МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
“УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ «МОДЕЛЮВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТМАС» ДЛЯ СТУДЕНТІВ V КУРСУ СПЕЦІАЛЬНОСТІ “ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ І ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ”

Затверджено на засіданні кафедри
хімічного машинобудування.
Протокол № 9 від 26.06. 2007.

Дніпропетровськ УДХТУ 2007

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
“УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ“

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ «МОДЕЛЮВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТМАС» ДЛЯ СТУДЕНТІВ V КУРСУ

Дніпропетровськ УДХТУ 2007

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи з дисципліни «Моделювання обладнання для переробки пластмас» для студентів V курсу спеціальності "Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів" / Укл. І.М. Кузяєв. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2007. – 110 с.

Укладач І.М. Кузяєв, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск В.І. Ситар, канд. техн. наук

Навчальне видання
Методичні вказівки до виконання самостійної роботи з
дисципліни "Моделювання обладнання для переробки пластмас"
для студентів V курсу спеціальності "Обладнання хімічних виробництв і
підприємств будівельних матеріалів"

Укладач КУЗЯЄВ Іван Михайлович

Редактор Л.М. Тонкошкур
Коректор Т.М. Кіжло

Підписано до друку 10.01.07. Формат 60×84 1/16. Папір ксерокс. Друк різограф. Умов.-друк. арк. 5. Облік.-вид. арк. 5,4. Тираж 40 прим. Замовлення № 77. Свідоцтво ДК №303 від 27.12.2000.
ДВНЗ УДХТУ, 49005, м. Дніпропетровськ-5, просп. Гагаріна, 8.
Видавничо-поліграфічний комплекс ІнКомЦентру

Зміст

1 МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ПОЛІМЕРНІЙ ПРОБЦІ В ЗОНІ ЖИВЛЕННЯ

1.1 Постановка задачі

У зв'язку з тим, що тиск у полімерній пробці в зоні живлення змінюється експоненційно вздовж осі черв'яка, то можна очікувати й відповідну зміну температури. Такий зв'язок обумовлює існування своєрідного захисного механізму, який попереджує надмірне перевищення тиску, тому що справедливість рівнянь для тиску буде виконуватися до тих пір, доки поверхневі шари пробки не нагріються до температури плавлення. У момент часу, коли на поверхні пробки утвориться шар розплаву, зона живлення закінчується, а починається перехідна зона, в якій зростання тиску різко сповільнюється чи навіть повністю припиняється.

У деяких випадках намагаються збільшити тиск екструзії за рахунок нейтралізації цього захисного механізму, тобто затримуючи утворення плівки розплаву різким охолодженням корпусу. Застосування такого способу в деяких випадках приводе до руйнування корпусів екструдерів та зрізуванню стінок гвинтового каналу.

Для розподілу температурного поля в твердій пробці можна скористатися одномірним рівнянням теплопровідності

$$\frac{\partial \mathbf{T_z}}{\partial \mathbf{t}} = \mathbf{a} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{T_z}}{\partial \mathbf{y}^2}, \tag{1.1}$$

де $\mathbf{T_z}$ – температура, яка розвивається в пробці;

$\mathbf{a}$ – коефіцієнт температуропровідності.

Коефіцієнт температуропровідності зв'язаний з теплофізичними характеристиками матеріалу наступною формулою

$$\mathbf{a} = \frac{\lambda_\mathbf{s}}{\mathbf{C_{ps}} \cdot \rho}, \tag{1.2}$$

де $\lambda_\mathbf{s}$ – коефіцієнт теплопровідності полімерної пробки;

$\mathbf{C_{ps}}$ – коефіцієнт теплоємності полімерної пробки;

ρ – густина полімерної пробки.

Слід відзначити, що густина твердої пробки ρ зростає при збільшенні тиску від початкового значення густини, яке характеризується насипною густиною $\rho_\mathbf{n}$; до граничного значення густини монолітного блоку полімеру $\rho_\mathbf{s}$. При цьому справедлива така залежність

$$\rho_\mathbf{s} - \rho = (\rho_\mathbf{s} - \rho_\mathbf{n}) \cdot \mathbf{exp}(-\mathbf{C}_\rho \cdot \mathbf{P_z}), \tag{1.3}$$

де $\mathbf{C}_\rho$ – емпіричний коефіцієнт;

P_Z – гідростатичний тиск, який розраховується за рівняннями

$$P_Z = P_0 \cdot \exp(AF \cdot z), \qquad (1.4)$$

де $AF = \dfrac{K_y \cdot W_n \cdot \left[f_b \cdot \cos(\theta + \varphi_0) - f_s\right] - h_G \cdot f_s \cdot (K_{XT} + K_{XP}) + A_K \cdot W_n}{h_G \cdot W_n}$;

P_0 – початковий тиск у зоні живлення, тобто тиск, що створює завантажувальний бункер;

f_b, f_s – коефіцієнти тертя між полімерним матеріалом і поверхнями робочого каналу, відповідно, внутрішньою поверхнею матеріального циліндра й зовнішньою поверхнею черв'яка;

W_n, h_G – відповідно ширина й глибина гвинтового каналу в зоні живлення;

K_{XT}, K_{XP} – коефіцієнти, які характеризують неізотропність поля тиску вздовж осі x у відношенні до поля тиску вздовж осі z;

A_K – конусність осердя черв'яка;

K_y – коефіцієнт, який характеризує неізотропність поля тиску вздовж осі y по відношенню до поля тиску вздовж осі z;

θ – кут транспортування;

φ_0 – кут підйому гвинтового каналу.

Тому що густина в загальному випадку залежить як від тиску, так і від температури, то рівняння (1.49) можна переписати так

$$\rho(P_Z, T_Z) = \rho_s(T_Z) - \left[\rho_s(T_Z) - \rho_n\right] \cdot \exp(-C_\rho \cdot P_Z). \qquad (1.5)$$

Так, наприклад, для поліетилену низької густини коефіцієнт C_ρ складає величину 0,16 МПа$^{-1}$ [1].

Необхідно також відзначити, що й коефіцієнти λ_s та C_{ps} залежать від температури. Тиск також впливає на значення цих теплофізичних характеристик. Це пов'язано з тим, що при меншому тиску між гранулами полімеру знаходиться значна кількість повітря, величини коефіцієнтів λ_s та C_{ps} для яких значно відрізняються від чистого полімеру. При зростанні тиску повітря витискується з пробки полімеру й значення λ_s і C_{ps} наближаються до монолітного блоку. Тобто, в принципі можна записати рівняння, аналогічні для густини (1.5).

Рівняння (1.1) було отримано в припущенні, що теплопровідністю вздовж осей x та z нехтуємо.

Рішення рівняння (1.4) краще виконувати в просторових координатах, зробивши таку заміну

$$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{z}}{\mathbf{V_p}}. \qquad (1.6)$$

Швидкість, з якою пробка рухається вздовж каналу $\mathbf{V_p}$, може бути розрахована за формулою

$$\mathbf{V_p} = \pi \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{N_0} \cdot \frac{\sin\theta}{\sin(\theta + \varphi_0)},$$

де **D** – зовнішній діаметр черв'яка; $\mathbf{N_0}$ – частота обертання черв'яка.

З урахуванням (1.6) вираз (1.1) можна подати так

$$\frac{\mathbf{V_p}}{\mathbf{a}} \cdot \frac{\partial \mathbf{T_z}}{\partial \mathbf{z}} = \frac{\partial^2 \mathbf{T_z}}{\partial \mathbf{y}^2}. \qquad (1.7)$$

Останнє рівняння являє собою диференційне рівняння в частинних похідних відносно температури $\mathbf{T_z}$.

Для розв'язку рівняння (1.7) складемо розрахункову схему, яка подана на рис. 1.1.

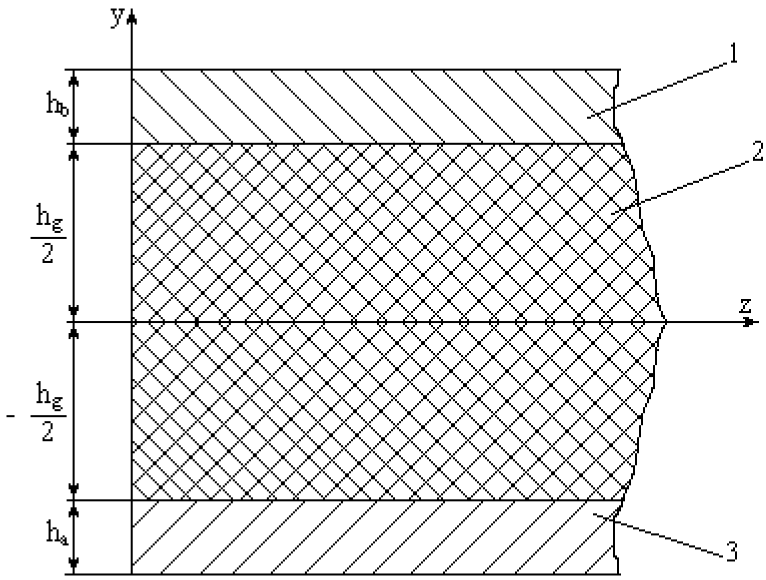


Рис. 1.1. Розрахункова схема для визначення температури :
1 – корпус; 2 – тверда полімерна пробка; 3 – осердя черв'яка

У даному випадку як для корпусу, так і для осердя черв'яка можна записати граничні умови другого роду, тобто задати теплові потоки на границі, а саме

$$-\lambda_s \cdot \frac{\partial \mathbf{T_z}}{\partial \mathbf{y}} = \mathbf{q_b} \quad \text{при} \quad \mathbf{y} = \frac{\mathbf{h_G}}{2}, \qquad (1.8)$$

$$\lambda_s \cdot \frac{\partial T_z}{\partial y} = q_s \quad \text{при} \quad y = -\frac{h_G}{2}. \qquad (1.9)$$

Знак мінус у рівнянні (1.8) поставлений тому, що тепловий потік, який направлений у тверду пробку з боку корпусу, має зворотній напрямок координаті **y**.

1.2 Складання математичної моделі у випадку припущення граничних температурних умов першого роду на зовнішніх поверхнях робочого каналу

Теплові потоки на границях у загальному випадку складаються із двох частин: перша частина, за рахунок дисипативного виділення, йде в пробку, а друга часина, за рахунок теплопровідності матеріалу корпусу й черв'яка, а також унаслідок охолодження останніх, відводиться від пробки. Таким чином, питомі теплові потоки, відповідно, на межах матеріал – корпус та матеріал – черв'як будуть [2]

$$q_b = V_p \cdot f_b \cdot P_z - \frac{\lambda_b}{h_b} \cdot \left[T_z\left(\frac{h_G}{2}, z\right) - T_b\left(h_b, z\right) \right]; \qquad (1.10)$$

$$q_s = V_p \cdot f_s \cdot P_z - \frac{\lambda_a}{h_a} \cdot \left[T_z\left(-\frac{h_G}{2}, z\right) - T_a\left(h_a, z\right) \right], \qquad (1.11)$$

де λ_b, λ_a – коефіцієнти теплопровідності, відповідно, корпусу й черв'яка;

h_b, h_a – товщини стінок, відповідно, корпусу й осердя черв'яка;

$T_b(h_b, z)$ – значення температури на зовнішній поверхні корпусу;

$T_a(h_a, z)$ – значення температури на внутрішній поверхні черв'яка, тобто на поверхні отвору для охолодження черв'яка.

Слід відзначити, що рівняння (1.11) використовується для охолоджуваних черв'яків. Якщо охолодження внутрішньої порожнини не передбачимо чи її зовсім немає, то рівняння (1.11) буде мати вигляд

$$q_s = V_p \cdot f_s \cdot P_z. \qquad (1.12)$$

Рішення рівняння (1.7) будемо шукати операційним методом. Використовуючи перетворення Лапласа [3-5] за координатою **z**, отримаємо таке рівняння

$$\frac{d^2\Lambda}{dy^2} - s \cdot \frac{V_p}{a} \cdot \Lambda = -\frac{V_p}{a} \cdot T_n. \qquad (1.13)$$

Рівняння (1.13) вже являє собою диференційне рівняння другого порядку в звичайних похідних відносно зображення температури Λ.

У рівнянні (1.13) величина Λ являє собою зображення температури $\mathbf{T_z}$, а величина $\mathbf{T_n}$ є початковим значенням температури, тобто дорівнює температурі $\mathbf{T_z}$ при $\mathbf{z = 0}$. Величина $\mathbf{s}$ є перетворенням координати $\mathbf{z}$.

Перед тим, як зробити перетворення Лапласа для граничних умов (1.8) та (1.9) з урахуванням виразів (1.10) та (1.11), зробимо припущення про незалежність теплових потоків на границях від координати $\mathbf{z}$. Це припущення буде справедливим, якщо весь інтервал уздовж осі $\mathbf{z}$ розіб'ємо на ряд достатньо малих відрізків довжиною $\Delta\mathbf{z}$.

Тоді, зображення граничних умов (1.8) та (1.9) будуть відповідно мати вигляд

$$-\lambda_s \cdot \frac{d\Lambda}{dy} = \frac{q_b}{s} \qquad \text{при} \quad y = \frac{h_G}{2}; \tag{1.14}$$

$$\lambda_s \cdot \frac{d\Lambda}{dy} = \frac{q_s}{s} \qquad \text{при} \quad y = -\frac{h_G}{2}. \tag{1.15}$$

Рішення рівняння (1.13) має вигляд

$$\Lambda = \frac{T_n}{s} + C_1 \cdot sh\left(\alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot y\right) + C_2 \cdot ch\left(\alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot y\right), \tag{1.16}$$

де $\alpha_v = \sqrt{\dfrac{V_p}{a}}$. (1.17)

Для визначення сталих інтегрування $\mathbf{C_1}$ та $\mathbf{C_2}$ здиференціюємо рівняння (1.16) за координатою $\mathbf{y}$ і підставимо в нього граничні умови (1.14) (1.15). У результаті отримаємо систему з двох рівнянь

$$-\frac{q_b}{\lambda_s \cdot s} = C_1 \cdot \alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot ch\left(\frac{\alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot h_G}{2}\right) + C_2 \cdot \alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot sh\left(\frac{\alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot h_G}{2}\right);$$

$$\frac{q_b}{\lambda_s \cdot s} = C_1 \cdot \alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot ch\left(\frac{\alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot h_G}{2}\right) - C_2 \cdot \alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot sh\left(\frac{\alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot h_G}{2}\right).$$

Із останньої системи знаходимо такі вирази для сталих інтегрування

$$C_1 = \frac{(q_s - q_b)}{2 \cdot \lambda_s \cdot \alpha_v \cdot s} \cdot \frac{1}{\sqrt{s} \cdot ch\left(\frac{\alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot h_G}{2}\right)}; \qquad (1.18)$$

$$C_2 = -\frac{(q_s + q_b)}{2 \cdot \lambda_s \cdot \alpha_v \cdot s} \cdot \frac{1}{\sqrt{s} \cdot sh\left(\frac{\alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot h_G}{2}\right)}. \qquad (1.19)$$

Підстановка (1.18) і (1.19) у (1.16) дає [6]

$$\Lambda = \frac{T_n}{s} + \frac{(q_s - q_b)}{2 \cdot \lambda_s \cdot \alpha_v \cdot s} \cdot \frac{sh(\alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot y)}{\sqrt{s} \cdot ch\left(\frac{\alpha_v \cdot \sqrt{s \cdot h_G}}{2}\right)} -$$

$$- \frac{(q_s + q_b)}{2 \cdot \lambda_s \cdot \alpha_v \cdot s} \cdot \frac{ch(\alpha_v \cdot \sqrt{s} \cdot y)}{\sqrt{s} \cdot sh\left(\frac{\alpha_v \cdot \sqrt{s \cdot h_G}}{2}\right)}. \qquad (1.20)$$

Оригіналом першого доданку в правій частині рівняння (1.20) буде

$$\frac{T_n}{s} \rightarrow T_n. \qquad (1.21)$$

Щоб знайти оригінали другого й третього доданків у рівнянні (1.20), подамо гіперболічні синуси й косинуси через показникові функції

$$sh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}; \qquad ch(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}. \qquad (1.22)$$

Після нескладних перетворень з використанням розкладення в ряд отримаємо

$$(1 - e^{-2 \cdot x})^{-1} = 1 + e^{-2 \cdot x} + e^{-4 \cdot x} + e^{-6 \cdot x} =$$

$$= \sum_{k=1}^{\infty} (1 + e^{-2 \cdot k \cdot x}) = \sum_{k=0}^{\infty} e^{-2 \cdot k \cdot x} \qquad ;$$

$$(1+e^{-2\cdot x})^{-1} = 1 - e^{-2\cdot x} + e^{-4\cdot x} - e^{-6\cdot x}$$
$$= \sum_{k=1}^{\infty}\left[1+(-1)^k \cdot e^{-2\cdot k\cdot x}\right] = \sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k \cdot e^{-2\cdot k\cdot x}.$$

Відповідно для другого й третього доданків у (1.20) маємо такі вирази

$$\frac{(q_s - q_b)}{2\cdot\lambda_s\cdot\alpha_v\cdot s}\cdot\left\{\begin{array}{l}\frac{1}{\sqrt{s}}\cdot\sum\limits_{k=0}^{\infty}(-1)^k\cdot\exp(-b1_k\cdot\sqrt{s}) - \\ -\frac{1}{\sqrt{s}}\cdot\sum\limits_{k=0}^{\infty}(-1)^k\cdot\exp(-b2_k\cdot\sqrt{s})\end{array}\right\}; \qquad (1.23)$$

$$\frac{(q_s + q_b)}{2\cdot\lambda_s\cdot\alpha_v\cdot s}\cdot\left\{\begin{array}{l}\frac{1}{\sqrt{s}}\cdot\sum\limits_{k=0}^{\infty}\exp(-b1_k\cdot\sqrt{s}) - \\ -\frac{1}{\sqrt{s}}\cdot\sum\limits_{k=0}^{\infty}\exp(-b2_k\cdot\sqrt{s}) -\end{array}\right\}, \qquad (1.24)$$

де $b1_k = \alpha_v \cdot \left[-y+\frac{h_G}{2}\cdot(2\cdot k+1)\right]$; $b2_k = \alpha_v \cdot \left[y+\frac{h_G}{2}\cdot(2\cdot k+1)\right]$.

Щоб знайти оригінали (1.23) та (1.24), треба використати табличне значення перетворення Лапласа [5]

$$\frac{1}{\sqrt{\pi\cdot z}}\cdot e^{-\frac{a^2}{4\cdot z}} \leftrightarrow \frac{e^{-a\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} \qquad (1.25)$$

і теорему множення, яку можна подати таким чином

$$F(s)\cdot G(s) \leftrightarrow \int_0^z f(\zeta)\cdot g(z-\zeta)d\zeta, \qquad (1.26)$$

де **F(s)**, **G(s)** – дві функції в зображенні; **f(ζ)**, **g(ζ)** – ті ж дві функції, але в оригіналі.

У результаті, відповідно для виразів (1.23) і (1.24), будемо мати такі оригінали

$$\frac{(q_s - q_b)}{2\cdot\lambda_s\cdot\alpha_v}\cdot\left\{\begin{array}{l}\int\limits_0^z \frac{1}{\sqrt{\pi\cdot(z-\eta)}}\cdot\sum\limits_{k=0}^{\infty}(-1)^k\cdot\exp\left[-\frac{(b1_k)^2}{4\cdot(z-\eta)}\right]d\eta - \\ -\int\limits_0^z \frac{1}{\sqrt{\pi\cdot(z-\eta)}}\cdot\sum\limits_{k=0}^{\infty}(-1)^k\cdot\exp\left[-\frac{(b2_k)^2}{4\cdot(z-\eta)}\right]d\eta\end{array}\right\}; \quad (1.27)$$

$$\frac{(q_s+q_b)}{2\cdot\lambda_s\cdot\alpha_v}\cdot\left\{\begin{array}{l}\int\limits_0^z \frac{1}{\sqrt{\pi\cdot(z-\eta)}}\cdot\sum\limits_{k=0}^{\infty}\exp\left[-\frac{(b1_k)^2}{4\cdot(z-\eta)}\right]d\eta+\\ +\int\limits_0^z \frac{1}{\sqrt{\pi\cdot(z-\eta)}}\cdot\sum\limits_{k=0}^{\infty}\exp\left[-\frac{(b2_k)^2}{4\cdot(z-\eta)}\right]d\eta\end{array}\right\}. \tag{1.28}$$

Після взяття інтегралів у виразах (1.27) і (1.28) отримаємо, відповідно, такі формули

$$\frac{(q_s-q_b)}{2\cdot\lambda_s\cdot\alpha_v}\cdot\left\{\begin{array}{l}\sum\limits_{k=0}^{\infty}(-1)^k\left\{\begin{array}{l}b1_k\cdot\left[\mathrm{erf}\left(\frac{b1_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)-1\right]+\\ +2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{(b1_k)^2}{4\cdot z}\right]\end{array}\right\}-\\ -\sum\limits_{k=0}^{\infty}(-1)^k\left\{\begin{array}{l}b2_k\cdot\left[\mathrm{erf}\left(\frac{b2_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)-1\right]+\\ +2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{(b2_k)^2}{4\cdot z}\right]\end{array}\right\}\end{array}\right\}; \tag{1.29}$$

$$\frac{(q_s+q_b)}{2\cdot\lambda_s\cdot\alpha_v}\cdot\left\{\begin{array}{l}\sum\limits_{k=0}^{\infty}\left\{\begin{array}{l}b1_k\cdot\left[\mathrm{erf}\left(\frac{b1_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)-1\right]+\\ +2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{(b1_k)^2}{4\cdot z}\right]\end{array}\right\}+\\ +\sum\limits_{k=0}^{\infty}\left\{\begin{array}{l}b2_k\cdot\left[\mathrm{erf}\left(\frac{b2_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)-1\right]+\\ +2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{(b2_k)^2}{4\cdot z}\right]\end{array}\right\}\end{array}\right\}, \tag{1.30}$$

де $\mathbf{erf}\left(\frac{b1_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)$ – функція помилок від аргументу $\left(\frac{b1_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)$;

$\mathbf{erf}\left(\frac{b2_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)$ – функція помилок від аргументу $\left(\frac{b2_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)$.

Таким чином, остаточно для розподілу температури в твердій пробці полімеру в зоні живлення маємо такий вираз

$$T_z(y,z)=T_n+\frac{(q_s-q_b)}{2\cdot\lambda_s\cdot\alpha_v}\cdot\left\{\begin{array}{l}\sum\limits_{k=0}^{\infty}(-1)^k\left\{\begin{array}{l}b1_k\cdot\left[\mathrm{erf}\left(\frac{b1_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)-1\right]+\\ +2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{(b1_k)^2}{4\cdot z}\right]\end{array}\right\}-\\ -\sum\limits_{k=0}^{\infty}(-1)^k\left\{\begin{array}{l}b2_k\cdot\left[\mathrm{erf}\left(\frac{b2_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)-1\right]+\\ +2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{(b2_k)^2}{4\cdot z}\right]\end{array}\right\}\end{array}\right\}-$$

$$-\frac{(q_s+q_b)}{2\cdot\lambda_s\cdot\alpha_v}\cdot\left\{\begin{array}{l}\sum\limits_{k=0}^{\infty}\left\{\begin{array}{l}b1_k\cdot\left[\mathrm{erf}\left(\frac{b1_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)-1\right]+\\ +2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{(b1_k)^2}{4\cdot z}\right]\end{array}\right\}+\\ +\sum\limits_{k=0}^{\infty}\left\{\begin{array}{l}b2_k\cdot\left[\mathrm{erf}\left(\frac{b2_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)-1\right]+\\ +2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{(b2_k)^2}{4\cdot z}\right]\end{array}\right\}\end{array}\right\}. \quad (1.31)$$

Якщо об’єднати комплекси при теплових потоках q_b і q_s, то рівняння (1.31) можна привести до вигляду

$$T_z(y,z)=T_n+\frac{q_s}{2\cdot\lambda_s\cdot\alpha_v}\cdot TM_z(y,z)+\frac{q_b}{2\cdot\lambda_s\cdot\alpha_v}\cdot TP_z(y,z), \quad (1.32)$$

де

$$\mathbf{TM_z(y,z) = 2\cdot\left\{\begin{aligned}&\sum_{k=1,3,5...}^{\infty}\left\{\begin{aligned}&-b1_k\cdot erfc\left(\frac{b1_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)+\\&+2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot exp\left[-\frac{(b1_k)^2}{4\cdot z}\right]\end{aligned}\right\}+\\&+\sum_{k=0,2,4...}^{\infty}\left\{\begin{aligned}&-b2_k\cdot erfc\left(\frac{b2_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)+\\&+2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot exp\left[-\frac{(b2_k)^2}{4\cdot z}\right]\end{aligned}\right\}\end{aligned}\right\}}; \quad (1.33)$$

$$\mathbf{TP_z(y,z) = 2\cdot\left\{\begin{aligned}&\sum_{k=0,2,4...}^{\infty}\left\{\begin{aligned}&-b1_k\cdot erfc\left(\frac{b1_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)+\\&+2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot exp\left[-\frac{(b1_k)^2}{4\cdot z}\right]\end{aligned}\right\}+\\&+\sum_{k=1,3,5...}^{\infty}\left\{\begin{aligned}&-b2_k\cdot erfc\left(\frac{b2_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)+\\&+2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot exp\left[-\frac{(b2_k)^2}{4\cdot z}\right]\end{aligned}\right\}\end{aligned}\right\}}. \quad (1.34)$$

При розрахунках за рівнянням (1.32) необхідно враховувати залежність теплових потоків $\mathbf{q_b}$ і $\mathbf{q_s}$ від температури згідно з формулами (1.10) і (1.11), а також залежність теплофізичних параметрів $\lambda_\mathbf{s}$, $\mathbf{C_{ps}}$, $\rho_\mathbf{s}$ від температури й тиску. Для цього треба розбити всю довжину зони живлення вздовж осі $\mathbf{z}$ на відрізки $\Delta\mathbf{z}$. І після кожного визначення температури вздовж координати $\mathbf{z}$ приводити у відповідність величини $\lambda_\mathbf{s}$, $\mathbf{C_{ps}}$, $\rho_\mathbf{s}$, $\mathbf{q_b}$, $\mathbf{q_s}$. Для врахування залежностей $\lambda_\mathbf{s}(\mathbf{T_z})$, $\mathbf{C_{ps}}(\mathbf{T_z})$, $\rho_\mathbf{s}(\mathbf{T_z})$ необхідно використати апроксимацію відповідних залежностей, які отримані експериментально.

При розрахунку температури за формулою (1.32) слід попередньо визначити значення температури на границях, а саме, $T_Z(h_G/2,z)$ і $T_Z(-h_G/2,z)$. Для цього треба записати таку систему

$$T_Z(h_G/2,z)=T_n-\frac{q_S}{2\cdot\lambda_S\cdot\alpha_V}\cdot TM_Z(h_G/2,z)+\frac{q_b}{2\cdot\lambda_S\cdot\alpha_V}\cdot TP_Z(h_G/2,z);$$

$$T_Z(-h_G/2,z)=T_n-\frac{q_S}{2\cdot\lambda_S\cdot\alpha_V}\cdot TM_Z(-h_G/2,z)+\frac{q_b}{2\cdot\lambda_S\cdot\alpha_V}\cdot TP_Z(-h_G/2,z).$$

З урахуванням рівнянь (1.10) і (1.11) останні дві формули можна подати у вигляді

$$\begin{aligned}T_Z(h_G/2,z)&=T_n-\left\{a1\cdot\left[T_a(h_a,z)-T_Z(-h_G/2,z)\right]+F_S(z)\right\}\times\\&\times TM_Z(h_G/2,z)+\left\{a2\cdot\left[T_b(h_b,z)-T_Z(h_G/2,z)\right]+F_b(z)\right\}\times\\&\times TP_Z(h_G/2,z);\end{aligned}\qquad(1.35)$$

$$\begin{aligned}T_Z(-h_G/2,z)&=T_n-\left\{a1\cdot\left[T_a(h_a,z)-T_Z(-h_G/2,z)\right]+F_S(z)\right\}\times\\&\times TM_Z(-h_G/2,z)+\left\{a2\cdot\left[T_b(h_b,z)-T_Z(h_G/2,z)\right]+F_b(z)\right\}\times\\&\times TP_Z(-h_G/2,z).\end{aligned}\qquad(1.36)$$

де $a1=\dfrac{\lambda_{ct}}{h_a\cdot\lambda_S\cdot\alpha_V}$, $\qquad a2=\dfrac{\lambda_{ct}}{h_b\cdot\lambda_S\cdot\alpha_V}$;

$$F_S(z)=\frac{V_p\cdot f_S(z)\cdot P_Z(z)}{\lambda_S\cdot\alpha_V},\qquad F_b(z)=\frac{V_p\cdot f_b(z)\cdot P_Z(z)}{\lambda_S\cdot\alpha_V}.$$

Перетворимо рівняння (1.35) і (1.36) відносно невідомих $T_Z(h_G/2,z)$ і $T_Z(-h_G/2,z)$, а саме

$$T_Z(-h_G/2,z)\cdot\left[a1\cdot TM_Z(-h_G/2,z)-1\right]-T_Z(h_G/2,z)\cdot a2\cdot TP_Z(-h_G/2,z)=-V_0\ ;\qquad(1.37)$$

$$T_z\left(-h_G/2,z\right)\cdot TM_z\left(h_G/2,z\right)\cdot a1-T_z\left(h_G/2,z\right)\cdot\left[a2\cdot TP_z\left(h_G/2,z\right)+1\right]=-V_1\ , \quad (1.38)$$

де

$$V_0=\left\{\begin{aligned}&T_n+\left[a1\cdot T_a\left(h_a,z\right)+F_s(z)\right]\cdot TM_z\left(-h_G/2,z\right)\ +\\&+\left[a2\cdot T_b\left(h_b,z\right)+F_b(z)\right]\cdot TP_z\left(-h_G/2,z\right)\end{aligned}\right\}; \quad (1.39)$$

$$V_1=\left\{\begin{aligned}&T_n+\left[a1\cdot T_a\left(h_a,z\right)+F_s(z)\right]\cdot TM_z\left(h_G/2,z\right)+\\&+\left[a2\cdot T_b\left(h_b,z\right)+F_b(z)\right]\cdot TP_z\left(h_G/2,z\right)\end{aligned}\right\}. \quad (1.40)$$

Таким чином, рівняння (1.37) і (1.38) утворюють систему з двох лінійних рівнянь з двома невідомими $T_z\left(h_G/2,z\right)$ і $T_z\left(-h_G/2,z\right)$. Таку систему можна розв’язати, наприклад, використовуючи функцію **lsolve** з пакету **Mathcad**.

1.3 Складання математичної моделі у випадку припущення граничних температурних умов третього роду на зовнішніх поверхнях робочого каналу

Для більше точного визначення температурного поля в об'ємі твердої полімерної пробки, що особливо істотно при проведенні високошвидкісних процесів екструзії, необхідно на зовнішніх границях системи використати умови конвективного теплообміну, які викликані рухом охолодного середовища. Тоді для кожного із шарів тришарової системи, поданої на рис. 1.1, можна записати такі рівняння нестаціонарної теплопровідності [7]

$$\rho_b\cdot C_{pb}\cdot\frac{\partial T_1}{\partial t}=\lambda_b\cdot\frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2}; \quad (1.41)$$

$$\rho_s\cdot C_{ps}\cdot\frac{\partial T_2}{\partial t}=\lambda_s\cdot\frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2}; \quad (1.42)$$

$$\rho_a\cdot C_{pa}\cdot\frac{\partial T_3}{\partial t}=\lambda_a\cdot\frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2}, \quad (1.43)$$

де T_1, T_2, T_3 – розподіл температурного поля відповідно в корпусі, полімерному матеріалі й осердя черв'яка; ρ_b, ρ_s, ρ_a – густина відповідно для матеріалу корпуса, полімеру й черв'яка; C_{pb}, C_{ps}, C_{pa} – коефіцієнти теплоємності відповідно для матеріалу корпуса, полімеру й черв'яка; λ_b, λ_s, λ_a – коефіцієнти теплопровідності відповідно для матеріалу корпуса, полімеру й черв'яка.

Усі три вирази (1.41) - (1.43) являють собою рівняння нестаціонарної теплопровідності й повинні мати по дві граничні умови вздовж осі **y** і по одній початковій умові щодо часу **t**.

Для шару корпуса, тобто для рівняння (1.41), на верхній границі, унаслідок омивання її рідким середовищем, варто прийняти граничну умову третього роду, що характеризує конвективний теплообмін. На нижній границі в першому наближенні можна задатися граничною умовою першого роду. Тоді граничні й початкові умови для рівняння (1.41) будуть мати вигляд

$$\mathbf{T_1 = T_{kv}} \text{ при } \mathbf{y = \frac{h_g}{2}}; \qquad \lambda_{\mathbf{b}} \cdot \frac{\partial \mathbf{T_1}}{\partial \mathbf{y}} = \alpha_{\mathbf{ck}} \cdot \left(\mathbf{T_{ck} - T_{kn}}\right) \text{ при } \mathbf{y = \frac{h_g}{2} + h_b}; \quad (1.44)$$

$$\mathbf{T_1 = T_{1n}} \text{ при } \mathbf{t = 0}, \quad (1.45)$$

де $\mathbf{T_{kv}}$ – температура поверхні корпуса на нижній границі; $\mathbf{T_{1n}}$ – початкова температура корпуса; $\mathbf{T_{kn}}$ – температура корпуса на верхній границі; $\mathbf{T_{ck}}$ – температура охолодного середовища; $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{ck}}$ – коефіцієнт тепловіддачі між охолодним середовищем і зовнішньою поверхнею корпуса, що визначається з виразу

$$\alpha_{\mathbf{ck}} = \frac{\mathbf{Nu} \cdot \lambda_{\mathbf{w}}}{\mathbf{d_e}},$$

де $\boldsymbol{\lambda}_{\mathbf{w}}$ – коефіцієнт теплопровідності для охолодного середовища; $\mathbf{d_e}$ – еквівалентний діаметр охолодного каналу, що залежить від конфігурації каналу; **Nu** – критерій Нуссельта, що залежить від типу потоку й геометрії каналів.

Для конфігурації системи охолодження зони живлення черв'ячних машин і відповідного швидкісного режиму можна записати наступний вираз для критерію Нуссельта [8]

$$\mathbf{Nu = 0{,}021} \cdot \varepsilon_{\mathbf{l}} \cdot \mathbf{Re^{0{,}8}} \cdot \mathbf{Pr^{0{,}43}} \cdot \left(\frac{\mathbf{Pr}}{\mathbf{Pr_{ст}}}\right)^{\mathbf{0{,}25}},$$

де **Re** – критерій Рейнольдса; $\mathbf{Pr}$, $\mathbf{Pr_{ст}}$ – критерії Прандтля, відповідно, при середній температурі охолодного агента й стінки, що стикається з охолодним потоком; $\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{l}}$ – поправочний коефіцієнт, що враховує вплив на коефіцієнт тепловіддачі відносини довжини каналу до його еквівалентного діаметра.

Вирази для критеріїв Рейнольдса й Прандтля, відповідно, можна подати у вигляді

$$\mathbf{Re} = \frac{\mathbf{V_w \cdot d_e} \cdot \rho_{\mathbf{w}}}{\eta_{\mathbf{w}}}; \qquad \mathbf{Pr} = \frac{\mathbf{C_{pw}} \cdot \eta_{\mathbf{w}}}{\lambda_{\mathbf{w}}},$$

де $\mathbf{V_w}$ – швидкість охолодного середовища; $\boldsymbol{\rho}_{\mathbf{w}}$, $\mathbf{C_{pw}}$, $\boldsymbol{\lambda}_{\mathbf{w}}$ – відповідно густина, коефіцієнти теплоємності й теплопровідності охолодного середовища.

Рішення рівняння (1.41) будемо знаходити, використовуючи перетворення Лапласа. Виконавши перетворення Лапласа за часом **t**, одержимо наступний операторний аналог

$$\frac{d^2 T_1^L}{dy^2} - \frac{s}{a_b} \cdot T_1^L = -\frac{T_{1n}}{a_b}, \qquad (1.46)$$

де T_1^L – зображення температури T_1; s – змінна перетворення Лапласа; a_b – коефіцієнт температуропровідності для матеріалу корпуса.

Операторні аналоги граничних умов (1.44) запишуться в такий спосіб

$$T_1^L = \frac{T_{kv}}{s} \text{ при } y = \frac{h_g}{2}; \qquad \frac{dT_1^L}{dy} = \frac{\alpha_{ck}}{\lambda_b \cdot s} \cdot (T_{ck} - T_{kn}) \text{ при } y = \frac{h_g}{2} + h_b. \qquad (1.47)$$

Рішення рівняння (1.46) має такий вигляд

$$T_1^L = \frac{T_{1n}}{s} + c_1 \cdot sh\left(\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot y\right) + c_2 \cdot ch\left(\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot y\right).$$

Визначаючи сталі інтегрування c_1 і c_2 в останньому рівнянні, використовуючи при цьому граничні умови (1.47), можна записати наступний вираз

$$T_1^L = \frac{T_{1n}}{s} + \frac{T_{kv} - T_{1n}}{s} \cdot \frac{ch\left[\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot \left(h_{bk} - y\right)\right]}{ch\left(\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot h_b\right)} + \frac{\alpha_{ck}}{\lambda_b \cdot s} \cdot \frac{\sqrt{a_b}}{\sqrt{s}} \cdot \left(T_{ck} - T_{kn}\right) \times$$

$$\times \left\{ \frac{sh\left(\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot y\right)}{ch\left(\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot h_{bk}\right)} - \frac{sh\left(\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot \frac{h_g}{2}\right)}{ch\left(\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot h_b\right)} \cdot \frac{ch\left[\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot \left(h_{bk} - y\right)\right]}{ch\left(\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot h_{bk}\right)} \right\}, \qquad (1.48)$$

де $h_{bk} = \frac{h_g}{2} + h_b$.

Комплекс, що стоїть у фігурних дужках останнього рівняння, адекватний такому співвідношенню

$$\frac{sh\left[\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot \left(y - \frac{h_g}{2}\right)\right]}{ch\left(\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot h_b\right)}.$$

Виражаючи гіперболічні функції в останньому співвідношенні через показникові, виконавши після чого відповідні перетворення за аналогією з попереднім розділом і підставивши у формулу (1.48), одержимо остаточне рівняння для зображення температурного поля в корпусі в наступному вигляді

$$\mathbf{T_1{}^L = \frac{T_{1n}}{s} + \frac{T_{kv} - T_{1n}}{s} \cdot \frac{ch\left[\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot \left(h_{bk} - y\right)\right]}{ch\left(\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot h_b\right)} + \frac{\alpha_{ck} \cdot \sqrt{a_b}}{\lambda \cdot s} \cdot \left(T_{ck} - T_{kn}\right) \times}$$

$$\mathbf{\times\left[\frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \exp\left(-b1_k \cdot \sqrt{s}\right) - \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \exp\left(-b2_k \cdot \sqrt{s}\right)\right]}, \qquad (1.49)$$

де $\mathbf{b1_k = \sqrt{\frac{1}{a_b}} \cdot \left[-\left(y - \frac{h_g}{2}\right) + h_b \cdot (2 \cdot k + 1)\right]}$;

$$\mathbf{b2_k = \sqrt{\frac{1}{a_b}} \cdot \left[\left(y - \frac{h_g}{2}\right) + h_b \cdot (2 \cdot k + 1)\right]}.$$

Для визначення оригіналу другого члена в правій частині рівняння (1.49) можна скористатися другою теоремою розкладання у такому вигляді

$$\mathbf{\frac{A(s)}{s \cdot B(s)} \leftrightarrow \frac{A(0)}{B(0)} + \sum_{k=1}^{n} \frac{A(s_k)}{s_k \cdot B'(s_k)} \cdot e^{s_k \cdot t}}, \qquad (1.50)$$

де $\mathbf{A(s)}$ – чисельник другого члена; $\mathbf{B(s)}$ – знаменник другого члена; $\mathbf{A(0)}$ і $\mathbf{B(0)}$ – відповідно значення чисельника й знаменника при $\mathbf{s = 0}$; $\mathbf{s_k}$ – полюси, тобто величини, при яких знаменник буде дорівнювати нулю

$$\mathbf{A(s) = \left(T_{kv} - T_{1n}\right) \cdot ch\left[\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot \left(h_{bk} - y\right)\right]};$$

$$\mathbf{B(s) = ch\left(\sqrt{\frac{s}{a_b}} \cdot h_b\right)};$$

$$\mathbf{B'(s_k) = \left.\frac{dB(s)}{ds}\right|_{s_k}}.$$

При цьому полюси запишуться в такий спосіб

$$s_0 = 0;\ s_k = -\frac{\pi^2 \cdot a_b}{2 \cdot h_b} \cdot (2 \cdot k - 1).$$

де $k = 1,\ 2,\ 3...$

Щоб визначити оригінал третього члена в рівнянні (1.49) варто використати вираз (1.26) для переходу від зображення до оригіналу, замінивши при цьому координату **z** на час **t**. Після чого необхідно застосувати теорему про інтегрування оригіналу.

Остаточно для розподілу температурного поля в оригіналі для корпуса можна записати наступний вираз

$$T_1(t, y) = T_{kv} + \frac{4}{\pi} \cdot (T_{kv} - T_{1n}) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2 \cdot k - 1)} \cdot \cos\left[\frac{\pi \cdot (h_{bk} - y)}{2 \cdot h_b} \cdot (2 \cdot k - 1)\right] \times$$

$$\times \exp\left[-\frac{\pi^2 \cdot a_b}{4 \cdot h_b^2} \cdot (2 \cdot k - 1)^2 \cdot t\right] +$$

$$+ \frac{\alpha_{ck} \cdot \sqrt{a_b}}{\lambda_b} \cdot (T_{ck} - T_{kn}) \cdot \left\{\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \left[2 \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{b1_k^{\,2}}{4 \cdot t}\right) - b1_k \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{b1_k}{2 \cdot \sqrt{t}}\right)\right] - \right.$$

$$\left. - \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \left[2 \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{b2_k^{\,2}}{4 \cdot t}\right) - b2_k \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{b2_k}{2 \cdot \sqrt{t}}\right)\right]\right\}. \qquad (1.51)$$

Якщо розглядати процес теплообміну в корпусі в стаціонарному наближенні, то рівняння (1.51) зводиться до наступного спрощеного вигляду

$$T_1(y) = T_{kv} + \frac{\alpha_{ck}}{\lambda_b} \cdot (T_{ck} - T_{kn}) \cdot \left(y - \frac{h_g}{2}\right). \qquad (1.52)$$

У рівняння (1.52) величина T_{kn} є невідомою. Для її визначення варто записати рівняння (1.52) при $y = h_{bk}$ і вирішити відносно T_{kn}. Тоді можна записати

$$T_{kn} = \frac{T_{kv} + \frac{\alpha_{ck}}{\lambda_b} \cdot h_b \cdot T_{ck}}{1 + \frac{\alpha_{ck}}{\lambda_b} \cdot h_b}. \qquad (1.53)$$

З урахуванням останнього виразу рівняння (1.52) можна подати так

$$\mathbf{T_1(y) = T_{kv} \cdot \left[1 - \frac{\frac{\alpha_{ck}}{\lambda_b} \cdot \left(y - \frac{h_g}{2}\right)}{1 + \frac{\alpha_{ck}}{\lambda_b} \cdot h_b}\right] + T_{ck} \cdot \left[1 - \frac{\frac{\alpha_{ck}}{\lambda_b} \cdot h_b}{1 + \frac{\alpha_{ck}}{\lambda_b} \cdot h_b}\right] \cdot \frac{\alpha_{ck}}{\lambda_b} \cdot \left(y - \frac{h_g}{2}\right)}. \quad (1.54)$$

За аналогією з тим, як були отримані рівняння для верхнього шару, тобто корпуса, можна одержати й відповідні вирази для нижнього шару, тобто осердя черв'яка. При цьому, замість граничних і початкових умов (1.44) і (1.45) варто записати наступні вирази

$$\mathbf{T_3 = T_{sn}} \text{ при } \mathbf{y = -\frac{h_g}{2}}; \quad \mathbf{-\lambda_a \cdot \frac{\partial T_3}{\partial y} = \alpha_{cs} \cdot (T_{cs} - T_{sv})} \text{ при } \mathbf{y = -\left(\frac{h_g}{2} + h_a\right)}; \quad (1.55)$$

$$\mathbf{T_3 = T_{3n}} \text{ при } \mathbf{t = 0}, \quad (1.56)$$

де $\mathbf{T_{sn}}$ – температура осердя на верхній межі; $\mathbf{T_{3n}}$ – початкова температура осердя черв'яка; $\mathbf{T_{sv}}$ – температура осердя на нижній межі, тобто на поверхні охолодного отвору; $\mathbf{T_{cs}}$ – температура охолодного середовища; $\boldsymbol{\alpha_{cs}}$ – коефіцієнт тепловіддачі між охолодним середовищем і поверхнею охолодного отвору, що визначається як і для величини $\boldsymbol{\alpha_{ck}}$.

Аналог рівняння (1.54) для осердя черв'яка може бути записаний таким чином

$$\mathbf{T_3(y) = T_{sn} \cdot \left[1 + \frac{\frac{\alpha_{cs}}{\lambda_a} \cdot \left(y + \frac{h_g}{2}\right)}{1 + \frac{\alpha_{cs}}{\lambda_a} \cdot h_a}\right] - T_{cs} \cdot \left[1 - \frac{\frac{\alpha_{cs}}{\lambda_a} \cdot h_a}{1 + \frac{\alpha_{cs}}{\lambda_a} \cdot h_a}\right] \cdot \frac{\alpha_{cs}}{\lambda_a} \cdot \left(y + \frac{h_g}{2}\right)}. \quad (1.57)$$

Якщо розглядати спільно систему трьох шарів, зображених на рис. 1.1, то температура $\mathbf{T_{kv}}$, що входить у рівняння (1.54), і температура $\mathbf{T_{sn}}$, що входить у рівняння (1.57), чітко не визначені. Для їхньої конкретизації варто вирішити теплову задачу для другого шару, тобто для твердої пробки полімерного матеріалу.

Для рівняння (1.42), унаслідок наявності сил тертя між твердою пробкою й поверхнями корпуса й черв'яка, варто прийняти граничні умови другого роду, які можна надати так

$$-\lambda_s \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y} = q_b \text{ при } y = \frac{h_g}{2}; \; \lambda_s \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y} = q_a \text{ при } y = -\frac{h_g}{2}, \tag{1.58}$$

де q_b, q_a – теплові потоки відповідно на верхній і нижній границях, які можна записати в такий спосіб

$$q_b = q_{b1} - q_{b2}; \qquad q_s = q_{s1} - q_{s2}; \tag{1.59}$$

де q_{b1}, q_{s1} – теплові потоки, які йдуть у тверду пробку й нагрівають її за рахунок сил тертя, що виникають на границі розділу твердої пробки з поверхнею гвинтового каналу; q_{b2}, q_{s2} – теплові потоки, які відводяться від твердої пробки й прохолоджують її за рахунок охолодного середовища, що контактує відповідно із зовнішньою поверхнею корпуса й внутрішньою поверхнею осердя черв'яка.

Згідно з попереднім розділом будуть справедливі наступні залежності

$$q_{b1} = V_p \cdot f_b \cdot P_z; \qquad q_{s1} = V_p \cdot f_s \cdot P_z. \tag{1.60}$$

Для визначення теплових потоків q_{b2} і q_{s2} варто записати наступні співвідношення

$$q_{b2} = \lambda_b \cdot \frac{\partial T_1}{\partial y}; \qquad q_{s2} = \lambda_a \cdot \frac{\partial T_3}{\partial y}.$$

З урахуванням формул (1.54) (1.57) останні залежності відповідно будуть мати вигляд

$$q_{b2} = T_{kv} \cdot k_{1b} + T_{ck} \cdot k_{2b}; \tag{1.61}$$

$$q_{s2} = T_{sn} \cdot k_{1s} + T_{cs} \cdot k_{2s}, \tag{1.62}$$

де $k_{1b} = \dfrac{\alpha_{ck} \cdot \lambda_b}{\lambda_b + \alpha_{ck} \cdot h_b}$; $\qquad k_{2b} = \left(1 - \dfrac{\alpha_{ck} \cdot h_b}{\lambda_b + \alpha_{ck} \cdot h_b}\right) \cdot \alpha_{ck}$;

$$k_{1s} = \frac{\alpha_{cs} \cdot \lambda_a}{\lambda_a + \alpha_{cs} \cdot h_a}; \qquad k_{2s} = \left(1 - \frac{\alpha_{cs} \cdot h_a}{\lambda_a + \alpha_{cs} \cdot h_a}\right) \cdot \alpha_{cs}.$$

Рішення рівняння (1.42) більш зручно знаходити, якщо перейти від нестаціонарної задачі теплопровідності при одній координаті до стаціонарної задачі, залежно від двох координат, зробивши заміну (1.6). При цьому, за аналогією з (1.7) можна записати

$$\frac{V_p}{a_s} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial z} = \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2}, \tag{1.63}$$

де a_s – коефіцієнт температуропровідності для матеріалу твердої пробки.

Граничні умови (1.58) для рівняння (1.63) будуть справедливі, а початкова умова по осі **z** буде мати вигляд

$$T_2 = T_{2n} \text{ при } z = 0. \tag{1.64}$$

Використовуючи перетворення Лапласа для рішення рівняння (1.63) з урахуванням граничних умов (1.58) і початкової умови (1.64), вираз у зображеннях для розподілу температурного поля в твердій пробці полімерного матеріалу буде мати вигляд

$$T_2^L = \frac{T_{2n}}{s} - \frac{q_s}{\lambda_s \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{V_P}} \frac{ch\left[\sqrt{\frac{V_p}{a_s} \cdot s} \cdot \left(y - \frac{h_g}{2}\right)\right]}{\sqrt{s} \cdot sh\left(\sqrt{\frac{V_p}{a_s} \cdot s} \cdot h_g\right)} -$$

$$- \frac{q_b}{\lambda_s \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{V_P}} \frac{ch\left[\sqrt{\frac{V_p}{a_s} \cdot s} \cdot \left(y + \frac{h_g}{2}\right)\right]}{\sqrt{s} \cdot sh\left(\sqrt{\frac{V_p}{a_s} \cdot s} \cdot h_g\right)}. \tag{1.65}$$

Якщо подати гіперболічні функції через показникові за аналогією з рівнянням (1.49), то формулу (1.65) можна переписати в наступному вигляді

$$T_2^L = \frac{T_{2n}}{s} - \frac{q_s}{\lambda_s \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{V_p}} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp\left(-d1_k \cdot \sqrt{s}\right) + \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp\left(-d2_k \cdot \sqrt{s}\right)\right] -$$

$$- \frac{q_b}{\lambda_s \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{V_p}} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp\left(-d3_k \cdot \sqrt{s}\right) + \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp\left(-d4_k \cdot \sqrt{s}\right)\right], \tag{1.66}$$

де $d1_k = \sqrt{\frac{Vp}{a_s}} \cdot \left[-\left(y - \frac{h_g}{2}\right) + h_g \cdot (2 \cdot k + 1)\right]$;

$$d2_k = \sqrt{\frac{Vp}{a_s}} \cdot \left[\left(y - \frac{h_g}{2}\right) + h_g \cdot (2 \cdot k + 1)\right];$$

$$d3_k = \sqrt{\frac{V_p}{a_s}} \cdot \left[-\left(y + \frac{h_g}{2} \right) + h_g \cdot (2 \cdot k + 1) \right];$$

$$d4_k = \sqrt{\frac{V_p}{a_s}} \cdot \left[\left(y + \frac{h_g}{2} \right) + h_g \cdot (2 \cdot k + 1) \right].$$

За аналогією з тим, як був отриманий оригінал для третього члена в правій частині рівняння (1.51), оригінал для рівняння (1.66) з урахуванням виразів (1.59) - (1.62) можна подати так

$$T_2(z,y) = T_{2n} - \frac{1}{\lambda_s} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{V_p}} \cdot \left(V_P \cdot f_s \cdot P_z - T_{sn} \cdot k_{1s} + T_{cs} \cdot k_{2s} \right) \cdot EX_1(z,y) -$$

$$- \frac{1}{\lambda_s} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{V_p}} \cdot \left(V_P \cdot f_b \cdot P_z - T_{kv} \cdot k_{1b} + T_{ck} \cdot k_{2b} \right) \cdot EX_2(z,y), \qquad (1.67)$$

де $EX_1(z,y) = \sum\limits_{k=0}^{\infty} \left[2 \cdot \sqrt{\frac{z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{d1_k^{\,2}}{4 \cdot z} \right) - d1_k \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{d1_k}{2 \cdot \sqrt{z}} \right) \right] +$

$$+ \sum_{k=0}^{\infty} \left[2 \cdot \sqrt{\frac{z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{d2_k^{\,2}}{4 \cdot z} \right) - d2_k \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{d2_k}{2 \cdot \sqrt{z}} \right) \right]; \qquad (1.68)$$

$$EX_2(z,y) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[2 \cdot \sqrt{\frac{z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{d3_k^{\,2}}{4 \cdot z} \right) - d3_k \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{d3_k}{2 \cdot \sqrt{z}} \right) \right] +$$

$$+ \sum_{k=0}^{\infty} \left[2 \cdot \sqrt{\frac{z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{d4_k^{\,2}}{4 \cdot z} \right) - d4_k \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{d4_k}{2 \cdot \sqrt{z}} \right) \right]. \qquad (1.69)$$

Щоб скористатися рівнянням (1.67), необхідно мати значення температур на верхній $T_2\left(z, h_g/2\right)$ і нижній $T_2\left(z, -h_g/2\right)$ межах твердої пробки полімерного матеріалу. Для цього треба в рівняння (1.67) підставити відповідні значення координати y, а саме $y = h_g/2$ і $y = -h_g/2$. У матричному вигляді дану систему можна представити в наступному виді

$$\begin{bmatrix} T_2\left(z, -\frac{h_g}{2}\right) \\ T_2\left(z, \frac{h_g}{2}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{0,0} & M_{0,1} \\ M_{1,0} & M_{1,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \end{bmatrix}, \qquad (1.70)$$

де $M_{0,0} = a1_s \cdot EX_1\left(z, -\frac{h_g}{2}\right) - 1$;

$$M_{0,1} = -a1_b \cdot EX_2\left(z, -\frac{h_g}{2}\right);$$

$$M_{1,0} = a1_s \cdot EX_1\left(z, \frac{h_g}{2}\right);$$

$$M_{1,1} = -a1_b \cdot EX_2\left(z, \frac{h_g}{2}\right) - 1;$$

$$V_0 = -T_{2n} + (a_{cs} \cdot T_{cs} + F_s) \cdot EX_1\left(z, -\frac{h_g}{2}\right) + (-a_{ck} \cdot T_{ck} + F_b) \cdot EX_2\left(z, -\frac{h_g}{2}\right);$$

$$V_1 = -T_{2n} + (a_{cs} \cdot T_{cs} + F_s) \cdot EX_1\left(z, \frac{h_g}{2}\right) + (-a_{ck} \cdot T_{ck} + F_b) \cdot EX_2\left(z, \frac{h_g}{2}\right);$$

$$F_s = \frac{V_p \cdot f_s \cdot P_z}{\lambda_s} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{V_p}};$$

$$F_b = \frac{V_p \cdot f_b \cdot P_z}{\lambda_s} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{V_p}};$$

$$a1_s = \frac{\lambda_a \cdot \alpha_{cs}}{\lambda_s \cdot (\lambda_a + \alpha_{cs} \cdot h_a)} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{V_p}};$$

$$a1_b = \frac{\lambda_b \cdot \alpha_{ck}}{\lambda_s \cdot (\lambda_b + \alpha_{ck} \cdot h_b)} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{V_p}};$$

$$\mathbf{a_{cs}} = \left(1 - \frac{\alpha_{cs} \cdot h_a}{\lambda_a + \alpha_{cs} \cdot h_a}\right) \cdot \frac{\alpha_{cs}}{\lambda_s} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{V_p}}\,;$$

$$\mathbf{a_{ck}} = \left(1 - \frac{\alpha_{ck} \cdot h_b}{\lambda_b + \alpha_{ck} \cdot h_b}\right) \cdot \frac{\alpha_{ck}}{\lambda_s} \cdot \sqrt{\frac{a_s}{V_p}}\,.$$

Значення температур $\mathbf{T_2\left(z, h_g/2\right)}$ й $\mathbf{T_2\left(z, -h_g/2\right)}$ у формулі (1.70) відповідає температурам $\mathbf{T_{kv}}$ і $\mathbf{T_{sn}}$ у виразі (1.67).

Визначення температури за рівнянням (1.67) з урахуванням виразу (1.70) важливо в тому розумінні, що температурний режим має великий функціональний вплив на коефіцієнти тертя $\mathbf{f_b}$ і $\mathbf{f_s}$, відношення яких у свою чергу вносить основний вклад у створення тиску в зоні живлення черв'ячних машин із гладкою внутрішньою поверхнею корпуса. Необхідно відзначити, що створюваний тиск у зоні живлення сприяє проштовхуванню полімерного матеріалу також і через зону пластикації, особливо на початковій ділянці.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЛАВЛЕННЯ ТЕРМОПЛАСТІВ В ОДНОЧЕРВ’ЯЧНИХ ЕКСТРУЗІЙНИХ АГРЕГАТАХ

У роботі [9] наведений аналіз існуючих схем і методик для моделювання процесів плавлення в пластикувальних екструзійних агрегатах і наведені підходи для реалізації моделей, що дозволяють оптимізувати вхідні й вихідні параметри об'єкта моделювання, які стосуються як технологічних, так і геометричних характеристик.

2.1 Аналіз функціонування зони плавлення з циліндричним осердям

Для моделювання процесів плавлення розглянемо схеми, представлені на рис. 2.1.

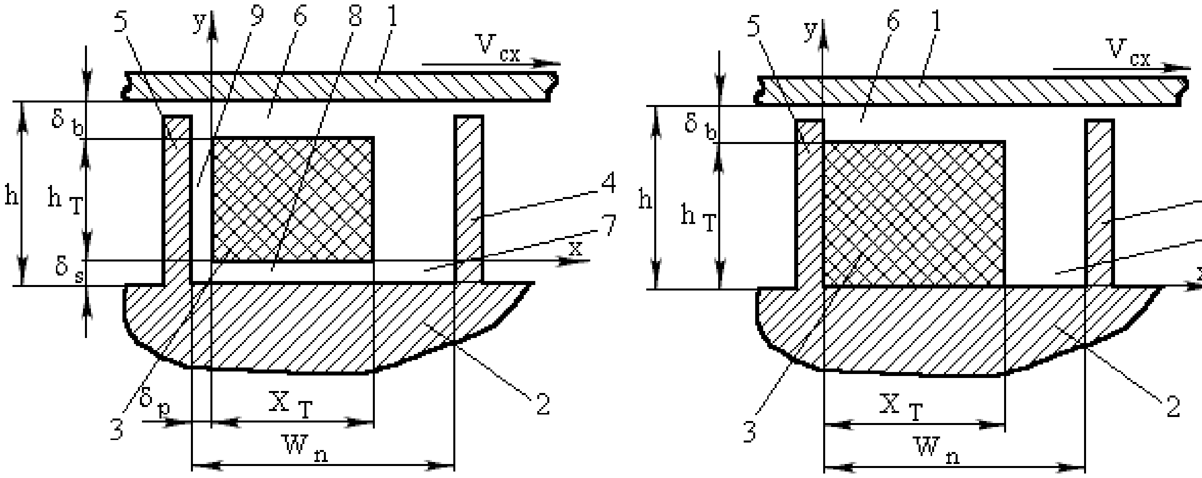


Рис. 2.1. Розрахункові схеми для опису процесу плавлення:
а – при наявності всебічного обтікання твердої пробки розплавом полімеру;
б – у випадку контакту твердої пробки з передньою стінкою й осердям черв'яка;
1 – розгорнення корпуса; 2 – розгорнення осердя черв'яка; 3 – розгорнення твердої пробки полімеру; 4 – розгорнення штовхальної стінки черв'ячної нарізки; 5 – розгорнення передньої стінки черв'ячної нарізки; 6, 7, 8, 9 – розгорнення шарів розплаву, що знаходяться між твердою пробкою й, відповідно, корпусом, штовхальною стінкою, осердям черв'яка й передньою стінкою

Схеми, подані на рис. 2.1 є типовими при плавленні полімерних матеріалів із циліндричним осердям. Причому схема на рис. 2.1,а характерна для процесів екструзії, що протікають при незначних градієнтах тиску й при відсутності охолодження черв'яків. У випадку значного опору формувального екструзійного інструменту й можливості охолодження черв'яка більш ймовірна схема, зображена на рис. 2.1,б.

Розподіл температурного поля в твердій пробці будемо знаходити, використовуючи рівняння (12) із [9], а саме

$$\rho_s \cdot C_{ps} \cdot V_{sz} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_s \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2}; \qquad (2.1)$$

$$\rho_s \cdot C_{ps} \cdot V_{sz} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial z} = \lambda_s \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \qquad (2.2)$$

де T_1, T_2 – розподіл температури в твердій пробці, відповідно, уздовж осей y та x, співвіднесених з віссю z; C_{ps}, λ_s – відповідно коефіцієнти теплоємності й теплопровідності матеріалу твердої пробки; ρ_s – густина твердої пробки; V_{sz} – швидкість руху твердої пробки вздовж гвинтового каналу.

Граничні умови для рівняння (2.1) будуть мати такий вигляд

$$\lambda_s \cdot \left.\frac{\partial T_1}{\partial y}\right|_{y=0} = q_s; \qquad (2.3)$$

$$-\lambda_s \cdot \left.\frac{\partial T_1}{\partial y}\right|_{y=h_T} = q_b, \qquad (2.4)$$

де q_b, q_s – теплові потоки, що надходять у тверду пробку, відповідно, через верхню й нижню межі розділу двох фаз.

Тепловий потік q_b для двох схем може бути поданий так

$$q_b = \lambda_m \cdot \left.\frac{\partial T_6}{\partial y}\right|_{y=h_T}, \qquad (2.5)$$

де T_6 – розподіл температури в зоні 6; λ_m – коефіцієнт теплопровідності розплаву полімеру в зоні 6.

Температурне поле в плівці розплаву між твердою пробкою й корпусом з обліком дисипативного розігріву може бути отримане з наступного виразу [10]

$$T_6(y) = \frac{T_b - T_p}{\delta_b} \cdot y + \frac{\mu \cdot V_6}{2 \cdot \lambda_m \cdot \delta_b^n} \cdot y \cdot \left(1 - \frac{y}{\delta_b}\right) + T_p, \qquad (2.6)$$

де δ_b – товщина шару розплаву в зоні 6; T_b – температура поверхні корпуса; T_p – температура плавлення матеріалу; n – показник степеня; μ – коефіцієнт консистенції; V_6 – результуюча швидкість відносного руху між шаром розплаву в зоні 6 і твердою пробкою, що визначається таким чином

$$V_6 = \left[(V_{cz} - V_{sz})^2 + V_{cx}^2\right]^{(n+1)/2},$$

де V_{cz}, V_{cx} – складові швидкості корпуса (або верхньої стінки згідно зі схемою на рис. 2.1), відповідно, вздовж осей z та x.

Необхідно враховувати при використанні рівняння (2.6) той факт, що коефіцієнт консистенції має наступну температурну залежність

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp\left[-\beta \cdot \left(T - T_0\right)\right] ,$$

де β – температурний коефіцієнт; T_0 – базова температура; μ_0 – коефіцієнт консистенції при базовій температурі.

Використовуючи співвідношення (2.5) і (2.6) і маючи на увазі, що рівняння (2.6) отримано при розташуванні початку системи координат на межі розділу, вираз для теплового потоку, що діє на тверду пробку з боку зони 6, буде мати вигляд

$$q_b = \frac{\lambda_m}{\delta_b} \cdot \left(T_b - T_p\right) + \frac{\mu \cdot V_6}{2 \cdot \delta_b^n} . \tag{2.7}$$

Що ж стосується теплового потоку q_s, то для схеми згідно з рис. 2.1,а вираз для нього буде аналогічним останньому рівнянню, а саме

$$q_{sa} = \frac{\lambda_m}{\delta_s} \cdot \left(T_s - T_p\right) + \frac{\mu \cdot V_8}{2 \cdot \delta_s^n} , \tag{2.8}$$

де δ_s – товщина шару розплаву в зоні 8; T_s – температура зовнішньої поверхні осердя; V_8 – результуюча швидкість відносного руху між шаром розплаву в зоні 8 і твердою пробкою.

Для схеми за рис. 2.1,б тепловий потік на нижній границі може бути знайдений за формулою

$$\lambda_s \cdot \left.\frac{\partial T_1}{\partial y}\right|_{y=0} = q_{sb} = V_{sz} \cdot f_s \cdot P_z , \tag{2.9}$$

де f_s – коефіцієнт тертя полімерного матеріалу по поверхні осердя черв'яка (у цьому випадку передбачається, що поверхня осердя має температуру плавлення полімерного матеріалу); P_z – тиск, що розвивається в гвинтовому каналі.

Для рівняння (2.2) будуть справедливі наступні граничні умови

$$\lambda_s \cdot \left.\frac{\partial T_2}{\partial x}\right|_{x=0} = q_P ; \tag{2.10}$$

$$-\lambda_s \cdot \left.\frac{\partial T_2}{\partial x}\right|_{x=X_T} = q_T , \tag{2.11}$$

де q_P, q_T – теплові потоки, що надходять у тверду пробку, відповідно, через ліву й праву межі розділу.

Усі обґрунтування, які були використані для постановки граничних умов уздовж осі **y**, будуть також справедливі й для рівнянь (2.10) і (2.11). Так, для теплового потоку на правій межі маємо

$$q_T = \lambda_m \cdot \left.\frac{\partial T_7}{\partial x}\right|_{x=X_T} . \tag{2.12}$$

При визначенні градієнта $\partial T_7 / \partial x$ варто пам'ятати, що на ділянці розплаву 7 спостерігаються циркуляційні потоки, аналогічні тим, які виникають у зоні дозування. У зв'язку з цим відбувається постійний зсув шарів матеріалу на цій ділянці, тим самим, усереднюючи значення температури вздовж осі **x**. Тоді можна записати наступний вираз

$$\left.\frac{\partial T_7}{\partial x}\right|_{x=X_T} = \frac{T_7(z)}{W_n - X_T}, \tag{2.13}$$

де $T_7(z)$ – середня температура в поперечному перерізі на ділянці розплаву 7 при відповідному кроці вздовж осі **z**.

Беручи до уваги результати роботи [11], залежність для $T_7(z)$ буде мати вигляд

$$T_7(z) = \frac{T_b - T_s}{2} \cdot (B1_c - B2_c) + \frac{T_b + T_s}{2} + \frac{2 \cdot (T_b + T_s - 2 \cdot T_{nz})}{\pi} \times$$

$$\times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2 \cdot k - 1)} \cdot C_k \cdot \exp\left[-\frac{a_7^2 \cdot \pi^2}{h^2} \cdot (2 \cdot k - 1)^2 \cdot z\right] -$$

$$- \frac{F_{q7} \cdot 4 \cdot h^2}{\pi^3} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2 \cdot k - 1)^3} \cdot C_k \cdot \left\{1 - \exp\left[-\frac{a_7^2 \cdot \pi^2}{h^2} \cdot (2 \cdot k - 1)^2 \cdot z\right]\right\}, \tag{2.14}$$

де T_{n7} – початкова температура розплаву в зоні 7; a_7 – комплекс, що характеризує вплив теплофізичних і швидкісних параметрів на теплові потоки; $B1_c$, $B2_c$, C_k – масиви, що характеризують усереднення температури вздовж осі **y**; F_{q7} – комплекс, що характеризує дисипативні процеси в зоні розплаву 7.

Комплекс a_7 може бути визначений зо наступною залежністю

$$a_7 = \sqrt{\frac{\lambda_m \cdot h \cdot (W_n - X_T)}{\rho_m \cdot C_{pm} \cdot Q_T}}, \tag{2.15}$$

де ρ_m, C_{pm} – відповідно густина й коефіцієнт теплоємності розплаву полімеру при середній температурі на ділянці 7; Q_T – об'ємна продуктивність матеріалу, що переміщається через зону 7 і може бути розрахована за наступною залежністю

$$Q_T = Q_d \cdot \frac{W_n - X_T}{W_n}, \tag{2.16}$$

де Q_d – об'ємна продуктивність за зоною дозування.

Масиви $B1_c$, $B2_c$, C_k можуть бути визначені як середні величини вздовж осі y за такими виразами

$$B1_c = \sum_{k=0}^{\infty} \operatorname{erfc}\left[\frac{y + h/2 \cdot (2 \cdot k + 1)}{2 \cdot a_7 \cdot \sqrt{z}}\right];$$

$$B2_c = \sum_{k=0}^{\infty} \operatorname{erfc}\left[\frac{-y + h/2 \cdot (2 \cdot k + 1)}{2 \cdot a_7 \cdot \sqrt{z}}\right];$$

$$C_k = \sum_{k=1}^{\infty} \cos[\pi \cdot y/h \cdot (2 \cdot k + 1)].$$

Рішення диференційного рівняння (2.1) знову ж таки знайдемо за допомогою операційного метода (інтегрального перетворення Лапласа) [3-5]. Причому інтегральне перетворення Лапласа будемо виконувати щодо координати z. Рівняння (2.1) в операторній формі має вигляд

$$\frac{d^2\theta_1}{dy^2} - \frac{s}{a_s} \cdot \theta_1 = -\frac{T_{ns}}{a_s}, \tag{2.17}$$

де θ_1 – зображення температури T_1; s – змінна перетворення Лапласа; T_{ns} – початковий розподіл температури в твердій пробці; a_s – комплекс, аналогічний за фізичним змістом величині a_7, і може бути визначений за такою залежністю

$$a_s = \sqrt{\frac{\lambda_s}{\rho_s \cdot C_{ps} \cdot V_{sz}}}. \tag{2.18}$$

Рішення диференційного рівняння (2.17) має вигляд

$$\theta_1 = \frac{T_{ns}}{s} + C_1 \cdot \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{s}{a_s}} \cdot y\right) + C_2 \cdot \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{s}{a_s}} \cdot y\right). \tag{2.19}$$

Використавши граничні умови (2.3) і (2.4) для визначення сталих інтегрування **C1** і **C2**, вираз для зображення температури вздовж осі **y** буде мати вигляд

$$\theta_1 = \frac{T_{ns}}{s} - \frac{q_b}{\lambda_s \cdot s} \cdot \frac{\sqrt{a_s}}{\sqrt{s}} \cdot \frac{ch\left(\sqrt{\frac{s}{a_s}} \cdot y\right)}{sh\left(\sqrt{\frac{s}{a_s}} \cdot h_T\right)} - \frac{q_s}{\lambda_s \cdot s} \cdot \frac{\sqrt{a_s}}{\sqrt{s}} \cdot \frac{ch\left[\sqrt{\frac{s}{a_s}} \cdot (h_T - y)\right]}{sh\left(\sqrt{\frac{s}{a_s}} \cdot h_T\right)}. \quad (2.20)$$

Для того, щоб перейти від зображення температури до оригіналу подамо відношення гіперболічних функцій через експонентні залежності, за аналогією з попереднім розділом, а саме, використовуючи вирази (1.22). Тоді можна записати так

$$\frac{ch(a)}{sh(b)} = \frac{e^a + e^{-a}}{e^b - e^{-b}} = \left(e^{a-b} + e^{-a-b}\right) \cdot \left[\left(1 - e^{-2b}\right)^{-1}\right].$$

Розкладаючи вираз, що знаходиться в квадратних дужках у біноміальний ряд, з урахуванням аргументів для гіперболічних функціях, рівняння (2.20) можна подати так

$$\theta_1 = \frac{T_{ns}}{s} - \frac{q_b \cdot \sqrt{a_s}}{\lambda_s \cdot s} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp\left(-b1_k \cdot \sqrt{s}\right) + \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp\left(-b2_k \cdot \sqrt{s}\right)\right] -$$

$$- \frac{q_s \cdot \sqrt{a_s}}{\lambda_s \cdot s} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp\left(-b3_k \cdot \sqrt{s}\right) + \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp\left(-b4_k \cdot \sqrt{s}\right)\right], \quad (2.21)$$

де $b1_k = \sqrt{\frac{1}{a_s}} \cdot \left[-y + h_T \cdot (2 \cdot k + 1)\right];$

$$b2_k = \sqrt{\frac{1}{a_s}} \cdot \left[y + h_T \cdot (2 \cdot k + 1)\right];$$

$$b3_k = \sqrt{\frac{1}{a_s}} \cdot \left[y + 2 \cdot h_T \cdot k\right];$$

$$b4_k = \sqrt{\frac{1}{a_s}} \cdot \left[-y + 2 \cdot h_T \cdot (k + 1)\right].$$

Використавши формулу переходу від зображення до оригіналу (1.25) і теорему про інтегрування оригіналу у вигляді

$$\int_0^t f(t)dt \leftrightarrow \frac{F(s)}{s}, \quad (2.22)$$

одержимо наступний вираз для оригіналу розподілу температури вздовж осі **y**

$$T_1(y,z) = T_{ns} + \frac{q_b \cdot \sqrt{a_s}}{\lambda_s} \cdot \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \left[-b1_k \cdot \mathrm{erfc}\left(\frac{b1_k}{2 \cdot \sqrt{z}} \right) + 2 \cdot \sqrt{\frac{z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{b1_k^2}{4 \cdot z} \right) \right] + \right.$$

$$+ \sum_{k=0}^{\infty} \left[-b2_k \cdot \mathrm{erfc}\left(\frac{b2_k}{2 \cdot \sqrt{z}} \right) + 2 \cdot \sqrt{\frac{z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{b2_k^2}{4 \cdot z} \right) \right] \Bigg\} +$$

$$+ \frac{q_s \cdot \sqrt{a_s}}{\lambda_s} \cdot \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \left[-b3_k \cdot \mathrm{erfc}\left(\frac{b3_k}{2 \cdot \sqrt{z}} \right) + 2 \cdot \sqrt{\frac{z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{b3_k^2}{4 \cdot z} \right) \right] + \right.$$

$$+ \sum_{k=0}^{\infty} \left[-b4_k \cdot \mathrm{erfc}\left(\frac{b4_k}{2 \cdot \sqrt{z}} \right) + 2 \cdot \sqrt{\frac{z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{b4_k^2}{4 \cdot z} \right) \right] \Bigg\}. \qquad (2.23)$$

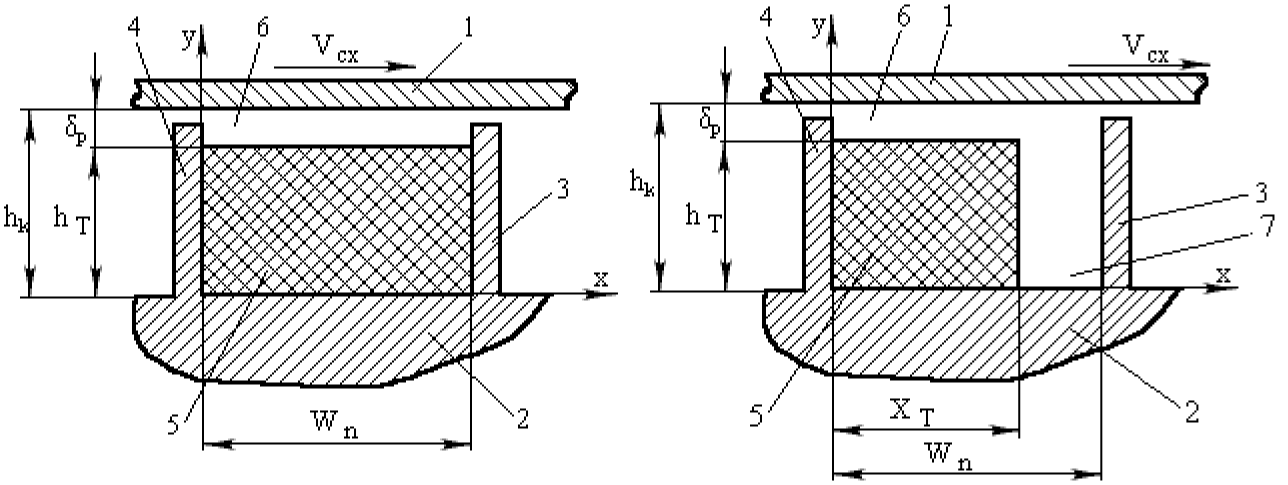
Порядок розв’язку рівняння (2.2) з урахуванням граничних умов (2.10) і (2.11) не буде мати принципових відмінностей від виконаних перетворень за рівнянням (2.1). Отже, і вираз для розподілу температури вздовж осі **x** буде аналогічно за рівняння (2.23) з відповідною заміною величин: q_b – на q_T; q_s – на q_p; **y** – на **x**; h_T – на X_T. При цьому необхідно також ураховувати й відмінності при записі виразів для теплових потоків за схемами на рис. 2.1,а й на рис. 2.1,б.

2.2 Аналіз функціонування зони плавлення з конічним осердям

Можуть існувати дві основні схеми положення твердої пробки на початку відрізку з конусним осердям: перший, коли цей відрізок розміщений на початку зони плавлення (рис. 2.2,а); другий, коли – на деякій відстані вздовж зони плавлення (рис. 2.2,б).

Як видно з наведених схем, тверда пробка може з трьох боків стикатися з поверхнею черв’яка, а з одного – з зоною розплаву (рис. 2.2,а). Що ж стосується схеми за рис. 2.2,б, то тут тверда пробка обмежується зонами розплаву вже з двох боків. При цьому слід зазначити, що граничні умови між твердою пробкою й зонами розплаву різняться з граничними умовами між твердою пробкою й поверхнями робочого каналу.

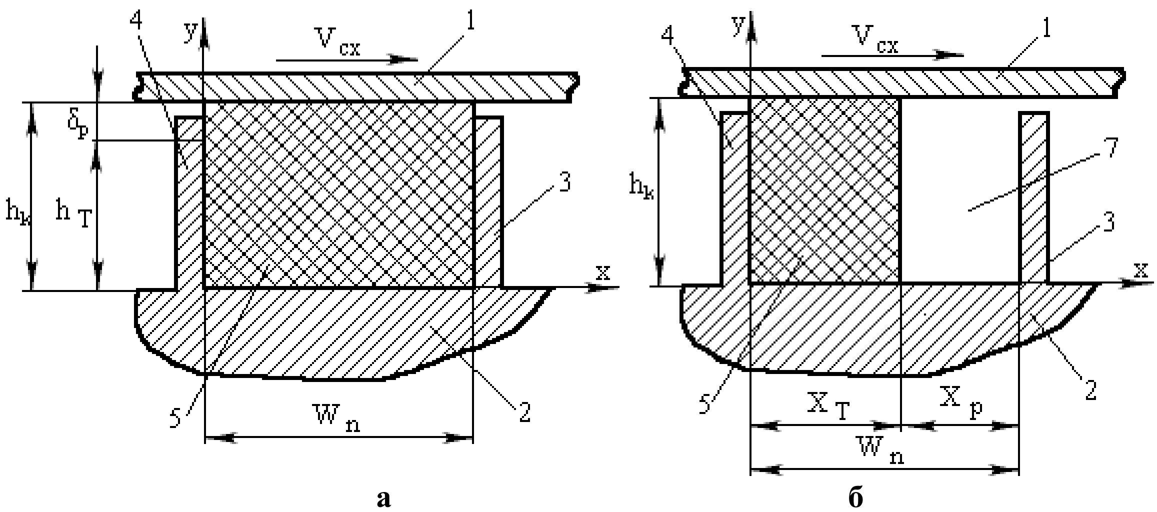
Унаслідок теплообміну на границях твердої пробки відбувається плавлення останньої й перехід частини матеріалу з твердої пробки в зони розплаву. Швидкість плавлення залежить від ряду параметрів, як зовнішніх, так і внутрішніх. Основним зовнішнім параметром є кількість тепла, яка підводиться через корпус. На внутрішні параметри, в першу чергу, впливають дисипативні процеси, які виникають на поверхнях твердої пробки внаслідок сполучення технологічних і геометричних характеристик проведення екструзійних процесів, у тому числі й величина конусності осердя черв'яка.



а **б**

Рис. 2.2. Схеми можливої форми твердої пробки перед відрізком з конусним осердям:
а – на початку зони плавлення; б – на проміжній відстані вздовж зони плавлення:
1 – корпус; 2 – осердя; 3 – штовхальна сітка; 4 – передня стінка; 5 – тверда пробка; 6 – зона розплаву між поверхнями твердої пробки й корпусом; 7 – зона розплаву між поверхнями твердої пробки й штовхальною стінкою

Якщо швидкість плавлення велика, а конусність черв'яка незначна, то зони розплаву постійно збільшуються, тобто буде справедлива схема за рис. 2.2,б, з розмірами $\mathbf{h_T}$ і $\mathbf{X_T}$, які постійно зменшуються при їх русі вздовж гвинтового каналу. У противному випадку, тобто при великій конусності й малій швидкості плавлення схеми за рис. 2.2 можуть відповідно перейти в схеми, які зображені на рис. 2.3. Усі позначення на рис. 2.3 співпадають з відповідними позначеннями на рис. 2.2.



а **б**

Рис. 2.3. Схеми можливої форми твердої пробки на відрізку з конусним осердям:
а – продовження процесу плавлення за схемою на рис. 2.2,а;
б – продовження процесу плавлення за схемою на рис. 2.2,б

Виходячи з міркувань, які були представлені в розділі 2.1, температурне поле в твердій пробці можна розглядати окремо вздовж осей **y** і **x**. При цьому відповідні вирази рівнянь будуть мати такий вигляд

$$\frac{\mathbf{V_{sz}}}{\mathbf{a_s}} \cdot \frac{\partial \mathbf{T_1}}{\partial \mathbf{z}} = \frac{\partial^2 \mathbf{T_1}}{\partial \mathbf{y}^2}; \tag{2.24}$$

$$\frac{\mathbf{V_{sz}}}{\mathbf{a_s}} \cdot \frac{\partial \mathbf{T_2}}{\partial \mathbf{z}} = \frac{\partial^2 \mathbf{T_2}}{\partial \mathbf{x}^2}, \tag{2.25}$$

де $\mathbf{V_{sz}}$ – швидкість руху твердої пробки вздовж гвинтового каналу, тобто вздовж осі **z**; $\mathbf{a_s}$ – коефіцієнт температуропровідності матеріалу твердої пробки; $\mathbf{T_1}$, $\mathbf{T_2}$ – розподіл температур у твердій пробці полімерного матеріалу відповідно вздовж осей **y** і **x**.

Для схем, зображених на рис. 2.2, на всіх чотирьох межах можна записати граничні умови другого роду, що в загальному випадку може бути подано таким чином

$$\pm \lambda_{\mathbf{s}} \cdot \frac{\partial \mathbf{T_i}}{\partial \mathbf{l}} = \mathbf{q_{гр}} \quad \text{при} \quad l = \mathbf{L_{уз}}, \tag{2.26}$$

де $\boldsymbol{\lambda_s}$ – коефіцієнт теплопровідності полімерного матеріалу твердої пробки; **i** – індекс, який позначає напрямок розподілу температурного поля (для рівняння (2.24) і (2.25) це відповідно 1 і 2); $\boldsymbol{l}$ – координата, за якою визначається температурне поле (**y** і **x**); $\mathbf{q_{гр}}$ – тепловий потік на відповідних межах; $\mathbf{L_{уз}}$ – узагальнене значення координати на межах (для координати **x** – це нуль і $\mathbf{X_T}$, для координати **y** – це нуль і $\mathbf{h_T}$).

Для схем, зображених на рис. 2.3, можна також використати граничні умови (2.26). Однак, у зоні плавлення температура корпуса на багато перевищує температуру плавлення полімерного матеріалу. Унаслідок останнього зауваження на поверхні контакту твердої пробки з поверхнею корпусу можна прийняти граничну умову першого роду, а саме

$$\mathbf{T_1} = \mathbf{T_k} \quad \text{при} \quad \mathbf{y} = \mathbf{h_k}, \tag{2.27}$$

де $\mathbf{T_k}$ – температура корпуса; $\mathbf{h_k}$ – поточна глибина гвинтової нарізки на конусному відрізку черв'яка, яка дорівнює висоті твердої пробки $\mathbf{h_T}$.

Рівняння (2.24) і (2.25) за своїм математичним сенсом не відрізняються одне від іншого. Звідси витікає, що й рішення їх повинні співпадати з точністю до позначень, якщо використовувати граничні умови (2.26). У випадку прийняття граничної умови (2.27) розв'язок задачі вздовж осей **y** і **x** буде вже мати істотну різницю.

Подамо приклад розв'язку задачі тепломасопереносу вздовж осі **y** для граничних умов (2.26) і (2.27). При цьому рішення будемо знаходити за допомогою операційного метода, як і в попередніх розділах.

Операторний аналог рівняння (2.24) буде мати вигляд

$$\frac{d^2 T_1^L}{dy^2} - \frac{s}{a_v} \cdot T_1^L = -\frac{T_n}{a_v}, \tag{2.28}$$

де T_1^L – зображення температури T_1 після перетворення Лапласа; **s** – змінна перетворення Лапласа; T_n – початкова температура твердої пробки; $a_v = a_s/V_{sz}$.

Граничні умови (2.26) і (2.27) після інтегрального перетворення Лапласа при відповідних позначеннях запишуться для схем на рис. 2.3 таким чином

$$\lambda_s \cdot \frac{dT_1^L}{dy} = \frac{q_s}{s} \quad \text{при} \quad y = 0; \tag{2.29}$$

$$T_1^L = \frac{T_k}{s} \quad \text{при} \quad y = h_k, \tag{2.30}$$

де q_s – тепловий потік, який проходить через границю твердої пробки, що контактує з осердям черв'яка.

Розв'язуючи рівняння (2.28) з урахуванням граничних умов (2.29) і (2.30) за методикою, яка наведена в попередньому розділі, буде справедливим таке рівняння для розподілу температурного поля в твердій пробці для системи координат **y-z**

$$T_1(y,z) = T_k + \frac{2}{\pi}(T_k - T_n) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(k-0{,}5)} \cdot \cos\left[\pi \cdot (k-0{,}5) \cdot \frac{y}{h_k}\right] \times$$

$$\times \exp\left[-\frac{\pi^2 \cdot a_v}{h_k^2} \cdot (k-0{,}5)^2 \cdot z\right] + \frac{q_s}{\lambda_s} \cdot \left(\sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k \cdot EX1_k - \sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k \cdot EX2_k\right), \tag{2.31}$$

де $EX1_k = 2 \cdot \sqrt{\frac{a_v \cdot z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{K1_k^2}{4 \cdot a_v \cdot z}\right) - K1_k \cdot \mathrm{erfc}\left(\frac{K1_k}{2 \cdot \sqrt{a_v \cdot z}}\right)$;

$$EX2_k = 2 \cdot \sqrt{\frac{a_v \cdot z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{K2_k^2}{4 \cdot a_v \cdot z}\right) - K2_k \cdot \mathrm{erfc}\left(\frac{K2_k}{2 \cdot \sqrt{a_v \cdot z}}\right);$$

$$\mathbf{K1_k = \left[y + 2 \cdot h_k \cdot k\right]} \ ; \qquad \mathbf{K2_k = \left[-y + 2 \cdot h_k \cdot (k+1)\right]} \ .$$

Якщо моделювати теплові процеси для схем за рис. 2.2, то замість операторного аналогу (2.30) треба записати наступну умову в зображеннях

$$-\lambda_s \cdot \frac{dT_1^L}{dy} = \frac{q_b}{s} \quad \text{при} \quad y = h_T, \tag{2.32}$$

де $\mathbf{q_b}$ – тепловий потік, який проходить у тверду пробку з боку зони розплаву 6.

Тоді, використовуючи методику з попереднього розділу, можна записати такий вираз для розподілу температури в твердій пробці для системи координат **y-z**

$$\mathbf{T_1(y,z) = T_n + \frac{q_s}{\lambda_s} \cdot \left(\sum_{k=0}^{\infty} EX1_k + \sum_{k=0}^{\infty} EX2_k \right) +}$$

$$\mathbf{+ \frac{q_b}{\lambda_s} \cdot \left(\sum_{k=0}^{\infty} EX3_k + \sum_{k=0}^{\infty} EX4_k \right)}, \tag{2.33}$$

де $\mathbf{EX3_k = 2 \cdot \sqrt{\frac{a_v \cdot z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{K3_k^2}{4 \cdot a_v \cdot z} \right) - K3_k \cdot erfc\left(\frac{K3_k}{2 \cdot \sqrt{a_v \cdot z}} \right)}$;

$$\mathbf{EX4_k = 2 \cdot \sqrt{\frac{a_v \cdot z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{K4_k^2}{4 \cdot a_v \cdot z} \right) - K4_k \cdot erfc\left(\frac{K4_k}{2 \cdot \sqrt{a_v \cdot z}} \right)};$$

$$\mathbf{K3_k = \left[-y + h_T \cdot (2 \cdot k + 1)\right]} \ ; \qquad \mathbf{K4_k = \left[y + h_T \cdot (2 \cdot k + 1)\right]} \ .$$

Слід зазначити, що для комплексів $\mathbf{EX1_k}$ і $\mathbf{EX2_k}$, будуть також справедливі рівняння, які наведені раніше. Однак, треба замість $\mathbf{h_k}$ підставити $\mathbf{h_T}$.

Далі проаналізуємо параметри для визначення теплових потоків. Тепловий потік $\mathbf{q_b}$ може бути визначений за такою залежністю

$$\mathbf{q_b = \lambda_m \cdot \left. \frac{\partial T_6}{\partial y} \right|_{y=h_T}}, \tag{2.34}$$

де $\mathbf{\lambda_m}$ – коефіцієнт теплопровідності в зоні розплаву 6; $\mathbf{T_6}$ – розподіл температурного поля в цій же зоні.

Користуючись методиками, поданими раніше, а також розроблених у роботах [11-14], можна записати таку формулу для розподілу температурного поля в зоні розплаву між поверхнями твердої пробки й корпуса [15]

$$T_6(y,z)=\frac{T_b+T_p}{2}+\frac{T_b-T_p}{2}\cdot\left[\sum_{k=0}^{\infty}\operatorname{erfc}\left(\frac{\beta_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)-\sum_{k=0}^{\infty}\operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)\right]+$$

$$+\frac{\left(T_b+T_p-2\cdot T_n\right)}{\pi}\cdot\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)^k}{(k-0,5)}\cdot\cos\left[2\cdot\pi\cdot(k-0,5)\cdot\frac{y}{\delta_p}\right]\times$$

$$\times\exp\left[-\frac{a_q\cdot\pi^2\cdot 4}{\delta_p^2}\cdot(k-0,5)^2\cdot z\right]-$$

$$-\frac{q_{cp}\cdot\delta_p^2}{2\cdot\pi^3\cdot\lambda_m}\cdot\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)^k}{(k-0,5)^3}\cdot\cos\left[2\cdot\pi\cdot(k-0,5)\cdot\frac{y}{\delta_p}\right]\times$$

$$\times\left\{1-\exp\left[-\frac{a_q\cdot\pi^2\cdot 4}{\delta_p^2}\cdot(k-0,5)^2\cdot z\right]\right\},\qquad(2.35)$$

де $\mathbf{T_p}$ – температура плавлення полімерного матеріалу; $\boldsymbol{\delta_p}$ – товщина шару розплаву в зоні 6; $\mathbf{q_{cp}}$ – усереднене значення функції дисипації вздовж осі $\mathbf{y}$; $\boldsymbol{\alpha_k}$, $\boldsymbol{\beta_k}$ – коефіцієнти розкладання в біноміальний ряд; $\mathbf{a_q}$ – параметр, що характеризує усереднення швидкості потоку вздовж зони розплаву 6.

Для останніх трьох величин можна записати такі вирази

$$\alpha_k=\sqrt{\frac{1}{a_q}}\cdot\left[-y+\frac{\delta_p}{2}\cdot(1+2\cdot k)\right];$$

$$\beta_k=\sqrt{\frac{1}{a_q}}\cdot\left[y+\frac{\delta_p}{2}\cdot(1+2\cdot k)\right];$$

$$a_q=\frac{\lambda_m\cdot W_n\cdot\delta_p}{\rho_m\cdot C_{pm}\cdot Q_{sp}},$$

де $\boldsymbol{\rho_m}$, $\mathbf{C_{pm}}$ – відповідно густина й коефіцієнт теплоємності для розплаву полімеру; $\mathbf{Q_{sp}}$ – частина об'ємних витрат черв'ячного агрегату, яка приходиться на площу зони 6, тобто на площу розмірами $\boldsymbol{\delta_p}\times\mathbf{X_T}$.

Усереднене значення функції дисипації q_{cp} знаходиться в загальному випадку з такого рівняння

$$q_{dis} = \sigma_{xy} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} + \sigma_{yz} \cdot \frac{\partial V_z}{\partial y} + \sigma_{xz} \cdot \frac{\partial V_z}{\partial x}, \tag{2.36}$$

де σ_{xy}, σ_{yz}, σ_{xz} – компоненти тензора напружень; V_x, V_z – компоненти вектора швидкості.

Таким чином, щоб знайти q_{cp} треба знати загальну залежність функції дисипації q_{dis} по об'єму зони розплаву 6, після чого від неї взяти середнє значення.

Залежно від типу рідини й співвідношення геометричних параметрів гвинтового каналу черв'яка (особливе значення надається відношенню y/W_n), можуть бути різні за складністю вирази, які описують поведінку функції дисипації. Для ньютонівської рідини, яка є найбільш простою за математичним описом, відповідні вирази можна знайти в роботах [9, 10]. Для степеневої рідини методика визначення функції дисипації наведена в роботах [6-8]. В останньому випадку при розв'язку теплової задачі необхідно знайти додаткові величини із систем нелінійних трансцендентних рівнянь.

У першому наближенні, з достатнім ступенем точності для усередненого значення функції дисипації можна записати рівняння у вигляді

$$q_{cp} = \mu_0 \cdot \exp\left[-\beta \cdot \left(T_6 - T_0\right)\right] \cdot \left(\frac{Q_{sp}}{X_T \cdot \delta_p^2}\right)^{n+1}, \tag{2.37}$$

де T_0 – базова температура; μ_0 – коефіцієнт консистенції при базовій температурі; β – температурний коефіцієнт; n – показник степеня для степеневої рідини.

Слід зазначити, що рівняння (2.35) отримане для випадку, коли система координат розташована посередині зони висотою δ_p. Таким чином, щоб отримати праву частину виразу (2.34), необхідно здиференціювати рівняння (2.35) за координатою y, після чого підставити значення $y = -\delta_p/2$. У результаті маємо

$$q_b = -\lambda_m \cdot \frac{T_b - T_p}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot z \cdot a_q}} \left[\sum_{k=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{\beta_{k\delta}^2}{4 \cdot z}\right) + \sum_{k=0}^{\infty} -\frac{\alpha_{k\delta}^2}{4 \cdot z}\right] -$$

$$-\lambda_m \cdot \frac{2 \cdot \left(T_b + T_p - 2 \cdot T_n\right)}{\delta_p} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{a_q \cdot \pi^2 \cdot 4}{\delta_p^2} \cdot (k - 0{,}5)^2 \cdot z\right] +$$

$$+\frac{q_{cp}\cdot\delta_p}{\pi^2}\cdot\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{(k-0{,}5)^2}\cdot\left\{1-\exp\left[-\frac{a_q\cdot\pi^2\cdot 4}{\delta_p^2}\cdot(k-0{,}5)^2\cdot z\right]\right\}, \tag{2.38}$$

де $\alpha_{k\delta}=\delta_p\cdot(1+k)/\sqrt{a_q}$;

$\beta_{k\delta}=\delta_p\cdot k/\sqrt{a_q}$.

Для теплового потоку на межі між твердою пробкою й осердям черв’яка можна записати залежність у вигляді

$$q_s=V_{sz}\cdot f_s\cdot P_{zk}, \tag{2.39}$$

де $\mathbf{f_s}$ – коефіцієнт тертя полімерного матеріалу по поверхні осердя черв’яка; $\mathbf{P_{zk}}$ – контактний тиск твердої пробки полімерного матеріалу на поверхні осердя черв’яка.

Слід замітити, що коефіцієнт тертя $\mathbf{f_s}$ у загальному випадку для більшості полімерних матеріалів має значну функціональну залежність від температури й тиску, що повинно бути враховано через апроксимаційні залежності.

Контактний тиск для схем за рис. 2.2 буде створюватися тиском, який виникає в зонах розплаву й викликаний наявністю градієнтів тиску $\partial P/\partial z$ і $\partial P/\partial x$. При цьому основний внесок на величину $\partial P/\partial z$ дає коефіцієнт опору формувальної головки.

Що ж стосується контактного тиску для схем за рис. 2.3, то істотна частина його буде викликатися деформацією твердої пробки на відрізку з конусним осердям і може бути визначений з рівняння

$$P_{zk}=\varepsilon\cdot E_0\cdot K_p\cdot\frac{\exp\left(-\frac{z}{V_{sz}\cdot\alpha}\right)}{\exp\left[\beta_E\cdot(T-T_{0E})\right]}, \tag{2.40}$$

де $\boldsymbol{\varepsilon}$ – деформація твердої пробки в напрямку осі $\mathbf{y}$; $\mathbf{T_{0E}}$ – базова температура при визначенні $\boldsymbol{\beta_E}$; $\mathbf{E_0}$ – модуль пружності полімерного матеріалу твердої пробки при базовій температурі $\mathbf{T_{0E}}$; $\boldsymbol{\alpha}$ – час релаксації; $\boldsymbol{\beta_E}$ – температурний коефіцієнт, який характеризує зміну модуля пружності $\mathbf{E_0}$ залежно від температури; $\mathbf{K_p}$ – поправочний коефіцієнт, що характеризує точність розрахунків.

Дамо деякі зауваження згідно з формулою (2.40).

По-перше, деформацію твердої пробки можна визначити за формулою

$$\varepsilon=\frac{h_T-h_k}{h_T}. \tag{2.41}$$

По-друге, значення модуля пружності $\mathbf{E_0}$ залежить від двох основних факторів, а саме, від тиску, який був створений у зоні живлення, і від температури полімерного матеріалу. При цьому, при великому тиску $\mathbf{E_0}$ наближатися до величини, яка дорівнює відповідному значенню для монолітного блоку. Температурний вплив характеризується експоненційною залежністю через температурний коефіцієнт $\boldsymbol{\beta_E}$.

Слід зазначити, що дві останні формули можуть бути використані тільки для схем на рис. 2.3, для яких справедлива умова $\mathbf{h_T > h_k}$, де під $\mathbf{h_T}$ мається на увазі теоретичне можливе значення висоти твердої пробки на кожному наступному розрахунковому кроці

Поправочний коефіцієнт $\mathbf{K_p}$ характеризує крок розрахунків вздовж осі $\mathbf{z}$. Для отримання більш точних результатів цей коефіцієнт повинний бути достатньо малим. Так, значення $\mathbf{K_p} = 0{,}01$ свідчить проте, що весь відрізок з конусним осердям розбитий на 100 розрахункових кроків.

Аналогічно тому, як були отримані формули (2.31) і (2.33), можна вивести залежності для розподілу температури в твердій пробці й уздовж координати $\mathbf{x}$, при цьому використавши рівняння (2.25) і відповідні граничні умови.

Однак, для даного режиму плавлення, тобто в режимі монолітного блоку, плавлення вздовж осі $\mathbf{y}$ буде йти значно швидше, ніж уздовж осі $\mathbf{x}$. Це зв'язано з двома основними причинами: по-перше, унаслідок виконання умови $\mathbf{h \ll W_n}$; по-друге, дисипативні процеси в зоні розплаву 6 будуть більш значні, ніж у зоні 7.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕІЗОТЕРМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У МІЖДИСКОВИХ ЗАЗОРАХ ДИСКОВИХ І ЧЕРВ'ЯЧНО-ДИСКОВИХ ЕКСТРУДЕРІВ

3.1 Постановка задачі

Для побудови математичної моделі подамо розрахункову схему згідно з рис. 3.1.

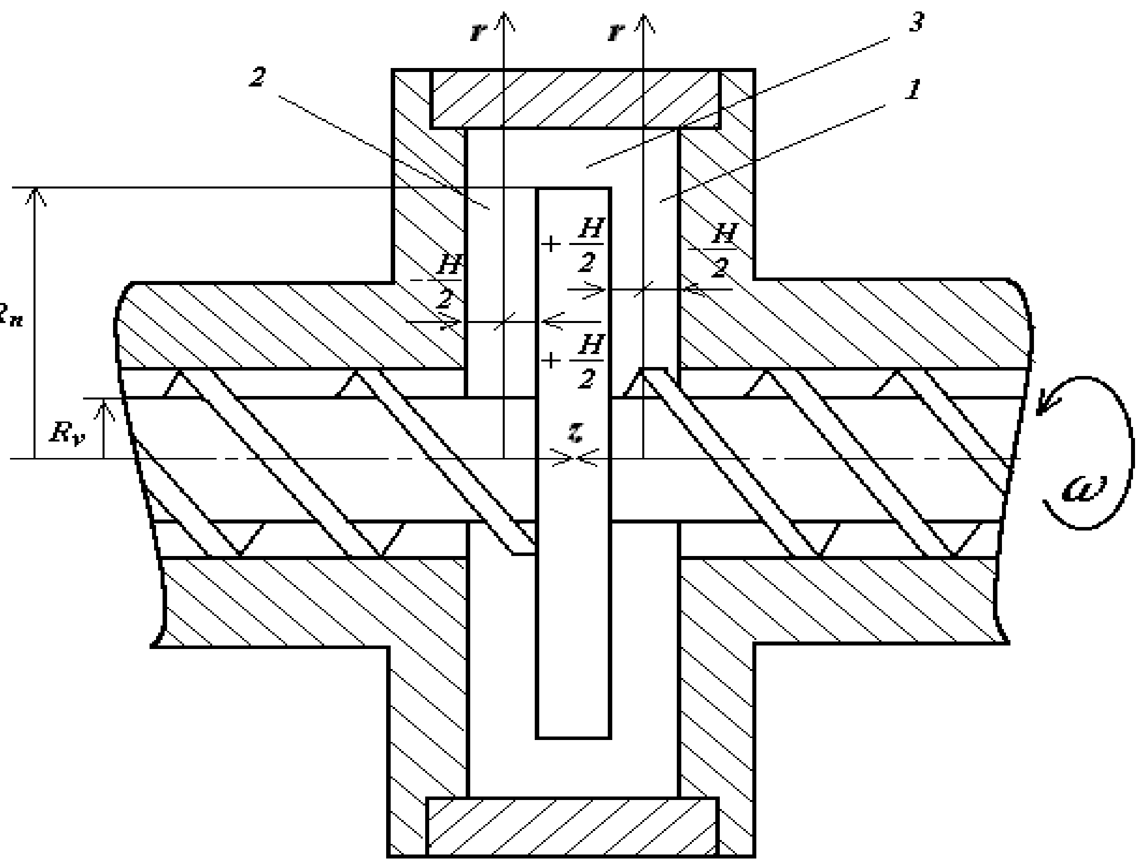


Рис. 3.1. Розрахункова схема міждискового зазору

На рис. 3.1 поданий міждисковий зазор (дискова зона) з двома зазорами 1 і 2. Причому, залежно від напрямку обертання один із зазорів може бути першим, а інший другим. Принципової різниці при опису процесів у цих зазорах немає. Однак, необхідно ураховувати той момент, що для першого зазору, по ходу течії матеріалу, потік, який створюється черв'яком, має позитивний напрямок уздовж осі **r**, а для другого – від'ємний. Крім того, необхідно відмітити ще й той факт, що перша дискова зона може експлуатуватися у режимі плавлення матеріалу на останній стадії загальної зони пластикації, яка починається у черв'ячній зоні. Але основне функціональне призначення дискових зон полягає в інтенсивному змішуванні й гомогенізації розплавів за рахунок значних зсувних деформацій.

Унаслідок того, що в більшості випадків товщина диска є величиною вищого порядку малості у порівнянні з його діаметром, то внесок циліндричної зони 3 у сумарний гідродинамічний ефект буде незначним.

У більшості випадків розплави полімерів являють собою в'язко-пружні рідини, при переробці яких виникають ефекти, що не властиві для звичайних рідких середовищ. У першу чергу тут необхідно виділити ефект Вайссенберга, який у випадку для течії між двома дисками характеризується появою доцентрових потоків, на відміну від наявності відцентрових потоків для рідин, які не мають пружних властивостей. Урахування таких ефектів можна здійснити, якщо використати відповідні реологічні рівняння стану, які ураховують як аномально-в'язкі властивості, так і пружні параметри розплавів полімерів.

Для отримання співвідношень, які можуть описати розподіл температурного поля в якомусь циліндричному осередку, необхідно скористатися рівняння збереження теплової енергії в циліндричній системі координат, яке в загальному вигляді може бути подано так

$$\rho\cdot C_P\cdot\left(\frac{\partial T}{\partial t}+V_r\cdot\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{V_\varphi}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial\varphi}+V_z\cdot\frac{\partial T}{\partial z}\right)=-\left[\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}(r\cdot q_r)+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial q_\varphi}{\partial\varphi}+\right.$$

$$\left.+\frac{\partial q_z}{\partial z}\right]+\sigma_{rr}\cdot\frac{\partial V_r}{\partial r}+\sigma_{\varphi\varphi}\cdot\frac{1}{r}\cdot\left(\frac{\partial V_r}{\partial\varphi}+V_r\right)+\sigma_{zz}\cdot\frac{\partial V_z}{\partial z}+\sigma_{r\varphi}\cdot\left[r\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{V_\varphi}{r}\right)+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial V_r}{\partial\varphi}\right]+$$

$$+\sigma_{rz}\cdot\left(\frac{\partial V_z}{\partial r}+\frac{\partial V_r}{\partial z}\right)+\sigma_{\varphi z}\cdot\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial V_z}{\partial\varphi}+\frac{\partial V_\varphi}{\partial z}\right)\ , \tag{3.1}$$

де **T** – температура; C_P — коефіцієнт теплоємності; q_i — компоненти тензора теплового потоку.

Для подальшого розв'язку введемо наступні припущення: осесиметричність потоку відносно кутової координати **φ**; будемо враховувати тільки складові швидкості V_r і V_φ; конвективну складову перенесення тепла будемо враховувати тільки вздовж координати **r**, а з іншого боку будемо нехтувати перенесенням тепла за рахунок теплопровідності вздовж координати **r.**

Тоді рівняння (3.1) можна спростити до такого виразу

$$\rho\cdot C_p.V_r\cdot\frac{\partial T}{\partial r}=-\frac{\partial q_z}{\partial z}+\sum_{i,j}\sigma_{i,j}\cdot\begin{pmatrix}(A_1)_{i,j}\,\text{при}\ i\neq j\\ d_{i,j}\,\text{при}\ i=j\end{pmatrix}\ . \tag{3.2}$$

де $\sigma_{i,j}$ – компоненти тензора напружень; $d_{i,j}$ — компоненти тензора швидкостей деформації **d**; $(A_1)_{i,j}$ – компоненти тензора Рівліна-Еріксена A_1;

$$d_{i,j}=\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\partial V^i}{\partial x^j}+\frac{\partial V^j}{\partial x^i}\right);\qquad A_1=2\cdot d\,. \tag{3.3}$$

Компоненти вектора теплового потоку можна подати через закон Фур'є. У даному випадку маємо

$$\mathbf{q_z} = -\lambda \cdot \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{z}} \quad , \tag{3.4}$$

де **λ** – коефіцієнт теплопровідності.

З урахуванням рівняння (3.4) формула (3.2) запишеться таким чином

$$\rho \cdot \mathbf{C_P} \cdot \mathbf{V_r} \cdot \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{r}} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{T}}{\partial \mathbf{z}^2} + \mathbf{F_{dis}}(\mathbf{r}, \mathbf{z}) \ . \tag{3.5}$$

3.2 Аналіз процесу при граничних умовах першого роду

Для системи координат, яка показана на рис. 3.1, граничні й початкові умови можуть бути подані так

$$\mathbf{T} = \mathbf{T_P} \text{ при } \mathbf{z} = \mathbf{H/2}, \tag{3.6}$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{T_K} \text{ при } \mathbf{z} = -\mathbf{H/2}, \tag{3.7}$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{T_n} \text{ при } \mathbf{r} = \mathbf{R_V}(\mathbf{R_n}), \tag{3.8}$$

де $\mathbf{T_P}$ – температура поверхні рухомого диска; $\mathbf{T_K}$ – температура поверхні корпуса дискової зони; $\mathbf{T_n}$ – початкова температура на вході в зазор.

Співвідношення $\mathbf{r} = \mathbf{R_V}$ буде справедливим для першого міждискового зазору, а $\mathbf{r} = \mathbf{R_n}$ – для другого міждискового зазору.

У рівнянні (3.5) введено позначення $\mathbf{F_{dis}}(\mathbf{r,z})$, що являє собою функцію дисипації, яка включає в себе суму комплексів із добутків компонентів тензора напружень на компоненти тензора швидкостей деформацій. Крім того, рівняння (3.5) отримано з урахуванням припущення, що коефіцієнт теплопровідності не залежить від температури.

Рівняння (3.5) являє собою диференційне рівняння в частинних похідних. Розв’язок цього рівняння будемо здійснювати, як і в попередніх двох розділах, за допомогою операційного методу [3-5]. Причому, перетворення Лапласа будемо виконувати за координатою **r**, тому що для перетворення Лапласа першої похідної необхідно знати початкову умову тільки самої величини, а для другої похідної – ще й початкову умову її першої похідної.

Необхідно також замітити, що крім температури, за якою буде виконуватися перетворення Лапласа, існує ще дві функції, які залежать від координати **r**, а саме $\mathbf{V_r}$ і $\mathbf{F_{dis}}$. Однак, у подальшому будемо приймати, що функції $\mathbf{V_r}$ і $\mathbf{F_{dis}}$ будуть фіксованими, як вздовж координати **r**, так і вздовж координати **z**. Останнє припущення буде справедливим, якщо всю дискову область розіб’ємо сіткою вздовж двох координат. Тоді рівняння (3.5) можна подати в такому вигляді

$$\rho \cdot C_P \cdot (V_r)_{i,j} \cdot \frac{\partial T_{i+1,j}}{\partial r_i} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T_{i+1,j}}{\partial z_j^2} + (F_{dis})_{i,j}, \qquad (3.9)$$

де **i** – кількість елементів розбиття вздовж координати **r**; **j** – кількість елементів розбиття вздовж координати **z**.

Після перетворення рівняння (3.9) за Лапласом вздовж координати **r** і деякого перегрупування, отримаємо наступний вираз

$$\frac{d^2\Theta_{i+1,j}}{dz_j^2} - AV_{i,j} \cdot s_i \cdot \Theta_{i+1,j} = -AV_{i,j} \cdot T_{i,j} - \frac{FD_{i,j}}{s_i}, \qquad (3.10)$$

де Θ – зображення температури **T**; **s** – змінна інтеграла Лапласа; $T_{i,j}$ – початкове значення температури (при **i** = 0 —> $T_{i,j} = T_n$); $AV_{i,j}$, $FD_{i,j}$ – комплекси, які знаходяться за виразами

$$AV_{i,j} = \frac{\rho \cdot C_P \cdot (V_r)_{i,j}}{\lambda}; \qquad (3.11)$$

$$FD_{i,j} = \frac{(F_{dis})\ i,j}{\lambda}. \qquad (3.12)$$

Щоб записати рішення для рівняння (3.10), необхідно відмітити, що значення для V_r можуть мати, як від'ємні, так і додатні значення. Таким чином, відповідні значення будуть мати й комплекси $AV_{i,j}$. Якщо V_r має додатні значення, то рішення для виразу (3.10) буде таким

$$\Theta p_{i+1,j} = \frac{T_{i,j}}{s_i} + \frac{FV_{i,j}}{s_i^2} + C_1 \cdot sh\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot z_j\right) + \\ + C_2 \cdot ch\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot z_j\right), \qquad (3.13)$$

де

$$FV_{i,j} = \frac{FD_{i,j}}{AV_{i,j}}. \qquad (3.14)$$

У випадку, коли V_r буде мати від'ємний напрямок, то рішення для виразу (3.10) можна записати таким чином

$$\Theta n_{i+1,j} = \frac{T_{i,j}}{s_i} - \frac{FV_{i,j}}{s_i^{\,2}} + C_3 \cdot \sin\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot z_j\right) +$$

$$+ C_4 \cdot \cos\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot z_j\right) \qquad . \qquad (3.15)$$

Необхідно зауважити, що величини $AV_{i,j}$ під коренем квадратним у рівнянні (3.15) треба підставити зі знаком плюс.

Таким чином, для першого міждискового зазору при нормальній роботі екструдера буде справедлива формула (3.15), а для другого – формула (3.13).

Перетворення Лапласа граничних умов (3.6) і (3.7) запишуться так

$$\Theta_{i+1,j} = \frac{T_P}{s_i} \quad \text{при} \quad z_j = H/2, \qquad (3.16)$$

$$\Theta_{i+1,j} = \frac{T_K}{s_i} \quad \text{при} \quad z_j = -H/2. \qquad (3.17)$$

Знайдемо спочатку рішення для рівняння (3.13). Підстановка граничних умов (3.16) і (3.17) у рівняння (3.13) дає

$$\frac{T_P}{s_i} = \frac{T_{i,j}}{s_i} + \frac{FV_{i,j}}{s_i^{\,2}} + C_1 \cdot sh\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot \frac{H}{2}\right) + C_2 \cdot ch\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot \frac{H}{2}\right),$$

$$\frac{T_K}{s_i} = \frac{T_{i,j}}{s_i} + \frac{FV_{i,j}}{s_i^{\,2}} - C_1 \cdot sh\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot \frac{H}{2}\right) + C_2 \cdot ch\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot \frac{H}{2}\right).$$

Після визначення сталих інтегрування C_1 і C_2 із двох останніх рівнянь і підстановки їх у формулу (3.13), отримаємо такий вираз

$$\Theta P_{i+1,j} = \frac{T_n}{s_i} + \frac{FV_{i,j}}{s_i^{\,2}} + \frac{T_P - T_K}{2 \cdot s_i} \cdot \frac{sh\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot z_j\right)}{sh\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot \frac{H}{2}\right)} +$$

$$+ \frac{\left(T_P + T_K - 2 \cdot T_{i,j}\right)}{2 \cdot s_i} \cdot \frac{ch\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot z_j\right)}{ch\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot \frac{H}{2}\right)} - \frac{FV_{i,j}}{s_i^{\,2}} \cdot \frac{ch\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot z_j\right)}{ch\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot \frac{H}{2}\right)}. \qquad (3.18)$$

Для того, щоб перейти від зображення до оригіналу температури, необхідно відшукати оригінали кожного із п'яти членів у правій частині рівняння (3.18). При перетвореннях для визначення оригіналу індекси **i** та **j** для спрощення виразів записувати не будемо.

Оригінали першого й другого членів маються у літературі

$$\frac{\mathbf{T_{i,j}}}{\mathbf{s_i}} \to \mathbf{T_{i,j}}, \tag{3.19}$$

$$\frac{\mathbf{FV_{i,j}}}{\mathbf{s_i}^2} \to \mathbf{FV_{i,j} \cdot r_i}. \tag{3.20}$$

Для визначення оригіналу третього члена подамо гіперболічні синуси через показникові функції, за аналогією з виразами (1.22). Тоді третій член у рівнянні (3.18) можна записати таким чином

$$\frac{\mathbf{T_P - T_K}}{\mathbf{2 \cdot s}} \cdot \left\{ \mathbf{exp}\left[\sqrt{\mathbf{AV \cdot s}} \cdot \left(\mathbf{z} - \frac{\mathbf{H}}{\mathbf{2}} \right) \right] - \mathbf{exp}\left[-\sqrt{\mathbf{AV \cdot s}} \cdot \left(\mathbf{z} + \frac{\mathbf{H}}{\mathbf{2}} \right) \right] \right\} \times$$

$$\times \left[\mathbf{1 - exp}\left(-\mathbf{2}\sqrt{\mathbf{AV \cdot s}} \cdot \frac{\mathbf{H}}{\mathbf{2}} \right) \right]^{-1}. \tag{3.21}$$

У зв'язку з тим, що показникові функції з від'ємним степенем завжди менше одиниці, то вираз, який стоїть у степені мінус одиниця, можна розкласти у біноміальний ряд

$$\left[\mathbf{1 - exp}\left(-\mathbf{2}\sqrt{\mathbf{AV \cdot s}} \cdot \mathbf{H} \right) \right]^{-1} = \mathbf{1 + exp}\left(-\sqrt{\mathbf{AV \cdot s}} \cdot \mathbf{H} \right) + \mathbf{exp}\left(-\mathbf{2}\sqrt{\mathbf{AV \cdot s}} \cdot \mathbf{H} \right) + \ldots =$$

$$= \sum_{\mathbf{k=0}}^{\infty} \mathbf{exp}\left(-\mathbf{k}\sqrt{\mathbf{AV \cdot s}} \cdot \mathbf{H} \right). \tag{3.22}$$

З урахуванням виразу (3.22) рівняння (3.21) можна записати таким чином

$$\frac{\mathbf{T_P - T_K}}{\mathbf{2}} \cdot \left[\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{s}} \cdot \sum_{\mathbf{k=0}}^{\infty} \mathbf{exp}\left(-\alpha_\mathbf{k} \sqrt{\mathbf{s}} \right) - \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{s}} \cdot \sum_{\mathbf{k=0}}^{\infty} \mathbf{exp}\left(-\beta_\mathbf{k} \sqrt{\mathbf{s}} \right) \right], \tag{3.23}$$

де $\alpha_\mathbf{k} = \sqrt{\mathbf{AV}} \cdot \left[-\mathbf{z} + \mathbf{H} \cdot \left(\mathbf{1 + 2 \cdot k} \right) \right];$ (3.24)

$$\beta_\mathbf{k} = \sqrt{\mathbf{AV}} \cdot \left[\mathbf{z} + \mathbf{H} \cdot \left(\mathbf{1 + 2 \cdot k} \right) \right]. \tag{3.25}$$

Для визначення оригіналу виразу (3.23) можна скористатися відомим співвідношенням між оригіналом і зображенням, а саме, виразом (1.25) з заміною

z на **r**. Тоді остаточно для оригіналу третього члена в рівнянні (3.18) можна записати вираз

$$\frac{T_P - T_K}{2} \cdot \left[\sum_{k=0}^{\infty} \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha_k}{2 \cdot \sqrt{r}} \right) - \sum_{k=0}^{\infty} \operatorname{erfc}\left(\frac{\beta_k}{2 \cdot \sqrt{r}} \right) \right]. \qquad (3.27)$$

Функції, які стоять у квадратних дужках рівняння (3.27), можна у загальному вигляді подати так

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) \;, \qquad (3.28)$$

де $\operatorname{erf}(x)$ – функція помилок, яка має вигляд

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\psi^2} d\psi \qquad (3.29)$$

Для даного випадку аргумент **x** має вигляд

$$\frac{\alpha_k}{2 \cdot \sqrt{r}} \qquad \text{і} \qquad \frac{\beta_k}{2 \cdot \sqrt{r}}.$$

Щоб визначити оригінал четвертого члена у рівнянні (3.18), треба використати другу теорему розкладання у вигляді (1.50), де

$$A(s) = \frac{\left(T_P + T_K - 2 \cdot T_{i,j}\right)}{2} \cdot ch\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot z_j \right);$$

$$B(s) = ch\left(\sqrt{AV_{i,j} \cdot s_i} \cdot \frac{H}{2} \right).$$

При цьому полюси будуть такі

$$s_0 = 0; \qquad (3.30)$$

$$s_k = -\frac{\pi^2}{AV \cdot H^2} \cdot (2 \cdot k - 1)^2, \qquad (3.31)$$

де $k = 1, 2, 3, \dots$

Тоді можна записати такі співвідношення

$$A(0) = \frac{T_P - T_K - 2 \cdot T_n}{2}; \qquad B(0) = 1;$$

$$A\left(s_k\right)=\frac{T_P-T_K-2\cdot T_n}{2}\cdot ch\left(\sqrt{AV\cdot\left[-\frac{\pi^2}{AV\cdot H^2}\cdot(2\cdot k-1)^2\right]}\cdot z\right)=$$

$$=\frac{T_P-T_K-2\cdot T_n}{2}\cdot ch\left[\frac{z}{H}\cdot(2\cdot k-1)\cdot\pi\cdot i\right]=$$

$$=\frac{T_P-T_K-2\cdot T_n}{2}\cdot\cos\left[\frac{z\cdot\pi}{H}\cdot(2\cdot k-1)\right],$$

$$s_k\cdot B'\left(s_k\right)=s_k\cdot ch\left(\sqrt{AV\cdot s_k}\cdot\frac{H}{2}\right)\cdot\sqrt{AV}\cdot\frac{H}{2}\cdot\frac{1}{2\sqrt{s_k}}=$$

$$=\frac{\pi}{4}\cdot i\cdot(2\cdot k-1)\cdot sh\left[\frac{\pi\cdot i\cdot(2\cdot k-1)}{2}\right]=-\frac{\pi}{4}\cdot(2\cdot k-1)\cdot\sin\left[\frac{\pi}{2}\cdot(2\cdot k-1)\right]=$$

$$=(-1)^k\cdot\frac{\pi}{2}\cdot(2\cdot k-1).$$

З урахуванням останніх виразів для оригіналу четвертого члена в рівнянні (3.18) можна записати

$$\frac{T_P+T_K}{2}-T_n+\frac{2\cdot\left(T_P-T_K-2\cdot T_n\right)}{\pi}\cdot\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)^k}{(2\cdot k-1)}\times$$

$$\times\cos\left[\frac{z\cdot\pi}{H}\cdot(2\cdot k-1)\right]\cdot\exp\left[-\frac{\pi^2}{AV\cdot H^2}\cdot(2\cdot k-1)^2\cdot r\right]. \qquad (3.32)$$

Для визначення оригіналу п’ятого члена виразу (3.18) подамо його у вигляді

$$\frac{\varphi(s)}{s}, \qquad (3.33)$$

де

$$\varphi(s)=\frac{FV\cdot ch\left(\sqrt{AV\cdot s}\cdot z_i\right)}{s\cdot ch\left(\sqrt{AV\cdot s}\cdot\frac{H}{2}\right)}. \qquad (3.34)$$

Для отримання оригіналу від виразу (3.33) можна використати теорему про інтегрування оригіналу у вигляді (2.22), а саме, з урахуванням прийнятих позначень можна записати

$$\int_0^r f(r)dr \rightarrow \frac{\varphi(s)}{s}, \tag{3.35}$$

де **f(r)** – оригінал зображення **φ(s).**

Для визначення оригіналу **φ(s)** можна використати також другу теорему розкладання і, за аналогією з тим, як був отриманий вираз (3.32), можна записати

$$\varphi(s) \rightarrow f(r) = FV \cdot \left\{1 + \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2 \cdot k - 1)} \cdot \cos\left[\frac{z \cdot \pi}{H} \cdot (2 \cdot k - 1)\right] \times \right.$$
$$\left. \times \exp\left[-\frac{\pi^2}{AV \cdot H^2} \cdot (2 \cdot k - 1)^2 \cdot r\right]\right\} . \tag{3.36}$$

Підстановка правої частини формули (3.36) у підінтегральний вираз (3.35) і подальше інтегрування дає таке співвідношення для оригіналу п’ятого члена у рівнянні (3.18)

$$FV \cdot r + \frac{4 \cdot H^2 \cdot AV \cdot FV}{\pi^3} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2 \cdot k - 1)^3} \cdot \cos\left[\frac{z \cdot \pi}{H} \cdot (2 \cdot k - 1)\right] \times$$

$$\times \left\{1 - \exp\left[-\frac{\pi^2}{AV \cdot H^2} \cdot (2 \cdot k - 1)^2 \cdot r\right]\right\}. \tag{3.37}$$

Таким чином, з урахуванням рівнянь (3.18), (3.19), (3.20), (3.27), (3.32) і (3.37), остаточно можна записати оригінал для температури, враховуючи розбивання на окремі відрізки, тобто індекси **i** та **j**, та маючи на увазі вираз (3.14), у такому вигляді [16-19]

$$T_{P_{i+1,j}} = \frac{T_P + T_K}{2} + \frac{T_P - T_K}{2} \cdot \left[\sum_{k=0}^{\infty} \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha_{k_{i,j}}}{2 \cdot \sqrt{r_i}}\right) - \sum_{k=0}^{\infty} \operatorname{erfc}\left(\frac{\beta_{k_{i,j}}}{2 \cdot \sqrt{r_i}}\right)\right] +$$

$$+ \frac{2 \cdot \left(T_P + T_K - 2 \cdot T_{i,j}\right)}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2 \cdot k - 1)} \cdot \cos\left[\frac{z_j \cdot \pi}{H} \cdot (2 \cdot k - 1)\right] \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{AV_{i,j} \cdot H^2} \cdot (2 \cdot k - 1)^2 \cdot r_i\right] -$$

$$-\frac{4\cdot H^2\cdot FD_{i,j}}{\pi^3}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)^k}{(2\cdot k-1)^3}\cdot\cos\left[\frac{z_j\cdot\pi}{H}\cdot(2\cdot k-1)\right]\times$$

$$\times\left\{1-\exp\left[-\frac{\pi^2}{AV_{i,j}\cdot H^2}\cdot(2\cdot k-1)^2\cdot r_i\right]\right\}. \qquad (3.38)$$

Розв’яжемо далі рівняння (3.15). При цьому, граничні умови (3.16) і (3.17) будуть також справедливі. Тоді замість рівняння (3.18) будемо мати

$$\Theta n_{i+1,j}=\frac{T_{i,j}}{s_i}-\frac{FV_{i,j}}{s_i^{\,2}}+\frac{T_P-T_K}{2\cdot s_i}\cdot\frac{\sin\left(\sqrt{AV_{i,j}\cdot s_i}\cdot z_j\right)}{\sin\left(\sqrt{AV_{i,j}\cdot s_i}\cdot\frac{H}{2}\right)}+$$

$$+\frac{T_P+T_K-2\cdot T_{i,j}}{2\cdot s_i}\cdot\frac{\cos\left(\sqrt{AV_{i,j}\cdot s_i}\cdot z_j\right)}{\cos\left(\sqrt{AV_{i,j}\cdot s_i}\cdot\frac{H}{2}\right)}+\frac{FV_{i,j}}{s_i^{\,2}}\cdot\frac{\cos\left(\sqrt{AV_{i,j}\cdot s_i}\cdot z_j\right)}{\cos\left(\sqrt{AV_{i,j}\cdot s_i}\cdot\frac{H}{2}\right)}. \qquad (3.39)$$

Для рівняння (3.39) співвідношення (3.19) і (3.20) будуть вірними. Щоб знайти оригінал для третього члена у рівнянні (3.39), можна скористатися наступним співвідношенням

$$\sin(z)=-i\cdot sh(i\cdot z)=-i\cdot\frac{e^{iz}-e^{-iz}}{2},$$

де $\mathbf{i}$ – уявна одиниця.

З урахуванням останнього виразу можна виконати перетворення, які аналогічні рівнянням (3.21) – (3.23). Тобто можна записати

$$\frac{T_p-T_k}{2}\cdot\left[\frac{1}{s}\sum_{k=0}^{\infty}\exp\left(-\alpha 1_k\cdot\sqrt{s}\right)-\frac{1}{s}\sum_{k=0}^{\infty}\exp\left(-\beta 1_k\cdot\sqrt{s}\right)\right], \qquad (3.40)$$

де $\alpha 1_k=i\cdot\sqrt{AV}\cdot[-z+H\cdot(1+2\cdot k)]$;

$\beta 1_k=i\cdot\sqrt{AV}\cdot[z+H\cdot(1+2\cdot k)]$.

Якщо урахувати той факт, що величина **AV** має від’ємні значення, то можна записати

$$\sqrt{-AV}=\sqrt{-1\cdot\sqrt{AV}}=i\cdot\sqrt{AV}$$

де **AV** буде вже додатною величиною.

Тоді для оригіналу третього члена в рівнянні (3.39) з урахуванням останніх співвідношень і парності функції **erf** буде також справедливим вираз (3.27).

Для визначення оригіналу четвертого члена в рівнянні (3.39) можна скористатися другою теоремою розкладання у вигляді (1.50). Тоді полюси запишуться так

$$s_0 = 0; \qquad s_k = \frac{\pi^2}{AV \cdot H^2} \cdot (2 \cdot k - 1)^2. \tag{3.41}$$

Таким чином, для четвертого члена У рівнянні (3.39) можна записати такі співвідношення

$$A(0) = \frac{T_P + T_K - 2 \cdot T_n}{2}; \qquad B(0) = 1;$$

$$A(s_k) = \frac{T_P + T_K - 2 \cdot T_n}{\pi} \cdot \cos\left[\frac{z \cdot \pi}{H} \cdot (2 \cdot k - 1)\right],$$

$$s_k \cdot B'(s_k) = -s_k \cdot \sin\left(\sqrt{AV \cdot s_k} \cdot \frac{H}{2}\right) \cdot \sqrt{AV} \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{s_k}} =$$

$$= -\frac{\pi}{4} \cdot (2 \cdot k - 1) \cdot \sin\left[\frac{\pi}{2} \cdot (2 \cdot k - 1)\right] = (-1)^k \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (2 \cdot k - 1).$$

Ураховуючи останні вирази, остаточно для оригіналу четвертого члена У рівнянні (3.39) можна записати такий вираз

$$\frac{T_P + T_K}{2} - T_n + \frac{2 \cdot (T_P + T_K - 2 \cdot T_n)}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2 \cdot k - 1)} \times$$

$$\times \cos\left[\frac{z \cdot \pi}{H} \cdot (2 \cdot k - 1)\right] \cdot \exp\left[\frac{\pi^2}{AV \cdot H^2} \cdot (2 \cdot k - 1)^2 \cdot r\right]. \tag{3.42}$$

Маючи на увазі, що **AV** являє собою від’ємну величину, то вираз (3.42) співпадає з виразом (3.32).

Тоді, за аналогією з тим, як була отримана формула (3.37), можна записати наступний вираз для оригіналу п’ятого члена в рівнянні (3.39)

$$FV \cdot r + \frac{4 \cdot H^2 \cdot AV \cdot FV}{\pi^3} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2 \cdot k - 1)^3} \cdot \cos\left[\frac{z \cdot \pi}{H} \cdot (2 \cdot k - 1)\right] \times$$
$$\times \left\{ \exp\left[\frac{\pi^2}{AV \cdot H^2} \cdot (2 \cdot k - 1)^2 \cdot r\right] - 1 \right\}. \qquad (3.43)$$

Остаточно для оригіналу температури за формулою (3.39) можна також використовувати вираз (3.38), але величину $AV_{i,j}$ треба підставити з додатнім значенням.

3.3 Аналіз процесу при граничних умовах другого роду

У реальних умовах роботи черв’ячно-дискового екструдера задати на поверхнях дисків граничні умови першого роду, а саме, температури не можна. Існують різні конструкції робочих органів, в яких зовнішні торцеві поверхні дисків можуть мати системи термостабілізації (охолодження й підігрівання). У даному випадку для визначення температури на границях, тобто на внутрішніх торцевих поверхнях дисків, можна використати граничні умови другого роду, які можна записати таким чином

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = q_P \quad \text{при} \quad z = H/2, \qquad (3.44)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = q_K \quad \text{при} \quad z = -H/2. \qquad (3.45)$$

Знак мінус у рівнянні (3.44) поставлений тому, що тепловий потік, який направлений у міждисковий простір, має зворотний напрямок координаті **z**.

Тепловий потік на границі обертового диску складається із двох частин: перша частина, за рахунок дисипативного виділення, йде в міждисковий зазор, а друга частина, за рахунок теплопровідності матеріалу диска та його охолодження відводиться із робочої зони. Дисипативне виділення відбувається внаслідок сил тертя, які з’являються між матеріалом і поверхнею диска, при обертанні останнього. Для нерухомого дискаураховується тільки друга частина теплового потоку. Таким чином, можна записати наступні співвідношення [20]

$$q_P = V_\omega(r) \cdot f_T \cdot P(r) - \frac{\lambda_P}{H_P} \cdot \left[T\left(\frac{H}{2}, r\right) - T_P\left(H_P, r\right)\right]; \qquad (3.46)$$

$$q_K = -\frac{\lambda_K}{H_K} \cdot \left[T\left(-\frac{H}{2}, r\right) - T_K\left(H_K, r\right)\right], \qquad (3.47)$$

де λ_P, λ_K – коефіцієнти теплопровідності матеріалу, відповідно, рухомого й нерухомого дисків; H_P, H_K – товщини стінок, відповідно, рухомого й нерухомого дисків; $T_P(H_P, r)$, $T_K(H_K, r)$ – значення температур на зовнішніх поверхнях, відповідно, рухомого й нерухомого дисків; f_T – коефіцієнт тертя між поверхнею рухомого диска й перероблюваного матеріалом; $V_\omega(r)$ – колова швидкість рухомого диска; **P(r)** – розподіл тиску в міждисковому зазорі, який залежно від типу течії може бути визначений за однією з формул.

Якщо присутній рух рідини тільки за рахунок ефекту Вайссенберга, то тиск можна знайти за формулою

$$P(r) = K_2 \cdot (G1 \cdot R_n)^n \cdot \left\{ \frac{R_V}{R_n} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \left[\left(\frac{r}{R_n} \right)^{(n-1)} - 1 \right] + \left(\frac{R_V}{R_n} \right)^{(3-n)} \cdot \frac{1}{2 \cdot n - 3} \cdot \left[\left(\frac{r}{R_n} \right)^{(2 \cdot n - 3)} - 1 \right] + \right.$$

$$+ \left(\frac{R_V}{R_n} \right)^{(5-2 \cdot n)} \cdot \frac{1}{3 \cdot n - 5} \cdot \left[\left(\frac{r}{R_n} \right)^{(3 \cdot n - 5)} - 1 \right] - \frac{1}{n} \cdot \left[\left(\frac{r}{R_n} \right)^{n} - 1 \right] -$$

$$\left. - \left(\frac{R_V}{R_n} \right)^{(2-n)} \cdot \frac{1}{2 \cdot n - 2} \cdot \left[\left(\frac{r}{R_n} \right)^{(2 \cdot n - 2)} - 1 \right] - \left(\frac{R_V}{R_n} \right)^{(4-2 \cdot n)} \cdot \frac{1}{3 \cdot n - 4} \cdot \left[\left(\frac{r}{R_n} \right)^{(3 \cdot n - 4)} - 1 \right] \right\}.$$

У випадку наявності, крім ефекту Вайссенберга, також ще нагнітаючої дії черв'яка, можна скористатися наступною залежністю

$$Q + 2\pi \int_{-H/2}^{H/2} f1(z,r)_{RV} \cdot dz = 2\pi \int_{-H/2}^{H/2} f2(z,r) \cdot dz,$$

де **Q** – продуктивність, яка створюється в дисковому зазорі за рахунок нагнітаючої дії черв'яка; $f1(z,r)_{RV}$, $f2(z,r)$ – функції, які розраховується за формулами (причому функція $f1(z,r)_{RV}$ повинна задовольняти умові $r = R_V$)

$$f1(z) = \frac{K_2 \cdot G1 \cdot H^2 \cdot r}{8 \cdot K_1} \cdot \left\{ 1 - \frac{\left(1 - \frac{R_V}{r} \right)}{\left[1 - \left(\frac{R_V}{r} \right)^{2-n} \right]} \right\} \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot z}{H} \right)^2 - 1 \right];$$

$$f2(r)=\left(\frac{K_2}{K_1}\cdot\Phi+\frac{r}{K_1}\cdot\Phi^{1-n}\cdot dPr\right)\cdot\frac{H^2}{8}\left[\left(\frac{2\cdot z}{H}\right)^2-1\right]+$$

$$+r\cdot\left|\frac{d\,Pr}{K_1}\right|^{1/n}\cdot\frac{n}{n+1}\cdot\left(\frac{H}{2}\right)^{(1+n)/n}\left[\left|\frac{2\cdot z}{H}\right|^{(1+n)/n}-1\right].$$

Слід замітити, що в останній формулі присутній безпосередньо градієнт тиску $d\,Pr=\dfrac{\partial P}{\partial r}$, після визначення якого й знаходиться тиск. Сутність величин, які містять останні рівняння, можна знайти в останніх п'яти літературних посилань.

Необхідно помітити, що на величину коефіцієнта тертя f_T великий вплив має температура. Тому, при розрахунках температурного поля з урахуванням рівняння (3.46) необхідно мати апроксимаційні залежності коефіцієнта тертя від температури.

У даному випадку буде справедливим рівняння теплового балансу (3.9) та його зображення (3.10). Рішення (3.13) і (3.15) будуть також справедливі при виконанні співвідношень (3.11), (3.12) і (3.14). Однак, для визначення констант інтегрування C_1, C_2, C_3, C_4 необхідно скористатися граничними умовами (3.44) і (3.45), які після перетворення Лапласа можна записати так

$$-\lambda\cdot\frac{\partial\Theta}{\partial z}=\frac{q_P}{s}\quad \text{при}\quad z=H/2; \tag{3.48}$$

$$\lambda\cdot\frac{\partial\Theta}{\partial z}=\frac{q_K}{s}\quad \text{при}\quad z=-H/2. \tag{3.49}$$

Щоб знайти константи інтегрування C_1 і C_2, необхідно здиференціювати рівняння (3.13) за координатою z і підставити граничні умови (3.48) і (3.49)

$$\frac{-q_P}{s\cdot\lambda}=C_1\cdot\sqrt{AV\cdot s}\cdot ch\left(\frac{\sqrt{AV\cdot s}\cdot H}{2}\right)+C_2\cdot\sqrt{AV\cdot s}\cdot sh\left(\frac{\sqrt{AV\cdot s}\cdot H}{2}\right),$$

$$\frac{q_K}{s\cdot\lambda}=C_1\cdot\sqrt{AV\cdot s}\cdot ch\left(\frac{\sqrt{AV\cdot s}\cdot H}{2}\right)-C_2\cdot\sqrt{AV\cdot s}\cdot sh\left(\frac{\sqrt{AV\cdot s}\cdot H}{2}\right).$$

Індекси **i** та **j** у двох останніх рівняннях для спрощення запису опущені.

Визначаючи константи інтегрування C_1 і C_2 із двох останніх рівнянь та підставляючи їх у формулу (3.13), вираз для зображення температури в даному випадку можна записати таким чином

$$\Theta = \frac{T_п}{s} + \frac{FV}{s^2} + \frac{\left(q_K - q_P\right)}{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{AV} \cdot s} \cdot \frac{sh\left(\sqrt{AV \cdot s} \cdot z\right)}{\sqrt{s} \cdot ch\left(\frac{\sqrt{AV \cdot s} \cdot H}{2}\right)} -$$

$$- \frac{\left(q_K + q_P\right)}{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{AV} \cdot s} \cdot \frac{ch\left(\sqrt{AV \cdot s} \cdot z\right)}{\sqrt{s} \cdot sh\left(\frac{\sqrt{AV \cdot s} \cdot H}{2}\right)}. \qquad (3.50)$$

Рівняння (3.50) для спрощення записане без індексів **i** та **j**.

Оригіналами перших двох членів у правій частині рівняння (3.50) будуть, відповідно, рівняння (3.19) і (3.20). Для визначення оригіналів третього та четвертого членів представимо гіперболічні функції через показникові і, за аналогією з тим, як було отримане рівняння (3.23), можна знайти наступні вирази

$$A1 \cdot \frac{1}{s} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \exp\left(-b1_k \cdot \sqrt{s}\right) - \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \exp\left(-b2_k \cdot \sqrt{s}\right)\right]; \qquad (3.51)$$

$$A2 \cdot \frac{1}{s} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp\left(-b1_k \cdot \sqrt{s}\right) + \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp\left(-b2_k \cdot \sqrt{s}\right)\right], \qquad (3.52)$$

де $A1 = \dfrac{\left(q_K - q_P\right)}{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{AV}}$; $A2 = \dfrac{\left(q_K + q_P\right)}{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{AV}}$;

$$b1_k = \sqrt{AV} \cdot \left[-z + \frac{H}{2} \cdot (2 \cdot k + 1)\right],$$

$$b2_k = \sqrt{AV} \cdot \left[z + \frac{H}{2} \cdot (2 \cdot k + 1)\right].$$

Для визначення оригіналів (3.51) і (3.52) можна використати табличне значення перетворення Лапласа у вигляді (1.25), а також теорему множення (1.26) або теорему про інтегрування оригіналу (2.22).

У результаті для виразів (3.51) і (3.52) можна записати, відповідно, такі оригінали

$$A1 \cdot \left(\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot B1_k - \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot B2_k\right); \qquad (3.53)$$

$$\mathbf{A2}\cdot\left(\sum_{k=0}^{\infty}\mathbf{B1}_k+\sum_{k=0}^{\infty}\mathbf{B2}_k\right), \tag{3.54}$$

де

$$\mathbf{B1}_k=\mathbf{b1}_k\cdot\left[\mathrm{erf}\left(\frac{\mathbf{b1}_k}{2\cdot\sqrt{\mathbf{r}}}\right)-1\right]+2\cdot\sqrt{\frac{\mathbf{r}}{\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{(\mathbf{b1}_k)^2}{4\cdot\mathbf{r}}\right]; \tag{3.55}$$

$$\mathbf{B2}_k=\mathbf{b2}_k\cdot\left[\mathrm{erf}\left(\frac{\mathbf{b2}_k}{2\cdot\sqrt{\mathbf{r}}}\right)-1\right]+2\cdot\sqrt{\frac{\mathbf{r}}{\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{(\mathbf{b2}_k)^2}{4\cdot\mathbf{r}}\right]. \tag{3.56}$$

Таким чином, остаточно для розподілу температури в міжвалковому просторі (у випадку додатнього значення радіальної швидкості) маємо такий вираз (з урахуванням розбиття на вузлові точки, тобто індекси $\mathbf{i}$ та $\mathbf{j}$)

$$\mathbf{T}_{i+1,j}=\mathbf{T}_{i,j}+\mathbf{FV}_{i,j}\cdot\mathbf{r}_i+\mathbf{A1}_{i,j}\cdot\left(\sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k\cdot\mathbf{B1}_{k_{i,j}}-\sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k\cdot\mathbf{B2}_{k_{i,j}}\right)-$$

$$-\mathbf{A2}_{i,j}\cdot\left(\sum_{k=0}^{\infty}\mathbf{B1}_{k_{i,j}}-\sum_{k=0}^{\infty}\mathbf{B2}_{k_{i,j}}\right). \tag{3.57}$$

Якщо об’єднати комплекси при теплових потоках $\mathbf{q_K}$ та $\mathbf{q_P}$, то останнє рівняння можна привести до вигляду

$$\mathbf{T}_{i+1,j}=\mathbf{T}_{i,j}+\mathbf{FV}_{i,j}\cdot\mathbf{r}_i-\frac{\mathbf{q}_{K_i}}{\lambda\cdot\sqrt{\mathbf{AV}_{i,j}}}\cdot\left(\sum_{k=1,3,5...}^{\infty}\mathbf{B1}_{k_{i,j}}+\sum_{k=0,2,4...}^{\infty}\mathbf{B2}_{k_{i,j}}\right)-$$

$$-\frac{\mathbf{q}_{P_i}}{\lambda\cdot\sqrt{\mathbf{AV}_{i,j}}}\cdot\left(\sum_{k=0,2,4...}^{\infty}\mathbf{B1}_{k_{i,j}}+\sum_{k=1,3,5...}^{\infty}\mathbf{B2}_{k_{i,j}}\right). \tag{3.58}$$

При розрахунках за рівнянням (3.58) необхідно ураховувати залежність теплових потоків $\mathbf{q_K}$ та $\mathbf{q_P}$ від температури за формулами (3.46) та (3.47). Причому, необхідно також використати апроксимацію коефіцієнта тертя залежно від температури й, у випадку необхідності, від тиску.

При розрахунку температури за формулою (3.58) з урахуванням виразів (3.46) і (3.47) на границях будемо мати по дві невідомі. Унаслідок чого необхідно спочатку розрахувати значення температур на межах, тобто при $\mathbf{z}=\pm\mathbf{H}/\mathbf{2}$. Для цього рівняння (3.58) можна подати у вигляді системи із двох рівнянь: перше –

при $\mathbf{j} = \mathbf{0}$, що відповідає значенню $\mathbf{z} = -\mathbf{H}/\mathbf{2}$; друге – при $\mathbf{j} = \mathbf{j_m}$, що відповідає значенню $\mathbf{z} = \mathbf{H}/\mathbf{2}$. Тоді будемо мати

$$\mathbf{T_{i+1,0} = T_{i,0} + FV_{i,0} \cdot r_i - \frac{q_{K_i}}{\lambda \cdot \sqrt{AV_{C_i}}} \cdot \left(\sum_{k=1,3,5...}^{\infty} B1_{k_{i,0}} + \sum_{k=0,2,4...}^{\infty} B2_{k_{i,0}} \right) -}$$

$$\mathbf{- \frac{q_{P_i}}{\lambda \cdot \sqrt{AV_{C_i}}} \cdot \left(\sum_{k=0,2,4...}^{\infty} B1_{k_{i,0}} + \sum_{k=1,3,5...}^{\infty} B2_{k_{i,0}} \right)}, \tag{3.59}$$

$$\mathbf{T_{i+1,jm} = T_{i,jm} + FV_{i,jm} \cdot r_i - \frac{q_{K_i}}{\lambda \cdot \sqrt{AV_{C_i}}} \cdot \left(\sum_{k=1,3,5...}^{\infty} B1_{k_{i,jm}} + \sum_{k=0,2,4...}^{\infty} B2_{k_{i,jm}} \right) -}$$

$$\mathbf{- \frac{q_{P_i}}{\lambda \cdot \sqrt{AV_{C_i}}} \cdot \left(\sum_{k=0,2,4...}^{\infty} B1_{k_{i,jm}} + \sum_{k=1,3,5...}^{\infty} B2_{k_{i,jm}} \right)}. \tag{3.60}$$

Комплекс $\mathbf{AV_{C_i}}$ у рівняннях (3.59) та (3.60) являє собою середнє значення від комплексу $\mathbf{AV_{i,j}}$ вздовж координати $\mathbf{z}$, тобто за індексом $\mathbf{j}$. Це викликане тим, що, по-перше, величина $\mathbf{AV_{i,j}}$ приймає на границі нульові значення згідно з формулою (3.11); по-друге, різниця в значеннях величини $\mathbf{AV_{i,j}}$ уздовж координати $\mathbf{z}$ (за індексом $\mathbf{j}$) не вносить значного вкладу в зміни температурного поля внаслідок урахування, згідно з прийнятими припущеннями, тільки перенесення тепла вздовж осі $\mathbf{z}$ за рахунок теплопровідності.

Ураховуючи рівняння (3.46) та (3.47) два останні вирази можна подати таким чином

$$\mathbf{T_{i+1,0} = T_{i,0} + FV_{i,0} \cdot r_i - K1_i \cdot \left(T_{i+1,0} - TH_{K_i} \right) \times}$$

$$\mathbf{\times \left(\sum_{k=1,3,5...}^{\infty} B1_{k_{i,0}} + \sum_{k=0,2,4...}^{\infty} B2_{k_{i,0}} \right) - \left[K2_i \cdot \left(T_{i+1,jm} - TH_{P_i} \right) - \frac{V_{\omega_i} \cdot f_{T_i} \cdot P_i}{\lambda \cdot \sqrt{AV_{C_i}}} \right] \times}$$

$$\mathbf{\times \left(\sum_{k=0,2,4...}^{\infty} B1_{k_{i,0}} + \sum_{k=1,3,5...}^{\infty} B2_{k_{i,0}} \right)}, \tag{3.61}$$

$$T_{i+1,jm} = T_{i,jm} + FV_{i,jm} \cdot r_i - K1_i \cdot \left(T_{i+1,0} - TH_{K_i} \right) \times$$

$$\times \left(\sum_{k=1,3,5...}^{\infty} B1_{k_{i,jm}} + \sum_{k=0,2,4...}^{\infty} B2_{k_{i,jm}} \right) - \left[K2_i \cdot \left(T_{i+1,jm} - TH_{P_i} \right) - \frac{V\omega_i \cdot f_{T_i} \cdot P_i}{\lambda \cdot \sqrt{AV_{C_i}}} \right] \times$$

$$\times \left(\sum_{k=0,2,4...}^{\infty} B1_{k_{i,jm}} + \sum_{k=1,3,5...}^{\infty} B2_{k_{i,jm}} \right), \qquad (3.62)$$

де $K1_i = \dfrac{\lambda_K}{H_K \cdot \lambda \cdot \sqrt{AV_{C_i}}}$; $K2_i = \dfrac{\lambda_P}{H_P \cdot \lambda \cdot \sqrt{AV_{C_i}}}$; TH_{K_i}, TH_{P_i} – являють дискретні аналоги, відповідно, температур $T_K(H_K, r)$ і $T_P(H_P, r)$.

Перетворимо рівняння (3.61) та (3.62) відносно невідомих $T_{i+1,0}$ та $T_{i+1,jm}$

$$T_{i+1,0} \cdot \left(1 + K1_i \cdot S1_{i,0}\right) + T_{i+1,jm} \cdot K2_i \cdot S2_{i,0} = Ck_0, \qquad (3.63)$$

$$T_{i+1,0} \cdot K1_i \cdot S1_{i,jm} + T_{i+1,jm} \cdot \left(1 + K2_i \cdot S2_{i,jm}\right) = Ck_1, \qquad (3.64)$$

де

$$S1_{i,j} = \sum_{k=1,3,5...}^{\infty} B1_{k_{i,j}} + \sum_{k=0,2,4...}^{\infty} B2_{k_{i,j}} ;$$

$$S2_{i,j} = \sum_{k=0,2,4...}^{\infty} B1_{k_{i,j}} + \sum_{k=1,3,5...}^{\infty} B2_{k_{i,j}} ;$$

$$Ck_0 = T_{i,0} + FV_{i,0} \cdot r_i - K1_i \cdot TH_{K_i} \cdot S1_{i,0} +$$

$$+ \left(K2_i \cdot TH_{P_i} + \frac{V\omega_i \cdot f_{T_i} \cdot P_i}{\lambda \cdot \sqrt{AV_{C_i}}} \right) \cdot S2_{i,0};$$

$$Ck_1 = T_{i,jm} + FV_{i,jm} \cdot r_i + K1_i \cdot TH_{K_i} \cdot S1_{i,jm} +$$

$$+ \left(K2_i \cdot TH_{P_i} + \frac{V\omega_i \cdot f_{T_i} \cdot P_i}{\lambda \cdot \sqrt{AV_{C_i}}} \right) \cdot S2_{i,jm}.$$

Таким чином, рівняння (3.63) і (3.64) утворюють систему із двох лінійних рівнянь з двома невідомими $T_{i+1,0}$ та $T_{i+1,jm}$. Тому систему можна розв'язати, наприклад, використовуючи із пакета **Mathcad** функцію **lsolve**.

4 КОНСТРУКТИВНЕ ОФОРМЛЕННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ОДНОЧЕРВ'ЯЧНИХ МАШИН ТА ЇХ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

4.1 Конструкції та умови роботи типових агрегатів

При переробці полімерних матеріалів у більшості випадків використовуються пластикувальні одночерв'ячні машини. Робочий об'єм таких агрегатів можна умовно розбити на три функціональні зони вздовж руху матеріалу, як схематично показано на рис. 4.1.

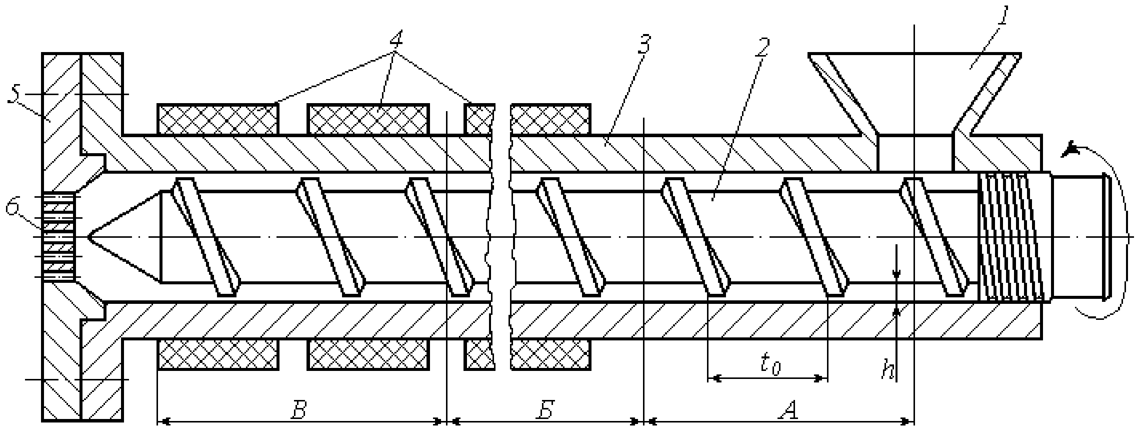


Рис. 4.1. Схема робочої частини типової одночерв'ячної машини:
1 – бункер; 2 – черв'як; 3 – корпус; 4 – нагрівачі;
5 – формувальний інструмент; 6 – вихідні канали;
***А* – зона живлення; *Б* – зона плавлення (або пластикації);**
***В* – зона дозування (або змішування, або витискування)**

Принцип роботи такої машини наступний: матеріал із бункера 1 у вигляді гранул чи порошку подається на гвинтову нарізку черв'яка в зоні живлення ***А***. У міру просування матеріалу за рахунок обертання черв'яка в зоні живлення матеріал ущільнюється й перетворюється в тверду пробку за рахунок тиску. Суцільність твердої пробки, а відповідно її механічні характеристики залежать від величини створюваного в зоні живлення тиску. Якщо тиск буде недостатній, то тверда пробка буде мати пори відповідних розмірів. У свою чергу тиск залежить від ряду факторів. Одним з основних факторів є відношення коефіцієнтів тертя між перероблюваним матеріалом та відповідними поверхнями гвинтового каналу:

$$\mathbf{K_f} = \frac{\mathbf{f_b}}{\mathbf{f_s}}, \tag{4.1}$$

де $\mathbf{f_b}$ – коефіцієнт тертя між перероблюваним матеріалом і внутрішньою поверхнею корпуса; $\mathbf{f_s}$ – коефіцієнт тертя між перероблюваним матеріалом та поверхнею черв'яка.

Для нормальної роботи черв'яка машини значення $\mathbf{K_f}$ повинне бути більше одиниці. В іншому випадку матеріал може налипнути на черв'як і подачі вздовж гвинтового каналу не буде. Даний режим отримав назву "голодне живлення".

Щоб збільшити значення параметра $\mathbf{K_f}$, треба створювати відповідний температурний режим у зоні живлення, тому що коефіцієнти тертя у великій мірі залежать від температури. Крім того, подачу матеріалу в зоні живлення можна збільшити за рахунок поздовжніх або спіральних пазів, які виконуються на внутрішній поверхні корпуса.

Слід також відзначити, що тиск, який створюється в зоні живлення, необхідний для протискування матеріалу через зону плавлення, особливо на початковій ділянці.

Проходячи через зону плавлення, полімерний матеріал плавиться внаслідок зовнішнього підведення тепла від нагрівачів, а також через дисипативний розігрів, що відбувається за рахунок в'язкого тертя і тертя між твердою пробкою та поверхнею гвинтового каналу.

Коли матеріал повністю розплавиться, то починається зона дозування, де відбувається змішування матеріалу та стабілізація потоку. Щоб досягти необхідної якості змішування, зона дозування повинна бути виконана з певною довжиною. Розуміється, чим більша довжина зони дозування, тим краща якість змішування та стабільність процесу екструзії. Але при цьому збільшується матеріалоємність та енергоємність агрегату. У наступних розділах будуть наведені різні конструкції змішувальних елементів, що дозволяє значно інтенсифікувати процеси в зоні дозування.

Необхідно також відмітити, що на характер роботи черв'ячної машини, і в першу чергу зони дозування, велику роль відіграє опір формувального інструмента. У зв'язку з цим можна виділити два граничні режими роботи: перший – коли формувальний інструмент повністю відсутній; другий – коли вихідний канал повністю закритий. Перший режим характерний тим, що продуктивність буде максимальною, а тиск, що створюється в робочому об'ємі, – мінімальний. При другому режимі черв'ячна машина працює сама на себе, тобто подачі через формувальний інструмент не буде. В останньому випадку виникає максимальний тиск. Реальні режими роботи припускають наявність формувального інструмента з певним опором, що залежить від геометричної конфігурації отримуваного виробу та властивостей перероблюваного матеріалу.

На рис. 4.1. показаний черв'як з постійним кроком $\mathbf{t_0}$ і циліндричним осердям, тобто з постійною глибиною каналу $\mathbf{h}$. У даному випадку елементарний об'єм гвинтового каналу вздовж усієї його довжини залишається незмінним. Більшість черв'ячних агрегатів споряджені черв'яками зі змінним об'ємом. Це досягається або зміною глибини каналу $\mathbf{h}$, або зміною кроку $\mathbf{t_0}$. Остання конструкція черв'яків, а саме, зі змінним кроком, використовується переважно для переробки гумових сумішей.

Схема черв'яка зі змінною глибиною зображена на рис. 4.2.

Згідно зі схемою на рис. 4.2 осердя черв'яка 4 має три зони: перша, довжиною $\mathbf{L_{C1}}$ має циліндричне осердя з глибиною нарізки $\mathbf{h_g}$; друга, довжиною $\mathbf{L_K}$ має конусне осердя, глибина якої змінюється від $\mathbf{h_g}$ до $\mathbf{h}$; третя, довжиною $\mathbf{L_{C2}}$ має циліндричне осердя з глибиною $\mathbf{h}$.

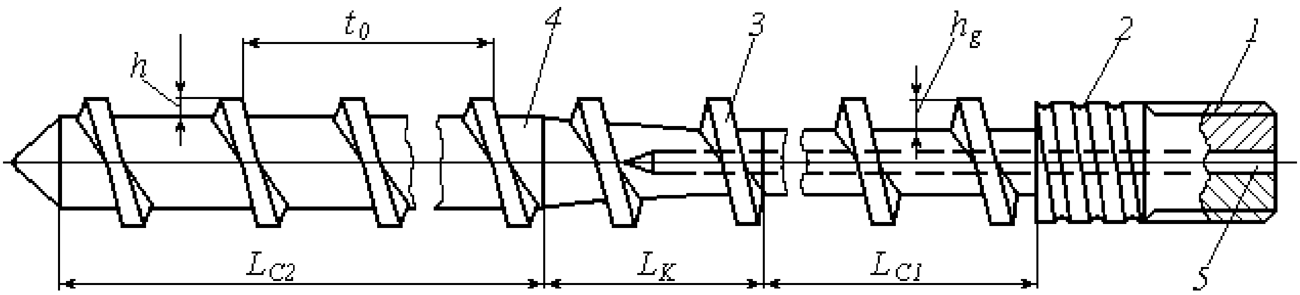


Рис. 4.2. Схема черв'яка, який має відрізок з конусним осердям:
1 – шліцьове з'єднання; 2 – спіральна нарізка; 3 – гребень; 4 – осердя;
5 – центральний отвір

Зона стискування, тобто відрізок з конічним осердям, як правило, розміщена на ділянці зони плавлення. Це викликане декількома факторами: по-перше, у процесі розігрівання та плавлення твердої пробки змінюються її характеристики; по-друге, наявність конусного осердя прискорює швидкість плавлення полімерної пробки. Довжина $\mathbf{L_K}$, а значить і конусність, залежить від властивостей перероблюваного матеріалу та режимів переробки.

Розподіл тиску вздовж гвинтового матеріалу, залежно від конструктивного оформлення та режимів переробки, може мати різний вигляд, як показано на рис. 4.3 [1].

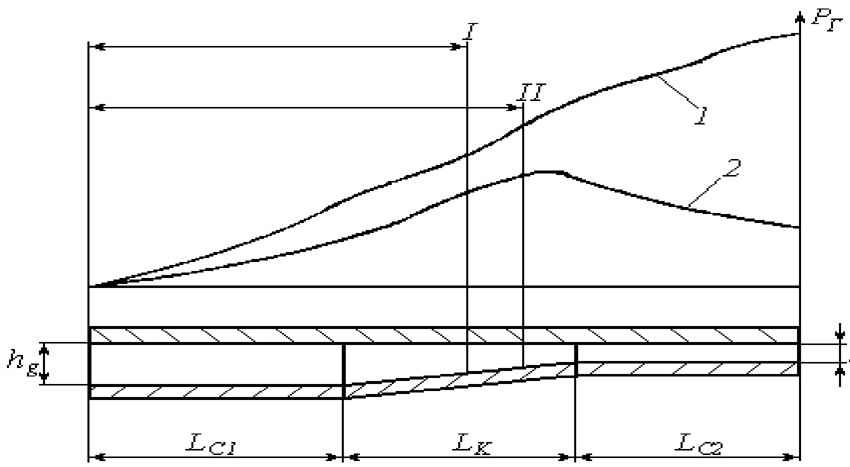


Рис. 4.3. Типові епюри тиску при екструзії термопластів:
1 – при $Q_1 < Q_{кр}$; 2 – при $Q_2 > Q_{кр}$; $P_Г$ – тиск у головці;
I, II – фактичні границі зони плавлення відповідно при Q_1 і Q_2

Об'ємні витрати, при якому на вході в зону дозування з найменшою глибиною нарізки градієнт тиску змінює знак, задовольняє відношенню

$$\mathbf{Q_{кр}} \geq \alpha_{\mathbf{min}} \cdot \mathbf{N_0}, \tag{4.2.}$$

де $\boldsymbol{\alpha_{min}}$ – значення коефіцієнта прямоструменя для відрізку каналу з найменшою глибиною нарізки; $\mathbf{N_0}$ – частота обертання черв'яка.

Подальше зростання продуктивності призводить до того, що тиск проходить через максимум. При цьому епюра тиску набуває вигляду, що схожий з кривою 2 на рис. 4.3.

Якщо продуктивність відрізків каналу, які розміщені ближче до зони плавлення, стає дуже великою, то виникаючий при цьому додатній градієнт тиску автоматично призводить до її зменшення. У випадку недостатності продуктивності залишкові витрати обумовлюють з'явлення від'ємного градієнта тиску.

Основний вплив на показники якості змішування для типового черв'яка відіграє циркуляційний потік, що направлений перпендикулярно осі гвинтового каналу. Але певний внесок у ці показники також дають потоки витоку та протиструменя, які залежать від градієнта тиску згідно з рис. 4.3. З цього виходить, що, чим більший градієнт тиску, тим більша якість змішування. Але при дуже великих градієнтах тиску зсувні деформації можуть досягти таких значень, що можуть виникати деструкційні процеси, які негативно впливають на якість отримуваного виробу.

Крім основних трьох функціональних зон, що зображені на рис. 4.1, можуть бути присутні інші спеціальні зони, без яких у деяких випадках обійтися не можна. На рис. 4.4. показана схема робочої частини одночерв'ячної машини з зоною дегазації (або зоною вентиляції, або зоною декомпресії) без формувального інструмента.

Згідно зі схемою, яка подана на рис. 4.4, черв'як вже має шість відрізків: чотири циліндричні з глибиною $\mathbf{h_g}$, $\mathbf{h_1}$, $\mathbf{h_V}$, $\mathbf{h_2}$ і довжиною $\mathbf{L_{C1}}$, $\mathbf{L_{C2}}$, $\mathbf{L_{C3}}$, $\mathbf{L_{C4}}$; два конічні з довжиною $\mathbf{L_{K1}}$, і $\mathbf{L_{K2}}$.

Необхідно зазначити, що в загальному випадку оптимальний режим екструзії відбувається при виконанні співвідношення

$$\mathbf{Q_g \geq Q_{pl} \geq Q_d}, \tag{4.2}$$

де $\mathbf{Q_g}$, $\mathbf{Q_{pl}}$, $\mathbf{Q_d}$ – продуктивності відповідно зон живлення, плавлення й дозування.

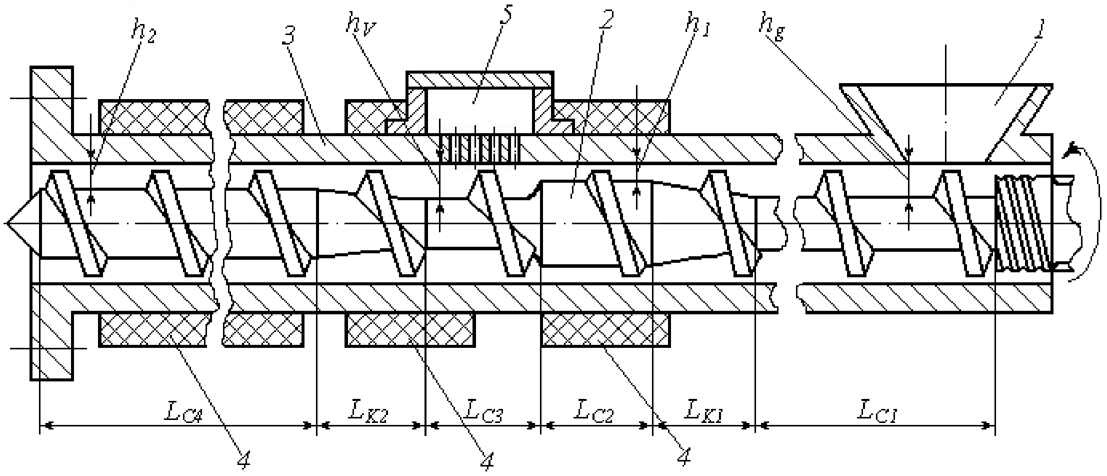


Рис. 4.4. Схема робочої частини з зоною дегазації:
1 – бункер; 2 – черв'як; 3 – корпус; 4 – нагрівачі;
5 – вакуумний пристрій для вилучення газоподібних речовин

Даний режим для черв'яків з постійним кроком може бути отриманий, коли, принаймні, глибина черв'ячної нарізки не збільшується вздовж каналу до вихідного отвору. Але для дегазаційних черв’яків необхідно, щоб продуктивність черв’яка для зони дегазації була меншою, ніж після неї. У противному випадку робочий об’єм у зоні вакуумного пристрою повністю заповниться матеріалом. Нормальний режим роботи для екструдера з зоною дегазації при постійному кроці гвинтової нарізки може бути забезпечений, якщо виконати умову

$$\mathbf{h_V > h_g > h_2 > h_1}. \tag{4.3}$$

На рис. 4.5 зображений загальний вигляд типової конструкції одночерв’ячної машини, що містить такі основні вузли: корпус 1; черв’як 2; секцію живлення 3; редуктор 4; завантажувальний бункер 5; електродвигун 6; станину 7; систему охолодження зони живлення 8; систему охолодження корпусу 9; пульт керування 10.

Порядок роботи черв’ячного агрегату такий. Перед запуском електродвигуна вмикають нагрівачі на корпусі й доводять температуру останнього до необхідного значення залежно від тиску перероблюваного матеріалу. При цьому, щоб підтримати достатньо низьку температуру секції живлення для збільшення відношення (4.1), в систему охолодження зони живлення подають теплоносій, як правило, воду. Конструктивне виконання охолоджувальних каналів у зоні живлення може мати різну форму. Але найбільш поширене – це у вигляді гвинтової нарізки, як зображено на рис. 4.5.

Нагрівачі на корпусі можуть бути виконані різних типів. Одним із більш простих й ефективних є нагрівач омічного типу, який і фігурує на рис. 4.5. Такий нагрівач виготовлений з матеріалу, який має великий електричний опір (ніхром, константан, тощо), зовні ізольований від контактування з металевими елементами через керамічні вставки.

Електродвигун у більшості випадків використовується постійного струму, що дає змогу повільно регулювати частоту обертання черв’яка. Причому запуск агрегату виконують на малих обертах, постійно збільшуючи їх до робочих, які відповідають необхідній продуктивності. Система охолодження корпусу може мати не тільки вентилятори, тобто бути не тільки повітряною, але й водяною, за аналогією з системою охолодження зони живлення.

У процесі роботи, особливо при великій частоті обертання черв’яка, можуть виникати значні дисипативні виділення, які призводять до значного підвищення температури перероблюваного матеріалу. Щоб уникнути термодеструкції, інтенсифікують процес відведення тепла введенням системи охолодження черв’яка через його центральний отвір (поз. 5 на рис. 4.2), який також проходить і через вузол упорного підшипника. Останній призначений для сприйняття осьового зусилля, яке діє на черв’як і виникає в результаті створюваного в робочому об’ємі тиску, згідно з рис. 4.3. Причому вузол упорного підшипника може бути як вмонтований в редуктор, так і виконаний окремо. Крім того слід зазначити, що редуктори можуть бути використані різних типів: планетарні, циліндричні, конічні, тощо.

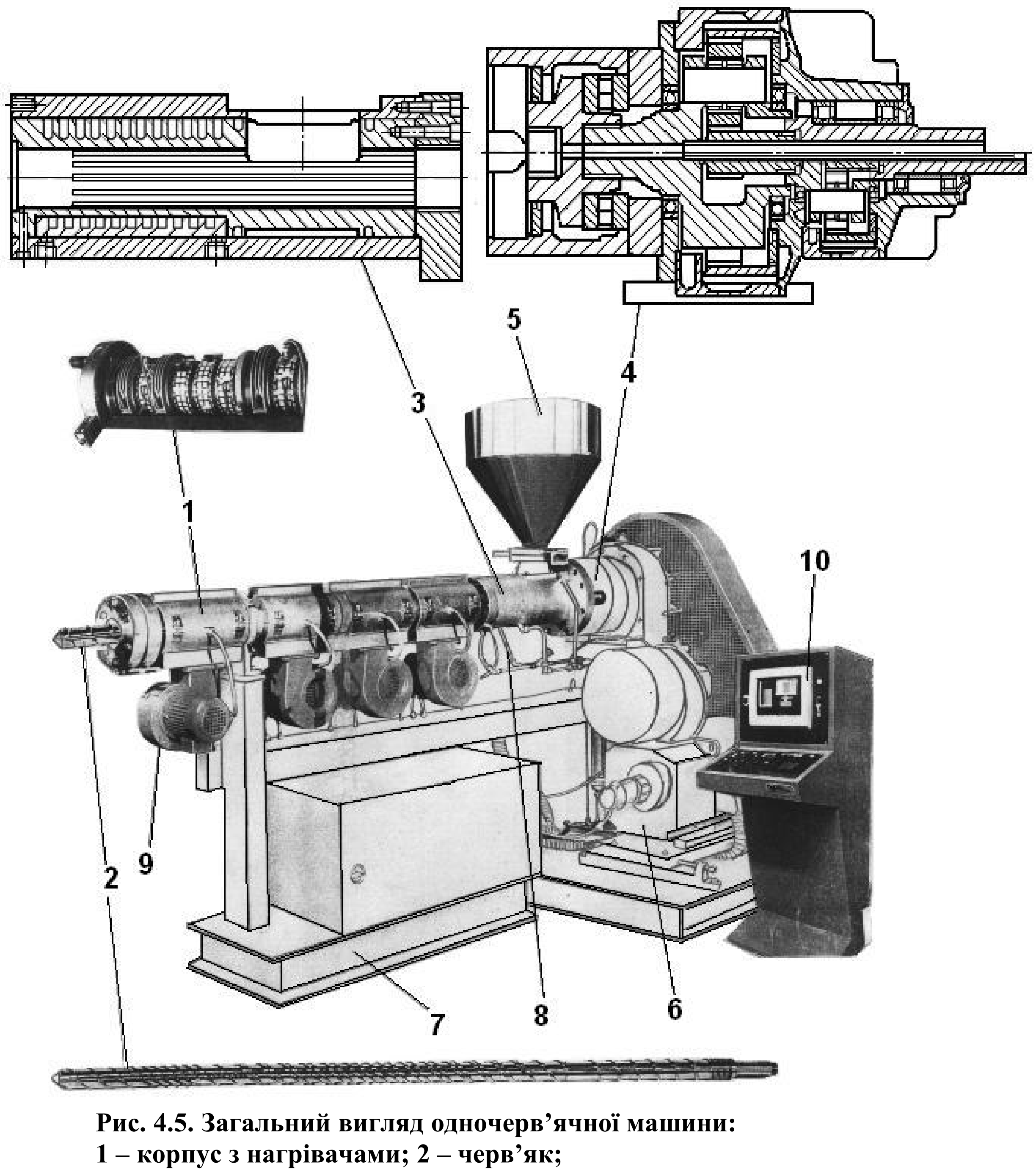


Рис. 4.5. Загальний вигляд одночерв'ячної машини:
1 – корпус з нагрівачами; 2 – черв'як;
3 – секція зони живлення з поздовжніми пазами;
4 – планетарний редуктор з вузлом упорного підшипника;
5 – бункер; 6 – електродвигун; 7 – станина;
8 – система охолодження зони живлення; 9 – вентилятори; 10 – пульт керування

Електродвигун може бути встановлений як на одному рівні з черв'яком, так і рознесений по висоті. У другому випадку для передачі крутного моменту використовують пасову або ланцюгову передачу.

4.2 Конструктивне оформлення змішувальних елементів

Змішувальні елементи можуть бути встановлені на черв'яку, на корпусі, або одночасно на черв'яку й корпусі.

На рис. 4.6. показаний черв'ячний екструдер з гвинтовим наконечником, що має нарізку, яка протилежна основній нарізці черв'яка [21].

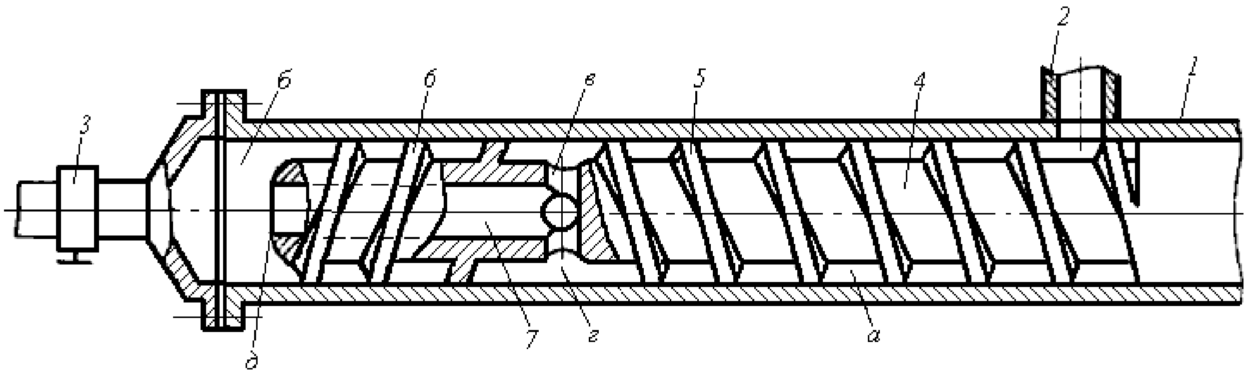
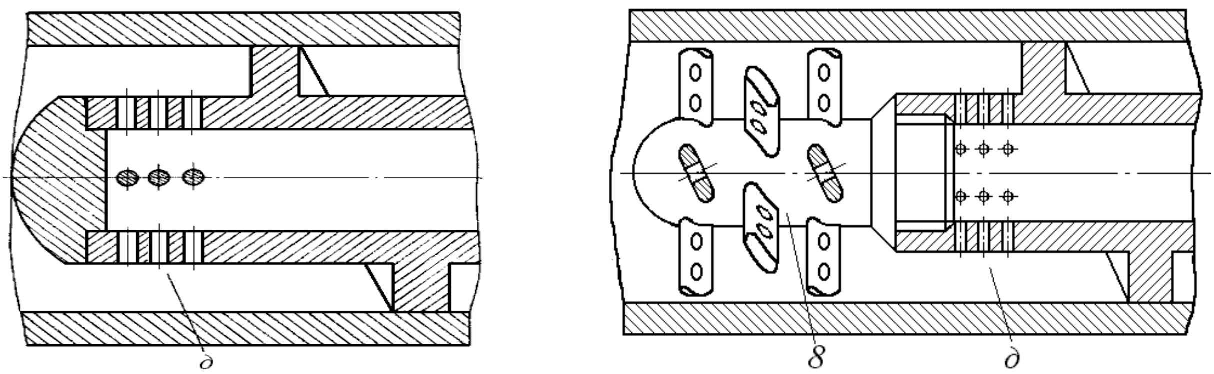


Рис. 4.6. Черв'ячний екструдер з гвинтовим наконечником:
1 – корпус; 2 – патрубок; 3 – дросель; 4 – черв'як;
5 – нарізка; 6 – наконечник; 7 – осьовий канал;
***а* – робочий об'єм основного черв'яка 4; *б* – вихідна зона;**
***в* – радіальні отвори; *г* – перехідна зона; *д* – кінцева зона наконечника**

У процесі роботи матеріал, що завантажується через патрубок 2, транспортується черв'яком 4, який розміщений у корпусі 1 до вихідної зони ***б***. При цьому полімер плавиться, частково змішується та надходить до зони ***г***, де напрямок нарізки змінюється на протилежний. У цій зоні розплав іде через радіальні отвори ***в*** в осьовий канал 7 і, пройшовши його, виходить на кінець наконечника в зону ***д***. Далі частина розплаву виходить через дросель 3, а інша частина захоплюється витками наконечника 6 зі зворотною нарізкою та повертається в зону ***г***. Величина зворотного потоку визначається вимогами технології та відповідає обраній геометрії осьового каналу та зворотній черв'ячній нарізці. У цій зоні повернена частина розплаву зливається з основною, що подається нарізкою 5, і йде в осьовий канал 7. Витки зі зворотною нарізкою створюють примусову циркуляцію розплаву, чим підсилюють якість змішування.

На рис. 4.7 показані варіанти виконання наконечників.



а **б**

Рис. 4.7. Варіанти виконання наконечників:
а – у вигляді радіальних свердлень;
б – з лопатевою мішалкою (8 – лопатева мішалка)

У випадку виконання виходу ***д*** каналу 7 у вигляді радіальних свердлень, розплав виходить декількома потоками, які через обертання черв'яка завиваються в спіраль, що сприяє змішуванню та поліпшенню умов добору розплаву зворотними витками наконечника. Лопатева мішалка 8, що укріплена на торці черв'яка, розмішує масу розплаву перед вихідним отвором і розсікає спіральні потоки, які виходять з радіальних отворів.

На рис. 4.8 і рис. 4.9 представлений черв'ячний екструдер зі змішувальними елементами у вигляді оребрених втулок [22].

Полімерний матеріал через бункер 2 надходить у корпус 1, де захоплюється черв'яком 5 і переміщується вздовж гвинтового каналу. У міру просування полімер пластикується та частково змішується, а в зоні дозування інтенсивно гомогенізується за допомогою елементів 10 і далі витискується через екструзійну головку 3.

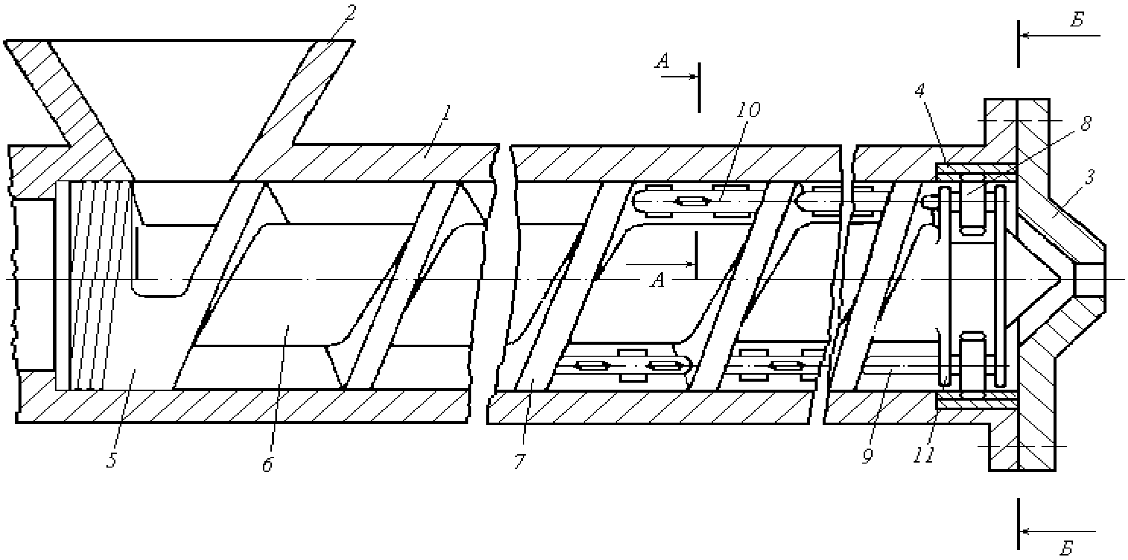
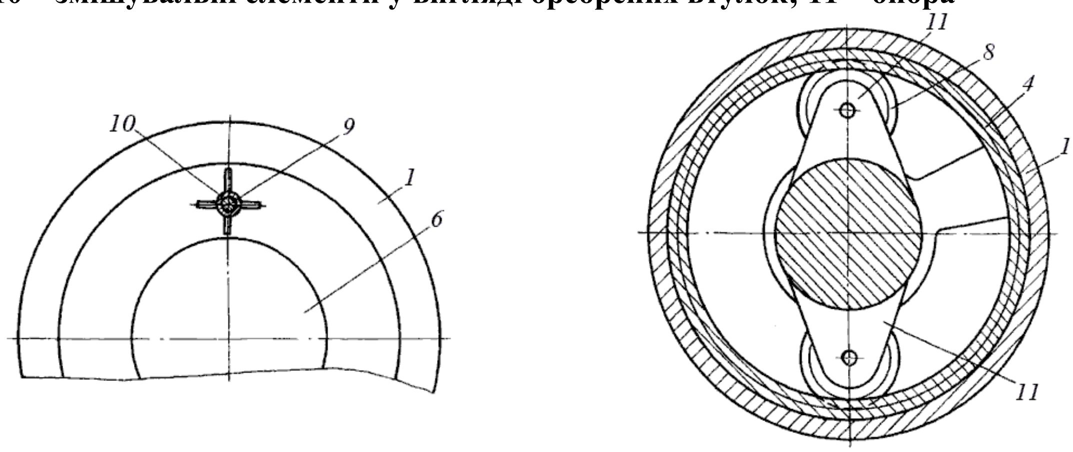


Рис. 4.8. Черв'ячний екструдер зі змішувальними елементами у вигляді оребрених втулок:
1 – корпус; 2 – бункер; 3 – екструзійна головка; 4 – зубчаста нарізка; 5 – черв'як; 6 – осердя черв'яка; 7 – гребені черв'яка; 8 – шестерні; 9 – вал; 10 – змішувальні елементи у вигляді оребрених втулок; 11 – опора



а **б**

Рис. 4.9. Розрізи екструдера за рис. 4.8:
а – розріз *А-А*; б – розріз *Б-Б*

Змішувальні елементи 10 обертаються з великою швидкістю, створюючи значні напруження зсуву вздовж усього перетину каналу черв'яка, чим збільшують ступінь диспергування матеріалу та підвищують швидкість плину розплаву на цьому відрізку, турбулізуючи потік і збільшуючи теплопередачу між частками матеріалу.

Змішувальний пристрій приводиться в обертання навколо своєї осі шестернями 8, що знаходяться в зачепленні з зубчастою нарізкою 4. Частота обертання елементів 10 залежить від співвідношення діаметрів шестерень 8 і зубчастої нарізки 4. З конструктивно-технологічних міркувань швидкість обертання шестерень 8 повинна в 4-6 разів перевищувати швидкість обертання черв'яка 5. Кількість гребенів 7 черв'ячної нарізки 5, де розміщені змішувальні елементи, а також кількість останніх, форма й розміри оребрення залежать від властивостей перероблюваного матеріалу та режиму переробки.

На рис. 4.10 показаний черв'ячний екструдер з лопатевим завихривачем, а на рис. 4.11 – сам завихривач та його розгортка [23].

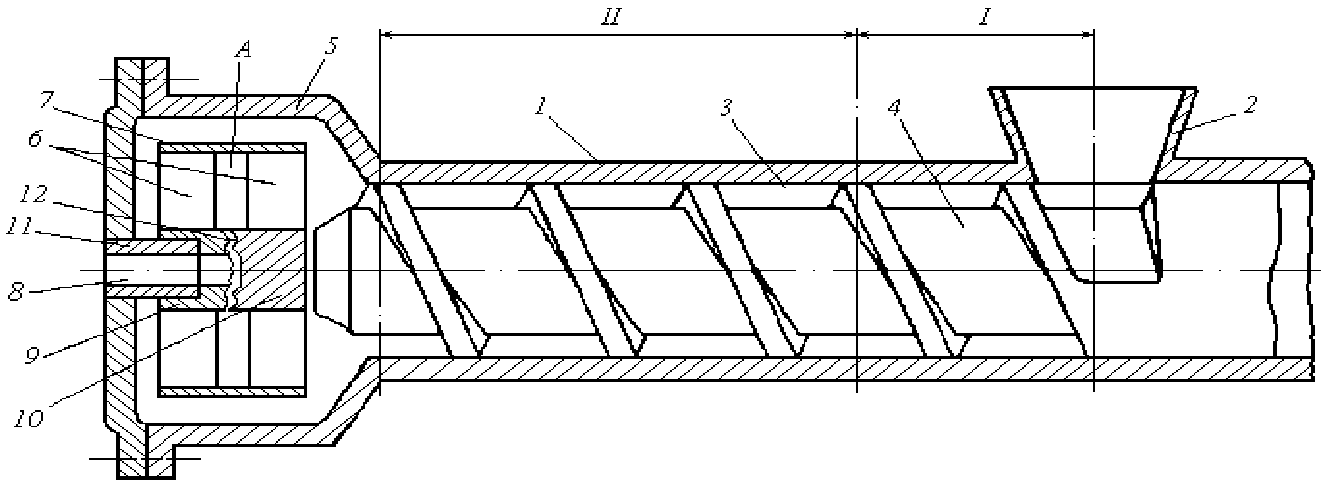
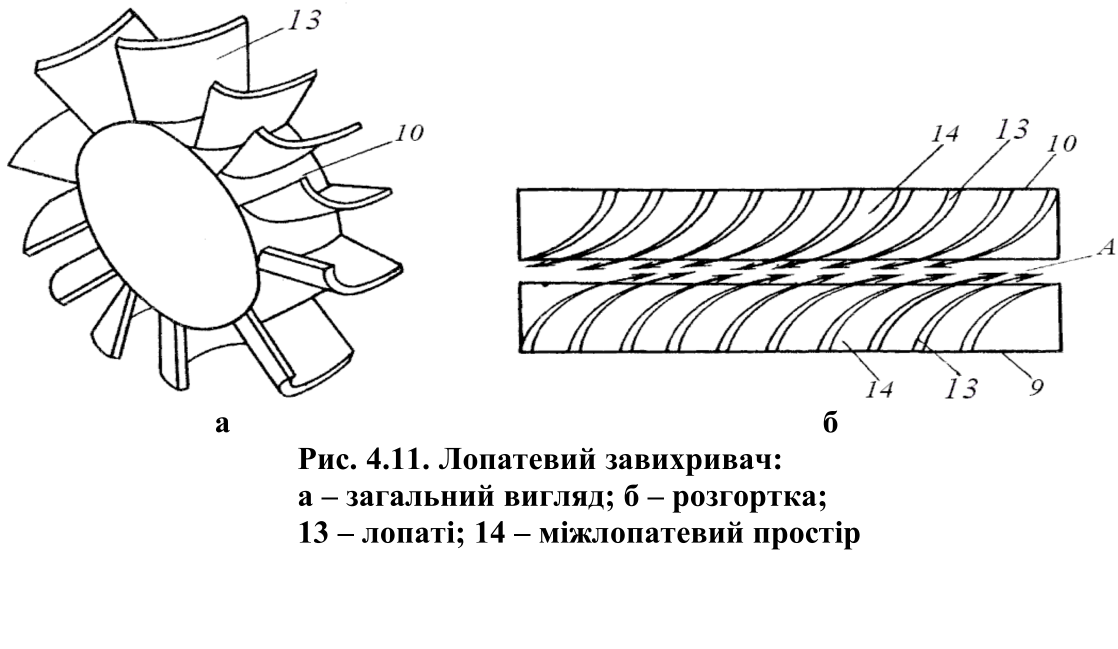


Рис. 4.10. Черв'ячний екструдер з лопатевим завихривачем:
1 – корпус; 2 – бункер; 3 – пластикаційний циліндр; 4 – черв'як;
5 – роздавальний циліндр; 6 – лопатеві завихривачі; 7 – обичайка;
8 – екструзійний отвір; 9, 10 – циліндричні осердя; 11 – мундштук;
12 – канал-дозатор; *А* – вихрова камера;
I – зона живлення; II – зона пластикації та дозування



а **б**

Рис. 4.11. Лопатевий завихривач:
а – загальний вигляд; б – розгортка;
13 – лопаті; 14 – міжлопатевий простір

Полімерний матеріал згідно з рис. 4.10 і 4.11 подається через бункер 2 на черв'як 4 у зону живлення I. Далі матеріал черв'яком 4 транспортується в зону II, де він пластикується й частково змішується. Розплавлена маса потрапляє в роздавальний циліндр 5, звідки рівномірно надходить до лопатевих завихривачів 6, через які протискується через міжлопатевий простір 14. Ступінь закручення залежить від величини тангенційної складової швидкості вихрового потоку в камері ***А***, що є функцією від кута нахилу лопатів і швидкості потоку. Швидкість потоку, у свою чергу, залежить від перепаду тиску між вихровою камерою ***А*** й об'ємом роздавального циліндра 5, що підбирається через різницю прохідного перетину на вході й виході міжлопатевого простору 14, а також прохідним перетином лабіринтного каналу-дозатора 12 й екструзійного отвору 8. Для створення різних епюр тангенційних складових швидкостей уздовж радіуса здійснюють закручення лопатів у різному напрямку, тобто кут, який утворюється між торцями камери ***А*** і дотичної до лопаті на виході в зону ***А***, можна підібрати залежно від необхідної епюри швидкості. Лопаті 13 установлені таким чином, що тангенційні складові швидкості потоків розплаву, які виходять з міжлопатевих просторів 14, спрямовані в різні боки.

На рис. 4.12 зображений черв'ячний екструдер з електромагнітним завихривачем, причому подана його кінцева частина [24]. Розплавлений матеріал переміщається черв'яком 2 у корпусі 1 до обойми 4. Потім він проходить через отвори 6 у торцевих стінках 5 і прямується в зону, де піддається інтенсивному змішуванню за рахунок коливань пластин 7 (рис. 4.12,а), які кріпляться до торцевих стінок 5, або не співвісних стержнів, наприклад, циліндричної форми (рис. 4.12,б), які знаходяться у вільному стані.

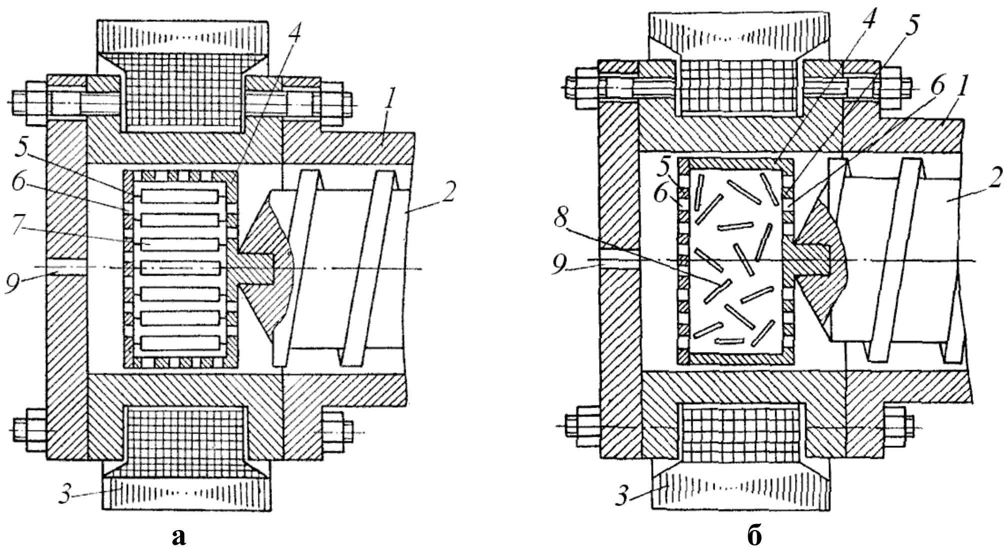


Рис. 4.12. Черв'ячний екструдер з електромагнітним завихривачем, розміщеним у зоні витискування:
а – елементи у формі пластин: б – елементи у формі циліндричних стержнів:
1 – корпус; 2 – черв'як; 3 – генератор електромагнітного поля; 4 – обойма;
5 – торцеві стінки обойми; 6 – отвори обойми; 7 – змішувальні пластини;
8 – змішувальні стержні; 9 – вихідний отвір

Коливання пластин 7 або стержнів 8 відбувається за рахунок впливу на них перемінного обертового поля, яке створюється генератором 3. Принцип роботи даного змішувального пристрою аналогічний електродвигуну з перемінним струмом, де в ролі статора служить генератор 3, а в ролі ротора – пластини 7 або стержні 8. Після виходу матеріалу із зони інтенсивних деформацій, знову ж таки через отвори 5, матеріал потрапляє в зону витискування, звідки видаляється через вихідний отвір 9.

На рис. 4.13 поданий черв'ячний екструдер з двома черв'ячними нарізками [25]. Черв'ячний екструдер містить корпус 1, бункер 2 і черв'як 3, на правому кінці якого виконані шліци 4 для передачі обертового моменту. Робоча частина від шліців відділена ущільнювальною гвинтовою нарізкою 5 і поділяється на три зони: зону живлення або подачі ***А***, зону пластикації ***Б*** і зону гомогенізації ***В***. Між зоною подачі ***А*** і зоною пластикації ***Б*** розміщена перехідна зона ***Г***.

У зоні подачі ***А*** черв'як має дві паралельні нарізки 6 і 7. Зона ***А*** знаходиться під бункером 2 і призначена для подачі гранул полімерного матеріалу в робочий об'єм корпусу 1 через його стискання до заданого тиску й придає масі матеріалу зусилля, що забезпечує її переміщення в напрямку виходу. Для розподілу гранул у вхідній частині зони ***Б*** передбачена перехідна зона ***Г***, де знаходиться одна з двох нарізок 6 або 7. Діаметр осердя черв'яка в цій перехідній зоні трохи більший ніж у зоні подачі. Отже, осердя має з'єднувальну поверхню ***а*** між обома зонами.

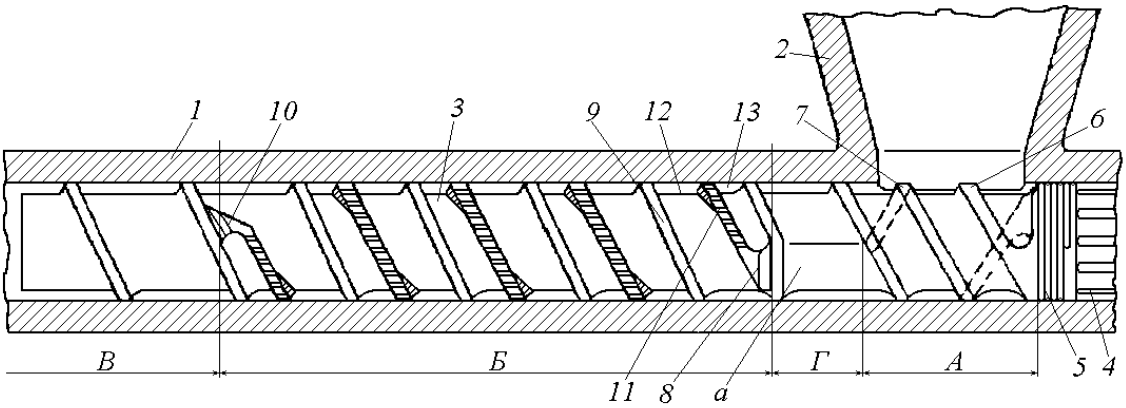


Рис. 4.13. Черв'ячний екструдер з двома черв'ячними нарізками:
А **– зона подачі;** ***Б*** **– зона пластикації;** ***В*** **– зона гомогенізації;** ***Г*** **– перехідна зона;**
а **– з'єднувальна поверхня; 1 – корпус; 2 – бункер; 3 – черв'як; 4 – шліцьове з'єднання;**
5 – ущільнювальна гвинтова нарізка; 6 – перша гвинтова нарізка в зоні ***А*****;**
7 – друга гвинтова нарізка в зоні ***А*****; 8 – перша гвинтова нарізка в зоні** ***Б*****;**
9 – друга гвинтова нарізка в зоні ***Б*****; 10 – виточення кінця нарізки 8;**
11 – щілинні проходи; 12 – вхідний канал; 13 – вихідний канал

Безпосередньо за перехідною зоною ***Г*** починається зона пластикації ***Б***, де черв'як має дві нарізки 8 і 9 з постійним, але різним кроком. Нарізка 8 тягнеться на продовженні нарізки 7 з тим же кроком, а нарізка 9 має менший крок. Вона починається на вхідній стороні нарізки 8 на початку зони ***Б*** і поступово розходиться таким чином, що наприкінці зони пластикації вона з'єднується з вихідною стороною тієї ж нарізки, описавши шлях, який містить на один виток більше. На нижньому кінці нарізки 8 є виточення 10, глибина якого набагато менше висоти нарізки. Нарізка 8 тягнеться, принаймні, на два повних витка. Її вхідна й вихідна сторони мають нахил щодо циліндричної поверхні, що обмежує осердя черв'яка.

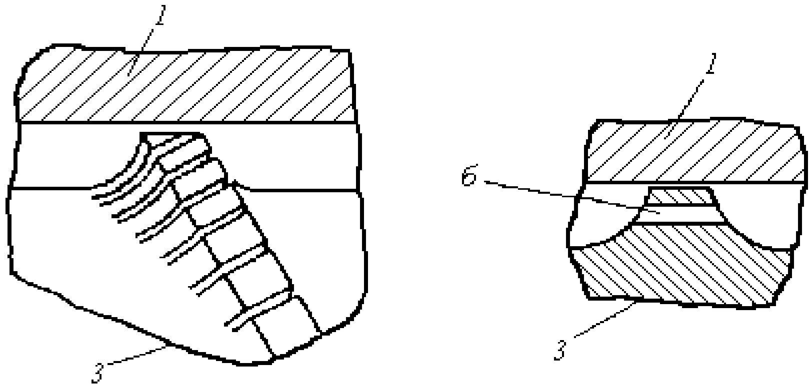
Нарізки 8 і 9 мають однаковий профіль, однак глибина нарізки 9 може бути трохи більше або трохи менше ніж глибина нарізки 8, відповідно з чим зазор між нарізкою 9 і внутрішньою поверхнею корпуса 1 буде менше або більше ніж зазор між нарізкою 8 і корпусом.

Нарізка 8 оснащена великою кількістю щілинних проходів 11, які розміщені в радіальному напрямку гребенів витків нарізки до осердя черв'яка.

Проходи 11 направлені паралельно осі черв'яка, площа їх поперечного перетину складає 20% від площі поперечного перетину нарізки черв'яка, а ширина кожного проходу складає 1% від діаметра черв'яка.

Нарізка 8 обмежує на вхідній стороні вхідний канал 12, а на вихідній стороні – вихідний канал 13. Вхідний канал має перетин, що зменшується до нуля наприкінці зони пластикації ***Б***, а вихідний канал 13 має перетин, який збільшується вздовж руху матеріалу. Якщо одна з нарізок 8 або 9 переривається на своєму вхідному кінці чи на вихідному кінці до з'єднання з іншою нарізкою, то продуктивність збільшується внаслідок наявності проходів 11. Немає необхідності в тому, щоб крок нарізки був різним, або в тому, щоб кількість нарізок відрізнялася на одну. У будь-якій черв'ячній нарізці, яка переміщує пластикуючий матеріал до вихідної сторони, у зоні пластикації наявність вузьких і численних проходів, що безпосередньо з'єднують вихідну й вхідну сторони нарізки, викликає підвищення продуктивності при одночасному поліпшенні пластикації.

Проходи 11 можуть являти собою не тільки прорізи, які паралельні осі черв'яка, а можуть бути виконані похилими до осі черв'яка (рис. 4.14,а) або у вигляді отворів ***б*** у гребені нарізки (рис. 4.14,б).



а **б**

Рис. 4.14. Проходи гвинтової нарізки:
а – у вигляді нахилених до осі черв'яка прорізів;
б – у вигляді отворів у гребені нарізки

При роботі екструдера матеріал, який йде з бункера 2, захоплюється нарізками 6 і 7 і транспортується через зони ***А*** і ***Г*** у зону ***Б***. Не цілком розплавлений матеріал, що знаходиться в зоні ***Б***, протидіє цьому переміщенню в напрямку виходу й перешкоджає створенню тиску в цьому напрямку.

У результаті руху матеріалу вздовж каналів черв'яка, починаючи від входу в робочий об’єм, відбувається значне тепловиділення за рахунок тертя перероблюваного матеріалу по стінкам гвинтових каналів. Це тепловиділення призводить до нагрівання металевих частин гвинтових каналів, температура яких може досягати величини, що перевищує температуру розм’якшення полімерного матеріалу.

Унаслідок відносної термоізольованості черв’яка й значної теплопровідності матеріалу черв’яка, черв’як буде нагріватися до зони пластикації, де метал знаходиться при температурі, що перевищує середню температуру маси в процесі пластикації. Численні проходи, які виконані в черв’ячній нарізці, дозволяють кожній частці пластичної речовини залишатися в контакті або в безпосередній близькості від поверхні черв’яка й нагріватися під його впливом протягом більшого проміжку часу, ніж у випадку, коли черв’ячна нарізка й корпус утворюють один канал.

Ефект витискування, що створюється нарізками 6 і 7, забезпечує більш інтенсивний плин переробленої маси, результатом чого є підвищення продуктивності, а також зниження температури в зоні ***A***, що дозволяє збільшити швидкість обертання черв’яка, а, отже, і продуктивність екструдера.

На рис. 4.15 показаний черв’ячний екструдер з поперечними перегородками [26]. У гвинтовому каналі, який створюється в просторі між осердям черв’яка 3 і внутрішньою поверхнею корпуса 1 в одному напрямку, а також витками нарізки 5 в іншому напрямку, виконані поперечні перегородки 6. Останні виконані з пазами 7, які розташовані по черзі біля внутрішньої поверхні корпуса 1 та осердя 4 (рис. 4.15). Крім того, пази 7 розміщені на половині довжини поперечних перегородок 6, причому на суміжних перегородках пази 7 розміщені по різні боки від середини перегородок.

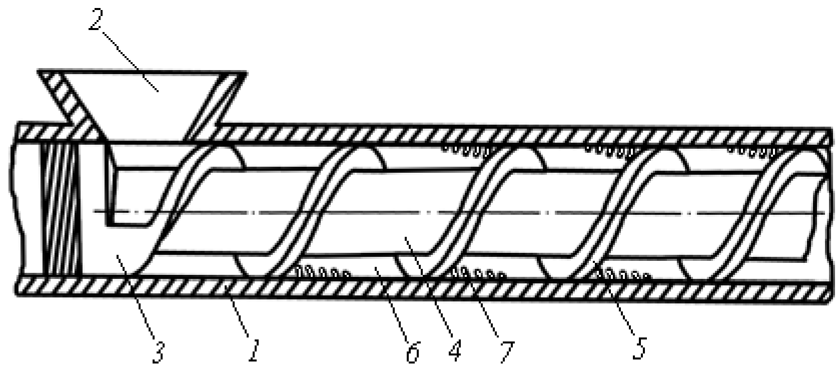


Рис. 4.15. Черв’ячний екструдер з поперечними перегородками:
1 – корпус; 2 – бункер; 3 – черв’як; 4 – осердя черв’яка; 5 – витки нарізки;
6 – поперечні перегородки; 7 – пази

При роботі екструдера розплавлений матеріал переміщується черв’яком 3 у корпусі 1, де він проходить через пази 7 поперечних перегородок 6, що супроводжується виникненням значних зсувних деформацій переробленого матеріалу, які в значному ступені визначають якість змішування. На виході матеріалу з пазів, унаслідок різниці швидкостей потоків у пазах і гвинтовому каналі, виникає інтенсивна вихрова зона змішування.

Завдяки тому, що пази 7 розміщені на половині поперечної перегородки 6, причому на суміжних перегородках пази розміщені по різні боки від середини перегородки, збільшується довжина шляху розплаву в гвинтовому каналі. Крім того, наявність поперечних перегородок 6 збільшує теплопередачу від корпусу, який обігрівається нагрівачами (на рис. 4.15 не показані), до розплаву полімеру, що дозволяє вирівняти градієнт температур у радіальному напрямку.

Кількість поперечних перегородок на кожному кроці нарізки, а також площа прохідного перетину пазів залежить від властивостей перероблюваного матеріалу та технологічного режиму переробки.

На рис. 4.16 показана розгортка гвинтового каналу, який зображений на рис. 4.15, з напрямком руху основного потоку.

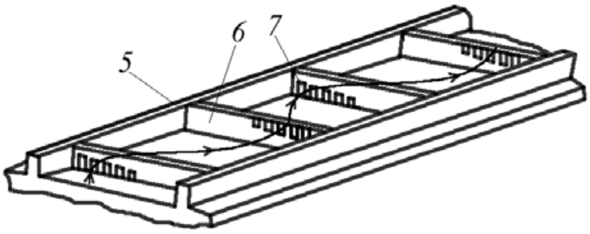


Рис. 4.16. Розгортка гвинтового каналу

На рис. 4.17 поданий фрагмент черв'ячної машини з додатковою рухомою гвинтовою нарізкою [27]. На осерді черв'яка 2 виконана основна нерухома нарізка 3, між витками якої розташована додаткова нарізка 4.

Додаткова нарізка 4 виконана з пружного матеріалу та має таку ж глибину, що й основна нарізка 3, і оснащена приводом поступального переміщення щодо поздовжньої осі осердя 2. Привід містить жорстко з'єднані з додатковою нарізкою штифти 5, які внутрішнім кінцем установлені в поздовжньому пазу ***а***, і пальці 6, які зовнішнім кінцем установлені в гвинтовому пазу ***б***, що утворений втулками 7 і 8. У додатковій нарізці для інтенсифікації потоків виконані отвори ***в*** і прорізи ***г*** (рис. 4.18).

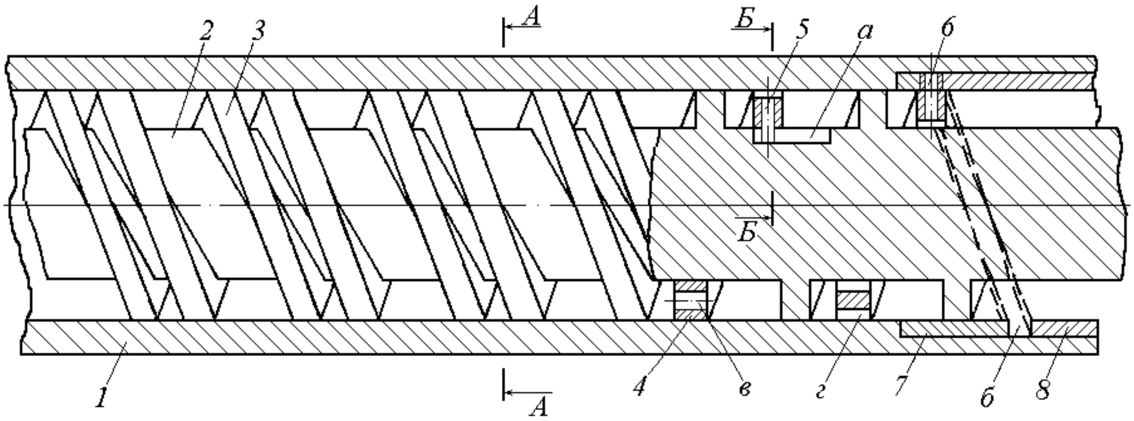
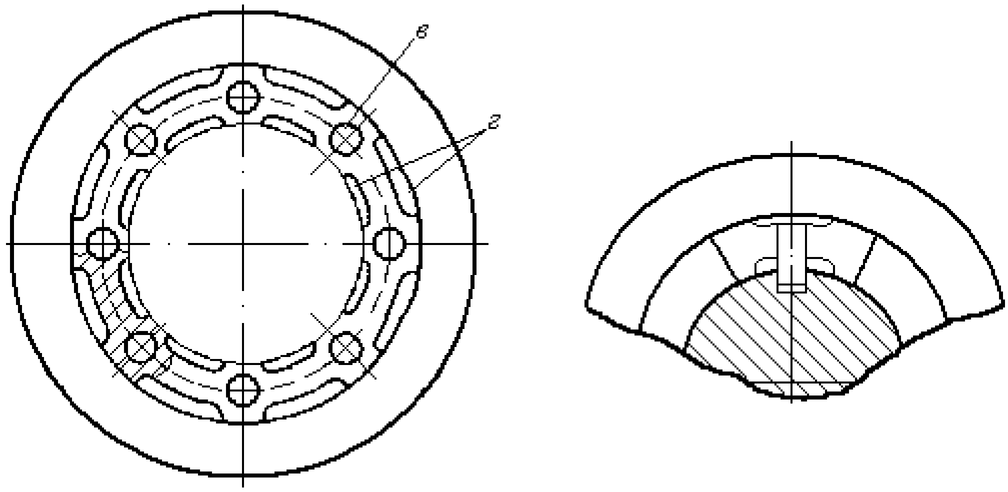


Рис. 4.17. Фрагмент черв'ячної машини з додатковою рухомою гвинтовою нарізкою:
1 – корпус; 2 – осердя черв'яка; 3 – основна нерухома гвинтова нарізка;
4 – додаткова рухома гвинтова нарізка; 5 – штифти; 6 – пальці;
7, 8 – втулки; *а* – поздовжній паз; *б* – гвинтовий паз; *в* – отвори; *г* – прорізи

У процесі роботи при обертанні осердя 2 разом обертається й додаткова нарізка 4, яка зафіксована від повороту за допомогою поздовжнього паза ***а*** і штифта 5. При цьому палець 6, обертаючись з додатковою нарізкою 4, переміщується своїм вільним кінцем по замкненому гвинтовому пазу ***б*** і захоплює за собою додаткову нарізку 4 зі штифтом 5, що переміщується вздовж паза ***а***. Після повороту черв’яка на 180° додаткова нарізка 4 виявляється пересуненою в крайнє переднє положення на величину, яка дорівнює половині ходу замкненого гвинтового паза ***б***. При повороті черв’яка на 360° додаткова нарізка 4 повертається в крайнє заднє положення.



а б

Рис. 4.18. Поперечні перетини згідно з рис. 4.17:
а – перетин *А-А*; б – перетин *Б-Б*; *в* – отвори; *г* – прорізи

Таким чином, у результаті руху додаткової нарізки вздовж осі осердя 2 відбувається, поруч з основним рухом уздовж гвинтового каналу, циркуляційні рухи за рахунок протискування розплаву полімеру через отвори ***в*** і прорізи ***г***, що призводить до виникнення інтенсивних зсувних деформацій та утворення вихрового руху вздовж усього об’єму гвинтового каналу черв’яка в зоні дозування.

На рис. 4.19 показаний кінцевий фрагмент черв’ячної машини з поздовжніми пазами на черв’яку та корпусі [28], який призначений для інтенсифікації процесів змішування й пластикації.

На рис. 4.20 зображені поперечні перерізи за рис. 4.19.

Зображений на рис. 4.19 і 4.20 пристрій містить корпус 1 з вихідним отвором 2 і розміщеним усередині нього шнеком 3 з насадженим на його хвостовик 4 ротором 5, який виконаний з поздовжніми пазами 6. У корпусі 1 закріплений статор 8, який виконаний у вигляді гільзи з поздовжніми пазами 9.

Поперечний перетин пазів 6 на роторі 5 зменшується від кінця черв’ячної нарізки до вихідного отвору, при цьому профіль пазів на роторі визначається за виразом

$$\mathbf{h_p(\varphi) = h_1 \cdot \frac{L-z}{z} \cdot \left\{ ch\left[\frac{2\pi \cdot (R_1 + \frac{z \cdot h_1}{L}) \cdot \varphi}{K \cdot 360 \cdot \left(h_1 \cdot \frac{L-z}{L} \right)} \right] - 1 \right\}}. \qquad (4.4)$$

Що ж стосується поперечного перетину пазів 9 на статорі 8, то він, навпаки, збільшується в тому ж напрямку, причому профіль цих пазів виконується за формулою

$$\mathbf{h_c(\varphi) = h_2 \cdot \frac{z}{L} \cdot \left\{ 2 - ch\left[\frac{2\pi \cdot (R_2 - \frac{L - z}{L} \cdot h_2) \cdot \varphi}{K \cdot 360 \cdot \left(h_2 \cdot \frac{L}{z} \right)} \right] - 1 \right\}}. \tag{4.5}$$

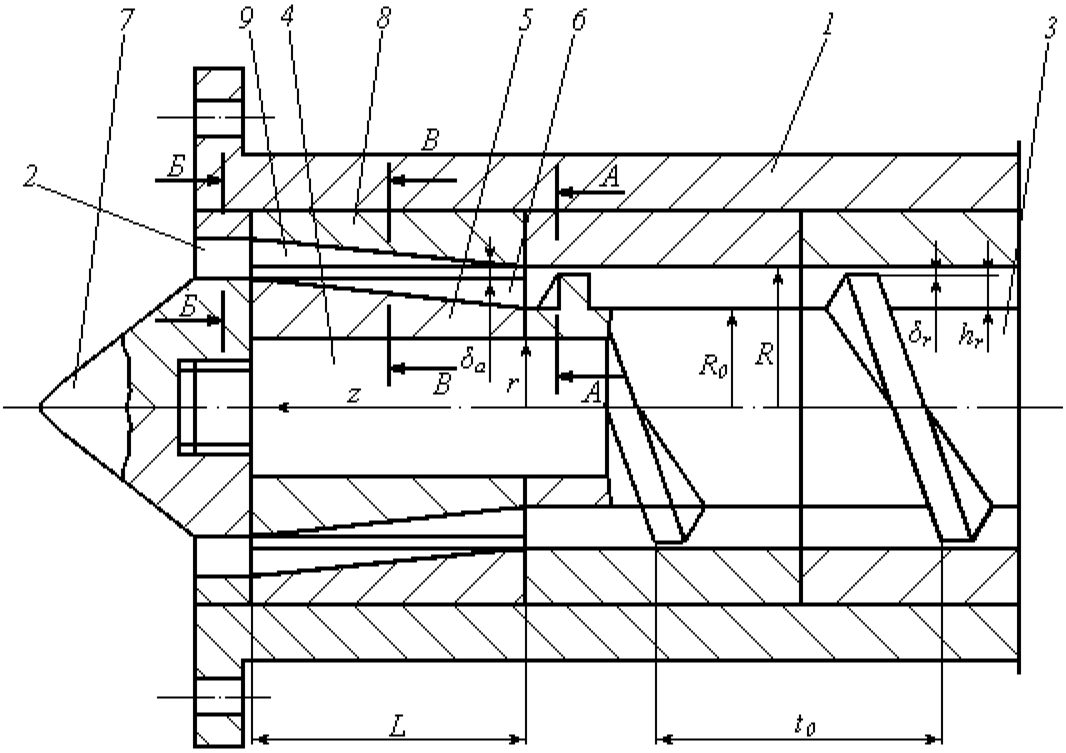


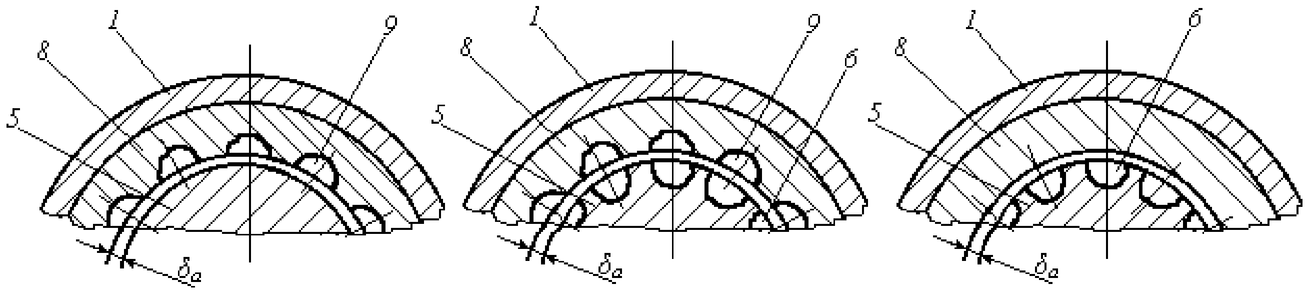
Рис. 4.19. Кінцевий фрагмент черв'ячної машини з поздовжніми пазами на черв'яку та корпусі:
1 – корпус; 2 – вихідний отвір; 3 – шнек; 4 – хвостовик; 5 – ротор; 6 – пази ротора; 7 – наконечник; 8 – статор; 9 – пази статора

Вирази (4.4) і (4.5) мають наступні позначення: $\mathbf{h_1}$ – початкова висота паза на роторі; $\mathbf{h_2}$ – висота паза на статорі біля вихідного отвору; $\mathbf{R_1}$ – мінімальний радіус кола пазів на роторі; $\mathbf{R_2}$ – максимальний радіус кола пазів на статорі; **y**, **z** – осі координат, **K** – коефіцієнт, що залежить від властивостей полімерної рідини й режимів переробки.

Для коефіцієнта **K** можна використати таку залежність

$$\mathbf{K = \frac{lg(\tau) \cdot lg(60 \cdot N_0)}{lg(\eta)}}, \tag{4.6}$$

де $\boldsymbol{\tau}$, $\boldsymbol{\eta}$ – відповідно зсувне напруження й коефіцієнт в'язкості полімерного середовища перед змішувальним елементом; **N_0** – частота обертання шнека ($с^{-1}$).



а б в

Рис. 4.20. Перерізи за рис. 4.19:
а – переріз *Б-Б*; б – переріз *В-В*; в – переріз *А-А*

При роботі даного пристрою перероблюваний матеріал подається шнеком 3 у пази 6 ротора 5. У міру просування матеріалу до вихідного отвору 2 поперечний переріз пазів 6 зменшується, а поперечний переріз пазів 9 збільшується. У такий спосіб частина матеріалу з пазів 6 переходить у пази 9, при цьому сумарний поперечний переріз пазів практично не змінюється. За рахунок обертання ротора відносно статора відбувається зміна конфігурації каналу, який утворюється пазами 6 і 9, що призводить до перерозподілу зсувних деформацій. А чим більше змінюються зсувні деформації, тим більший буде змішувальний ефект.

На рис. 4.21 показаний динамічний гомогенізатор розплавів полімерів [29].

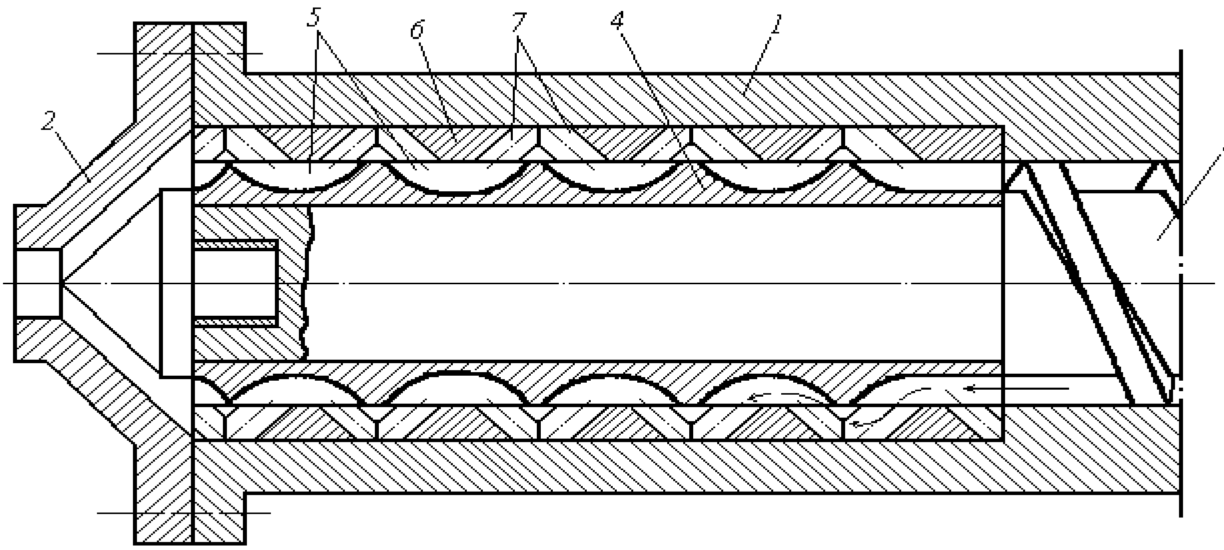


Рис. 4.21. Динамічний гомогенізатор розплавів полімерів:
1 – корпус; 2 – фланець з вихідним отвором; 3 – черв'як; 4 – ротор;
5 – поздовжні сегментні пази; 6 – статор; 7 – наскрізні отвори

У процесі роботи розплав полімеру черв'яком 3 подається в пази 5 ротора 4 першої групи, яка розміщена одразу після кінця черв'ячної нарізки. Потім, під тиском розплав полімеру перетікає в отвори 7 статора 6, як показано стрілкою, а звідки – у пази 5 другої групи. Далі через отвори 7 полімер протискується в пази 5 третьої групи й т.д., переміщуючись уздовж осі ротора 4 і виходячи з гомогенізатора через вихідний отвір фланця 2.

При обертанні ротора 4 пази 5 суміщаються послідовно з різними отворами 7, завдяки чому відбувається інтенсивне перемішування (гомогенізація) розплаву полімеру.

Одним із напрямків розвитку конструктивного оформлення одночерв'ячних екструдерів, а також розробки теорії для таких агрегатів, є розробка черв'ячних машин, де черв'ячна нарізка виконана окремо від осердя. Основоположні аспекти цієї теорії подані в роботі [30]

Загальний елемент такого агрегату показаний на рис. 4.22.

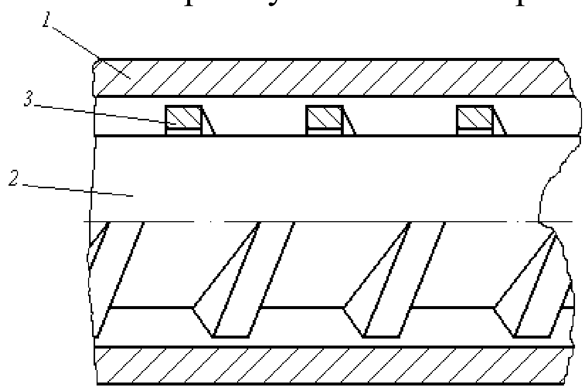


Рис. 4.22. Схема фрагмента черв'ячної машини з окремим виконанням черв'ячної нарізки від осердя: 1 – корпус; 2 – циліндричне осердя; 3 – черв'ячна нарізка

Згідно з рис. 4.22 черв'ячна нарізка 3 виконана окремо від осердя 2, причому в даному випадку при роботі реальних агрегатів обертається черв'ячна нарізка 3, а корпус 1 і осердя 2 нерухомі. Можливо виконання такого агрегату, де осердя 2 рухається в зворотному напрямку. Перевага даної конструкції в порівнянні з типовою, яка показана на рис. 4.1, полягає в тому, що змішувальна властивість такого агрегату збільшується удвічі й більше. Але головний недолік даної конструкції полягає в тому, що черв'ячна нарізка має незначну жорсткість, унаслідок чого полімерні середовища з середньою й великою в'язкістю на даних агрегатах переробляти не можна. Також дані агрегати не можуть використовуватися при значних перепадах тиску, тому що черв'ячна нарізка буде стискатися як пружина й змінювати свою геометрію.

4.3 Конструктивне виконання черв'яків

Багато робіт присвячено виконанню черв'яків для інтенсифікації процесів змішування та пластикації в черв'ячних машинах. Тут слід виділити декілька напрямків. Перший напрямок зв'язаний з модернізацією профілю та форми черв'ячної нарізки. До другого можна віднести – встановлення різних елементів на поверхні черв'яка. Що ж стосується третього напрямку, то він зв'язаний з розробкою так званих бар'єрних черв'яків. При розробці останніх вводяться проміжні елементи або на кінці, або в розриві черв'ячної нарізки, де виконуються пази різної конфігурації, що мають відкритий вхід і закритий вихід або навпаки вздовж осі черв'яка.

Розуміється, що надана класифікація напрямків модернізації черв'яків є певною мірою умовною, тому що в конструктивній розробці можуть бути використані елементи одразу двох або трьох напрямків.

На рис. 4.23 зображений черв'як з трьома нарізками [31]. У зоні живлення черв'як виконаний з гвинтовим каналом 1, що утворюється гвинтовою нарізкою 2, діаметр якої відрізняється від внутрішнього діаметра корпуса на малу величину радіального зазору. Крок і глибина гвинтового каналу 1 залишаються постійними аж до перехідної зони, де поруч з твердою пробкою полімерного матеріалу з'являється його розплав.

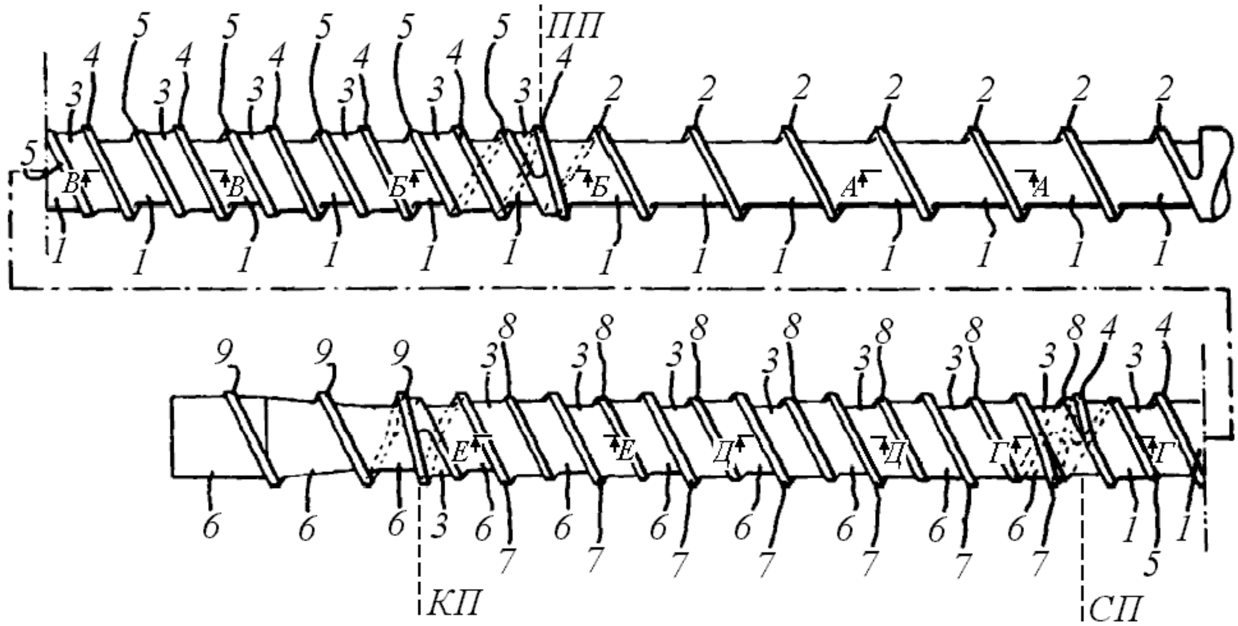


Рис. 4.23. Черв'як з трьома нарізками:
1 – перший гвинтовий канал; 2 – перша гвинтова нарізка; 3 – другий гвинтовий канал; 4 – друга гвинтова нарізка; 5 – третя гвинтова нарізка; 6 – третій гвинтовий канал; 7 – четверта гвинтова нарізка; 8 – п'ята гвинтова нарізка; 9 – шоста гвинтова нарізка

Схеми вказаних на рис. 4.23 перерізів показані на рис. 4.24.

На початку перехідної зони (***ПП)*** поруч з каналом 1 з'являється канал 3, який у поздовжньому напрямку утворюється між штовхальною стінкою нарізки 4 і пасивною стінкою нарізки 5, а канал 1 у перехідній зоні розміщений між штовхальною стінкою нарізки 5 і пасивною стінкою нарізки 4. При цьому глибина каналу 3 і його крок збільшується вздовж напрямку руху матеріалу, а параметри каналу 1 зменшуються.

У перехідній зоні відбувається інтенсивне плавлення полімерного матеріалу, де частина розплавленого матеріалу постійно переходить з каналу 1 у канал 3 через радіальний зазор між зовнішнім діаметром нарізки 5 і внутрішньою поверхнею корпусу ***К***, який має величину значно більшу, ніж для радіального зазору між нарізкою 2 і корпусом ***К***.

Необхідно замітити, що в каналі 3 поруч з розплавом полімеру можуть бути й частинки нерозплавленого матеріалу. Приблизно в середній частині перехідної зони канал 1 сходить нанівець, а замість його поруч з каналом 3 з'являється канал 6, який у поздовжньому напрямку розміщений між штовхальною стінкою нарізки 7 і пасивною стінкою нарізки 8.

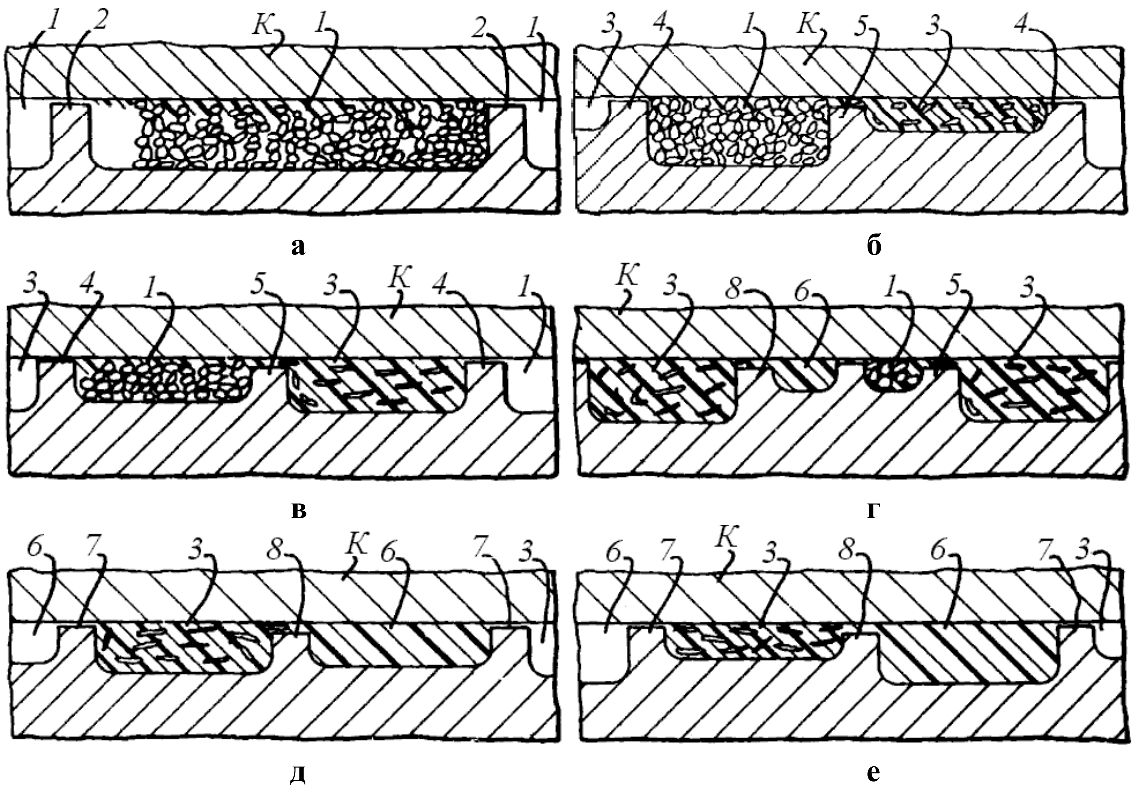


Рис. 4.24. Схема перетинів згідно з рис. 4.23:
а – переріз *А–А*; б – переріз *Б–Б*; в – переріз *В–В*; г – переріз *Г–Г*;
д – переріз *Д–Д*; е – переріз *Е–Е*; *К* – корпус черв'яка

Що ж стосується каналу 3, то на даній ділянці він утворюється між штовхальною стінкою нарізки 8 і пасивною стінкою нарізки 7. Радіальний зазор для нарізки 8 має такі ж розміри, що й для нарізки 5, а радіальний зазор для нарізки 7 є таким же малим, що й для нарізки 2.

На відрізку між частиною перехідної зони ***СП*** і її кінцем ***КП***, відбувається постійне зменшення глибини та кроку каналу 3 і відповідне зростання параметрів каналу 6. Причому в каналі 6 вже знаходиться тільки розплав полімеру. Необхідно відмітити, що на початку ***ПП***, всередині ***СП*** і в кінці ***КП*** перехідної зони розміщені місця злиття суміжних нарізок, що утворюють бар'єри.

У продовженні кінцевої частини перехідної зони черв'як має тільки один канал 6, що утворюється нарізкою 9, яка є продовженням нарізки 7, з таким же радіальним зазором. Канал 6 тягнеться далі в зону дозування з постійним кроком. Що ж стосується осердя, то воно може мати як циліндричні відрізки, так і конусні.

На рис. 4.25,а зображений черв'як з однією основною та двома додатковими нарізками, а на рис. 4.25,б – збільшена частина зони пластикації [32].

Черв'як, згідно зі схемою на рис. 4.25 має основну черв'ячну нарізку 1, яка тягнеться через усі чотири зони: зону живлення ***A***, зону пластикації ***B***, зону гомогенізації ***C*** і зону витискування ***D***. Крім того, починаючи з початку зони живлення, між основною нарізкою зроблена додаткова черв'ячна нарізка 2, яка тягнеться до середини зони пластикації. Причому діаметри та кроки обох черв'ячних нарізок однакові. У зоні живлення й пластикації осердя черв'яка 3 виконане конусним для підсилення транспортувальної та пластикуючої дії черв’яка.

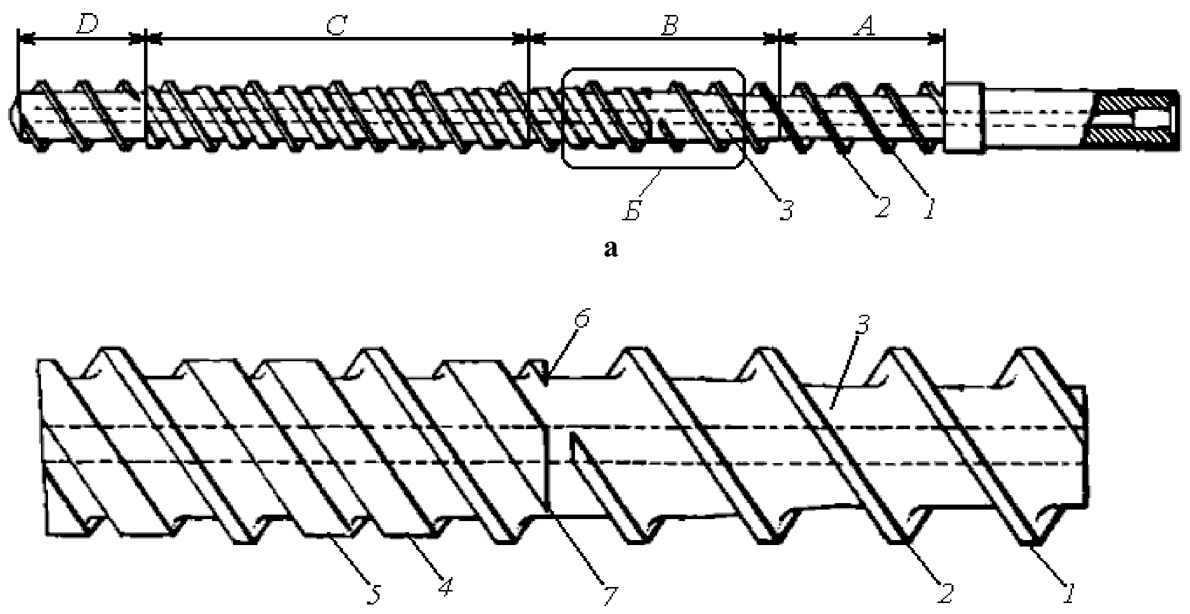


Рис. 4.25. Черв’як з однією основною та двома додатковими нарізками:
а – загальний вид черв’яка; б – виноска *Б*;
***A* – зона живлення; *B* – зона пластикації; *C* – зона гомогенізації; *D* – зона витискування:**
1 – основна черв’ячна нарізка; 2 – додаткова черв’ячна нарізка; 3 – осердя черв’яка;
4, 5 – змішувальні черв’ячні нарізки; 6, 7 – західні частини додаткових нарізок 4 і 5

З середини зони пластикації, де є вже достатня маса розплаву полімеру, починаються дві змішувальні черв’ячні нарізки 4 і 5. Для зменшення опору при вході в міжвитковий простір зі змішувальними нарізками, останні виконані з загостреними західними частинами 6 і 7. Крім того, таке виконання західних частин дозволяє розсікати тверду пробку, що призводить до інтенсифікації процесу плавлення. Змішувальні нарізки 4 і 5 виконані з меншим діаметром, ніж нарізки 1 і 2, але з більшою шириною гребенів, що призводить до перетікання розплаву полімеру через радіальний зазор і покращує змішувальний ефект. Нарізки 4 і 5 тягнуться через усю зону гомогенізації. На початку зони витискування змішувальні нарізки 4 і 5 закінчуються й знову з’являється додаткова нарізка 2, яка стабілізує потік на виході з екструдера.

На рис. 4.26 показаний змішувальний вузол, який виконаний у вигляді набору шпильок, що розташовані на осерді черв’яка [33]. Система розташування шпильок на осерді може бути виконана різним чином. На рис. 4.27,а зображена розгортка черв’яка, де шпильки розміщені у вигляді так званої „риб’ячої кістки”, а на рис. 4.27,б представлений один з варіантів кріплення шпильок до осердя черв’яка.

Шпильки можуть бути розміщені нерегулярно, або за деякою схемою, як показано на рис. 4.27,а. В останньому випадку шпильки рівного діаметра, але різної висоти 4 і 5 утворюють два типи груп рядів шпильок: групи ***A***, які направлені вздовж осі черв’яка; групи ***B***, які мають нахил до осі черв’яка. Таким чином, потоки, які формуються в просторі груп шпильок ***B***, перетинають під кутом потоки, які формуються в просторі груп шпильок ***A***, що забезпечує інтенсивне змішування. Деякі ряди в групах шпильок з великим діаметром можуть бути замінені на ряди шпильок з малим діаметром.

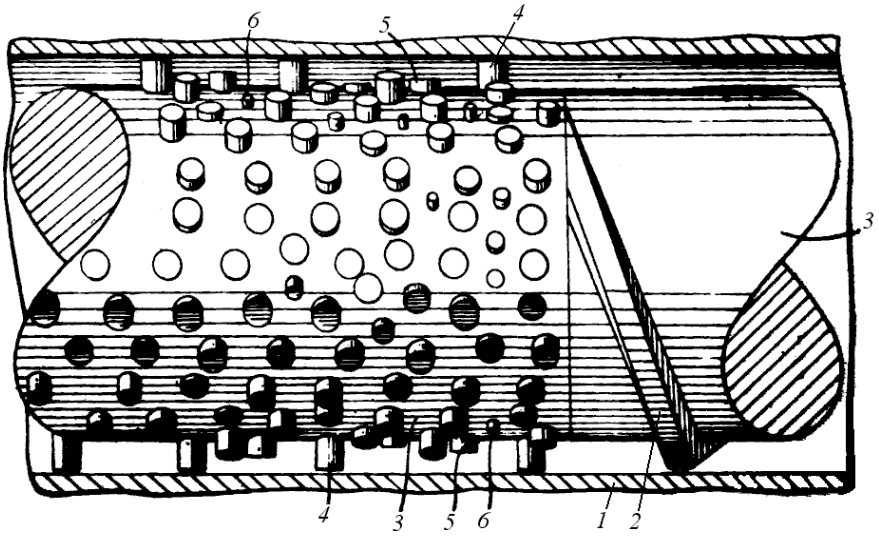
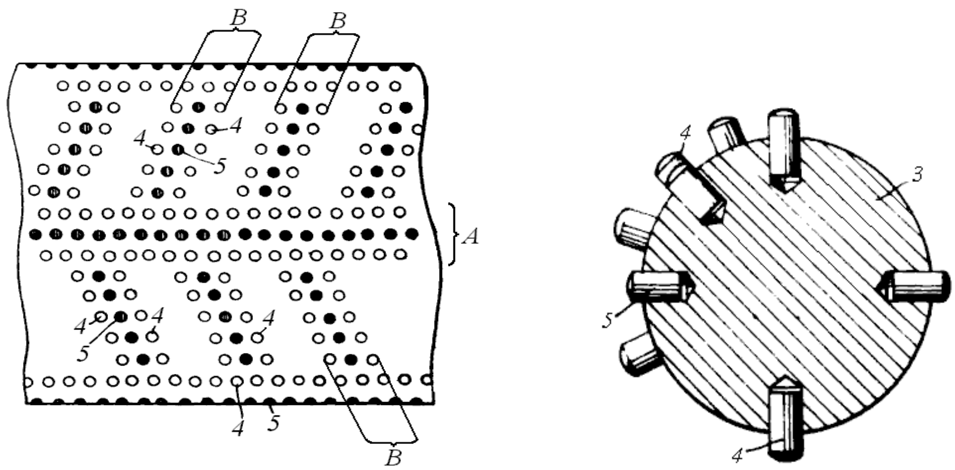


Рис. 4.26. Змішувальний вузол зі шпильками:
1 – корпус; 2 – черв'ячна нарізка; 3 – осердя черв'яка ; 4 – довгі шпильки; 5 – короткі шпильки; 6 – допоміжні шпильки меншого діаметра



а **б**

Рис. 4.27. Схема розташування шпильок:
а – розгортка черв'яка зі шпильками у вигляді "риб'ячої кістки";
б – варіант кріплення шпильок до осердя черв'яка

Відстань між поверхнями шпильок становить розмір 1,5 діаметра шпильок. Відношення діаметрів шпильок треба вибирати в межах 0,25–2,0.

На рис. 4.28 зображений змішувальний елемент з бар'єрною секцією в проміжній частині зони дозування [34].

Змішувальний елемент містить вхідні пази 3, які відкриті з боку входу матеріалу в змішувальний елемент і мають торцеві перемички 7 з боку виходу матеріалу з пазів у поздовжньому напрямку (стрілка з позначенням V_l показує напрямок поздовжнього руху полімерного матеріалу).

У кінцевій частині змішувального елемента розміщені вихідні пази 5, які відкриті з боку виходу зі змішувального елемента й закриті торцевими перемичками 8 з боку входу матеріалу в поздовжньому напрямку.

Середня частина містить проміжні пази 4, які закриті з обох боків торцевими перемичками 7 і 8.

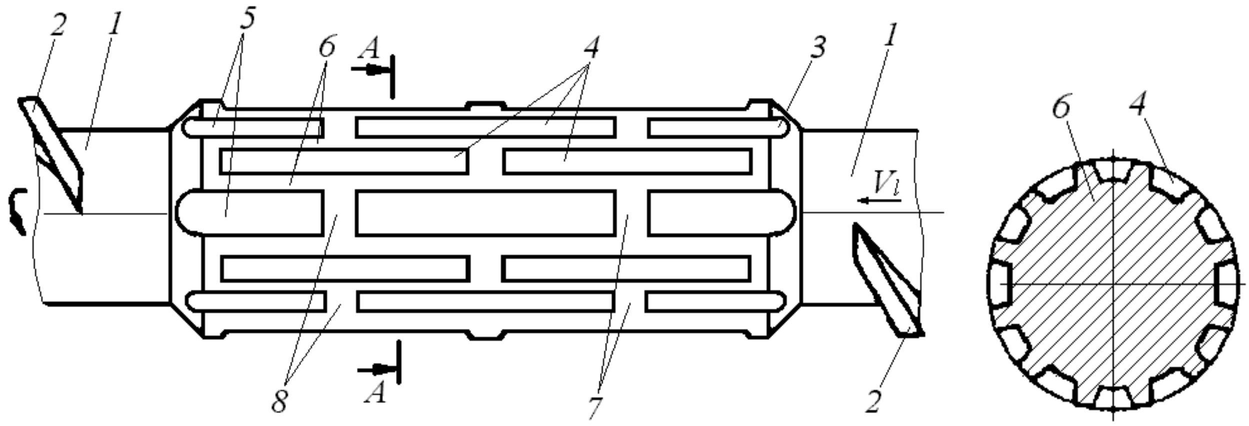


Рис. 4.28. Змішувальний елемент з бар'єрною секцією в проміжній частині зони дозування:
а – загальний вигляд; б – перетин А–А; 1 – осердя черв'яка; 2 – черв'ячна нарізка; 3 – вхідні пази; 4 – проміжні пази; 5 – вихідні пази; 6 – поздовжні перемички; 7, 8 – торцеві перемички

При роботі екструдера розплавлений матеріал подається черв'ячною нарізкою 2 у вхідні пази 3. Під дією черв'яка й тиску, що створюється витками черв'яка, розплав притискується через радіальний зазор, який утворюється між поздовжніми перемичками 6 і внутрішньою поверхнею корпусу екструдера, у сусідній проміжний паз 4. Далі одна частина матеріалу знову ж таки потрапляє в суміжний проміжний паз 4, а інша частина – у сусідній вихідний паз 5, звідки через вихідний отвір виходить до робочого об'єму черв'ячної нарізки 2.

У радіальних зазорах на полімер діють інтенсивні зсувні деформації, за рахунок чого відбувається змішування й гомогенізація полімерного матеріалу. Потрапляючи в пази 3, де інтенсивність зсуву значно менша, полімер змішується з порціями матеріалу, що надходить з інших пазів, у результаті чого відбувається усереднення температурного поля. Проходячи послідовно через зони з різною інтенсивністю зсувних деформацій і переміщуючись через змішувальні контури за складними траєкторіями, матеріал знаходиться в оптимальних умовах для гомогенізації й змішування. Крім того, незначний розмір радіальних зазорів не дає проскочити до вихідного отвору екструдера нерозплавлених частинок полімеру.

На рис. 4.29 наведений змішувальний елемент з бар'єрною секцією, що встановлюється в кінці черв'яка [35].

Змішувальний елемент, що показаний на рис. 4.29 приєднується до кінцевої частини за допомогою різьбового з'єднання 8. З виходу черв'ячної нарізки розплавлений матеріал подається через входові отвори 7 у поздовжні пази 1. Таким чином, один потік розділяється на багато мілких потоків.

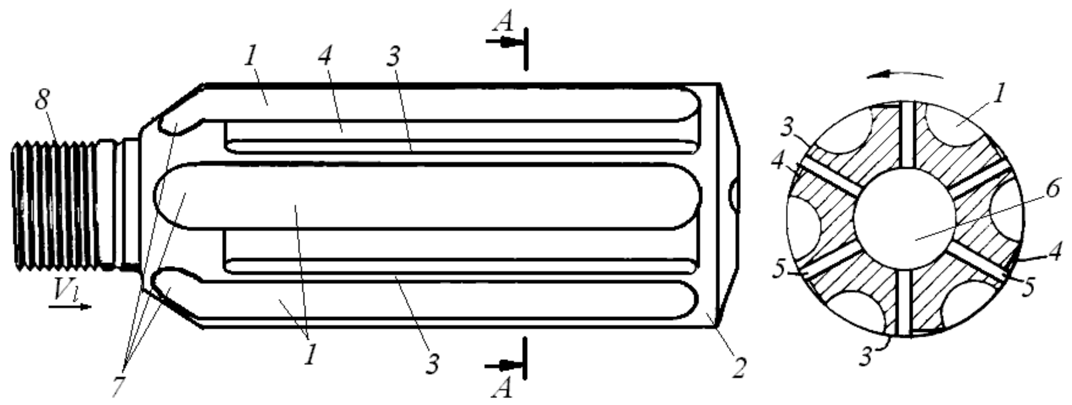


Рис. 4.29. Змішувальний елемент з бар'єрною секцією, що встановлюється в кінці черв'яка:
а – загальний вигляд; б – перетин *А–А*: 1 – поздовжні пази; 2 – кільцева перемичка; 3 – фіксуючі поздовжні перемички; 4 – нагнітальні поздовжні перемички; 5 – радіальні отвори; 6 – поздовжній отвір; 7 – входові отвори поздовжніх пазів; 8 – різьбове з'єднання

Потоки, потрапивши до пазів 1, зазнають інтенсивного циркулювання за рахунок обертального руху змішувального елемента разом з черв'яком. Унаслідок придання нагнітальним поздовжнім перемичкам клинчастої форми й відповідного обертального руху змішувального елемента, полімерний матеріал нагнітається через радіальні отвори 5 у поздовжній отвір 6 і далі до вихідного отвору екструдера. Фіксуючі поздовжні перемички 3 необхідні для спрямування потоків розплаву в радіальні отвори 5. Прямому руху розплаву вздовж пазів 1 заважає кільцева перемичка. Дана конструкція, крім підвищення змішувальної властивості, також покращує пластикаційні характеристики екструдера, не дозволяючи пройти до вихідного отвору нерозплавленим частинкам матеріалу.

4.4 Особливості конструктивного виконання зони живлення

Найбільш просте конструктивне оформлення зони живлення – це гладкий матеріальний циліндр з завантажувальним отвором круглого або прямокутного перетину, над яким змонтований конічно–циліндричний бункер (рис. 4.30). У таких системах припускається вільне, гравітаційне витікання гранульованого чи порошкоподібного матеріалу із завантажувального бункера в канал черв'яка.

Певний вплив на продуктивність зони живлення чинить конфігурація завантажувального вікна та його орієнтація відносно осі черв'яка. Це визначає швидкість заповнення матеріалом міжвиткового простору в зоні живлення. Як було показано Сіліним [36], оптимальна форма завантажувального отвору повинна мати прямокутну конфігурацію, причому оптимальна довжина її знаходиться в межах

$$\boldsymbol{l} = (1.25 \div 1.5) \cdot \mathbf{t}_{\mathbf{03}}, \tag{4.7}$$

де $\mathbf{t}_{\mathbf{оз}}$ – крок черв'яка на ділянці завантаження.

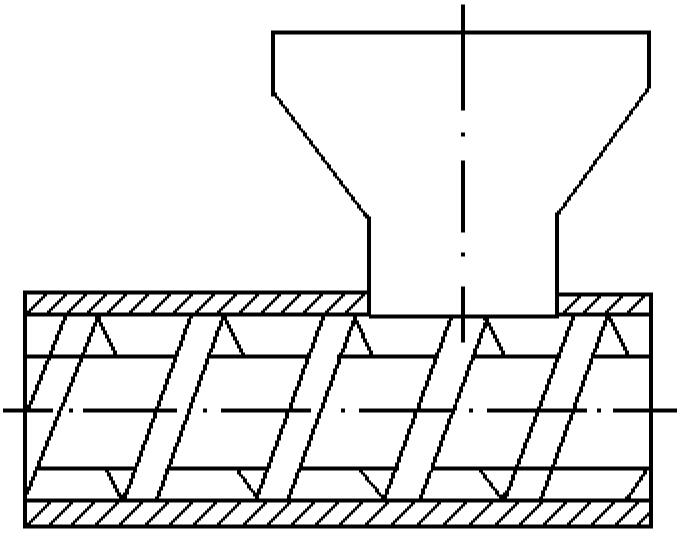
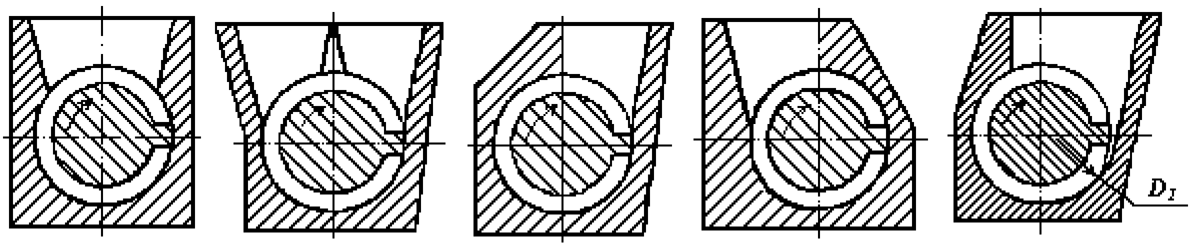


Рис. 4.30. Зона живлення з гладким матеріальним циліндром і конічно–циліндричним бункером

Верхня межа в рівнянні (4.7) вибирається для менш рухливих мас. Рухливість перероблюваного матеріалу збільшується при зменшенні розмірів гранул і наближенні їх форми до кулькоподібної, а також при збільшенні міжвиткового простору й зменшенні коефіцієнта тертя.

Певний вплив на характер процесу в зоні живлення вносить схема розміщення завантажувального отвору в поперечному осі черв'яка напрямку, як представлено на рис. 4.31

.



а б в г д

Рис. 4.31. Схема розміщення завантажувального отвору:
а – центральне; б – центральне з перегородкою;
в – тангенційне в продовження руху; г – тангенційне на зустріч руху;
д – тангенційне з додатковою виїмкою

Ширину завантажувального отвору, з урахуванням достатньої рухливості гранульованого матеріалу, можна зменшити до **3/4·D**. Максимальна продуктивність досягається у випадку центрального розташування завантажувального отвору (рис. 4.31,а) з шириною

$$\mathbf{H = (0.8 \div 0.9) \cdot D}. \qquad (4.8)$$

Практично такий же результат дає отвір з центральним розташуванням і перегородкою (рис. 4.31,б) і шириною, що дорівнює діаметру черв'яка, а також отвір згідно зі схемою на рис. 4.31,в. Схема за рис. 4.31,г призводить до зменшення продуктивності. Що ж стосується схеми, що зображена на рис. 4.31,д, то її слід використовувати у випадку живлення агрегату термопластичним матеріалом у вигляді смуги. Як було визначено в роботі [37] найбільша продуктивність досягається при прямокутному завантажувальному отворі, який розміщений під кутом до осі екструдера, що дорівнює куту підйому гвинтової лінії.

Практично всі конструкції завантажувальних бункерів мають конусну частину, тому особлива увага приділяється поведінці сипкого матеріалу в конусних обичайках. Результуючий тиск на виході з бункера, що складається з верхньої циліндричної й нижньої конусної частини, як показано на рис. 4.32, визначається таким чином

$$\mathbf{P_1} = \left(\frac{\mathbf{h_1}}{\mathbf{h_0}}\right)^{\mathbf{b_1}} \cdot \mathbf{P_0} + \frac{\boldsymbol{\rho}_\mathbf{n} \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{h_1}}{\mathbf{b_1} - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{\mathbf{h_1}}{\mathbf{h_0}}\right)^{\mathbf{b_1} - 1}\right], \tag{4.9}$$

де ρ_n – насипна густина матеріалу; **g** – прискорення вільного падіння; $\mathbf{b_1}$ – коефіцієнт, який ураховує форму бункера й властивості матеріалу; $\mathbf{P_0}$ – тиск, що створюється на вході в конусну частину бункера за рахунок об’єму матеріалу в циліндричній обичайці.

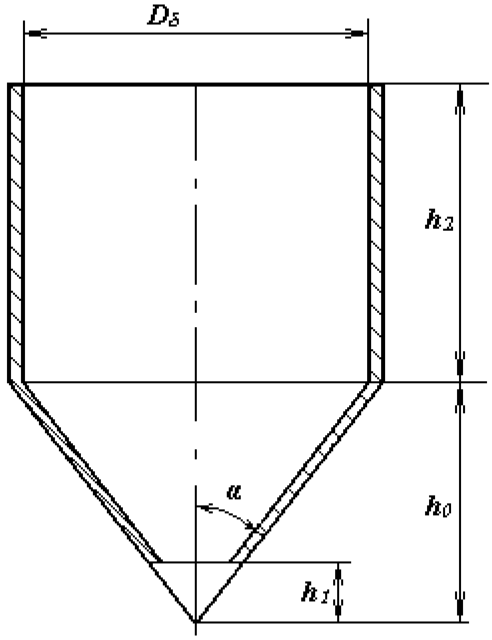


Рис. 4.32. Схема бункера з послідовним розміщенням циліндричної та конусної обичайок

Для визначення $\mathbf{P_0}$ можна скористатися такою залежністю

$$\mathbf{P_0} = \frac{\rho_\mathbf{n} \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{D}_\delta}{4 \cdot \mathbf{f}_\omega \cdot \mathbf{K}_\delta} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{4 \cdot \mathbf{f}_\omega \cdot \mathbf{K}_\delta \cdot \mathbf{h_2}}{\mathbf{D}_\delta}\right)\right], \tag{4.10}$$

де $\mathbf{K_\delta}$ – відношення напруження при стисканні в горизонтальному напрямку до напруження при стисканні у вертикальному напрямку (його ще називають коефіцієнтом бокового стискання); $\mathbf{f_\omega}$ – коефіцієнт тертя на стінці в парі полімер – метал.

Величини $\mathbf{h_0}$, $\mathbf{h_1}$, $\mathbf{h_2}$, $\mathbf{D_\delta}$ являють собою геометричні параметри бункера згідно з рис. 4.32.

Для величини $\mathbf{K_\delta}$ з урахуванням того, що напруження при стисканні в горизонтальному напрямку будуть мінімальними, а у вертикальному напрямку – максимальні, можна записати залежність

$$\mathbf{K_\delta = \frac{1 - \sin(\delta_T)}{1 + \sin(\delta_T)}}, \tag{4.11}$$

де δ_T – ефективний кут тертя, який для багатьох гранульованих полімерних систем лежить у межах δ_T $\mathbf{= 30° \div 40°}$.

Для коефіцієнта $\mathbf{b_1}$ буде справедлива формула

$$\mathbf{b_1 = \frac{2 \cdot B' \cdot D^*}{tg(\alpha)}}, \tag{4.12}$$

де α – кут розхилу конусної частини; $\mathbf{D^*}$ – функція розподілу, яка в першому наближені може бути взята за одиницю; $\mathbf{B'}$ – комплекс, що визначається з такого співвідношення

$$\mathbf{B' = \frac{\sin(\delta_T) \cdot \sin(2 \cdot \alpha + k_0)}{1 - \sin(\delta_T) \cdot \cos(2 \cdot \alpha + k_0)}}. \tag{4.13}$$

де $\mathbf{k_0 = \beta_\omega + arcsin\left[\frac{\sin(\beta_\omega)}{\sin(\delta_T)}\right]}$; $\quad \mathbf{arcsin\left[\frac{\sin(\beta_\omega)}{\sin(\delta_T)}\right] < \frac{\pi}{2}}$.

В останніх виразах величина β_ω являє собою кут тертя біля стінки, який, наприклад, для ПЕНГ має значення β_ω $\mathbf{= 16{,}7°}$ (для ефективного кута тертя в даному випадку буде δ_T $\mathbf{= 33{,}7°}$).

Для стабілізації роботи зони живлення та збільшення продуктивності вводять різного типу конструктивні елементи.

На рис. 4.33 зображений завантажувальний бункер з додатковим складеним шнеком, який має циліндричну й конусну частини та приводиться до руху через вал за допомогою привода шнека [38].

Додатковий завантажувальний шнек, що розташований у бункері може створювати необхідний тиск на початку зони живлення, що навіть при недостатньо оптимальному температурному режимі в зоні живлення, дозволяє уникнути режиму «голодного живлення».

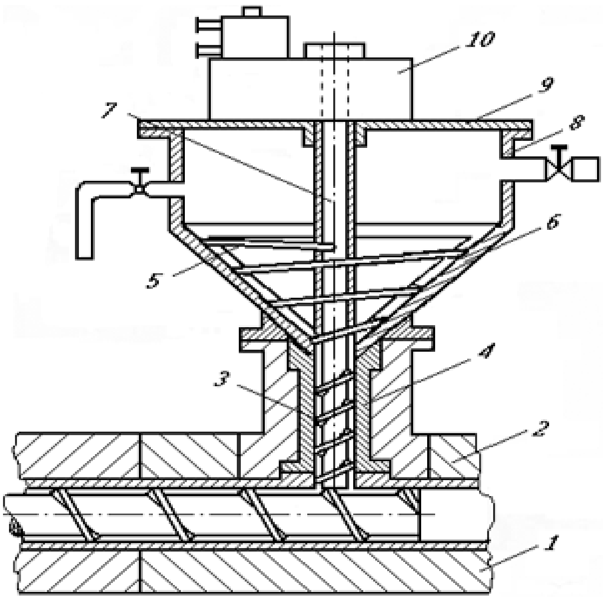


Рис. 4.33. Зона живлення з додатковим вертикальним шнеком в бункері:

1 – корпус; 2 – секція завантаження; 3 – завантажувальний шнек з циліндричною нарізкою; 4 – нижня циліндрична обичайка; 5 – зрушуючий шнек з конусною нарізкою; 6 – проміжна конусна обичайка; 7 – привідний вал; 8 – верхня циліндрична обичайка; 9– кришка; 10 – привід шнека

У патенті [39] розроблені два конструктивних підходи до стабілізації роботи екструзійного агрегату в зоні живлення. На рис. 4.34 показаний варіант з додатковим коротким горизонтальним черв'яком у зоні живлення, а на рис. 4.35 зображений варіант з пазами на внутрішній поверхні корпусу.

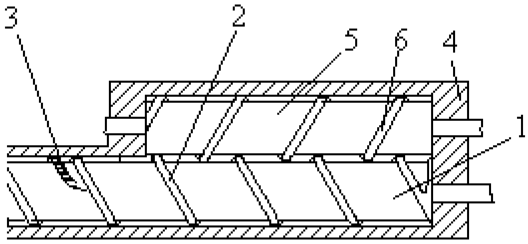


Рис. 4.34. Зона живлення з додатковим коротким горизонтальним черв'яком:

1 – основний черв'як; 2 – головна нарізка основного черв'яка; 3 – додаткова нарізка основного черв'яка; 4 – корпус; 5 – додатковий черв'як; 6 – нарізка додаткового черв'яка

Конструкція, яка надана на рис. 4.34 являє собою схему для двочерв'ячного екструдера, але тільки в зоні живлення, що дозволяє функціонувати в режимі самоочищення черв'яків.

Для такої схеми, навіть коли буде виконуватися співвідношення $\mathbf{f_b < f_s}$, налипання перероблюваного матеріалу на шнек ніколи не буде спостерігатися. Крім того, згідно з рис. 4.34 слід відмітити, що нарізки на основному й додатковому черв'яках мають різний напрямок. У цьому випадку черв'яки будуть обертатися в різні боки. Додаткова нарізка 3 основного черв'яка призначена для інтенсифікації процесів транспортування та пластикації полімерного матеріалу за рахунок виконаних на її поверхні прорізів.

Конструктивне оформлення зони живлення згідно з рис. 4.35 передбачає виконання на внутрішній поверхні корпусу пазів або поздовжніх, як показано на рис. 4.35,а,б, або гвинтових, як показано на рис. 4.35,в.

Пази, які виконані на внутрішній поверхні корпусу дозволяють значно збільшити опір руху матеріалу по поверхні корпусу, підвищуючи продуктивність і тиск у зоні живлення.

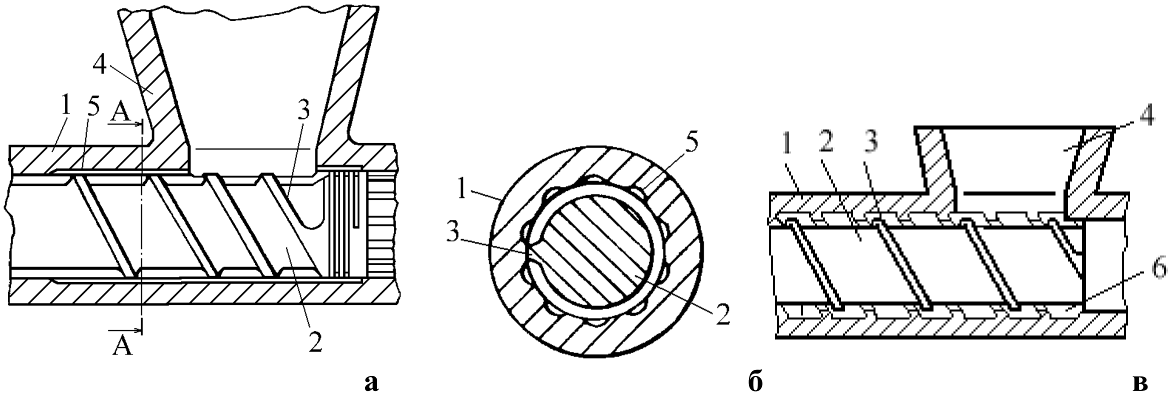


Рис. 4.35. Зона живлення з пазами на внутрішній поверхні корпуса:
а – з поздовжніми пазами; б – перетин А – А на рис. 5.11,а; в – з гвинтовими пазами:
1 – корпус; 2 – черв'як; 3 – гвинтова нарізка черв'яка; 4 – бункер; 5 – поздовжні пази;
6 – гвинтовий паз

Ще один напрямок конструктивного оформлення для покращення характеристик зони живлення полягає у введенні на початку зони живлення вакуумної секції.

На рис. 4.36 зображена схема зони живлення з вузлом вакуумного відсмоктування повітря.

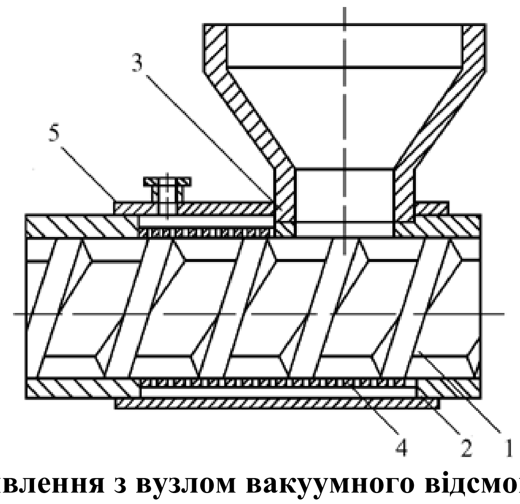


Рис. 4.36. Зона живлення з вузлом вакуумного відсмоктування повітря:
1 – черв'як; 2 – корпус; 3 – бункер; 4 – перфорована сітка; 5 – патрубок

Використання вакуумної секції в зоні живлення дає особливо гарні результати у випадку переробки малорухомих полімерних композицій, наприклад, при застосуванні волокнистих наповнювачів. У цьому випадку рухома сила буде складатися з двох компонентів: перший, як і для типової конструкції – за рахунок сил тертя в гвинтовому каналі; другий – за рахунок транспортувальної дії повітряного потоку, причому кут транспортування буде складати $\boldsymbol{\theta} = 90^{o} + \boldsymbol{\varphi_0}$.

5 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ ГРАНУЛЮВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

У наш час найбільшого розповсюдження для промислового користування набули дві схеми систем гранулювання: перша – з холодним різанням стренг із полімерного матеріалу; друга – з гарячим різанням на філь’єрній решітці в охолодному середовищі.

Перша схема в конструктивному виконанні є більш простою й використовується, як правило, при гранулюванні відходів різних виробництв (обрізка при виробництві плівок, труб, листів, що отримують екструзійним способом; літникові системи при формуванні виробів на термопластавтоматах, тощо), а також виробів із полімерних матеріалів, які відслужили свій термін.

Типова схема агрегату з холодним різанням стренг представлена на рис. 5.1.

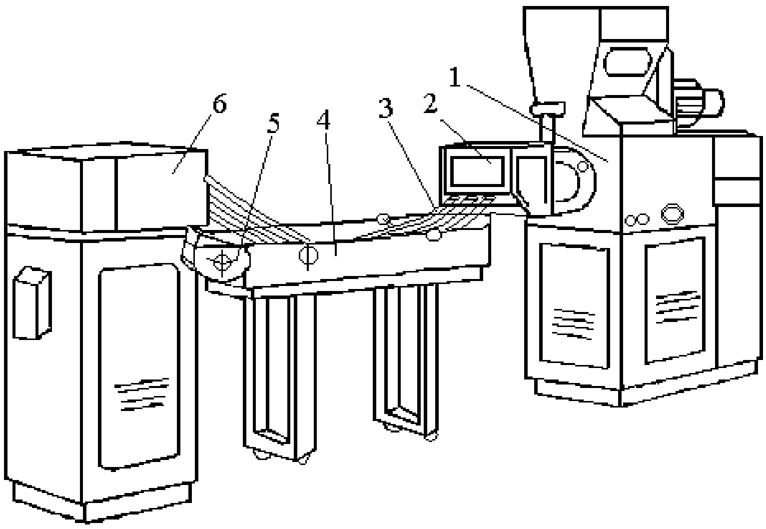


Рис. 5.1. Схема агрегату з холодним різанням стренг:
1 – екструдер; 2 – гранулювальна головка; 3 – стренги з полімерного матеріалу; 4 – охолодна ванна; 5 – повітряна сушарка; 6 – роторна дробарка

При роботі гранулювального агрегату, що зображений на рис. 5.1, перероблюваний матеріал подається в завантажувальний бункер екструдера у вигляді подрібненої крихти або порошку. Далі він захоплюється черв’яком і подається до гранулювальної головки, відповідним чином оброблюючись у робочому об’ємі екструдера (згідно з тими процесами, що розглянуті в попередніх розділах). Підготовлений розплав полімерного матеріалу протискується через формувальні отвори гранулювальної головки за рахунок тиску, який створюється екструзійним агрегатом, і потрапляє у вигляді стренг в охолодну ванну, де він охолоджується за рахунок конвективного теплообміну з охолодною речовиною, як правило, водою.

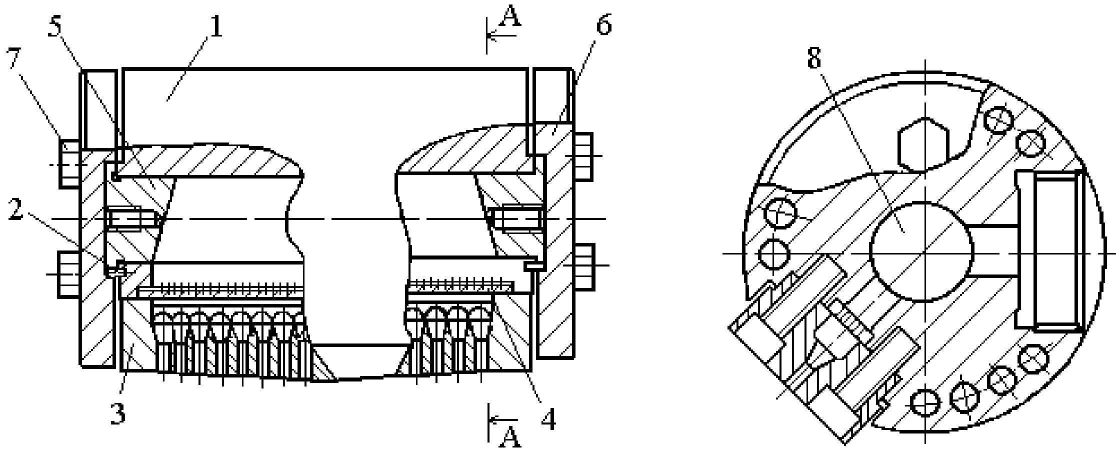
Після виходу з ванни полімерні стренги підсушуються повітряною сушаркою й подаються на роторну дробарку, де розрізаються на гранули певної довжини. У ролі різального інструменту в більшості випадків використовується фрези з різним типом різальних кромок. Перед різальним інструментом установлюються обгумовані валки, які безпосередньо тягнуть стренги.

Необхідний розмір гранул досягається підбором частоти обертання роторів дробарки. Слід відмітити, що торці гранул у даному випадку мають нечітку форму. До недоліків схеми з холодною різкою стренг у першу чергу необхідно віднести значну кількість пилу, що призводить до виникнення склепіння в бункерах для переробки пластмас. У такому грануляті можуть бути також мілкі металеві включення, тому що різання холодних стренг супроводжується істотним зносом різальних кромок.

У більшості випадків формувальні отвори в гранулювальній головці розміщені в один ряд, як показано на рис. 5.2. При цьому, чим далі від осі вхідного отвору розміщені формувальні отвори, тим більший шлях проходить розплав полімеру, унаслідок чого збільшується опір руху матеріалу, зменшуючи об’ємну швидкість.

Для врівноваження об’ємних швидкостей, а значить і лінійних швидкостей стренг, які виходять з різних формувальних отворів, вихідну поверхню гранулювальної решітки профілюють відповідним чином. При цьому найбільша ширина гранулювальної решітки (а значить довжина формувальних отворів) буде на осі симетрії, а найменша – на периферії.

Підтримування теплового режиму гранулювальної головки забезпечується за допомогою нагрівачів, що встановлюються в корпусі головки.



а б

Рис. 5.2. Стренгова гранулювальна головка:
а – загальний вигляд; б – переріз А–А:
1 – корпус; 2 – штифт; 3 – решітка гранулювальна; 4 – решітка фільтровальна; 5 – заглушка; 6 – фланець; 7 – болти; 8 – колектор

Загальний вигляд агрегату для гранулювання полімерного матеріалу за схемою з гарячим різанням на філь’єрній решітці зображений на рис. 5.3.

У даному випадку підготовка полімерного матеріалу також відбувається в екструдері, звідки він подається до гранулювальної головки. На відміну від гранулювальної головки з холодним різанням у даному випадку формувальні отвори розташовані, як правило, по концентричним колам у декілька рядів, як показано на рис. 5.4.

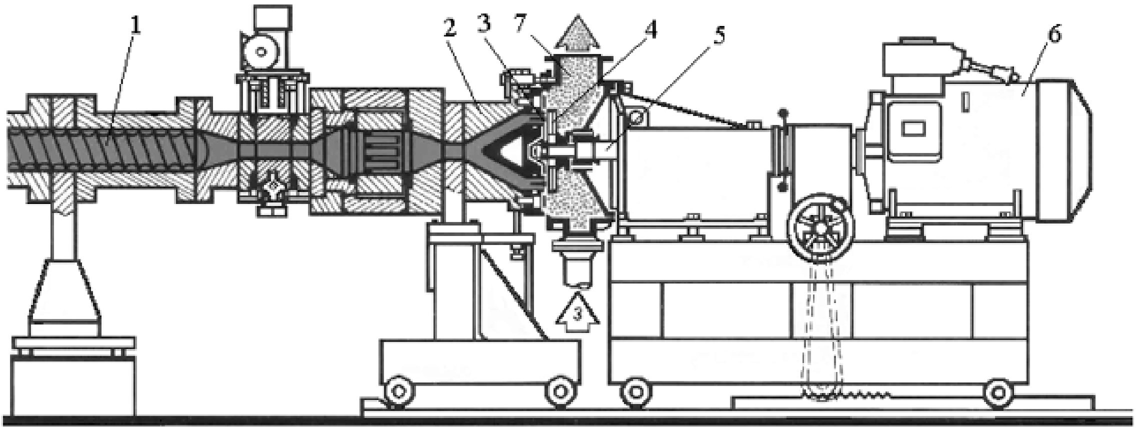
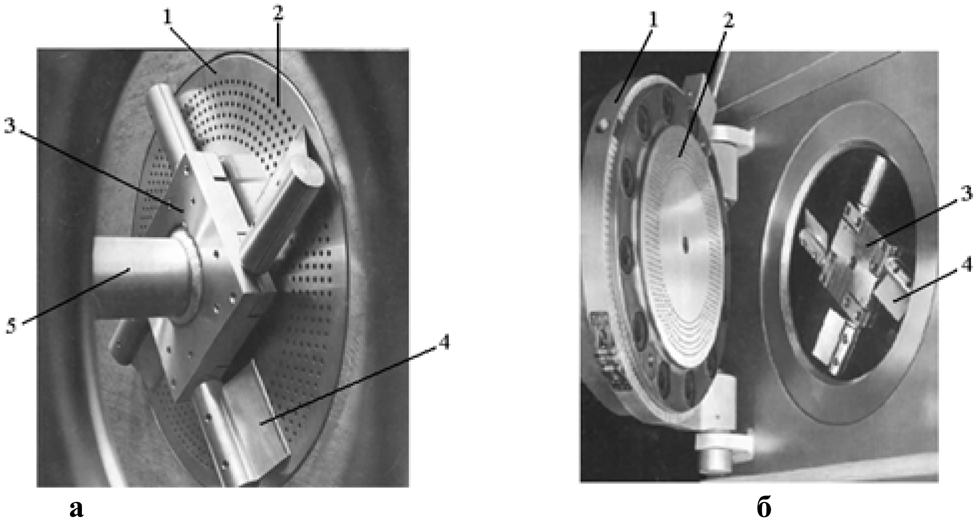


Рис. 5.3. Загальний вигляд агрегату для гранулювання полімерних матеріалів з гарячим різанням на філь'єрній решітці:
1 – екструдер; 2 – екструзійна головка; 3 – філь'єра; 4 – ножова головка; 5 – привідний вал; 6 – привід різального інструменту; 7 – охолодна камера

У процесі роботи гранулювального агрегату, за схемою на рис. 5.3, розплавлена маса полімеру, для вирівнювання потоків, розсікачем направляється в конусний кільцевий конвергентний канал. Звідки перероблюваний матеріал безпосередньо подається у формувальні канали, що розміщені у філь'єрі, і далі витискується в охолодну камеру у вигляді циліндричних стержнів, де обертається ножова головка. Ножі, які розміщені в ножовій головці, згідно з рис. 5.4, повинні рухатися зі швидкістю, що забезпечує відрізання гранул необхідної довжини. При цьому швидкість витискування гранул визначається продуктивністю екструдера. Отже, частота обертання ножової головки повинна синхронізуватися зі швидкістю обертання й геометричними параметрами черв'яка.



а **б**

Рис. 5.4. Вузол фільєри з ножовою головкою:
а – у робочому положенні; б – при відведеній ножовій головці;
1 – фільєра; 2 – формувальні отвори; 3 – ножова головка; 4 – ножі; 5 – привідний вал

Кількість формувальних отворів залежно від продуктивності буває в межах 40÷2000, при цьому їх оптимальний діаметр складає 2,2÷3 мм.

Щоб уникнути застійних зон перед входом у формувальні отвори, вхідні відрізки останніх виконані конусними. Причому більший діаметр конуса вибирається таким чином, щоб перетинаючиєся стінки конусів утворювали на вході правильні шестигранники, як показано на рис. 5.5. Таким чином, внутрішня поверхня філь'єри, що обернена назустріч потоку розплаву, має вигляд на зразок стільників.

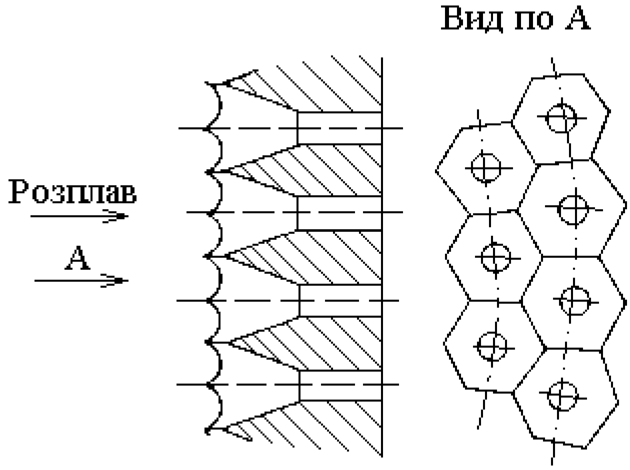


Рис. 5.5. Фільєра гранулятора

Як правило, при підведенні ножової головки до філь'єри існує два режими: швидкий (грубий) і повільний (тонкий). При тонкому режимі необхідно забезпечити оптимальне зусилля притискання ножів до робочої поверхні філь'єри. З одного боку велике зусилля притискання дає впевненість у тому, що ножі будуть постійно знаходитися в контакті з філь'єрою й не виникне режиму зминання й розмазування полімерного матеріалу по поверхні. Але з іншого боку велике зусилля притискання дає більш інтенсивний знос як ножів, так і поверхні філь'єри.

У зв'язку з вищевказаними факторами, одним з напрямків модернізації грануляторів з гарячим різанням є конструктивне оформлення саме системи тонкого режиму підведення ножової головки до поверхні філь'єри.

На рис. 5.6 зображене конструктивне оформлення системи гарячого гранулювання з фіксацією ножів на філь'єрній решітці за допомогою електрода з системою зворотного зв'язку [40].

У процесі роботи зображеної на рис. 5.6 системи гранулювання швидке підведення ножової головки відбувається через гідроциліндр 21. Фіксація положення ножів 8 відносно робочої поверхні філь'єри 1 відбувається за допомогою електроду 24, сигнал від якого йде на реєстровий елемент 25 і далі на блок керування 26. При цьому на деякому інтервалі зусилля притискання врівноважується пружиною 10. Коли зусилля притискання ножів перетне найменше можливе значення, то електричний ланцюг у системі ножі-електрод порушиться й через реєстровий елемент у блок управління буде поданий відповідний сигнал. Після чого подається сигнал на привід черв'ячної передачі 15, яка є першим кільцем у системі тонкого регулювання ножової головки. При обертанні черв'ячного колеса 18 відбувається зворотно-поступальний рух втулки

19 унаслідок наявності гвинтової передачі, яке є другим кільцем у системі тонкого регулювання ножової головки.

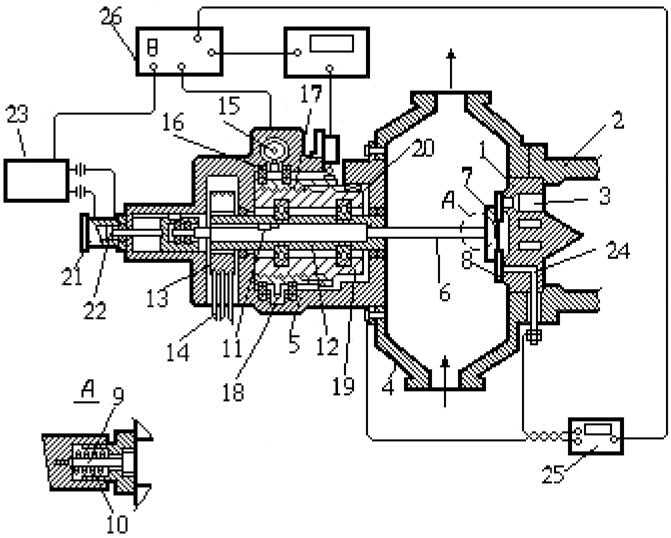


Рис. 5.6. Схема гранулювання з гарячим різанням і тонким регулюванням притискання ножів за допомогою електрода з системою зворотного зв'язку:
1 – філь'єра; 2 – корпус екструдера; 3 – живильні канали; 4 – приймальна камера; 5 – корпус вузла підведення ножової головки; 6 – привідний вал; 7 – ножова головка; 8 – ножі; 9 – шток; 10 – пружина; 11 – шпонка; 12 – обертальна втулка; 13 – шків; 14 – клинчасто-пасова передача; 15 – черв'ячна передача; 16 – підшипники; 17 – гвинтова передача; 18 – черв'ячне колесо; 19 – втулка з гвинтовою нарізкою; 20 – підшипники; 21 – гідроциліндр; 22 – поршень; 23 – гідросистема управління гідроциліндром; 24 – електрод; 25 – реєстровий елемент; 26 – блок управління

Таким чином відбувається підтискання ножів до поверхні філь'єри за рахунок системи зворотного зв'язку ножі – електрод – реєстровий елемент – блок управління – черв'ячна передача – гвинтова передача – підшипники – привідний вал – ножова головка – ножі. До недоліків даної системи необхідно віднести той факт, що контролювати положення ножів можна тільки при зупинці процесу грануляції, інакше вода замкне контакти й, незалежно від величини зусилля притискання ножів до електроду, струм в електричному ланцюгу буде визначатися провідністю води в приймальній камері.

У роботі [41] розроблена конструкція системи фіксації ножів на філь'єрній решітці, яка усуває вище згаданий недолік. Схема системи гранулювання з такою фіксацією ножів подана на рис. 5.7.

Перед пуском гранулятора, зображеного на рис. 5.7, слід виконати його попереднє налагодження, яке полягає у визначенні ненавантаженого контакту ножів і філь'єри й позначенні цієї нульової точки за манометром 8.

Потім, відводячи ножову головку 1 і підвищуючи тиск у замкненій порожнині 4 до моменту контактування центра мембрани з ножовою головкою, за допомогою мікрометричного індикатора виконують тарировку манометра 8 під шкалу зазорів. Таким чином, налагоджена система дозволяє здійснювати пуск і функціонування гранулятора як із зазором, так і при відсутності останнього.

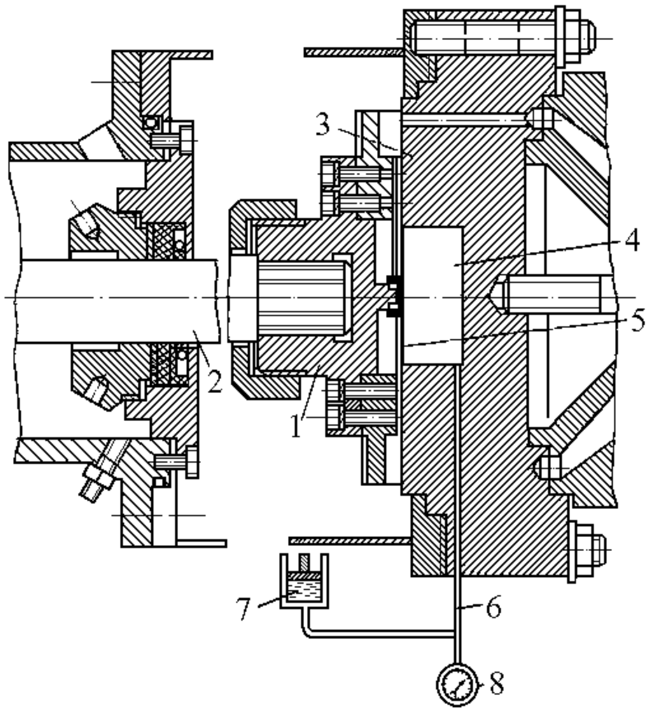


Рис 5.7. Схема гранулювання з гарячим різанням і тонким регулюванням притискання ножів за допомогою мембрани:
1 – ножова головка; 2 – привідний вал; 3 – філь'єра; 4 – замкнена порожнина; 5 – мембрана; 6 – з'єднувальна трубка; 7 – гідравлічний прес; 8 – манометр

Унаслідок зношування ножів, що впливає на погіршення якості гранул, ножову головку підводять до філь'єри; при цьому тиск на мембрану зростає. Однак, манометр буде показувати зростання тиску тільки до тих пір, доки ножі не доторкнуться до робочої поверхні філь'єри, після чого вони почнуть сприймати навантаження. Ця точка і є нульовою точкою. Підвищуючи тиск пресом 7 і відводячи ножову головку на таку величину, щоб стрілка манометра 8 повернулася на нову нульову точку, можна знову встановити будь-який необхідний зазор, величина якого визначається по відхиленню стрілки манометра 8 від нульової точки.

При роботі грануляторів з гарячим різанням на філь'єрі необхідно інтенсивне охолодження відрізаних гранул, що вимагає як можна більш швидкого подання гранул в охолодне середовище, тобто безпосереднє біля вихідних отворів у філь'єрі. Однак, якщо вода буде потрапляти на робочу поверхню філь'єри, то вона буде її охолоджувати, що може призвести до закупорювання формувальних отворів і порушенню нормальної роботи гранулювального пристрою. Щоб уникнути переохолодження гранул, розроблено багато різного роду пристосувань.

На рис. 5.8 зображений пристрій для гранулювання термопластів з дифузором для подачі повітря [42].

Робота гранулятора за рис. 5.8 полягає в протискуванні полімерного матеріалу через формувальні отвори 13 з наступним зрізанням порцій матеріалу ножами 4, розміщеними в ножовій головці 3, що обертається в охолодному середовищі (воді). При цьому через осьовий отвір 11 дифузора 8, який залишається нерухомим при обертанні привідного валу 2 з ножовою головкою 3, подається повітря, що виходить з вузької щілини між дифузором 8 і робочою поверхнею 6. Повітря відтискує воду від площини філь'єри й утворює повітряний прошарок, який заважає інтенсивному охолодженню філь'єри. При зношуванні ножів ножова головка наближається до філь'єри, а дифузор займає постійне положення внаслідок наявності пружини 10.

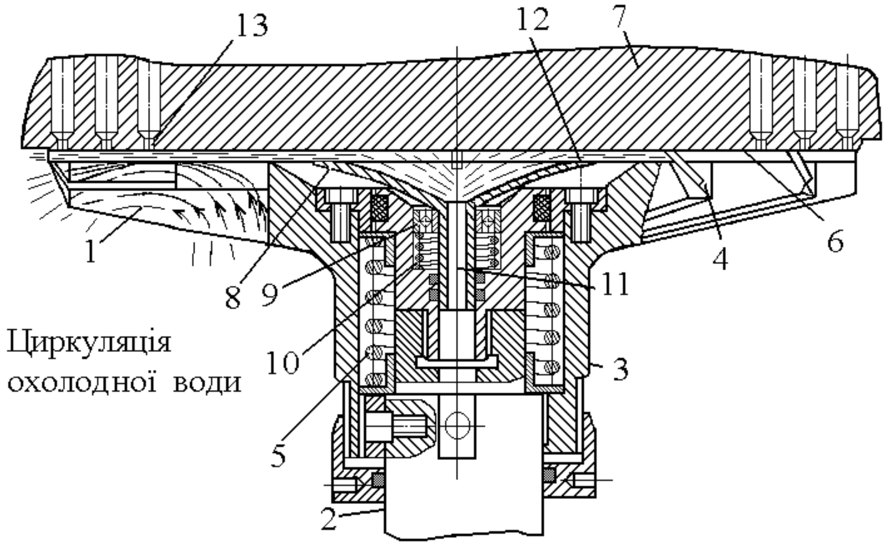


Рис. 5.8. Пристрій для гранулювання термопластів з дифузором для подачі повітря: 1 – охолодне середовище; 2 – привідний вал; 3 – ножова головка; 4 – ножі; 5 – пружина; 6 – робоча поверхня філь'єри; 7 – філь'єра; 8 – дифузор; 9 – підшипник; 10 – пружина; 11 – отвір для подачі повітря; 12 – радіальні втулки; 13 – формувальні отвори

Пристрій для гранулювання полімерів із захисним екраном для попередження переохолодження філь'єри зображений на рис. 5.9 [43].

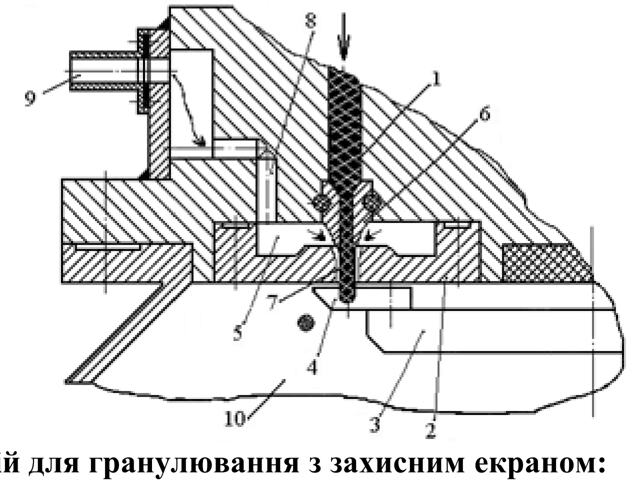


Рис. 5.9. Пристрій для гранулювання з захисним екраном: 1 – філь'єра; 2 – захисний екран; 3 – ножова головка; 4 – ножі; 5 – порожнина екрана; 6 – формувальні отвори філь'єри; 7 – прохідні отвори захисного екрана; 8 – система каналів для подачі енергоносія; 9 – вхідний патрубок; 10 – охолодна камера

У процесі роботи зображеного на рис. 5.9 пристрою для гранулювання, розплав полімеру, виходячи з формувальних отворів 6, проходить прохідні отвори 7, виконані співвісно з отворами 6, де він обволікається паровою оболонкою й тягнеться нею до охолодної камери 10. При цьому робоча поверхня філь'єри не має безпосереднього контакту з водою в охолодній камері 10. Таким чином, відбувається розділення основних функцій філь'єри, а саме, формування й гранулювання гранул. При цьому формування гранул відбувається на виході із отворів 6, а гранулювання – на виході із отворів 7.

Ще одна конструктивна розробка, яка дозволяє зменшити переохолодження філь'єри подана на рис. 5.10 [44].

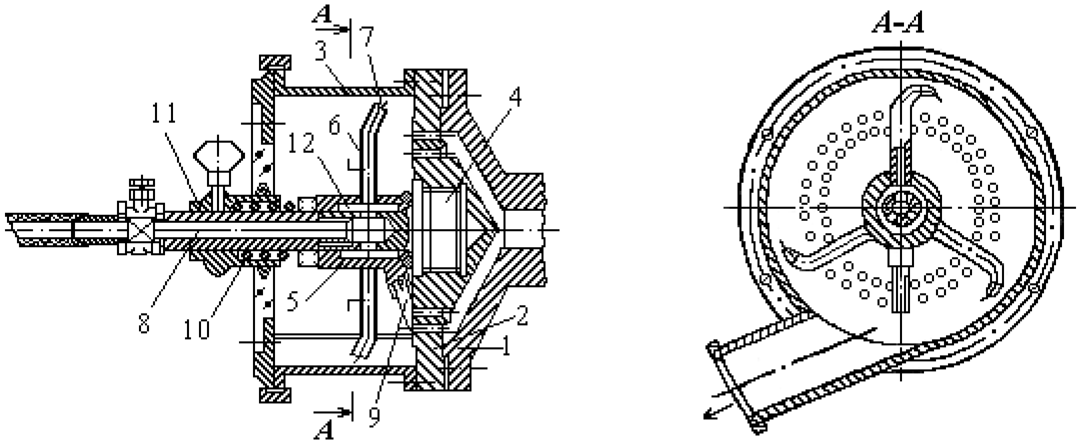


Рис. 5.10. Пристрій для гранулювання з радіальними патрубками на ножовій головці: 1 – корпус формувальної головки; 2 – філь'єра; 3 – охолодна камера; 4 – вал; 5 – втулка; 6 – радіальні патрубки; 7 – відігнуті кінці; 8 – осьовий канал; 9 – ножі; 10 – пружина; 11 – вузол регулювання підтискання ножів до робочої поверхні філь'єри; 12 – порожнина втулки

При роботі пристрою за рис. 5.10 охолодне середовище (воду або стиснений газ) під надлишковим тиском подають в осьовий канал 8, звідки воно через радіальні патрубки 6 подається до відігнутих кінців 7 і далі витікає в охолодну камеру, приводячи до обертання ножову головку з ножами 9, які зрізують стренги розплаву, що виходять з філь'єри 2. Створюваний обертальний потік охолодного середовища за рахунок реактивної сили потоку, який виходить із відігнутих кінців 7, уносить зрізані гранули, одночасно охолоджуючи їх.

Регулювання швидкості обертання ножової головки виконують через зміну тиску або витрат охолодного середовища.

Крім філь'єри з плоскою робочою поверхнею, зроблені також гранулювальні пристрої з філь'єрами, які мають циліндричні робочі поверхні.

На рис. 5.11 представлений гранулювальний пристрій з циліндричною філь'єрою [45].

У процесі роботи стренги переробнюваного матеріалу витискуються через формувальні канали 11. При обертанні диска 4 ножі 8 своїми лезами 9 відрізають гранули.

Струмінь повітря, який входить у захисний кожух 5, повітрязабиральними лопатями 6 спрямовується в отвори 7 диска 4. Входячи у внутрішню порожнину ножів 8, яка обмежена з торцевої поверхні диска 10, повітря має можливість вийти через зазор між філь'єрою 1 і ножами 8, що усуває з'явлення циркуляційних струменів, які сприяють занесенню гранул полімеру у внутрішні порожнини ножів 8.

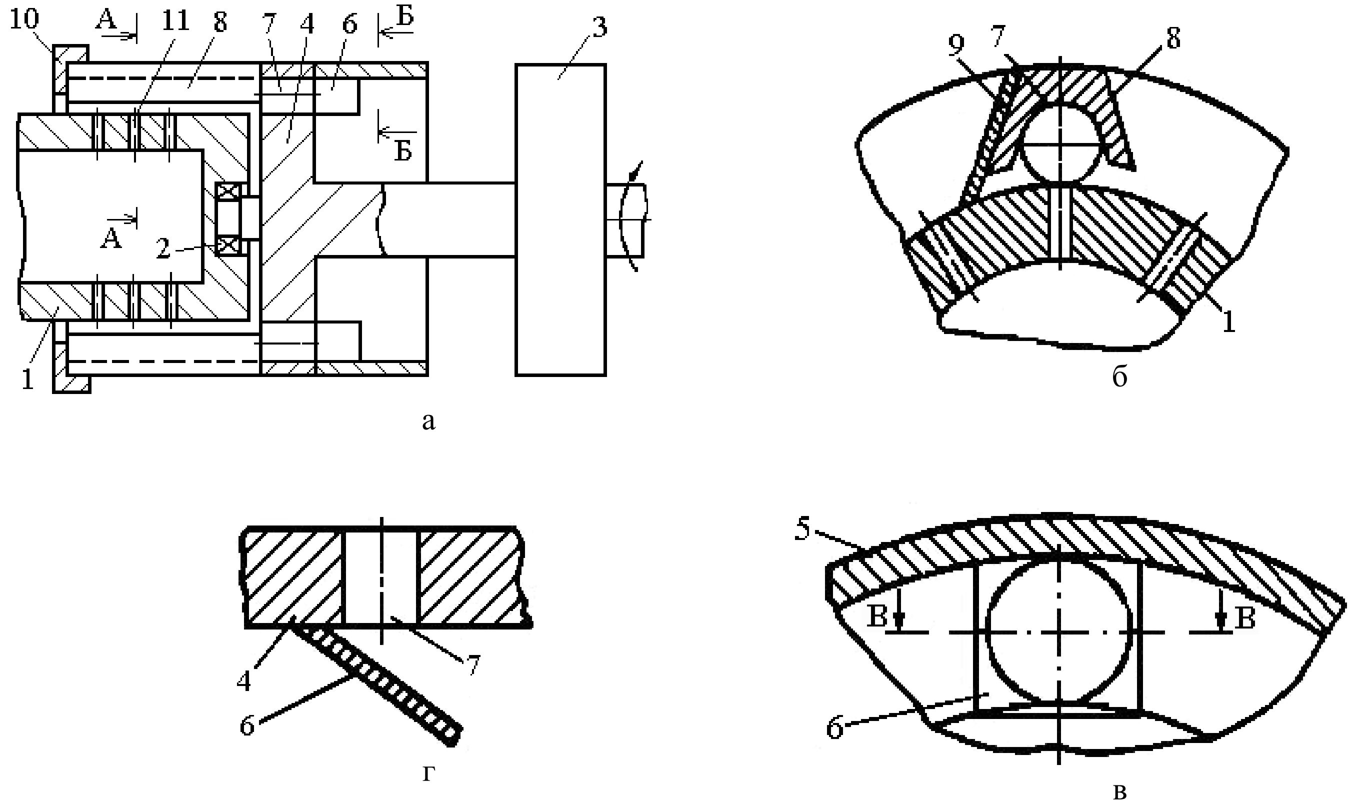


Рис. 5.11. Гранулювальний пристрій з циліндричною філь'єрою:
а – загальний вигляд; б – перетин А–А на рис. 5.11,а;
в – перетин Б–Б на рис. 5.11,а; г – перетин В–В на рис. 5.11,в:
1 – циліндрична філь'єра; 2 – підшипник; 3 – опора; 4 – диск; 5 – захисний кожух; 6 – повітряно-забиральні лопаті; 7 – з'єднувальні отвори; 8 – ножі; 9 – леза; 10 – диск для збільшення жорсткості; 11 – формувальні канали

Вихід повітря із порожнини ножів 8 призводить до появи повітряних струменів, які співпадають з напрямком доцентрової сили, у результаті чого затримка частинок у повітряних завихреннях за ножами 8 усувається й зменшується вірогідність злипання отриманих гранул з утворенням більших за розміром частинок.

На рис. 5.12 зображений пристрій для гранулювання полімерних матеріалів, який містить додаткову охолодну плиту й сполучає в собі елементи двох систем гранулювання, як з холодним різанням стренг, так і з гарячим різанням на філь'єрній решітці [46].

Зображений на рис. 5.12 пристрій для гранулювання працює таким чином. Підготовлений полімерний матеріал черв'ячним екструдером 1 через перехідну плиту 2 подається в підвідний канал 4 формувальної головки 3. Далі розплав рівномірно заповнює формувальні канали 6 у філь'єрі 5, звідки він витискується через отвори в ізоляційній прокладці 7 в охолодну порожнину 14, де розміщені напрямні втулки 16.

Після виходу полімерної стренги 20 із отворів ізоляційної прокладки 7 вона одразу ж потрапляє в просторово обмежений потік охолодної рідини, швидкість якої перевищує швидкість подання стренги.

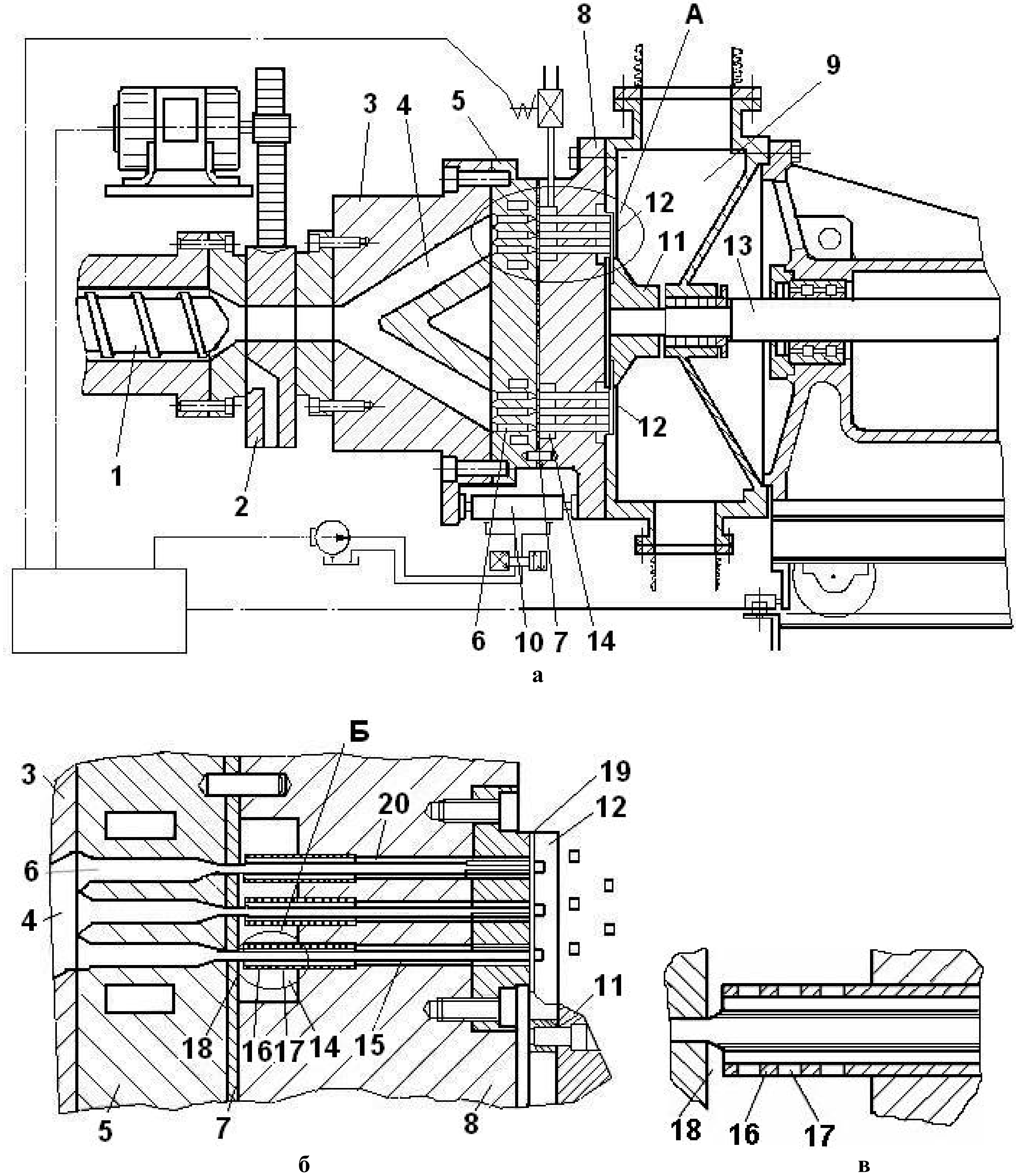


Рис. 5.12. Пристрій для гранулювання полімерних матеріалів з додатковою охолоджувальною плитою:
а – загальний вид; б – виноска А на загальному виді; в – виноска Б на рис. 5.12,б:
1 – черв’ячний екструдер; 2 – перехідна плита; 3 – формувальна головка; 4 – підвідний канал; 5 – філь’єра; 6 – формувальні канали; 7 – ізоляційна прокладка; 8 – охолодна плита; 9 – охолодна камера; 10 – гідросистема; 11 – ножова головка; 12 – ножі; 13 – привідний вал; 14 – охолодна порожнина; 15 – охолодні канали; 16 – напрямні втулки; 17 – вхідні отвори; 18 – кільцевий зазор; 19 – зносостійка вставка; 20 – полімерна стренга

Цей потік рівномірно охолоджує полімерну стренгу й подає її через охолодні канали 15, розташовані в охолодній плиті 8, у зону різальних ножів 12. Транспортувальна рідина, як правило вода, оточує полімерну стренгу й охолоджує її настільки, щоб перероблюваний матеріал досягав оптимальної температури різання.

Ступінь охолодження визначається температурою й швидкістю потоку води, яка заходить у напрямні втулки 16 як через кільцевий зазор 18, так і через вхідні отвори 17, радіально просвердлені в напрямних втулках 16 на ділянці охолодної порожнини 14. Струмені води через отвори 17 дозволяють центрувати полімерну стренгу 20 в охолодних каналах 15. Таким чином, будова вузла охолодної плити є багато функціональною, яка забезпечує не тільки надійне відділення зони гарячого формування від охолодної рідини, яка протікає в камері 9, але й створює направлений хід охолодної стренги через плиту 8 у камеру 9.

Між філь'єрою 5 й охолодною плитою 8 встановлена ізоляційна прокладка 7, яка накриває торцеві поверхні обох плит таким чином, що тільки отвори для проходження полімерної стренги залишаються відкритими.

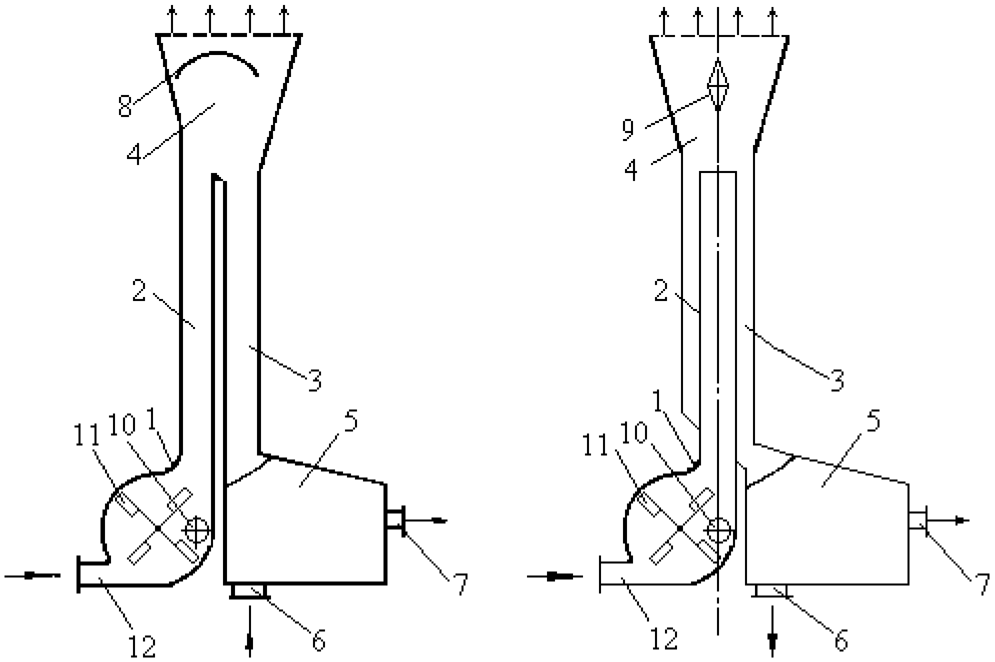
Прокладка 7 повинна затримувати процеси теплопередачі від поверхні філь'єри до охолодної порожнини 14, щоб не виникало переохолодження формувальних отворів 6 і затвердіння в них полімерного матеріалу. Унаслідок чого матеріал прокладок 7 повинний мати відповідні теплоізоляційні характеристики й у той же час бути зносостійким, наприклад, виготовлений з оксиду цирконію, фенілону, тощо.

Охолоджена полімерна стренга відрізається ножами 12 після виходу із охолодних каналів 15 плити 8. При цьому нема необхідності підводити ножі впритул до торцевої поверхні вставки 19. Процес різання при максимально можливому зазорі істотно підвищує довговічність ножів 12.

Гідросистема 10 призначена для відведення охолодної плити 8 від філь'єри 5 перед пуском гранулювального пристрою.

Усі розглянуті вище системи гранулювання з гарячим різанням на філь'єрі мають охолодну камеру, де відбувається охолодження гранул енергоносієм, який знаходиться, як правило, у рідинному стані (у більшості випадків використовують воду). Але охолодження гранул може також здійснюватись газоподібним енергоносієм, як правило, повітрям. Перевага охолодження повітрям полягає в тому, що не треба витрачати енергетичні ресурси на сушіння гранул від води. До недоліків використання в ролі охолодного середовища повітря слід віднести низьку тепловіддачу між полімером і повітрям, що вимагає більшого часу на проведення процесу охолодження. Причому для усунення ефекту прилипання гранул між собою з утворенням агломератів великих розмірів, процес охолодження повітрям виконують у псевдозрідженому шарі. Одна з таких конструкцій зображена на рис. 5.13. Дана конструкція може мати два варіанти розміщення під'ємної й спускної труб: паралельне й концентричне [47].

У процесі роботи пристрою для гранулювання за рис. 5.13 охолодне середовище подають у гранулятор 1 і охолоджувач 5 через патрубки, відповідно, 12 і 6. Нагрітий до в'язко-текучого стану полімерний матеріал протискується через філь'єру 10 і розрізається на гранули ножами 11, які обертаються відносно своєї осі. Із гранулятора відрізані гранули підхоплюються охолодним середовищем і спрямовуються через під'ємну трубу 2 у сепараційний простір. Розширення сепараційного простору 4 призводить до зменшення швидкості охолодного середовища й переходу гранул через вертикальну спускну трубу 3 в охолоджувач 5 псевдозрідженого шару.



а б

Рис. 5.13. Пристрій для гранулювання полімерних матеріалів з використанням псевдозрідженого шару для охолодження гранул:
а – паралельне розміщення під'ємної й спускної труб; б – концентричне розміщення під'ємної й спускної труб;
1 – гранулятор; 2 – під'ємна труба; 3 – спускна труба; 4 – сепараційний простір; 5 – охолоджувач псевдозрідженого шару; 6 – патрубок введення охолодного середовища (повітря); 7 – патрубок відведення охолоджених гранул; 8 – відбивальна пластина; 9 – відхильний конус; 10 – філь'єра; 11 – ножі; 12 – патрубок введення охолодного середовища

Охолоджені гранули видаляються через патрубок 7. Наявність відбивальної пластини 8 для схеми на рис. 5.13,а або відхильного конуса 9 для схеми на рис. 5.13,б у сепараційному просторі 4 дозволяє змінити напрямок руху гранул, виводячи їх із ядра потоку охолодного середовища в під'ємній трубі, що дає змогу значно зменшити об'єм сепараційного простору 4.

В останні роки (починаючи з вісімдесятих років двадцятого століття) почав розвиватися новий спосіб гранулювання полімерних матеріалів, який полягає у виштовхуванні гранул за допомогою газоподібного (як правило стисненого повітря) або рідинного (як правило води) енергоносія.

Однією з перших робіт у даному напрямку є патент Річчі й Катареллі [48]. Конструктивне виконання даного способу отримання гранул зображено на рис. 5.14. Слід зазначити, що всі елементи робочого вузла на рис. 5.14 знаходяться в стаціонарному положенні, а формування гранул відбувається внаслідок тиску, який має повітря або вода. При цьому підготовлений полімерний матеріал подається через живильний канал 3 у формувальний канал 1. Підготовка матеріалу може бути здійснена на будь-якому існуючому обладнанні: пресах, термопластавтоматах, екструдерах та інших агрегатах. У той момент, коли полімерний матеріал наблизиться до вихідного отвору 2, у канал високого тиску 4 через патрубок 6 подається стиснене повітря або вода при певному тиску, за рахунок чого в зоні перетискного отвору 5 відбувається відділення кінцевої частини полімерного матеріалу й виштовхування її з формувального каналу. Після чого тиск у каналі 4 скидається й полімер знову повністю заповнює формувальний канал 1. Далі цикл повторюється, тобто зростає тиск у каналі 4, полімер відділяється й видаляється.

Один з варіантів даної схеми зображений на рис. 5.15. У даному випадку основною відмінною рисою конструктивного оформлення є наявність кільцевого перетискного отвору, замість перетискного отвору за рис. 5.14, що дає змогу відрізати гранулу одночасно по всій циліндричній поверхні. Така система, по-перше, прискорює процес гранулювання; по-друге, поліпшує якість форми гранул за рахунок того, що торці гранули приймають більш чіткий вигляд, а також зменшується вірогідність з'явлення так званих "хвостів".

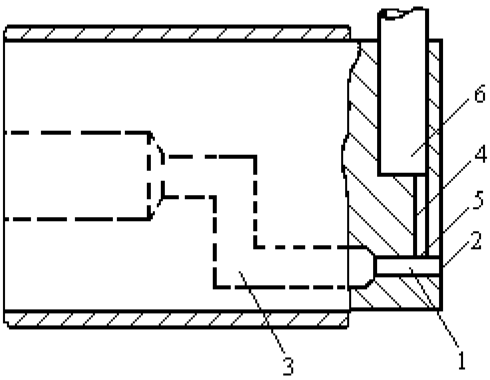


Рис. 5.14. Схема формування гранул за методом Річчі й Катареллі з перетискним отвором:
1 – формувальний канал; 2 – вихідний отвір; 3 – живильний канал; 4 – канал високого тиску; 5 – перетискний отвір; 6 – патрубок для підводу енергоносія

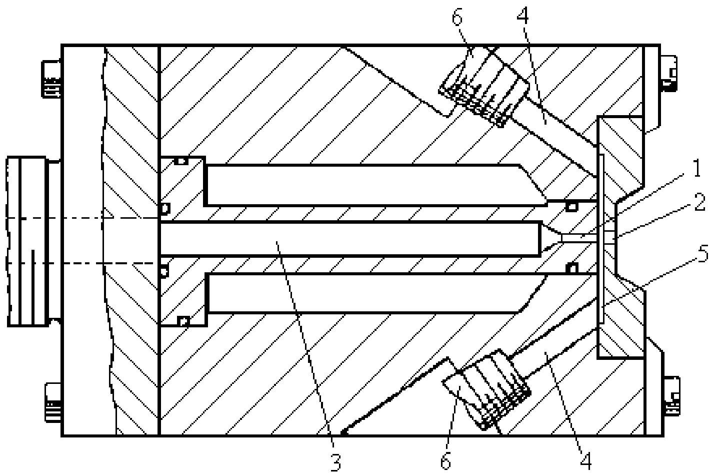


Рис. 5.15. Схема формування гранул за методом Річчі й Катареллі з перетискним кільцевим простором:
1 – формувальний канал; 2 – вихідний отвір; 3 – живильний канал; 4 – канали високого тиску; 5 – перетискний кільцевий простір; 6 – патрубки для підводу енергоносія

Деяку модифікацію конструктивного виконання вищенаведеного способу виконав у своїй роботі Михаель Рейнгард [49]. Загальна конструкція пристрою згідно з останньою роботою наведена на рис. 5.16.

Для даної схеми робочий вузол має вже крім нерухомих елементів також і деталі, які здійснюють поступальний рух за рахунок приводу 10. При зворотно-поступальному русі опорної плити 5 з патрубками 6 для центрування всіх плит вони встановлені на напрямних колонках 11.

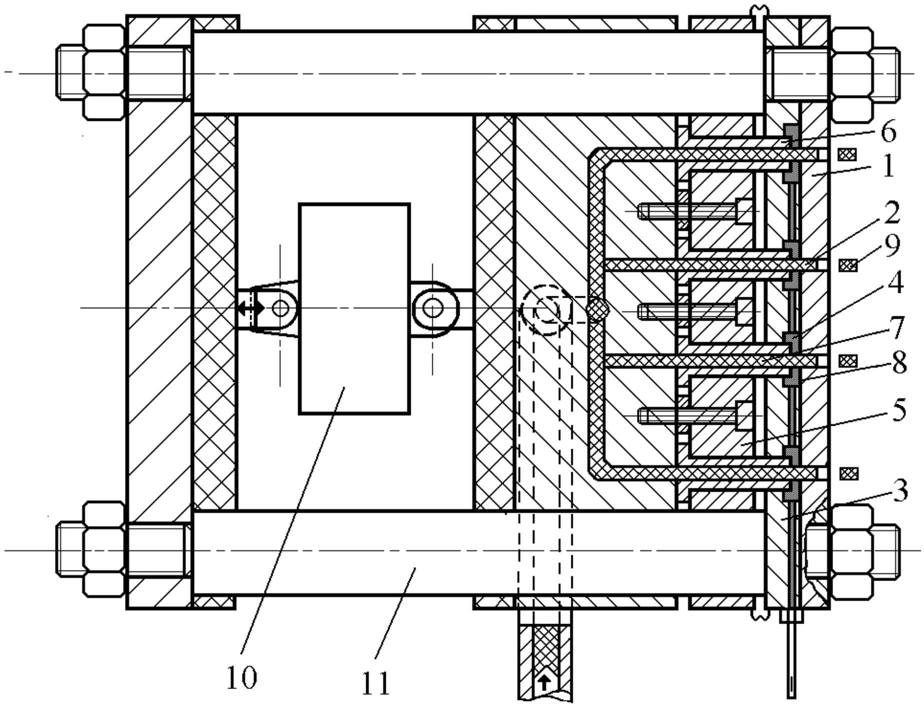
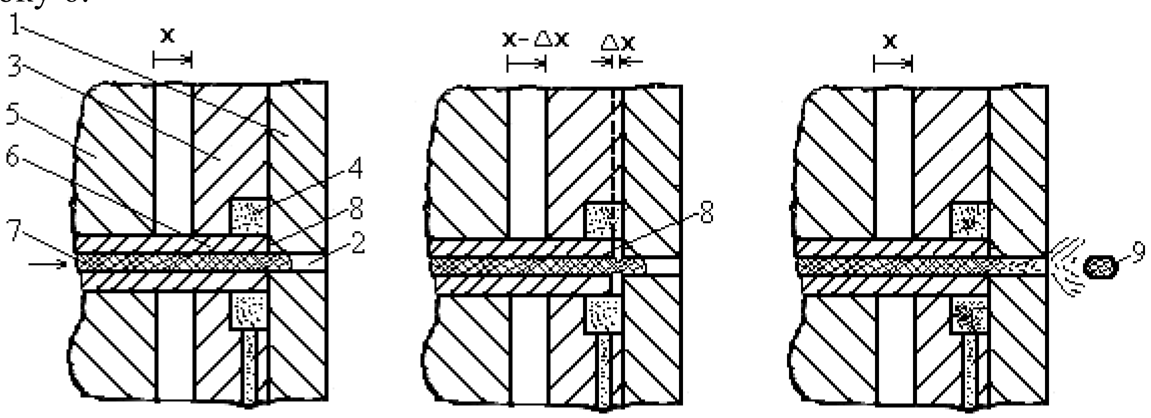


Рис. 5.16. Загальний вигляд пристрою для формування гранул згідно з розробкою Рейнгарда:
1 – філь'єра; 2 – формувальні канали; 3 – розподілювальна плита; 4 – порожнина високого тиску; 5 – опорна плита; 6 – патрубок для підведення матеріалу; 7 – живильний канал; 8 – площина рознімання; 9 – гранула; 10 – привід; 11 – напрямні колонки

Схема роботи гранулятора Рейнгарда на базі однієї секції зображена на рис. 5.17 (позначення відповідають рис. 5.16). Згідно з рис. 5.17 розплавлена маса полімерного матеріалу надходить через живильний канал 7, що виконаний у патрубку 6.



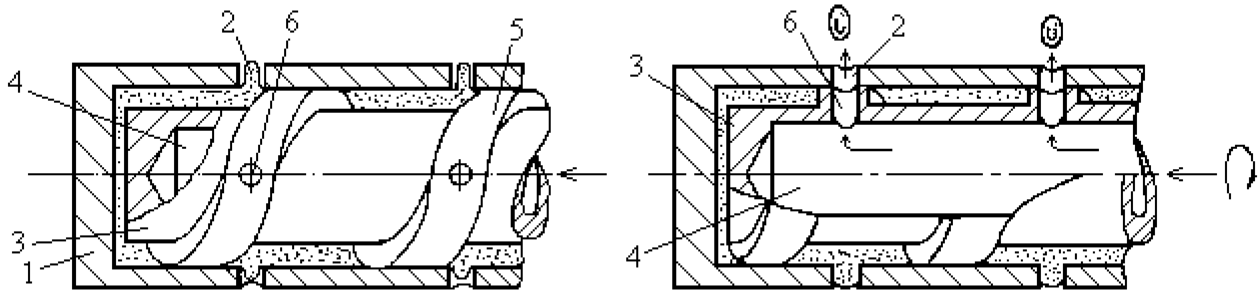
а б с

Рис .5.17. Схема роботи гранулятора Рейнгарда:
а – стадія заповнення формувального каналу; б – стадія відділення порції матеріалу; с – стадія виштовхування гранули

Після заповнення перероблюваним матеріалом певної ділянки формувального каналу, що відповідає довжині гранул, опорна плита 5 разом з патрубком 6 переміщується на відстань **Δx**, розмикаючи площину рознімання 8 між торцевими поверхнями патрубка 6 і філь'єри 1, таким чином відкриваючи кільцевий канал між порожниною високого тиску 4 і поверхнею полімерного матеріалу.

У результаті значного перепаду тиску циліндрична поверхня розплаву полімеру стискується й перерізається. У наступній стадії опорна плита 5 з патрубком 6 займає своє початкове положення, замикаючи площину рознімання 8. При цьому повітря, яке знаходиться між основною масою матеріалу, що розміщена в живильному каналі 7, і відрізаною частиною матеріалу, яка знаходиться у формувальному каналі 2, за рахунок надлишкового тиску виштовхує матеріал з формувального каналу 2 у вигляді гранули 9. У ролі енергетичного агента для розрізання матеріалу може також служити й вода. При цьому тиск для виштовхування гранули буде підсилюватися за рахунок агрегатного переходу води в пару.

У роботі [50] була розроблена конструкція системи пневмогранулювання полімерних матеріалів стосовно до черв'ячних екструдерів. Схема даної системи представлена на рис. 5.18.



а **б**

Рис. 5.18. Система пневмогранулювання на базі черв'ячного екструдера:
а – загальний вид; б – фаза виштовхування;
1 – корпус; 2 – формувальні отвори; 3 – черв'як; 4 – осьовий канал; 5 – гребені гвинтової нарізки; 6 – радіальні отвори

У процесі роботи згідно з рис. 5.18 полімерний матеріал транспортується гвинтовою нарізкою 5, створюючи при цьому певний тиск, за рахунок якого полімерний матеріал втискується у формувальні отвори 2. При перекриванні гребенями гвинтової нарізки 5 формувальних отворів 2, надходження матеріалу в останні завершується. Остання фаза циклу відбувається при суміщенні отворів 2 і 6, у результаті чого відбувається виштовхування гранул стисненим повітрям, як показано на рис. 5.18,б. При цьому слід зауважити, що при видаленні матеріалу із формувальних отворів одного ряду, формувальні отвори інших рядів заповнюються перероблюваним матеріалом (на рис. 5.18 показано два ряди формувальних отворів).

Необхідно зауважити, що в результаті руху матеріалу вздовж гвинтової нарізки виникає перепад тиску. Цей перепад призводить до різної об'ємної швидкості матеріалу через формувальні отвори, які розміщені вздовж одного ряду.

З метою зменшення градієнта тиску в роботі [51] запропоновано в гребенях нарізки виконувати поздовжні пази, як показано на рис. 5.19.

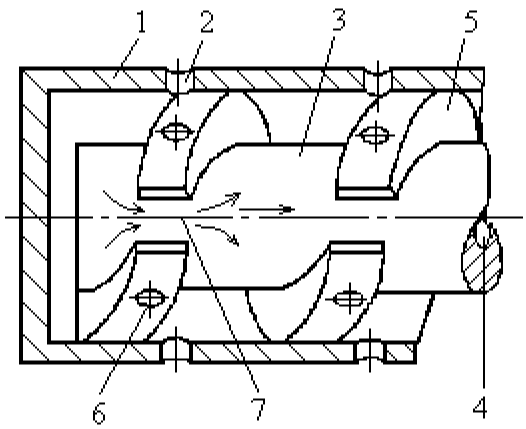


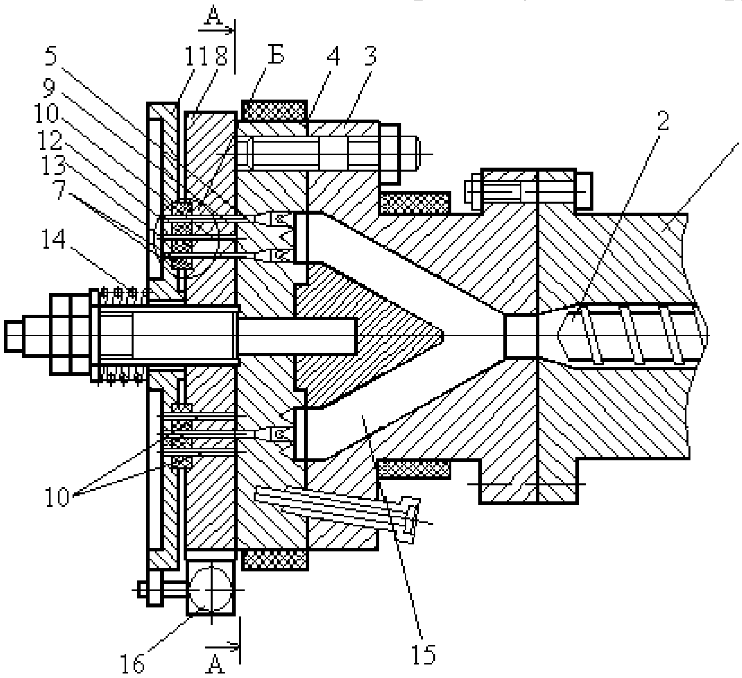
Рис. 5.19. Система пневмогранулювання з поздовжніми пазами в гребенях гвинтової нарізки:
1 – корпус; 2 – формувальні отвори; 3 – черв'як; 4 – осьовий канал; 5 – гребені гвинтової нарізки; 6 – радіальні отвори; 7 – поздовжній паз

У роботі [52] розроблена конструкція гранулятора з пневмоформуванням гранул, яка дозволяє повністю уникнути перепаду тиску у формувальних отворах і, таким чином, зменшити розкидання в гранулометричному складі продукту. Схема даної конструкції показана на рис. 5.20.

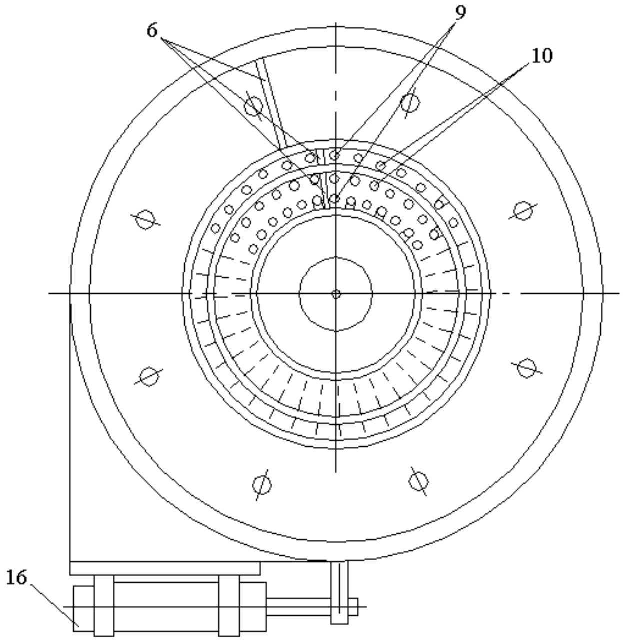
У процесі роботи гранулятора згідно з рис. 5.20 екструдер 1 за допомогою черв'яка 2 підводить розплав полімеру в робочий об'єм 15 головки 3. Звідки через живильні канали 5, які розміщені у філь'єрі 4, полімер надходить у перехідні канали 9, що виконані в нерухомому елементі 8. Останнім відрізком шляху розплаву є формувальні отвори 12 і 13, які розміщені в повертальному фланці 11. У нерухомому елементі 8 виконані також канали для стисненого повітря (радіальні 6 й осьові 10), призначені для видалення порцій матеріалу у вигляді гранул з формувальних отворів 12.

Слід відзначити, що перехідні канали 9 й осьові канали 10 для енергоносія в нерухомих елементах 8 розміщені почергово за концентричними колами, як показано на рис. 5.20,б.

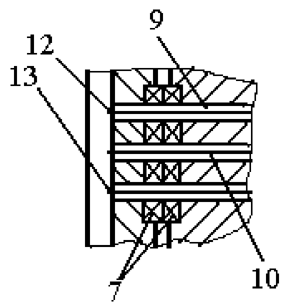
Після заповнення розплавом полімеру отворів 12 у повертальному фланці 11 привід 16 повертає фланець відносно осі на певний кут, який залежить від кількості отворів у концентричних колах, у результаті чого здійснюється відсікання порцій матеріалу у формувальних отворах, що визначає довжину гранул. У результаті повороту фланця 11 заповнені матеріалом отвори 12 суміщаються з осьовими каналами 10 і відбувається викидання матеріалу у вигляді гранул циліндричної форми. У цей же час формувальні отвори 13 суміщаються з перехідними каналами 9 і отвори 13 починають заповнюватися матеріалом. Після заповнення отворів 13 фланець 11 повертається в початкове положення. Пружина 14 призначена для щільного притискування фланця11 до нерухомого елемента 8. Для зменшення коефіцієнта тертя при коливальному русі фланця 11 і збільшення зносостійкості використовуються антифрикційні кільця 7.



а



б



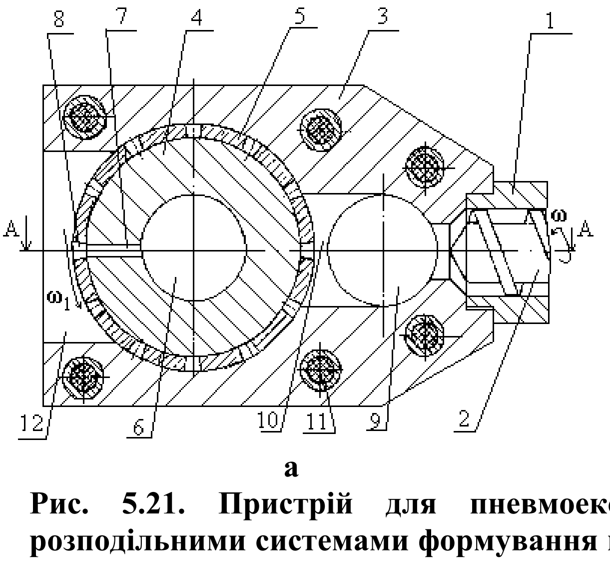
в

Рис. 5.20. Гранулятор з концентричним розміщенням формувальних отворів: а – загальний вид; б – переріз А-А; в – виноска Б: 1 – екструдер; 2 – черв'як; 3 – головка; 4 – філь'єра; 5 – живильні канали; 6 – радіальні канали для стисненого повітря; 7 – антифрикційні кільця; 8 – нерухомий елемент; 9 – перехідні канали; 10 – осьові канали для стисненого повітря; 11 – повертальний фланець; 12, 13 – формувальні отвори; 14 – пружина; 15 – робочий об'єм головки; 16 – привід

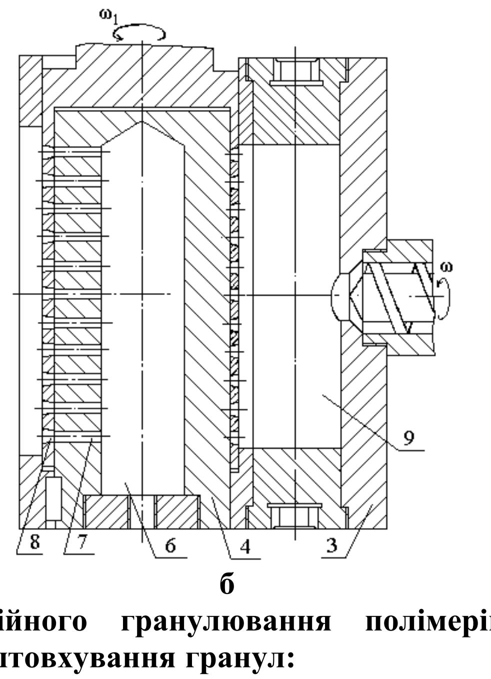
Основним недоліком вищенаведених конструкцій для пневмоформування гранул є жорсткі умови по узгодженню роботи систем нагнітання переробллюваного матеріалу й формування та виштовхування гранул. При незначному порушенні такої узгодженості з'являється різке розкидання в гранулометричному складі, а при значному зростанні тиску на вході у формувальні отвори розплав полімеру може вийти за межі останніх і налипнути на зовнішні поверхні гранулювальних пристроїв, що призводить до порушення всього технологічного процесу.

Усунення вищезгаданих недоліків було здійснено в роботі [53], де були роз'єднані система нагнітання й формування гранул з системою виштовхування гранул. Конструкція даного агрегату подана на рис. 5.21.

У процесі роботи згідно з рис. 5.21 полімерний матеріал черв'яком 2, який обертається з кутовою швидкістю **ω**, подається спочатку в колектор 9, а потім через живильний канал 10 потрапляє до зовнішньої поверхні формувального елемента 5 і заповнює формувальні отвори 8. Коли формувальні отвори виходять із зони живильного каналу 10, то порції розплаву, які знаходяться у формувальних отворах, відсікаються внутрішньою поверхнею корпусу 3. У момент часу, коли зовнішня поверхня формувальних отворів відкриється й почне контактувати із зовнішнім середовищем 12, відбувається попереднє охолодження гранул. Крім того, при значній швидкості $\boldsymbol{\omega_1}$ ротора виникають відцентрові сили, які намагаються відірвати гранули від поверхні формувального каналу, що дає змогу зменшити тиск енергоносія при виштовхуванні гранул у момент співпадіння формувальних отворів 8 з радіальними каналами 7 для підведення стисненого повітря. У даній конструкції система формування гранул, яка містить живильний канал 10 і формувальні отвори 8 не зв'язана із зовнішнім середовищем 12 і, таким чином, пульсації тиску розплаву не впливають на розміри гранул, які при будь-яких параметрах залишаються постійними.



а



б

Рис. 5.21. Пристрій для пневмоекструзійного гранулювання полімерів з розподільними системами формування й виштовхування гранул:
а – загальний вид; б – розріз А-А:
1 – корпус екструдера; 2 – черв'як; 3 – корпус гранулятора; 4 – мундштук; 5 – формувальний елемент; 6 – осьова порожнина для підведення стисненого повітря; 7 – радіальні канали для стисненого повітря; 8 – формувальні отвори; 9 – колектор; 10 – живильний канал; 11 – нагрівачі; 12 – зовнішнє середовище

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Торнер Р.В., Акутин М.С. Оборудование заводов по переработки пластмасс. – М.: Химия, 1986. – 400 с.
2. Кузяєв І.М. Оптимізація температурно-силового поля в зоні живлення черв'ячного екструдера // Вопр. химии и хим. технол. – 2002. – №4. – С. 129 – 133.
3. Диткин В.А., Прудников А.П. Операционное исчисление. – М.: Высш. шк., 1966. – 406с.
4. Диткин В.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. – М.: Наука, 1974. – 544 с.
5. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. – М.: Наука, 1973. – 736с.
6. Кузяев И.М. Анализ взаимосвязи между коэффициентами трения и давлением с учетом температурного поля при транспортировке материалов в винтовом канале червячных машин // Трение и износ – 2002. – Vol.23. – №2. – С. 154-159.
7. Кузяев И.М., Сытар В.И. Сафронова И.В. Моделирование температурного поля в системе корпус – полимерный материал – сердечник червяка для зоны питания одночервячного экструдера // Вопр. химии и хим. технол. – 2004. – № 2. – С.198-204.
8. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1970. – 624с.
9. Кузяев И.М. Анализ процессов плавления полимерных материалов в червячных экструдерах // Вопр. химии и хим. технологии. – 2003. – №3. – С.
10. Tadmor Z, Klein I. Engineering principles of plasticating extrusion. – N. – Y: Van Nastrand Reinhold Company, 1970. – 500 p.
11. Кузяєв І.М. Моделювання неізотермічних процесів в робочому об`ємі черв`ячних насосів для аномально в'язких рідин // Вопросы хим. и хим. технологии. – 2002. – №2. – С.107-112.
12. Кузяев И.М. Интенсификация процессов тепломассопереноса в рабочем канале червячных машин при переработке неньютоновских полимерных жидкостей // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т.26 – №1. – С.25-31.
13. Кузяєв І.М. Механіка та реологія полімерів. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2002. – 386 с.
14. Кузяев И.М. Моделирование процессов плавления термопластов в экструзионных агрегатах // Вопр. химии и хим. технологии. – 2003. – № 4. – С.145-149.
15. Кузяєв І.М. Моделювання процесів, які відбуваються в зоні плавлення одночерв'ячних екструдерів при наявності конусного осердя / Вопр. химии и хим. технологии. – 2004. – № 5. С.152-156.

16. Кузяєв І.М. Моделювання процесів, які відбуваються у дисковому зазорі черв'ячно-дискових екструдерів //Вопр. химии и хим. технол. – 2002. – №6. – С.145-149.
17. Математичне моделювання процесів у міждискових зазорах черв'ячно-дискових екструдерів. Частина 1: Розрахунок енергосилових характеристик / І.М. Кузяєв, І.І. Начовний, Є.О. Богуцька, М.С. Хорольський // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. Ін-т геотехнічної механіки НАН України. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 46. – С.47-59.
18. Математичне моделювання процесів у міждискових зазорах черв'ячно-дискових екструдерів. Частина 2: Розрахунок температурного поля / І.М. Кузяєв, І.І. Начовний, Є.О. Богуцька, М.С. Хорольський // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. Ін-т геотехнічної механіки НАН України. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 46. – С.60-73.
19. Кузяев И.М. Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в агрегатах с рабочими пространствами между двумя дисками при переработке жидких сред // Промышленная теплотехника. – 2003. – Vol.25. – № 5. – С.17-24
20. Кузяев И.М. Анализ диссипативных процессов, развивающихся в пространстве между вращающимся и неподвижным дисками, с учетом внутреннего и внешнего трения // Трение и износ. – 2002. – Vol.23. – №6. – С.635-639.
21. А.с. 757339 СССР, МКИ В 29 F 3/02. Экструдер-смеситель для полимерных материалов / Г.П. Воедило, Ф.П. Смиян, В.А. Масич (СССР). – № 2605770/23-05; Заявлено 11.04.78; Опубл. 23.03.80, Бюл. № 31. – 4 с.
22. А.с. 960038 СССР, МКИ В 29 F 3/02. Шнековый экструдер / С.В. Портненко, И.М. Кузяев, В.А. Успенский и др. (СССР). – № 3225178/23-05; Заявлено 26.12.80; Опубл. 23.09.82, Бюл. № 35. – 3 с.
23. А.с. 897554 СССР , МКИ В 29 F 3/02. Червячный экструдер для полимерных материалов / В.А. Успенский, И.М. Кузяев, С.В. Портненко, И.И. Начовный (СССР). – № 2913241/23-05; Заявлено 17.04.80; Опубл. 15.01.82, Бюл. № 2.– 4 с.
24. А.с. 903172 СССР, МКИ В 29 F 3/02. Червячный экструдер для полимерных материалов / И.М. Кузяев, Н.И. Шишков, В.А. Успенский, Н.В. Довгопол (СССР). – № 2943317/23-05; Заявлено 23.06.80; Опубл. 07.02.82, Бюл. № 5. – 5 с.
25. Пат. 688112 СССР, МКИ В 29 F 3/02. Червячный экструдер для переработки полимерных материалов / Шарль Майллефер (Швейцария); Майллефер С.А. – № 2377638/05; Заявлено 30.06.76; Опубл. 25.09.79, Бюл. № 35. – 4 с.
26. А.с. 939270 СССР, МКИ В 29 F 3/02. Червячный экструдер для полимерных материалов / С.В. Портненко, И.М. Кузяев,

Ю.А. Кузнецов, В.Н. Ткач (СССР). – № 3224680/23-05; Заявлено 26.12.80; Опубл.30.06.82, Бюл. № 24. – 3 с.
27. А.с. 887235 СССР, МКИ В 29 F 3/02. Червячная машина для переработки полимерных материалов / С.В. Портненко, И.М. Кузяев, В.А. Успенский, Ю.А. Кузнецов и др. (СССР). – № 2885721/23-05; Заявлено 20.08.80; Опубл. 07.12.81, Бюл. № 45. – 3 с.
28. Пат. 14948 Україна, МКИ В 29 В 7/40. Пристрій для змішування та пластикації полімерних матеріалів / І.М. Кузяєв, Д.В. Руденко, І.Г.Плошенко, В.В. Лимар (Україна). – № 96072872; Заявлено 17.07.96; Опубл. 30.06.97; Бюл. № 3. – 5 с.
29. А.с. 1781052 СССР, МКИ В 29 В 7/40. Динамический гомогенизатор расплавов полимеров / Л.М. Бедер, В.В. Шевченко, В.Б. Жаров (СССР). – № 4901385/05; заявлено 09.01.91; Опубл. 15.12.92; Бюл. № 46. – 3 с.
30. Янков В.И. Исследование и разработка методов расчета шнековых насосов и аппаратов непрерывного растворения полимеров в производстве синтетических волокон: Дис. д-ра техн. наук: 05.04.09. Калинин, 1980. – 450с.
31. Пат. 2388668 Франция, МКИ В 29 F 3/02. Vis pour extrudeuse / John Shhau, Tze-Hsu (Франция); Ingersoll-Rand Company. – № 7812742; Заявл. 29.04.77; Опубл. 24.11.78.–12 с.
32. Пат. 2411079 Франция, МКИ В 29 F 3/02. Perfectionnements aux vis pour machines extruder / Michael Ian Iddon, Donald Milne Turner (Франция); Iddon Brothers Limited. – № 7832046; Заявл. 8.12.77; Опубл. 06.07.79. – 8 с.
33. Пат. 3751015 США, МКИ В 29 f 3/01. Screw extruder with radially projecting pins / Fredhein Hensen, Hans Slemetzki, Egon Gathmann (ФРГ); Barmag Barmer Maschinenfabrik Aktiengesellschaft. – № 155458; Заявл. 22.06.71; Опубл. 07.08.73; НКИ 259/191. – 8 с.
34. А.с. 763130 СССР, МКИ В 29 F 3/02. Червяк экструдера / Е.П. Бармашин, П.А. Войтушенко, Т.И. Коношевич и др. (СССР). – № 2628935/23-05; Заявлено 16.06.78; Опубл. 15.09.80, Бюл. № 34 – 3 с.
35. Пат. 3730492 США, МКИ В 29 f 3/00. Mixing of thermoplastic materials / Bruce H, Maddock, Fanwood N.J. (США); Union Carbide Corporation. – № 154011
36. Силин В.А. Динамика процессов переработки пластмасс в червячных машинах. – М.: Машиностроение, 1972. – 150 с.
37. Техника переработки пластмасс / Н.И. Басов, В. Брой, В.С. Ким и др. / Под ред. Н.И. Басова и В. Броя. – М.: Химия, 1985. – 528 с.
38. Пат. 3633494 США, МКИ В 29 f 3/02. Screw extruders with baffle plates and expeller bodies / Heinz Schippers, Hans Siemetzki (Германия); Barmag Barmer Maschinenfabrik Aktiengesellschaft Wuppertal. – № 39020; Заявл. 28.05.69; Опубл. 11.01.72; НКИ 100/90. – 6 с.

39. Пат. 4171196 США, МКИ B 29 F 3/02. Screw-type plastics extruder / Charles Maillefer (Швейцария); Maillefer S.A. – № 951787; Заявл. 16.11.78; Опубл. 16.11.79; НКИ 425/209. – 6 с.
40. Пат. 538654 СССР, МКИ B 29 B 1/02. Устройство для гранулирования полимерных материалов / Масхо Нагахара, Масатэру Тацудан, Ёсихиро Хидака (Япония); Джапан Стил Воркс. – № 2097839/05; Заявлено 07.01.75; Опубл. 05.12.76, Бюл. № 45. – 5 с.
41. А.с. 634959 СССР, МКИ B 29 B 1/02. Устройство для гранулирования полимерных материалов в водной среде / Л.В. Ромушкевич, И.В. Скрипко (СССР). – № 2437258/23-05; Заявлено 03.01.77; Опубл. 30.11.78, Бюл. № 44. – 3 с.
42. А.с. 514707 СССР, МКИ B 29 B 1/02. Устройство для гранулирования термопластов / Г.А. Гавриленко, Г.В. Головизнин, Е.В. Матвиенко и др. (СССР). – № 2042665/23-05; Заявлено 11.07.74; Опубл. 25.05.76, Бюл. № 19. – 3 с.
43. А.с. 552202 СССР, МКИ B 29 B 1/02. Устройство для гранулирования термопластов в водяной среде / И.В. Скрипко, В.С. Ким (СССР). – № 2159053/05; Заявлено 16.07.75; Опубл. 30.03.77, Бюл. № 12. – 2 с.
44. А.с. 614956 СССР, МКИ B 29 B 1/02. Устройство для гранулирования термопластичных полимерных материалов / И.В. Скрипко (СССР). – № 2441145/23-05; Заявлено 05.01.77; Опубл. 15.07.78, Бюл. № 26. – 2 с.
45. А.с. 1242386 СССР, МКИ B 29 B 9/06. Гранулирующее устройство / В.И. Ермаков, Г.М. Кошелев, У.А. Мамедов и др. (СССР). – № 3849003/23-05; Заявлено 28.01.85; Опубл. 07.07.86, Бюл. № 25. – 2 с.
46. Пат. DE 2814113 С 2 ФРГ, МКИ B 29 B 1/02. Vorrichtung zum granulieren von kunststoffsträngen / Friedrich Lambertus (Германия); Werner & Pfleiderer, 7000 Stuttgart. – № P 2814113.1-16; Заявл. 01.04.78; Опубл. 04.10.79. – 9 с.
47. А.с. 1087343 СССР, МКИ B 29 B 1/02. Устройство для гранулирования и охлаждения полимерных материалов / З.Я. Камыс (ПНР). – № 3528160/23-05; Заявлено 29.12.82; Опубл. 23.04.84, Бюл. № 15. – 4 с.
48. Заявка 2160814 Великобритания, МКИ B 29 B 9/06. Pellestising device / Marc Anthony Rizzi, James Cutarelli (США); USM Corporation. – № 8515616; Заявл. 20.06.85; Опубл. 02.01.86.– 6 с.
49. Заявка W 088/06961 PCT, МКИ B 29 B 9/06. Device for granulation melted and softened materials // Michael Reinhard (Германия); Heinz Bardehle. – № P 3708695.2; Заявл. 18.03.87; Опубл. 22.09.88. – 17 с.
50. А.с. 1528551, МКИ B 01 J 2/20. Гранулятор / В.В. Немков, В.Ф. Гулин, В.Е. Максюта, И.М. Кузяев (СССР). – № 4334681/23-26; Заявлено 30.11.87; Опубл. 15.12.89, Бюл. № 46. – 2 с.
51. А.с. 1632482, МКИ B 01 J 2/20. Гранулятор / В.В. Немков, В.Ф. Гулин, В.Е. Максюта, И.М. Кузяев (СССР). – № 4684780/26; Заявлено 15.03.89; Опубл. 07.03.91, Бюл. № 9. – 2 с.

52. Пат. 17138А Україна, МКИ В 29 В 9/06. Гранулятор / І.М. Кузяєв, А.М. Семенюк, І.Г. Плошенко та ін. (Україна). – № 96072870; Заявл. 17.07.96; Опубл. 31.10.97, Бюл. № 5. – 2 с.
53. Пат. 50309А Україна, МКИ В 29 В 9/06. Пристрій для пневмоекструзійного гранулювання полімерів / І.М. Кузяєв (Україна). – № 2001128773; Заявл. 18.12.01; Опубл. 15.10.02, Бюл. № 10. – 3 с.