

ROBERT SIKORA, EMIL SASIMOWSKI

Politechnika Lubelska

Katedra Procesów Polimerowych

ul. Nadbystrzycka 36, 20-950 Lublin

## Nowy model kinematyczny ślimakowego układu uplastyczniającego

### A NEW KINEMATIC MODEL OF THE SCREW-BASED PLASTIFYING SYSTEM

**Summary** — The present kinematic concept assumes both the barrel and the screw to move uniformly but in opposite directions (Fig. 1). Equations 13, 14 and 15 were derived to describe the longitudinal flow, drag flow and pressure flow, resp., and equation 26 to describe the volume flow rate. The equations were verified (Table 1, 2; Fig. 3) and the plastifying system processes were thus discovered to have been intensified whereby the volume flow rates of the drag flow and leak flow and also the velocities and rates of the pressure flow have increased. As a result, the total volume flow rate is higher than that in the model with the revolving barrel and that in the model with the revolving screw. In the example considered the corresponding increases are 245% and 298% under identical conditions. The concept and design assumptions are presented, based on the new model, and a suitable modification of the plastifying system is suggested.

**Key words:** plastifying system, new kinematic model.

Problemy kinematyczne ślimakowego układu uplastyczniającego rozpatruje się dotychczas w dwóch układach:

a) Chronologicznie biorąc starszym, którego badania rozpoczęto przed rokiem 1951, a ich wyniki opublikowano w latach 1951—55; założono w nim nierealnie, że ruch obrotowy jednostajny wykonuje cylinder, natomiast ślimak pozostaje nieruchomy.

b) Chronologicznie nieco późniejszym, bowiem związane z nim publikacje pochodzą z lat 1960—69; w układzie tym przyjęto zgodnie z rzeczywistością, że ruch obrotowy jednostajny wykonuje ślimak, a cylinder jest nieruchomy.

Pomimo braku publikacji poświęconych porównaniu obu układów, przyjmowano dotychczas (często milcząco), że w istocie są one identyczne. Okazuje się jednak [1], że porównanie tych układów działających w takich samych warunkach prowadzi do wniosku, iż pomimo identyczności formalnego zapisu niektórych charakteryzujących je równań ogólnych istotnie różnią się one od siebie. Tak więc, rozpowszechniona metodyka badań, opierająca się na teoretycznym modelu z obracającym się cylindrem i weryfikowana doświadczalnie za pomocą modelu, w którym obraca się ślimak (w rzeczywistości występuje przecież tylko taki układ), nie jest odpowiednia.

Można jednak zaproponować zupełnie nową koncepcję kinematyczną, według której ruch obrotowy jedno-

stajny wykonuje jednocześnie zarówno cylinder, jak i ślimak, z tym że kierunki ich obrotów są sobie przeciwne. Badania takiego modelu są bardzo interesujące od strony poznawczej. Mają one również znaczenie użytkowe, gdyż okazuje się, że model ten (pod warunkiem określonego rozwiązania konstrukcyjnego) jest realny, o czym będzie mowa w dalszej części niniejszego artykułu.

### ZAŁOŻENIA

Ze względu na charakter rozpoznawczy przedstawionych tu badań przyjęto założenia klasyczne, a więc ślimak ma kanał śrubowy ciągły, wypełniony w całości tworzywem znajdującym się w stanie plastycznym lub ciekłym — płynem niutonowskim. Przepływ w kanale jest izotermiczny, ustalony i laminarny oraz odbywa się pod wpływem obrotów cylindra i ślimaka, obracających się ruchem jednostajnym, przy czym obroty te są przeciwne względem siebie. Zakłada się dalej, że kanał śrubowy i powierzchnię wewnętrzną cylindra można rozwinąć na płaszczyznę, a stosunek głębokości kanału do jego szerokości jest mały. Jest to zgodne z ujęciami podawanymi w literaturze [2, 3], mianowicie w przypadku kanału płytkiego za wystarczająco dokładny uznaje się układ odniesienia prostokątny, natomiast w odniesieniu do kanału głębokiego należy stosować układ odniesienia śrubowy (helikoidalny).

Wszystko to sprawia, że jest spełnione równanie ciągłości dotyczące płynu [4], a równanie różniczkowe ruchu Naviera—Stokesa w prostokątnym układzie współrzędnych  $y - z$  ( $y$  — oś prostopadła do powierzchni cylindra i rdzenia ślimaka,  $z$  — oś równoległa, tj. wzdłużna w stosunku do kanału śrubowego) przybiera postać

$$\frac{d^2 v}{dy^2} = \frac{1}{\eta} \left( \frac{dp}{dz} \right) \quad (1)$$

gdzie:  $v$  — prędkość przepływu tworzywa,  $p$  — ciśnienie tworzywa,  $\eta$  — lepkość dynamiczna tworzywa.

#### BADANIA TEORETYCZNE

Rysunek 1 przedstawia schemat ślimakowego układu uplastyczniającego z naniesionymi rozważanymi tu wielkościami kinematycznymi i geometrycznymi. Prędkość obwodowa  $V_c$  cylindra o średnicy wewnętrznej  $D$ , związana z prędkością obrotową cylindra  $v_c$ , rozkłada się na dwie składowe: składową  $V_{cz}$  styczną do linii śrubowej kanału oraz składową  $V_{cx}$  prostopadłą do linii śrubowej kanału. Wektory  $V_c$  oraz  $V_{cz}$  tworzą pomiędzy sobą kąt  $\alpha_w$  zwany umownym kątem pochylenia linii śrubowej kanału przy powierzchni wewnętrznej cylindra. Prędkość obwodowa  $V_s$  ślimaka o średnicy  $D$ , związana z prędkością obrotową ślimaka  $v_s$ , rozkłada się również na dwie składowe: składową  $V_{sz}$  styczną do linii śrubowej kanału oraz składową  $V_{sx}$  prostopadłą do linii śrubowej kanału. Pomiedzy wektorami  $V_s$  oraz  $V_{sz}$  tworzy się kąt  $\alpha_r$ , równy kątowi pochylenia linii śrubowej kanału przy rdzeniu ślimaka.

Całkując dwukrotnie zależność (1) z uwzględnieniem warunków brzegowych oraz zakładając, że cylinder i ślimak współdziałają ściśle, otrzymuje się równanie opisujące prędkość  $v$  przepływu tworzywa wzdłuż kanału śrubowego na dowolnej jego głębokości  $y$ . Warunki brzegowe są następujące (rys. 2): na powierzchni rdzenia ślimaka, gdzie  $y = h$  ( $h$  — głębokość kanału), prędkość przepływu tworzywa względem ślimaka wynosi  $v = V_{sz}$ , natomiast na powierzchni wewnętrznej cylindra, gdzie  $y = 0$ , prędkość przepływu wynosi  $v = V_{cz}$ . Tak więc, zakładając  $dp/dz \neq 0$ , poszukiwane równanie przybiera postać:

$$v = \frac{V_{cz}(h-y) + V_{sz}y}{h} + \frac{y^2 - hy}{2\eta} \left( \frac{dp}{dz} \right) \quad (2)$$

W równaniu tym pierwszy człon opisuje prędkość przepływu wlezonego  $v_w$ :

$$v_w = \frac{V_{cz}(h-y) + V_{sz}y}{h} \quad (3)$$

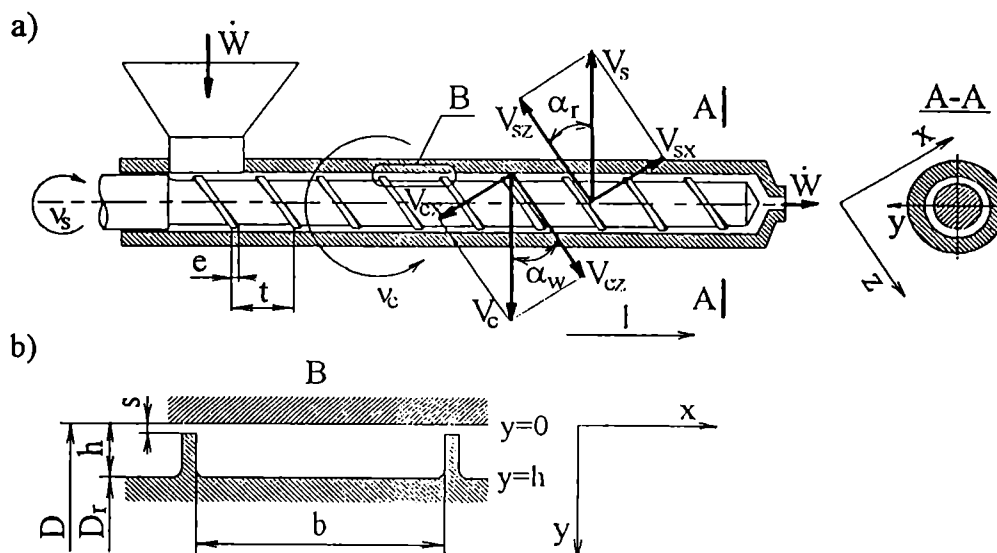
a człon drugi prędkość przepływu ciśnieniowego  $v_c$ :

$$v_c = \frac{y^2 - hy}{2\eta} \left( \frac{dp}{dz} \right) \quad (4)$$

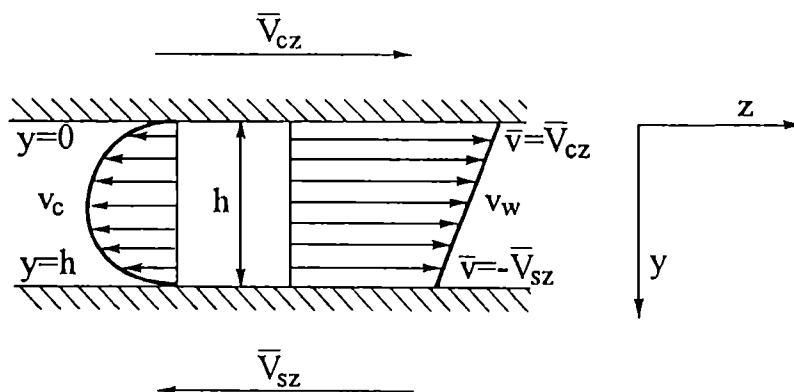
Równaniom tym można nadać postać bardziej dogodną do zastosowań, wprowadzając do nich elementy geometryczne kanału śrubowego oraz prędkość obrotową cylindra i ślimaka.

Zatem wprowadza się  $\alpha_s$  jako średni kąt pochylenia linii śrubowej kanału:

$$\alpha_s = \frac{\alpha_w + \alpha_r}{2} \quad (5)$$



Rys. 1. Schemat ślimakowego układu uplastyczniającego w przypadku modelu, w którym ruch obrotowy wykonują jednocześnie cylinder i ślimak: a) przekrój wzdłużny, b) przekrój poprzeczny fragmentu; objaśnienia w tekście  
Fig. 1. The model of the screw-based plasticizing system with the barrel and the screw revolving simultaneously: a — longitudinal section, b — cross-section (for explanations see text)



Rys. 2. Rozkład prędkości przepływu tworzywa wzdłuż kanału śrubowego; 1 — powierzchnia cylindra, 2 — powierzchnia ślimaka (rdzeń) (objaśnienia w tekście)

Fig. 2. The velocity distribution in the polymer stream flowing along the screw channel; 1 — barrel surface area, 2 — screw surface area (explanations in main text)

oraz  $l$  jako oś równoległą do osi geometrycznej ślimaka:

$$dl = dz \sin \alpha_s \quad (6)$$

Wzdłuż osi  $l$ , na rozpatrywanej długości  $L$ , zachodzi zmiana ciśnienia tworzywa  $\Delta p$ , co sprawia, że

$$\frac{dp}{dl} = \frac{\Delta p}{L} \quad (7)$$

a po podstawieniu wzoru (6)

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\Delta p}{L} \sin \alpha_s \quad (8)$$

Składowe prędkości obwodowej cylindra i ślimaka, styczne do linii śrubowej kanału, mogą być wyrażone wzorami:

$$V_{cz} = V_c \cos \alpha_w = \pi D v_c \cos \alpha_w \quad (9)$$

oraz

$$V_{sz} = V_s \cos \alpha_r = \pi D_r v_s \cos \alpha_r \quad (10)$$

gdzie:  $D_r$  — średnica rdzenia ślimaka.

Składowe te będą podlegać dalszym przekształceniom matematycznym, zatem powinny być do siebie równoległe. Można to uzyskać, przyjmując średnie wartości kąta pochylenia linii śrubowej kanału  $\alpha_s$  [wzór (5)].

Wtedy wzory (9) i (10) przybierają odpowiednio postać:

$$V_{cz} = V_c \cos \alpha_s = \pi D v_c \cos \alpha_s \quad (11)$$

$$V_{sz} = V_s \cos \alpha_s = \pi D_r v_s \cos \alpha_s \quad (12)$$

Po uwzględnieniu wzorów (8), (11) i (12) równania (2), (3) i (4) przybierają odpowiednio postać:

$$v = \frac{\pi D v_c \cos \alpha_s (h - y) + \pi D_r v_s y \cos \alpha_s}{h} + \frac{(y^2 - hy) \Delta p \sin \alpha_s}{2\eta L} \quad (13)$$

$$v_w = \frac{\pi D v_c \cos \alpha_s (h - y) + \pi D_r v_s y \cos \alpha_s}{h} \quad (14)$$

$$v_c = \frac{(y^2 - hy) \Delta p \sin \alpha_s}{2\eta L} \quad (15)$$

Wyrażenie na objętościowe natężenie przepływu wzdłużnego tworzywa, czyli przepływu wzdłuż kanału śrubowego (nie wzdłuż układu uplastyczniającego), uzyskuje się w wyniku scałkowania iloczynu prędkości  $v$  oraz elementarnej powierzchni przekroju poprzecznego kanału  $b \cdot dy$  (rys. 1b) w granicach jego głębokości  $h$ :

$$\dot{W} = \int_0^h v b \cdot dy \quad (16)$$

Po podstawieniu równania (2) i wykonaniu działań uzyskuje się

$$\dot{W} = \frac{bh(V_{cz} + V_{sz})}{2} - \frac{bh^3}{12\eta} \left( \frac{dp}{dz} \right) \quad (17)$$

Przez analogię do równania (2), w równaniu (17) pierwszy człon opisuje objętościowe natężenie przepływu wlezonego  $\dot{W}_w$ :

$$\dot{W}_w = \frac{bh(V_{cz} + V_{sz})}{2} \quad (18)$$

a człon drugi — objętościowe natężenie przepływu ciśnieniowego  $\dot{W}_c$ :

$$\dot{W}_c = \frac{bh^3}{12\eta} \left( \frac{dp}{dz} \right) \quad (19)$$

Przekształcając równania (17), (18) i (19) uwzględnia się wzory (8), (11) i (12) oraz, dodatkowo (rys. 1), to że

$$b = (t - e) \cos \alpha_s \quad (20)$$

gdzie:  $t$  — skok linii śrubowej ślimaka,  $e$  — szerokość grzebienia zwoju.

Tak więc równanie (17) przybiera postać:

$$\dot{W} = \frac{(t-e) \cos \alpha_s h (\pi D v_c \cos \alpha_s + \pi D_r v_s \cos \alpha_s)}{2} + \frac{h^3 (t-e) \cos \alpha_s \sin \alpha_s \Delta p}{12 \eta L} \quad (21)$$

Podstawiając do równania (21) zależność na skok linii śrubowej ślimaka

$$t = \pi D_s t g \alpha_s \quad (22)$$

oraz pomijając stosunkowo małe wartości  $e$ , otrzymuje się

$$\dot{W} = \frac{\pi^2 D_s \sin \alpha_s \cos \alpha_s h (D v_c + D_r v_s)}{2} + \frac{\pi D_s h^3 \sin^2 \alpha_s \Delta p}{12 \eta L} \quad (23)$$

Różnica ciśnienia panującego na czynnej i biernej powierzchni zwoju ślimaka jest powodem występowania przepływu tworzywa pomiędzy grzbietem zwoju a powierzchnią wewnętrzną cylindra. Wprowadzenie odpowiedniego równania opisującego objętościowe natężenie przepływu przeciekowego można od dawna znaleźć w literaturze (por. np. [5]). Ma ono postać:

$$\dot{W}_s = \frac{\pi^2 D^2 s^3 t g \alpha_s \Delta p}{10 \eta_s L e} \quad (24)$$

gdzie:  $s$  — wysokość szczeliny pomiędzy grzbietem zwoju ślimaka a powierzchnią wewnętrzną cylindra,  $\eta_s$  — lepkość tworzywa w szczelinie (dawniej przyjmowano uproszczenie  $\eta = \eta_s$ ).

Zatem, gdy uwzględni się również przepływ przeciekowy, równanie opisujące objętościowe natężenie przepływu w ślimakowym układzie uplastyczniającym przybiera postać ogólną:

$$\dot{W} = \dot{W}_w - \dot{W}_c - \dot{W}_s \quad (25)$$

i postać szczegółową:

$$\dot{W} = \frac{\pi^2 D_s \sin \alpha_s \cos \alpha_s h (D v_c + D_r v_s)}{2} + \frac{\pi D_s h^3 \sin^2 \alpha_s \Delta p}{12 \eta L} - \frac{\pi^2 D^2 s^3 t g \alpha_s \Delta p}{10 \eta_s L e} \quad (26)$$

#### WERYFIKACJA OBLICZENIOWA

Weryfikacja obliczeniowa dotyczy przykładu identycznego, jak w przypadku opublikowanego w [1] badania modeli układu uplastyczniającego z obracającym się cylindrem i nieruchomym ślimakiem oraz z obracającym się ślimakiem i nieruchomym cylindrem. Tak więc w układzie ślimakowym uplastycznia się PE-LD o nazwie handlowej "Lupolen 1800M". Warunki uplastyczniania są następujące: temperatura w strefie dozowania 190°C, ciśnienie na końcu strefy dozowania  $p_2 =$

19,4 MPa, prędkość obrotowa cylindra  $v_c = 1,0 \text{ s}^{-1}$ , prędkość obrotowa ślimaka  $v_s = 1,0 \text{ s}^{-1}$ . Elementy geometryczne strefy dozowania to: średnica wewnętrzna cylindra  $D = 60 \text{ mm}$ , długość strefy  $L = 4,5 D$ , skok linii śrubowej  $t = D$ , szerokość grzbietu zwoju  $e = 4,5 \text{ mm}$ , głębokość kanału na początku i na końcu strefy dozowania odpowiednio:  $h_1 = 9 \text{ mm}$  i  $h_2 = 3 \text{ mm}$ , szczelina pomiędzy grzbietem zwoju ślimaka a powierzchnią wewnętrzną cylindra  $s = 0,12 \text{ mm}$ . Zadanie polega na wyznaczeniu prędkości poszczególnych przepływów tworzywa oraz ich natężeń objętościowych.

Do wykorzystania wzorów (13), (14) i (15) jest potrzebna znajomość wartości  $D_r$ ,  $\alpha_s$ ,  $\Delta p$  oraz  $\eta$ ; wartości pozostałych wielkości są dane.

Średnice rdzenia ślimaka na początku i na końcu strefy dozowania wynoszą odpowiednio:

$$D_{r1} = D - 2h_1 \quad (27a)$$

oraz

$$D_{r2} = D - 2h_2 \quad (27b)$$

a po podstawieniu danych liczbowych  $D_{r1} = 42 \text{ mm}$  oraz  $D_{r2} = 54 \text{ mm}$ .

Z warunku ciągłości przepływu ciśnieniowego wynika, że

$$\frac{\pi D_{s1} h_1^3 \sin^2 \alpha_{s1} p_1}{12 \eta L} = \frac{\pi D_{s2} h_2^3 \sin^2 \alpha_{s2} p_2}{12 \eta L} \quad (28)$$

gdzie:  $p_1$  — ciśnienie na początku strefy dozowania.

Zatem

$$p_1 = \frac{D_{s2} \sin^2 \alpha_{s2} \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^3}{D_{s1} \sin^2 \alpha_{s1}} p_2 \quad (29)$$

Średnice średnie ślimaka na początku i na końcu strefy dozowania wynoszą odpowiednio:

$$D_{s1} = \frac{D + D_{r1}}{2} \quad (30a)$$

oraz

$$D_{s2} = \frac{D + D_{r2}}{2} \quad (30b)$$

a po podstawieniu danych liczbowych  $D_{s1} = 51 \text{ mm}$  oraz  $D_{s2} = 57 \text{ mm}$ .

Ze wzoru (22) wynika, że

$$\text{tg } \alpha_{s1} = \frac{t}{\pi D_{s1}} \quad (31a)$$

oraz

$$\text{tg } \alpha_{s2} = \frac{t}{\pi D_{s2}} \quad (31b)$$

a po podstawieniu danych liczbowych  $\alpha_{s1} = 20^\circ 32'$  oraz  $\alpha_{s2} = 18^\circ 32'$ .

Na podstawie równania (29) można teraz wyznaczyć ciśnienie na początku strefy dozowania:

$$p_1 = \frac{57 \cdot 0,1011}{51 \cdot 0,1230} \left(\frac{3}{9}\right)^3 p_2 = 0,034 p_2 \quad (32)$$

Oznacza to, że tworzywo przepływa w kierunku od ciśnienia niższego do wyższego.

Zmiana ciśnienia (w tym przypadku jego przyrost) na długości strefy dozowania wynosi więc

$$\Delta p = p_2 - p_1 = p_2 - 0,034 p_2 = 0,966 p_2 = 18,741 \text{ MPa} \quad (33)$$

Określając lepkość tworzywa w strefie dozowania należy uwzględnić fakt, że zależy ona przede wszystkim od temperatury i szybkości ścinania tworzywa w tej strefie. Miarodajne są przy tym wartości wielkości na końcu strefy dozowania, gdyż tam się one determinują. Tak więc, z wystarczającym przybliżeniem, szybkość ścinania tworzywa określa równanie

$$\dot{\gamma} = \frac{V_c + V_s}{h_2} = \frac{\pi(Dv_c + D_r v_s)}{h_2} \quad (34)$$

Po podstawieniu danych liczbowych  $\dot{\gamma} = 119,38 \text{ s}^{-1}$ .

Z wykresu krzywej płynięcia PE-LD ("Lupolen 1800M") odczytuje się wg [6], w odniesieniu do wartości  $\dot{\gamma} = 119,38 \text{ s}^{-1}$  oraz temp.  $190^\circ\text{C}$ , wartość lepkości  $\eta = 280 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

Po zgromadzeniu wszystkich powyższych danych

T a b e l a 1. Rezultaty weryfikacji obliczeniowej prędkości przepływów tworzywa [wzory (13), (14) i (15)]

T a b l e 1. Results of computational verification of the melt flow velocities (eqns. 13–15)

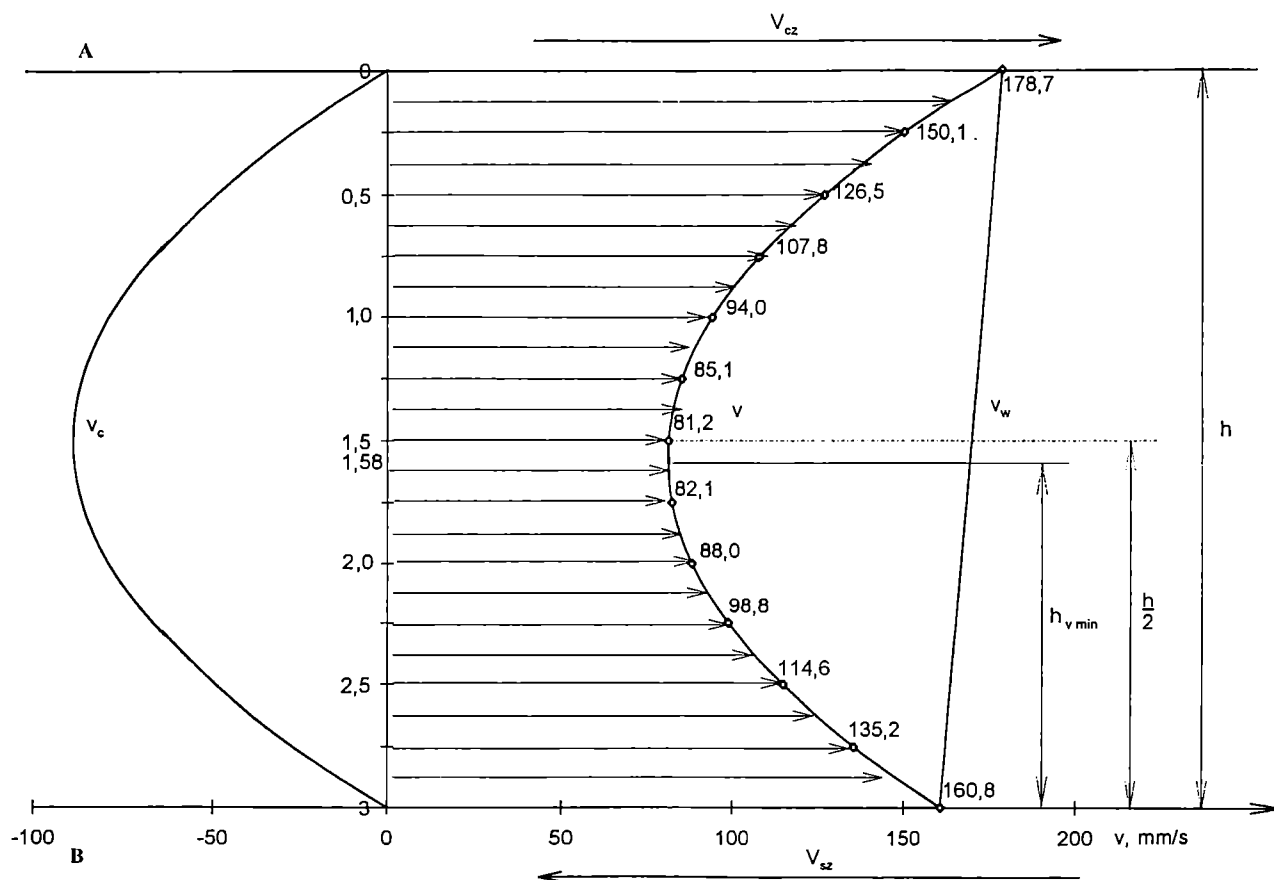
Rodzaj przepływu	Prędkość przepływu (mm/s) w odniesieniu do wartości rzędnej $y$ (mm)									
	$y$	0	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	2,75	3,0
Przepływ wleczony $v_w$		178,7	177,2	175,7	172,8	169,8	166,8	163,8	162,3	160,8
Przepływ ciśnieniowy $v_c$		0	-27,1	-49,2	-78,8	-88,6	-78,8	-49,2	-27,1	0
Przepływ wzdłużny $v$		178,7	150,1	126,5	94,0	81,2	88,0	114,6	135,2	160,8

można już korzystać ze wzorów (13), (14) i (15). Wyniki obliczeń, w przypadku  $0 \leq y \leq 3 \text{ mm}$ , przedstawiają tabela 1 i rys. 3.

W identyczny sposób, po uprzednim wyznaczeniu wartości  $\alpha_w = 17^\circ 39'$  ze wzoru

$$\text{tg } \alpha_w = \frac{t}{\pi D} \quad (35)$$

wykorzystano równanie (26); wyniki obliczeń zawiera tabela 2.



Rys. 3. Wykresy rozkładu prędkości przepływu tworzywa wzdłuż kanału śrubowego do weryfikacji obliczeniowej równań (13)–(15); A — powierzchnia cylindra, B — powierzchnia ślimaka, objaśnienia symboli w tekście (por. tabela 1)

Fig. 3. Velocity distribution graphs for a polymer stream flowing along the screw channel used for the computational verification of equations (13)–(15): A — barrel surface area, B — screw surface area (for symbols see text, Table 1)

T a b e l a 2. Wyniki weryfikacji obliczeniowej objętościowego natężenia przepływu tworzywa [równanie (26)]

T a b l e 2. Results of computational verification of the melt volumetric flow rates [eqn. (26)]

Rodzaj przepływu	Objętościowe natężenie przepływu, m <sup>3</sup> /s
Wleczony	$2,899 \cdot 10^{-5}$
Ciśnieniowy	$1,009 \cdot 10^{-5}$
Przeciekowy	$7,533 \cdot 10^{-7}$
Całkowity	$18,147 \cdot 10^{-6}$

## WNIOSKI Z BADAŃ TEORETYCZNYCH

Zaproponowane i zweryfikowane obliczeniowo badania teoretyczne modelu kinematycznego ślimakowego układu uplastyczniającego, w którym ruch obrotowy wykonuje jednocześnie zarówno cylinder, jak i ślimak z tym, że kierunki ich obrotów są sobie przeciwne, pozwalają na sformułowanie następujących ważniejszych wniosków odniesionych do strefy dozowania układu uplastyczniającego. We wnioskach przedstawiono również dane porównawcze, wykorzystując wiadomości podane w poprzedniej pracy [1].

— Model kinematyczny ślimakowego układu uplastyczniającego z jednocześnie obracającym się cylindrem i ślimakiem jest, w ujęciu opisujących go równań matematycznych ogólnych i szczegółowych, superpozycją bezpośrednią modelu z obracającym się cylindrem i modelu z obracającym się ślimakiem; powoduje to istotną intensyfikację procesów zachodzących w układzie uplastyczniającym.

— Prędkość przepływu wzdłużnego (wypadkowego) jest największa przy powierzchni wewnętrznej cylindra (tak jak w układzie z obracającym się cylindrem), a druga co do wartości — przy powierzchni rdzenia ślimaka (odpowiednik stanowi tu układ z obracającym się ślimakiem). Prędkość najmniejsza jest względem średnicy średniej ślimaka nieco przesunięta w kierunku powierzchni rdzenia ślimaka.

— Prawdopodobieństwo występowania wartości ujemnych prędkości przepływu wzdłużnego (wypadkowego) w zależności od rzędnej głębokości kanału oceniamy jako bardzo małe; praktycznie biorąc, nie powinny one w ogóle wystąpić.

— Objętościowe natężenie przepływu wleczonego jest sumą natężenia przepływu w modelu z obracającym się cylindrem i w modelu z obracającym się ślimakiem. W rozpatrywanym przykładzie stanowi ono (w takich samych warunkach) 189% wartości otrzymanych w pierwszym modelu i 213% wartości otrzymanych w modelu drugim.

— Prędkość przepływu ciśnieniowego i objętościowe natężenie przepływu ciśnieniowego przybierają większe wartości niż w modelu z obracającym się cylindrem i w modelu z obracającym się ślimakiem. W rozpatrywanym przykładzie największa wartość prędkości przepływu ciśnieniowego i natężenie takiego przepływu są większe o 43%.

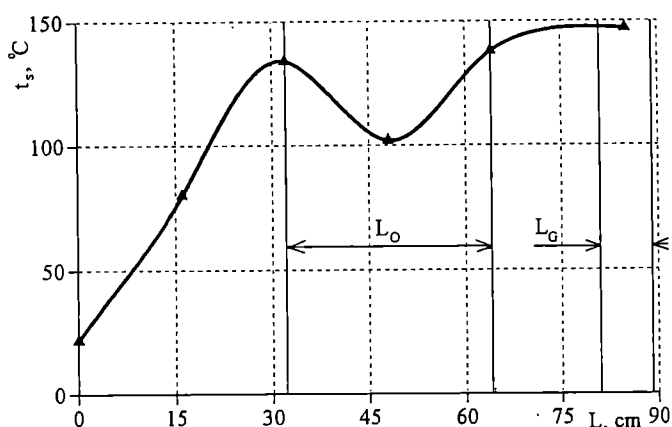
— Objętościowe natężenie przepływu przeciekowego przybiera większe wartości niż w modelu z obracającym się cylindrem i w modelu z obracającym się ślimakiem — w rozpatrywanym przykładzie wartość natężenia przepływu przeciekowego jest większa o 55%.

— Całkowite objętościowe natężenie przepływu jest większe niż w modelu z obracającym się cylindrem i w modelu z obracającym się ślimakiem — w rozpatrywanym przykładzie stanowi ono odpowiednio 245% i 298% wartości otrzymanych w tych modelach.

## KONCEPCJE KONSTRUKCYJNE

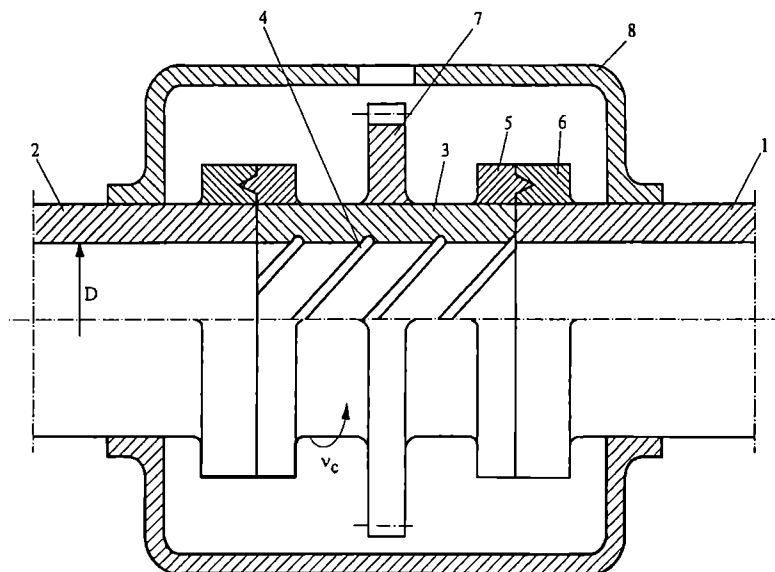
Rozwiązanie konstrukcyjne, w którym obracałby się cały cylinder układu uplastyczniającego wytłaczarki, jest bardzo złożone, głównie ze względu na dwa całkowicie nowe i trudne węzły konstrukcyjne, mianowicie węzeł obejmujący strefę zasypu (np. doprowadzanie tworzywa do zasobnika wykonującego ruch obrotowy) i węzeł obejmujący końcówkę strefy dozowania (np. połączenie z nieruchomą głowicą wytłaczarską). Wydaje się więc, że to rozwiązanie nie będzie szybko urzeczywistnione.

O wiele bliższe zastosowaniu praktycznemu może być rozwiązanie polegające na wprowadzeniu składanego cylindra układu uplastyczniającego, w którym wybrany element składowy cylindra wykonuje ruch obrotowy [7]. Element ten powinien być umiejscowiony w układzie uplastyczniającym tam, gdzie występuje największe zapotrzebowanie na ciepło. Miejsce to mo-



Rys. 4. Zależność temperatury ( $t_s$ ) od długości układu uplastyczniającego ( $L$ ) podczas wytłaczania autotermicznego PE-LD; ślimak klasyczny średnicy  $D = 32$  mm, stosunek  $L/D = 25$ , prędkość obrotowa ślimaka  $4,22$  s<sup>-1</sup>,  $L_G$  — długość głowicy wytłaczarskiej,  $L_0$  — długość składowa elementu obrotowego cylindra [8]

Fig. 4. Temperature ( $t_s$ ) in relation to the plasticating system length ( $L$ ) in autothermal extrusion of LDPE; conventional screw  $D = 32$  mm bore,  $L/D = 25$ , screw rotation speed  $4.22$  s<sup>-1</sup>,  $L_G$  — extrusion head, length,  $L_0$  — length of rotating barrel component [8]



Rys. 5. Schemat fragmentu składanego cylindra układu uplastyczniającego wytłaczarki ze składowym elementem obrotowym wg [7]; objaśnienia w tekście

Fig. 5. The diagram of a folding barrel part in the extruder plasticizing system involving the rotating component of the barrel (see text for explanations) [7]

zna wyznaczyć w procesie wytłaczania autotermicznego; na wykresie zależności temperatury od długości układu uplastyczniającego znajduje się ono w zakresie temperatury najniższej (rys. 4).

Rysunek 5 przedstawia schematycznie fragment cylindra składanego (bez grzejników i ślimaka). Cylinder jest zbudowany z trzech składowych elementów konstrukcyjnych — (1), (2) i (3) — współosiowych, przylegających do siebie. Element (1) jest nieruchomym elementem początkowym cylindra, element (2) jest nieruchomym elementem końcowym cylindra, natomiast element (3) stanowi część środkową wykonującą ruch obrotowy  $v_c$ , o kierunku przeciwnym do ruchu obrotowego  $v_s$  ślimaka. Powierzchnia wewnętrzna elementu obrotowego może być jednolita geometrycznie — walcowa, albo niejednolita geometrycznie — rowkowana, z rowkami liniowymi lub prawo- bądź lewoskrętnymi (4). Na rysunku pokazano ponadto przykład ułożyskowania (5) i (6) elementu obrotowego (3), przykład przeniesienia napędu przez koło zębate (7) na element obro-

towy (3) oraz przykład połączenia tuleją (8) elementów nieruchomych (1) i (2) cylindra składanego.

#### LITERATURA

1. Sikora R., Sasimowski E.: *Polimery* 1999, **44**, 600.
2. Yu Q. P., Hu G. H.: *Polym. Eng. Sci.* 1998, **38**, 819.
3. Rauwendaal Ch. i inni: *Intern. Polym. Processing* 1998, **13**, 327.
4. Kemblowski Z. i inni: "Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej", WNT, Warszawa 1985.
5. Sikora R.: "Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych", Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
6. "Kenndaten für die Verarbeitung thermoplastischer Kunststoffe, Teil 2. Rheologie", Carl Hanser Verlag, Monachium — Wiedeń 1982.
7. *Zgłosz. pat.* RP P-325 674 (1998).
8. Sikora J.: *Polimery* 1997, **42**, 565.

Otrzymano 11 III 1999 r.