

ROBERT SIKORA¹⁾, ELŻBIETA BOCIĄGA^{2)*)}

Podobieństwo przepływów tworzyw polimerowych w kanałach narzędzi przetwórczych

SIMILARITY OF POLYMERS FLOW IN THE CHANNELS OF PROCESSING TOOLS

Summary — The problems of modeling of the phenomena concerning the polymers flow in processing tools channels have been examined from the point of view of possibility of modeling results reference to the actual subjects *i.e.* theory of probability requirements keeping. Special attention has been paid to rheological and thermal processes and to criteria numbers used to their similarity defining. Among these numbers the following have been characterized: Reynolds's, Weber's, Grashoff's, Fourier's, Peclet's, Prandtl's, Nusselt's, Graetz's, Brinkman's and Biot's ones. It seems to be useful to attempt to determine the values of criteria numbers in relation to polymers processing. This way the proper planning and carrying out the model experiments can be easier.

Key words: processing tools channels, polymers flow, modeling, criteria numbers.

PODSTAWY BADAŃ MODELOWYCH

Badania procesu przepływu tworzyw polimerowych w kanałach narzędzi przetwórczych często prowadzi się w skali laboratoryjnej, co wynika stąd, że wykonywanie prób podczas procesu produkcyjnego wiąże się z dużymi kosztami i stratami produkcyjnymi. W modelowych badaniach laboratoryjnych odtwarza się w zasadzie warunki występujące w procesach produkcyjnych. Niejednokrotnie jednak nie ma potrzeby odtwarzania całego określonego procesu technologicznego przetwórstwa, a jest wystarczające ograniczenie badań do wybranego problemu. Jako przykład mogą tu służyć badania procesów reologicznych i cieplnych zachodzących podczas przepływu tworzywa w kanałach przepływowych modelowej formy wtryskowej bądź też modelowej głowicy wytłaczarskiej. Możliwe są również badania procesów prowadzonych z zastosowaniem maszyny produkcyjnej, ale w modelowych warunkach jej działania. Jednak w każdym przypadku w doświadczeniach modelowych muszą być zachowane wymagania teorii podobieństwa pomiędzy modelem a obiektem rzeczywistym, tylko wtedy bowiem wyniki badań modelowych mogą być odniesione do obiektu rzeczywistego [1—4].

Jeżeli warunki podobieństwa nie zostaną spełnione, wówczas wyniki badań modelowych są słuszne jedynie w warunkach występujących podczas badań. Dlatego też przed przystąpieniem do budowy modelu jest konieczne ustalenie warunków podobieństwa określonych wielkości fizycznych albo geometrycznych mających wpływ na badane zjawisko, przy czym ważne zagadnienie stanowi poprawne określenie zbioru tych wielkości [2]. W praktyce uwzględnienie w analizie wszystkich wielkości jest oczywiście niemożliwe do zrealizowania. Ze zbioru wielkości podstawowych wybiera się te, które odgrywają najbardziej istotną rolę. Poprawny ich wybór wymaga dużej wiedzy na temat badanego zjawiska.

Najczęściej stosowane metody określania warunków podobieństwa są opisane w pracach [1—6]. Parametry fizyczne decydujące o przebiegu danego zjawiska można pogrupować w bezwymiarowe moduły podobieństwa, nazywane liczbami kryterialnymi. Często stosowane — również w badaniach procesów przepływu tworzywa polimerowego w kanałach narzędzi przetwórczych — liczby kryterialne to, na przykład, liczba Reynoldsa, Webera, Grashoffa, Fouriera, Biota, Pecleta, Prandtla, Nusselta, Froude'a, Strouhala, Graetza lub Brinkmana [6—10]. Zgrupowanie wielkości fizycznych w liczby kryterialne przyczynia się do zmniejszenia liczby zmiennych określających przebieg danego zjawiska. Wyznaczenie zależności pomiędzy liczbami kryterialnymi, ze względu na ich mniejszą liczbę, jest łatwiejsze niż związku między wielkościami pierwotnymi [5]. Poza tym, aby zmienić wartość liczby kryterialnej wystar-

¹⁾ Politechnika Lubelska, Katedra Procesów Polimerowych, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin; kptw@archimedes.pol.lublin.pl

²⁾ Politechnika Częstochowska, Katedra Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych i Zarządzania Produkcją, Al. Armii Krajowej 19c, 42-200 Częstochowa; bociaga@kpts.pcz.czyst.pl

^{*)} Autor, do którego należy kierować korespondencję.

czy zastosować inną wartość liczbową tylko jednego parametru wchodzącego w skład tej liczby. Przyczynia się to do znacznego ułatwienia badań i skrócenia czasu ich wykonywania, a więc i kosztów ich realizacji.

Najczęściej uwzględnia się podobieństwo geometryczne, dynamiczne, kinematyczne, fizykochemiczne, cieplne oraz masowe (przenoszenie ciepła i masy), jak również chemiczne [1—8].

W przypadku każdego rodzaju podobieństwa jest wymagane zachowanie wszystkich poprzedzających go rodzajów. Na przykład, aby uzyskać podobieństwo chemiczne należy spełnić warunki wszystkich wcześniej wyszczególnionych rodzajów podobieństwa.

Ogólne warunki podobieństwa zjawisk fizycznych można określić następująco [4]:

— muszą być tego samego rodzaju, na przykład dwa przepływy płynu nieniuutonowskiego;

— muszą występować w układach podobnych geometrycznie;

— bezwymiarowe liczby kryterialne określające podobieństwo obydwu zjawisk muszą być sobie równe.

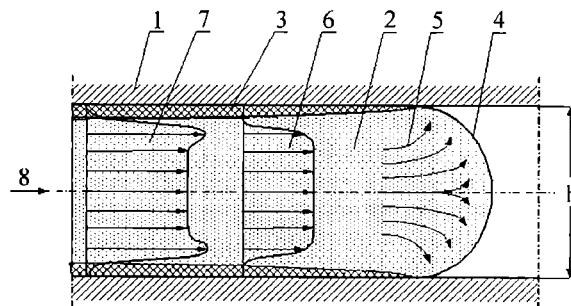
Podstawowe informacje dotyczące możliwości wykorzystania liczb kryterialnych do określenia podobieństwa przepływów tworzyw w kanałach przepływowych narzędzi przetwórczych można znaleźć w nielicznych tylko pracach z zakresu podstaw przetwórstwa tworzyw polimerowych, na przykład w pracach [6, 9], ocenia się je jednak obecnie jako niewystarczające.

ZACHOWANIE SIĘ TWORZYWA W KANAŁACH PRZEPLYWOWYCH NARZĘDZI PRZETWÓRCZYCH

Podczas przepływu tworzywa ciekłego w kanałach przepływowych narzędzi przetwórczych istotne znaczenie mają procesy reologiczne oraz cieplne. Przepływ tworzywa jest uwarunkowany kształtem i wymiarami kanałów oraz prędkością przepływu i lepkością tworzywa, na co z kolei wpływ wywiera ciśnienie i temperatura tworzywa oraz temperatura narzędzia [6, 11—13].

Przepływ tworzywa ciekłego w kanałach narzędzi przetwórczych jest przepływem nieizotermicznym [6, 14, 15]. Jego nieizotermiczność jest efektem generowania ciepła wskutek tarcia wewnętrznego w tworzywie ciekłym oraz tarcia zewnętrznego tworzywa o ścianki kanałów, a także różnicy temperatury narzędzia i tworzywa ciekłego [16—18]. Najczęściej przedstawiany w literaturze model nieizotermicznego przepływu tworzywa w kanale jest pokazany na rys. 1.

Wpływające do kanału tworzywo ciekłe stykając się ze ściankami kanału o znacznie niższej temperaturze ulega stopniowemu zestaleniu, tworząc w efekcie warstwę tworzywa stałego. Warstwa ta stanowi izolację cieplną dla tworzywa przepływającego po jej ścianie wewnętrznej. Front strumienia przepływającego tworzywa, ochładzany dodatkowo powietrzem znajdującym się w kanale, ma niższą temperaturę i większą lepkość niż jego warstwy wewnętrzne. Na skutek przepły-



Rys. 1. Klasyczny model przepływu tworzywa przez kanał: 1 — ścianka kanału, 2 — plastyczny rdzeń tworzywa, 3 — warstwa tworzywa zestalonego, 4 — front strumienia tworzywa i jego rozkład, 5 — przepływ poprzeczny tworzywa (efekt „fontannowy”), 6 — rozkład prędkości przepływu, 7 — rozkład temperatury, 8 — kierunek przepływu tworzywa; h — wysokość kanału [11, 12, 16, 17, 19, 20] (dalsze objaśnienia w tekście)

Fig. 1. Classical model of polymer flow through the channel: 1 — channel wall, 2 — plastic core of a polymer, 3 — layer of solidified polymer, 4 — front of the polymer stream and its profile, 5 — transverse polymer flow („fountain effect”) 6 — flow velocity profile, 7 — temperature profile, 8 — polymer flow direction; h — channel height [11, 12, 16, 17, 19, 20] (further explanations in the text)

wu poprzecznego tworzywa, nazywanego w literaturze efektem „fontannowym” (ang. *fountain effect*), ta przeschłodzona warstwa tworzywa przemieszcza się w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu, osadzając się w postaci zestalonej na ściankach kanału i tworząc postępującą warstwę tworzywa zestalonego.

Rozkład temperatury tworzywa w kanale zależy nie tylko od różnicy między temperaturą ścianki kanału i tworzywa ciekłego oraz współczynnika przewodzenia ciepła tworzywa, lecz także od jego lepkości, gęstości i ciepła właściwego oraz prędkości przepływu. Jest on związany z przewodzeniem ciepła od tworzywa do ścianek kanału, konwekcją oraz wewnętrznym generowaniem ciepła. Zjawisko wewnętrznego generowania ciepła występuje najintensywniej w obszarach, w których jest największy gradient poprzeczny prędkości przepływu sąsiadujących warstw tworzywa, a więc i maksymalna szybkość ścinania, tj. w pobliżu zestalonej warstwy tworzywa [21]. W obszarze tym temperatura osiąga wartość największą. W środkowej części kanału gradient poprzeczny prędkości jest bliski zeru i zjawisko wewnętrznego generowania ciepła prawie zanika, gdyż gradient wzdłużny prędkości w tym obszarze, ze względu na niezmiennicze pole przekroju poprzecznego kanału, nie wywiera istotnego wpływu na zjawisko wewnętrznego generowania ciepła. Rozkład temperatury tworzywa w kanale wpływa na rozkład jego lepkości i prędkości, a tym samym na straty ciśnienia w kanale.

W toku przepływu tworzywa w kanałach narzędzi przetwórczych następuje przenoszenie ciepła pomiędzy

tworzywem wtryskiwanym, narzędziem, maszyną i otoczeniem. Ciepło może być przenoszone w wyniku przewodzenia, konwekcji i promieniowania [6, 11, 19]. Wymienione trzy podstawowe sposoby przenoszenia ciepła występują równocześnie, przy czym stopień ich udziału jest zróżnicowany [4, 6, 10, 22, 23]. Podczas ruchu płynu, w jego głębszych warstwach dominuje przenoszenie na drodze konwekcji, natomiast w strefie przylegającej do ścianki, gdzie prędkość przepływu jest zero — na drodze przewodzenia. Intensywność konwekcyjnego przenoszenia ciepła zależy przede wszystkim od przewodności cieplnej płynu oraz od prędkości jego przepływu. W procesie przepływu tworzywa w kanale przenoszenie ciepła w wyniku promieniowania odgrywa mniejszą rolę, natomiast jest istotne w określaniu strat ciepłych narzędzia [11, 24, 25].

KRYTERIA PODOBIEŃSTWA

Podczas przepływu tworzywa polimerowego w kanałach narzędzi przetwórczych istotną rolę odgrywają procesy reologiczne i cieplne, dlatego też w badaniach modelowych muszą być spełnione warunki podobieństwa w zakresie przepływów oraz zjawisk cieplnych. Można wyróżnić następujące dwie grupy wielkości podstawowych wywierających duży wpływ na te procesy:

— właściwości fizyczne charakteryzujące tworzywo ciekłe: gęstość, lepkość, a także właściwości cieplne określone dyfuzyjnością cieplną, współczynnikiem przewodzenia ciepła, współczynnikiem wnikania ciepła i współczynnikiem rozszerzalności objętościowej;

— wielkości kinematyczne i elementy geometryczne: prędkość ruchu tworzywa ciekłego, kształt i wymiary przekroju poprzecznego kanału przepływowego oraz jego długość.

Podobieństwo przepływów płynów określa się głównie na podstawie podobieństwa pól prędkości [2, 3, 7, 8]. Przepływy charakteryzuje się również polem ciśnienia, gęstości, lepkości, temperatury itp. Całkowite podobieństwo przepływów występuje wówczas, gdy pola wszystkich wielkości charakteryzujących przepływ są wzajemnie podobne. Uzyskanie całkowitego podobieństwa przepływów jest zazwyczaj niemożliwe do osiągnięcia. W badaniach często ogranicza się liczbę parametrów określających rozpatrywany przepływ, wybierając te, które mają na niego największy wpływ. Realizuje się zatem badania w warunkach podobieństwa częściowego.

W badaniach przepływów polimerów ciekłych, traktowanych jako uogólnione płyny niutonowskie opisywane modelem potęgowym Oswalda—de Waele, do określania podobieństwa zjawisk wykorzystuje się liczbę Reynoldsa o następującej postaci uogólnionej [2, 5—9]:

$$Re_u = \frac{v^{2-n'} d^{n'} \rho}{k' 8^{n'-1}} \quad (1)$$

gdzie: n' oraz k' — parametry reologiczne, ρ — gęstość płynu polimerowego, v — prędkość przepływu, d — wymiar charakterystyczny kanału.

Parametry reologiczne można wyrazić za pomocą parametrów modelu potęgowego:

$$n' = n \quad (2a); \quad k' = k \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \quad (2b)$$

Wartość d w przypadku kanałów o przekroju niekołowym oblicza się z wzoru:

$$d = \frac{4F}{S} \quad (3)$$

gdzie: F — pole przekroju poprzecznego, S — obwód kanału.

W przypadku płynu niutonowskiego ($n = 1$, $k = \eta$) uogólniona liczba Reynoldsa upraszcza się do zwykłej liczby Reynoldsa

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} = \frac{v d}{\nu} \quad (4)$$

gdzie: η — lepkość dynamiczna płynu, ν — jego lepkość kinematyczna.

Niekiedy operuje się również zmodyfikowaną liczbą Reynoldsa, przedstawioną w pracy [26]. Liczbę tę można odnieść do przepływu dowolnie zdefiniowanych płynów reostabilnych, do których zalicza się większość tworzyw polimerowych w stanie ciekłym.

Liczba Re wyraża stosunek sił dynamicznych do sił tarcia występujących podczas przepływu, określając charakter przepływu. Gdy $Re \leq 2100$ przepływ jest laminarny, w przedziale $2100 < Re < 10^4$ występuje przepływ przejściowy, natomiast gdy $Re \geq 10^4$ przepływ staje się turbulentny.

Wartość Re charakteryzująca przepływ tworzyw polimerowych jest zazwyczaj bardzo mała i wynosi $Re < 1$ [27]. Jeżeli w badaniach modelowych stosuje się takie samo tworzywo jak w procesie rzeczywistym, to do spełnienia warunku podobieństwa wystarczy spełnić zależność $vd = v'd'$, w której v' , d' stanowią odpowiednio modelową prędkość przepływu oraz wymiar charakterystyczny modelu. Oznacza to, że w razie zmniejszonych wymiarów modelu należy stosować odpowiednio większą prędkość przepływu.

Podczas modelowania przepływu strumienia płynu z powierzchnią swobodną jest wymagane zachowanie podobieństwa pól napięcia powierzchniowego [3, 28]. Ma to szczególne znaczenie w badaniu zjawiska zderzenia się strumieni ciekłego tworzywa polimerowego występującego w gniazdach form wtryskowych w przypadku wcześniejszego rozdzielenia tych strumieni na przykład wstawką konstrukcyjną kształtującą otwór w wyprase. Wówczas podobieństwo rozpatrywanych zjawisk można określić liczbą Webera o następującej postaci:

$$We = \frac{\rho v^2 d}{\chi} \quad (5)$$

gdzie: χ — napięcie powierzchniowe.

Liczba Webera wyraża stosunek sił bezwładności do sił napięcia powierzchniowego [29].

W przepływach laminarnych, w których ruch płynu wpływa na jego gęstość, uwzględnia się liczbę Grashofa [3, 6]:

$$Gr = \frac{gd^3}{\nu^2} \beta \Delta T \quad (6)$$

gdzie: β — współczynnik rozszerzalności objętościowej, g — przyspieszenie ziemskie, ΔT — różnica temperatury.

Liczba Grashofa opisuje podobieństwo ruchu wywołanego różnicą gęstości płynu, spowodowaną różnicą jego temperatury w poszczególnych obszarach kanału.

Przepływ może polegać na ruchach molekularnych (dyfuzja molekularna) lub na ruchu określonej masy płynu względem pozostałej (konwekcyjna wymiana masy) [3]. Kryterium podobieństwa dyfuzji molekularnej stanowi liczba Fouriera

$$Fo = \frac{at}{d^2} \quad (7)$$

gdzie: a — dyfuzyjność cieplna (nazywana też współczynnikiem wyrównania temperatury), t — czas.

W przypadku konwekcyjnej wymiany masy używa się liczby Pecleta. Jest ona wyrażana następująco

$$Pe = \frac{vd}{a} \quad (8)$$

Liczba Pecleta, uwzględniająca właściwości płynu, opisuje podobieństwo rozkładu temperatury.

Na podstawie liczb Fouriera oraz Pecleta można wyciągnąć wnioski dotyczące intensywności procesów dyfuzji molekularnej i konwekcyjnej.

Dzieląc liczbę Pecleta przez liczbę Reynoldsa otrzymuje się liczbę Prandtla, która determinuje podobieństwo właściwości materiałowych:

$$Pr = Pe:Re = \frac{vd}{a} : \frac{vd}{\nu} = \frac{\nu}{a} \quad (9)$$

Liczba Prandtla ujmuje wyłącznie właściwości fizyczne płynu. Stanowi ona iloraz dwóch wielkości odpowiadających za dwa zjawiska nieodwracalne zachodzące w procesie konwekcji, czyli wyrównywania prędkości wskutek tarcia (lepkość) oraz wyrównywania temperatury wskutek przewodzenia ciepła.

Kryterium podobieństwa przejmowania strumienia ciepła w płynach opisuje liczba Nusselta wyrażana zależnością

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \quad (10)$$

gdzie: α — współczynnik wnikania ciepła, λ — współczynnik przewodzenia ciepła.

W procesach przetwórstwa tworzyw polimerowych najczęściej występuje laminarny przepływ przez kanał płynów charakteryzujących się dużą lepkością i wówczas liczbę Nusselta można, z dobrym lub dostatecznym przybliżeniem, określić następująco [2, 6]:

— w przypadku płynów o małej lepkości

$$Nu = 1,63 C^{1/3} \text{ gdy } C > 4,5$$

$$Nu = 0,5 C^{1/3} \text{ gdy } C < 4,5$$

— w przypadku płynów o większej lepkości ($\eta > 2\eta_{H_2O}$)

$$Nu = 1,86 C^{1/3} \left(\frac{\eta}{\eta_{sc}} \right)^{0,14} \quad (11)$$

gdzie: $C = Re Pr (D/L)$ (D — średnica kanału, L — długość kanału), η — lepkość dynamiczna w średniej temperaturze płynu, η_{sc} — lepkość dynamiczna w temperaturze ściany.

Podobieństwo konwekcyjnego przenoszenia ciepła podczas przepływu turbulენტnego płynu o większej lepkości na podstawie liczby Nusselta można obliczyć ze wzoru

$$Nu = 0,027 Re^{0,8} Pr^{0,33} \left(\frac{\eta}{\eta_{sc}} \right)^{0,14} \quad (12)$$

Liczba Nusselta określa podobieństwo przekazywania ciepła drogą konwekcji i przewodzenia. W badaniach dotyczących przenoszenia ciepła pomiędzy płynem a ciałem stałym często korzysta się z zależności wyrażającej związek liczby Nusselta z innymi kryteriami podobieństwa [5, 6]. W przypadku nieustalonego ruchu płynu związek ten ma postać: $Nu = Nu(Re, Fr, Pe, Fo)$ lub $Nu = Nu(Re, Fr, Pe, Ho)$ gdzie Fr jest liczbą Froude'a, Ho liczbą Strouhala.

W ruchu ustalonym zależność powyższą można przedstawić jako: $Nu = Nu(Re, Fr, Pe)$. Jeżeli natomiast ruch płynu jest wymuszony zewnątrz, co występuje w procesach przetwórstwa tworzyw polimerowych, wówczas siły ciężkości mają niewielki wpływ na ten ruch i mogą zostać pominięte, zatem $Nu = Nu(Re, Pe)$ lub $Nu = Nu(Re, Pr)$.

Podobieństwo przenoszenia ciepła podczas przepływu płynu w kanale może być scharakteryzowane liczbą Graetzta (Gz), określaną stosunkiem ciepła przenoszonego przez konwekcję w kierunku osi kanału do ciepła przewodzonego w kierunku ściany kanału [6, 9]:

$$Gz = \frac{\pi R^2 \rho c_p v}{\lambda L} \quad (13)$$

gdzie: R — promień kanału, L — długość kanału, c_p — ciepło właściwe pod stałym ciśnieniem.

Podczas przepływu tworzywa ciekłego w kanałach formy wtryskowej w typowych warunkach wtryskiwania liczba Graetzta zazwyczaj przekracza 100 [6].

Ze względu na fakt, że podczas przepływu tworzyw polimerowych w kanałach narzędzi przetwórczych istotne znaczenie ma tarcie, zachodzi potrzeba określenia stosunku ciepła wydzielającego się wskutek tarcia wewnętrznego w tworzywie ciekłym do ciepła przenoszonego w wyniku różnicy temperatury pomiędzy tworzywem a narzędziem. Stosuje się tutaj liczbę Brinkmana zdefiniowaną następująco [6—8]:

$$Br = \frac{v^2 \eta}{\lambda \Delta T} \quad (14)$$

Wartość liczby Brinkmana na ogół zmienia się od kilku jednostek do 300 [6].

Duże znaczenie w przenoszeniu ciepła ma liczba Biota, która w procesie nieustalonego dwustronnego, sy-

metrycznego przewodzenia ciepła w ściance przedmiotu ma postać [5, 6, 30]

$$Bi = \frac{\alpha \left(\frac{b}{2} \right)}{\lambda_s} \quad (15)$$

gdzie: λ_s — współczynnik przewodzenia ciepła ścianki przedmiotu, b — grubość ścianki płaskiej przedmiotu.

W procesie nieustalonego jednostronnego przewodzenia ciepła w ściance ma zastosowanie wzór [30]

$$Bi = \frac{\alpha b}{\lambda_s} \quad (16)$$

Liczba Biota przedstawia stosunek wewnętrznego oporu przewodzenia ciepła ścianki do oporu wnikanie strumienia ciepła [10].

Zdefiniowane tu liczby kryterialne są najbardziej istotne w określaniu podobieństwa przepływu tworzyw polimerowych w kanałach narzędzi przetwórczych, stanowią one jednak tylko część wszystkich liczb kryterialnych stosowanych w teorii podobieństwa i modelowania zjawisk fizycznych. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że zjawiska zachodzące podczas przepływu ciekłego tworzywa polimerowego w kanałach o temperaturze znacznie niższej od temperatury tworzywa są złożone i określenie liczb kryterialnych może w tym przypadku nastęrczać pewne trudności. Na przykład przekazywanie ciepła podczas przepływu zachodzi w warunkach stopniowej zmiany stanu skupienia tworzywa, a więc i zmiany wartości charakteryzujących go właściwości fizycznych. Wiąże się to także ze zmianą cech reologicznych tworzywa. W przekroju poprzecznym kanału występuje nierównomierny rozkład prędkości przepływu, szybkości ścinania bądź temperatury tworzywa. Określenie wartości wielkości niezbędnych do obliczenia liczb kryterialnych nie jest więc łatwe.

Przedstawione zagadnienia mogą być odniesione tylko do przepływów, którym nie towarzyszy reakcja chemiczna przebiegająca w tworzywie, na przykład sieciowanie występujące podczas przepływu tworzyw utwardzalnych. Liczby kryterialne mają więc na razie znaczenie ograniczone wyłącznie do przepływu tworzyw termoplastycznych.

Wydaje się zatem celowe podjęcie prób określenia wartości liczb kryterialnych w odniesieniu do procesów przetwórstwa takich właśnie tworzyw po to, aby ułatwić właściwe projektowanie, planowanie i prowadzenie badań modelowych. Jak już podkreśliliśmy, tylko bowiem wówczas, gdy jest zapewnione podobieństwo modelu do obiektu rzeczywistego wyniki badań modelowych mogą być odniesione do analizy procesów przetwórstwa. W następnym artykule przedstawimy wyniki obliczeń wartości liczb kryterialnych w przypadku przepływu tworzywa termoplastycznego w kanałach narzędzi przetwórczych, zwłaszcza w kanałach formy wtryskowej.

LITERATURA

- Müller L.: „Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modeli”, PWN, Warszawa 1983, str. 245.
- Ziołkowski Z., Kawala Z., Pająk M., Skoczylas A.: „Podstawowe procesy inżynierii chemicznej. Przenoszenie pędu, ciepła i masy”, PWN, Warszawa 1982, str. 674.
- Gryboś R.: „Podstawy mechaniki płynów”, PWN, Warszawa 1989, str. 587.
- Gdula S. J.: „Podstawy techniki cieplnej”, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1976, str. 492.
- Kemblowski Z., Michałowski S., Strumillo Cz., Zarzycki R.: „Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej”, WNT, Warszawa 1985, str. 524.
- Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992, str. 501.
- Kemblowski Z.: „Reometria płynów nienewtonowskich”, WNT, Warszawa 1973, str. 187.
- Ferguson J., Kemblowski Z.: „Reologia stosowana płynów”, Wyd. Marcus, Łódź 1995, str. 321.
- Carreau P. J., De Kee D. C. R., Chhabra R. P.: „Rheology of Polymeric Systems. Principles and Applications”, Hanser Publishers, Monachium — Wiedeń — Nowy Jork 1997, str. 520.
- Pastucha L., Otwinowski H.: „Podstawy przekazywania ciepła”, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1999, str. 434.
- Zawistowski H., Frenkler D.: „Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych”, WNT, Warszawa 1984, str. 393.
- Bociąga E.: „Procesy determinujące przepływ tworzywa w formie wtryskowej i jego efektywność”, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001, str. 153.
- Bociąga E.: *Polimery* 2002, 47, 122.
- Kim M. S., Lee W. I., Lee J. S.: *Int. Polym. Proc.* 1996, 11, 58.
- Lee Ho-S.: *Polym. Eng. Sci.* 1997, 37, 559.
- Brzoskowski R.: „Zagadnienia plynienia tworzywa w układzie wlewowym i gnieździe formy”, w pracy zbiorowej „Wtrysk termoplastów”, Wyd. PAN-SIMP, Rydzyna 1983, str. 88.
- Buchmann M., Theriault R., Osswald T. A.: *Polym. Eng. Sci.* 1997, 37, 667.
- Szydłowski W., Brzoskowski R.: *Polimery* 1984, 29, 110.
- Smorawiński A.: „Technologia wtrysku”, WNT, Warszawa 1989, str. 460.
- Pötsch G., Michaeli W.: „Injection Molding. An Introduction” Hanser Publishers Monachium — Wiedeń — Nowy Jork, 1995, str. 195.
- Sterzyński T.: *Polimery* 1985, 30, 343, 409, 457.
- Staniszewski B.: „Wymiana ciepła — podstawy teoretyczne”, PWN, Warszawa 1980, str. 467.
- Wiśniewski S., Wiśniewski T. S.: „Wymiana ciepła”, WNT, Warszawa 1997, str. 437.
- Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, WE, Warszawa 1993, str. 528.
- Sikora J. W.: „Studium autotermiczności procesu wytłaczania i strefy rowkowanej wytłaczarki”, Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000, str. 191.
- Matras Z., Nowak Z.: „Modyfikacja liczby Reynoldsa i współczynnika Fanninga dla przepływów reostabilnych cieczy nienewtonowskich w rurach”, ZN Politechniki Poznańskiej, Chemia i Inżynieria Chemiczna, Poznań 1978, nr 14, str. 5.
- Costa F. S., Ray S., Friedl Ch., Cook P. S., Xu S.: „The Effect of Inertia on Fill Pattern in Injection Molding” ANTEC 2001, str. 454.
- Żenkiewicz M.: „Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych”, WNT, Warszawa 2000, str. 362.
- Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R.: „Mechanika płynów w inżynierii środowiska”, WNT, Warszawa 1997, str. 590.
- Sikora R.: „Leksykon naukowo-techniczny. Wprowadzenie do przetwórstwa tworzyw polimerowych”, Wyd. Wadim Plast Sp. J., Warszawa 2002, str. 115.