

ARKADIUSZ KŁOZIŃSKI

Politechnika Poznańska  
Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej  
Zakład Polimerów  
Pl. M. Skłodowskiej-Curie 2, 60-965 Poznań  
e-mail: Arkadiusz.Klozinski@put.poznan.pl

## Ocena liczby Reynoldsa w pomiarach reometrycznych polietylenu\*)

**Streszczenie** — Przedstawiono wyniki badań dotyczących oceny liczby Reynoldsa, przeprowadzonych w rzeczywistych warunkach procesu wytłaczania, za pomocą reometru wytłaczarkowego, przy użyciu dysz cylindrycznych o przekroju kołowym i różnym stosunku  $L/D$ . W badaniach zastosowano polietylen małej gęstości (PE-LD FABS 23-D 022), polietylen średniej gęstości (PE-MD HF513) oraz ich równowagową mieszaninę (PE-LD/PE-MD). Oceniono wpływ wymiarów kanału dyszy oraz właściwości przetwarzanych polimerów na wartość liczby Reynoldsa. Charakter przepływu określono na podstawie wartości liczby Reynoldsa ( $Re$ ), którą wyznaczono opierając się na średniej liniowej prędkości przepływu. Pomimo dużych prędkości przepływu polimerów wynoszących nawet 0,30 m/s (PE-LD, dysza:  $L = 20$  mm,  $D = 2$  mm), przepływ miał zawsze charakter laminarny. Analiza porównawcza wykazała istotne zmiany liczby Reynoldsa wynikające ze zróżnicowania wartości wykładnika płynięcia ( $n$ ) oraz współczynnika konsystencji ( $k$ ). Wyznaczenie przebiegów krzywych płynięcia umożliwiło również określenie zależności pomiędzy wartością  $Re$ , a lepkością  $\eta$  zastosowanych polimerów.

**Słowa kluczowe:** pomiary reologiczne, liczba Reynoldsa, prędkość przepływu, wykładnik płynięcia, współczynnik konsystencji, lepkość, polietylen, mieszanina polimerowa.

### EVALUATION OF THE REYNOLDS NUMBER IN RHEOLOGICAL MEASUREMENTS OF POLYETHYLENE

**Summary** — The determination of the Reynolds number from experiments performed under real extrusion conditions with an extrusion Rheometer equipped with special cylindrical heads and exchangeable dies of varying  $L/D$  ratios has been presented. Low density (PE-LD FABS 23-D 022), middle density (PE-MD HF513) polyethylene and a blend of equal amounts of both were chosen for the rheological studies. The influence of the die dimensions and the properties of the extruded polymers on the Reynolds number was evaluated. The flow parameters were determined on the basis of the Reynolds number ( $Re$ ) which was estimated on the basis of the average linear flow velocity. In spite of the high flow velocity of the polymer, attaining even 0.30 m/s for PE-LD through a die 20 mm in length and 2 mm in diameter, a laminar flow was maintained. A comparative analysis revealed significant changes of the Reynolds number resulting from the different values of the power flow index ( $n$ ) and the consistency index ( $k$ ). The determination of the flow curves also allowed for the evaluation of the dependence between the  $Re$  values and the viscosity  $\eta$ , of the studied polymers.

**Key words:** rheological measurements, Reynolds number, flow velocity, power law index, consistency index, polyethylene, polymer blends.

Ocena właściwości reologicznych tworzyw polimerowych przy użyciu reometrów (kapilarnych, wytłaczarkowych) powinna być prowadzona w warunkach przepływu najbardziej zbliżonych do warunków panujących w kanałach urządzeń przetwórczych. Stosowane w ba-

daniach reometrycznych procedury obliczeniowe, opierające się na modelowym przepływie Poiseuille'a, uwzględniają szereg poprawek korygujących odstępstwa rzeczywistych przepływów od założeń powyższego modelu [1–7]. W jednym z założeń przyjmuje się, że przepływ ma charakter laminarny. W większości przypadków przepływ jest przepływem laminarnym, jednakże w odniesieniu do płynów o małej lepkości, przepływających ze znacznym natężeniem przez kanały o dużych

\*) Artykuł stanowi treść wystąpienia w ramach XIII Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, które odbyły się w dniach 8–11 czerwca 2009 r. w Lublinie.

średnicach, przepływ teleskopowy koncentrycznych warstewek cylindrycznych może zostać zakłócony przez pojawienie się wirów i część energii mechanicznej zostanie wówczas rozproszona w wyniku chaotycznych ruchów elementów płynu.

Wyznaczona w takich warunkach krzywa płynięcia odchyli się w kierunku osi naprężenia stycznego i nie będzie reprezentować rzeczywistych właściwości reologicznych płynu [1, 2, 8]. Dlatego przed wyznaczeniem charakterystyki reologicznej uplastycznionego tworzywa polimerowego uzasadnione staje się określenie charakteru jego przepływu w kanałach urządzeń pomiarowych.

Aby określić charakter ruchu płynu newtonowskiego stosuje się, m.in. liczbę Reynoldsa, określającą bezwymiarowy stosunek sił bezwładności do siły tarcia wewnętrzznego płynu, zdefiniowaną równaniem [1, 2, 6, 8—17]:

$$Re = \frac{v_s D \rho}{\eta} \quad (1)$$

gdzie:  $v_s$  — średnia liniowa prędkość przepływu płynu,  $D$  — średnica kanału,  $\rho$  — gęstość płynu,  $\eta$  — lepkość dynamiczna płynu.

Przepływ jest laminarny, gdy obliczona wartość liczby Reynoldsa jest mniejsza od wartości krytycznej  $Re_{kr} \leq 2100$ , w przedziale  $2100 < Re < 10^4$  występuje przepływ przejściowy, natomiast gdy  $Re \geq 10^4$  przepływ staje się turbulentny [1, 2, 8, 10, 12, 13, 18].

W badaniach przepływów uplastycznionych tworzyw polimerowych, traktowanych jako uogólnione płyny nienewtonowskie opisywane modelem potęgowym Ostwalda-de Waele, do określania charakteru przepływu stosuje się liczbę Reynoldsa o następującej uogólnionej postaci [1, 2, 8, 10, 12, 13]:

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

gdzie:  $n$  — wykładnik płynięcia,  $k' = k[(3n+1)/4n]^n$ ,  $k$  — współczynnik konsystencji.

Określenie przedstawionej, uogólnionej postaci liczby Reynoldsa wymaga doświadczalnego wyznaczenia wartości liczbowych parametrów reologicznych  $n$  oraz  $k$ . W myśl przekazów literaturowych [1, 8] krytyczna wartość liczby Reynoldsa odnosząca się do płynów nienewtonowskich jest, w przybliżeniu, taka sama jak  $Re_{kr}$  płynów newtonowskich ( $Re_{kr} \approx 2100$ ), choć zauważono pewien wpływ  $n$  na jej wartość. Mianowicie, w przypadku płynów rozrzedzanych ścinaniem ( $n < 1$ ) ze zmniejszaniem się  $n$  wartość  $Re_{kr}$  nieznacznie wzrasta. Liczba  $Re$ , charakteryzująca przepływ tworzyw polimerowych, jest zazwyczaj bardzo mała i w warunkach przetwórstwa mieści się w zakresie  $10^{-4} - 10^{-1}$ , tym samym warunek przepływu laminarnego jest prawie zawsze spełniony [12, 19].

Liczba Reynoldsa, określająca charakter przepływu, wraz z liczbami: Webera ( $We$ ), Grashofa ( $Gr$ ), Pecleta ( $Pe$ ), Graetzta ( $Gz$ ), Brinkmana ( $Br$ ) i Biota ( $Bi$ ), stanowi najczęściej stosowaną wielkość w analizie podobieństw przepły-

wu tworzyw polimerowych w kanałach narzędzi przetwórczych [12, 20]. Powyższe liczby kryterialne ułatwiają również właściwe projektowanie, planowanie oraz prowadzenie badań modelowych z zakresu przetwórstwa [12].

Przepływy uplastycznionych polimerów, ze względu na ich lepkosprężysty charakter, w istotnym stopniu różni się od przepływu cieczy lepkich. Siły sprężyste przejawiające się w postaci efektu Weissenberga i Barusa [1, 2, 19, 21—25], uwzględniane w obliczeniach za pomocą liczby Deborah ( $De$ ) [1, 2, 8, 21, 26], odgrywają większą rolę w procesach utraty statycznego charakteru przepływu niż siły bezwładności; przepływy wtórne i wiele zaburzeń wynikających z sił sprężystych pojawia się już przy niewielkich wartościach liczby Reynoldsa. W większości przepływów uplastycznionych polimerów siły sprężystości działają przeciwnie niż siły bezwładności, co powoduje, że przepływ burzliwy pojawia się później niż w cieczach lepkich [27—29].

Celem niniejszego artykułu jest ocena wartości liczby Reynoldsa w pomiarach przeprowadzonych w rzeczywistych warunkach przetwórczych, przy użyciu reometru wytłaczarkowego. Do korzyści płynących z tego typu pomiarów, oprócz uzyskania charakterystyki reologicznej materiału polimerowego w warunkach technologicznych [30—40] należy zaliczyć również możliwość optymalizacji i częściowej kontroli procesu [41]. Zastosowanie w badaniach dwóch odmian polietylenu oraz ich mieszaniny, jak również dysz pomiarowych o różnym stosunku długości do średnicy, pozwoliło na analizę wpływu zmian wymiarów kanału dyszy oraz parametrów reologicznych polimeru na wartość  $Re$ .

## CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

### Materiały i aparatura

Do badań zastosowano polietylen małej gęstości o nazwie handlowej Malen E oznaczony symbolem FABS 23-D 022 (Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o.), o  $MFI_{(190;2,16)} = 1,81$  g/10 min; polietylen średniej gęstości PE-MD o nazwie handlowej Finathene<sup>®</sup>, oznaczony symbolem HF513 (Atofina S.A.), o  $MFI_{(190;2,16)} = 0,11$  g/10 min oraz mieszaninę PE-LD/PE-MD, o stosunku masowym składników 1/1,  $MFI_{(190;2,16)} = 1,11$  g/10 min.

### T a b e l a 1. Wymiary kanału dysz pomiarowych

T a b l e 1. Dimensions of the channels of the applied measuring dies

Długość dyszy, mm	Średnica dyszy, mm					
20	2	3	4	5	8	10
30						

Pomiary prowadzono przy użyciu reometru wytłaczarkowego, zaopatrzonego w głowicę z wymiennymi dyszami o przekroju kołowym. Wymiary kanału zastoso-

wanych dysz pomiarowych przedstawiono w tabeli 1. Opis stanowiska badawczego zawarto we wcześniejszych publikacjach [3–5].

Każdorazowo temperatura wytłaczanego tworzywa wynosiła  $170 \pm 0,5$  °C. Zastosowanie tej temperatury, porównywalnej z rzeczywistą temperaturą przetworstwa polietylenu, miało na celu uzyskanie wysokich wartości ciśnienia oraz stabilności pracy reometru. Zakres szybkości obrotowej ślimaka ( $v_s$ ) wynosił  $0,17–0,76$  s<sup>-1</sup>.

### Metodyka badań

Liczbę Reynoldsa, a tym samym charakter analizowanych przepływów obliczano wykorzystując równanie (2). Określone w badaniach wielkości reologiczne wyznaczono na podstawie modelu potęgowego Ostwalda-de Waele. Gęstość tworzywa polimerowego w warunkach przepływu określono na podstawie charakterystyk  $p$ - $v$ - $T$ , sporządzonych za pomocą urządzenia pvT 100 produkcji firmy SWO Polymertechnik GmbH. Wpływ zmian gęstości polimerów na charakterystykę reologiczną oraz sposób określenia gęstości w pomiarach reometrycznych, opisano we wcześniejszej publikacji [42]. Do oceny liczby Reynoldsa ( $Re$ ) wykorzystano wartości średniej liniowej prędkości przepływu ( $v_s$ ), wyznaczone na podstawie całkowitego spadku ciśnienia  $\Delta p_c$ , stosując znany wzór [1, 2, 9, 15, 43]:

$$v_s = \frac{R}{(3n+1)} \left( \frac{R\Delta p_c}{2kL} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

gdzie:  $R$  – promień kanału,  $L$  – długość kanału.

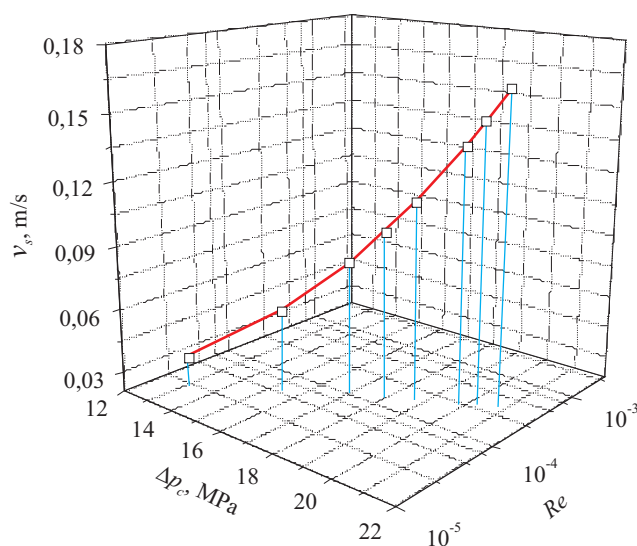
W pomiarach reologicznych prowadzonych przy użyciu reometrów kapilarnych najistotniejsze jest określenie zależności pomiędzy objętościowym natężeniem przepływu ( $\dot{Q}$ ) wywołanym przesuwem tłoka, a całkowitym spadkiem ciśnienia ( $\Delta p_c$ ) na długości kanału dyszy pomiarowej. Wywołanie przepływu tworzywa w układzie uplastyczniającym oraz w kanale dyszy reometru wytłarczarkowego, a także zmiana jego natężenia są uwarunkowane zmianą szybkości obrotowej ślimaka ( $v_s$ ). W opisywanych badaniach przepływ tworzywa polimerowego wywołano na drodze zmian szybkości obrotowej ślimaka wytłarczarki w przedziale  $0,17–0,76$  s<sup>-1</sup>. W przedziale tym scharakteryzowano proces wytłaczania wyznaczając zależności: pomiędzy wartością całkowitego spadku ciśnienia a naprężeniem stycznym przy ścianie kanału ( $\tau_w$ ) oraz między objętościowym natężeniem przepływu a nieskorygowaną szybkością ścinania ( $\dot{\gamma}_a$ ). W przypadku każdego z analizowanych tworzyw polimerowych wyznaczono również przebiegi krzywych płynięcia oraz krzywych lepkości podczas przepływu przez kanał dyszy o określonym stosunku  $L/D$ .

### WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

W toku przepływu danego polimeru przez dysze o określonym stosunku  $L/D$ , uzyskano różne zakresy

całkowitego spadku ciśnienia ( $\Delta p_c$ ) oraz objętościowego natężenia przepływu ( $\dot{Q}$ ). Większe wartości  $\Delta p_c$  występują podczas przepływu polimerów przez kanały dysz o mniejszych średnicach, co stanowi naturalną konsekwencję wzrostu oporów przepływu. O wartości spadku ciśnienia decyduje również długość kanału pomiarowego dyszy – większe wartości  $\Delta p_c$  odpowiadały większej długości użytych kanałów dysz, tzn. wartości 30 mm. Na wartość  $\Delta p_c$  oraz  $\dot{Q}$  wpływają także właściwości zastosowanego tworzywa polimerowego, zagadnienie to omówiono we wcześniejszych publikacjach [3, 42].

Przepływ danego tworzywa przez każdą z zastosowanych w badaniach dysz charakteryzuje się określonym przebiegiem zmian zarówno  $\Delta p_c$ , jak i krzywej płynięcia. Wzrostowi wartości  $\Delta p_c$ , oprócz zmian naprężenia stycznego, towarzyszy wzrost prędkości przepływu oraz liczby Reynoldsa. Przykładowy przebieg zmian liczby Reynoldsa w funkcji  $\Delta p_c$  oraz średniej liniowej prędkości przepływu ( $v_s$ ) przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Wykres zależności liczby Reynoldsa ( $Re$ ) od całkowitego spadku ciśnienia ( $\Delta p_c$ ) oraz średniej prędkości przepływu ( $v_s$ ), uzyskany podczas przepływu PE-MD przez dyszę o długości  $L = 20$  mm i średnicy  $D = 2$  mm

Fig. 1. The Reynolds number ( $Re$ ) versus total pressure drop ( $\Delta p_c$ ) and mean flow velocity ( $v_s$ ) of PE-MD for flow through a die 20 mm in length and 2 mm in diameter

Uzyskane w badaniach zakresy średniej liniowej prędkości przepływu oraz odpowiadające im wartości  $Re$ , a także wartości wykładnika płynięcia ( $n$ ) i zakresy lepkości skorygowanej ( $\eta_w$ ) przedstawiono w tabelach 2 i 3 [5]. Z zestawienia liczby Reynoldsa wynika, że we wszystkich rozpatrywanych przypadkach, przepływ miał charakter laminarny.

Przyjmując liczbę Reynoldsa jako jedyne kryterium oceny statycznego charakteru przepływu należy stwier-

**T a b e l a 2.** Wyznaczone parametry reologiczne ( $v_s$ ,  $Re$ ,  $n$  oraz  $\eta_w$ ) odpowiadające przepływowi PE-LD, mieszaniny PE-LD/PE-MD oraz PE-MD przez dysze o długości 20 mm i średnicy: 2, 3, 4, 5, 8 lub 10 mm

**T a b l e 2.** Measured rheological parameters  $v_s$ ,  $Re$ ,  $n$ ,  $\eta_w$  corresponding to the flow of PE-LD, PE-LD/PE-MD blend and PE-MD through an extrusion head with a 20 mm die of diameters of 2, 3, 4, 5, 8 or 10 mm

Badane tworzywo	$D$ , mm	$v_s$ , m/s	$Re \cdot 10^{-5}$	$n$	$\eta_w$ , Pa · s
PE-LD FABS 23-D022	2	0,075–0,300	27,16–245,14	0,40	235–105
	3	0,034–0,143	9,56–84,02	0,49	513–234
	4	0,020–0,086	4,99–40,92	0,55	871–459
	5	0,013–0,057	3,45–25,36	0,62	1158–669
	8	0,006–0,025	1,79–9,94	0,85	1745–1439
	10	0,004–0,016	1,20–6,27	0,86	2132–1729
PE-LD/PE-MD FABS 23-D022/HF513	2	0,037–0,164	3,01–46,28	0,32	371–123
	3	0,023–0,105	2,14–27,50	0,33	1077–398
	4	0,018–0,093	1,75–27,43	0,34	1987–752
	5	0,007–0,021	0,31–3,10	0,37	2900–1042
	8	0,004–0,022	0,28–3,13	0,56	6300–3470
	10	0,002–0,012	0,19–1,75	0,63	6623–3887
PE-MD HF513	2	0,035–0,164	2,29–32,29	0,30	869–300
	3	0,027–0,112	1,79–19,69	0,31	1965–740
	4	0,011–0,049	0,44–4,59	0,38	3545–1541
	5	0,008–0,033	0,25–2,67	0,39	5387–2311
	8	0,003–0,014	0,09–0,82	0,50	12740–6438
	10	0,002–0,010	0,07–0,52	0,59	17590–10287

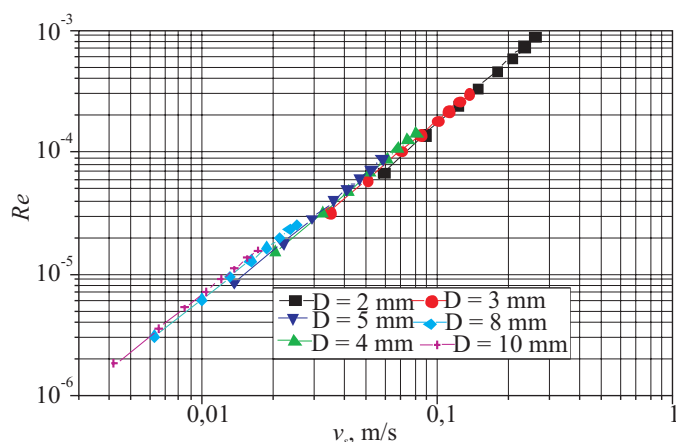
**T a b e l a 3.** Wyznaczone parametry reologiczne ( $v_s$ ,  $Re$ ,  $n$  oraz  $\eta_w$ ) odpowiadające przepływowi PE-LD, mieszaniny PE-LD/PE-MD oraz PE-MD przez dysze o długości 30 mm i średnicy: 2, 3, 4, 5, 8 lub 10 mm

**T a b l e 3.** Measured rheological parameters  $v_s$ ,  $Re$ ,  $n$ ,  $\eta_w$  corresponding to the flow of PE-LD, PE-LD/PE-MD blend and PE-MD through an extrusion head with a 30 mm die of diameters of 2, 3, 4, 5, 8 or 10 mm

Badane tworzywo	$D$ , mm	$v_s$ , m/s	$Re \cdot 10^{-5}$	$n$	$\eta_w$ , Pa · s
PE-LD FABS 23-D022	2	0,055–0,222	16,14–154,89	0,38	261–111
	3	0,029–0,123	7,70–71,16	0,45	513–234
	4	0,018–0,075	4,47–37,43	0,50	807–391
	5	0,012–0,050	2,81–22,22	0,52	1129–560
	8	0,005–0,021	0,69–5,41	0,58	2407–1292
	10	0,003–0,014	0,64–4,42	0,63	3135–1782
PE-LD/PE-MD FABS 23-D022/HF513	2	0,034–0,186	3,52–68,53	0,25	463–138
	3	0,026–0,118	3,45–40,68	0,35	845–345
	4	0,010–0,051	1,08–12,98	0,40	1668–626
	5	0,007–0,039	0,53–5,35	0,43	2017–863
	8	0,003–0,011	0,14–1,37	0,45	5767–2134
	10	0,002–0,010	0,11–0,74	0,46	7613–3259
PE-MD HF513	2	0,032–0,138	3,10–24,01	0,28	737–254
	3	0,029–0,089	2,29–13,30	0,30	1706–708
	4	0,012–0,045	0,51–4,37	0,36	2923–1255
	5	0,009–0,037	0,36–3,73	0,38	4487–1857
	8	0,004–0,014	0,12–0,95	0,47	10729–5193
	10	0,002–0,010	0,07–0,60	0,48	15467–7651

dzić, że obliczone wartości  $Re$  w znacznym stopniu odbiegają od jej wartości krytycznej, określającej możliwy

początek zakłóceń przepływu. We wszystkich przypadkach wartości  $Re$  mieściły się w przedziałach, które poda-

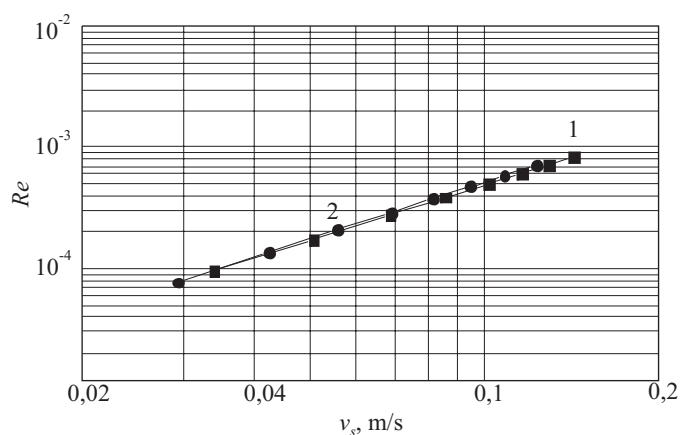


Rys. 2. Wykres zależności liczby Reynoldsa ( $Re$ ) od średniej prędkości przepływu ( $v_s$ ), w warunkach przepływu PE-MD przez dysze o długości  $L = 30$  mm i średnicy  $D = 2, 3, 4, 5, 8, 10$  mm

Fig. 2. The Reynolds number ( $Re$ ) versus mean flow velocity ( $v_s$ ) under PE-MD flow conditions through dies 30 mm in length and 2, 3, 4, 5, 8 or 10 mm in diameter

je literatura jako charakterystyczne dla przetwórstwa tworzyw polimerowych metodą wytłaczania [12, 19].

Porównując otrzymane wartości liczby Reynoldsa można zauważyć bezpośredni wpływ wymiarów kanału dyszy ( $L$ ,  $D$ ) na  $Re$ . W wyniku zmiany średnicy dyszy uzyskuje się różne zakresy  $v_s$  oraz różne, odpowiadające im zakresy  $Re$  (rys. 2). Jak obrazuje przebieg krzywych większe wartości  $Re$  występują podczas przepływu przez dysze o mniejszej średnicy. Należy jednak zauważyć, że w toku przepływu polimeru przez dysze o zbliżonych wartościach średnicy, np.: 2 i 3 mm, 3 i 4 itd., można uzyskać podobne prędkości przepływu, natomiast takiej



Rys. 3. Wykres zależności liczby Reynoldsa ( $Re$ ) od średniej prędkości przepływu ( $v_s$ ), w warunkach przepływu PE-LD przez dysze o średnicy  $D = 3$  mm i długości  $L = 20$  mm (1) lub 30 mm (2)

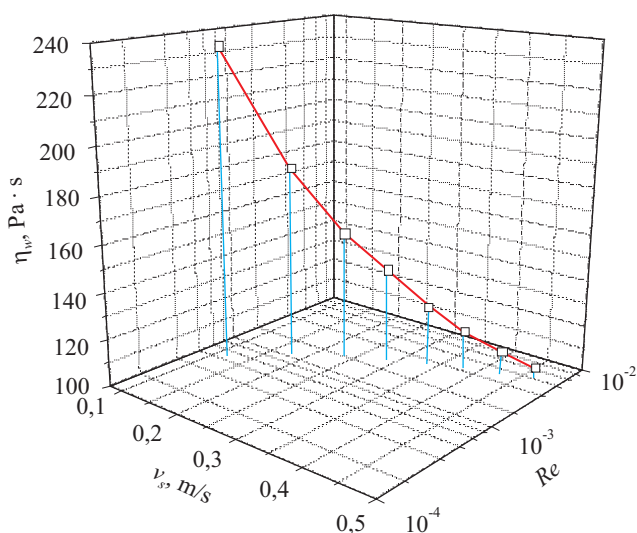
Fig. 3. The Reynolds number ( $Re$ ) versus mean flow velocity ( $v_s$ ) under PE-LD flow conditions through dies 20 mm (1) or 30 mm (2) in length and 3 mm in diameter

samej wartości  $v_s$ , określonej dla dwóch różnych dysz, odpowiadają różne wartości  $Re$ .

Jak już wspomniano, na zmianę charakteru przepływu uplastycznionych tworzyw polimerowych, podobnie jak w płynach newtonowskich, wpływa również długość kanału przepływowego. Analizując wyznaczone wartości  $Re$  nie można jednoznacznie wykazać, że liczba Reynoldsa maleje wraz ze wzrostem długości kanału dyszy. W przypadku PE-LD występuje pewna zależność w odniesieniu do średnic: 2, 3, 4, 5 i 10 mm, mianowicie mniejsze przedziały  $v_s$  oraz  $Re$  występowały podczas przepływu przez dysze o długości 30 mm. W przypadku natomiast dysz o średnicy 8 mm, takiej długości dysz odpowiadał większy przedział wartości  $Re$ . Rysunek 3 przedstawia przykładowy wykres zależności  $Re = f(v_s)$ , wyznaczony podczas przepływu PE-LD przez dysze o średnicy 3 mm i długości 20 lub 30 mm. Podobny przebieg krzywych uzyskano podczas przepływu PE-LD przez dysze o średnicy 2, 4, 5 i 10 mm. W przypadku mieszaniny polietylenów oraz PE-LD nie zaobserwowano jednoznacznych zmian wartości  $Re$ , wynikających ze zmiany długości kanału dyszy pomiarowej z 20 mm na 30 mm. Można wnioskować, że różnica długości kanału dyszy, wynosząca zaledwie 10 mm w istotnym stopniu wpływa na opory przepływu, ale jednak jest zbyt mała, aby mieć wyraźny wpływ na zmianę liczby Reynoldsa.

#### Wpływ lepkości dynamicznej na wartość liczby Reynoldsa

W odniesieniu do wszystkich analizowanych przepływów wyznaczono wykresy lepkości dynamicznej

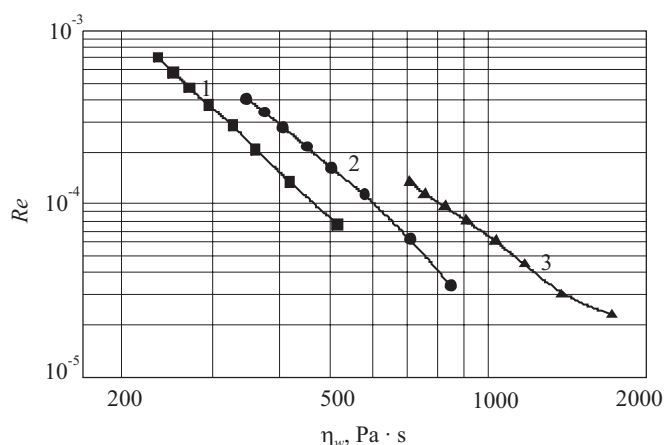


Rys. 4. Zależność liczby Reynoldsa ( $Re$ ) od średniej prędkości przepływu ( $v_s$ ) oraz skorygowanej lepkości dynamicznej ( $\eta_w$ ), uzyskana podczas przepływu PE-LD przez dyszę o długości  $L = 20$  mm i średnicy  $D = 2$  mm

Fig. 4. The Reynolds number ( $Re$ ) versus mean flow velocity ( $v_s$ ) and corrected viscosity ( $\eta_w$ ) for PE-LD for flow through a die 20 mm in length and 2 mm in diameter

w funkcji szybkości ścinania. Znajomość przebiegów krzywych lepkości umożliwia przedstawienie zależności pomiędzy lepkością tworzywa, czyli wielkością reologiczną, stanowiącą miarę tarcia wewnętrznego, a charakterem przepływu. Jak wynika z przebiegu krzywej wyznaczonej podczas przepływu PE-LD przez dyszę o długości 20 mm i średnicy 2 mm (rys. 4) wartość liczby Reynoldsa jest odwrotnie proporcjonalna do lepkości polimeru. Liczba Reynoldsa rośnie wraz ze zwiększającą się prędkością przepływu, a wzrostowi  $v_s$  towarzyszy spadek lepkości polimeru stanowiący naturalną konsekwencję wzrostu występujących sił ścinających.

Odniesienie liczby Reynoldsa do lepkości polimeru pozwala na przedstawienie różnicy w przepływach badanych tworzyw polimerowych. W każdym przypadku określonego stosunku  $L/D$  przepływ PE-LD charakteryzo-



Rys. 5. Zależność liczby Reynoldsa ( $Re$ ) od skorygowanej lepkości ( $\eta_w$ ): 1 — PE-LD, 2 — PE-LD/PE-MD, 3 — PE-MD; wymiary dyszy:  $D = 3$  mm,  $L = 30$  mm

Fig. 5. The Reynolds number ( $Re$ ) versus corrected viscosity ( $\eta_w$ ) for (1) PE-LD, (2) PE-LD/PE-MD blend and (3) PE-MD through a die 30 mm in length and 3 mm in diameter

wała większą wartość  $Re$  i mniejszą  $\eta_w$  niż mieszaniny oraz PE-MD. Rysunek 5 przedstawia przebieg krzywych określających liczbę Reynoldsa w funkcji skorygowanej lepkości ( $\eta_w$ ), wyznaczoną podczas przepływu PE-LD, mieszaniny PE-LD/PE-MD lub PE-MD przez kanał dyszy o długości 30 mm i średnicy 3 mm. Zgodnie z danymi literaturowymi [13], dwa przepływy scharakteryzowane taką samą liczbą Reynoldsa uważamy za podobne pod względem rozpatrywanej liczby kryterialnej, niezależnie od bezwzględnej wartości poszczególnych parametrów. Z przebiegu krzywych (por. rys. 5) wynika, że jest możliwe podobieństwo przepływów (czyli taka sama wartość liczby Reynoldsa) tworzyw różniących się w danych warunkach lepkością. I tak na przykład, wartość liczby Reynoldsa równa  $1,14 \cdot 10^{-4}$  odpowiadała przepływowi PE-LD oraz lepkości 445 Pa · s, mieszaniny PE-LD/PE-MD o lepkości 563 Pa · s, oraz PE-MD o lepkości 759 Pa · s.

## Wpływ wykładnika płynięcia i współczynnika konsystencji na wartość liczby Reynoldsa

W przypadku cieczy newtonowskich wielkością reologiczną, na podstawie której określamy wartość liczby Reynoldsa jest lepkość. W odniesieniu zaś do cieczy nienewtonowskich, do których zaliczamy uplastycznione polimery, charakter przepływu określa się na podstawie doświadczalnie wyznaczonych parametrów reologicznych, tj. wykładnika płynięcia  $n$  i współczynnika konsystencji  $k$  [równanie (2) i (3)]. Jak wykazano we wcześniejszej publikacji [5], wartość wykładnika płynięcia danego polimeru nie jest wielkością stałą (por. tabela 2 i 3), zmianie ulega także wartość współczynnika konsystencji, co stanowi bezpośrednią konsekwencję występowania zróżnicowanych przedziałów szybkości ścinania ( $\dot{\gamma}_a$ ) oraz wartości naprężenia stycznego ( $\tau_w$ ), uzyskiwanych podczas przepływu przez kanały dysz o różnym stosunku  $L/D$ .

Jeżeli w ocenie liczby Reynoldsa wykorzystano prędkość przepływu obliczoną na podstawie spadku ciśnienia ( $\Delta p_c$ ) na długości kanału dyszy, stanowiącego, obok objętościowego natężenia przepływu ( $Q$ ), drugą mierzalną wartość pomiarową, to rozpatrywanie wpływu zmian  $n$  oraz  $k$  na wartość liczby Reynoldsa wymaga aby pomiar był prowadzony z zastosowaniem dyszy o określonym stałym stosunku  $L/D$  oraz w warunkach takiego samego spadku ciśnienia ( $\Delta p_c = \text{const}$ ).

Określono zatem liczbę Reynoldsa w odniesieniu do przepływu polimerów przez dyszę o średnicy  $D = 4$  mm i długości  $L = 30$  mm, w warunkach całkowitego spadku ciśnienia  $\Delta p_c = 3,0$  MPa, odnotowując największą wartość  $Re = 118,23 \cdot 10^{-5}$  podczas przepływu polietylenu małej gęstości, któremu odpowiada wartość wykładnika płynięcia równa 0,50; mniejszą  $Re = 2,32 \cdot 10^{-5}$  podczas przepływu mieszaniny PE-LD/PE-MD o wartości wykładnika 0,40; a najmniejszą  $Re = 0,13 \cdot 10^{-5}$  — polietylenu średniej gęstości, charakteryzującego się  $n$  równym 0,36. Tak więc, w przypadku analizowanych tworzyw polimerowych, w stałych warunkach pomiaru, liczba Reynoldsa wzrasta wraz ze wzrostem wartości wykładnika płynięcia.

Określonej wartości wykładnika płynięcia odpowiada ustalona wartość współczynnika konsystencji stanowiącego miarę lepkości (im  $k$  jest mniejsze, tym płyn jest mniej lepki). W przypadku rozpatrywanych przepływów wartość  $k$  wynosiła, odpowiednio, PE-LD — 6513 Pa · s<sup>n</sup>, mieszaniny PE-LD/PE-MD — 27556 Pa · s<sup>n</sup>, PE-MD — 45161 Pa · s<sup>n</sup>. Jak wynika z wyznaczonych wartości  $Re$ , w takich samych warunkach przepływu ( $\Delta p_c = \text{const}$ ), największa liczba Reynoldsa cechuje polietylen małej gęstości, którego wartości  $n$  oraz  $k$  są najbardziej zbliżone do wartości  $n$  i  $k$  odpowiadających cieczy newtonowskiej.

## PODSUMOWANIE

Wykazano, że w warunkach prowadzonych pomiarów liczba Reynoldsa nie przekraczała wartości krytycz-

nej. Pomimo prędkości przepływów sięgających 0,30 m/s, przepływ miał zawsze charakter laminarny. W przypadku każdej z zastosowanych dysz oraz każdego z tworzyw polimerowych uzyskano różne zakresy średniej prędkości przepływu oraz odpowiadające im różne zakresy liczby Reynoldsa.

Ponieważ dwa przepływy charakteryzujące się taką samą liczbą Reynoldsa uważa się za podobne z punktu widzenia rozpatrywanej liczby kryterialnej, niezależnie od bezwzględnych wartości poszczególnych składowych parametrów, zatem liczba Reynoldsa stanowi wielkość porównawczą stosowaną w analizie przepływów uplastycznionych tworzyw polimerowych. Ze względu na trudność uzyskania dwóch podobnych przepływów, nawet w najprostszych kanałach, jakimi są kanały kołowe różniące się jedynie średnicą lub długością, analizę przepływu tworzyw w kanałach narzędzi przetwórczych przeprowadza się głównie za pomocą badań modelowych. Jak podkreślano w licznych pracach, wyniki badań modelowych stanowią źródło informacji tylko w przypadku zachowania teorii podobieństwa pomiędzy modelem a obiektem rzeczywistym. Danych do badań modelowych, a przede wszystkim do ich weryfikacji, dostarczają natomiast opisane tu prace w zakresie oceny właściwości reologicznych tworzyw polimerowych w rzeczywistych warunkach procesu przetwórczego.

Praca wykonana w ramach projektu DS 32/061/2010.

#### LITERATURA

- Kembłowski Z.: „Reometria płynów nienewtonowskich”, WNT, Warszawa 1973, str. 79–100.
- Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw polimerowych”, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992, str. 145–244.
- Kłodziński A., Sterzyński T.: *Polimery* 2005, **50**, 455.
- Kłodziński A., Sterzyński T.: *Polimery* 2007, **52**, 583.
- Kłodziński A., Sterzyński T.: *Polimery* 2007, **52**, 855.
- Tadmor Z., Gogos C. G.: „Principles of Polymer Processing”, John Wiley & Sons 2006, str. 25–122.
- Kłodziński A., Sterzyński T.: „TeKa Komisji Budowy i Eksploatacji Maszyn, Elektrotechniki, Budownictwa”, Polska Akademia Nauk, Oddział w Lublinie, Lublin 2008, str. 79–84.
- Ferguson J., Kembłowski Z.: „Reologia stosowana płynów”, Wyd. Marcus, Łódź 1995, str. 53–75.
- Agassant J.-F. i in.: „Polymer Processing – Principles and Modeling”, Hanser Publishers 1991, str. 41–89.
- Kembłowski Z. i in.: „Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej”, WNT, Warszawa 1985, str. 90–181.
- Menges G.: „Werkstoffkunde Kunststoffe”, Carl Hanser Verlag, Manchen Wien 1990.
- Sikora R., Bociąga E.: *Polimery* 2003, **48**, 753.
- Praca zbiorowa: „Podstawowe procesy inżynierii chemicznej – przenoszenie pędu, ciepła i masy” (red. Ziolkowski Z.), WNT, Warszawa 1982, str. 39–50.
- Malkin A. Y.: „Rheology Fundamentals”, ChemTec Publishing, Toronto 1994, str. 61–117.
- Chhabra R. P., Richardson J. F.: „Non-Newtonian Flow in the Process Industries. Fundamentals and Engineering Applications”, Butterworth-Heinemann, Oxford 1999, str. 1–159.
- Praca zbiorowa: „Flow Handbook” (red. Stauss T.), Endress+Hauser Flowtec AG, Reinach 2004, str. 22–48.
- Mezger T. G.: „The Rheology Handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers”, Vincentz Network GmbH & Co. KG, Hannover 2006, str. 171–251.
- Praca zbiorowa: „Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne” (red. Sikora R.), Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006, str. 99–127.
- Wilczyński K., Łączyński B., Szymaniak Z.: *Polimery* 1999, **44**, 683.
- Bociąga E., Sikora R.: *Polimery* 2004, **49**, 36.
- Szlezzyngier W.: „Podstawy reologii polimerów”, Politechnika Rzeszowska 1994, str. 25–41.
- Beverly C. R., Tanner R. I.: *Rheol. Acta* 1993, **32**, 526.
- Liang J.-Z.: *Polym. Test.* 2002, **21**, 69.
- Koopmans R. J.: *J. Appl. Polym. Sci.* 1992, **32**, 1741.
- Koopmans R. J.: *J. Appl. Polym. Sci.* 1992, **32**, 1750.
- Ofoli R. Y., Morgan R. G., Steffe J. F.: *J. Food Eng.* 1993, **18**, 297.
- Giesekus H.: *Rheol. Acta* 1968, **7**, 127.
- Giesekus H.: *Rheol. Acta* 1969, **8**, 411.
- Bhatnagar R. K., Giesekus H.: *Rheol. Acta* 1970, **9**, 412.
- Friesenbichler W., Langecker G. R., Duretek I., Schuschnigg S.: „Polymer Melt Rheology at High Shear Rates Using a New Micro-Rheology Technique”, „21st Annual Meeting of the Polymer Processing Society”, Leipzig 2005, mat. konf., str. 85.
- Takahashi H., Matsuoka T., Kurauchi T.: *J. Appl. Polym. Sci.* 1985, **30**, 4669.
- Takahashi H.: *J. Appl. Polym. Sci.* 1989, **37**, 1837.
- Haddout A., Villoutreix G.: *Int. Polym. Proc.* 2003, **3**, 291.
- Coates P. D., Immonen J., Whiteside B. R., Martyn M. T.: „High Shear Rheology of Materials for Micromoulding”, w [30], str. 86.
- Chen Z.-L., Chao P.-Y., Chiu S.-H.: *Polym. Test.* 2003, **22**, 601.
- Pabedinskas W. R., Cluett W. R.: *Polym. Eng. Sci.* 1994, **34**, 585.
- Chiu S. H., Pong S. H.: *J. Appl. Polym. Sci.* 1999, **74**, 541.
- Chiu S. H., Pong S. H.: *J. Appl. Polym. Sci.* 2001, **79**, 1249.
- Dealy J. M., Broadhead T. O.: *Polym. Eng. Sci.* 1993, **33**, 1513.
- Broadhead T. O., Patterson W. I., Dealy J. M.: *Polym. Eng. Sci.* 1996, **36**, 2840.
- Dealy J. M., Saucier P. C.: „Rheology in Plastics Quality Control”, Hanser Publishers, Munich 2000.
- Kłodziński A., Sterzyński T., Samujło B.: *Polimery* 2008, **54**, 57.
- Wilczyński K.: „Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 2001.