

ARKADIUSZ KŁOZIŃSKI, TOMASZ STERZYŃSKI

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

Ocena poprawki Bagleya na podstawie pomiarów w linii wytłaczarskiej^{*)}

BAGLEY CORRECTION EVALUATION ON THE BASIS OF MEASUREMENTS IN EXTRUSION LINE

Summary — Bagley correction (e_B) measurements usually are done using capillary rheometers. In this article a method of e_B value determination on the basis of the measurements done in real processing conditions is presented. Extrusion head with exchangeable dies (Fig. 3, Table 2) installed to the single-screw extruder was used as a measuring device. Two commercial grades of low-density polyethylene (PE-LD) (Table 1) were used. The peculiarity of the action of plastifying system of an extruder, far different from plastifying system of capillary rheometer, forced us to elaborate the special measuring — computational procedure allowing to evaluate e_B during the process of extrusion (Fig. 4—6). Bagley correction was determined for shear rate range from 27 s^{-1} up to 629 s^{-1} (Table 3). Ability of dies to be exchanged allowed estimating the effect of geometric elements of the channel on e_B value (Fig. 7—9). On the basis of velocity profiles courses (Fig. 10 and 11) the interpretation of differences in Bagley correction value, dependently on PE-LD grades and measuring dies' dimensions, has been done.

Key words: Bagley correction, measurements in extrusion line, entrance effect, velocity profile, rheological measurements.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZAGADNIENIA

W badaniach i ocenie przepływu polimerów stopionych w plastomerach obciążnikowych, reometrach kapilarnych oraz typowych narzędziach przetwórczych (głównie wytłaczarskie, dysze wtryskowe) rozpatruje się przede wszystkim kanały cylindryczne. Szczegółowa analiza reologiczna wymaga w tym przypadku uwzględnienia efektów końcowych występujących w rzeczywistych przepływach polimerów w stanie uplastycznionym.

Szczególne znaczenie mają efekty wlotowe powodujące dodatkowy spadek ciśnienia w początkowej części dyszy (odcinku wlotowym). Ten dodatkowy spadek ciśnienia jest wynikiem formowania się profilu przepływu uplastycznionego materiału polimerowego. Zjawisko to jest szeroko omawiane w literaturze [1—5], a pominięcie

go prowadzi do błędnej oceny wartości naprężenia stycznego, zawyżając ją w stosunku do wartości rzeczywistej.

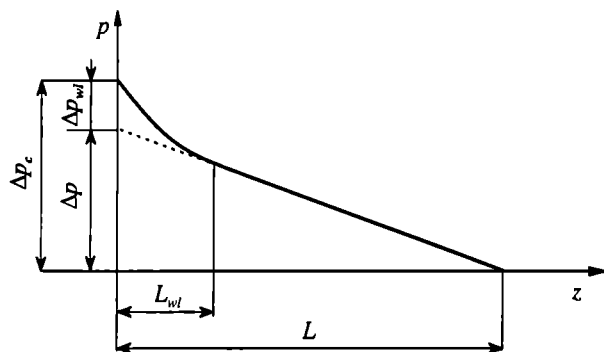
Wartość ciśnienia w przepływie ocenia się jako sumę spadku ciśnienia wynikającego z efektu wlotowego i z przepływu uformowanego. W rezultacie powstaje problem doświadczalnego osobnego określenia spadku ciśnienia związanego z obydwoma tymi składnikami, czyli formowaniem się profilu prędkości oraz spadkiem ciśnienia wywołanego tarciem wewnętrznym w warunkach w pełni już uformowanego profilu prędkości.

Oceniany podczas pomiarów reometrycznych, w trakcie przepływu tworzywa przez dysze długości L , spadek ciśnienia Δp_c stanowi sumę spadku ciśnienia podczas przepływu ustalonego Δp i spadku ciśnienia Δp_{w1} w odcinku wlotowym L_{w1} (rys. 1):

$$\Delta p_c = \Delta p + \Delta p_{w1} \quad (1)$$

Liczbę wskazującą o ile należy zwiększyć fikcyjnie stosunek L/D dyszy, aby spadek ciśnienia płynu polimerowego spowodowany zjawiskiem wlotowym zrów-

^{*)} Artykuł stanowi rozwinięcie wystąpienia przedstawionego w ramach IX Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Szczecin—Dziwnówek, 10—12 maja 2004 r.



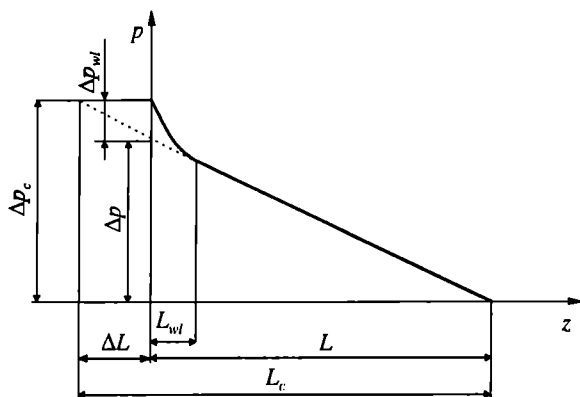
Rys. 1. Schemat przebiegu zmian ciśnienia wzdłuż dyszy o przekroju kołowym [1—3]: p — ciśnienie, z — współrzędna w kierunku długości dyszy, Δp_c — rzeczywisty spadek ciśnienia, Δp — teoretyczny spadek ciśnienia, Δp_{wl} — spadek ciśnienia na wlocie dyszy, L — długość dyszy, L_{wl} — odcinek wlotowy Fig. 1. Diagram of the course of pressure changes along the circular section die [1—3]: p — pressure, z — coordinate in die length direction, Δp_c — real pressure drop, Δp — theoretical pressure drop, Δp_{wl} — pressure drop at die entrance, L — die length, L_{wl} — entrance section

noważyc spadkiem ciśnienia podczas przepływu ustalonego nazywa się poprawką Bagleya (e_B) [2, 6—8]. Określa się ją wzorem:

$$e_B = \frac{\Delta L}{D} \quad (2)$$

gdzie: D — średnica kanału.

Poprawkę Bagleya wyraża się bezwymiarowym stosunkiem L/D lub bezwymiarowym stosunkiem L/R , gdzie $R = D/2$. Graficzne objaśnienie poprawki Bagleya przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Schemat metody Bagleya [4—6]: ΔL — dodatkowa długość kapilary z uwzględnieniem spadku ciśnienia na odcinku wlotowym ($\Delta L = e_B D$), L_c — domniemana długość kanału z uwzględnieniem spadku ciśnienia na odcinku wlotowym ($L_c = L + \Delta L$), pozostałe oznaczenia jak na rys. 1

Fig. 2. Scheme of Bagley's method [4—6]: ΔL — additional length of capillary (pressure drop at entrance section taken into consideration) ($\Delta L = e_B D$), L_c — suspected length of the channel (pressure drop at entrance section taken into consideration) ($L_c = L + \Delta L$), the other designations as in Fig. 1

Poprawkę Bagleya wprowadza się do równania określającego wartość naprężenia stycznego przy ścianie dyszy (τ_R) podczas przepływu płynu polimerowego w kanale cylindrycznym [1, 3, 7—9]:

$$\tau_R = \frac{\Delta p_c \cdot R}{2 \cdot L} \quad (3)$$

Wówczas równanie (3) przybiera postać:

$$\tau_R = \frac{\Delta p_c \cdot R}{2(L + e_B R)} \quad (4)$$

Wartość e_B można wyznaczyć na podstawie pomiarów wykonanych przy użyciu dysz o różnym stosunku L/D . W odniesieniu do każdej dyszy należy określić spadek ciśnienia Δp_c , dający pewną stałą wartość nieskorygowanej szybkości ścinania $\dot{\gamma}_R$. Wykres $\Delta p_c = f(L/D)$ powinien być linią prostą, odcinającą na osi odciętych (L/D) wartość (e_B) dla $\Delta p_c = 0$ [1, 4, 7—10].

W praktyce do wyznaczania powyższą metodą poprawki Bagleya stosuje się reometry kapilarne [1, 2, 4, 7—11]. Wyniki uzyskiwane w pomiarach reometrycznych ekstrapoluje się wprawdzie do warunków panujących w procesach technologicznych, nie odzwierciedlają one jednak w pełni zachowania się handlowych tworzyw polimerowych w rzeczywistych warunkach przetwórstwa [12]. Badania procesu przepływu tworzyw polimerowych w kanałach narzędzi przetwórczych często prowadzi się w skali laboratoryjnej, modelowo odtwarzając warunki występujące w procesach produkcyjnych [13]. Przykłady badań procesów reologicznych i cieplnych zachodzących podczas przepływów tworzywa w kanałach przepływowych narzędzi przetwórczych (modelowa forma wtryskowa, modelowa głowica wyciązarska) oraz prowadzonych z zastosowaniem maszyn produkcyjnych w modelowych warunkach ich działania opisano w pracach [12—17].

W niniejszym artykule przedstawiamy metodę badawczą określania wartości poprawki Bagleya na podstawie pomiarów przeprowadzonych w linii wyciązarskiej, tzn. w trakcie trwania procesu przetwórstwa. W zastosowanej technice pomiarowej analizie poddaje się cały strumień materiału przepływający bezpośrednio przez urządzenie pomiarowe w linii technologicznej, które stanowi wyciązarska głowica pomiarowa o specjalnej konstrukcji (por. rys. 3). Zalety tego typu pomiarów reologicznych, a także zastosowanie wyciązarskich głowic pomiarowych przedstawia literatura [12, 17—21]. Jako materiał badawczy w ocenie wartości poprawki Bagleya podczas opisywanych obecnie pomiarów posłużyły dwa rodzaje polietylenu małej gęstości (PE-LD).

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiał

Badania przeprowadzono przy użyciu dwóch rodzajów polietylenu małej gęstości: PE-LD o nazwie handlo-

wej „Malen E” oznaczony symbolem FABS 23-D 022 (PKN Orlen SA) oraz PE-LD oznaczony symbolem 402L (Dow Plastics). Podstawowe właściwości zastosowanych polietylenów przedstawia tabela 1.

T a b e l a 1. Podstawowe właściwości stosowanych rodzajów PE-LD

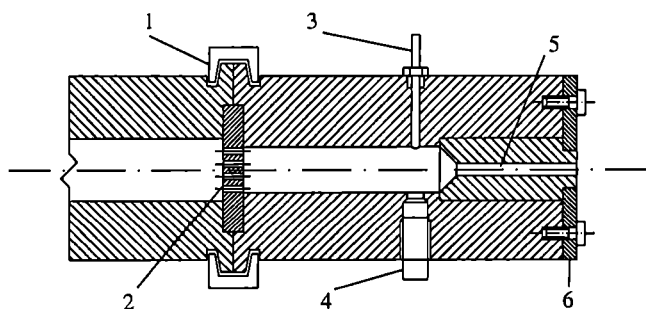
T a b l e 1. Basic properties of PE-LD grades used

Właściwość	Rodzaj PE-LD	
	FABS 23-D 022	402L
Gęstość w temp. 23 °C, kg/m ³	919—923	925
MFR, g/10 min	1,8	0,8
Granica plastyczności, MPa	12	10
Naprężenie zrywające, MPa	14	23
Wydłużenie przy zerwaniu, %	600	400
Temperatura mięknięcia wg Vicata, °C	96	99

Wartości wskaźnika szybkości płynięcia (MFR) tych produktów określono doświadczalnie na podstawie normy PN-EN ISO 1133 (temp. 190 °C, obciążenie 2,16 kG).

Aparatura

Jako urządzenie pomiarowe wykorzystano wytłaczarską głowicę pomiarową (rys. 3) zamontowaną do wytłaczarki jednoślindakowej „Fairex”, ze ślimakiem średnicy $d = 30$ mm i o stosunku $l/d = 25$. Konstrukcja głowicy umożliwia stosowanie wymiennych dysz o różnych stosunkach L/D . Głowicę termostatuje się za pomocą płaszcza grzejnego; bezpośrednio przed kanałem pomiarowym jest umieszczony czujnik temperatury oraz czujnik ciśnienia („Dynisco MDT462H”). W pomiarach zastosowano dysze kołowe o wymiarach przedstawionych w tabeli 2.



Rys. 3. Schemat wytłaczarskiej głowicy pomiarowej z dyszami wymiennymi; 1 — obejma, 2 — filtr, 3 — termopara, 4 — czujnik ciśnienia, 5 — dysza wymienna, 6 — pierścień mocujący

Fig. 3. Scheme of measuring head extrusion with exchangeable dies: 1 — connection clip, 2 — filter, 3 — thermocouple, 4 — pressure sensor, 5 — exchangeable die, 6 — clamping ring

T a b e l a 2. Elementy geometryczne dysz pomiarowych
T a b l e 2. Geometrical elements of measuring dies

Długość dyszy (L), mm	Średnica dyszy (D), mm	L/D	Średnica dyszy (D), mm	L/D	
20	3	6,66	5	4	
30		10		6	
40		13,33		8	
50		16,66			10

Metodyka pomiarów

W celu wyznaczenia poprawki Bagleya [1, 4, 7—10] należy w odniesieniu do każdej z dysz wyznaczyć spadek ciśnienia Δp_c , pozwalający na obliczenie stałej wartości nieskorygowanej szybkości ścinania na ściance dyszy $\dot{\gamma}_R$. Wartość $\dot{\gamma}_R$ dotyczącą przepływu polimerów w dyszy o przekroju kołowym określa się na podstawie znanego wzoru:

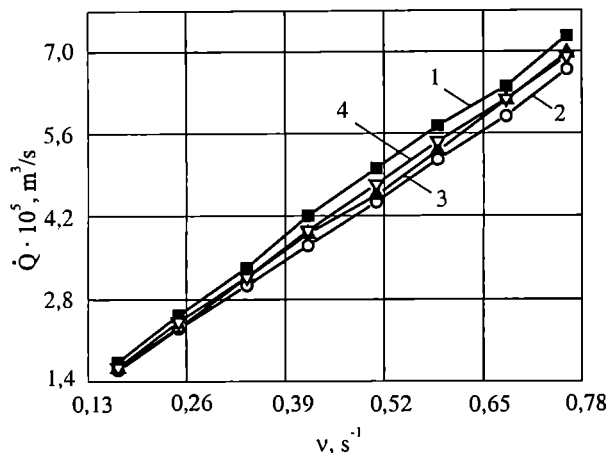
$$\dot{\gamma}_R = \frac{4 \cdot \dot{Q}}{\pi \cdot R^3} \quad (5)$$

gdzie: \dot{Q} — objętościowe natężenie przepływu, R — promień dyszy.

W przypadku stosowania dysz pomiarowych o stałej wartości średnicy D i zmiennej długości L , stałemu objętościowemu natężeniu przepływu $\dot{Q} = const.$ odpowiada nieskorygowana szybkość ścinania $\dot{\gamma}_R = const.$ W odniesieniu do obu rodzajów polietylenu określiliśmy zależność $\Delta p_c = f(\dot{Q})$ podczas przepływu przez dysze o elementach geometrycznych przedstawionych w tabeli 2. Objętościowe natężenie przepływu wyznaczano pośrednio, poprzez pomiar masowego natężenia przepływu (\dot{M}) z uwzględnieniem gęstości badanego polimeru. Wymienione powyżej pomiary Δp_c oraz \dot{M} prowadzono w określonych warunkach przetwórczych: stała temperatura głowicy 170 °C, zmienna szybkość obrotowa ślimaka v . Masowe natężenie przepływu wyznaczano na drodze bezpośredniego pobierania próbek co 30 s w warunkach określonej szybkości obrotowej ślimaka. Wszystkie wartości wykorzystane do obliczeń są średnimi z 5 pomiarów.

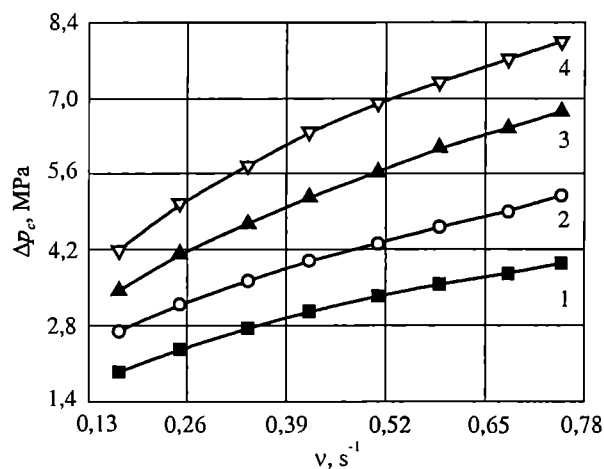
Określanie stałości objętościowego natężenia przepływu

Na rysunku 4 przedstawiono odnoszące się do PE-LD FABS 23-D 022 krzywe zależności $\dot{Q} = f(v)$ wyznaczone w przypadku dysz o $D = 3$ mm i $L = 20, 30, 40$ oraz 50 mm. Na wykresie widoczne są różnice \dot{Q} dotyczące poszczególnych dysz wyznaczone w warunkach takiej samej wartości v , przy czym obserwacja ta dotyczy zwłaszcza obszaru większych wartości v . Różnicom objętościowego natężenia przepływu \dot{Q} w warunkach szybkości obrotowej ślimaka $v = const.$ towarzyszą zróżnicowane wartości całkowitego ciśnienia tworzywa (Δp_c) mierzonego w obrębie kanału wlotowego dyszy pomiarowej, wynikające z różnic w długości kanału dysz (rys. 5).



Rys. 4. Wykres zależności objętościowego natężenia przepływu (\dot{Q}) w funkcji szybkości obrotowej ślimaka (v) w przypadku PE-LD FABS 23-D 022, przy użyciu dysz o wartościach $D = 3$ mm i L (w mm) 20 (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4)

Fig. 4. Plot of volume rate flow (\dot{Q}) versus rotation speed screw (v) for PE-LD FABS 23-D 022, using dies of $D = 3$ mm and L equal to (in mm) 20 (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4)

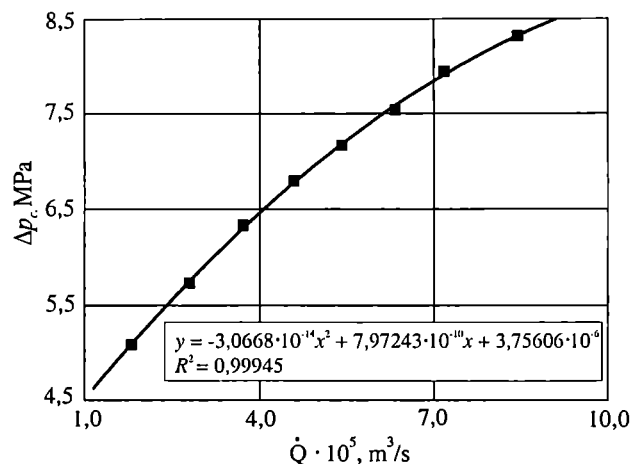


Rys. 5. Wykres zależności spadku całkowitego ciśnienia (Δp_c) mierzonego w obrębie kanału wlotowego od szybkości obrotowej ślimaka (v) w przypadku PE-LD FABS 23-D 022, przy użyciu dysz o wartościach $D = 3$ mm i L (w mm) 20 (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4)

Fig. 5. Plot of total pressure drop (Δp_c), measured at entrance channel area, versus rotation speed screw (v) for PE-LD FABS 23-D 022, using dies of $D = 3$ mm and L equal to (in mm) 20 (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4)

Procedura pomiarowo-obliczeniowa

Zmienność objętościowego natężenia przepływu omawianych polimerów, badanych z zastosowaniem dysz o stałej średnicy lecz zmiennej długości, wywołujących zmiany ciśnienia w warunkach stałych wartości v , jest efektem specyfiki działania układu uplastyczniania wylączarki jednoślismakowej. Dotyczy to w szczegól-



Rys. 6. Przykład wykresu zależności $\Delta p_c = f(\dot{Q})$ i odpowiedniego równania regresji wielomianowej (PE-LD 402L, dysza $L = 30$ mm i $D = 3$ mm) — por. tekst

Fig. 6. Example of the plot of $\Delta p_c = f(\dot{Q})$ dependence and appropriate equation of multinomial regression (PE-LD 402L, die: $L = 30$ mm and $D = 3$ mm) — see text

ności zmiennych wartości przepływu ciśnieniowego zmniejszającego natężenie przepływu w przypadku wzrostu ciśnienia na końcu strefy dozowania [22]. Różnica występująca między sposobem uplastyczniania polimeru i wymuszaniem jego przepływu w układzie uplastyczniającym wylączarki oraz w reometrze kapilarnym spowodowała konieczność opracowania odpowiedniej procedury pomiarowo-obliczeniowej, umożliwiającej wyznaczenie spadków ciśnienia Δp_c , dających pewną stałą wartość nieskorygowanej szybkości ścinania $\dot{\gamma}_R$.

W celu wyznaczenia wartości e_B na podstawie pomiarów w linii wylączarskiej zastosowaliśmy następującą procedurę:

I Określenie masowego natężenia przepływu (\dot{M}) w funkcji szybkości obrotowej ślimaka wylączarki (v): $\dot{M} = f(v)$.

II Wyznaczenie wykresu zależności spadku ciśnienia w funkcji objętościowego natężenia przepływu: $\Delta p_c = f(\dot{Q})$.

III Wyznaczenie równania $\Delta p_c = f(\dot{Q})$ na podstawie regresji wielomianowej (przykład na rys. 6).

IV Określenie wartości spadku Δp_c dla stałych wartości \dot{Q} .

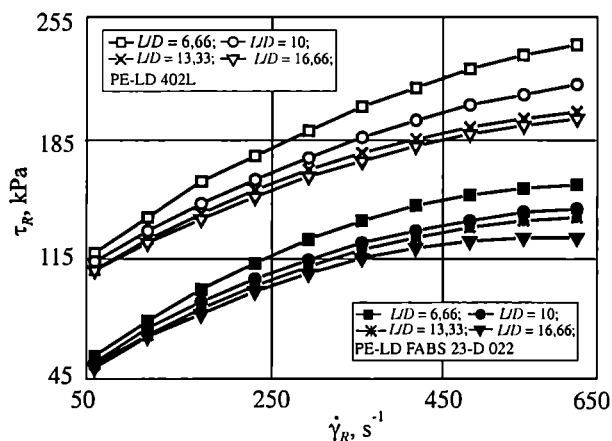
V Wyznaczenie zależności $\Delta p_c = f(L/D)$.

Przeprowadzone w powyższy sposób pomiary oraz obliczenia pozwoliły na określenie poprawki Bagleya w trakcie procesu wylączania, w warunkach pewnych stałych wartości szybkości ścinania zdefiniowanych równaniem (5).

WYNIKI

Przeprowadzenie pomiarów w zakresie szybkości obrotowej ślimaka v w przedziale 0,17–0,76 s⁻¹ stwo-

rzyło możliwość badań reologicznych w szerokim zakresie szybkości ścinania $\dot{\gamma}_R$ oraz naprężeń ścinających τ_R . W warunkach określonej wartości szybkości ścinania w procesie wytłaczania dwóch zastosowanych przez nas rodzajów PE-LD uzyskiwaliśmy różne wartości naprężeń ścinających. Różnice te obrazuje rys. 7 przedstawiający krzywe zależności $\tau_R = f(\dot{\gamma}_R)$ w przypadku użycia dysz średnicy $D = 3$ mm i zmiennej długości L . Większe wartości τ_R występują w wytłaczaniu PE-LD 402L charakteryzującego się większą gęstością oraz mniejszą wartością MFR (por. tabela 1). Przebieg krzywych na rys. 7 wskazuje na bezpośredni wpływ stosowanych elementów geometrycznych kanału dyszy na wartość naprężeń ścinających. W przypadku obu polimerów zmniejszenie wartości stosunku L/D (czyli zmniejszenie długości dyszy) pociąga za sobą wzrost naprężeń ścinających. Takie same zależności, jednak odnoszące się do mniejszych wartości τ_R oraz $\dot{\gamma}_R$, uzyskaliśmy stosując dysze średnicy $D = 5$ mm. Podczas wszystkich pomiarów obserwowaliśmy monotoniczność przebiegu krzywych $\tau_R = f(\dot{\gamma}_R)$.

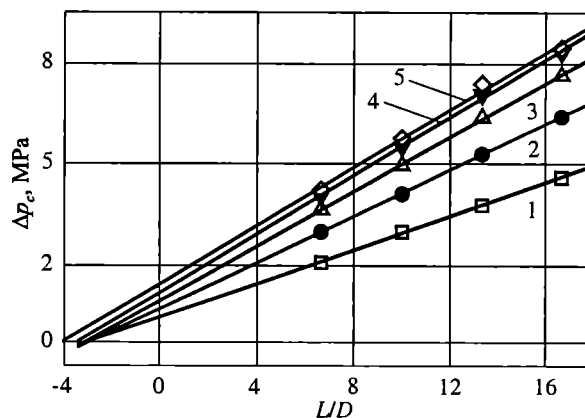


Rys. 7. Wykres zależności naprężeń ścinających (τ_R) od nieskorygowanej szybkości ścinania ($\dot{\gamma}_R$); PE-LD FABS 23-D 022 i 402L, dysze o różnym stosunku L/D

Fig. 7. Plot of shear stress (τ_R) versus uncorrected shear rate ($\dot{\gamma}_R$). PE-LD FABS 23-D 022 and 402L, dies of different L/D ratio

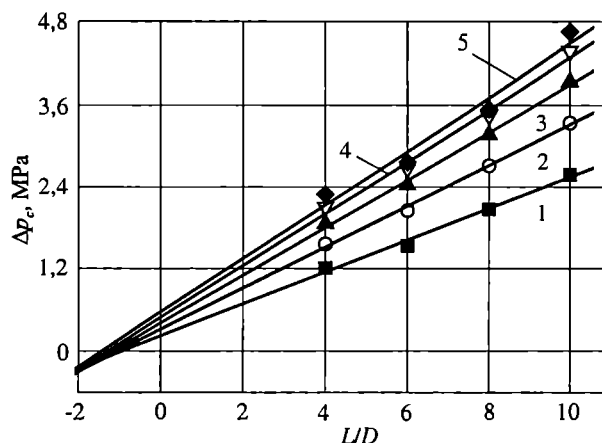
Zastosowanie dysz pomiarowych średnicy $D = 3$ lub 5 mm pozwoliło na wyznaczenie wartości poprawki Bagleya w dwóch przedziałach szybkości ścinania. Tak więc przy użyciu dysz średnicy $D = 3$ mm wartości $\dot{\gamma}_R$ mieściły się w przedziale od ok. 63 do ok. 630 s^{-1} , natomiast przy użyciu dysz średnicy $D = 5$ mm przedział ten wynosił od ok. 14 do ok. 136 s^{-1} .

Wartości poprawki Bagleya odczytywaliśmy z wykresów zależności $\Delta p_c = f(L/D)$ w odniesieniu do określonych wartości szybkości ścinania wybranych z powyżej wymienionych przedziałów. Przykłady uzyskanych wykresów przedstawiono na rys. 8 i 9. Rysunek 8 obra-



Rys. 8. Wykresy zależności sumarycznego spadku ciśnienia (Δp_c) od stosunku L/D (PE-LD FABS 23-D 022, dysze $D = 3$ mm; wartości nieskorygowanej szybkości ścinania ($\dot{\gamma}_R$ w s^{-1}): 1 — 126, 2 — 252, 3 — 377, 4 — 503, 5 — 629

Fig. 8. Plots of total pressure drop (Δp_c) versus L/D ratio (PE-LD FABS 23-D 022, dies of $D = 3$ mm). Values of uncorrected shear rate ($\dot{\gamma}_R$ in s^{-1}): 1 — 126, 2 — 252, 3 — 377, 4 — 503, 5 — 629



Rys. 9. Wykres zależności $\Delta p_c = f(L/D)$ (PE-LD 402L, dysze $D = 5$ mm); wartości nieskorygowanej szybkości ścinania ($\dot{\gamma}_R$ w s^{-1}): 1 — 27, 2 — 54, 3 — 82, 4 — 109, 5 — 136

Fig. 9. Plot of $\Delta p_c = f(L/D)$ dependence (PE-LD 402 L, dies of $D = 5$ mm). Values of uncorrected shear rate ($\dot{\gamma}_R$ in s^{-1}): 1 — 27, 2 — 54, 3 — 82, 4 — 109, 5 — 136

zuje przebieg zależności $\Delta p_c = f(L/D)$ odnoszącej się do dysz o $D = 3$ mm i PE-LD FABS 23-D 022, natomiast rys. 9 przedstawia odpowiednie zależności otrzymane z zastosowaniem dysz o $D = 5$ mm i PE-LD 402L; uzyskiwaliśmy więc prostoliniowe przebiegi zależności $\Delta p_c = f(L/D)$.

Wartości poprawki Bagleya wyznaczone w odniesieniu do obu rodzajów PE-LD z zastosowaniem dysz o $D = 3$ mm i 5 mm, w warunkach różnych szybkości ścinania, zawiera tabela 3. Przedstawione w tej tabeli wartości współczynników regresji R , charakteryzujące prostoliniowy przebieg zależności $\Delta p_c = f(L/D)$, są bardzo duże.

Tabela 3. Wartości poprawki Bagleya (e_B)
Table 3. Values of Bagley correction (e_B)

Nieskorygowana szybkość ścianania $\dot{\gamma}_R, s^{-1}$	Średnica dyszy $D = 3$ mm			
	PE-LD FABS 23-D 022		PE-LD 402L	
	e_B	wsp. regresji (R)	e_B	wsp. regresji (R)
126	1,90	0,9994	1,51	0,9999
252	2,08	1	1,96	1
377	2,37	0,9995	2,30	1
503	2,77	1	2,60	1
629	3,36	0,99	2,90	1
	Średnica dyszy $D = 5$ mm			
	PE-LD FABS 23-D 022		PE-LD 402L	
	e_B	wsp. regresji (R)	e_B	wsp. regresji (R)
27	0,60	0,9662	0,91	0,9894
54	0,81	0,9999	1,02	0,9961
82	1,14	0,9995	1,13	0,9956
109	1,60	0,9981	1,26	0,9887
136	2,27	0,9936	1,42	0,9685

Analiza wykresów $\Delta p_c = f(L/D)$ oraz wartości e_B pozwalają na wysunięcie następujących wniosków:

— Wraz ze zwiększaniem nieskorygowanej szybkości ścinania $\dot{\gamma}_R$ [zatem objętościowego natężenia przepływu \dot{Q} , co wynika z równania (5)], rośnie wartość poprawki Bagleya e_B .

— W warunkach takiej samej wartości objętościowego natężenia przepływu \dot{Q} znacznie większe wartości e_B występują w przypadku dyszy średnicy 3 mm, niż dyszy o $D = 5$ mm.

— W procesie wytłaczania PE-LD o mniejszej gęstości i większej wartości MFR (FABS 23-D 022) wartości e_B są większe.

PRÓBA INTERPRETACJI WYNIKÓW

Wzrost wartości e_B obserwowany w przypadku zwiększenia wydatku objętościowego jest wynikiem wyższego ciśnienia u wejścia do kanału dyszy. Można to wyjaśnić zwiększaniem poziomu strat ciśnienia w odcinku wlotowym dyszy, powstających podczas formowania profilu rozkładu prędkości przepływu.

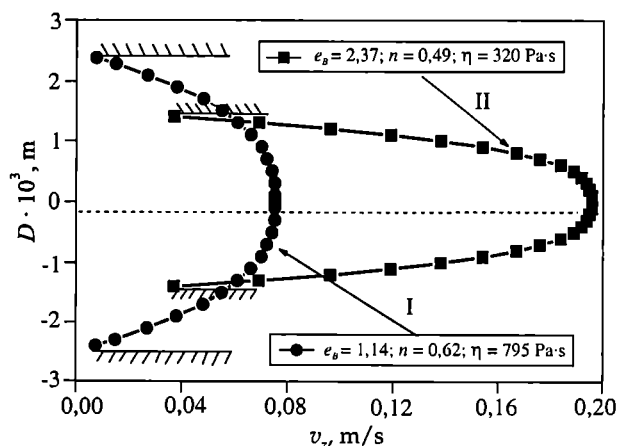
Zróźnicowanie przebiegu rozkładu prędkości przepływu może stanowić wytłumaczenie wspomnianego już występowania większych wartości e_B w przypadku dysz o mniejszych średnicach, a więc wówczas gdy obserwuje się większe straty ciśnienia w odcinku wlotowym. W myśl znanych teorii [1–4], spadek wartości ciśnienia w początkowej części kapilary reometru (w tzw. odcinku wlotowym) jest efektem formowania się profilu rozkładu prędkości przepływu uplastycznionego materiału polimerowego. Kształt profilu rozkładu prędkości wyznaczaliśmy z wykorzystaniem równania (6) [23], z założeniem modelu potęgowego Ostwalda-de Waele:

$$v_z = \frac{3n+1}{n+1} V \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\left(\frac{1+n}{n} \right)} \right] \quad (6)$$

gdzie: v_z — rozkład prędkości w kierunku przepływu, n — wykładnik płynięcia, V — średnia prędkość przepływu ($V = \dot{Q}/\pi R^2$), r — zmienna wartość R w kierunku od środka kanału ku jego ściankom.

Próbie interpretacji uzyskanych wartości poprawki Bagleya na podstawie przebiegów profili rozkładu prędkości przepływu (wyznaczonych w odniesieniu do objętościowego natężenia przepływu) przedstawiają rys. 10 i 11.

Rysunek 10 ilustruje przebiegi profili rozkładu prędkości polietylenu FABS 23-D 022 uzyskane podczas przepływu przez dysze średnicy $D = 5$ mm (profil I) oraz

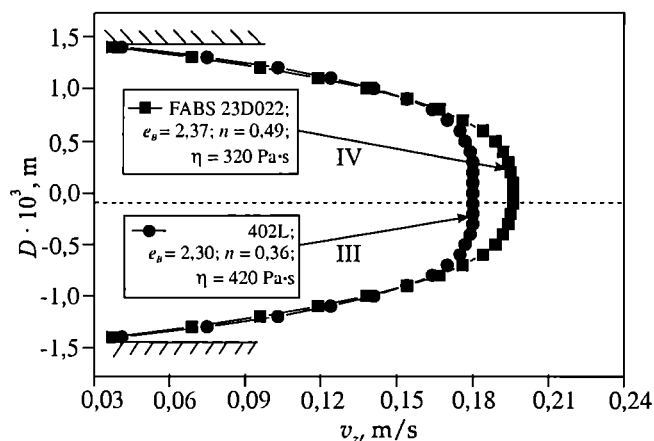


Rys. 10. Przebieg profili rozkładu prędkości przepływu (v_z) PE-LD FABS 23-D 022 w warunkach $\dot{Q} = 8,33 \cdot 10^{-7} m^3/s$ podczas przepływu przez dysze $L = 20$ mm i $D = 5$ mm (profil I) oraz $L = 20$ mm i $D = 3$ mm (profil II); n — wykładnik płynięcia w równaniu (6), η — lepkość dynamiczna polimeru (wyznaczona doświadczalnie z zależności $\eta = \tau_R/\dot{\gamma}_R$)

Fig. 10. Courses of the profiles of velocity distribution (v_z) of PE-LD FABS 23-D 022 at $\dot{Q} = 8.33 \cdot 10^{-7} m^3/s$ during the flow through the die of $L = 20$ mm and $D = 5$ mm (profile I) or one of $L = 20$ mm and $D = 3$ mm (profile II); n — exponent of flow in equation (6), η — dynamic viscosity of a polymer (determined experimentally from the dependence $\eta = \tau_R/\dot{\gamma}_R$)

podczas przepływu przez dysze średnicy $D = 3$ mm (profil II) w warunkach stałości \dot{Q} . W przypadku przepływu przez dysze mniejszej średnicy widoczne jest wyraźne wydłużenie profilu w kierunku przepływu (profil II) — polimer przepływa tu z większą prędkością średnią.

Z przebiegu profili prędkości wyznaczonych teoretycznie w odniesieniu do znanych objętościowych natężeń przepływu oraz spadków ciśnień w wyniku ich formowania można wnioskować, iż straty ciśnienia będą większe w przypadku formowania się profilu II, co wynika z dłuższej drogi potrzebnej do uzyskania profilu uformowanego. Potwierdzeniem tego są wartości poprawki Bagleya uzyskane podczas obu przepływów. W przypadku profilu I $e_B = 1,44$, profilowi II odpowiada



Rys. 11. Przebieg profili rozkładu prędkości przepływu PE-LD 402L (profil III) oraz FABS 23-D 022 (profil IV) w warunkach $\dot{Q} = 8,33 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ podczas przepływu przez dysze $L = 20 \text{ mm}$ i $D = 3 \text{ mm}$; znaczenia n oraz η jak na rys. 10

Fig. 11. Courses of the profiles of velocity distribution (v_z) of PE-LD 402L (profile III) and FABS 23-D 022 (profile IV) at $\dot{Q} = 8,33 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ during the flow through the dies of $L = 20 \text{ mm}$ and $D = 3 \text{ mm}$; n and η meanings as in Fig. 10

wartość $e_B = 2,37$ (tabela 3). Różnice kształtu profili rozkładu prędkości są wynikiem nie tylko występowania różnych elementów geometrycznych kanałów dysz, lecz także różnic w wartości wykładnika płynięcia n stanowiącego składową wielkość w równaniu (6). Poza tym każdemu z profili, czyli różnym wartościom poprawki Bagleya, odpowiada różna lepkość dynamiczna polimeru (η). Większe wartości e_B uzyskuje się podczas przepływu polietylenu o mniejszej lepkości (profil II).

Rysunek 11 ilustruje przebiegi profili rozkładu prędkości podczas przepływu przez dyszę długości $L = 20 \text{ mm}$ i średnicy $D = 3 \text{ mm}$ w warunkach $\dot{Q} = \text{const.}$ dwóch zastosowanych przez nas rodzajów PE-LD. Czoło profilu IV prędkości FABS jest przesunięte w stronę większych prędkości; podobnie jak w poprzednim przypadku, uformowanie profilu wymaga dłuższej drogi, czyli większych strat ciśnienia, co w efekcie przekłada się na większe wartości poprawki Bagleya. Ponieważ jednak lepkość dynamiczna PE-LD FABS 23-D 022 jest mniejsza od lepkości polietylenu 402L jedynie o $100 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, różnice wartości poprawki e_B są małe (wartości e_B odpowiednio 2,37 i 2,30), a profile rozkładu prędkości zróżnicowane nieznacznie — tylko w obrębie osi dyszy (por. rys. 11).

Przebiegi i kształt profili prędkości przepływu mogą stanowić pomoc w interpretacji wyników badań i uzasadnieniu przedstawionych wniosków dotyczących poprawki Bagleya. Należy jednak pamiętać, że rozpatrywanie zagadnienia poprawki Bagleya w kontekście przebiegu profili prędkości wymaga uwzględnienia wzajemnego powiązania wielkości reologicznych (np. lepkości dynamicznej i wykładnika płynięcia n) z elementami geometrycznymi kanału dysz pomiarowych.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone przez nas badania oceny poprawki Bagleya na podstawie pomiarów w linii wytłaczarskiej pozwalają na sformułowanie następujących stwierdzeń:

— Przedstawiona metoda pomiarowa umożliwiła wyznaczenie poprawki Bagleya w rzeczywistych warunkach technologicznych. Pomiaru w pełni odwierciedlają zachowanie się wybranych handlowych rodzajów polietylenów w procesach przetwórczych, w odróżnieniu od pomiarów prowadzonych za pomocą reometrów kapilarnych.

— Oceniając spadki ciśnienia Δp_c pomierzone w linii wytłaczarskiej, należy wprowadzić procedury obliczeniowe w celu wyznaczenia stałych wartości nieskorygowanej szybkości ścinania $\dot{\gamma}_R$ stanowiących warunek określenia poprawki Bagleya.

— Umożliwiająca wymiennosc dysz budowa wytłaczarskiej głowicy pomiarowej pozwala na przedstawienie wpływu elementów geometrycznych kanału na wartość poprawki Bagleya.

— Różnice podstawowych właściwości (gęstość, MFR) badanych rodzajów PE-LD bezpośrednio przekładają się na zróżnicowanie uzyskanych wartości poprawki Bagleya.

— Wyznaczone na podstawie teoretycznej przebiegi profili rozkładu prędkości przepływu, charakteryzujące pod względem reologicznym stosowane tworzywa, pozwalają na interpretację różnic zaobserwowanych w wartościach poprawki Bagleya. Może to stanowić pomoc w pełniejszym zrozumieniu zjawisk zachodzących w rzeczywistych warunkach wytłaczania, jak również w ocenie korelacji pomiędzy tymi warunkami, a strukturą i właściwościami wytworów.

Praca wykonana w ramach grantu KBN 3 T08E 053 26.

LITERATURA

1. Wilczyński K.: „Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 2001, str. 115—121.
2. Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw polimerowych”, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992, str. 225—231.
3. Szlezzyngier W.: „Podstawy reologii polimerów”, Politechnika Rzeszowska 1994, str. 60—69.
4. Ferguson J., Kemblowski Z.: „Reologia stosowana płynów”, wyd. Marcus, Łódź 1995, str. 53—65.
5. Kemblowski Z.: „Reometria płynów nienewtonowskich”, WNT, Warszawa 1973, str. 85—94.
6. Sikora R.: „Leksykon naukowo-techniczny”, wyd. Wadim Plast Sp. j., Lublin 2002, str. 116.
7. Birley A. W., Haworth B., Batchelor J.: „Physics of Plastics — Processing, Properties and Material Engineering”, Hanser Publishers, Monachium—Wiedeń—Nowy Jork—Barcelona 1992, str. 71—74.

8. Dealy J. M., Saucier P. C.: „Rheology in Plastics Quality Control”, Hanser Publishers, Monachium 2000, str. 71—75.
9. Sombatsompop N., Intawong N.-T.: *Polym. Test.* 2001, 20, 97.
10. White J. L.: „Principles of Polymer Engineering Rheology”, John Wiley & Sons, Inc., Kanada 1990, str. 105—111.
11. Michaeli W.: „Extrusions-Werkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk”, Hanser Verlag, Monachium 1991, str. 36—38.
12. Kloziński A., Sterzyński T.: „Wyznaczenie poprawki Bagleya na podstawie pomiarów w linii wylaczarskiej” w „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, IX Profesorskie Warsztaty Naukowe, Szczecin—Dziwnówek 2004., Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2004.
13. Sikora R., Bociąga E.: *Polimery* 2003, 48, 753.
14. Sikora R., Bociąga E.: *Polimery* 2003, 48, 100.
15. Sikora R., Bociąga E.: *Polimery* 2004, 49, 36.
16. Banasiak A., Sterzyński T.: *Polimery* 2004, 49, 442.
17. Coates P. D., Chohan R. K., Groves D., Speight R. G., Rose R. M., Woodhead M.: „In-line rheometry in extrusion and injection moulding processing”, Polymer Processing Society IX Annual Meeting Manchester, 5—8 kwietnia 1993 r.
18. Sterzyński T., Romankiewicz A.: „Pomiary reologiczne w linii wylaczarskiej” w „Materiały polimerowe i ich przetwórstwo” (red. Koszkuł J.), Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000.
19. Kloziński A., Kruszelnicka I., Sterzyński T.: „Pomiary właściwości reologicznych <<in line>> w linii wylaczarskiej” w „Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych” (red. Koszkuł J.), Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
20. Kloziński A., Kruszelnicka I., Sterzyński T.: „Wizualizacyjna ocena rozszerzenia strugi” w „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, VII Profesorskie Warsztaty Naukowe, Puszczykowo 2002, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2002.
21. Kloziński A., Sterzyński T.: „The estimation of the extrude swell by a visualization technique” w „Technomer 2003 — 18. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren”, wyd. Institut für Print- und Medientechnik Technische Universität Chemnitz 2003.
22. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993, str. 33—58.
23. Agassant J.-F. i in.: „Polymer Processing — Principles and Modeling”, Hanser Publishers, 1991, str. 34—36.