

KRZYSZTOF WILCZYŃSKI

Politechnika Warszawska
Instytut Technologii Bezwiórowych
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

Model matematyczny procesu wytłaczania jednoślیمakowego

Cz. X. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA MODELU^{*)}

A MATHEMATICAL MODEL OF SINGLE-SCREW EXTRUSION. Part X. EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE MODEL

Summary — Experimental verification results are presented for a computer model of the single-screw extrusion process of polymers [9]. An extruder, 45 mm in diameter (D), and two screw types were used, *viz.*, a classical screw and a nonconventional screw comprising a mixing section. LDPE and PS were extruded. The model was verified as regards the predicted mass flow rate of the polymer, distribution of polymer pressures and temperatures, and consumption of energy (Table 1, Figs. 4–11). The data predicted by the model were most consistent with the observed flow rates and most divergent from the observed pressures. The classical screw was found to provide the higher extrusion yield than did the screw equipped with the mixing section. The lines to be followed in future studies include a more precise definition of model assumptions, dilation of model applicability to include other materials (*e.g.* polyblends), and developing of a model that optimizes the extrusion process.

Key words: computer modeling of single-screw extrusion process, experimental verification of the model, polyethylene, polystyrene.

Poniższe opracowanie stanowi kolejny artykuł z cyklu publikacji dotyczących matematycznego modelowania procesu wytłaczania jednoślیمakowego [1–9]. W ostatniej opublikowanej pracy zaprezentowaliśmy program komputerowy, który realizuje ten model [9], natomiast w niniejszym artykule przedstawiamy wyniki weryfikacji doświadczalnej opracowanego modelu wytłaczania. Weryfikację tę zrealizowaliśmy na drodze porównania wyników obliczeń (symulacji) i pomiarów dotyczących podstawowych parametrów procesu, mianowicie masowego natężenia przepływu, ciśnienia i temperatury tworzywa oraz zużycia mocy.

BADANIA DOŚWIADCZALNE

Program badań doświadczalnych obejmował ocenę wpływu rozwiązania konstrukcyjnego ślیمaka i głowicy, właściwości (rodzaju) tworzywa oraz warunków technologicznych procesu (prędkości obrotowej ślیمaka) na przebieg wytłaczania, który był charakteryzowany następującymi wielkościami:

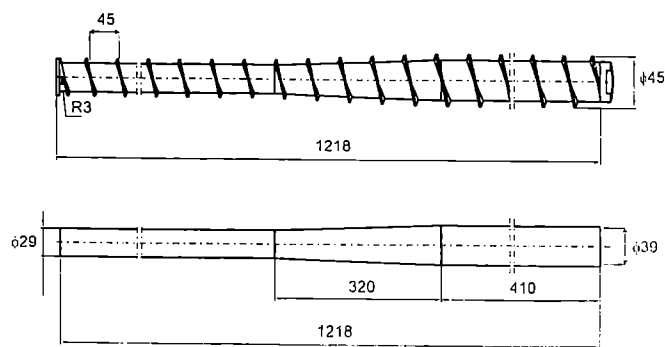
- masowym natężeniem przepływu tworzywa (wydajnością wytłaczania),
- ciśnieniem (mierzonym w cylindrze i głowicy wytłaczarki),
- temperaturą tworzywa (w cylindrze i głowicy),
- zużyciem energii.

Do badań użyliśmy krajowych tworzyw: polietylenu małej gęstości ("Malen E" II-003/GO) oraz polistyrenu (SX-1103K). Zastosowaliśmy dwa rozwiązania konstrukcyjne ślیمaków (o stosunku długości do średnicy $L/D = 27$): ślیمak klasyczny, trójstrefowy (rys. 1) i ślیمak z sekcją intensywnego mieszania (rys. 2); używaliśmy przy tym głowicy do wytłaczania prętów z wymiennymi ustnikami (rys. 3). Pomiary prowadziliśmy w warunkach czterech prędkości obrotowych ślیمaka: 20, 50, 80 i 110 obr./min oraz stałych pozostałych parametrów procesu. Przyjęliśmy jednakowy program nastawiania temperatury w poszczególnych strefach cylindra wytłaczarki: 150/180/210/220°C i głowicy: 220°C.

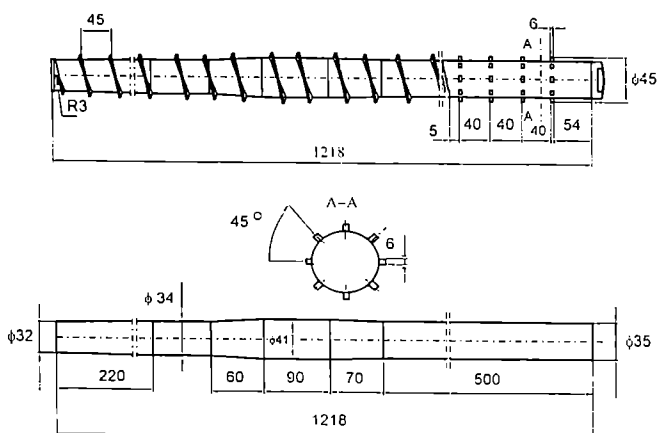
Badania zrealizowaliśmy na diagnostycznym stanowisku oceny przebiegu procesu wytłaczania. W skład tego stanowiska wchodzi:

- wytłaczarka jednoślیمakowa T45-27-22T (produk-

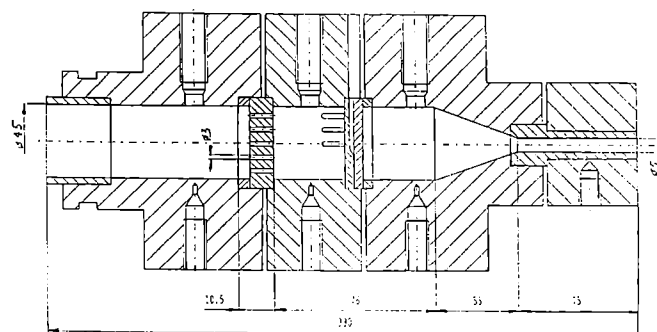
^{*)} Cz. IX — por. Polimery 1999, 44, 282.



Rys. 1. Trójstrefowy ślimak klasyczny
Fig. 1. The conventional three-section screw



Rys. 2. Ślimak z sekcją intensywnego mieszania
Fig. 2. The mixing screw



Rys. 3. Głowica do wytłaczania prętów z ustnikiem cylindrycznym
Fig. 3. The cylindrical rod die

cji Zakładów Maszyn Chemicznych Metalchem w Gliwicach), z możliwością bezstopniowego nastawiania liczby obrotów (z napędem tyrystorowym);

- urządzenie do chłodzenia wytłoczyny;
- urządzenie do odbierania wytłoczyny (odciągu).

Stanowisko to jest wyposażone w aparaturę pomiarową, która pozwala na pomiar następujących parametrów:

— prędkości obrotowej ślimaka (miernik specjalnej konstrukcji, składający się z czujnika magnetycznego współpracującego z cyfrowym licznikiem częstotliwości);

— temperatury ścianek cylindra i głowicy (cztery czujniki termoelektryczne Fe-Ko, rozmieszczone równomiernie wzdłuż cylindra oraz cztery czujniki, rozmieszczone wzdłuż głowicy, sprzężone z automatycznym rejestratorem kompensującym MKV-T12, produkcji niemieckiej);

— rozkładu temperatury tworzywa w przekroju poprzecznym głowicy (czujnik termoelektryczny specjalnej konstrukcji, z trzema termoparami umieszczonymi w osi głowicy oraz na wysokości 1/3 i 2/3 promienia, sprzężony z rejestratorem Micrograph BD-6, produkcji niemieckiej);

— ciśnienia i temperatury tworzywa przy ścianie cylindra (trzy punkty pomiarowe) i głowicy (jeden punkt pomiarowy) (zestaw pomiarowy ZP-13.4, produkcji Zakładów Metalchem w Toruniu, złożony z czujnika tensometrycznego i termoelektrycznego oraz współpracujących z nimi miernikami napięcia: analogowym i cyfrowym);

— mocy czynnej i biernej pobieranej przez silnik (rejestrator poboru mocy Zi-Rg 320, produkcji niemieckiej);

— czasu pracy urządzeń nagrzewających (liczniki czasu T-593, produkcji niemieckiej).

BADANIA SYMULACYJNE

W celu weryfikacji opracowanego modelu wytłaczania wykonaliśmy badania symulacyjne procesu (obliczenia) dotyczące warunków odpowiadających warunkom przeprowadzonych badań doświadczalnych.

Jak wiadomo z pracy [9], dane wejściowe, niezbędne do zrealizowania obliczeń, obejmują elementy geometryczne wytłaczarki, warunki technologiczne procesu oraz właściwości tworzywa (m.in. gęstość, właściwości cieplne, współczynniki tarcia w różnych warunkach).

Właściwości badanych tworzyw — z wyjątkiem charakterystyki reologicznej — zaczerpnęliśmy z danych literaturowych [10—12].

Charakterystykę reologiczną, tzn. zależności lepkości pozornej tworzywa od szybkości ścinania i od temperatury — ze względu na ich decydujący wpływ na dokładność obliczeń — określiliśmy na podstawie badań własnych [10, 13]. Posłużyliśmy się przy tym reometrem kapilarnym "INSTRON" 3211, działającym na zasadzie stałej szybkości ścinania.

Krzywe płynięcia określaliśmy na podstawie sześciu punktów pomiarowych, wynikających z sześciostopniowej skali prędkości tłoka reometru (0,06; 0,2; 0,6; 2,0; 6,0; 20,0 cm/min). W każdym punkcie pomiarowym dokonaliśmy sześciu odczytów obciążenia tłoka. Badania przeprowadziliśmy w zakresie szybkości od 10^1 do 10^4 s⁻¹ w pełnym zakresie temperatury przetwórstwa.

Dolną graniczną wartość tej temperatury wyznaczała zdolność tworzywa do osiągnięcia pełnego zakresu szybkości ścinania, a górną określały warunki niekontrolowanego wypływu tworzywa z kapilary. Pomiary przeprowadziliśmy w odstępach 20°C. Stosowaliśmy kapilarę średnicy $D_k = 0,762$ mm i długości $L = 50,82$ mm, tj. o stosunku $L/D = 66,6$. Szybkość ścinania korygowaaliśmy poprawką Rabinowitscha, natomiast nie stosowaliśmy poprawki Bagley'a (ze względu na dużą wartość stosunku L/D). Każdorazowo określaliśmy stałą konsystencji oraz wykładnik płynięcia (na drodze liniowej aproksymacji — metodą najmniejszych kwadratów — podwójnie logarytmicznej zależności naprężenia stycznego od szybkości ścinania). Dokładność aproksymacji ocenialiśmy na podstawie współczynnika korelacji liniowej i średniego błędu kwadratowego.

Wyniki pomiarów reometrycznych pozwoliły na określenie parametrów równania reologicznego stosowanego w opracowanym przez nas modelu, tzn. równania Kleina. Dokonałiśmy tego aproksymując (metodą najmniejszych kwadratów) te wyniki logarytmiczną funkcją Kleina opisującą zależność lepkości pozornej tworzywa od szybkości ścinania i temperatury:

$$\ln \eta = A_0 + A_1 \cdot \ln \dot{\gamma} + A_{11} \cdot \ln^2 \dot{\gamma} + A_{12} \cdot T \cdot \ln \dot{\gamma} + A_2 \cdot T + A_{22} \cdot T^2 \quad (1)$$

gdzie: η — lepkość pozorna; $\dot{\gamma}$ — szybkość ścinania; T — temperatura; $A_0, A_1, A_{11}, A_{12}, A_2, A_{22}$ — współczynniki wielomianu stanowiącego aproksymację doświadczalnie uzyskanej zależności lepkości pozornej od szybkości ścinania i temperatury.

OMÓWIENIE WYNIKÓW

Weryfikacja modelu polegała na porównaniu wyników obliczeń (symulacji) i pomiarów podstawowych parametrów procesu: masowego natężenia przepływu, ciśnienia i temperatury tworzywa oraz zużycia mocy. Obliczenia temperatury dotyczyły przy tym wartości

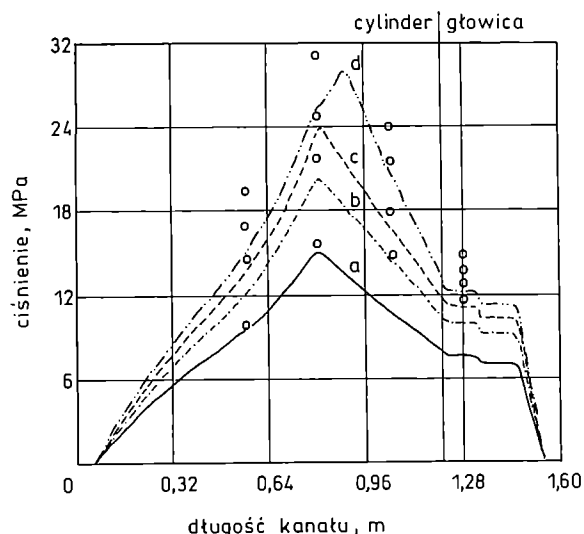
T a b e l a 1. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na masowe natężenie przepływu polietylenu: porównanie wyników obliczeń oraz pomiarów dotyczących ślimaka klasycznego (K) i ślimaka z sekcją mieszającą (M)

T a b e l e 1. The mass flow rate in relation to screw speed: comparison of calculated with measured data for the conventional ("K") screw and the mixing screw ("M")

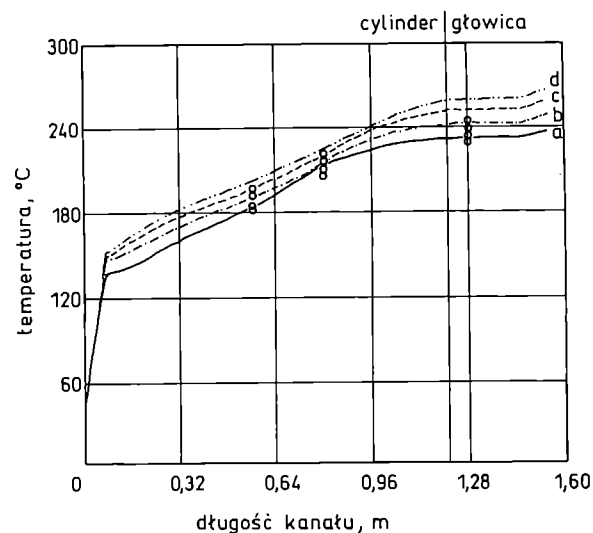
Typ ślimaka	Prędkość obrotowa ślimaka, obr./min	Nat. przepływu PE-LD (obliczenia), kg/h	Nat. przepływu PE-LD (pomiar), kg/h
K	20	6,51	6,40
	50	16,20	16,40
	80	26,02	28,70
	110	37,44	40,10
M	20	5,76	5,30
	50	14,76	14,90
	80	23,68	24,90
	110	32,04	34,10

średnich, natomiast pomiary — średniej temperatury tworzywa w głowicy oraz przy ścianie cylindra. Przykłady odnoszące się do wytłaczania polietylenu (przy użyciu głowicy z ustnikiem cylindrycznym oraz scharakteryzowanych już dwóch różnych ślimaków) przedstawiamy w tabeli 1 i na rys. 4—11.

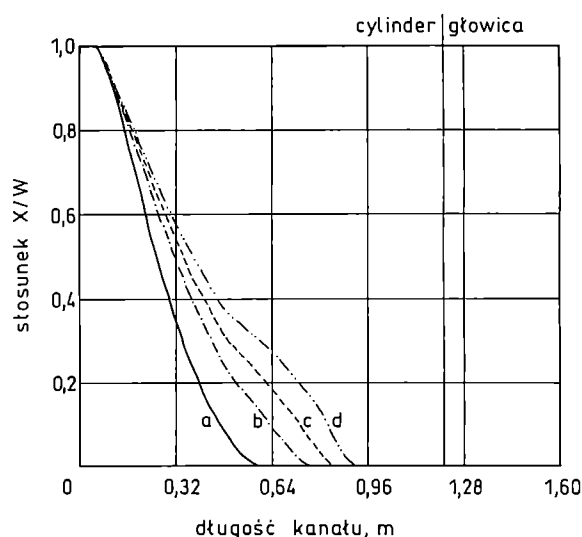
Najlepszą zgodność wyników pomiarów i obliczeń uzyskaliśmy w przypadku natężenia przepływu two-



Rys. 4. Wpływ prędkości obrotowej (N) ślimaka klasycznego na profil ciśnienia; N (obr./min): a — 20, b — 50, c — 80, d — 110. Krzywe — wyniki obliczeń, \circ — punkty doświadczalne
Fig. 4. The calculated (curves) and observed (circles) pressures in relation to conventional screw speed (N , rpm): (a) 20, (b) 50, (c) 80, (d) 110

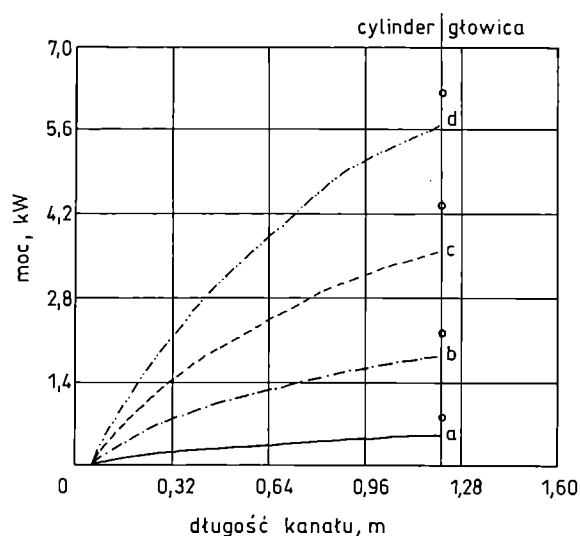


Rys. 5. Wpływ prędkości obrotowej (N) ślimaka klasycznego na profil temperatury; oznaczenia krzywych jak na rys. 4. Krzywe — wyniki obliczeń, \circ — punkty doświadczalne
Fig. 5. The calculated (curves) and observed (circles) temperature in relation to conventional screw speed (N , rpm): (a) 20, (b) 50, (c) 80, (d) 110



Rys. 6. Wpływ prędkości obrotowej (N) ślimaka klasycznego na profil warstwy stałej (stosunek X/W); oznaczenia krzywych jak na rys. 4

Fig. 6. The solid bed profile (X/W ratio) calculated for a conventional screw in relation to screw speed (N) (for curve designations see Fig. 4)

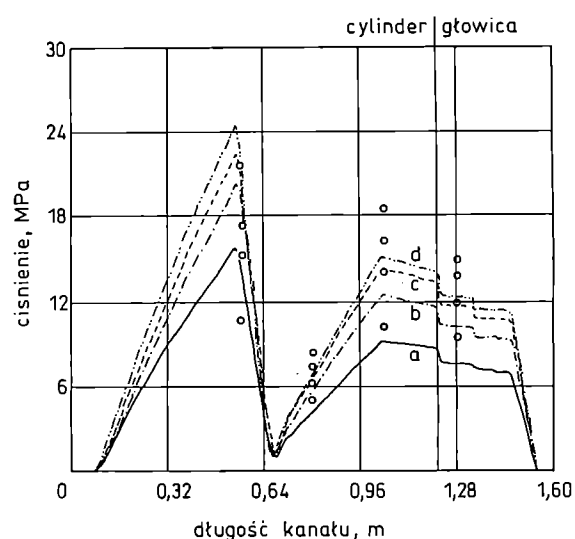


Rys. 7. Wpływ prędkości obrotowej (N) ślimaka klasycznego na zużycie mocy; oznaczenia krzywych jak na rys. 4. Krzywe — wyniki obliczeń, \circ — punkty doświadczalne

Fig. 7. The calculated (curves) and measured (circles) power consumption by the conventional screw in relation to screw speed (N) (for curve designations see Fig. 4)

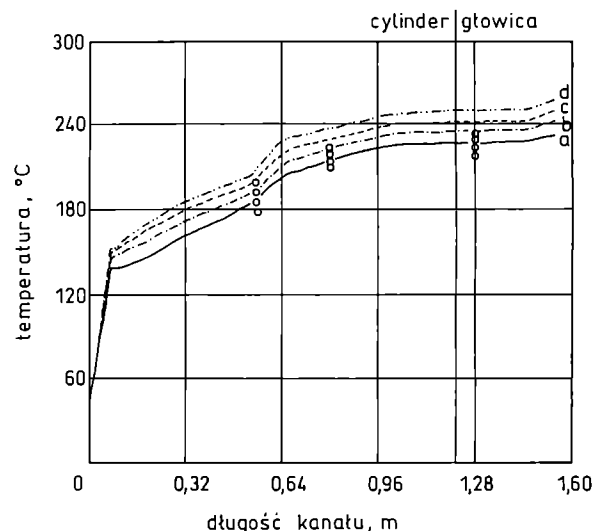
rzywa (tabela 1). Rozbieżności wynosiły tu kilka procent i były nieco mniejsze w odniesieniu do polietylenu niż do polistyrenu.

Różnice temperatury były większe (rys. 5 i 9), ale też nie przekraczały dziesięciu procent, przy czym lepszą dokładność obliczeń uzyskaliśmy w przypadku polistyrenu.



Rys. 8. Wpływ prędkości obrotowej (N) ślimaka z sekcją mieszającą na profil ciśnienia; oznaczenia krzywych jak na rys. 4. Krzywe — wyniki obliczeń, \circ — punkty doświadczalne

Fig. 8. The calculated (curves) and measured (circles) pressures in the mixing screw in relation to screw speed (N) (for curve designations see Fig. 4)



Rys. 9. Wpływ prędkości obrotowej (N) ślimaka z sekcją mieszającą na profil temperatury; oznaczenia krzywych jak na rys. 4. Krzywe — wyniki obliczeń, \circ — punkty doświadczalne

Fig. 9. The calculated (curves) and observed (circles) pressures in the mixing screw in relation to screw speed (N) (for curve designations see Fig. 4)

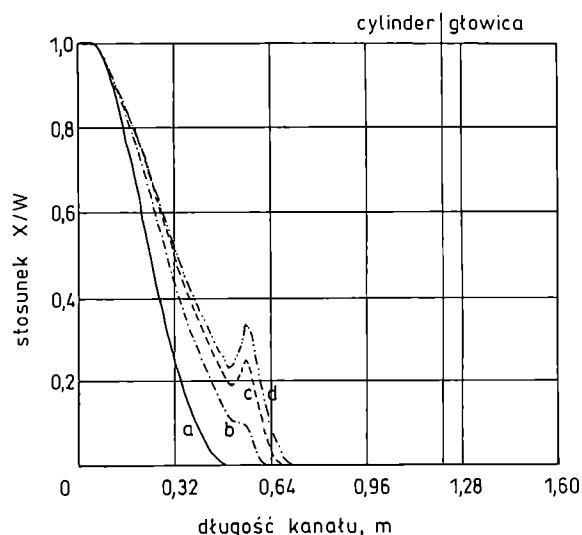
Najtrudniejszym do przewidzenia parametrem obliczeń okazało się ciśnienie (rys. 4 i 8); rozbieżności wynosiły zwykle kilkanaście procent, niekiedy jednak przekraczały nawet dwadzieścia procent.

Teoretyczne zużycie mocy odnieśliśmy do mocy efektywnie wykorzystanej podczas wytłaczania (a nie mocy dostarczanej do wytłaczarki), powodującej wzrost ciśnienia oraz temperatury tworzywa i określanej na pod-

stawie iloczynu masowego natężenia przepływu tworzywa i jego entalpii oraz iloczynu objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia. Rozbieżności z wynikami doświadczalnymi wynosiły zwykle kilkanaście procent (rys. 7 i 11).

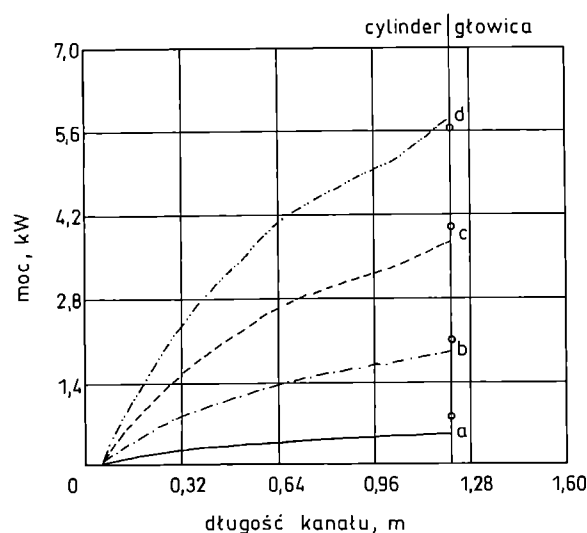
Uzyskane przez nas dokładności obliczeń odpowiadają danym prezentowanym w literaturze [11, 14].

Ustaliliśmy, że rozbieżności pomiarów i obliczeń



Rys. 10. Wpływ prędkości obrotowej (N) ślimaka z sekcją mieszającą na profil warstwy stałej (stosunek X/W); oznaczenia krzywych jak na rys. 4

Fig. 10. The calculated solid bed profiles for the mixing screw in relation to screw speed (for curve designations see Fig. 4)



Rys. 11. Wpływ prędkości obrotowej (N) ślimaka z sekcją mieszającą na zużycie mocy; oznaczenia krzywych jak na rys. 4. Krzywe — wyniki obliczeń, \circ — punkty doświadczalne

Fig. 11. The calculated (curves) and measured (circles) power consumption for the mixing screw in relation to screw speed (N) (for curve designations see Fig. 4)

zwiększają się ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka, co może być spowodowane rosnącym znaczeniem przepływu ciśnieniowego w wylączarce. Opracowany przez nas model uwzględnia oczywiście przepływ ciśnieniowy, ale tylko z pewną dokładnością. Gdy rośnie rola tego przepływu, istotnego znaczenia nabierają niedokładności obliczeń generowane przez elementy modelu opisujące ten przepływ. Tak więc kształt profilu ciśnienia jest przewidywany prawidłowo, jednak obliczenia dostarczają zawyżonych wartości w strefie uplastyczniania, a zaniżonych — w strefie dozowania i w głowicy. Profil ten silnie zależy od charakterystyki geometrycznej ślimaka i rozkładu względnej szerokości warstwy stałej, ale w odniesieniu do ślimaka o określonej charakterystyce geometrycznej jego kształt jest podobny w przypadku różnych wartości prędkości obrotowej. Ciśnienie rośnie wyraźnie ze wzrostem tej prędkości i towarzyszy temu wzrost natężenia przepływu tworzywa (rysunki 4 i 8, tabela 1). Temperatura również rośnie z prędkością obrotową ślimaka, przy czym obliczenia dostarczają tutaj wartości zawyżonych (rys. 5 i 9). Szybkość uplastyczniania tworzywa maleje ze wzrostem natężenia przepływu (rys. 6 i 10).

Przedstawione wyniki świadczą o wyraźnym związku między ciśnieniem i temperaturą. Obliczenia temperatury dostarczają zawyżonych wartości, co prowadzi — poprzez zależność lepkości od temperatury — do zaniżonych wartości ciśnienia. Można przypuszczać, że w modelu została niedoszacowana wymiana ciepła między cylindrem a uplastycznionym materiałem (niedoszacowanie wartości współczynnika przejmowania ciepła).

Ogólnie biorąc, można stwierdzić, że źródła występowania rozbieżności między wynikami pomiarów i obliczeń są dwójakiego rodzaju: wynikają one bądź z ograniczeń proponowanego modelu wylączania, tj. uproszczeń przyjętych do opisu procesu, bądź też z niedokładności danych wejściowych wprowadzanych do obliczeń.

W odniesieniu do ograniczeń modelu warto zwrócić uwagę m.in. na potrzebę uwzględnienia w opisie procesu zjawisk cieplnych w strefie ciała stałego oraz poślizgu tworzywa i rozrywania warstwy stałej (dwa ostatnie problemy nie są dotąd rozwiązane na świecie), a także zastosowania dokładniejszego modelu przepływu tworzywa uplastycznego.

Drugą przyczyną niedokładności obliczeń są niedokładności danych wejściowych. Stwierdziliśmy, że duży wpływ wywierają tu dane dotyczące właściwości tworzywa (lepkości) oraz warunków technologicznych (głównie precyzji określania prędkości obrotowej ślimaka oraz temperatury cylindra).

Opisane badania prowadzą również do wniosku, że ślimak klasyczny zapewnia większą wydajność wylączania i mniejsze jednostkowe zużycie energii (tj. koszt) oraz że ciśnienie i zużycie mocy rośnie w przypadku wylączania polietylenu, który ma większą lepkość od polistyrenu.

Wyniki weryfikacji (tj. uzyskane dokładności obliczeń) wskazują na przydatność modelu w rozwiązywaniu praktycznych problemów inżynierskich. Model stanowi kompromis między złożonością stosowanych metod obliczeniowych (czasem trwania obliczeń), a dokładnością uzyskiwanych wyników, co ma duże znaczenie w praktyce projektowej.

PODSUMOWANIE

Opracowaliśmy kompleksowy model komputerowy procesu wytłaczania jednoślimakowego tworzyw wielkocząsteczkowych, opisujący działanie układu maszyna (wytłaczarka) — narzędzie (głowica). Model dotyczy wytłaczania przy użyciu ślimaków klasycznych i niekonwencjonalnych oraz głowic o różnej charakterystyce geometrycznej.

Oryginalność modelu w stosunku do nielicznych rozwiązań światowych z tej dziedziny — poza elementami opisu matematycznego procesu oraz oryginalnym algorytmem obliczeń i oprogramowaniem — polega na kompleksowości ujęcia problemu, tzn. na rozpatrywaniu procesu wytłaczania jako układu współpracy maszyny (wytłaczarki) i narzędzia (głowicy). Takie ujęcie — wraz z opracowaniem rozwiązań pozwalających na ocenę jakości procesu wytłaczania [10] — stwarza realne podstawy do podjęcia w przyszłości problemu optymalizacji tego procesu, w którym funkcja celu będzie obejmowała wydajność wytłaczania, zużycie energii (koszt) i jakość procesu. Problem ten nie został dotychczas rozwiązany na świecie.

Omawiany model potwierdziliśmy doświadczalnie badaniami przebiegu wytłaczania PE-LD i PS za pomocą wytłaczarki średnicy $D = 45$ mm. Wyniki tej weryfikacji wskazują na jego przydatność w rozwiązywaniu praktycznych problemów inżynierskich.

Potrzebny jest dalszy rozwój modelu, m.in. w następujących kierunkach:

— uściślenia założeń (np. dzięki uwzględnieniu poślizgu tworzywa, rozrywaniu warstwy stałej lub na

drodze zastosowania dokładniejszego modelu przepływu tworzywa uplastycznionego);

— rozszerzenia modelu na inne materiały, przede wszystkim na mieszaniny tworzyw, a to ze względu na ich interesujące właściwości oraz bardzo dynamiczny wzrost produkcji i zastosowań w ostatnich latach;

— budowy modelu optymalizującego wytłaczanie, a nie tylko prognozującego (symulującego) jego przebieg.

Niniejszy artykuł kończy podstawowy cykl ściśle powiązanych ze sobą publikacji dotyczących matematycznego modelu procesu wytłaczania jednoślimakowego, nie wyczerpuje on jednak oczywiście prowadzonych przez nas prac w tym zakresie. Kierunek tych prac podaliśmy powyżej w ogólnym zarysie; kolejne artykuły dotyczące modelowania procesu wytłaczania będą się już jednak ukazywały jako opracowania odrębne.

LITERATURA

1. Wilczyński K.: *Polimery* 1986, **31**, 470.
2. Wilczyński K.: *Polimery* 1987, **32**, 373.
3. Wilczyński K.: *Polimery* 1989, **34**, 447.
4. Wilczyński K.: *Polimery* 1995, **40**, 56.
5. Wilczyński K.: *Polimery* 1996, **41**, 523.
6. Wilczyński K.: *Polimery* 1996, **41**, 587.
7. Wilczyński K.: *Polimery* 1997, **42**, 706.
8. Wilczyński K.: *Polimery* 1998, **43**, 44.
9. Wilczyński K.: *Polimery* 1999, **44**, 284.
10. Wilczyński K.: "Teoria wytłaczania jednoślimakowego tworzyw wielkocząsteczkowych", Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1990.
11. Agur S., Vlachopoulos J.: *Polym. Eng. Sci.* 1982, **22**, 1084.
12. Michaeli W.: "Extrusion Dies for Plastics and Rubber", Hanser, Nowy Jork 1992.
13. Wilczyński K.: *Mechanik* 1994, **67**, 311.
14. Amellal K., Lafleur P. G.: *Plast. Rubber Composites, Processing Applicat.* 1993, **19**, 227.

Otrzymano 16 III 1999 r.