

KRZYSZTOF WILCZYŃSKI<sup>1)</sup>, JAMES L. WHITE<sup>2)</sup>

## Modelowanie procesu wytłaczania dwuślimakowego<sup>\*)</sup>

### CZ. II. WERYFIKACJA MODELU

**Streszczenie** — Na podstawie badań symulacyjnych i doświadczalnych dokonano weryfikacji opracowanego uprzednio (por. cz. I) kompleksowego modelu procesu dwuślimakowego wytłaczania przeciwbieżnego z dozowanym zasilaniem przy użyciu układu ślimaków ściśle zazębiających się. Badania wykonano w warunkach różnych wartości masowego natężenia przepływu tworzywa i różnych szybkości obrotowych ślimaka. Oceniano przy tym przebieg uplastycznienia wytłaczanego materiału i stopień wypełnienia kanału ślimaka oraz zmiany ciśnienia i temperatury tworzywa. Uzyskano zadowalającą zgodność wyników pomiarów i obliczeń symulacyjnych.

**Słowa kluczowe:** dwuślimakowe wytłaczanie przeciwbieżne, model komputerowy, obliczenia symulacyjne, weryfikacja doświadczalna.

#### MODELING OF TWIN SCREW EXTRUSION. PART II. MODEL VERIFICATION

**Summary** — A comprehensive computer model for counter-rotating twin-screw extrusion has been verified on the base of experimental and simulation studies for closely intermeshing strave fed extrusion (Fig. 3). Melting behavior of the polymer, pressure and temperature profiles as well as fill factor were evaluated at various flow rates and screw speeds (Fig. 4—9). The agreement of predictions and observations was satisfactory (Fig. 10—12).

**Key words:** counter-rotating twin-screw extrusion, computer modeling, simulation, experimental verification.

W pierwszej części publikacji przedstawiliśmy model matematyczny procesu wytłaczania dwuślimakowego oraz zbudowany na jego podstawie program komputerowy [1]. Model opisuje transport tworzywa w stanie stałym, przebieg jego uplastycznienia oraz przepływ tworzywa uplastycznionego. Opracowany program komputerowy umożliwia symulację procesu w wyniku prognozowania przebiegu wytłaczania na podstawie charakterystyki geometrycznej układu ślimakowego, warunków technologicznych procesu oraz właściwości przetwarzanego tworzywa. Pozwala również na określenie przebiegu uplastycznienia tworzywa, rozkładu ciśnienia i temperatury oraz stopnia wypełnienia kanału ślimaka.

Poniższy artykuł zawiera wyniki weryfikacji doświadczalnej modelu oraz badań symulacyjnych, ukazujących wpływ warunków technologicznych procesu na przebieg wytłaczania. Podobne prace [2] zrealizowano już w odniesieniu do modelu wzmiankowanego w [1]. Obecne badania różnią się rodzajem przetwarzanego materiału, charakterystyką geometryczną ślimaków oraz warunkami technologicznymi procesu.

#### CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

##### Materiał

Wytłaczaniu poddawaliśmy polipropylen PP88-GK (firmy Equistar, USA) o gęstości właściwej  $\rho = 0,9 \text{ g/cm}^3$ , wskaźniku szybkości płynięcia ( $WSP$ ) = 5 g/10 min i temperaturze topnienia  $T_m = 160 \text{ }^\circ\text{C}$  (wg danych producenta i danych literaturowych). Zależność lepkości PP od szybkości ścinania i temperatury określiliśmy na podstawie badań własnych, opisując ją za pomocą równania reologicznego Kleina. Wyznaczone przez nas parametry tego równania zastosowaliśmy w obliczeniach symulacyjnych.

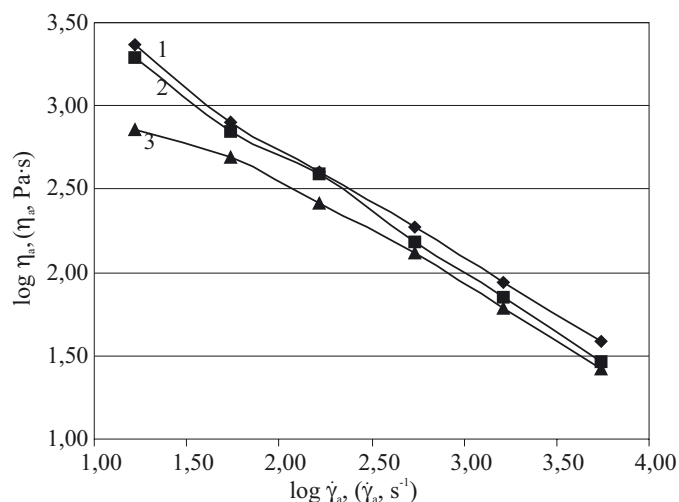
Pomiary wykonywaliśmy przy użyciu reometru kapilarnego Instron 3211, działającego na zasadzie stałej szybkości ścinania, wykorzystując w tym celu kapilary o różnym stosunku długości do średnicy równym 100, 66 lub 33. Dane do obliczeń reometrycznych uzyskiwano na podstawie sześciu punktów pomiarowych wynikających z sześciostopniowej skali prędkości tłoka reometru (0,06, 0,2, 0,6, 2,0, 6,0 i 20,0 cm/min). Temperatura pomiarów wynosiła: 190, 210 bądź 230  $^\circ\text{C}$ .

Do obliczeń zastosowano procedurę obliczeniową Reo z poprawką Bagleya. Szybkość ścinania korygowano poprawką Rabinowitscha. Dokładność aproksymacji

<sup>\*)</sup> Cz. I — patrz [1].

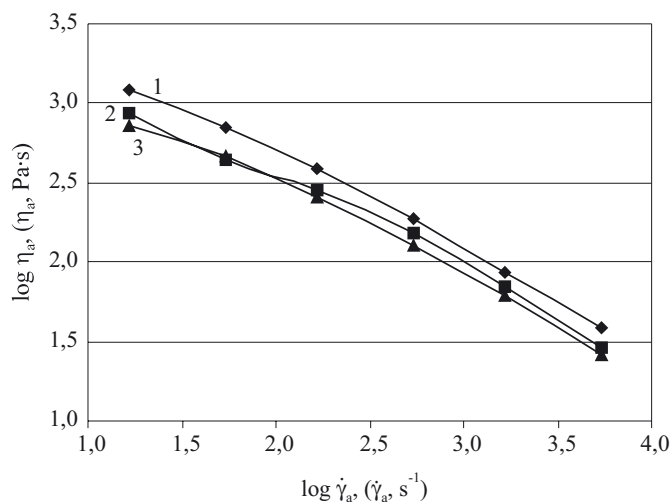
<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska, Instytut Technologii Materiałowych, Zakład Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, e-mail: krzysztof.wilczynski@wip.pw.edu.pl

<sup>2)</sup> The University of Akron, Department of Polymer Engineering, OH 44325-0301 Akron.



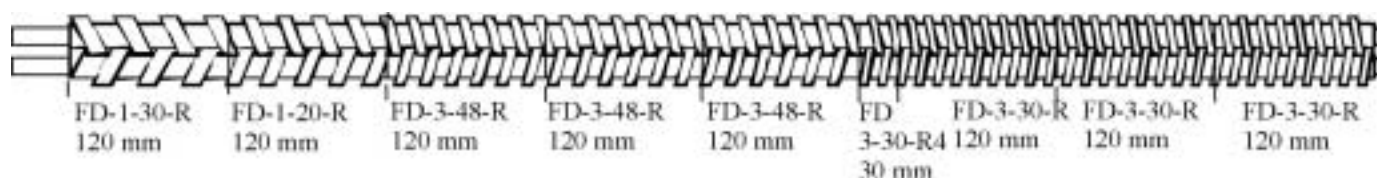
Rys. 1. Krzywe lepkości  $[\eta = f(\dot{\gamma})]$  bez uwzględnienia poprawki Bagleya; temperatura pomiaru: 1 — 190 °C, 2 — 210 °C, 3 — 230 °C

Fig. 1. Viscosity curves without Bagley correction (temperature: 1 — 190 °C, 2 — 210 °C, 3 — 230 °C)



Rys. 2. Krzywe lepkości z uwzględnieniem poprawki Bagleya; temperatura pomiaru patrz rys. 1

Fig. 2. Viscosity curves with Bagley correction (temperature — see Fig. 1)



Rys. 3. Schemat układu ślimakowego przeciwbieżnego wylączarki LSM 34.30: FD-1-30-R — krotność uzwojenia ślimaka  $i = 1$ , skok  $t = 30$  mm, długość sekcji  $L = 120$  mm; FD-1-20-R —  $i = 1$ ,  $t = 20$  mm,  $L = 120$  mm; FD-3-48-R —  $i = 3$ ,  $t = 48$  mm,  $L = 360$  mm; FD-3-30-R —  $i = 3$ ,  $t = 30$  mm,  $L = 390$  mm

Fig. 3. Screw configuration used in computations ( $I =$  multiplication factor,  $t =$  pitch,  $L =$  section length)

oceniano na podstawie wartości współczynnika korelacji liniowej i średniego błędu kwadratowego.

Wyniki pomiarów reometrycznych przedstawiają rys. 1 i 2.

### Badania doświadczalne wylączania

Weryfikację modelu matematycznego przeprowadzono na podstawie wyników doświadczeń wykonanych przy użyciu wylączarki dwuślimakowej Leistritz LSM 30.34 pracującej w układzie przeciwbieżnym. Charakteryzuje się ona budową modułową; średnica ślimaków  $D$  wynosi 34 mm, długość  $L = 990$  mm, a odległość między ich osiami  $R = 30$  mm.

Zastosowaliśmy układ ślimaków ściśle zazębiających się o szerokim zwoju ślimaka (*thick flighted* — FD) (rys. 3). Układ składa się z kilku sekcji o różnej charakterystyce geometrycznej i różnej długości. W procesie wykorzystaliśmy głowicę trójżyłową do wylączania żył średnicy 3 mm.

Badania wykonywaliśmy w warunkach zasilania dozowanego za pomocą dozownika ślimakowego, z różnymi wartościami masowego natężenia przepływu tworzywa:  $G = 5, 10$  lub  $15$  kg/h i różnymi szybkościami

obrotowymi ślimaka:  $N = 100$  bądź  $200$  obr/min. Temperatura cylindra wynosiła  $T_b = 220$  °C.

W toku prowadzonego procesu wylączania ocenialiśmy przebieg uplastycznienia tworzywa i stopień wypełnienia kanału z zastosowaniem techniki „wyciągania ślimaka” oraz dokonywaliśmy pomiaru ciśnienia i temperatury w punkcie wlotu do głowicy.

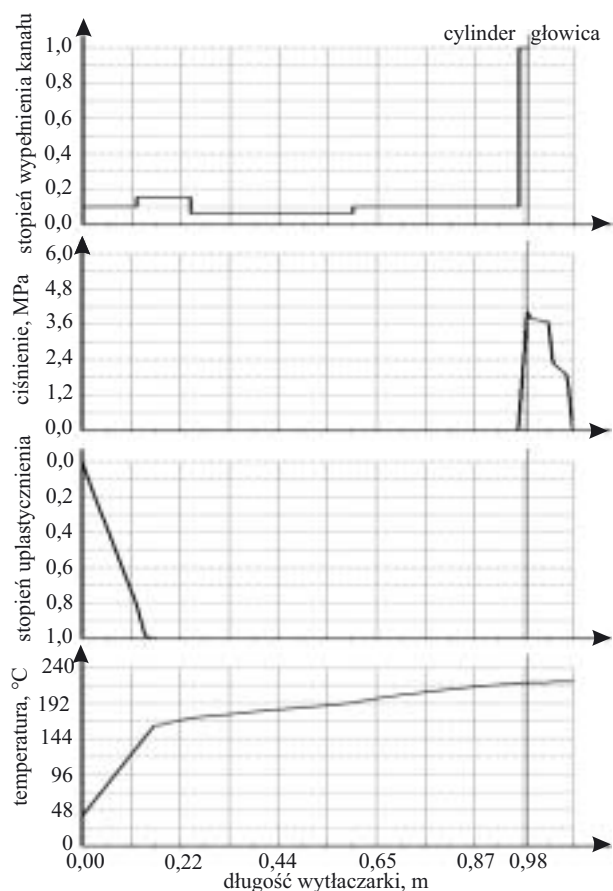
### Obliczenia symulacyjne

Obliczenia symulacyjne przeprowadzaliśmy w odniesieniu do warunków zastosowanych w badaniach doświadczalnych (podane już różne wartości masowego natężenia przepływu tworzywa i rozmaite szybkości obrotowe ślimaka). Określano: rozkład ciśnienia, rozkład temperatury, przebieg uplastycznienia tworzywa oraz stopień wypełnienia kanału ślimaka.

## WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

### Symulacja

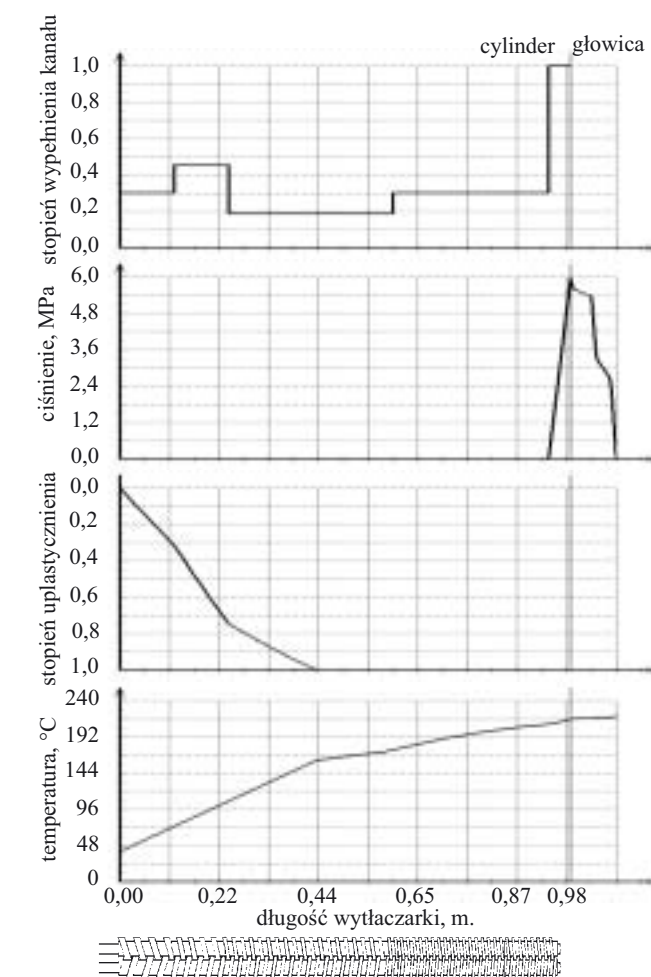
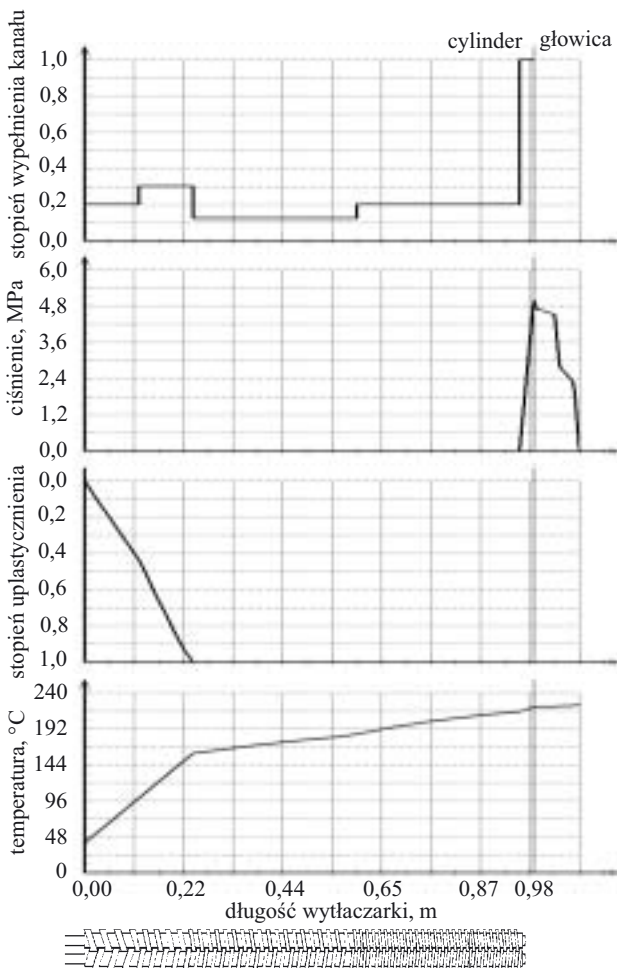
Wyniki obliczeń symulacyjnych przedstawiono na rys. 4—9.



Rys. 4. Wyniki symulacji wytłaczania w warunkach masowego natężenia przepływu tworzywa  $G = 5 \text{ kg/h}$  i szybkości obrotowej ślimaka  $N = 100 \text{ obr/min}$

Fig. 4. Simulation results for extrusion at the flow rate  $G = 5 \text{ kg/h}$ , and screw speed  $N = 100 \text{ rpm}$

Można zauważyć, że wraz ze wzrostem wartości  $G$  droga uplastyczniania tworzywa wydłuża się, co oznacza mniejszą szybkość uplastyczniania. Towarzyszy temu zwiększenie długości strefy kanału ślimaka całkowicie wypełnionej tworzywem. Wzrost szybkości obrotowej ślimaka powoduje natomiast skrócenie drogi uplas-

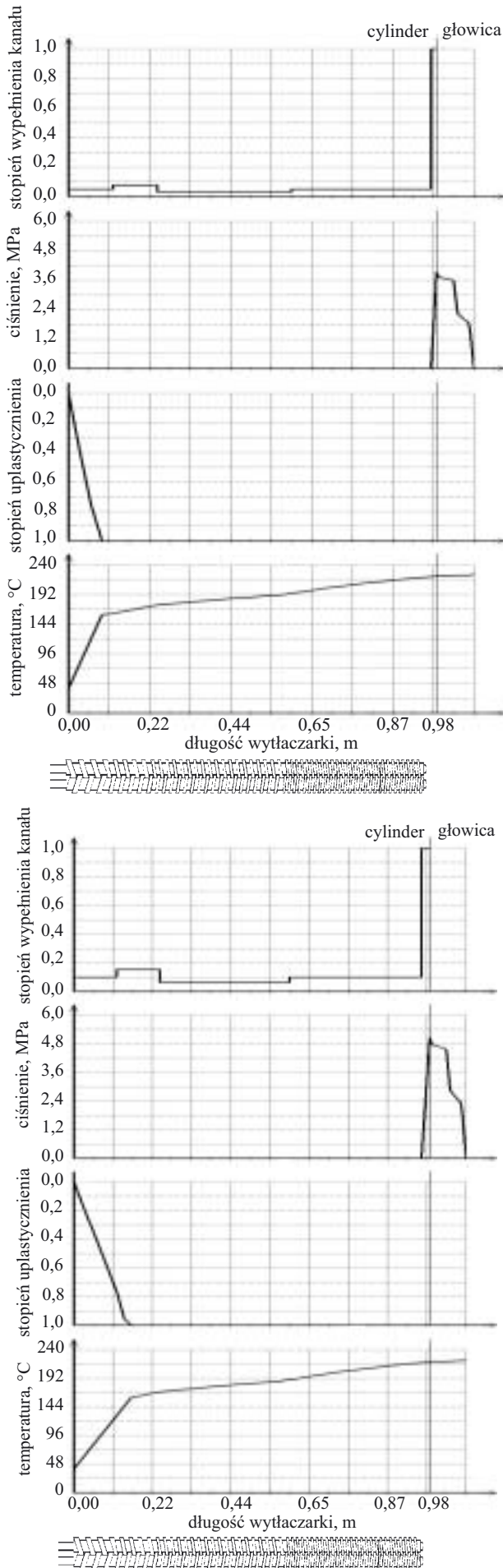


Rys. 6. Wyniki symulacji wytłaczania w warunkach masowego natężenia przepływu tworzywa  $G = 15 \text{ kg/h}$  i szybkości obrotowej ślimaka  $N = 100 \text{ obr/min}$

Fig. 6. Simulation results for extrusion at the flow rate  $G = 15 \text{ kg/h}$ , and screw speed  $N = 100 \text{ rpm}$

Rys. 5. Wyniki symulacji wytłaczania w warunkach masowego natężenia przepływu tworzywa  $G = 10 \text{ kg/h}$  i szybkości obrotowej ślimaka  $N = 100 \text{ obr/min}$

Fig. 5. Simulation results for extrusion at the flow rate  $G = 10 \text{ kg/h}$ , and screw speed  $N = 100 \text{ rpm}$

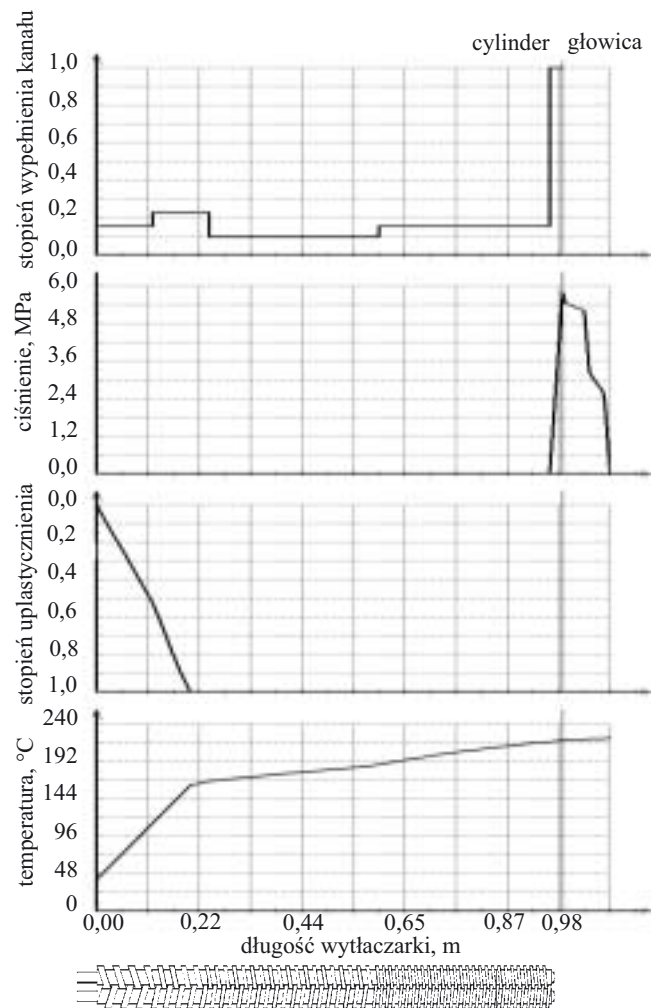


Rys. 7. Wyniki symulacji wytłaczania w warunkach masowego natężenia przepływu tworzywa  $G = 5 \text{ kg/h}$  i szybkości obrotowej ślimaka  $N = 200 \text{ obr/min}$

Fig. 7. Simulation results for extrusion at the flow rate  $G = 5 \text{ kg/h}$ , and screw speed  $N = 200 \text{ rpm}$

tycznienia, a więc większą szybkość tego procesu. Zmniejsza się również długość strefy ślimaka całkowicie wypełnionej tworzywem.

W obliczeniach, w każdym przypadku, podwyższenie ciśnienia w układzie uplastyczniającym wytłaczarki



Rys. 8. Wyniki symulacji wytłaczania w warunkach masowego natężenia przepływu tworzywa  $G = 10 \text{ kg/h}$  i szybkości obrotowej ślimaka  $N = 200 \text{ obr/min}$

Fig. 8. Simulation results for extrusion at the flow rate  $G = 10 \text{ kg/h}$ , and screw speed  $N = 200 \text{ rpm}$

Rys. 9. Wyniki symulacji wytłaczania w warunkach masowego natężenia przepływu tworzywa  $G = 15 \text{ kg/h}$  i szybkości obrotowej ślimaka  $N = 200 \text{ obr/min}$

Fig. 9. Simulation results for extrusion at the flow rate  $G = 15 \text{ kg/h}$ , and screw speed  $N = 200 \text{ rpm}$

jest równoważne spadkowi ciśnienia w głowicy, zmniejszenie zaś ciśnienia do zera powoduje niecałkowite wypełnienie kanału ślimaka tworzywem.

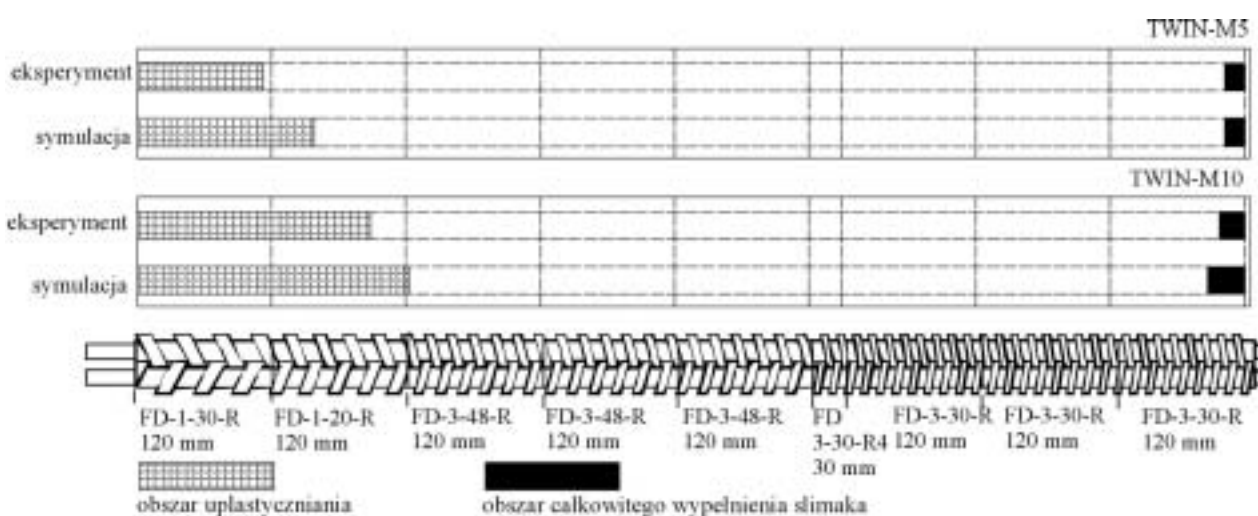
Punkt załamania na krzywej rozkładu temperatury odpowiada końcowi tego proces — temperatura tworzywa jest wówczas równa temperaturze uplastycznienia, a wartość ta stanowi kryterium zbieżności obliczeń iteracyjnych omawianego modelu komputerowego.

### Weryfikacja modelu

Oceny modelu dokonano na podstawie porównania wyników uzyskanych w badaniach doświadczalnych i symulacyjnych.

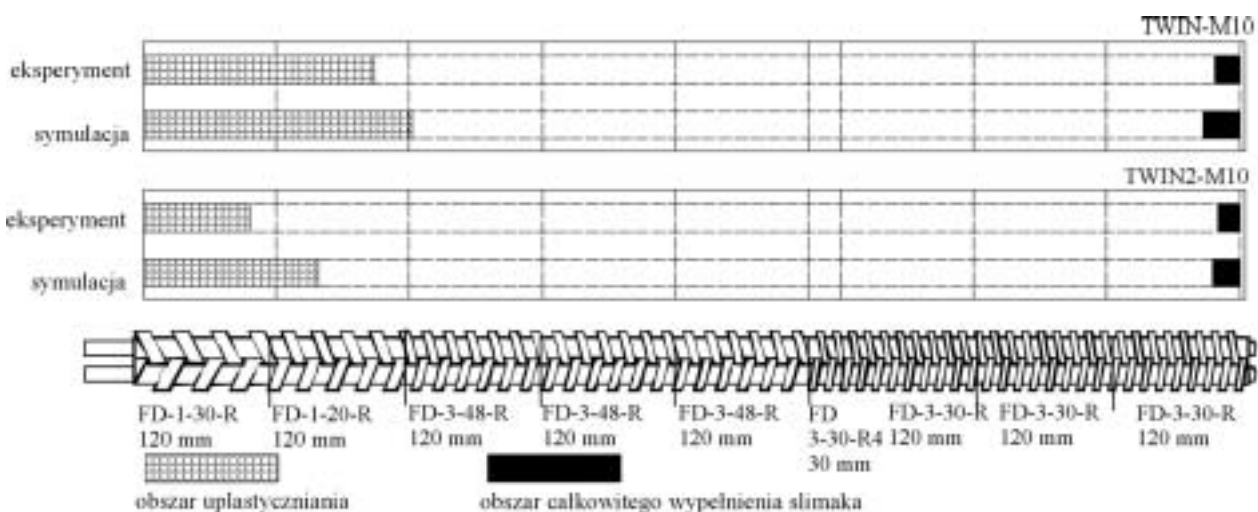
Rysunki 10 i 11 przedstawiają przykładowe zestawienie odpowiednich danych dotyczących przebiegu uplastycznienia tworzywa i stopnia wypełnienia kanału ślimaka w warunkach różnych wartości masowego natężenia przepływu tworzywa i stałej szybkości obrotowej ślimaka (rys. 10), bądź odwrotnie (rys. 11).

Przebiegi zależności uzyskanych w wyniku obliczeń symulacyjnych i badań doświadczalnych są zgodne. W obydwu przypadkach ze wzrostem masowego natężenia przepływu zwiększa się długość zarówno drogi uplastycznienia tworzywa (mniejsza szybkość uplastycznienia), jak i strefy kanału ślimaka całkowicie nim wypełnionej. Ze wzrostem szybkości obrotowej ślimaka zależności są natomiast odwrotne. Spostrzeżenia te stano-



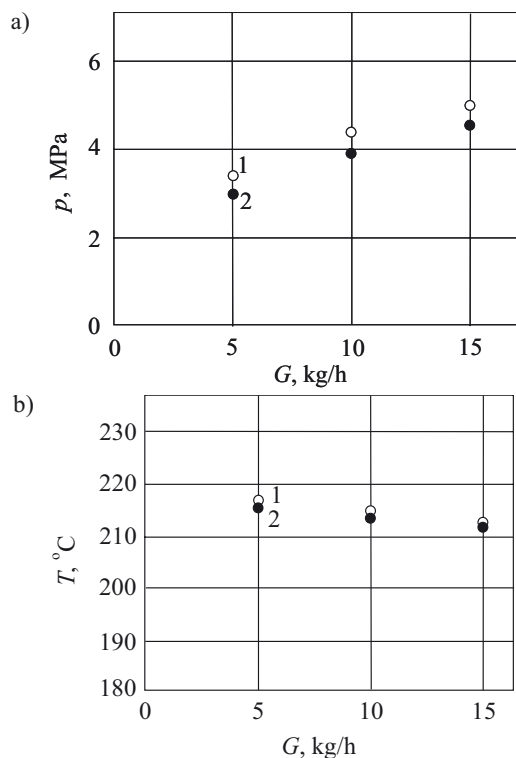
Rys. 10. Porównanie wyników obliczeń symulacyjnych i badań doświadczalnych wytłaczania w warunkach stałej szybkości obrotowej ślimaka  $N = 100$  obr/min i różnych wartości masowego natężenia przepływu tworzywa:  $G = 5$  kg/h — TWIN-M5,  $G = 10$  kg/h — TWIN-M10

Fig. 10. Comparison of predicted and measured fully filled region (■) and melting region (▤) [ $N = 100$  rpm,  $G = 5$  kg/h (TWIN-M5) or 10 kg/h (TWIN-M10)]



Rys. 11. Porównanie wyników obliczeń symulacyjnych i badań doświadczalnych wytłaczania w warunkach stałego masowego natężenia przepływu tworzywa  $G = 10$  kg/h i różnej szybkości obrotowej ślimaka:  $N = 100$  obr/min — TWIN-M10,  $N = 200$  obr/min — TWIN2-M10

Fig. 11. Comparison of predicted and measured fully filled region (■) and melting region (▤) [ $G = 10$  kg/h,  $N = 100$  rpm (TWIN-M10) or 200 rpm (TWIN2-M10)]



Rys. 12. Porównanie wyników obliczeń symulacyjnych (o) i pomiarów (●) ciśnienia (a) oraz temperatury (b) w warunkach  $N = 100$  obr/min i różnych wartości natężenia przepływu tworzywa

Fig. 12. Comparison of predicted (o) and measured (●) pressure (a) and temperature (b) at the inlet to the die for extrusion at the screw speed  $N = 100$  rpm, and various flow rates

wią konsekwencją faktu, że ilość tworzywa w układzie ślimakowym zwiększa się wraz ze wzrostem masowego natężenia przepływu w odniesieniu do stałej szybkości obrotowej lub ze zmniejszeniem szybkości obrotowej w warunkach stałego masowego natężenia przepływu. Obserwowane rozbieżności ilościowe między wynikami obliczeń i doświadczeń mogą być rezultatem m.in. niedokładności danych wejściowych do obliczeń (np. materiałowych) jak również uproszczeń opracowanego modelu, w tym dotyczących newtonowskiego i izotermicz-

nego charakteru przepływu (mimo zastosowania techniki obliczeniowej, która te błędy ogranicza [1]).

Stwierdziliśmy, że ciśnienie i temperatura uplastycznianego tworzywa w zasadzie nie zależą od szybkości obrotowej ślimaka. Ta niezależność  $p$  od  $N$  wynika z równowagi zmian ciśnienia w głowicy i strefie dozowania układu ślimakowego, albowiem na wartość  $p$  w głowicy wpływa jedynie natężenie przepływu, które podczas wytłaczania z dozowanym zasilaniem jest ustalone i nie stanowi funkcji  $N$ .

Rysunek 12 ilustruje wyniki weryfikacji zaproponowanego przez nas modelu z punktu widzenia zgodności wyników obliczeń symulacyjnych i pomiarów dotyczących zależności ciśnienia oraz temperatury od natężenia przepływu tworzywa w warunkach stałej szybkości obrotowej ślimaka. Podstawowe przyczyny zaobserwowanych rozbieżności (zwłaszcza w odniesieniu do ciśnienia) są takie same, jak omawiane już w przypadku uplastyczniania tworzywa i stopnia wypełnienia kanału ślimaka (por. rys. 10 i 11).

#### PODSUMOWANIE

Opracowano kompleksowy model procesu dwuślimakowego wytłaczania przeciwbieżnego opisujący transport tworzywa w stanie stałym, przebieg jego uplastyczniania oraz przepływ tworzywa w stanie uplastycznionym. Dokonano doświadczalnej weryfikacji modelu na podstawie wyników badań wytłaczania polipropylenu.

Weryfikacja ta potwierdziła prawidłowość przyjętych założeń i uzyskanych rozwiązań. Wyniki obliczeń symulacyjnych i badań doświadczalnych były jakościowo zgodne, a rozbieżności ilościowe mogą być rezultatem zarówno niedokładności danych wejściowych do obliczeń, jak i uproszczeń opracowanego modelu.

#### LITERATURA

1. Wilczyński K., White J. L.: *Polimery* 2008, **53**, 754.
2. Wilczyński K., Jiang J. L., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 2007, **22**, 198.

Otrzymano 21 VIII 2007.