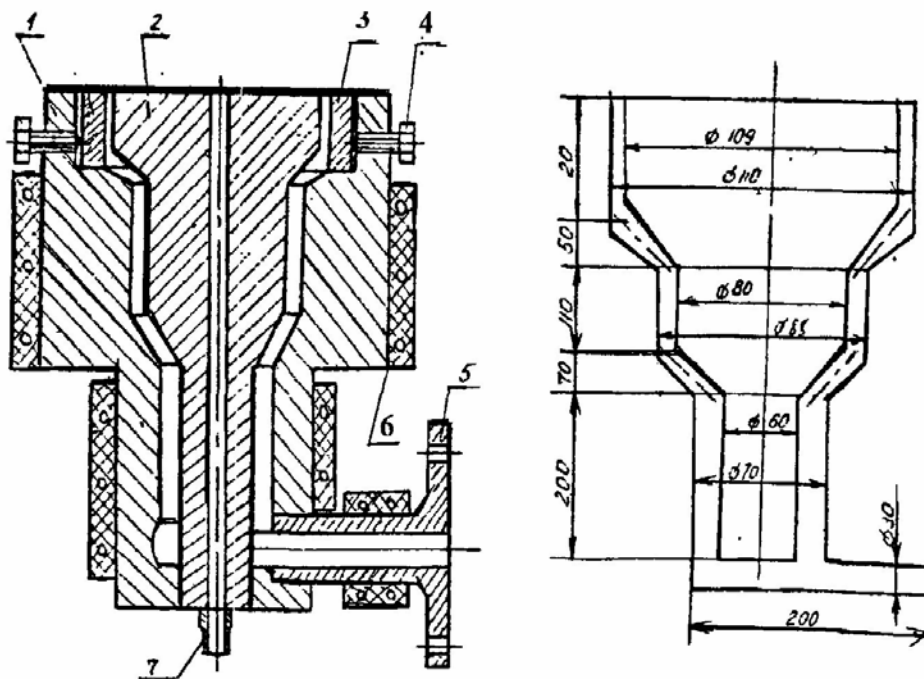


Рис.2. Конструктивна схема формуючої головки

## 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСІВ

### 2.1. Процес екструзії

Принципова схема дискового екструдера подана на рис.3. Гранули полімеру шнековим дозатором подаються в отвір 4 екструдера і транспортуються восьмизахідною гвинтовою нарізкою 3, виконаною на зовнішній поверхні диска, вздовж циліндра 2 до робочого зазору 5, утвореного обертаючимся диском та корпусом 1 екструдера.

Внаслідок деформації зсуву в зазорі виділяється значна кількість теплоти дисипації, достатньої для плавлення полімеру та гомогенізації розплаву, який через центральний отвір у корпусі екструдера подається в перехідний патрубок і далі в шестерінний насос.

Розглянемо більш докладно роботу екструдера, починаючи з процесу подачі полімеру (рис.4а). Кожний з витків черв'яка знаходиться під загрузочним отвором тільки  $1/m$  частку оберту, де  $m$  число заходів нарізки, тому черв'ячна частина диска завжди працює в режимі "голодної" подачі, тобто при неповністю заповненому каналі нарізки. Розглянемо плоскопаралельну модель черв'яка, суть якої полягає в тому, що диск вважається нерухомим, а циліндр обертається з окружною швидкістю  $V=\pi Dn$ , де  $D$ -діаметр диска, а  $n$ -число його обертів. Таке припущення дозволяє розгорнути канали нарізки і циліндр в площину (рис.4б і 4в). Таким чином, плоскопаралельна модель становить  $m$  нерухомих каналів прямокутного перерізу, над якими зі швидкістю  $V$ , спрямованою під кутом  $\varphi$  до повздовжніх осей каналів, рухається розгорнута площина циліндра, причому цей кут дорівнює куту гвинтової нарізки. Припустимо, що канал 1 (рис.4в) знаходиться під отвором для завантаження і в нього поступають гранули, які переміщуються вздовж циліндра до зазору між корпусом і диском. Якщо цей зазор більше розміру гранул, то ці гранули будуть проходити через нього до вихідного отвору, не плавлячись. При зменшенні зазору утворюється зона деформації 1 (рис.4г), причому діаметр цієї зони залежить як від продуктивності, так і від величини зазору. В області перед цією зоною полімер рухається у вигляді джгутиків, які обертаються 2. При збільшенні продуктивності або зменшенні зазору радіус зони деформації збільшується і настає момент, коли початок зони плавлення виходить за межі дискового зазору і цей процес починається уже в каналах гвинтової нарізки (рис.4в), утворюючи зону напіврозплаву з повністю заповненими каналами нарізки.

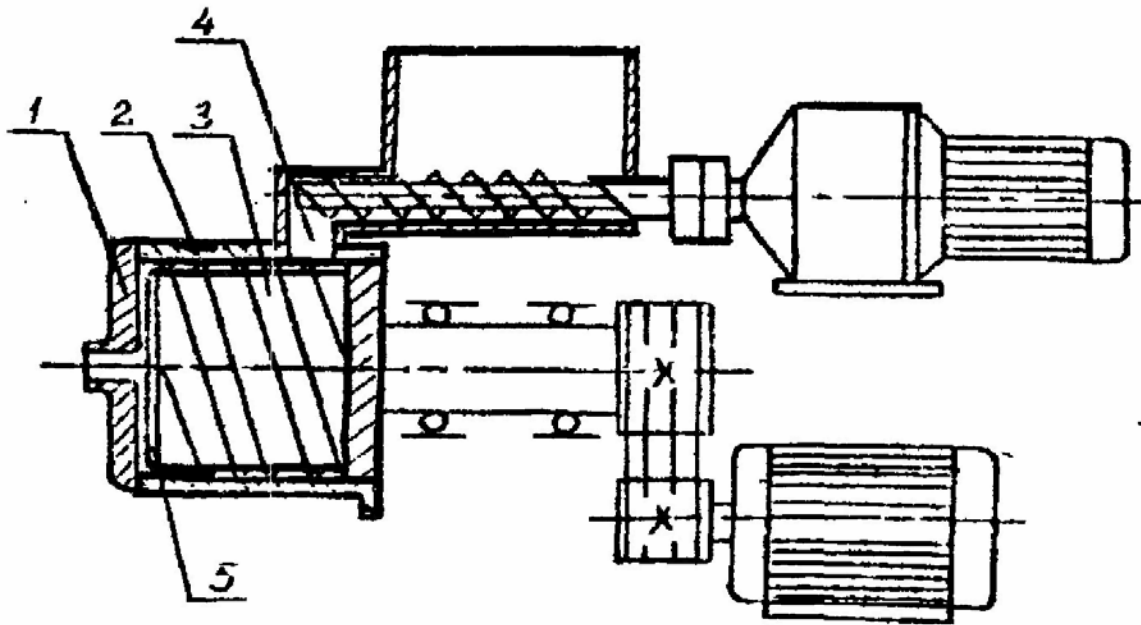


Рис. 3. Принципова схема дискового екструдера

1 – корпус; 2 – циліндр отвір; 3 – гвинтова нарізка; 4 – екструдер;  
5 – робочий зазор

Радіус зони деформації збільшується і настає момент, коли початок зони плавлення виходить за межі дискового зазору і цей процес починається уже в каналах гвинтової нарізки (рис.4в), утворюючи зону напіврозплаву з повністю заповненими каналами нарізки. У зазорі між дисками полімер рухається до вихідного отвору внаслідок дії так званого ефекту Вайссенберга, тобто дії ефекту нормальної напруги, який визначає продуктивність екструдера. Коли ж зона деформації досягає гвинтової нарізки, то до цього ефекту додається тиск, який розвивається в каналах нарізки. Як показали результати дослідження роботи даного екструдера в лінії, найбільш ефективними режимами є такі, при яких плавлення і гомогенізація полімеру відбувається тільки в дисковому зазорі. Ці режими забезпечуються дозованою подачею гранул, яка створює можливість регулювання процесів плавлення і гомогенізації за рахунок зміни числа обертів диску та величини зазору при постійній продуктивності.

Складемо математичну модель процесів, які відбуваються у дисковому зазорі. Для спрощення розрахункових залежностей застосуємо метод ступеневої апроксимації, суть якого полягає в тому, що зона деформації поділяється на ряд елементів об'ємом  $2\pi r \Delta r$  (рис.5), у межах яких вважаються постійними ряд параметрів, залежних від радіуса, а зміна цих параметрів відбуваються скачкоподібно на границі елементів. Оскільки окружна швидкість в зазорі значно більше радіальної, то ефект



Вайссенберга мало впливає на потужність дисипації і його враховувати не

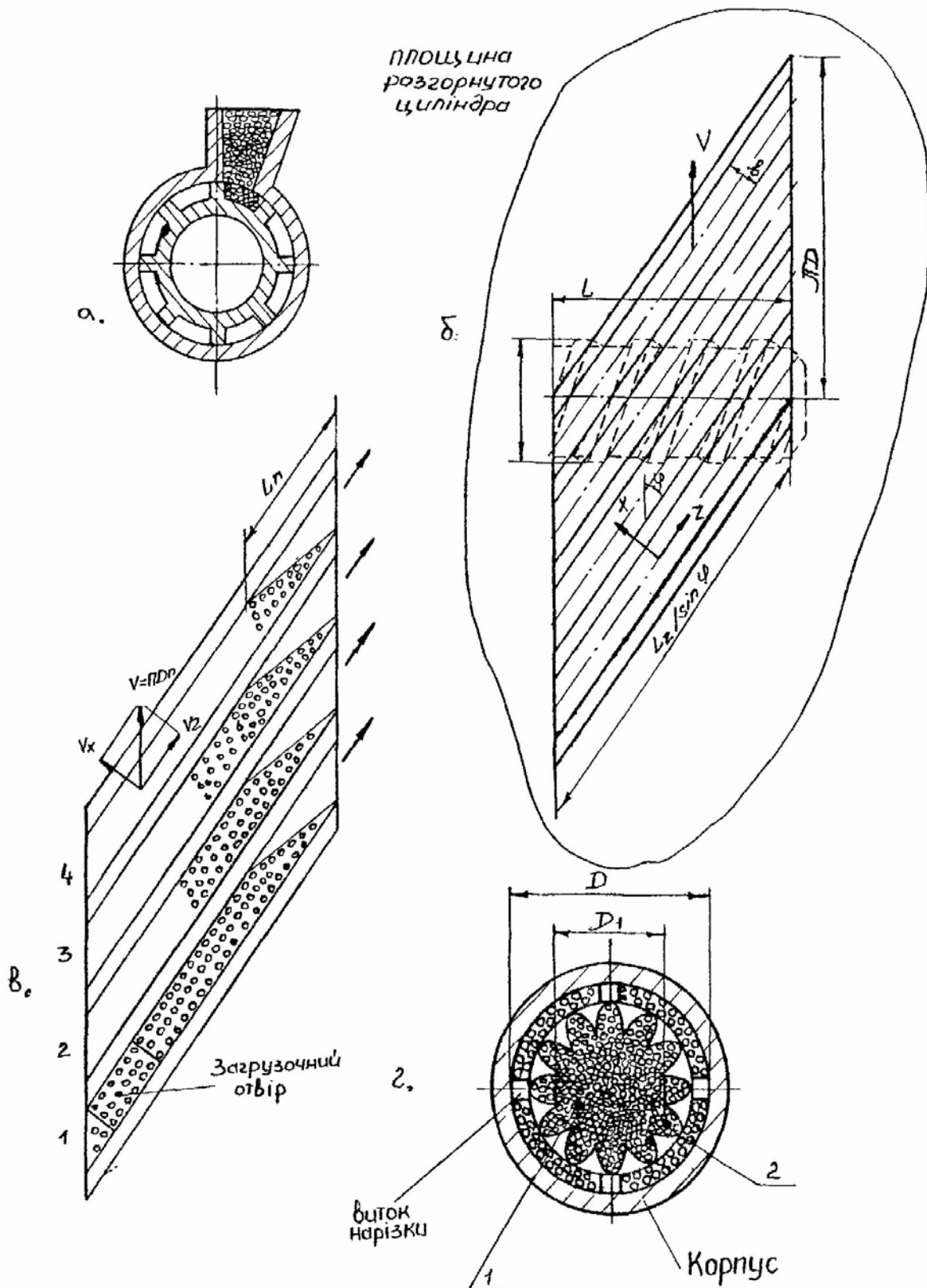


Рис. 4. Схема процесів, що протікають у дисковому екструдері

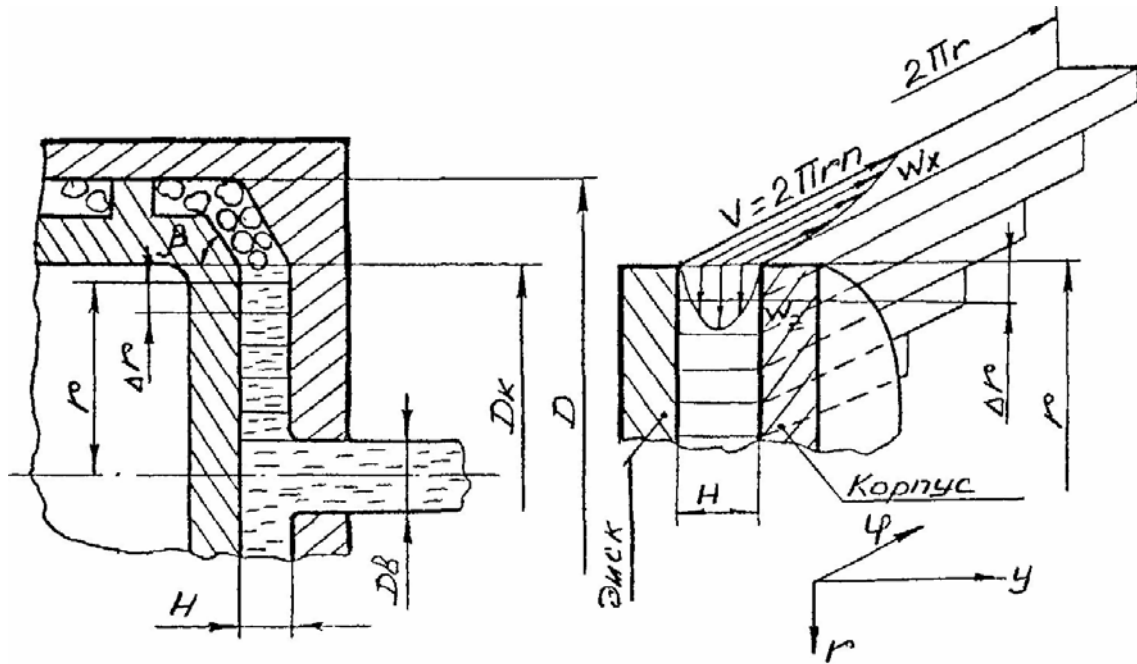


Рис.5. Схема зони деформації

будемо. Якщо розгорнути виділені елементи як показано на рис.5, то, враховуючи, що величина зазору  $H$  набагато менша решти розмірів задачу можна розглядати в прямокутній системі координат. Розрахунок профілів радіальної  $W_r$ , і окружної  $W_\varphi$  швидкостей є складною задачею, враховуючи те, що полімер рухається в зазорі спочатку у вигляді розм'якшених гранул, змішаних з розплавом, які переходять поступово в розплав. Проте для розрахунку потужності дисипації в об'ємах виділених елементів з достатньою точністю можна використати профілі швидкостей ньютонівської моделі рідини. В напрямі осі  $\varphi$  швидкість міняється лінійно від значення  $V$  на рухомому диску до нуля на поверхні нерухомого корпусу, (рис5):

$$w_\varphi = V \cdot \frac{y}{H} \quad (1)$$

Відповідно в напрямі  $r$  (по радіусу) течію полімеру можна розглядати як течію між нерухомими пластинами, а профіль швидкості  $W_r$  описується рівнянням :

$$W_r = \frac{1}{2 \cdot \mu} \frac{\partial P}{\partial \tau} (y^2 - H \cdot y), \quad (2)$$

де  $\mu$  -в'язкість, а  $P$ -тиск.

Масова продуктивність при цьому визначається так:

$$G = \rho \pi r H \cdot \frac{1}{H} \int_0^H W_r dy, \quad (3)$$

де вираз  $\frac{1}{H} \int_0^H W_r dy$  є середньою швидкістю.

Підставляючи рівняння (2) в (3) і проінтегрувавши вираз, можна одержати рівняння для визначення градієнта тиску:

$$\frac{\partial P}{\partial r} = - \frac{6G\mu}{\rho \pi H^3 r} \quad (4)$$

Підставимо (4) в (2) і одержимо рівняння для визначення швидкості  $W_r$ :

$$W_r = \frac{3G}{\rho \pi r H^3} (yH - y^2). \quad (5)$$

Відповідно складові швидкості деформації дорівнюють:

$$\gamma_\phi = \frac{\partial W_\phi}{\partial y} = \frac{V}{H}, \quad (6)$$

$$\gamma_r = \frac{\partial W_\phi}{\partial \tau} = \frac{3G}{\rho \pi r H^3} (H - 2y) \quad (7)$$

Потужність дисипації в об'ємі елемента визначимо, інтегруючи по об'єму функцію дисипації:

$$\Delta N_\partial = \int_0^{2\pi r} \int_0^H \int_{r_1}^{r_2} \mu (\gamma_\phi^2 - \gamma_r^2) d\phi dy dr \quad (8)$$

Підставляючи (6) і (7) в (8) та виконуючи інтегрування по  $\phi$  та  $r$ , одержимо:

$$\Delta N_{\partial} = 2\pi r \Lambda r \int_0^H \mu \left\{ \left( \frac{V}{H} \right)^2 + \left[ \frac{3G}{\rho \pi r H^3} (H - 2y) \right]^2 \right\} dy \quad (9)$$

Щоб врахувати зміну в'язкості по координаті  $y$ , інтеграл у рівнянні (9) визначимо чисельним методом, використовуючи формулу Сімпсона. Для цього розіб'ємо зазор  $H$  на  $K$  вузлових точок. Тоді рівняння для обчислення набуває вигляду:

$$\Delta N_{\partial} = \frac{2}{3} \pi r \Lambda r \cdot [ \mu_0 (\gamma_{\phi 0}^2 + \gamma_{r 0}^2) + \mu_k (\gamma_{\phi k}^2 + \gamma_{r k}^2) + 4 \sum_{i=1}^{k-1} \mu_i (\gamma_{\phi i}^2 + \gamma_{r i}^2) + 2 \sum_{j=2}^{k-2} \mu_j (\gamma_{\phi j}^2 + \gamma_{r j}^2) ] \quad (10)$$

де  $i=1,3,5,\dots,k-1$  ;  $j=2,4,6,\dots,k-2$  ;  $\gamma_{\phi 0}, \gamma_{\phi k}, \gamma_{\phi i}, \gamma_{\phi j}, \gamma_{r 0}, \gamma_{r k}, \gamma_{r i}, \gamma_{r j}$  – складові швидкості деформації, обчислені по рівнянням (6) і (7) для відповідних вузлових точок, а  $\mu_0, \mu_k, \mu_i, \mu_j$  значення в'язкості у вузлових точках, які обчислюються за відповідними значеннями швидкостей деформації і середньою для обчислюваного елемента температурою. Для області плавлення цю температуру вважаємо рівній температурі плавлення полімеру. Тоді маса розплаву, який утворюється за одиницю часу за рахунок теплоти дисипації, дорівнює:

$$\Delta G_p = \frac{\Delta N_{\partial}}{i_{nl} - i_{ex}}, \quad (11)$$

де  $i_{nl}$  та  $i_{ex}$  - ентальпії полімеру при температурах плавлення і поступаючих гранул відповідно. Середньомасова температура полімеру при цьому визначиться так:

$$T = [G_p \cdot T_{nl} + (G - G_p) \cdot T_{ex}] \cdot \frac{1}{G}, \quad (12)$$

Для області розплаву прийемо, що вся потужність дисипації йде на підвищення ентальпії полімеру (процес вважаємо адіабатичним). Тоді підвищення температури визначається з рівняння теплового балансу елемента:

$$\Delta T = \frac{\Delta N_{\partial}}{G \cdot C}, \quad (13)$$

де  $C$  - теплоємність розплаву при його середній температурі.

Оскільки оптимальним для даного випадку режимом роботи екструдера є режим "голодної" подачі, то важливим є визначення діаметра області деформування  $DI$  (рис.4г). Визначення цього діаметра теоретично є складною задачею, оскільки пов'язане з врахуванням в'язко-пружних властивостей розплаву. Для даного випадку з врахуванням експериментальних даних значення  $DI$ , можна обчислити за формулою:

$$D_1 = 2,4 \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho \cdot H}} \quad (14)$$

де  $G$  - масова продуктивність, кг/с,  $\rho$  - густина розплаву, кг/м, а  $H$  - величина дискового зазору, м.

Алгоритм розрахунку екструдера приведений далі, а ідентифікатори величин і значення їх геометричних розмірів у табл. 1

Для опису функцій в пунктах 11 і 12 таблиці необхідна апроксимація теплофізичних властивостей функціями і визначення параметрів реологічного рівняння по кривим течії. Так, наприклад, для поліетилену марки 15802-020 ці рівняння мають вигляд:

$$\rho(T) = 832 + 0,0673T - 0,00302T^2 + 5,24 \cdot 10^{-6} T^3 \quad (15)$$

$$c(T) = 1738,5 + 2,527 \cdot T \quad (16)$$

$$i(T) = 388000 + 2350 \cdot T \quad (17)$$

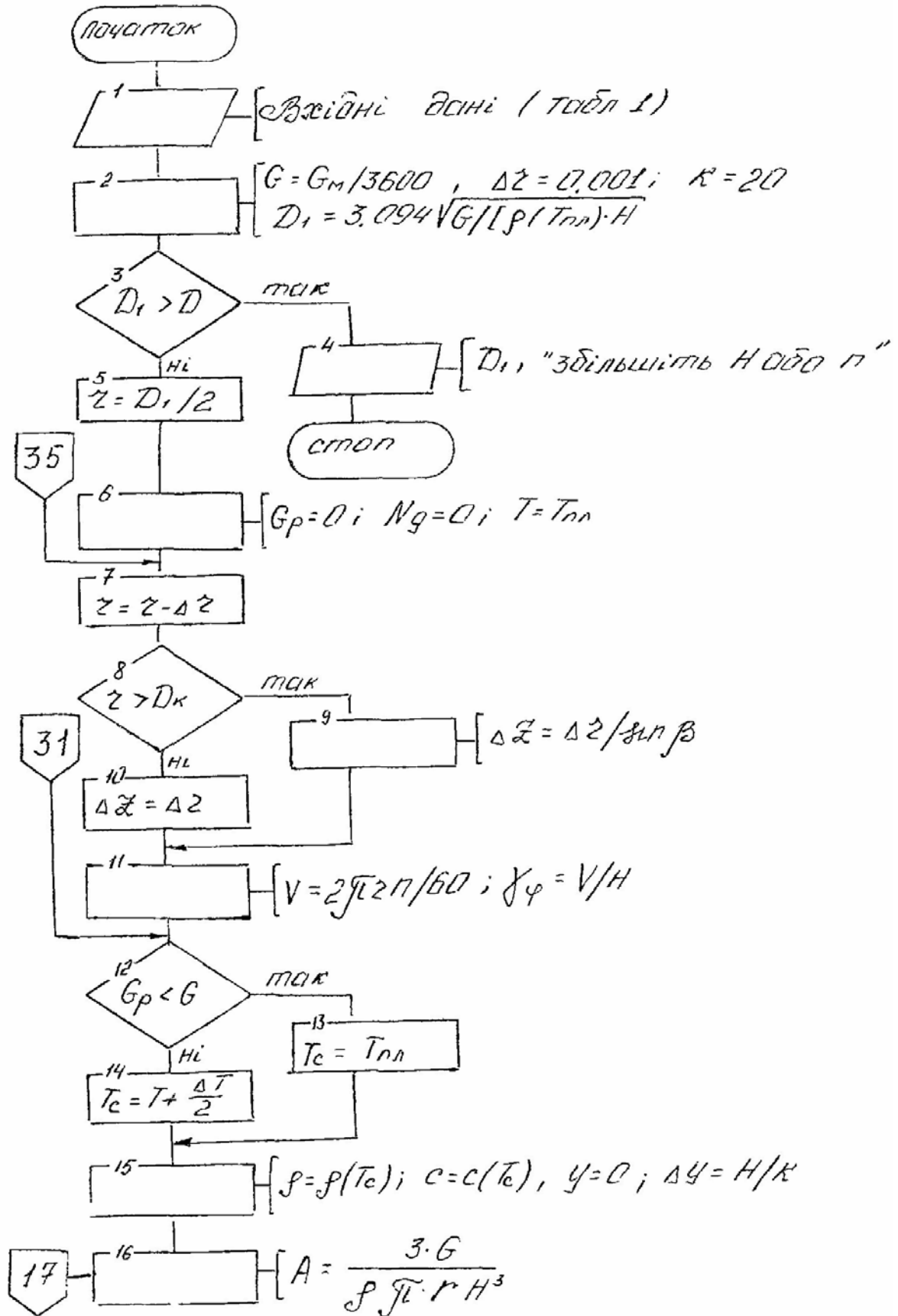
$$\mu(\gamma, T) = 4,06 \cdot 10^4 \cdot \gamma^{-0,7} \cdot \exp[-0,00998 \cdot (T - 120)] \quad (18)$$

Вхідні дані вводяться в блоці 1, а в блоці 2 обчислюється секундна продуктивність і діаметр області деформування, а також задаються крок розрахунку по радіусу і значення  $K$ . Якщо обчислене значення  $DI$  більше діаметра диска, то блоки 3 і 4 зупиняють рахунок. У блоках 5 і 6 задаються початкові значення величин, а блоки 7 і 8 обчислюють поточний радіус і значення  $\Delta Z$ . Окружна швидкість обертання диска на поточному радіусі і значення  $\gamma_f$  обчислюються в блоці 11, а в блоках 12-14 вибирається середня температура розплаву. Розрахунок потужності дисипації по формулі (10) реалізується в блоках 15-24, а в блоках 25-32, відповідно, обчислюється температура розплаву або середньомасова температура полімеру в залежності від того, закінчився (блоки 25,28-32) чи ні (блоки 25,26,27) процес плавлення. При цьому значення  $\Delta T$  уточнюється методом послідовних наближень (блоки 25,28-31 з поверненням на блок 12). У блоці 33 знаходиться сумарна потужність дисипації, а в блоці 34 виводяться на друк значення поточного радіуса, температури і потужності дисипації. Блок 35 порівнює поточний радіус з кінцевим і або повертає на блок 6, або закінчує розрахунок. Програма розрахунку приведена нижче.

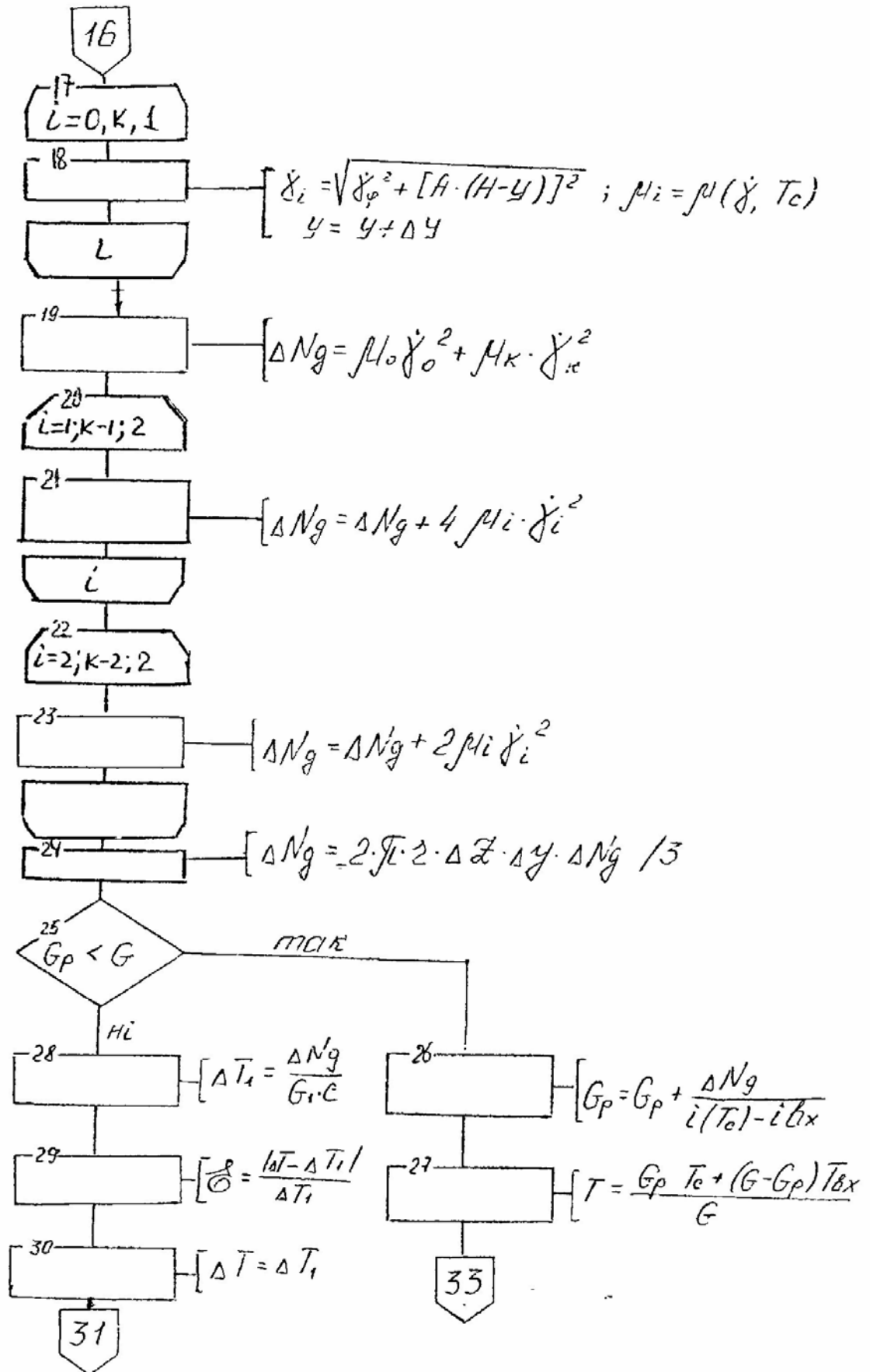
Таблиця 1 - Ідентифікатори вхідних величин

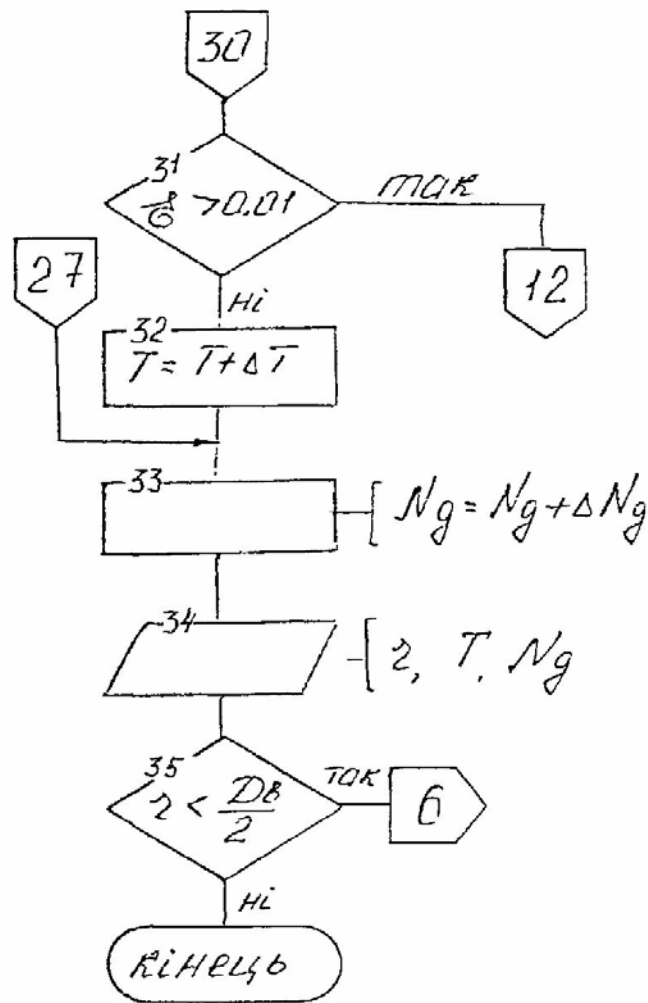
Найменування	Розмірність	Позн. в формулі	Ідентиф.	Значення
1	2	3	4	5
Діаметр диска	м	D	d	0,2
Діаметр конуса диска	м	Dк	dk	0,11
Діаметр вихідного отвору	м	Dв	dv	0,03
Кут нахилу твірної диска	град	$\beta$	ve	45
Дисковий зазор	м	H	h	
Продуктивність екструдера	кг\год	Gm	gm	
Число обертів диска	1\хв	n	n	
Температура гранул на вході	°С	Tвх	tвх	
Температура плавлення	°С	Tпл	tp	
Теплофізичні властивості як функції температури:				
-густина	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho$	r(t)	рів(15)
-теплоємність	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	C	C(t)	рів(16)
-ентальпія	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	i	ip(t)	рів(17)
В'язкість як функція швидкості зсуву $\gamma$ і температури	Па·с	$\mu$	$m(\gamma t)0$	рів(18)

2.1.1. Алгоритм розрахунку дискового екструдера









### 2.1.2. Програма розрахунку дискового екструдера

```

CLS
'      Розрахунок дискового екструдера
'
PRINT "  Введіть вхідні дані для розрахунку"
INPUT " - діаметр диска, м"; d
INPUT " - менший діаметр конуса диска, м"; dk
INPUT " - діаметр вихідного отвору, м"; db
INPUT " - кут нахилу твірної диска"; be
INPUT " - зазор між дисками. м"; h
INPUT " - продуктивність екструдера, кг/год"; gm
INPUT " - число обертів диска, 1 хв"; n
INPUT " - температура поступаючих гранул. град С"; tb
INPUT " - температура плавлення, град С"; tp

```

```

INPUT " - ентальнія поступаючаго полімеру, Дж/кг"; ib
DEF fnc (t) = 1738.5 + 2.527 * t
DEF fnr (t) = 832 + .067 * t - .00302 * t ^ 2 + 5.24E-06 * t ^ 3
DEF fnip (t) = 388000 + 2350 * (t - 110)
DEF fnm (j, t) = 40600 * j ^ (-.7) * EXP(-.00998 * (t - 120))
mm = 20: mm1 = mm + 1
DIM ga(mm1), mj(mm1)
g = gm / 3600: dr = .001
kz=2.54 REM Коефіцієнт заповнення
d1 = kz * (g / (fnr(tp) * h)) ^ (1 / 2)
IF d1 > d THEN PRINT "d1="; d1; " Збільшіть h або n": GOTO 6
be = 3.14 / 180 * be: r = d1 / 2
gp = 0: t = tp: nd = 0: cz = 0
PRINT : PRINT " Результати розрахунку екструдера"
PRINT " _____"
PRINT "   r      t      nd"
PRINT "   мм     гр С   кВт"
PRINT "   -----"
1:
r = r - dr: cz = cz + 1
IF r > dk / 2 THEN dz = dr / SIN(be) ELSE dz = dr
v = 2 * 3.14 * r * n / 60: gf = v / h
2:
IF gp < .95 * g THEN tc = tp ELSE tc = t + dt / 2
ro = fnr(tc): c = fnc(tc): y = 0: dy = h / mm
a = 3 * g / (ro * 3.14 * r * h ^ 3)
FOR i = 0 TO mm
ga(i) = (gf ^ 2 + (a * (h - y)) ^ 2) ^ (1 / 2)
mj(i) = fnm(ga(i), tc): y = y + dy
NEXT i
dn = mj(0) * ga(0) ^ 2 + mj(mm) * ga(mm) ^ 2
FOR i = 1 TO mm - 1
IF INT(i / 2) = i / 2 THEN bb = 2 ELSE bb = 4
dn = dn + bb * mj(i) * ga(i) ^ 2
NEXT i
dn = 2 * 3.14 * r * dz * dy * dn / 3
IF gp < .95 * g THEN 3
dt1 = dn / (g * c): ep = ABS(dt - dt1) / dt1: dt = dt1
IF ep > .01 THEN 2
t = t + dt: GOTO 4
3:
gp = gp + dn / (fnip(tc) - ib)
t = (gp * tc + (g - gp) * tb) / g
4:
nd = nd + dn
r1 = 1000 * r: nd1 = .001 * nd
IF cz < 5 THEN 5
cz = 0

```

```

PRINT USING " ####   ##   ##.##"; r1; t; nd1
5:
IF r > db / 2 THEN 1
PRINT " -----"
6:
END

```

## 2.2. Процес формування трубчатої заготовки

Метою розрахунку є визначення різниці тиску між вхідним і вихідним перерізами головки (опір головки) для заданої продуктивності. Переріз каналів, по яким рухається розплав, змінний, тому при точному обчисленні необхідно розв'язувати систему диференціальних рівнянь для кожного каналу. Проте для інженерних розрахунків часто використовується спрощений метод, оснований на припущенні, що течія ламінарна, сили інерції і тяжіння малі і ними можна знехтувати, а температура розплаву дорівнює температурі на виході екструдера. Дійсно, оскільки відсутня тангенціальна складова швидкості, то інтенсивність дисипації набагато менше, ніж, наприклад, в дисковому зазорі. Тоді продуктивність через поперечний переріз каналів пропорційна перепаду тиску (опору) і обернено пропорційна в'язкості розплаву:

$$G = \rho \cdot K \frac{\Delta P}{\mu}, \quad (19)$$

де  $K$ - коефіцієнт геометричної форми, який залежить тільки від форми і розмірів каналів. В галузевій літературі подаються рівняння для розрахунку значень  $K$  для каналів простої форми і визначення середньої швидкості деформації в цих каналах. Методика спрощеного розрахунку опору головки при цьому така:

1. Канали головки розбиваються на ряд каналів простої форми. Наприклад, у випадку конструкції, зображеної на рис.2, такими каналами є:

- циліндричний діаметром 30мм та довжиною 200 мм;
- кільцевий циліндричний довжиною 200 мм;
- кільцевий конічний довжиною 70 мм;
- кільцевий циліндричний довжиною 110мм;
- кільцевий конічний довжиною 50 мм;
- кільцевий циліндричний довжиною 20 мм.

2. По формулах знаходяться коефіцієнти геометричної форми  $K_i$  і швидкості деформації для кожного каналу. Відповідні формули і геометричні розміри подані в алгоритмі розрахунку головки.

3. По температурі розплаву, рівній температурі на виході екструдера, і відповідним значенням  $\gamma_i$  по реологічному рівнянню (або кривій течії) знаходиться ефективна в'язкість  $\mu_i$  для кожного каналу.

4. Розв'язуючи рівняння (19), для кожного каналу знаходиться значення опору  $\Delta P_i$ :

$$\Delta P_i = \frac{G}{\rho} \cdot \frac{\mu_i}{K_i}, \quad (20)$$

і сумарний опір формуючої головки:

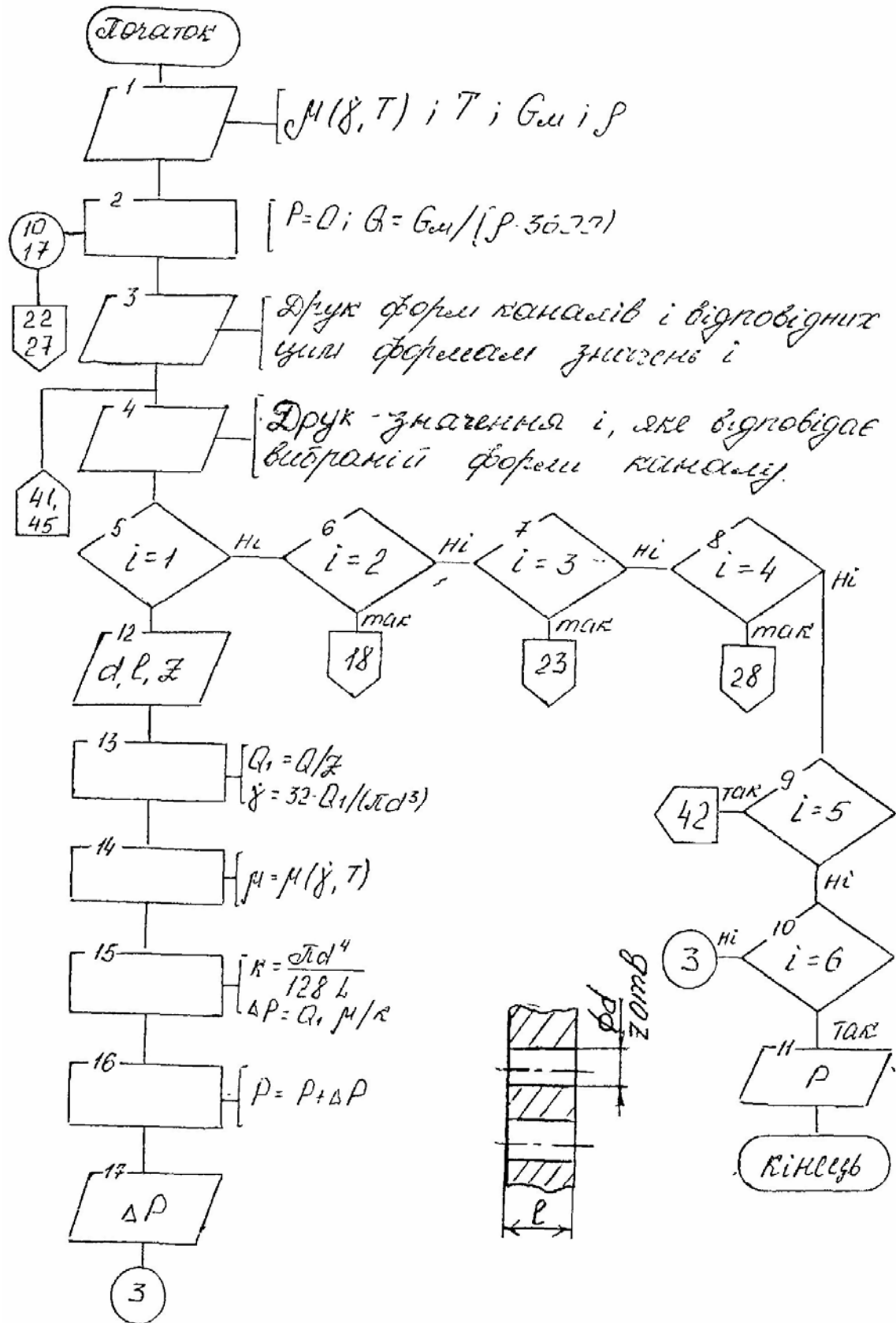
$$\Delta P = \sum_{s=1}^n \Delta P_i = \frac{G}{\rho} \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{K_i}, \quad (21)$$

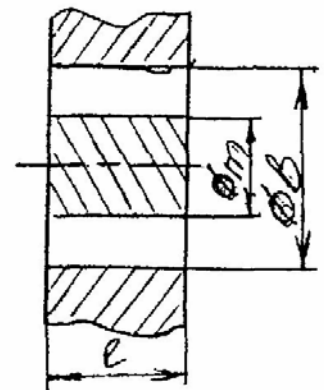
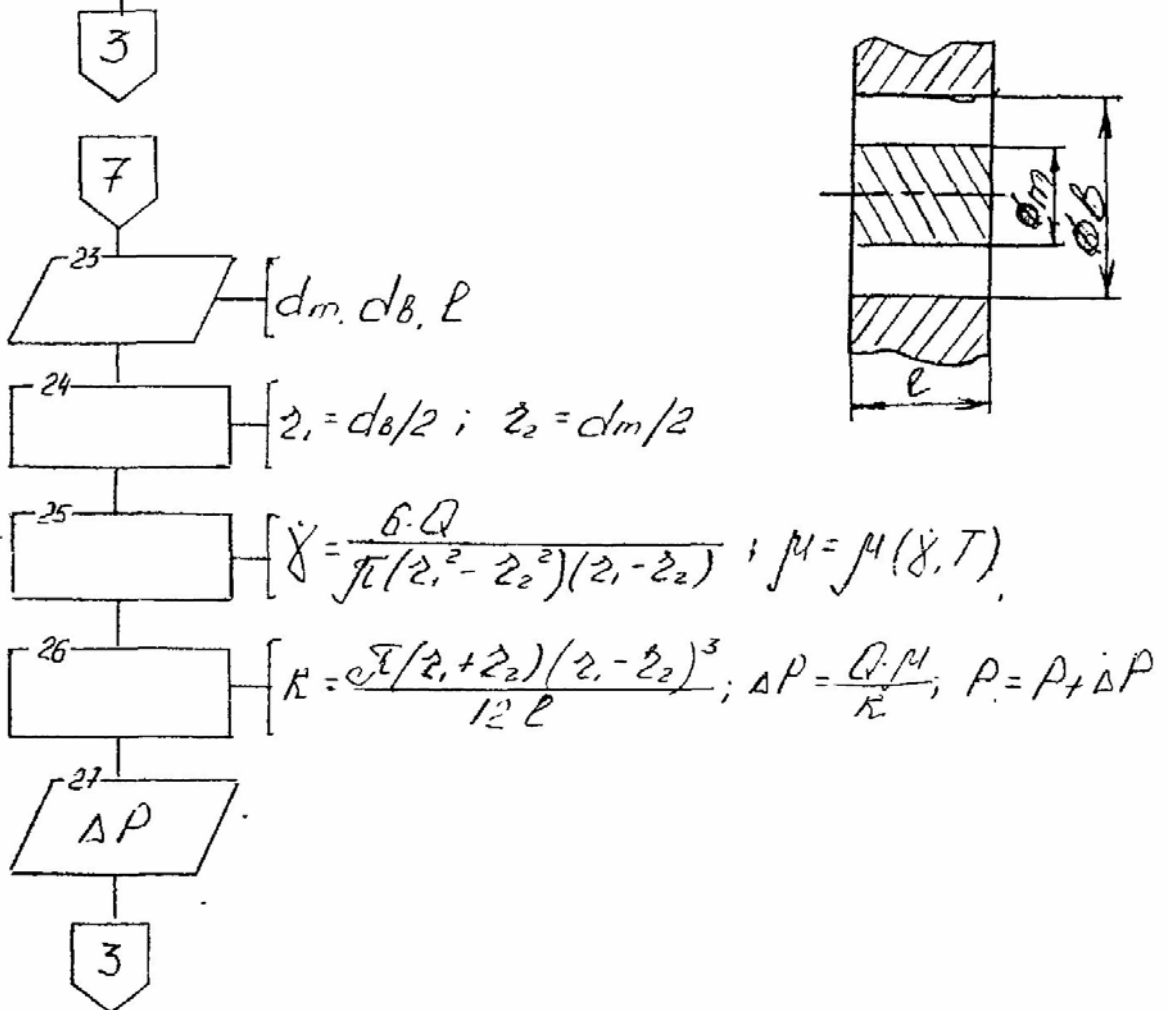
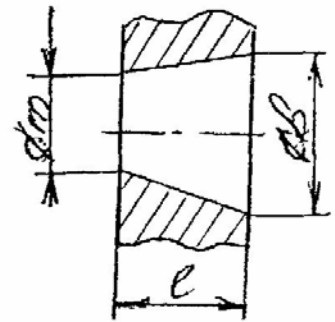
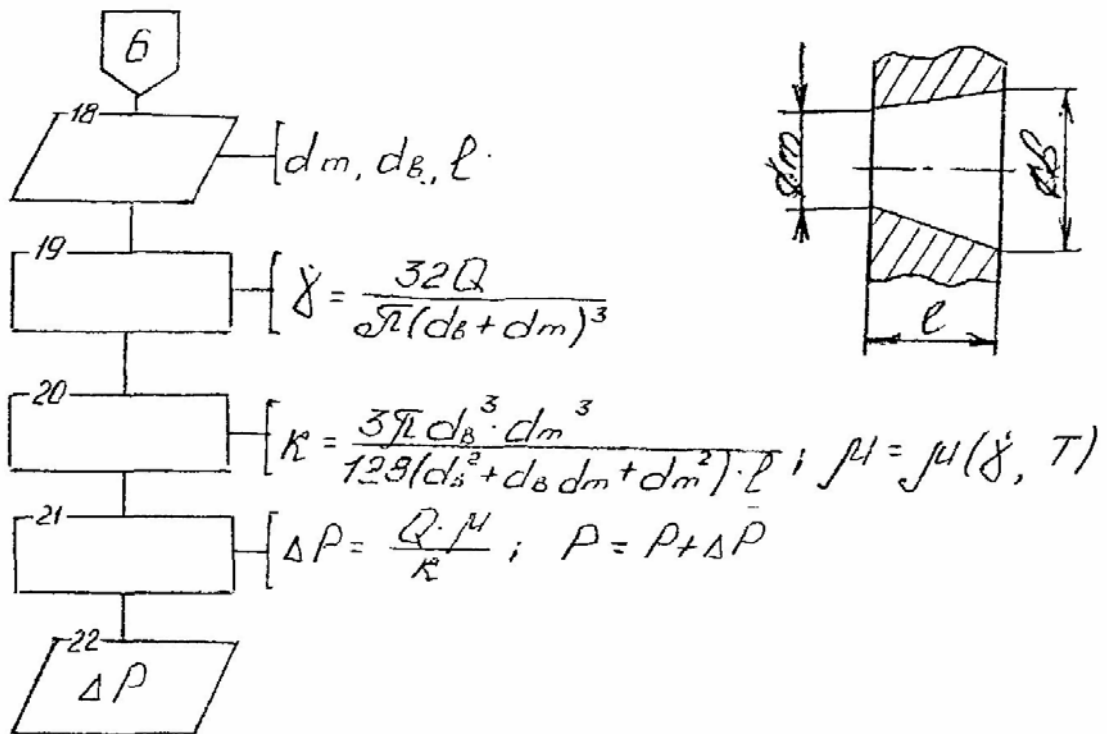
Знайдене значення опору головки необхідне для подальшого розрахунку шестерінного насоса. При розрахунку на ЕОМ може бути використаний універсальний алгоритм розрахунку, який реалізує описану методику. Цей алгоритм приведений в розділі 2.2.1, а ідентифікатори вхідних величин в табл. 2.

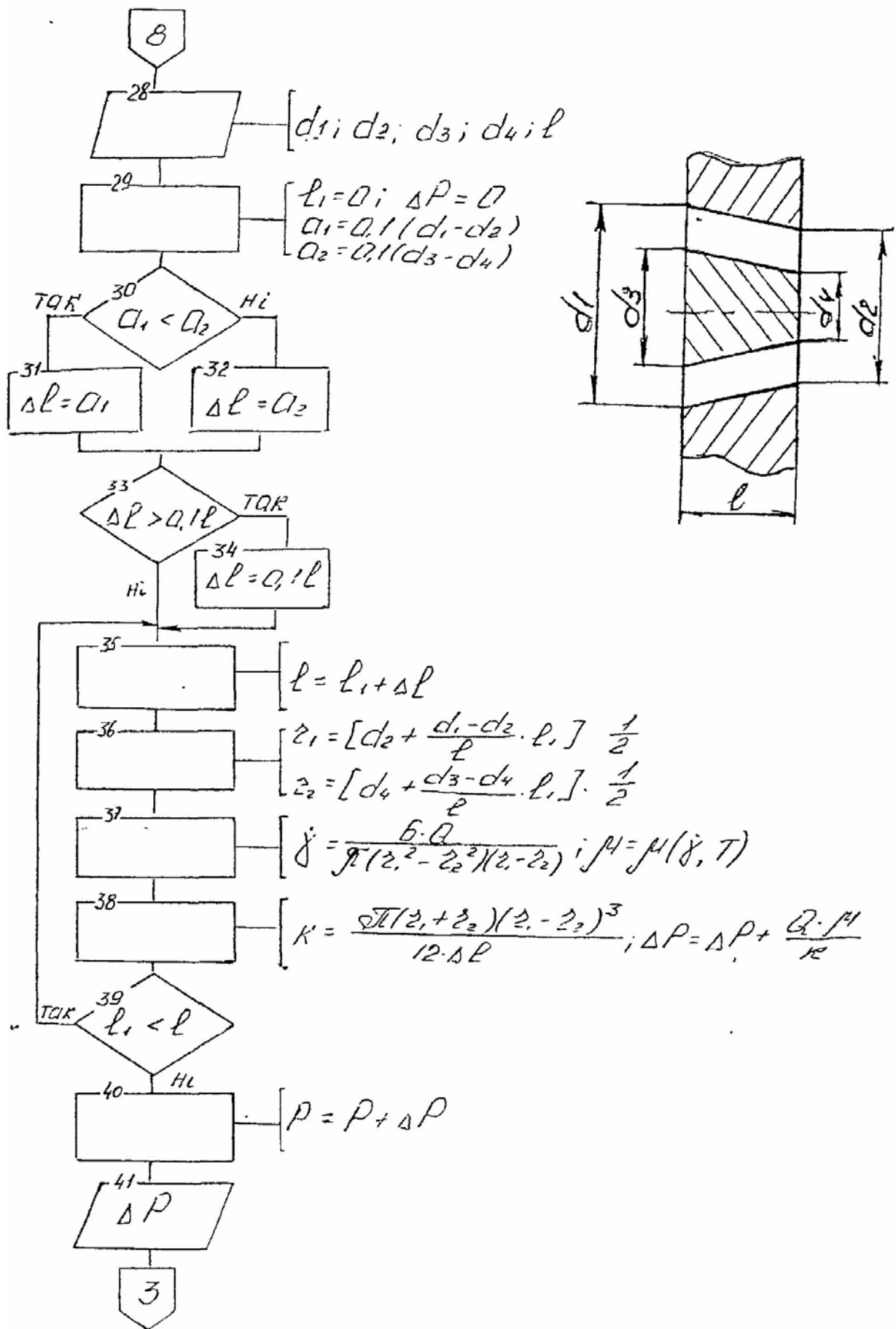
Алгоритм розрахований на обчислення в діалоговому режимі, тому геометричні параметри каналів і їх схема подана далі.

Вхідні дані вводяться в блоці 1, а в блоці 2 приймається значення тиску  $P=0$  і обчислюється секундна об'ємна продуктивність. У блоці 3 у вигляді інформації виводиться перелік форм каналів і відповідні цим формам значення  $i$  яке виводиться в блоці 4. Блоки 5-10 в залежності від введеного значення  $i$  вибирають ту частину алгоритму, в якій здійснюється розрахунок вибраного каналу. При  $i=1$  обчислюється циліндричний канал або решітка, яка має  $Z$ , отворів діаметром  $d$  (блоки 12-17), при  $i=2$  обчислюються опір конічного каналу (блоки 18-22), а при  $i=3$  кільцевого циліндричного каналу (блоки 23-27). При розрахуванні параметрів кільцевого конічного каналу ( $i=4$ , блоки 28-41) застосовується метод ступеневої апроксимації, у відповідності з яким кільцевий конічний канал розглядається, як ряд кільцевих циліндричних довжиною  $\Delta l$ . При цьому значення  $\Delta l$  вибирається не більше 0,1 від меншої різниці діаметрів, але не більше 0,1 загальної довжини (блоки 28-34). Плоскощільовий канал обчислюється в блоках 42-45 при  $i=5$ . Після розрахунку опору кожного каналу його значення виводиться (блоки 17,22,27,41 і 45) і відбувається повернення на блок 3. При значенні  $i=6$  розрахунок закінчується і блок 11 виводить сумарний опір головки. Необхідні для розрахунків розміри каналів подані на відповідних схемах цих каналів.

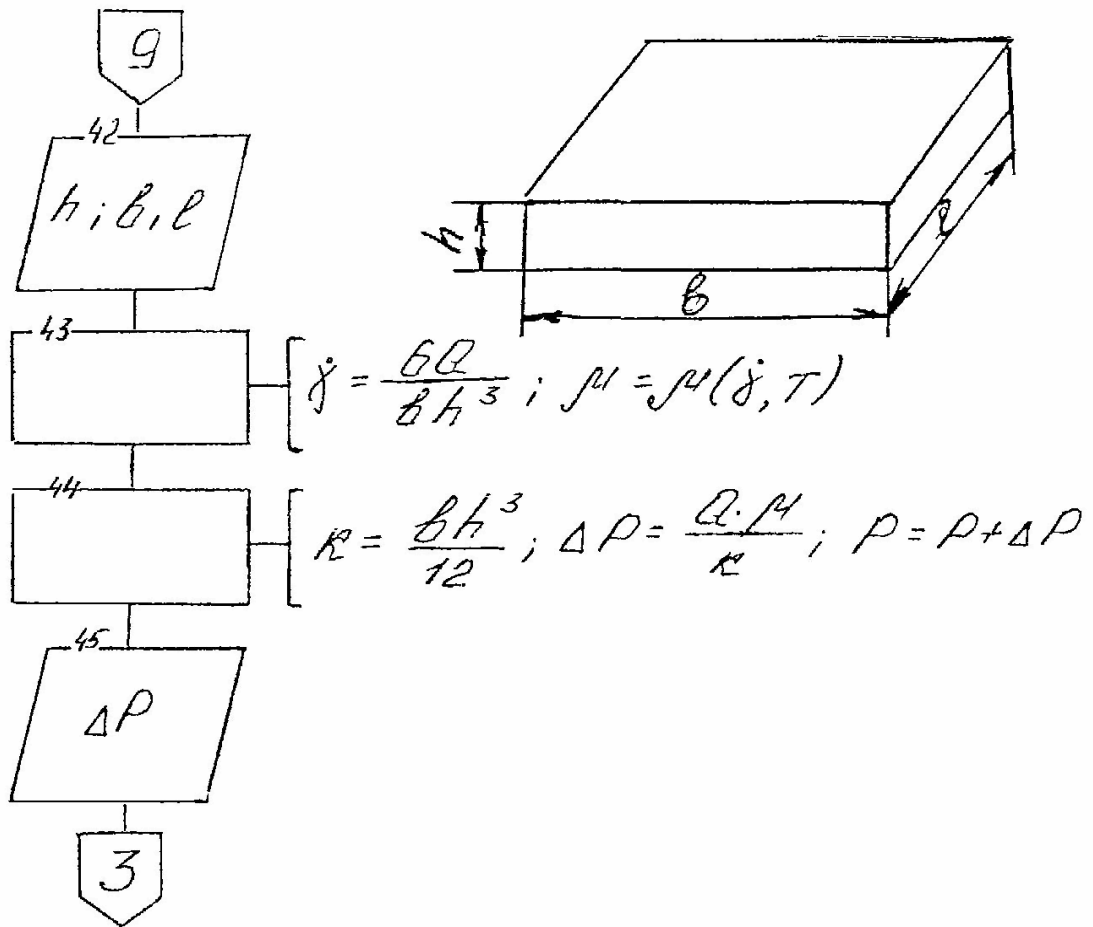
2.2.1. Алгоритм розрахунку формуючої голівки











### 2.2.2. Програма розрахунку формуючої головки

```

CLS
PRINT "      Розрахунок формуючої головки"
PRINT
DEF fnm (ga, t) = 32900 * ga ^ (-.7) * EXP(-.006 * (t - 120))
PRINT "Введіть вхідні дані:"
PRINT
INPUT "Продуктивність, кг/год"; g
INPUT "Густина розплаву, кг/м^3"; go
INPUT "Температура розплаву, град.С"; t
p = 0: q = g / (3600 * go)
9:
PRINT "Форма каналу, що обчислюється:"

```

```

PRINT "   Круглий циліндричний або решітка (1)"
PRINT "   Конічний (2)"
PRINT "   Кільцевий циліндричний (3)"
PRINT "   Кільцевий конічний (4)"
PRINT "   Плоскощільовий (5)"
PRINT "   Розрахунок закінчено (6)"
INPUT i
IF i = 6 THEN 10
PRINT "   Введіть розміри каналу:"
IF i = 1 THEN 1
IF i = 2 THEN 2
IF i = 3 THEN 2
IF i = 4 THEN 3
IF i = 5 THEN 4
1:
INPUT "Діаметр, м"; d
INPUT "Довжина, м"; l
INPUT "Кількість каналів"; z
GOTO 11
2:
INPUT "Більший діаметр, м"; db
INPUT "Менший діаметр, м"; dm
INPUT "Довжина, м"; l
IF i = 2 THEN 5
GOTO 6
3:
INPUT "Більший діаметр більшого конуса, м"; d1
INPUT "Менший діаметр більшого конуса, м"; d2
INPUT "Більший діаметр меншого конуса, м"; d3
INPUT "Менший діаметр меншого конуса, м"; d4
INPUT "Довжина, м"; l
GOTO 7
4:
INPUT "Ширина каналу, м"; b
INPUT "Довжина каналу, м"; l
INPUT "Висота каналу, м"; h
GOTO 8
11:
g1 = q / z: ga = 32 * g1 / (3.14 * d ^ 3)
mj = fnm(ga, t): k = 3.14 * d ^ 4 / (128 * l)
p1 = g1 * mj / k
p = p + p1
p1 = .000001 * p1
PRINT USING "   Опір каналу   ###.## МПА"; p1
GOTO 9
5:
ga = 32 * q / (3.14 * (db + dm) ^ 3): mj = fnm(ga, t)
k = 3 * 3.14 * db ^ 3 * dm ^ 3 / (128 * (db ^ 2 + db * dm + dm ^ 2) * l)

```

```

p1 = q * mj / k
p = p + p1
p1 = .000001 * p1
PRINT USING " Опір каналу ###.## МПА"; p1

GOTO 9
6 :
r1 = db / 2; r2 = dm / 2
ga = 6 * q / (3.14 * (r1 ^ 2 - r2 ^ 2) * (r1 - r2))
mj = fnm(ga, t)
k = 3.14 * (r1 + r2) * (r1 - r2) ^ 3 / (12 * l)
p1 = q * mj / k
p = p + p1
p1 = .000001 * p1
PRINT USING " Опір каналу ###.## МПА"; p1
GOTO 9
7 :
l1 = 0; p1 = 0
a1 = .1 * (d1 - d2); a2 = .1 * (d3 - d4)
IF a1 < a2 THEN dl = a1 ELSE dl = a2
IF dl > .1 * l THEN dl = .1 * l
12 :
l1 = l1 + dl
r1 = (d2 + (d1 - d2) * l1 / l) / 2
r2 = (d4 + (d3 - d4) * l1 / l) / 2
ga = 6 * q / (3.14 * (r1 ^ 2 - r2 ^ 2) * (r1 - r2))
mj = fnm(ga, t)
k = 3.14 * (r1 + r2) * (r1 - r2) ^ 3 / (12 * dl)
p1 = p1 + q * mj / k
IF l1 < l - .5 * dl THEN 12
p = p + p1
p1 = .000001 * p1
PRINT USING " Опір каналу ###.## МПА"; p1
GOTO 9
8 :
ga = 6 * q / (b * h ^ 3); mj = fnm(ga, t)
k = b * h ^ 3 / (2 * l)
p1 = q * mj / k; p = p + p1
p1 = .000001 * p1
PRINT USING " Опір каналу ###.## МПА"; p1
GOTO 9
10 :
p = .000001 * p
PRINT
PRINT USING " Опір формуючої головки #####.## МПА"; p
END

```



Таблиця 2 - Вхідні величини та їх ідентифікатори

Найменування	Розмірність	Позн. в формулі	Ідентиф.	Значення
1	2	3	4	
Продуктивність	кг\год	Gm	gm	
Температура розплаву	°С	T	t	
Теплофізичні властивості як функції температури:				
Густина розплаву при температурі T	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho$	$\rho_0$	
В'язкість як функція $\gamma$ і T	Па	$\mu$	m	

### 2.3. Процес дозування розплаву

Для дозування розплаву і створення тиску, необхідного для подолання опору формуючої головки, в схемі підготовки розплаву встановлений шестерінний насос. За кожний оберт насос подає масу рідини, яка дорівнює сумі об'єму зубів, причому, продуктивність насосу повинна дорівнювати продуктивності екструдера:

$$G = \rho \cdot 2\pi D_0 m b n \eta_{об}, \quad (22)$$

де  $D_0 = m \cdot z$  - діаметр початкового кола шестерні,  $m=2,25$  мм – модуль зачеплення,  $z=20$  - кількість зубів,  $b=32$  мм - ширина зуба,  $n$  - число обертів,  $\eta_{об}$ - коефіцієнт, який враховує перетікання розплаву полімеру між поверхнями зубів та корпусом і неповноту зачеплення. Густина розплаву можна визначити по температурі на виході екструдера. Потужність насосу визначається за формулою:

$$N = \frac{G \cdot \Delta P}{\rho \cdot \eta_n}, \quad (23)$$

де  $\Delta P$ - тиск, який дорівнює опору формуючої головки,  $\eta_n$ - коефіцієнт, який враховує втрати на тертя в сальниках та підшипниках, а також гідравлічні втрати на подалання опору при течії розплаву в насосі. Потужність на валу двигуна з врахуванням ККД приводу  $\eta_n$  дорівнює:

$$N_d = \frac{N}{\eta_{np}}, \quad (24)$$

Значення коефіцієнтів  $\eta_{об}$ ,  $\eta_{н}$ ,  $\eta_{пр}$  вибирається в межах 0,8-0,85.

## 2.4. Процес охолодження плівки

### 2.4.1. Математична модель процесу охолодження

Схема процесу охолодження плівки приведена на рис. 6. Сформована в формуючій головці 1 трубчатая заготовка діаметром  $D_0$  і товщиною  $\delta_0$  роздувається замкнутим всередині рукава 3 об'ємом повітря до кінцевих розмірів  $D_1$  і  $\delta_1$ . Охолоджуюче повітря подається в кільце 2 і, пройшовши через його вихідну щілину, обдуває рукав. Формування розмірів рукава відбувається на висоті  $H_k$ . На цій висоті візуально помітне характерне помутніння рукава, яке свідчить про те, що температура полімеру досягла температури кристалізації. Від висоти лінії кристалізації значною мірою залежить стабільність процесу і якість плівки. При зниженні інтенсивності охолодження висота  $H_k$  збільшується, починаються поперечні коливання рукава і стабільність процесу порушується. Регулювання висоти  $H_k$  може здійснюватися за рахунок зміни інтенсивності обдуву повітрям, або при зміні продуктивності лінії. Після достатнього охолодження рукав 3, проходить крізь пластини 4, які його складають, тягнучі валики 5 і подається через систему направляючих роликів до пристрою для намотування.

Метою розрахунку в даному випадку буде визначення висоти лінії кристалізації  $H_k$ . Розглянемо для цього математичну модель процесу охолодження. Оскільки товщина плівки набагато менша від діаметра, то рукав можна розгорнути в площину і розглядати процес в прямокутній системі координат. Спрямуємо вісь  $x$  по дотичній до поверхні рукава, розгорнутого в площину, вісь  $y$  - по товщині рукава, а вісь  $z$ , відповідно, по дотичній до твірної поверхні рукава (рис. 6). При цьому координати  $H$  і  $Z$  зв'язані очевидним співвідношенням:

$$H = \sqrt{Z^2 - \left(\frac{D_1 - D_0}{2}\right)^2} \quad (25)$$

Для спрощення задачі будимо вважати, що діаметр рукава  $D$  і товщина плівки  $\delta$  міняються лінійно. Тоді для  $H < H_k$  ( $Z < Z_k$ ) і довільної координати  $Z$  можемо записати:

$$D = D_0 + \frac{D_1 - D_0}{Z_k} \cdot Z, \quad (26)$$

$$\delta = \delta_0 + \frac{\delta_0 - \delta_1}{Z_k} \cdot Z, \quad (27)$$

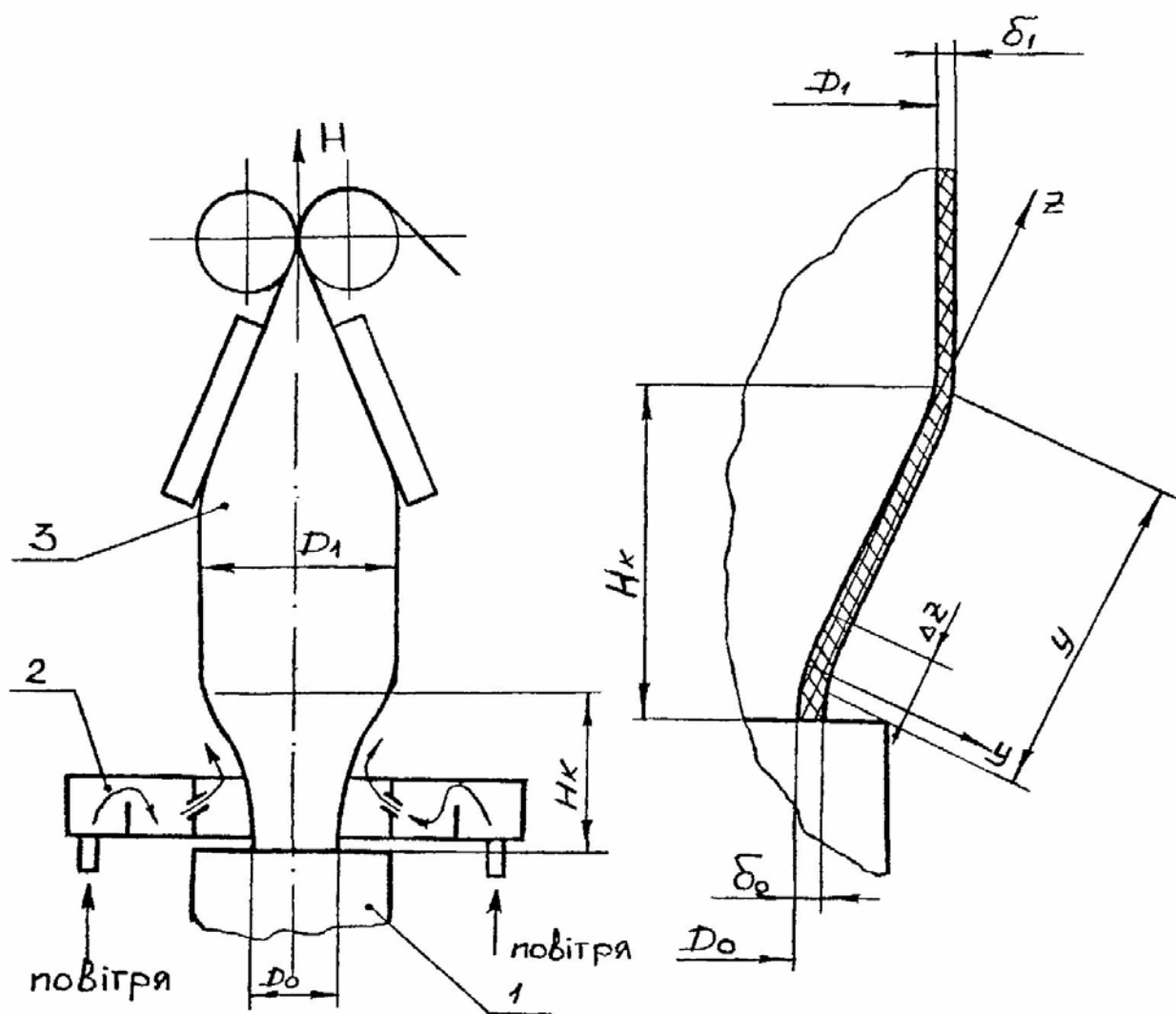


Рис. 6. Схема процесу охолодження плівки

Середню швидкість руху рукава  $W_z$  визначаємо з рівняння масової витрати:

$$G = \rho \cdot \pi \cdot D \cdot \delta \cdot W_z, \quad (28)$$



звідки

$$W_z = \frac{G}{\rho \cdot \pi \cdot D \cdot \delta} \quad (29)$$

Оскільки  $D$  і  $\delta$  міняються по координаті  $Z$ , то і швидкість  $W_z$  буде також змінною. Рівняння (29) дозволяє визначити середню швидкість плівки, однак враховуючи, що товщина плівки мала, зміною швидкістю по товщині плівки (координаті  $y$ ) можна знехтувати.

Для розв'язання задачі застосуємо метод ступеневої апроксимації, розділивши зону охолодження на елементи  $\Delta Z$ , в межах яких будемо вважати незмінними товщину плівки  $\delta$ , діаметр  $D$ , швидкість  $W_z$  і теплофізичні властивості полімеру. Зміна цих параметрів згідно з методом відбувається стрибкоподібно на межі двох елементів. Вважаємо, що в межах елемента перенос теплоти відбувається, в основному, разом з полімером, який рухається зі швидкістю  $W_z$  відносно нерухомої системи координат, теплопровідністю по товщині плівки. Тоді рівняння переносу теплоти (рівняння енергії) для елемента  $\Delta Z$  запишеться так:

$$\rho \cdot c \cdot W_z \frac{\partial T}{\partial Z} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (30)$$

де  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$  - густина, теплоємність і теплопровідність полімеру, які в межах елемента вважаються незмінними. Вводячи коефіцієнт температуропровідності  $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ , перепишемо рівняння (30) у вигляді:

$$\frac{\partial T}{\partial \left( \frac{Z}{W_z} \right)} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (31)$$

Величина  $Z/W_z$  є час, тому маємо:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (32)$$

Рівняння (32) записане для системи координат, яка рухається разом з плівкою, і є рівнянням нестационарної теплопровідності, причому,  $dt$  є час, за

який система координат (плівка) переміщається на відстань  $dZ$ . Умови однозначності для розв'язання рівняння (32) для  $j$ -го елемента  $\Delta Z$  будуть :

$$\text{при } t=0 \quad T = T_{j-1} \quad (33)$$

$$\text{при } y=0 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (34)$$

$$\text{при } y=\delta \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = a(T \Big|_{y=\delta} - T_N) \quad (35)$$

В умові (33)  $T_{j-1}$  - це профіль температур на виході попереднього  $j-1$  елемента. Для розв'язання рівняння (32) можна вважати, що температура  $T_{j-1}$ , незмінна по товщині плівки, оскільки задача відповідає випадку, коли значення критерію Біо мале, а швидкість процесу охолодження визначається інтенсивністю тепловіддачі від поверхні рукава до охолоджуючого повітря (зовнішня задача). Умова (34) означає відсутність теплообміну між поверхнею рукава і повітрям, замкненим в його середині, а умова (35), відповідно, процес тепловіддачі від зовнішньої поверхні рукава до охолоджуючого повітря ( $T_N$  - температура повітря, а  $a$  - коефіцієнт тепловіддачі).

Розв'язок рівняння (32) з умовами однозначності (33)-(35) приведено в /1/ і має вигляд:

$$\frac{T - T_n}{T_{j-1} - T_n} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \sin \beta_m}{\beta_m + \sin \beta_m \cdot \cos \beta_m} \cdot \cos \left( \beta_m \cdot \frac{y}{\delta} \right) \cdot \exp(-\beta_m^2 \cdot Fo), \quad (36)$$

де  $Fo = \frac{a \cdot \Delta t}{S^2}$  - критерій Фур'є (безрозмірний час), а  $\beta_m$  - корені тригонометричного рівняння

$$\text{ctg } \beta_m = \frac{\beta_m}{Bi}, \quad (37)$$

в якому  $Bi = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda}$  - критерій Біо. Нескінченний ряд швидко сходиться, а для малих значень критерію Біо можна обмежити тільки першим його членом:

$$\frac{T - T_n}{T_{j-1} - T_n} = \frac{2 \cdot \sin \beta_1}{\beta_1 + \sin \beta_1 \cdot \cos \beta_1} \cdot \cos\left(\beta_1 \cdot \frac{y}{\delta}\right) \cdot \exp(-\beta_1^2 \cdot Fo). \quad (38)$$

Графічний розв'язок рівняння (37) має вигляд, зображений на рис. 7, з якого видно, що перший корінь  $\beta_1$  лежить в інтервалі від 0 до  $\pi/2$ . Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  є сумою коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією  $\alpha_k$  і випромінювання  $\alpha_v$ . Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_k$  визначається по критеріальному рівнянню для випадку обтікання поверхні повітрям:

$$Nu = 0,0317 Re^{0,8}, \quad (39)$$

де  $Nu = \frac{\alpha_k \cdot Z}{\lambda_n}$ ,  $Re = \frac{W_n \cdot Z}{\nu_n}$ ,  $W_n$  - швидкість обтікання повітрям рукава,

$\lambda_n$  і  $\nu_n$ , відповідно теплопровідність і кінематична в'язкість повітря, які визначаються по його температурі  $T_n$ , тобто, по температурі оточуючого середовища. Швидкість обтікання  $W_n$  визначається залежно від положення засувки на вентиляторі подачі повітря по графіку градування для даної експериментальної установки.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінювання  $\alpha_v$ , визначається по залежності:

$$\alpha_v = E \cdot C_0 \cdot \frac{\left(\frac{T|_{y=\delta} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_n + 273}{100}\right)^4}{T|_{y=\delta} - T_n} \quad (40)$$

де  $T|_{y=\delta}$  - температура поверхні рукава, яка визначається розрахунком по рівнянню (38) для значення  $y/\delta=1$ ,  $E=0,56$  - ступінь чорноти, а  $C_0 = 5,67 \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$  - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

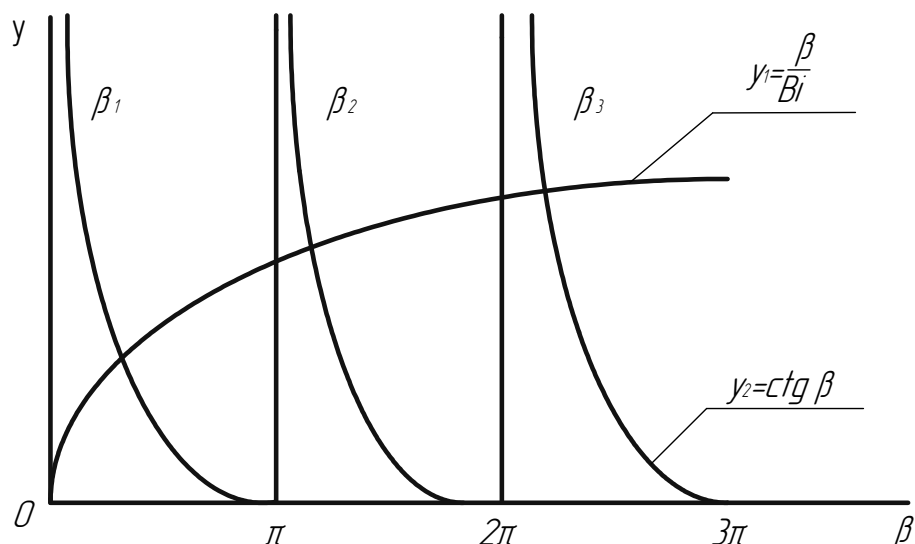


Рис. 7. Графічний розв'язок рівняння (37).

Вхідними даними для розрахунку є величини, подані в табл. 3.

Окрім цих даних необхідно ввести функції, які описують залежність теплофізичних властивостей полімеру від температури. В алгоритмі передбачена можливість їх апроксимації для чотирьох температурних діапазонів. Так, наприклад, для поліетилену марки 15802-020 апроксимуючі поліноми мають вигляд:

$$T < T^1 = 100$$

$$\rho_1(T) = 942,15 - 1,656 \cdot T^2 + 0,02578 \cdot T^2 - 0,000191 \cdot T^3 \quad (43)$$

$$\lambda_1(T) = 0,3087 - 0,001536 \cdot T + 3,143 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 2,162 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 \quad (44)$$

$$C_1(T) = 2366 - 46,8 \cdot T + 2,65 \cdot T - 0,417 \cdot T^3 + 0,000222 \cdot T^4 \quad (45)$$

$$100 \leq T < 110$$

$$\rho_2(T) = 942,15 - 1,656 \cdot T + 0,02578 \cdot T^2 - 0,00019 \cdot T^3 \quad (46)$$

$$\lambda_2(T) = 0,1993 + 1,947 \cdot 10^{-4} \cdot T - 4,202 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \quad (47)$$

$$C_2(T) = 26130 \cdot T - 1,013 \cdot T^2 + 0,0471 \cdot T^3 \quad (48)$$

$$110 \leq T < 119$$

$$\rho_3(T) = 860,2 - 0,4621 \cdot T \quad (49)$$

$$\lambda_3(T) = 0,1993 + 1,947 \cdot 10^{-4} \cdot T - 4,202 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \quad (50)$$

$$C_3(T) = 135500 - 1129 \quad (51)$$

$$T > 119$$

$$\rho_4(T) = 860,2 - 0,4621 \cdot T \quad (52)$$

$$\lambda_4(T) = 0,1993 + 1,947 \cdot 10^{-4} \cdot T - 4,202 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \quad (53)$$

$$C_4(T) = 2200 \quad (54)$$

Наведені вище дані вводяться в блоках 1 і 2, а в блоці 3 задається число вузлів по координаті  $u$ , початкове наближення координати  $Z_k$ , вибирається крок розрахунку і обчислюється секундна продуктивність. У подальшому в алгоритмі передбачено розрахунок  $Z_k$  за два цикли при значеннях лічильника  $J_n=0$ , рівних нулю і одиниці. Тому в блоці 3 приймається  $J_n=0$ . У блоці 4 приймаються початкові значення координати  $Z$ , температури  $T_m$ , поверхні рукава, середньої температури розплаву на першій  $T_c$  і попередній  $T_{c(j-1)}$  ділянках, які в першому наближенні прийняті рівними  $T_{вх}$ , а також обчислюються постійні для даного  $Z_k$  величини  $A1$  і  $A2$ . У подальшому середня температура  $T_c$  уточнюється методом послідовних наближень, причому, кількість наближень обмежується, окрім точності розрахунку, значенням лічильника  $j_r$ , яке в блоці 4 приймається рівним нулю. Розрахунок температурних полів здійснюється в блоках 5-36.

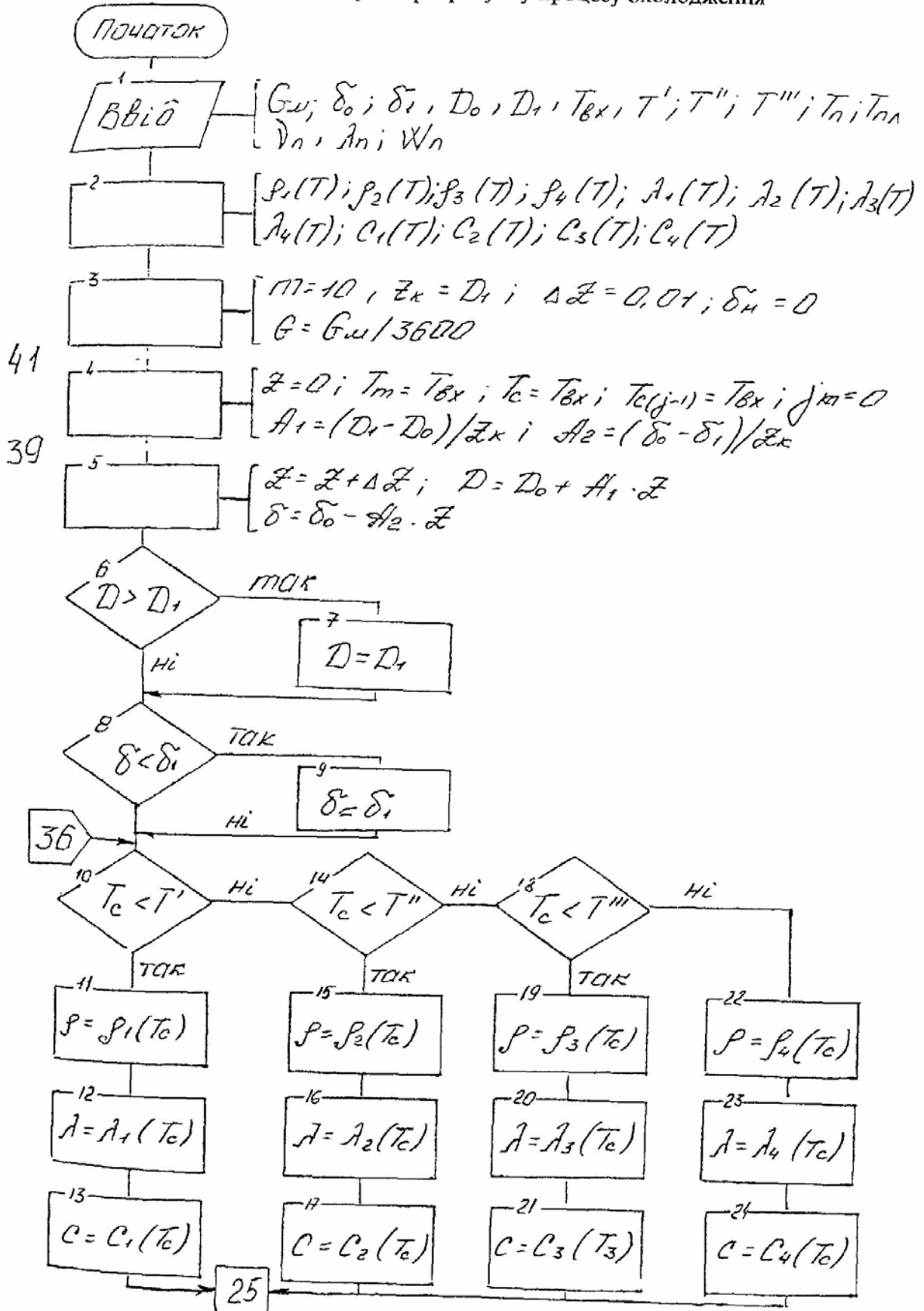
У блоці 5 обчислюється координата  $Z$  елемента, а також відповідні їй значення  $D$  та  $\delta$ , причому, блоки 6-9 сліdkують за тим, щоб ці значення не вийшли за межі кінцевих значень  $D_1$  та  $\delta_1$ . Залежно від значення  $T_c$  у блоках 10-24 визначаються теплофізичні властивості полімеру, а розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha_b$ ,  $\alpha_k$ ,  $\alpha$ , критеріїв Біо і Фурє здійснюється в блоці 25. У цьому ж блоці обнуляються значення  $T_c$  і координата  $u$ , вибирається крок розрахунку  $\Delta u$  а в блоках 26-30 здійснюється розв'язання за методом Горнера-Руффіні трансцендентного рівняння для визначення  $\beta_1$ . У блоках 31-33 обчислюються температури в вузлових точках по координаті  $u$ , визначається середня температура і похибка обчислення попереднього і даного наближень. Якщо число ітерацій менше 20 або похибка більша, ніж задане значення, то здійснюється перехід на блок 10 для обчислення наступного наближення (блоки 34-36). В іншому випадку в блоці 37 виводяться результати розрахунку, а в блоці 38 здійснюється перейменування середньої температури для розрахунку наступного елемента  $\Delta z$ . Блок 39 порівнює обчислене значення  $T_c$  з температурою плавлення  $i$ , якщо  $T_{пл}$  не досягається, здійснює перехід на блок 5 для розрахунку наступного елемента  $\Delta z$ . Блок 40 забезпечує розрахунок  $Z_k$  за два цикли. При першому розрахунку  $j_n=0$ , тому в блоці 41 значення  $Z_k$  приймається рівним координаті  $Z$ , а  $j_n$  набуває значення 1, після чого здійснюється перехід на блок 4. При другому розрахунку блок 40 забезпечує перехід на блок 42 ( $j_n=1$ ), в якому обчислюються  $N_k$ , а в блоці 43 виводяться кінцеві результати розрахунку.

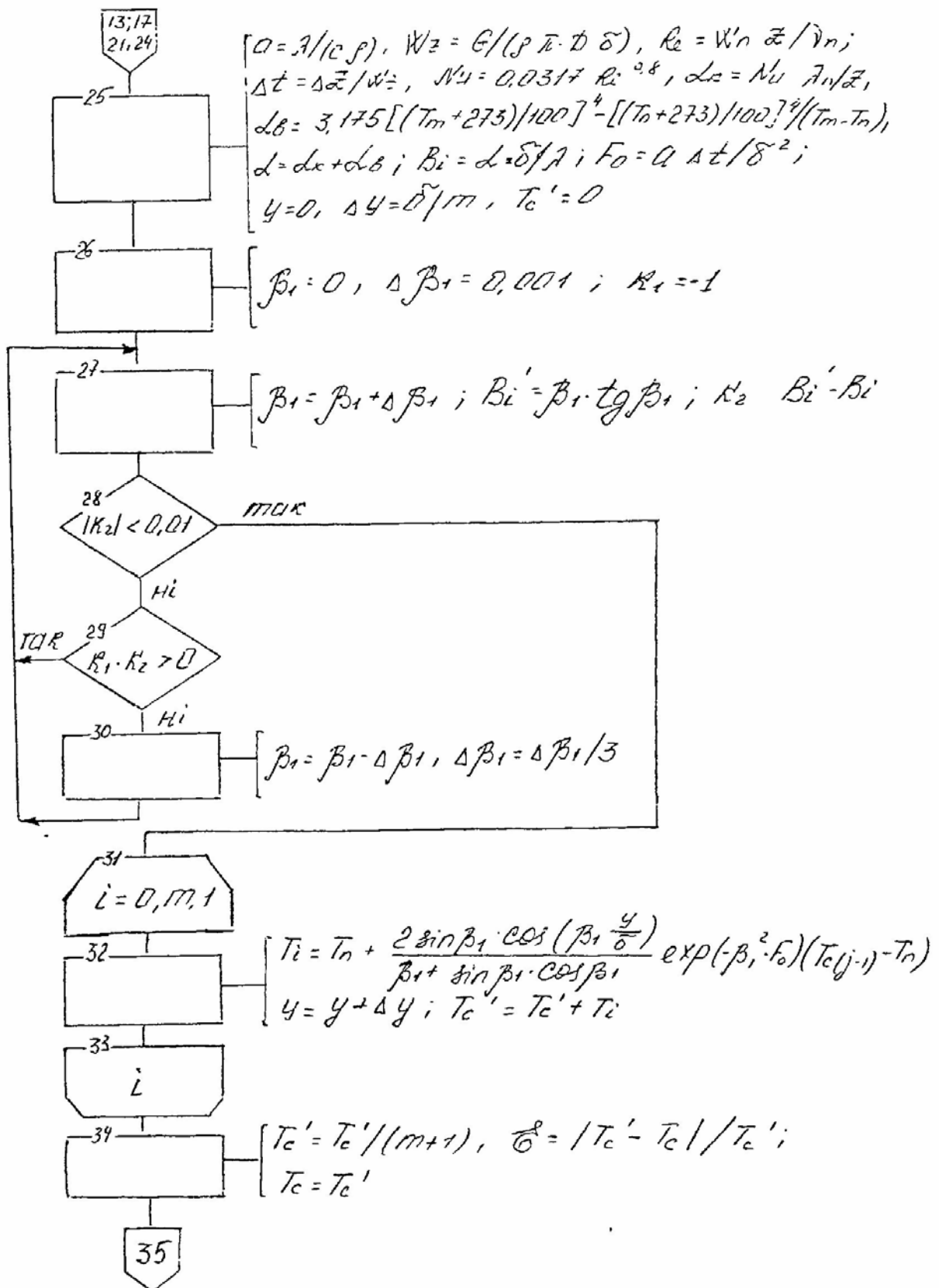
Таблиця 3 - Ідентифікатори вхідних величин

Найменування	Розмірність	Позначення	Ідент.	Значення
Продуктивність	кг/год	$G_m$	gm	

Ширина вихідного кільцевого отвору формуючої головки	м	$\delta_0$	de0	
Кінцева товщина плівки	м	$\delta_1$	de0	
Діаметр кільцевого отвору формуючої головки	м	$D_0$	d0	
Кінцевий діаметр рукава	м	$D_1$	d1	
Температура розплаву на вході в зону охолодження (на виході формуючої головки)	°С	$T_{\text{вх}}$	tb	
Інтервал апроксимації теплофізичних властивостей полімеру	°С	$T^I,$ $T^{II},$ $T^{III}$	t1, t2, t3	100, 110, 120
Температура охолоджуючого повітря	°С	$T_{\text{п}}$	tn	
Температура плавлення полімеру	°С	$T_{\text{пл}}$	tp	
Кінематична в'язкість повітря	м <sup>2</sup> /с	$\nu_{\text{п}}$	njn	
Теплопровідність повітря	Вт/(м·К)	$\lambda_{\text{п}}$	ian	
Середня швидкість повітря	м/с	$W_{\text{п}}$	wn	

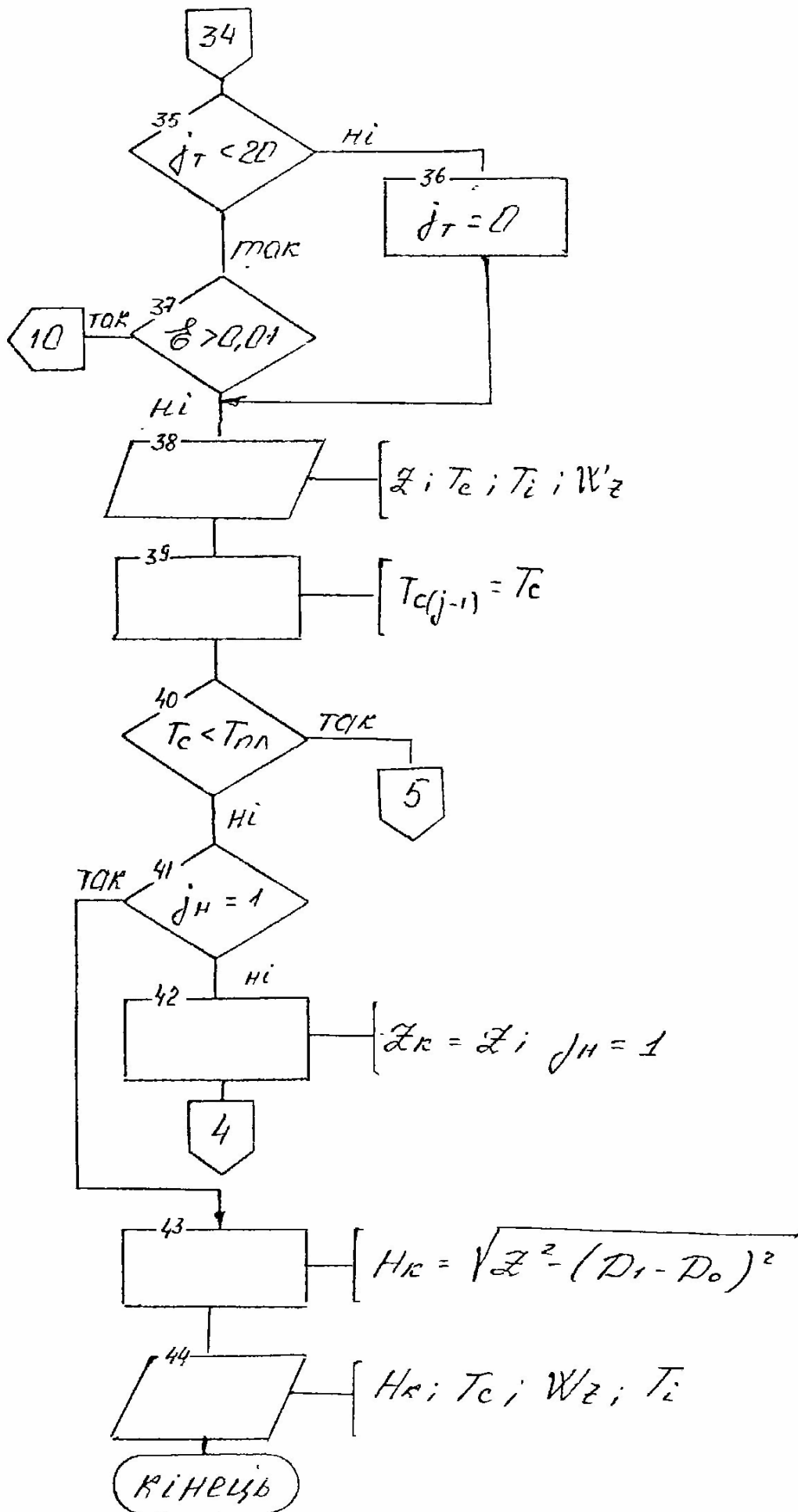
2.4.2. Алгоритм розрахунку процесу охолодження











### 2.4.3. Програма розрахунку процесу охолодження

```

CLS
PRINT " Розрахунок процесу охолодження рукавної плівки"
PRINT
PRINT "Введіть вхідні дані:"
INPUT "Діаметр кільцевого отвору головки, м"; d0
INPUT "Кінцевий діаметр рукава, м"; d1
INPUT "Товщина плівки на вході, м"; de0
INPUT "Кінцева товщина плівки, м"; de1
INPUT "Швидкість охолоджуючого повітря, м/С"; wn
INPUT "Температура охолоджуючого повітря, град С"; tn
INPUT "Продуктивність, кг/год"; gm
INPUT "Початкова температура розплаву, град С"; tb
INPUT "Температура плавлення полімеру, град С"; tp
INPUT "Теплопровідність охолоджуючого повітря, Вт/(м*К)"; lan
INPUT "Кінематична в'язкість повітря, м^2/С"; njn
PRINT "Інтервали апроксимації теплофізичних властивостей t1,t2,t3"
INPUT t1, t2, t3
DEF FNro1 (t) = 942.15 - 1.656 * t + .02578 * t ^ 2 - .000191 * t ^ 3
DEF FNro2 (t) = 942.15 - 1.656 * t + .02578 * t ^ 2 - .000191 * t ^ 3
DEF FNro3 (t) = 860.2 - .4621 * t
DEF FNro4 (t) = 860.2 - .4621 * t
DEF FNc1 (t) = 2366 - 46.8 * t + 2.65 * t ^ 2 - .0417 * t ^ 3 + .000222 * t ^ 4
DEF FNc2 (t) = 26130 - 585.5 * t - 1.013 * t ^ 2 + .0471 * t ^ 3
DEF FNc3 (t) = 135500 - 1129 * t
DEF FNc4 (t) = 2200
DEF FNla1 (t) = .3087 - .001536 * t + 3.143E-05 * t ^ 2 - 2.162E-07 * t ^ 3
DEF FNla2 (t) = .1993 + .0001947 * t - 4.202E-07 * t ^ 2
DEF FNla3 (t) = .1993 + .0001947 * t - 4.202E-07 * t ^ 2
DEF FNla4 (t) = .1993 + .0001947 * t - 4.202E-07 * t ^ 2
m = 10: DIM t(m + 1)
g = gm / 3600: zk = d1: dz = .01: j = 0
PRINT " Результати розрахунку"
PRINT " z   tc   al   wz"
1:
ro = FNro4(tc): z = 0: t(m) = tb: tc = tb: tcm = tb: ct = 0
al = (d1 - d0) / zk: a2 = (de0 - de1) / zk
2:
z = z + dz
d = d0 + a1 * z: de = de0 - a2 * z
IF d > d1 THEN d = d1
IF de < de1 THEN de = de1
3:
ct = ct + 1
IF tc < t1 THEN 4
IF tc < t2 THEN 5

```

```

IF tc < t3 THEN 6
ro = FNro4(tc): c = FNc4(tc): la = FNla4(tc): GOTO 7
4:
ro = FNro1(tc): c = FNc1(tc): la = FNla1(tc): GOTO 7
5:
ro = FNro2(tc): c = FNc2(tc): la = FNla2(tc): GOTO 7
6:
ro = FNro3(tc): c = FNc3(tc): la = FNla3(tc)
7:
a = la / (c * ro): wz = g / (ro * 3.14 * d * de)
Re = wn * z / njn: dt = dz / wz
Nu = .0317 * Re ^ .8
ak = Nu * lan / z
ab = 3.175 * (((t(m) + 273) / 100) ^ 4 - ((tn + 273) / 100) ^ 4)
ab = ab / (t(m) - tn)
al = ak + ab: bi = al * de / la: Fo = a * dt / (de ^ 2)
y = 0: dy = de / m: tcl = 0
bel = 0: dbel = .001: kb = -1
17:
bel = bel + dbel
bil = bel * TAN(bel)
km = bil - bi
IF ABS(km) / bi < .01 THEN 21
IF kb * km > 0 THEN 17
bel = bel - dbel: dbel = dbel / 3: GOTO 17
21:
a3 = 2 * SIN(bel) * EXP(-bel ^ 2 * Fo)
a3 = a3 / (bel + SIN(bel) * COS(bel))
FOR i = 0 TO m
t(i) = tn + a3 * COS(bel * y / de) * (tcm - tn)
y = y + dy: tcl = tcl + t(i)
NEXT i
tcl = tcl / (m + 1): ep = ABS(tc - tcl) / tcl: tc = tcl
IF ct < 20 THEN 10
ct = 0: GOTO 11
10:
IF ep > .01 THEN 3
11:
tcm = tc
IF j = 0 THEN 20
PRINT USING "#.### #.### #.### #.###"; z; tc; al; wz
20:
IF tc > .95 * tp THEN 2
IF j = 1 THEN 8
zk = z: j = 1: GOTO 1
8:
hk = (z ^ 2 - (d1 - d0) ^ 2) ^ .5
PRINT

```

```

PRINT USING " Довжина зони охолодження Нк ###.## м"; hk
PRINT USING " Середня температура ###.# С"; tc
PRINT USING " Швидкість прийому рукава ##.### м/С"; wz
PRINT " Профіль температур по товщині плівки на виході"
FOR i = 0 TO m
PRINT USING " ###.#"; t(i);
NEXT i
END

```

### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Порядок запуску лінії

Перед включенням лінії необхідно провести зовнішній огляд, перевірити справність комунікацій, захисних кожухів, заземлення, впевнитися у відсутності сторонніх предметів у бункері та загрузочному конусі екструдера, перевірити присутність паперових бобін на намотувальному пристрої, заправочного тросика. По лімбу, встановленому на екструдері, встановити необхідну величину зазора між дисками. Для розігріву екструдера, шестерінного насосу та формуючої головки до заданого температурного режиму необхідно:

включити вхідний автомат шафи теплової автоматики;

встановити регулятори температури різних зон на заданні температури для поліетилену низької густини:

дисківий екструдер:

корпус, °С	160
перехідник, °С	170
шестерінчатий насос, °С	180
головка, °С	180

включити обігрів кожної зони;

відкрити подачу охолоджуючої води для охолодження завантажувального конуса дисківого екструдера.

Час виходу на заданий режим дисківого екструдера та шестерінного насоса 90 хв, формуючої головки 180-210хв. Після виходу формуючої головки на заданий температурний режим установку необхідно додатково прогріти протягом 30 хв для розігріву полімеру, що знаходиться в каналах. До цього моменту вмикати приводи категорично забороняється.

Після розігріву установки необхідно включити шестерінний насос та екструдер і впевнитися, що приводи насоса та екструдера працюють плавно, а споживана потужність холостого ходу екструдера не перевищує 1 кВт.

Для пуску лінії необхідно:

увімкнути шестерінний насос та дисковий екструдер;  
розвести 5-6 короткочасних запусків дозатора гранул з інтервалом 3-4 секунди для подачі гранул в екструдер;  
включити дозатор та зробити витримку, даючи можливість продавити свіжоприготовленим розплавом формуючу головку;  
увімкнути дозатор, тягнучі валки та вентилятор подачі повітря в охолоджуюче кільце;  
провести тягнучі валки, переводячи ручку приводу валків в положення «відкрито» та встановити лінійну швидкість валків 2-3 м/хв;  
відкрити кран подачі повітря всередину рукава;  
одягти на руки теплозахисні рукавиці;  
взяти руками кінець заготовки, що вийшла з формуючої головки, стиснути його до забезпечення герметичності простору всередині заготовки та, повільно витягуючи його вгору, прив'язати до заправочного тросика;  
за допомогою заправочного тросика повільно провести кінець рукава до тягнучих валків і, коли він увійде в зазор між валками, стиснути валки, перемістивши ручку переводу валків в положення «закрито»;  
пропустити кінець рукава через систему направляючих валків приймально-тягнучого пристрою, увімкнути намотувальний пристрій та, відрізавши ножом несортову плівку, заправити кінець рукава на бобіну намотувального пристрою і регулятором числа обертів намотувального пристрою виставити необхідний натяг плівки;  
регулюючи подачу повітря всередину рукава і змінюючи продуктивність подачі охолоджуючого повітря, встановити необхідну величину роздуву рукава, а змінюючи число обертів намотувального пристрою забезпечити необхідний натяг плівки.

### 3.2. Вказівки по техніці безпеки

Вмикання та нагрів обладнання лінії проводиться обслуговуючим персоналом до початку лабораторних занять.

До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які ознайомилися з обладнанням лінії та порядком виконання лабораторної роботи.

При роботі лінії забороняється: відкривати захисні кожухи; примусово проштовхувати матеріал у завантажувальну горловину дискового екструдера; регулювати натяг приводного ланцюга тягнучого пристрою; проводити огляд, наявність мастила та ремонт під час роботи лінії; передавати чи брати предмети через працюючу лінію; торкатися до токоведучих та нагрітих частин лінії; робота лінії дозволяється тільки при включеній приточно-втяжній вентиляції.

При заправці трубчатой заготовки забороняється працювати без теплозахисних рукавиць.

Вимикання лінії проводиться в такій послідовності: дозатор, екструдер, шестерінний насос, тягучі валки та пристрій для намотки. Аварійне вимикання лінії проводиться натисканням на кнопку «аварійний стоп» типу «грибок», встановлену на пульті управління лінії (повністю вимикаються всі приводи), чи на кнопки аварійної зупинки пристроїв, що входять у лінію.

### 3.3. Методичні вказівки по виконанню експеримента

Установка включається для розігріву до початку лабораторної роботи. Після досягнення заданого теплового режиму обслуговуючий персонал проводить запуск лінії. Через 15-20хв після досягнення заданих параметрів процесу проводяться такі заміри:

потужність, яка витрачається на роботу екструдера, по ватметру на пульті управління дискового екструдера  $N_{к.д.}$ ;

величина робочого зазора по лімбу на дисковому екструдері  $H_д$ ;

частота обертання диска  $n$ ;

температура розплаву на виході з дискового екструдера за показаннями термометри, яка встановлена в перехідній частині, при виключеному нагріві другої зони  $t_{вих}$ ;

тиск перед формуючою головкою за показаннями манометра  $\Delta P$ ;

масова продуктивність за показаннями вольметра і тарувальному графіку на пульті дискового екструдера  $G$ ;

потужність, яка витрачається на шестерінному насосі, по показаннях вольметра та амперметра на пульті управління лінією  $N_{дв.}$ ;

частота обертів  $n_н$  шестерен насоса визначається візуально по приводному валу;

швидкість охолоджуючого повітря за показником на регулючій заслонці вентилятора;

радіус рукава плівки за допомогою лінійки  $R_к$ ;

радіус вихідної щілини формуючої головки  $R_н$ ;

висота лінії кристалізації за допомогою лінійки  $H_к$ ;

кінцева товщина рукавної плівки за допомогою мікрометра  $\delta_к$ .

Температуру доступуючого в екструдер полімера  $t_{вх}$  та температуру охолоджуючого повітря  $t_п$  можна прийняти рівними кімнатній температурі. Потужність холостого ходу  $N_{х.х.}$  для заданої частоти обертання знаходиться по графіку тарування. Результати вимірів заносяться в табл.4.

Таблиця 4 - Результати вимірювань

Вимірювана величина	Величина	Одиниці	Значення
Потужність холостого ходу	$N_{x.x.}$	кВт	
Потужність при роботі екструдера	$N_{p.x.}$	кВт	
Частота обертання диска	$n$	$xв^{-1}$	
Масова потужність	$G$	кг/год	
Температура полімеру на вході до екструдера	$t_{вх}$	°С	
Температура полімеру на виході з екструдера	$t_{вих}$	°С	
Величина зазору між дисками	$H_d$	м	
Тиск перед формуючою головкою	$\Delta P$	Па	
Потужність двигуна шестерінного насоса	$N_{дв.}$	кВт	
Частота обертів шестерен насоса	$n_n$	$xв^{-1}$	
Швидкість охолоджуючого повітря	$W$	м/с	
Висота лінії кристалізації	$H_k$	м	
Температура охолоджуючого повітря	$t_n$	°С	
Радіус кільцевої щілини формуючої головки	$R_n$	м	
Радіус рукава	$R_k$	м	
Товщина рукавної плівки	$\delta_k$	м	
Ширина кільцевої щілини	$\delta_o$	м	

#### 4. МЕТОДИКА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ

##### 4.1. Процес екструзії

Знайти дійсну потужність екструдера, яка затрачується на транспортування, плавлення та гомогенізацію полімерів, по залежності

$$N_d = N_{px} - N_x \quad (55)$$

Розрахувати енергосилові параметри процесу екструзії по програмі, що приводиться в розд. 2.1.

Скласти таблицю ідентифікаторів (табл.1) та внести в неї значення величин, що вводяться в програму. Необхідні геометричні розміри вже приведено в табл. 1. Число обертів диска  $n$ , продуктивність екструдера  $G_{ш}$ , та величину зазору між дисками  $H$  беруть з таблиці дослідних даних (табл.4).



Температура поступаючих в екструдер гранул  $T_{вх}$  приймається рівною кімнатній, а температура плавлення поліетилену  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ввести в ЕОМ програму розрахунку і запустити її на обчислення, відповіді на запитання програми, увівши необхідні початкові дані. Розрахувати енергосилові параметри процесу екструзії.

Порівняти розраховані значення температури розплаву на виході з екструдера та сумарну потужність дисипації відповідним експериментальним значенням температури та потужності, розрахованій по залежності (55). Знайти відносну похибку експериментальних та розрахункових значень.

#### 4.2. Опір формуючої головки

Конструктивна схема формуючої головки та розміри каналів показані на рис. 2. Розрахунок опору головки потрібно проводити в такій послідовності:

розбити канали формуючої головки на ділянки простої геометричної форми;

ввести в ЕОМ програму розрахунку і запустити її на рахунок, відповіді на запитання програми, увівши необхідні початкові данні. Необхідні розміри каналів формуючої головки взяти з рис. 2;

порівняти розраховані значення гідравлічного опору формуючої головки з відповідними експериментальними значеннями. Знайти відносну похибку експериментальних та розрахункових значень.

#### 4.3. Шестерінний насос

Користуючися залежністю (15), розрахувати густину  $\rho$ . Використовуючи гідравлічний опір, розрахований у розділі 4.2, і густину  $\rho$ , по залежності (24) знайти потужність на валу двигуна насоса.

Порівняти розраховані значення потужності з відповідним експериментальним значенням. Знайти відносну похибку експериментальних та розрахункових значень.

#### 4.4. Процес охолодження

Скласти таблицю ідентифікаторів (табл. 3) та внести в неї значення величин, що вводяться в програму. Необхідні початкові дані беруть з таблиці дослідних даних (табл. 4). Температура поступаючих в екструдер гранул  $T_{вх}$  та охолоджуючого повітря  $T_{п}$  приймається рівною кімнатній.

Порівняти розраховані значення висоти ділянки лінії кристалізації з відповідними експериментальними значеннями. Знайти відносну похибку експериментальних та розрахункових значень.

Побудувати криву залежності температури плівки від координати  $Z$ .

#### Список рекомендованої літератури

1. Рябинин Д.Д., Лукач Ю.Е. Смесительные машины для пластмассы и резиновых смесей. - М.: Машиностроение, 1972. - 272 с.
2. Теплофизические и реологические характеристики полимеров. Справочник / Под общ.ред. Ю.С.Липатова, - К.: Наук.думка, 1977.- 244с.
3. Пивень А.Н., Гречаная Н.А Чернобыльский И.И. Теплофизические свойства полимерных материалов. - К. : Вища шк., 1976. -180 с.

## Зміст

Вступ .....	3
1. Принцип роботи лінії .....	3
2. Математичні моделі та алгоритми розрахунку процесів.....	6
2.1. Процес екструзії .....	6
2.1.1. Алгоритм розрахунку дискового екструдера.....	14
2.1.2. Програма розрахунку дискового екструдера .....	16
2.2. Процес формування трубчатої заготовки .....	18
2.2.1. Алгоритм розрахунку формуючої головки .....	20
2.2.2. Програма розрахунку формуючої головки .....	23
2.3. Процес дозування розплаву .....	26
2.4. Процес охолодження плівки .....	27
2.4.1. Математична модель процесу охолодження.....	27
2.4.2. Алгоритм розрахунку процесу охолодження .....	34
2.4.3. Програма розрахунку процесу охолодження.....	37
3. Методика проведення експериментальних досліджень.....	39
3.1. Порядок запуску лінії .....	39
3.2. Вказівки по техніці безпеки .....	40
3.3. Методичні вказівки по виконанню експерименту.....	41
4. Методика обробки результатів експерименту .....	42
4.1. Процес екструзії .....	42
4.2. Опір формуючої головки .....	43
4.3. Шестерінний насос .....	43
4.4. Процес охолодження .....	43
Список рекомендованої літератури.....	44

Навчальне видання

**ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
РОЗЧИНІВ ПОЛІМЕРІВ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО НАУЦКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ ПО КУРСУ  
«МАШИНИ ТА АПАРАТИ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»

для студентів спеціальності: 090220  
«Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів»

Укладачі: Швед Микола Петрович,  
Радченко Леонід Борисович,  
Ружинська Людмила Іванівна,  
Степанюк Андрій Романович