

А.О. Данькевич, аспірант
А.І. Жученко, д.т.н., проф.
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Дискретна математична модель екструдера з варійованими потужностями нагрівачів та динамічним фазовим розподілом полімеру

Постійний ріст і розвиток суспільства сприяє збільшенню споживання, що призводить до розвитку виробництва, але також зростає конкуренція і вимоги до продукції. Товар високої якості можна отримати лише з використанням сучасних цифрових систем. Для синтезу яких необхідно проводити велику кількість експериментів на обладнанні, що призводить до значних збитків. Найкращим рішенням є створення моделей, що дозволяє отримувати результати швидко та без значних витрат на виробництві. У роботі отримано дискретну модель екструдера з варійованими потужностями нагрівачів у циліндричній системі координат з урахуванням розподілу температури по довжині для кожного з елементів, а також розподілу температури по радіусу корпусу і шнека. Модель дозволяє врахувати вплив теплового потоку кожного окремого нагрівача на зміну загального теплового поля. Враховано зміни теплоємності та густини відповідно до фазового складу полімеру. Також забезпечена динаміка фазового складу полімеру залежно від діючих теплових та матеріальних потоків. Розроблено алгоритм розрахунку фазового складу полімеру в залежності від попереднього значення та його температури. Отримана модель може бути використана для прогнозування якості готового полімерного виробу та синтезу системи керування з урахуванням дії різномірних збурень.

Ключові слова: екструзія; дискретна математична модель; розподілені параметри; циліндрична система координат.

Вступ. Метод неперервної черв'ячної екструзії є широкоживим методом виробництва різноманітної продукції для промисловості, сільського господарства, побуту. Широке застосування метод екструзії знайшов у харчовій промисловості. Ця обставина визначає актуальність розв'язання задачі підвищення ефективності даного процесу. Вказана задача може бути розв'язана на основі впровадження сучасних комп'ютерних систем керування, створенню яких передують етапи дослідження процесу екструзії.

Проте проведення експериментальних досліджень на реальних об'єктах продукує велику кількість браку і призводить до значної збитковості. У цих умовах єдиним альтернативним методом дослідження є метод математичного моделювання.

Всі техніко-економічні показники процесу, а також показники якості готової продукції визначаються температурним режимом процесу [14, с. 91; 2, с. 2250, 2251]. Тому створення математичної моделі температурного режиму є надзвичайно важливою і актуальною практичною задачею. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні дискретної математичної моделі процесу екструзії.

Аналіз попередніх досліджень. Створення математичних моделей теплового режиму роботи екструдера з урахуванням різних особливостей процесу присвячено достатньо робіт [1–12]. Так, в працях [1, с. 91; 6, с. 2, 3] тепла модель екструдера представлена у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з запізненням.

У дисертації Аль Таамнех Мохаммед Абдель Рахім [8, с. 56–58] тепла математична модель в екструдері представлена як сукупність аперіодичних ланок першого порядку із запізненням, на які діють зовнішні збурення (нагрівання нагрівачами та охолодження вентиляторам), також подана відповідними передатними функціями. Але модель не враховує наявності в об'єкті теплові потоки, що направлені у зворотному напрямі до руху полімеру, а також зміну енергії дисипації.

У статтях [3, с. 620; 5, с. 52, 54, 56, 58, 60, 65, 67; 4, с. 106–109] тепла модель екструдера представлена у вигляді передатних функцій вище другого порядку.

В дослідженні [2, с. 2553, 2554] математична модель температурного профілю має вигляд нелінійних регресивних рівнянь.

В роботі [11, с. 145] математична модель сформована в загальному вигляді і не розкриває сутності залежностей величин, а тільки ідентифікує ці величини. До того ж у системі відсутні граничні умови, або вони представлені в узагальнених функціях. У подальшому модель була розглянута в просторі станів.

В праці [7, с. 134–138] математична модель теплового процесу в екструдері була подана у просторі станів з урахуванням запізнення для розрахунку температури в 4-х зонах екструдера. Коефіцієнти моделі дані в загальному випадку, що унеможливило аналіз врахування дії внутрішніх і зовнішніх збурень.

Усі вище описані математичні моделі дозволяють визначити температуру лише в ключових точках і не дають можливості побудувати й дослідити динаміку температурних полів усього екструдера і його складових.

Математична модель, представлена в роботах [12, с. 109–113; 10, с. 61–76], не враховує внутрішні теплові потоки в кожному окремому нагрівачі та втрати тепла в оточуюче середовище. Також не було враховано розподіл температури вздовж шнека, доцільність врахування якої зумовлена наявністю значної різниці між температурою охолоджуючої води і полімером.

У статті [9, с. 118–120] математична модель теплового режиму процесу екструзії зображена у вигляді системи диференціальних рівнянь у частинних похідних, що ускладнює програмування моделі для її розрахунку. Тому метою цієї статті є створення дискретної математичної моделі теплових режимів одночерв'ячного екструдера.

Екструдер як об'єкт математичного моделювання.

Екструдер як об'єкт математичного моделювання представлений на рисунку 1.

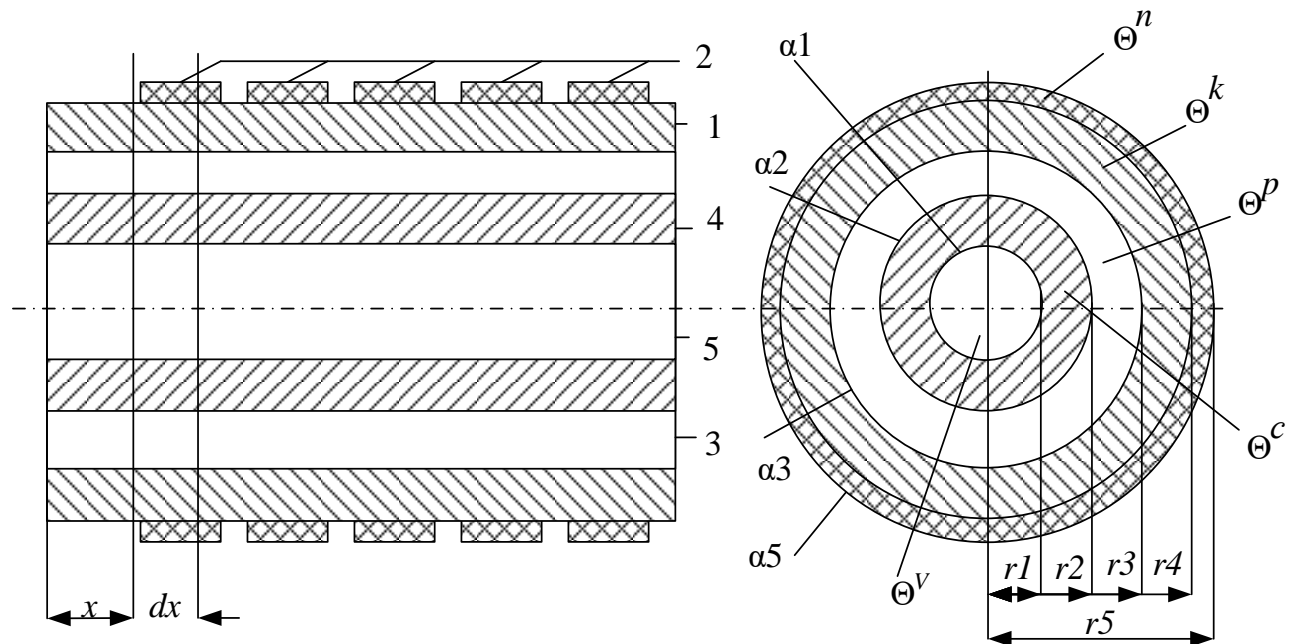


Рис. 1. Схема екструдера як об'єкта математичного моделювання

1 – корпус циліндра екструдера; 2 – нагрівачі; 3 – полімер; 4 – шнек; 5 – охолоджувальна рідина; dx – елементарний об'єм; θ^n – температура нагрівача; θ^k – температура корпусу екструдера; θ^p – температура полімеру; θ^c – температура черв'яка (шнека); θ^v – температура охолоджуючої рідини; $\alpha 1$ – коефіцієнт тепловіддачі від черв'яка до охолоджуючої рідини; $\alpha 2$ – коефіцієнт тепловіддачі від полімеру до черв'яка; $\alpha 3$ – коефіцієнт тепловіддачі від корпусу до полімеру; $\alpha 5$ – коефіцієнт тепловіддачі від нагрівача до повітря; $r 1$ – внутрішній радіус черв'яка; $r 2$ – еквівалентний зовнішній радіус черв'яка; $r 3$ – внутрішній радіус корпусу; $r 4$ – зовнішній радіус корпусу; $r 5$ – зовнішній радіус нагрівача;

Як видно з рисунку 1 екструдер представлений як об'єкт, що складається з таких типових ємностей: нагрівачі, корпус екструдера, полімер, шнек, охолоджувальна рідина. Для створення повної моделі екструдера потрібно математично описати усі складові об'єкта моделювання. У [9, с. 118–120] представлена неперервна математична модель екструдера. На її основі побудуємо дискретну модель.

Нагрівач

Рівняння, що описує динаміку теплових процесів нагрівачів, має вигляд [9, с. 118]:

$$\frac{\partial \theta^n(x,t)}{\partial t} = b_1 \cdot Q^n(x,t) - b_2 \left. \frac{\partial \theta^k(r,x,t)}{\partial r} \right|_{r=r_4} - b_3(\theta^n(x,t) - \theta^{os}) + b_4 \frac{\partial^2 \theta^n(x,t)}{\partial x^2},$$

де Q^n – потужність 1-го нагрівача, b_1 , b_2 , b_3 , b_4 – відповідні коефіцієнти рівняння динаміки теплового процесу нагрівачів, θ^{os} – температура оточуючого середовища.

Застосовуючи метод кінцевих різниць [13, с. 17, 18], у дискретній формі отримаємо:

$$\frac{(\theta_{s,\vartheta+1}^n - \theta_{s,\vartheta}^n)}{\tau} = b_1 \cdot Q_{s,\vartheta}^n - b_2 \frac{\theta_{mkr2,s,\vartheta}^k - \theta_{mkr2-1,s,\vartheta}^k}{h_{r2}} - b_3(\theta_{s,\vartheta}^n - \theta^{os}) + b_4 \frac{(\theta_{s+1,\vartheta}^n - \theta_{s,\vartheta}^n) - (\theta_{s,\vartheta}^n - \theta_{s-1,\vartheta}^n)}{h_x^2},$$

де s – крок за довжиною апарата, ϑ – крок за часом, τ – стала часу (період дискретизації), $mkr2$ – кількість кроків по радіусу для корпусу екструдера, h_{r2} – величина кроку по радіусу для корпусу екструдера, h_x – величина кроку по довжині екструдера.

Виразивши з останнього рівняння $\theta_{s,\vartheta+1}^n$, перегрупувавши та звівши подібні доданки отримаємо:

$$\theta_{s,\vartheta+1}^n = \left(1 - b_3\tau - \frac{2 \cdot b_4 \cdot \tau}{h_x^2}\right) \theta_{s,\vartheta}^n + \frac{b_2 \cdot \tau}{h_{r2}} (\theta_{mkr2,s,\vartheta}^k - \theta_{mkr2-1,s,\vartheta}^k) + b_1 \cdot \tau \cdot Q_{s,\vartheta}^n + b_3 \cdot \tau \cdot \theta^{os} + \frac{b_4 \cdot \tau}{h_x^2} \theta_{s+1,\vartheta}^n + \frac{b_4 \cdot \tau}{h_x^2} \theta_{s-1,\vartheta}^n, \quad (1)$$

У якому $Q_{s,\vartheta}^n$ визначають як:

$$Q_{s,\vartheta}^n = \begin{cases} Q_{1,\vartheta}^n, & 0 \leq s \leq m_n - 1, \\ Q_{2,\vartheta}^n, & m_n \leq s \leq 2 \cdot m_n - 1, \\ \dots & \dots \\ Q_{N,\vartheta}^n, & (N-1) \cdot m_n \leq s \leq N \cdot m_n - 1. \end{cases}$$

де m_n – кількість кроків по довжині одного нагрівача.

Рівняння, що описують граничні умови динаміки теплових процесів нагрівачів, має вигляд [9, с. 118]:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial \theta^n(x, t)}{\partial x} \right|_{xp} = 0, \\ \left. \frac{\partial \theta^n(x, t)}{\partial x} \right|_{xk} = 0, \end{cases}$$

де x_p і x_k – значення координати початку і кінця i -го нагрівача.

В дискретному вигляді граничні умови будуть мати такий вигляд.

Для першого нагрівача:

$$\begin{cases} -\lambda_n \frac{\theta_{1,\vartheta+1}^n - \theta_{0,\vartheta+1}^n}{h_x} = 0, \\ \lambda_n \frac{\theta_{m_n-1,\vartheta+1}^n - \theta_{m_n-2,\vartheta+1}^n}{h_x} = 0, \end{cases}$$

де λ_n – коефіцієнт теплопровідності нагрівача.

Для другого нагрівача:

$$\begin{cases} -\lambda_n \frac{\theta_{m_n+1,\vartheta+1}^n - \theta_{m_n,\vartheta+1}^n}{h_x} = 0, \\ \lambda_n \frac{\theta_{2 \cdot m_n-1,\vartheta+1}^n - \theta_{2 \cdot m_n-2,\vartheta+1}^n}{h_x} = 0. \end{cases}$$

Для i -го нагрівача:

$$\begin{cases} -\lambda_n \frac{\theta_{(i-1)m_n+1,\vartheta+1}^n - \theta_{(i-1)m_n,\vartheta+1}^n}{h_x} = 0, \\ \lambda_n \frac{\theta_{i \cdot m_n-1,\vartheta+1}^n - \theta_{i \cdot m_n-2,\vartheta+1}^n}{h_x} = 0. \end{cases}$$

Враховавши, що λ_n і h_x не дорівнюють нулю, отримаємо:

Для першого нагрівача:

$$\begin{cases} \theta_{0,\vartheta+1}^n = \theta_{1,\vartheta+1}^n, \\ \theta_{m_n-1,\vartheta+1}^n = \theta_{m_n-2,\vartheta+1}^n. \end{cases}$$

Для другого нагрівача:

$$\begin{cases} \theta_{m_n,\vartheta+1}^n = \theta_{m_n+1,\vartheta+1}^n, \\ \theta_{2 \cdot m_n-1,\vartheta+1}^n = \theta_{2 \cdot m_n-2,\vartheta+1}^n. \end{cases}$$

Для i -го нагрівача:

$$\begin{cases} \theta_{(i-1)m_n,\vartheta+1}^n = \theta_{(i-1)m_n+1,\vartheta+1}^n, \\ \theta_{i \cdot m_n-1,\vartheta+1}^n = \theta_{i \cdot m_n-2,\vartheta+1}^n, \end{cases} \quad (2)$$

Корпус екструдера

Рівняння, що описує динаміку теплових процесів корпусу екструдера, у неперервній формі має вигляд [9, с. 118]:

$$\frac{\partial \theta^k(r, x, t)}{\partial t} = a_k \left(\frac{\partial^2 \theta^k(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta^k(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta^k(r, x, t)}{\partial x^2} \right),$$

де a_k – коефіцієнт теплопровідності корпусу екструдера.

Застосовуючи метод кінцевих різниць [13, с. 17, 18], в дискретній формі отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{z,s,\vartheta+1}^k - \theta_{z,s,\vartheta}^k}{\tau} = a_k \left[\frac{\theta_{z+1,s,\vartheta}^k - 2\theta_{z,s,\vartheta}^k + \theta_{z-1,s,\vartheta}^k}{h_{r2}^2} + \frac{1}{r_3+z \cdot h_{r2}} \left(\frac{\theta_{z+1,s,\vartheta}^k - \theta_{z,s,\vartheta}^k}{h_{r2}} + \frac{\theta_{z,s,\vartheta}^k - \theta_{z-1,s,\vartheta}^k}{h_{r2}} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\theta_{z,s+1,\vartheta}^k - 2\theta_{z,s,\vartheta}^k + \theta_{z,s-1,\vartheta}^k}{hx^2} \right], \end{aligned}$$

де z – крок по радіусу апарата.

Ліву і праву частину помножимо на τ і запишемо відносно $\theta_{z,s,\vartheta+1}^k$, тоді отримаємо:

$$\theta_{z,s,\vartheta+1}^k = \theta_{z,s,\vartheta}^k + a_k \tau \left[\frac{\theta_{z+1,s,\vartheta}^k - 2\theta_{z,s,\vartheta}^k + \theta_{z-1,s,\vartheta}^k}{h_{r2}^2} + \frac{1}{r_3+z \cdot h_{r2}} \left(\frac{\theta_{z+1,s,\vartheta}^k - \theta_{z-1,s,\vartheta}^k}{2 \cdot h_{r2}} \right) + \frac{\theta_{z,s+1,\vartheta}^k - 2\theta_{z,s,\vartheta}^k + \theta_{z,s-1,\vartheta}^k}{hx^2} \right].$$

Розкривши дужки і згрупувавши доданки, отримаємо:

$$\theta_{z,s,\vartheta+1}^k = b_{14} \cdot \theta_{z,s,\vartheta}^k + b_{15} \cdot \theta_{z+1,s,\vartheta}^k + b_{16} \cdot \theta_{z-1,s,\vartheta}^k + b_{17} \cdot \theta_{z,s+1,\vartheta}^k + b_{17} \cdot \theta_{z,s-1,\vartheta}^k, \quad (3)$$

де

$$\begin{aligned} b_{14} = \left(1 - \frac{2a_k \tau}{h_{r2}^2} - \frac{2a_k \tau}{hx^2} \right), \quad b_{15} = \left(\frac{a_k \tau}{h_{r2}^2} + \frac{a_k \tau}{2 \cdot h_{r2} (r_3+z \cdot h_{r2})} \right), \quad b_{16} = \left(\frac{a_k \tau}{h_{r2}^2} - \frac{a_k \tau}{2 \cdot h_{r2} (r_3+z \cdot h_{r2})} \right), \\ b_{17} = \frac{a_k \tau}{hx^2}. \end{aligned}$$

Рівняння, що описує граничну умову для зовнішньої поверхні корпусу екструдера, набуде вигляду [9, с. 118]:

$$\theta^k(r, x, t) = \theta^n(x, t).$$

У дискретній формі гранична умова матиме вигляд:

$$\theta_{mkr2,s,\vartheta+1}^k = \theta_{s,\vartheta+1}^n. \quad (4)$$

Рівняння, що описує граничну умову для внутрішньої поверхні корпусу екструдера, буде виглядати як [9, с. 118]:

$$-\lambda_k \left. \frac{\partial \theta^k(r, x, t)}{\partial r} \right|_{r=r_3} = \alpha_3 \left(\theta^p(x, t) - \theta^k(r, x, t) \right) \Big|_{r=r_3},$$

де λ_k – коефіцієнт теплопровідності матеріалу корпусу екструдера.

В дискретній формі гранична умова матиме вигляд:

$$\lambda_k \frac{\theta_{1,s,\theta+1}^k - \theta_{0,s,\theta+1}^k}{h_{r2}} = \alpha_3 (-\theta_{s,\theta+1}^p + \theta_{0,s,\theta+1}^k).$$

Розкриємо дужки і перенесемо в одну сторону $\theta_{0,s,\theta+1}^k$, а решту в іншу:

$$\left(\frac{\lambda_k}{h_{r2}} + \alpha_3\right) \theta_{0,s,\theta+1}^k = \alpha_3 \theta_{s,\theta+1}^p + \frac{\lambda_k}{h_{r2}} \theta_{1,s,\theta+1}^k.$$

Виразимо $\theta_{0,s,\theta+1}^k$ та спростимо вираз, таким чином отримаємо:

$$\theta_{0,s,\theta+1}^k = b_{18} \cdot \theta_{s,\theta+1}^p + b_{19} \cdot \theta_{1,s,\theta+1}^k. \quad (5)$$

де

$$b_{18} = \frac{\alpha_3 h_r}{\lambda_k + \alpha_3 h_{r2}}, \quad b_{19} = \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \alpha_3 h_{r2}}.$$

Рівняння, що описує граничні умови на торцях корпусу екструдера, прийме форму [9, с. 118]:

$$\begin{cases} -\lambda_k \frac{\partial \theta^k(r, x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \\ -\lambda_k \frac{\partial \theta^k(r, x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0. \end{cases}$$

У дискретній формі гранична умова, матиме вигляд:

$$\begin{cases} -\lambda_k \frac{\theta_{z,1,\theta+1}^k - \theta_{z,0,\theta+1}^k}{h_x} = 0, \\ \lambda_k \frac{\theta_{z,m_x,\theta+1}^k - \theta_{z,m_x-1,\theta+1}^k}{h_x} = 0. \end{cases}$$

А оскільки $h_x \neq 0$ і $\lambda_k \neq 0$ тоді маємо:

$$\begin{cases} \theta_{z,0,\theta+1}^k = \theta_{z,1,\theta+1}^k, \\ \theta_{z,m_x,\theta+1}^k = \theta_{z,m_x-1,\theta+1}^k. \end{cases} \quad (6)$$

Полімер

Для зони нагрівання:

У [9, с. 119] показано, що рівняння, яке описує динаміку теплових процесів для твердого полімеру у неперервній формі має вигляд:

$$\frac{\partial \theta^p(x,t)}{\partial t} = -V^p(t) \frac{\partial \theta^p(x,t)}{\partial x} + b_5 Q^d(x,t) + b_6 \frac{\partial \theta^k(r,x,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_3} - b_7 \frac{\partial \theta^c(r,x,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_2},$$

де V^p – масова витрата твердого полімеру вздовж осі руху полімеру, b_5, b_6, b_7 – відповідні коефіцієнти рівняння динаміки теплового процесу для твердого полімеру.

Застосовуючи метод кінцевих різниць [13, с. 17, 18], в дискретній формі отримаємо:

$$\frac{\theta_{s,\theta+1}^p - \theta_{s,\theta}^p}{\tau} = -V_{s,\theta}^p \frac{\theta_{s,\theta}^p - \theta_{s-1,\theta}^p}{h_x} + b_5 Q_{s,\theta}^d + b_6 \frac{\theta_{1,s,\theta}^k - \theta_{0,s,\theta}^k}{h_{r2}} - b_7 \frac{\theta_{mkr1,s,\theta}^c - \theta_{mkr-1,s,\theta}^c}{h_{r1}},$$

де $mkr1$ – кількість кроків по радіусу черв'яка для екструдера, h_{r1} – величина кроку по радіусу черв'яка екструдера.

Виразивши з останнього рівняння $\theta_{s,\theta+1}^p$, перегрупувавши та звівши подібні доданки, отримаємо:

$$\theta_{s,\theta+1}^p = \left(1 - \frac{\tau \cdot V_{s,\theta}^p}{h_x}\right) \theta_{s,\theta}^p + \frac{\tau \cdot V_{s,\theta}^p}{h_x} \theta_{s-1,\theta}^p + b_5 \cdot \tau \cdot Q_{s,\theta}^d + \frac{\tau \cdot b_6}{h_{r2}} (\theta_{1,s,\theta}^k - \theta_{0,s,\theta}^k) - \frac{\tau \cdot b_7}{h_{r1}} (\theta_{mkr1,s,\theta}^c - \theta_{mkr-1,s,\theta}^c). \quad (7)$$

Оскільки полімер знаходиться в твердому стані, то коефіцієнт вмісту розплаву в полімері $F_{s,\theta}^p = 0$ і маса розплавленого полімеру $m_{s,\theta}^r = 0$.

У процесі переробки виникає ситуація, коли температура $\theta_{s,\theta+1}^n$ стала вищою, за температуру плавлення полімеру θ^{pl} , що означає, що полімер вже почав плавитись. А тому надлишкове тепло витрачається не на підвищення температури, а на фазовий перехід у полімері. Маса розплавленого полімеру визначається як:

$$m_{s,\theta+1}^r = \frac{(\theta_{s,\theta+1}^p - \theta^{pl}) \cdot C_p \cdot \pi \cdot (r_3^2 - r_2^2) \cdot \rho_p \cdot h_x}{R^p}, \quad (8)$$

де ρ_p – густина полімеру, C_p – питома теплоємність полімеру, R^p – маса полімеру, що розплавляється за одиницю часу.

А величина фазової складової визначається як:

$$F_{s,\theta+1}^n = \frac{m_{s,\theta+1}^r}{\pi \cdot (r_3^2 - r_2^2) \cdot \rho_p \cdot h_x}. \quad (9)$$

Для зони плавлення:

У [9, с. 119] сказано, що рівняння, яке описує динаміку зміни маси розплавленого полімеру і коефіцієнта вмісту розплаву, можна записати як:

$$m_r(x,t) = b_8 Q^d(x,t) + b_9 \frac{\partial \theta^k(r,x,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_3} - b_{10} \frac{\partial \theta^c(r,x,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_2},$$

$$F^p(x,t + dt) = F^p(x,t) + \frac{m^r(x,t)}{\pi \cdot (r_3^2 - r_2^2) \cdot \rho_p \cdot dx}$$

де b_8, b_9, b_{10} – відповідні коефіцієнти рівняння динаміки теплового процесу для полімеру, що плавиться.

Застосовуючи метод кінцевих різниць [13, с. 17, 18], в дискретній формі отримаємо:

$$m_{s,\theta}^r = b_8 Q_{s,\theta}^d + b_9 \frac{\theta_{1,s,\theta}^k - \theta_{0,s,\theta}^k}{h_{r2}} - b_{10} \frac{\theta_{mkr1,s,\theta}^c - \theta_{mkr-1,s,\theta}^c}{h_{r1}}, \quad (10)$$

$$F_{s,\theta+1}^p = F_{s,\theta}^p + b_{20} \cdot m_{s,\theta}^r, \quad (11)$$

де

$$b_{20} = \frac{1}{\pi \cdot (r_3^2 - r_2^2) \cdot \rho_p \cdot h_x}$$

Оскільки полімер знаходиться в процесі плавлення, то його температура залишається сталою $\theta_{s,\theta}^p = \theta^{pl} = \text{const}$, θ^{pl} – температура плавлення полімеру.

У процесі плавлення може виявитися, що нове значення фазової складової вийшло за межі (0÷1) це означає, що полімер знову затвердів і знаходиться у стані підігріву (при $F^p < 0$), або повністю розплавився і тепер розплав полімеру нагрівається (при $F^p > 1$). Надлишкове тепло буде витрачатися не на фазовий перехід, а на зміну температури:

$$\theta_{s,\theta+1}^p = \theta^{pl} + \frac{\Delta F_{s,\theta}^p \cdot R^p}{C_p}, \text{ де } \begin{cases} \Delta F_{s,\theta}^p = F_{s,\theta}^p, \text{ при } F_{s,\theta}^n < 0 \\ \Delta F_{s,\theta}^p = F_{s,\theta}^p - 1, \text{ при } F_{s,\theta}^n > 1 \end{cases} \quad (12)$$

Для зони дозування:

З [9, с. 119] відомо, рівняння, що описує динаміку теплових процесів для рідкого полімеру, можна записати як:

$$\frac{\partial \theta^p(x,t)}{\partial t} = -V^p(t) \frac{\partial \theta^p(x,t)}{\partial x} + b_{11} \left. \frac{\partial \theta^k(r,x,t)}{\partial r} \right|_{r=r_3} - b_{12} \left. \frac{\partial \theta^c(r,x,t)}{\partial r} \right|_{r=r_2},$$

де b_{11} , b_{12} – відповідні коефіцієнти рівняння динаміки теплового процесу для розплавленого полімеру.

Застосовуючи метод кінцевих різниць [13, с. 17, 18], у дискретній формі отримаємо:

$$\frac{\theta_{s,\theta+1}^p - \theta_{s,\theta}^p}{\tau} = -V_{\theta}^p \frac{\theta_{s,\theta}^p - \theta_{s-1,\theta}^p}{h_x} + b_{11} \frac{\theta_{1,s,\theta}^k - \theta_{0,s,\theta}^k}{h_{r2}} - b_{12} \frac{\theta_{mkr1,s,\theta}^c - \theta_{mkr-1,s,\theta}^c}{h_{r1}}.$$

Виразивши з останнього рівняння $\theta_{s,\theta+1}^p$, перегрупувавши та звівши подібні доданки, отримаємо:

$$\theta_{s,\theta+1}^p = \left(1 - \frac{\tau \cdot V_{\theta}^p}{h_x}\right) \theta_{s,\theta}^p + \frac{\tau \cdot V_{\theta}^p}{h_x} \theta_{s-1,\theta}^p + \frac{\tau \cdot b_{11}}{h_{r2}} (\theta_{1,s,\theta}^k - \theta_{0,s,\theta}^k) - \frac{\tau \cdot b_{12}}{h_{r1}} (\theta_{mkr1,s,\theta}^c - \theta_{mkr-1,s,\theta}^c). \quad (13)$$

Оскільки полімер знаходиться в рідкому стані, то коефіцієнт вмісту розплаву в полімері $F_{s,\theta}^p = 1$.

В процесі переробки може виникнути ситуація, коли температура $\theta_{s,\theta+1}^n$ стала нижчою, за температуру плавлення полімеру θ^{pl} , що означає, що полімер почав кристалізуватися. А тому небаланс тепла перейшов не в зміну температури, а на фазовий перехід у полімері. Маса кристалізованого полімеру визначається як:

$$m_{s,\theta+1}^r = \frac{(\theta^{pl} - \theta_{s,\theta+1}^p) \cdot C_p \cdot \pi \cdot (r_3^2 - r_2^2) \cdot \rho_p \cdot h_x}{R^p}. \quad (14)$$

А величина фазової складової визначається як:

$$F_{s,\theta+1}^p = 1 - b_{20} \cdot m_{s,\theta+1}^r. \quad (15)$$

Рівняння, що описує граничну умову динаміки теплового процесу полімеру, має вигляд [9, с. 119]:

$$\theta^p(0, t) = \theta_{vh}^p(t).$$

У дискретному вигляді гранична умова записується як:

$$\theta_{0,\theta+1}^p = \theta_{vh,\theta+1}^p. \quad (16)$$

Для того, щоб визначитися в якому стані знаходиться полімер, а отже на якому кроці за якою формулою розраховувати теплову модель для полімера, необхідно створити базу правил, яка дасть можливість однозначно визначити стан полімеру.

У процесі дослідження було виявлено, що при аналізі двох показників можна однозначно виявити стан полімеру. До цих показників належить температура полімеру і коефіцієнт вмісту розплаву в полімері. Структурна схема алгоритму ідентифікації фазового стану полімеру наведена на рисунку 2.

Блок 1. Введення початкових значень температури полімеру та коефіцієнта вмісту розплаву в полімері.

Блок 2. Якщо значення коефіцієнта вмісту розплаву в полімері дорівнює нулю ($F^p = 0$), то переходимо до блоку 3. В іншому випадку переходимо до блоку 6.

Блок 3. Якщо значення температури полімеру вище за температуру плавлення $\theta^p > \theta^{pl}$ переходимо до блоку 4. В іншому випадку переходимо до блоку 5.

Блок 4. Зона змішаних фаз (твердої і рідкої) – потрібно присвоїти θ^p рівною θ^{pl} , а енергія різниці температур $\theta^p - \theta^{pl}$, витрачається на плавлення полімеру. Розрахунок ведеться за рівнянням (8) та (9). Визначення стану полімеру і формул для розрахунку закінчено.

Блок 5. Зона нагрівання твердого полімеру, розрахунок за рівнянням (7). Визначення стану полімеру і формул для розрахунку закінчено.

Блок 6. Якщо значення коефіцієнта вмісту розплаву в полімері рівне одиниці ($F^p = 1$), переходимо до блоку 7. В іншому випадку переходимо до блоку 10.

Блок 7. Якщо значення температури полімеру вище за температуру плавлення $\theta^p \geq \theta^{pl}$ – переходимо до блоку 8. В іншому випадку переходимо до блоку 9.

Блок 8. Зона нагрівання розплавленого полімеру, розрахунок за рівнянням (13). Визначення стану полімеру і формул для розрахунку закінчено.

Блок 9. Зона змішаних фаз – потрібно задати температуру полімеру рівною θ^{pl} , а енергія різниці температур $\theta^p - \theta^{pl}$ витрачається на кристалізацію полімеру. Розрахунок ведеться за рівнянням (14) та (15). Визначення стану полімеру і формул для розрахунку закінчено.

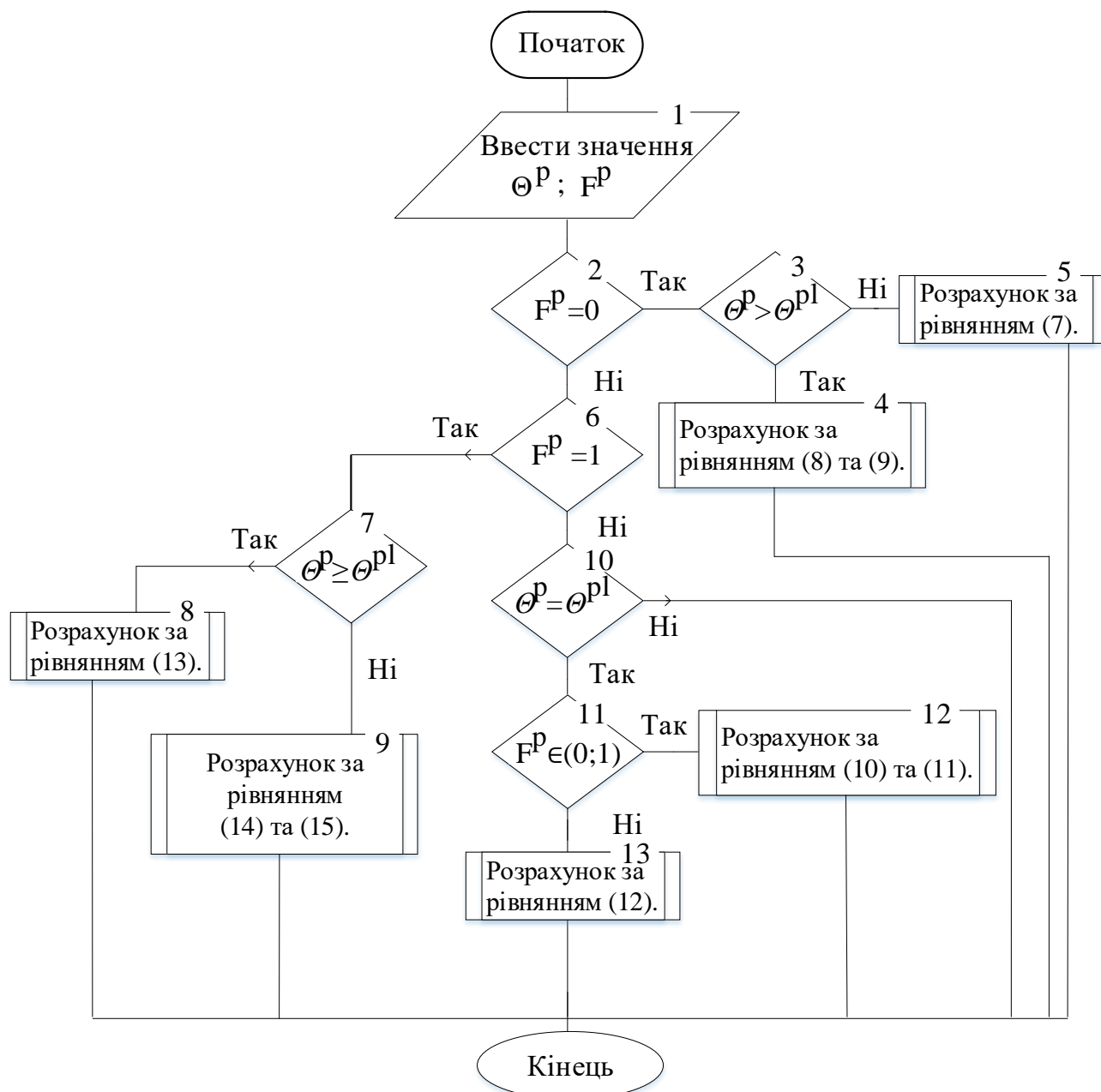


Рис. 2. Структурна схема алгоритму ідентифікації фазового стану полімеру

Блок 10. Якщо значення температури полімеру рівне температурі плавлення $\theta^p = \theta^{pl}$, переходимо до блоку 11. У іншому випадку необхідно перевірити істинне значення температури полімеру і коефіцієнта вмісту розплаву в полімері; визначення стану полімеру і формул для розрахунку закінчено.

Блок 11. Якщо значення коефіцієнта вмісту розплаву в полімері знаходиться в діапазоні від нуля до одиниці $F^p \in (0; 1)$ – переходимо до блоку 12. У іншому випадку переходимо до блока 13.

Блок 12. Зона змішаних фаз, розрахунок ведемо за рівнянням (10) та (11). Визначення стану полімеру і формул для розрахунку закінчено.

Блок 13. Область переходу в зону твердої фази полімеру (при $F^p < 0$) або в зону рідкої фази полімеру (при $F^p > 1$), визначається за рівнянням (12). Визначення стану полімеру і формул для розрахунку закінчено.

Також необхідно враховувати вплив на густину та теплоємність, можливість вмісту обох фаз одночасно. Тому їх необхідно перерахувати. Враховуючи, що полімер знаходиться лише в двох фазах: твердому та рідкому. А також вважаючи, що вплив зміни температури на густину і питому теплоємність незначний, порівняно з різницею між їх значенням у різних агрегатних станах. У першому наближенні пропонується брати їх як зважені функції, коефіцієнтом ваги в якому є вміст розплавленого полімеру. Тоді теплоємність і густину полімеру на кожному кроці розрахунку необхідно визначати як:

$$\rho_p = \rho_{tp}(1 - F_{s,\theta}^p) + F_{s,\theta}^p \cdot \rho_{rp},$$

де ρ_{tp} – густина твердого полімеру, ρ_{rp} – густина рідкого полімеру.

$$C_p = C_{tp}(1 - F_{s,\theta}^p) + F_{s,\theta}^p \cdot C_{rp},$$

де C_{tp} – питома теплоємність твердого полімеру, C_{rp} – питома теплоємність рідкого полімеру.

Черв'як

Рівняння, що описує динаміку теплових процесів шнека, у неперервній формі має вигляд [9, с. 120]:

$$\frac{\partial \theta^c(r, x, t)}{\partial t} = a_c \left[\frac{\partial^2 \theta^c(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta^c(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta^c(r, x, t)}{\partial x^2} \right],$$

де a_c – коефіцієнт температуропровідності матеріалу шнека.

Застосовуючи метод кінцевих різниць, у дискретній формі отримаємо:

$$\frac{\theta_{z,s,\theta+1}^c - \theta_{z,s,\theta}^c}{\tau} = a_c \left[\frac{\theta_{z+1,s,\theta}^c - 2\theta_{z,s,\theta}^c + \theta_{z-1,s,\theta}^c}{h_{r1}^2} + \frac{1}{r_1 + z \cdot h_{r1}} \left(\frac{\theta_{z+1,s,\theta}^c - \theta_{z,s,\theta}^c}{h_{r1}} + \frac{\theta_{z,s,\theta}^c - \theta_{z-1,s,\theta}^c}{h_{r1}} \right) \right] + a_c \frac{\theta_{z,s,\theta+1}^c - 2\theta_{z,s,\theta}^c + \theta_{z,s,\theta-1}^c}{h_x^2}.$$

Виразимо з останнього рівняння $\theta_{z,s,\theta+1}^c$, розкриємо дужки і перегрупуємо доданки, тоді отримаємо:

$$\theta_{z,s,\theta+1}^c = b_{21} \cdot \theta_{z,s,\theta}^c + b_{22} \cdot \theta_{z+1,s,\theta}^c + b_{23} \cdot \theta_{z-1,s,\theta}^c + b_{24} \cdot \theta_{z,s,\theta+1}^c + b_{24} \cdot \theta_{z,s,\theta-1}^c, \quad (17)$$

де

$$b_{21} = \left(1 - \frac{2a_c \tau}{h_{r1}^2} - \frac{2a_c \tau}{h_x^2} \right), b_{22} = \left(\frac{a_c \tau}{h_{r1}^2} + \frac{a_c \tau}{2 \cdot h_{r1}^2 (r_1 + z \cdot h_{r1})} \right), b_{23} = \left(\frac{a_c \tau}{h_{r1}^2} - \frac{a_c \tau}{2 \cdot h_{r1}^2 (r_1 + z \cdot h_{r1})} \right), b_{24} = \frac{a_c \tau}{h_x^2}.$$

Рівняння, що описує граничну умову для внутрішньої поверхні шнека, може матиме вигляд [9, с. 120]:

$$-\lambda_c \frac{\partial \theta^c}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \alpha_1 (\theta^V - \theta^c|_{r=r_1}),$$

де λ_c – коефіцієнт теплопровідності матеріалу шнека.

У дискретному вигляді гранична умова матиме вигляд:

$$\lambda_c \frac{\theta_{0,s,\theta+1}^c - \theta_{1,s,\theta+1}^c}{h_{r1}} = \alpha_1 (\theta_{s,\theta+1}^V - \theta_{0,s,\theta+1}^c).$$

Запишемо $\theta_{0,s,\theta+1}^c$ з одного боку, а решту з другого:

$$\left(\frac{\lambda_c}{h_{r1}} + \alpha_1 \right) \theta_{0,s,\theta+1}^c = \frac{\lambda_c}{h_{r1}} \theta_{1,s,\theta+1}^c + \alpha_1 \theta_{s,\theta+1}^V.$$

Виразивши $\theta_{0,s,\theta+1}^c$, розкривши дужки та перегрупувавши, отримаємо:

$$\theta_{0,s,\theta+1}^c = b_{25} \cdot \theta_{1,s,\theta+1}^c + b_{26} \cdot \theta_{s,\theta+1}^V, \quad (18)$$

де

$$b_{25} = \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \alpha_1 h_{r1}}, b_{26} = \frac{\alpha_1 h_{r1}}{\lambda_c - \alpha_1 h_{r1}}.$$

Рівняння, що описує граничну умову для зовнішньої поверхні шнека, може бути записана у вигляді [9, с. 120]:

$$-\lambda_c \frac{\partial \theta^c(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \alpha_2 [\theta^c(r, x, t)|_{r=r_2} - \theta^p(x, t)].$$

У дискретній формі гранична умова матиме вигляд:

$$-\lambda_c \frac{\theta_{mkr1,s,\theta+1}^c - \theta_{mkr1-1,s,\theta+1}^c}{h_{r1}} = \alpha_2 (\theta_{mkr1,s,\theta+1}^c - \theta_{s,\theta+1}^p).$$

Запишемо $\theta_{mkr1,s,\theta+1}^c$ з одного боку, а решту з другого:

$$\left(\alpha_2 + \frac{\lambda_c}{h_{r1}} \right) \theta_{mkr1,s,\theta+1}^c = \alpha_2 \theta_{s,\theta+1}^p + \frac{\lambda_c}{h_{r1}} \theta_{mkr1-1,s,\theta+1}^c.$$

Виразивши $\theta_{mkr1,s,\theta+1}^c$, отримаємо:

$$\theta_{mkr1,s,\theta+1}^c = b_{27} \cdot \theta_{s,\theta+1}^p + b_{28} \cdot \theta_{mkr1-1,s,\theta+1}^c, \quad (19)$$

де

$$b_{27} = \frac{\alpha_2 h_{r1}}{\lambda_c + \alpha_2 h_{r1}}, b_{28} = \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \alpha_2 h_{r1}}.$$

Рівняння, що описують граничні умови на торцях шнека, прийемо як [9, с. 120]:

$$\begin{cases} -\lambda_c \frac{\partial \theta^c(r, x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \\ -\lambda_c \frac{\partial \theta^c(r, x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0. \end{cases}$$

У дискретній формі граничні умови матимуть вигляд:

$$\begin{cases} -\lambda_c \frac{\theta_{z,1,\theta+1}^c - \theta_{z,0,\theta+1}^c}{h_x} = 0 \\ \lambda_c \frac{\theta_{z,mx,\theta+1}^c - \theta_{z,mx-1,\theta+1}^c}{h_x} = 0 \end{cases}$$

А оскільки $\lambda_c \neq 0$ і $h_x \neq 0$, то тоді запишемо:

$$\begin{cases} \theta_{z,0,\theta+1}^c = \theta_{z,1,\theta+1}^c \\ \theta_{z,mx,\theta+1}^c = \theta_{z,mx-1,\theta+1}^c \end{cases}, \quad (20)$$

Охолоджувальна рідина

З [9, с. 120] відомо, рівняння, що описує динаміку теплового процесу для охолоджувальної рідини, набуде вигляду:

$$\frac{\partial \theta^V(x, t)}{\partial t} = V^V(t) \frac{\partial \theta^V(x, t)}{\partial x} + b_{13} (\theta^c(r, x, t)|_{r=0} - \theta^V(x, t)),$$

де b_{13} – відповідний коефіцієнт рівняння динаміки теплового процесу для охолоджувальної рідини.

Застосовуючи метод кінцевих різниць [13, с. 17, 18], у дискретній формі отримаємо:

$$\frac{(\theta_{s,\theta+1}^V - \theta_{s,\theta}^V)}{\tau} = -V_{\theta}^V \frac{\theta_{s,\theta}^V - \theta_{s-1,\theta}^V}{h_x} + b_{13} (\theta_{0,s,\theta}^c - \theta_{s,\theta}^V).$$

Виразивши $\theta_{s,\theta+1}^V$ і звівши подібні доданки, отримаємо:

$$\theta_{s,\theta+1}^V = \left(1 - \frac{V_{\theta}^V \cdot \tau}{h_x} - b_{13} \cdot \tau\right) \theta_{s,\theta}^V + \frac{V_{\theta}^V \cdot \tau}{h_x} \theta_{s-1,\theta}^V + b_{13} \cdot \tau \cdot \theta_{0,s,\theta}^c \quad (21)$$

Рівняння, що описують граничні умови динаміки теплових процесів для охолоджувальної рідини, можемо записати як [9, с. 120]:

$$\theta^V(0, t) = \theta_{vh}^V(t),$$

де θ_{vh}^V – значення величини температури охолоджуючої води на вході в апарат.

У дискретній формі граничні умови матимуть вигляд:

$$\theta_{0,\theta}^V = \theta_{vh,\theta}^V, \quad (22)$$

Таким чином дискретна математична модель теплових полів одночерв'ячного екструдера з варійованими потужностями нагрівачів може бути подана як:

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_{s,\theta+1}^n &= \left(1 - b_3 \tau - \frac{2 \cdot b_4 \cdot \tau}{h_x^2}\right) \theta_{s,\theta}^n + b_1 \cdot \tau \cdot Q_{s,\theta}^n + \frac{b_2 \cdot \tau}{h_{r2}} (\theta_{mkr2,s,\theta}^k - \theta_{mkr2-1,s,\theta}^k) + \\ &\quad + b_3 \cdot \tau \cdot \theta^{os} + \frac{b_4 \cdot \tau}{h_x^2} \theta_{s+1,\theta}^n + \frac{b_4 \cdot \tau}{h_x^2} \theta_{s-1,\theta}^n \\ \theta_{z,s,\theta+1}^k &= b_{14} \cdot \theta_{z,s,\theta}^k + b_{15} \cdot \theta_{z+1,s,\theta}^k + b_{16} \cdot \theta_{z-1,s,\theta}^k + b_{17} \cdot \theta_{z,s+1,\theta}^k + b_{17} \cdot \theta_{z,s-1,\theta}^k \\ \theta_{s,\theta+1}^p &= \left(1 - \frac{\tau \cdot V_{\theta}^p}{h_x}\right) \theta_{s,\theta}^p + \frac{\tau \cdot V_{\theta}^p}{h_x} \theta_{s-1,\theta}^p + b_5 \cdot \tau \cdot Q_{s,\theta}^d + \frac{\tau \cdot b_6}{h_{r2}} (\theta_{1,s,\theta}^k - \theta_{0,s,\theta}^k) - \\ &\quad - \frac{\tau \cdot b_7}{h_{r1}} (\theta_{mkr1,s,\theta}^c - \theta_{mkr-1,s,\theta}^c) \\ m_{s,\theta}^r &= b_8 Q_{s,\theta}^d + b_9 \frac{\theta_{1,s,\theta}^k - \theta_{0,s,\theta}^k}{h_{r2}} - b_{10} \frac{\theta_{mkr1,s,\theta}^c - \theta_{mkr-1,s,\theta}^c}{h_{r1}} \\ F_{s,\theta+1}^p &= F_{s,\theta}^p + b_{20} \cdot m_{s,\theta}^r \\ \theta_{s,\theta+1}^p &= \left(1 - \frac{\tau \cdot V_{\theta}^p}{h_x}\right) \theta_{s,\theta}^p + \frac{\tau \cdot V_{\theta}^p}{h_x} \theta_{s-1,\theta}^p + \frac{\tau \cdot b_{11}}{h_{r2}} (\theta_{1,s,\theta}^k - \theta_{0,s,\theta}^k) - \\ &\quad - \frac{\tau \cdot b_{12}}{h_{r1}} (\theta_{mkr1,s,\theta}^c - \theta_{mkr-1,s,\theta}^c) \\ \theta_{z,s,\theta+1}^c &= b_{21} \cdot \theta_{z,s,\theta}^c + b_{22} \cdot \theta_{z+1,s,\theta}^c + b_{23} \cdot \theta_{z-1,s,\theta}^c + b_{24} \cdot \theta_{z,s+1,\theta}^c + b_{24} \cdot \theta_{z,s-1,\theta}^c \\ \theta_{s,\theta+1}^V &= \left(1 - \frac{V_{\theta}^V \cdot \tau}{h_x} - b_{13} \cdot \tau\right) \theta_{s,\theta}^V + \frac{V_{\theta}^V \cdot \tau}{h_x} \theta_{s-1,\theta}^V + b_{13} \cdot \tau \cdot \theta_{0,s,\theta}^c \end{aligned} \right.$$

З граничними умовами:

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_{(i-1)m_n,\theta+1}^n &= \theta_{(i-1)m_n+1,\theta+1}^n \\ \theta_{i:m_n-1,\theta+1}^n &= \theta_{i:m_n-2,\theta+1}^n \\ \theta_{mkr2,s,\theta+1}^k &= \theta_{s,\theta+1}^k \\ \theta_{0,s,\theta+1}^k &= b_{18} \cdot \theta_{s,\theta+1}^p + b_{19} \cdot \theta_{1,s,\theta+1}^k \\ \theta_{z,0,\theta+1}^k &= \theta_{z,1,\theta+1}^k \\ \theta_{z,m_x,\theta+1}^k &= \theta_{z,m_x-1,\theta+1}^k \\ \theta_{0,\theta+1}^p &= \theta_{vh,\theta+1}^p \\ \theta_{0,s,\theta+1}^c &= b_{25} \cdot \theta_{1,s,\theta+1}^c + b_{26} \cdot \theta_{s,\theta+1}^V \\ \theta_{mkr1,s,\theta+1}^c &= b_{27} \cdot \theta_{s,\theta+1}^p + b_{28} \cdot \theta_{mkr1-1,s,\theta+1}^c \\ \theta_{z,0,\theta+1}^c &= \theta_{z,1,\theta+1}^c \\ \theta_{z,m_x,\theta+1}^c &= \theta_{z,m_x-1,\theta+1}^c \\ \theta_{0,\theta}^V &= \theta_{vh,\theta}^V \end{aligned} \right.$$

Висновки

Зазначена дискретна модель процесу екструзії полімерів у циліндричній системі координат з урахуванням розподілу температури для кожного з елементів, а також розподілу температури по радіусу корпусу шнека. Наведений алгоритм, який дозволяє враховувати динамічний фазовий перехід для полімеру.

У подальшому планується створити модель прогнозування якості готового виробу за даними технологічного процесу, а також дослідити вплив на температурні поля кожного окремого нагрівача та їх сукупності й вплив збурень на показники якості готового виробу.

Список використаної літератури:

1. Baskaran C. Modelling and Simulation of Hybrid Neuro Fuzzy Controller for Temperature Response Regulation of Plastic Extrusion Plant / C.Baskaran, M.Dharmendirakumar, A.Kayathri // European Journal of Scientific Research. – 2012. – № 79 (1). – P. 89–98.
2. Extruder Melt Temperature Control With Fuzzy Logic / C.Abeykoon, L.Adrian, J.Kelly-Peter, M.KangLi // Preprint of the 18th IFAC World Congress Milano. – Italy. – 2013. – P. 2250–2255.
3. Ching-Chih T. Fuzzy supervisory predictive PID control of a plastics extruder barrel / T.Ching-Chih, Lu.Chi-Huang // Journal of the Chinese Institute of Engineers. – 1998. – № 21 (5). – P. 619–624.

4. Haley T.A. On-line system identification and control design of an extrusion cooking process / T.A. Haley, S.J. Mulvaney // *System identification*. – 2000. – № 11. – P. 103–120.
5. Paul F.E. Physics based modelin gand control of reactiveextrusion / F.E. Paul. – Maryland. – 2003. – 153 p.
6. Ravi S. Design of Intelligent Self-Tuning GA ANFIS Temperature Controller for Plastic Extrusion System / S.Ravi, M.Sudha, P.A. Balakrishnan // *Modelling and Simulation in Engineering Volume*. – Cairo : Hindawi Publishing Corporation, 2011.
7. Wang Yin-Tien Modelingand Controlfor a Thermal Barrelin Plastic Molding Processes / Yin-Tien Wang, Sung-Lin Wu // *Tamkang Journal of Science and Engineering*. – 2006. – № 9 (2). – P. 129–40.
8. Мохаммед А. Автоматизация многозонных экструдеров на основе адаптивных и нечётких позициональных систем управления : дис. ... канд. техн. наук / А.Мохаммед – М., 2003. – 153 с.
9. Жученко А.І. Математичний опис теплового режиму екструдера / А.І. Жученко, А.І. Кубрак, А.О. Данькевич // Вісник КПІ. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2016. – № 1. – С. 116–122.
10. Жученко О.А. Автоматизация процесів керування екструзією полімерних матеріалів в умовах змінних режимів функціонування : дис. ... канд. техн. наук / О.А. Жученко. – К., 2013. – 211 с.
11. Завальнюк І.П. Управление высокопроизводительной экструзией неоднородных материалов / И.П. Завальнюк // *Современные технические средства, комплексы и системы*. – 2010. – № 1 (25). – С. 141–147.
12. Кубрак А.І. Математична модель керування тепловим режимом процесу екструзії полімерних матеріалів / А.І. Кубрак, О.А. Жученко // Вісник КПІ. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2010. – №2 – С. 107–114.
13. Мареев В.В. Основы методов конечных разностей / В.В. Мареев, Е.Н. Станкова. – Петерб. : СПб Ун-та, 2012. – 64 с.
14. Швецов Г.А. Технология переработки пластических масс : учебник для техникумов / Г.А. Швецов, Д.У. Алимova, М.Д. Барышникова. – М. : Химия, 1988. – 521 с.

References:

1. Baskaran, C., Dharmendirakumar, M. and Kayathri, A. (2012), «Modellingand Simulation of Hybrid Neuro Fuzzy Controller for Temperature Response Regulation of Plastic Extrusion Plant», *European Journal of Scientific Research*, Vol. 79 (1), pp. 89–98.
2. Abeykoon, C., Adrian L., Kelly-Peter, J. and KangLi, M. (2013), «Extruder Melt Temperature Control With Fuzzy Logic», *Preprintsof the 18th IFAC World Congress Milano*, Italy, pp. 2250–2555.
3. Ching-Chih, Tsai and Chi-Huang, Lu. (1998), «Fuzzy supervisorypredictive PID controlof a plastics extruder barrel», *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 21 (5), pp. 619–624.
4. Haley, T.A. and Mulvaney, S.J. (2000), «On-line system identification and control design of an extrusion cooking process», *System identification*, Vol. 11, pp. 103–120.
5. Paul, F.E. (2003), *Physics based modeling and control of reactive extrusion*, Maryland, 153 p.
6. Ravi, S., Sudha, M. and Balakrishnan, P.A. (2011), «Design of Intelligent Self-Tuning GA ANFIS Temperature Controller for Plastic Extrusion System», *Modelling and Simulation in Engineering Volume*, Hindawi Publishing Corporation, Cairo.
7. Wang, Yin-Tien and Wu, Sung-Lin (2006), «Modelingand Controlfor a Thermal Barrelin Plastic Molding Processes», *Tamkang Journal of Science and Engineering*, Vol. 9 (2), pp. 129–140.
8. Mohammed, A. (2003), *Avtomatizacija mnogozonnyh jekstruderov na osnove adaptivnyh i nechjotkih pozicional'nyh sistem upravlenija*, Diss. of kand. tehn. nauk, M., 153 p.
9. Zhuchenko, A.I., Kubrak, A.I. and Dan'kevich, A.O. (2016), «Matematichnij opis teplovogo rezhimu ekstrudera», *Visnyk KPI. Himichna inzhenerija, ekologija ta resursozberezhennja*, Vol 1, pp. 116–122.
10. Zhuchenko, O.A. (2013), *Avtomatyzacija procesiv keruvannja ekstruzijeju polimernyh materialiv v umovah zminnyh rezhymiv funkcionuvannja*, Diss. of kand. tehn. nauk, Kyiv, 211 p.
11. Zaval'nyuk, I.P. (2010), «Upravlenie visokoproizvoditel'noy ekstruziey neodnorodnykh materialov», *Sovremennye tekhnicheskie sredstva, komplekсы i sistemy*, Vol.1 (25), pp. 141–147.
12. Kubrak, A.I. and Zhuchenko, O.A. (2010), «Matematychna model' keruvannja teplovym rezhymom procesu ekstruzij polimernyh materialiv», *Visnyk KPI. Himichna inzhenerija, ekologija ta resursozberezhennja*, Vol. 2, pp. 107–114.
13. Mareev, V.V. and Stankova, E.N. (2012), *Osnovy metodov konechnykh raznostej*, SPb Un-ta, Peterb, 64 p.
14. Shvetsov, G.A., Alimova, D.U. and Baryshnikova M.D. (1988), *Tekhnologiya pererabotki plasticheskikh mass*, Khimiya, M., 521 p.

Данькевич Андрій Олександрович – асистент КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання;
- нечіткі системи керування.

Жученко Анатолій Іванович – доктор технічних наук, професор КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання та оптимальне керування енергоємними технологічними процесами.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2019