

ROBERT SIKORA, EMIL SASIMOWSKI

Politechnika Lubelska
Katedra Procesów Polimerowych
ul. Nadbystrzycka 36, 20-950 Lublin

Analiza geometryczno-kinematyczna przepływu w ślimakowym układzie uplastyczniającym^{*)}

THE GEOMETRICAL AND KINEMATICAL ANALYSIS OF THE FLOW OF POLYMER THROUGH THE SCREW-BASED PLASTICATING SYSTEM

Summary — Earlier investigations [1-4] on the lengthwise flow and the transverse flow of polymer particles through the helical channel in the screw-based plasticating system are continued to study the resultant flow in the models examined, *i.e.*, one involving the rotating barrel and the other involving the rotating screw. The trajectories followed by polymer particles in the two models were found to be different. In the rotating barrel model, the spiral lead of the polymer particle trajectory was found to be higher (Figs. 6, 7) than that in the rotating screw model (Figs. 8, 9), because the peripheral speeds of the barrel and the screw are different. The spiral motion pathway is laevorotatory in the former and dextrorotatory in the latter model. In the vicinity of the helical channel wall (direction of motion varies by $\pi/2$), polymer particles behave identically in either model.

Key words: screw rotation, barrel rotation, trajectory of polymer particle flow.

W naszych poprzednich pracach przedstawiliśmy porównanie modeli kinematycznych ślimakowego układu uplastyczniającego we współrzędnych prostokątnych [1] oraz we współrzędnych śrubowych [2] zarówno w przypadku, gdy ruch obrotowy wykonuje cylinder układu, jak i wówczas, gdy ruch obrotowy wewnątrz układu wykonuje ślimak [3]. W każdym z tych czterech analizowanych teoretycznie i weryfikowanych obliczeniowo modeli kinematycznych występuje wzdłuż śrubowego kanału układu uplastyczniającego przepływ tworzywa przetwarzanego (określany jako wleczony wzdłużny) i jednocześnie przepływ przyjmowany jako ciśnieniowy wzdłużny; obydwa te przepływy w wyniku superpozycji dają przepływ łączny wzdłużny. Nie będący przedmiotem naszej analizy wpływ powierzchni ścianek bocznych (powierzchni czynnej i powierzchni biernej) kanału śrubowego nie wydaje się istotny ze względu na fakt, że przepływy odbywają się równoległe do powierzchni ścianek. Zatem, omawiane przepływy nie zmieniają swojego charakteru względem przekroju wzdłużnego kanału śrubowego.

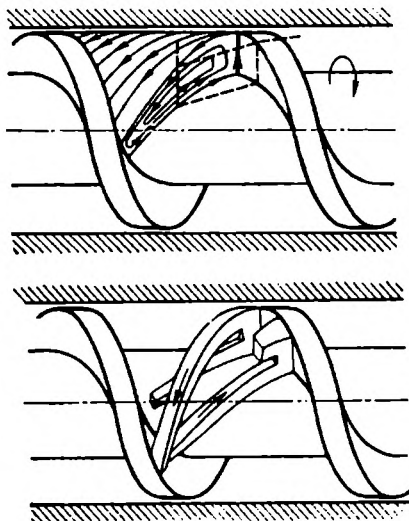
Z kolei w pracy [4] rozpatrywaliśmy takie same warianty kinematyczne przepływu tworzywa, ale w poprzek śrubowego kanału układu uplastyczniającego.

W poprzek kanału odbywają się przepływy wleczony poprzeczny i ciśnieniowy poprzeczny, powodujące na drodze superpozycji przepływ łączny poprzeczny. Przepływy te, ponieważ zachodzą bardziej lub mniej prostopadle do powierzchni ścianek bocznych kanału, nie zmieniają wprawdzie swego charakteru w przekroju poprzecznym kanału śrubowego, zależą jednak w sposób istotny od powierzchni ścianek.

Zagadnienia te nie były dotychczas przedmiotem pogłębionych analiz geometryczno-kinematycznych, aczkolwiek w literaturze można znaleźć kilka prób uproszczonej wizualizacji przepływów.

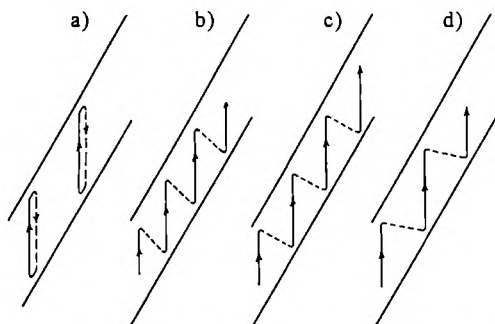
Jako jedni z pierwszych próbę wizualizacji wypadkowego — czyli łącznego wzdłużnego i łącznego poprzecznego — przepływu tworzywa w ślimakowym układzie uplastyczniającym przedstawili w 1953 r. J. F. Carley i R. A. Strub [5] (rys. 1). Ze względu na swe walory wizualizacja ta była od tego czasu wykorzystywana w różnych okolicznościach w prawie niezmienionej postaci przez wielu autorów, m.in. H. R. Jacobiego [6], B. Łączyńskiego [7], R. W. Tornera [8], J. Bursę i J. Stabika [9] oraz R. Stelera [10]. Podobne ujęcie przepływu wypadkowego — ale w pewnym uproszczeniu, bowiem w rozwiniętym na płaszczyznę kanale śrubowym — przedstawił w 1962 r. J. M. McKelvey [11] (rys. 2). W ujęciu tym został jednak uwzględniony dodatkowo stosunek natężenia przepływu wypadkowego ciśnieniowego do wlezonego. Zbliżoną próbę wizualizacji przepływu zamieścili

^{*)} Wykład wygłoszony w ramach VI Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Poznań, 19—22 czerwca 2001.



Rys. 1. Schematy przepływu tworzywa w ślimakowym układzie uplastyczniającym — wizualizacja wg [5]

Fig. 1. Polymer flow schemes in the screw-based plasticating system [5]



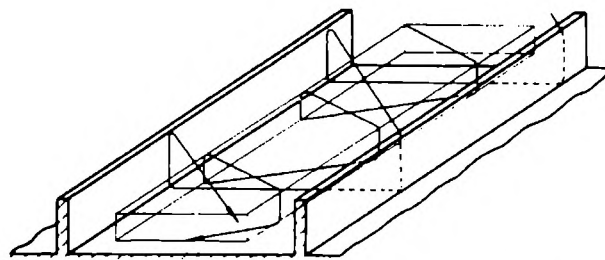
Rys. 2. Schematy przepływu tworzywa w ślimakowym układzie uplastyczniającym wg [10], uwzględniające stosunek $Q_p/Q_d = f$, czyli stosunek natężenia przepływu wypadkowego ciśnieniowego Q_p do wleczanego Q_d : a) $f = 1$, b) $f = 2/3$, c) $f = 1/3$, d) $f = 0$

Fig. 2. The schemes of polymer flow in the screw-based plasticating system [10] in relation to the resultant pressure flow rate (Q_p)/drag flow rate (Q_d) ratio equal to: (a) 1, (b) 2/3, (c) 1/3, (d) 0

również w swoich opracowaniach Z. Tadmor i C. G. Gogos [12] oraz, niedawno, J. A. Covas i G. Caldeira w pracy zbiorowej pod redakcją M. Kozłowskiego [13].

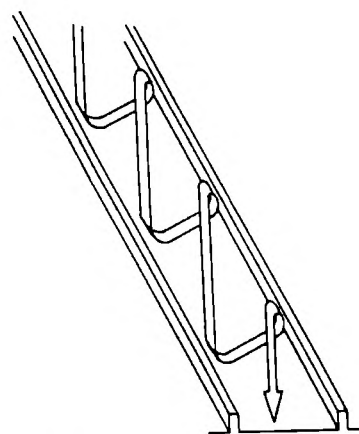
Schemat przepływu tworzywa w rozwiniętym na płaszczyznę kanale śrubowym w rzucie izometrycznym zinterpretowali graficznie L. P. B. M. Janssen [14] (rys. 3), M. Henczkowski [15], a następnie Ch. Rauwendaal [16] (rys. 4). Należy zauważyć, że Janssen podjął próbę uwzględnienia wpływu położenia cząstki tworzywa w kanale na trajektorię jej ruchu. Do najnowszych tego rodzaju opracowań zalicza się próbę wizualizacji Chana I. Chunga z 2000 r. [17] (rys. 5), należy ją jednak ocenić jako bardzo wyidealizowaną i raczej symboliczną.

W wymienionych publikacjach autorzy na ogół przyjmowali tylko jeden model układu uplastycz-



Rys. 3. Schemat przepływu tworzywa w ślimakowym układzie uplastyczniającym wg [14]

Fig. 3. Polymer flow scheme in the screw-based plasticating system [14]



Rys. 4. Schemat przepływu tworzywa w ślimakowym układzie uplastyczniającym wg [16]

Fig. 4. Polymer flow scheme in the screw-based plasticating system [16]



Rys. 5. Schemat przepływu tworzywa w ślimakowym układzie uplastyczniającym wg [17]

Fig. 5. Polymer flow scheme in the screw-based plasticating system [17]

niającego, w którym ruch obrotowy wykonuje cylinder, a ślimak pozostaje nieruchomy. Przyjmowali też dużo założeń upraszczających, pozostawiając wiele możliwości interpretacji i oceny. Prezentowane dotychczas próby wizualizacji, oprócz [14], dotyczą ogólnego, uprosz-

czonego przepływu w kanale śrubowym układu uplastyczniającego bez jednoznacznego wyodrębnienia krzywej stanowiącej trajektorię, którą zakreśla w kanale śrubowym pojedyncza wybrana cząstka tworzywa. Wizualizacja takiej właśnie trajektorii stanowi przedmiot niniejszego opracowania, dotyczącego dwóch wspomnianych uprzednio modeli kinematycznych

WARUNKI ANALIZY

W układzie współrzędnych prostokątnych przyjęliśmy dwa modele kinematyczne ślimakowego układu uplastyczniającego. W jednym z nich jednostajny ruch obrotowy wykonuje cylinder, a ślimak jest nieruchomy, natomiast w drugim jednostajny ruch obrotowy wykonuje ślimak, a cylinder pozostaje nieruchomy.

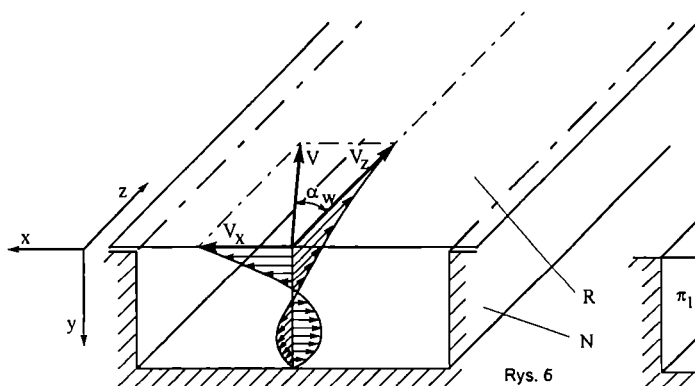
Ślimak ma ciągły kanał śrubowy, w całości wypełniony plastycznym lub ciekłym tworzywem, traktowanym jako płyn newtonowski. Przepływ w kanale jest izotermiczny, ustalony i laminarny.

Rozpatruje się trajektorię umownej cząstki tworzywa w punkcie znajdującym się w przekroju poprzecznym kanału w jego osi geometrycznej względem szerokości kanału, nieco poniżej powierzchni cylindra w modelu z obracającym się cylindrem, lub nieco powyżej powierzchni rdzenia ślimaka w przypadku modelu z obracającym się ślimakiem. Punkt ten został oznaczony w dalszym tekście literą A, powierzchnia wewnętrzna cylindra — literą φ , powierzchnia czynna ścianki bocznej zwoju ślimaka jako π_1 , powierzchnia bierna tej ścianki jako π_2 , a powierzchnia rdzenia ślimaka jako π_3 .

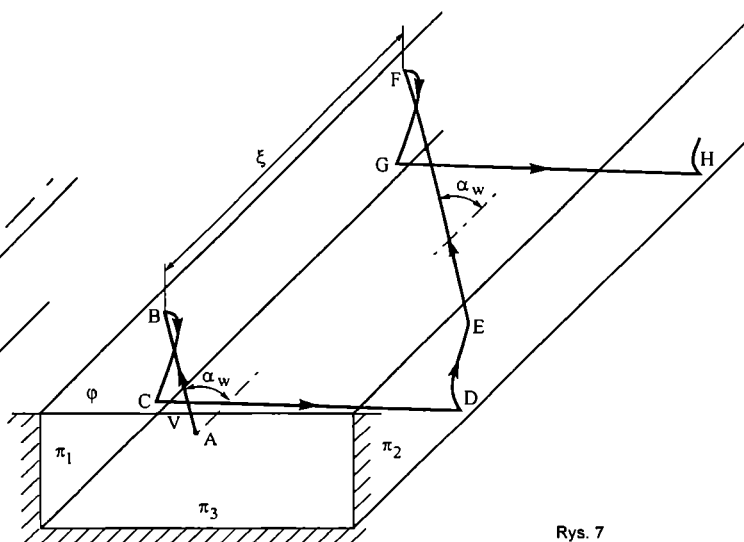
MODEL Z OBRACAJĄCYM SIĘ CYLINDREM

Rysunek 6 przedstawia schematycznie rozwinięty na płaszczyźnie kanał śrubowy układu uplastyczniającego z obracającym się cylindrem. Prędkość obwodową V cylindra, umiejscowioną w osi geometrycznej kanału, rozkłada się na dwie składowe prędkości: składową V_x poprzeczną (prostopadłą) do osi wzdłużnej kanału oraz V_z równoległą do osi wzdłużnej kanału. Wektory V oraz V_z tworzą pomiędzy sobą kąt α_w nazywany umownym kątem pochylenia linii śrubowej kanału [1—3]. Przyjęto klasyczne rozkłady prędkości przepływu łącznego poprzecznego i przepływu łącznego wzdłużnego [7—9, 18].

Na rozpatrywaną cząstkę tworzywa w punkcie A działają obie składowe prędkości cylindra — V_x oraz V_z — natomiast tor jej ruchu jest zgodny z kierunkiem prędkości wypadkowej V (rys. 7). Gdy cząstka tworzywa osiągnie punkt B na powierzchni równoległej do powierzchni φ cylindra, który jest nieco oddalony od powierzchni czynnej π_1 ścianki bocznej zwoju ślimaka, składowa V_x na skutek powstania na torze ruchu cząsteczki powierzchni π_1 , zmienia swój kierunek o $(\pi/2)$ rad na równoległą do tej powierzchni ze zwrotem skierowanym w stronę powierzchni π_3 rdzenia ślimaka; kierunek składowej V_z pozostaje natomiast bez zmiany, gdyż nie ma czynnika, któryby go zmienił. Od punktu B trajektoria cząstki jest więc inna, przybierając kierunek wypadkowy na kierunek równoległy do powierzchni π_1 oraz odchyłony nieliniowo w stronę składowej V_z . W punkcie C, nieco oddalonym od powierzchni π_1 oraz od powierzchni π_3 , składowa V_x po-



Rys. 6



Rys. 7

Rys. 6. Rozwinięty na płaszczyźnie kanał śrubowy układu uplastyczniającego — model z obracającym się cylindrem; R — element ruchomy, N — element nieruchomy, dalsze objaśnienia w tekście

Fig. 6. Planar development of the helical channel area — rotating barrel model; R — mobile element, N — immobile element (explanations in main text)

Rys. 7. Tor ruchu cząstki tworzywa w kanale śrubowym, w modelu z obracającym się cylindrem (por. rys. 6); objaśnienia w tekście

Fig. 7. The polymer particle trajectory in the helical channel of the rotating barrel model (cf. Fig. 6)

nownie zmienia kierunek o $(\pi/2)$ rad, gdyż na torze ruchu cząsteczki staje powierzchnia π_3 ; kierunek ten staje się równoległy do powierzchni π_3 , kierunek zaś składowej V_z pozostaje bez zmiany z tego samego powodu co poprzednio. Począwszy od punktu C trajektoria cząstki zmienia się więc na równoległą do powierzchni π_3 oraz odchyłoną w stronę składowej V_z .

W punkcie D usytuowanym tak jak punkt C, lecz przy powierzchni biernej π_2 ścianki bocznej zwoju ślimaka, na cząstkę tworzywa zaczyna działać składowa V_x o kierunku równoległym do powierzchni π_2 oraz zwrocie skierowanym w stronę powierzchni φ , natomiast kierunek składowej V_z , tak jak dotychczas, pozostaje bez zmiany. Trajektoria cząstki przybiera więc kierunek wypadkowy — równoległy do powierzchni π_2 oraz odchyłony nieliniowo w stronę składowej V_z . W punkcie E składowa V_x przybiera kierunek taki, jak w punkcie A. W punkcie F cykl ruchu cząstki tworzywa, mający kształt nieregularnej linii śrubowej o skoku ξ , zamyka się i rozpoczyna się cykl następny, identyczny jak opisany.

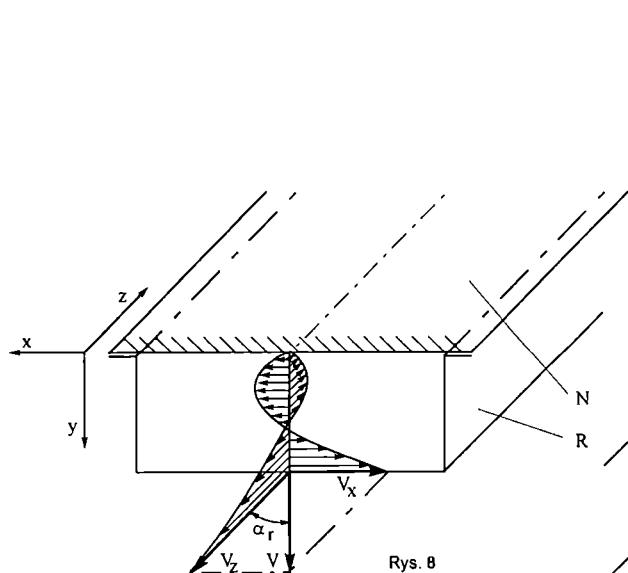
MODEL Z OBRACAJĄCYM SIĘ ŚLIMAKIEM

Rysunek 8 ilustruje schematycznie rozwinięty na płaszczyźnie kanał śrubowy układu uplastyczniającego z obracającym się ślimakiem. Prędkość obwodową V ślimaka rozkłada się, jak poprzednio, na składową V_x poprzeczną (prostopadłą) do osi wzdłużnej kanału oraz

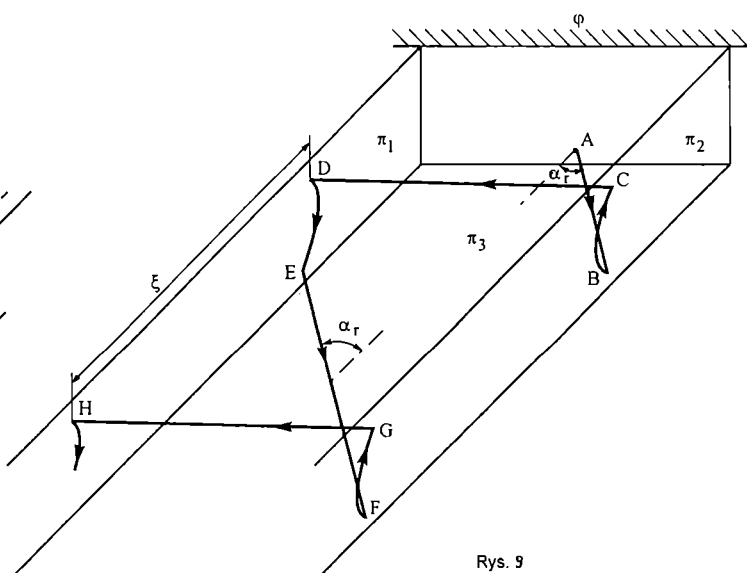
V_z równoległą do osi wzdłużnej kanału. Wektory V oraz V_z tworzą pomiędzy sobą kąt α_r , nazywany kątem pochylenia linii śrubowej kanału przy rdzeniu ślimaka [1—3].

Trajektoria ruchu rozpatrywanej cząstki A tworzywa, na którą działają obie składowe prędkości ślimaka — V_x oraz V_z — jest przedstawiona na rysunku 9. Ruch jej jest zgodny z kierunkiem prędkości wypadkowej V . Gdy cząstka ta osiągnie punkt B na powierzchni równoległej do powierzchni π_3 , który jest nieco oddalony od powierzchni biernej π_2 ścianki bocznej zwoju ślimaka, składowa V_x zmienia swój kierunek o $(\pi/2)$ rad, podczas gdy kierunek składowej V_z , ze względu na brak czynnika zmieniającego go pozostaje taki sam; zmiana kierunku V_x na równoległy do powierzchni π_2 o zwrocie skierowanym do powierzchni wewnętrznej cylindra φ następuje więc w wyniku napotkania na torze ruchu cząstki powierzchni π_2 . Zatem, począwszy od punktu B trajektoria cząstki zmienia się, przybierając kierunek wypadkowy jako kierunek równoległy do powierzchni π_2 z nieliniowym odchyleniem w stronę składowej V_z . W punkcie C, nieco oddalonym od powierzchni π_2 oraz od powierzchni φ , składowa V_x ponownie zmienia kierunek o $(\pi/2)$ rad na równoległy do powierzchni φ ; taki też staje się tor cząstki, ponieważ powierzchnia ta pojawia się na torze ruchu.

W punkcie D, usytuowanym podobnie jak punkt C, lecz przy powierzchni czynnej π_1 , na cząstkę tworzywa ponownie działają obie składowe: V_z oraz składowa V_x kolejny raz zmieniająca kierunek o $(\pi/2)$ rad. Tor



Rys. 8



Rys. 9

Rys. 8. Rozwinięty na płaszczyźnie kanał śrubowy układu uplastyczniającego — model z obracającym się ślimakiem; R — element ruchomy, N — element nieruchomy, dalsze objaśnienia w tekście

Fig. 8. Planar development of the helical channel area — rotating screw model; R — mobile element, N — immobile element

Rys. 9. Tor ruchu cząstki tworzywa w kanale śrubowym, w modelu z obracającym się ślimakiem (por. rys. 8); objaśnienia w tekście

Fig. 9. The polymer particle trajectory in the helical channel of the rotating screw model (cf. Fig. 8)

cząstki przybiera kierunek wypadkowy — równoległy do powierzchni π_1 z nieliniowym odchyleniem w stronę składowej V_z . W punkcie E składowe V_z oraz V_x przybierają kierunki, jak w punkcie A, a w punkcie F cykl ruchu cząstki tworzywa zamyka się w kształcie nieregularnej linii śrubowej o skoku ξ ; rozpoczyna się tu cykl kolejny, taki jak już opisany.

PORÓWNANIE OBU MODELI

Ogólny tor ruchu cząstek tworzywa w obu rozpatrywanych modelach kinematycznych ma podobny zarys nieregularnej linii śrubowej. Zachowanie się cząstki tworzywa w pobliżu ścianek kanału — zmiana kierunku ruchu o $(\pi/2)$ rad — jest takie samo.

W przypadku obracającego się cylindra (rys. 7) linia śrubowa ruchu cząstki jest lewoskrętna, natomiast gdy obraca się ślimak (rys. 9) jest ona prawoskrętna; powodują to przeciwne sobie kierunki obrotów cylindra i ślimaka.

Występuje także różnica w skoku linii śrubowej ruchu cząstki tworzywa w obu rozpatrywanych modelach. Wynika ona z odmiennego rozkładu prędkości obwodowej cylindra i ślimaka, co jest konsekwencją innej wartości odpowiednich kątów pochylenia linii śrubowej α_w oraz α_r . Ze względu na to, że kąt α_w jest mniejszy od kąta α_r , skok ξ linii śrubowej ruchu cząstki tworzywa jest większy w przypadku obracającego się cylindra niż w przypadku obracającego się ślimaka. Skok ξ linii śrubowej ruchu cząstki zwiększa się wraz ze wzrostem głębokości kanału śrubowego, a ten z kolei determinuje różnicę kąta α_w względem kąta α_r .

WNIOSKI

Analiza porównawcza i wizualizacja przepływu wypadkowego tworzywa w ślimakowym układzie uplastyczniającym pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

— W zależności od położenia cząstki tworzywa w początkowym przekroju poprzecznym śrubowego kanału ślimaka, trajektoria jej ruchu mająca postać nieregularnej linii śrubowej jest inna; różnice dotyczą wszystkich elementów geometrycznych linii śrubowej.

— Trajektorie ruchu cząstek tworzywa w istotny sposób zależą od przyjętego modelu kinematycznego, czyli są inne w modelu z obracającym się cylindrem i w modelu z obracającym się ślimakiem.

— Przeciwny sobie zwrot nieregularnej linii śrubowej toru ruchu wybranej cząstki tworzywa oraz różny jej skok w obu porównywanych modelach kinematycznych stanowi wynik odmiennego rozkładu prędkości

składowych ruchu cząstki tworzywa.

Uzyskane przez nas rezultaty są całkowicie zgodne z wynikami poprzednich, cytowanych tu naszych prac. Dalsze badania będą dotyczyć trajektorii ruchu cząstek tworzywa umiejscowionych w różnych punktach w tym samym początkowym przekroju poprzecznym kanału oraz korelacji między nimi.

LITERATURA

1. Sikora R., Sasimowski E.: *Polimery* 1999, **44**, 600.
2. Sikora R., Sasimowski E.: *Polimery* 2000, **45**, 141.
3. Sikora R., Sasimowski E.: *Intern. Polym. Processing* 2000, **3**, 1.
4. Sikora R., Sasimowski E.: *Polimery* 2001, **46**, 184.
5. Carley J. F., Strub R.A.: *Ind. Eng. Chem.* 1953, **45**, 970.
6. Jacobi H. R.: „Grundlagen der Extrudertechnik“, Hanser Verlag, Monachium 1960, str. 5—9.
7. Łączyński B.: „Metody przetwórstwa tworzyw sztucznych“, WNT, wyd. II, Warszawa 1973.
8. Torner R. W.: „Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov“, Wyd. Khimiya, Moskwa 1977.
9. Bursa J.: „Podstawy procesu wytłaczania jednoślismakowego“, Materiały I Wiosennej Szkoły Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych, Gliwice — Lublin — Toruń 1980, str. 7—9.
10. Steller R., Kozłowski M., Piękowski J.: *Polimery* 1986, **31**, 60.
11. McKelvey J. M.: „Polymer Processing“, John Wiley Sons, Nowy Jork — Londyn 1962, str. 228—247.
12. Tadmor Z., Gogos C. G.: „Principles of Polymer Processing“, John Wiley & Sons, Nowy Jork — Brisbane — Chichester — Toronto 1979, str. 351—360.
13. Praca zbiorowa: „Podstawy recyklingu tworzyw sztucznych“ (red. Kozłowski M.), Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998, str. 381—384.
14. Janssen L. P. B. M.: „Twin Screw Extrusion“, Elsevier, Amsterdam — Oxford — Nowy Jork 1978, str. 2—4.
15. Praca zbiorowa: „Technologia przetwórstwa tworzyw sztucznych“ (red. Heneczkowski M.), Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1999, str. 77—79.
16. Rauwendaal Ch.: „Mixing in Polymer Processing“, Marcel Dekker Inc., Nowy Jork 1991, str. 130—148.
17. Chan I. Chung: „Extrusion of Polymers“, Hanser Verlag, Monachium 2000, str. 26—28.
18. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielocząsteczkowych“, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993, str. 46—55.