

# Zjawiska przepływowe układu grzybek – gniazdo w konstrukcjach mikrohydraulicznych

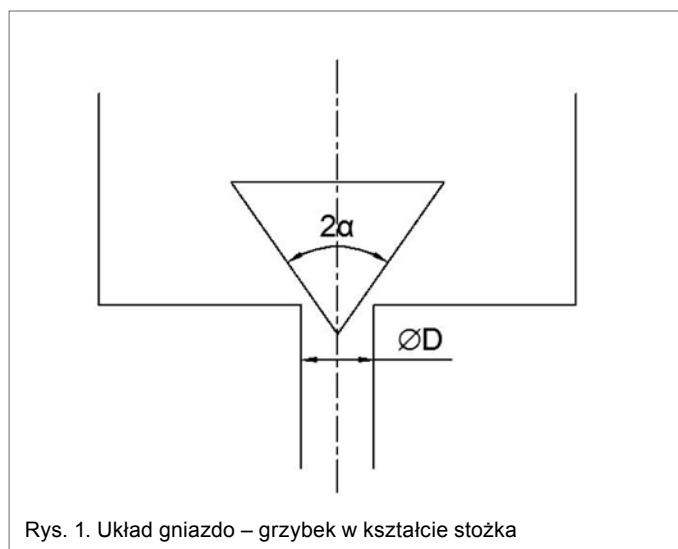
Wacław Kolek, Grzegorz Łomotowski

## 1. Wprowadzenie

Współczesny świat zmierza w kierunku miniaturyzacji. Układy napędowe mają coraz mniejszą masę i wymiary przy zachowaniu takiej samej przenoszanej mocy. Hydraulika siłowa, której istotną zaletą jest właśnie duża gęstość przenoszanej mocy (definiowana jako stosunek mocy do masy elementu, który ją przenosi), doskonale się wpisuje w trend miniaturyzacji napędów. Zminiaturyzowane układy hydrostatyczne mogą z powodzeniem zastępować większe i cięższe układy pneumatyczne bądź elektromechaniczne, przy zachowaniu tej samej przenoszanej mocy oraz przy takich samych możliwościach automatyzacji.

Mikrohydraulika obejmuje takie elementy i układy hydrauliczne, w których obecne są przepływy mniejsze niż 3 l/min [1]. Niewiele firm zajmujących się produkcją elementów i układów mikrohydraulicznych wprowadza swoje produkty do wielu różnych branż. Jako przykład obszarów zastosowań można wymienić: narzędzia ręczne, maszyny technologiczne i montażowe, manipulatory i roboty, lotnictwo i astronautykę, przemysł samochodowy itd. [8, 9, 10, 11]. Warto zwrócić uwagę, że elementy mikrohydrauliczne są powszechnie stosowane w zaworach dwustopniowych. We wstępnym stopniu sterującym, zwanym pilotem, obecne są przeważnie bardzo małe przepływy, a sam element posiada bardzo małe wymiary.

Zawory hydrauliczne bardzo często posiadają odmiany konstrukcyjne, w których występuje gniazdo oraz element domykający w kształcie stożka (rys. 1). Układ grzybek – gniazdo ideal-



Rys. 1. Układ gniazdo – grzybek w kształcie stożka

**Streszczenie:** Artykuł poświęcony jest zjawiskom przepływowym w zminiaturyzowanych zaworach, w których obecna jest para: gniazdo oraz element domykający w kształcie stożka. Zawory o tej odmianie konstrukcyjnej doskonale nadają się do układów mikrohydraulicznych. Ze względu na problemy pomiarowe zdecydowano się na analizę tych elementów z wykorzystaniem metod CFD. Analiza wykazała, że zjawiska przepływowe są podobne przy zachowaniu tych samych liczb Reynoldsa. Różnica między mikrozaworami a zaworami w skali makro polega jedynie na zakresie liczb Reynoldsa, w jakich zawory pracują – w elementach zminiaturyzowanych liczby Reynoldsa są dużo mniejsze.

**Słowa kluczowe:** mikrohydraulika, mikrozawory, podobieństwo przepływów, CFD.

## 🇬🇧 FLOW PHENOMENA IN POPPET MICROVALVES

**Abstract:** This paper deals with the flow phenomena in poppet valves. That kind of valves are used in hydraulic drive systems. Microhydraulics is the new research area and poppet valves according to its properties can be easily applied in it.

Measurement of hydraulic quantities is not easy in microscale so the CFD analysis was applied.

Analysis showed that the flow phenomena are similar when the Reynolds number is the same and that the flow coefficient is unequivocal function of Reynolds number both in micro and macro scale.

The difference between micro and macro scale is in Reynolds number. In classic valves the Reynolds number is much higher than in microvalves. The function which approximate connection between Reynolds number and flow coefficient should be coincident for low Reynolds number in microvalves.

nie nadaje się do mikrozaworów przelewowych lub dławiących ze względu na dużą szczelność w fazie zamknięcia oraz łatwe do wykonania kształty geometryczne. Ponadto przemieszczenia elementu domykającego są bardzo małe, co przy zaworach dławiących umożliwia idealne kojarzenie ich z piezoelektrycznymi elementami sterującymi. Elementy piezoelektryczne cechują się małymi wymiarami, dużą szybkością działania oraz niskim poborem mocy, tak więc idealnie nadają się do automatyzacji sterowań dławieniowych układów mikrohydraulicznych [6, 7].

Zagadnienia związane ze zjawiskami przepływowymi oraz z siłami działającymi na element domykający dla układu z ry-

sunku 1 były bardzo szeroko badane. Jednak prawie wszystkie tego typu badania poświęcone były elementom o wymiarach typowych dla klasycznej hydrauliki, gdzie były obecne również typowe dla klasycznej hydrauliki przepływy.

Niniejszy artykuł będzie poświęcony zjawiskom przepływowym obecnym w układzie grzybek – gniazdo z rysunku 1, jednak dla dużo mniejszych wymiarów niż te obecne w klasycznej hydraulice.

W przypadku elementu klasycznego sprawy związane z pomiarami nie sprawiają większych trudności. Nieco inaczej sprawa wygląda z elementami zminiaturyzowanymi. Ze względu na trudności pomiarowe zdecydowano się skorzystać z metod CFD, które obecnie są bardzo często wykorzystywane i dają bardzo dobrą zgodność wyników eksperymentalnych z symulacyjnymi.

## 2. Para grzybek – gniazdo w mikrozaworze

Najistotniejszą zależnością opisująca układ grzybek – gniazdo jest zależność łącząca trzy wielkości: spadek ciśnienia, natężenie przepływu oraz przemieszczenie elementu domykającego. Najczęściej stosowaną zależność tego typu przedstawia wzór (1).

$$Q = C_d A(z) \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (1)$$

We wzorze (1)  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] to natężenie przepływu,  $A(z)$  [ $\text{m}^2$ ] – pole najmniejszego przekroju, przez który płynie ciecz (jest ono ściśle zależne od przemieszczenia grzybka  $z$ ),  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] to gęstość cieczy,  $\Delta p$  [Pa] jest różnicą ciśnień po obu stronach grzybka, natomiast  $C_d$  jest współczynnikiem przepływu. Współczynnik  $C_d$  jest funkcją liczby Reynoldsa. Liczbę tę można zdefiniować wzorem (2) [2]:

$$\text{Re} = \frac{v d_h}{\nu} = \frac{2Q}{\pi(D - z \sin \alpha \cos \alpha) \nu} \quad (2)$$

We wzorze tym:  $\nu$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] jest lepkością kinematyczną cieczy,  $d_h$  [m] jest średnicą hydrauliczną najmniejszego przekroju przepływowego,  $v$  [m/s] jest prędkością cieczy w tym przekroju,  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] jest natężeniem przepływu,  $z$  [m] jest przemieszczeniem elementu domykającego,  $D$  oraz  $\alpha$  wymiarami jak na rysunku 1.

Współczynnik  $C_d$  dla wyższych liczb Reynoldsa, przekraczających liczbę krytyczną, jest wartością stałą. Założenie stałej wartości współczynnika przepływu jest przeważnie prawdziwe dla elementów klasycznej hydrauliki, gdzie w oporach miejscowych są przepływy burzliwe. Problem jednak może wystąpić na przykład przy badaniu dynamiki zaworów przelewowych [4]. Nieuwzględnienie zmienności współczynnika przepływu dla niższych liczb Reynoldsa powoduje pewne rozbieżności między przebiegiem modelowym a doświadczalnym.

Badania zmienności współczynnika  $C_d$  przy niskich liczbach Reynoldsa były prowadzone, jednak tak wyznaczonych zależności nie aplikowano raczej do modeli dynamicznych zaworów, ze względu na znaczne jego skomplikowanie i trudności w rozwiązaniu. Przykład takich badań zawarty jest w pracy [2]. Zmienność współczynnika przepływu odzwierciedlona została funkcją wykładniczą (3).

$$C_d(\text{Re}) = C_{dconst} (1 - \exp(-a\sqrt{\text{Re}})) \quad (3)$$

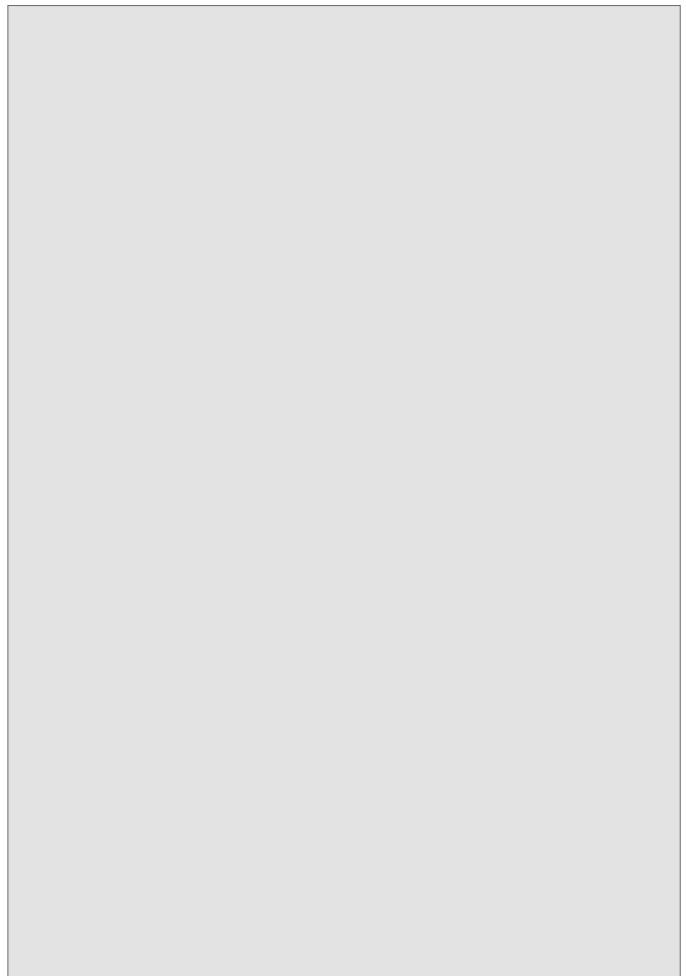
We wzorze tym  $C_{dconst}$  jest stałym współczynnikiem przepływu, który występuje przy liczbach Reynoldsa dużo większych od krytycznej. Zarówno współczynnik  $C_{dconst}$ , jak i parametr  $a$  są zależne od geometrii.

Zależność (3) opisuje zarówno zmienność współczynnika przepływu przy niskich liczbach Reynoldsa, jak i jego stałą wartość dla dużych liczb Reynoldsa.

Warto zaznaczyć, że dla układu z rysunku 1 liczba Reynoldsa przy zachowaniu stałej lepkości cieczy jest silnie zależna od natężenia przepływu, natomiast w bardzo małym stopniu zależna od przemieszczenia grzybka. O ile w klasycznej hydraulice zjawiska przepływowe dla pary grzybek – gniazdo są opisywane zależnością (1) z zachowaniem stałego współczynnika przepływu, to takie podejście w układach zminiaturyzowanych budzi poważne wątpliwości. Przy małych natężeniach przepływu znacznie maleją liczby Reynoldsa, w związku z tym występuje tutaj przeważnie przepływ przejściowy bądź nawet laminarny.

Zdziwienie może budzić fakt, że w modelach dynamicznych dwustopniowych zaworów dławiących bądź przelewowych [3, 5] równania opisujące przepływy przez piloty zawierają stały współczynnik przepływu. O ile dla czynnika roboczego, jakim jest woda, podejście to może być poprawne, to w przypadku oleju hydraulicznego duża lepkość wpływa na znaczne obniżenie liczb Reynoldsa. Jak pokazują jednak dane porów-

reklama



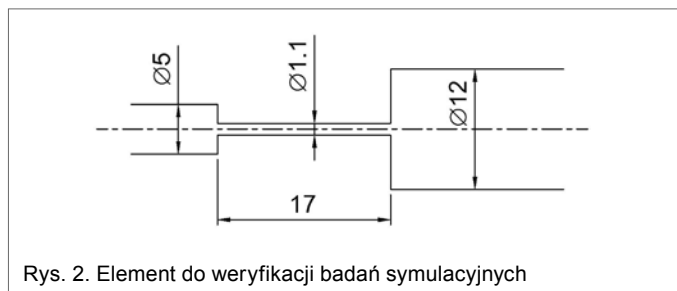
nawcze wyników modelowych z doświadczalnymi, uproszczenie to nie wpływa znacznie na wartości błędów. Piloty jednak są jedynie elementami pomocniczymi. Inaczej sprawa wygląda, jeżeli zminiaturyzowana para grzybek – gniazdo jest obecna w jednostopniowym zaworze dławiącym lub przelewowym, sterującym całym układem mikrohydraulicznym. Zawory takie pełnią dużo ważniejszą funkcję.

### 3. Badania symulacyjne metodami CFD

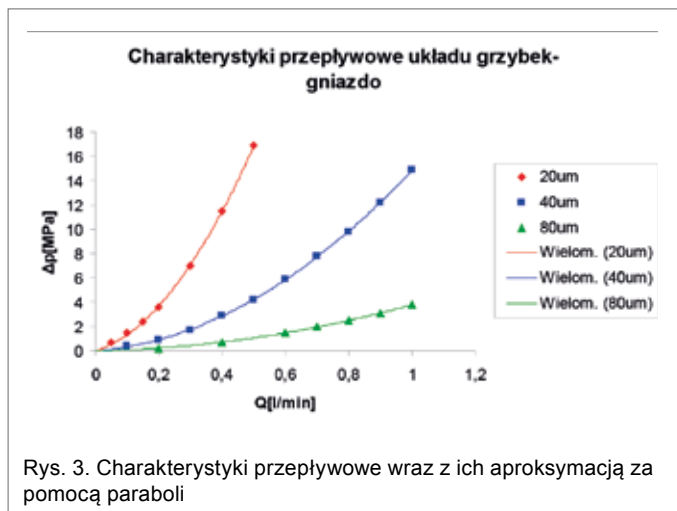
Przedmiotem badań symulacyjnych była para grzybek – gniazdo przeznaczona do zaworów przelewowych pracujących przy natężeniach przepływu od 0 do 1 l/min, w zakresie ciśnień od 0 do 16 MPa. Grzybek miał kąt wierzchołkowy  $2\alpha = 60^\circ$  oraz średnicę gniazda  $D = 2$  mm. Gniazdo miało ostrą krawędź (nie było sfazowane). Gęstość czynnika roboczego przyjęto jako  $880 \text{ kg/m}^3$ , natomiast lepkość kinematyczną przyjęto jako 30 cSt (własności te odpowiadały własnościom oleju Azolla ZS w temperaturze  $30^\circ\text{C}$ ).

W takim zminiaturyzowanym układzie grzybek – gniazdo przyjęcie stałego współczynnika przepływu jest zupełnie niedopuszczalne. Biorąc po uwagę wyniki doświadczalne zawarte w pracy [2], współczynnik przepływu przyjmuje wartość stałą dopiero dla liczb Reynoldsa większych od 300. Tymczasem maksymalna liczba Reynoldsa obliczona dla natężenia przepływu 1 l/min wynosi 181. Dlatego też badany układ grzybek – gniazdo będzie pracował przy przepływie laminarnym oraz przejściowym, gdzie współczynnik przepływu będzie zmieniał się w całym zakresie przewidywanych liczb Reynoldsa.

Przed przystąpieniem do badań symulacyjnych przepływu przez układ grzybek – gniazdo zweryfikowana została poprawność sposobu prowadzenia badań symulacyjnych. Wybrany został element przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Element do weryfikacji badań symulacyjnych



Rys. 3. Charakterystyki przepływowe wraz z ich aproksymacją za pomocą parabol



Rys. 4. Przykładowy rozkład prędkości cieczy dla przemieszczenia  $z = 20 \mu\text{m}$  oraz natężenia przepływu 0,4 l/min

Lepkość kinematyczna oleju wynosiła 32 cSt, a jego gęstość  $870 \text{ kg/m}^3$ . Element ustawiono tuż za pompą stałej wydajności z regulacją obrotów i podano natężenie przepływu równe 1,66 l/min oraz 2,44 l/min. W pierwszym przypadku uzyskano spadek ciśnienia 1 MPa, natomiast w drugim przypadku uzyskano spadek ciśnienia 2 MPa. Powyższe przypadki zamodelowano metodą CFD. W pierwszym przypadku wynik symulacji dał spadek ciśnienia równy 1,14 MPa, natomiast w drugim 2,13 MPa.

W badaniach symulacyjnych przyjęto następujące założenia upraszczające: płynąca ciecz jest nieściśliwa, gęstość oraz lepkość czynnika są stałe, ściany otaczające ciecz są idealnie gładkie.

Po wykonaniu weryfikacji poprawności rezultatów sumacyjnych wykonane zostały badania układu grzybek – gniazdo. Badania symulacyjne zostały wykonane dla natężenia przepływu w zakresie od 0,05 do 1 l/min, przemieszczeń grzybka: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 i  $80 \mu\text{m}$  oraz ciśnienia nad grzybkim równego atmosferycznemu i ciśnienia przed grzybkim nieprzekraczającego 17 MPa.

Rysunek 3 przedstawia charakterystyki przepływowe dla przemieszczeń grzybka: 20, 40 oraz  $80 \mu\text{m}$ . Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy rozkład prędkości cieczy.

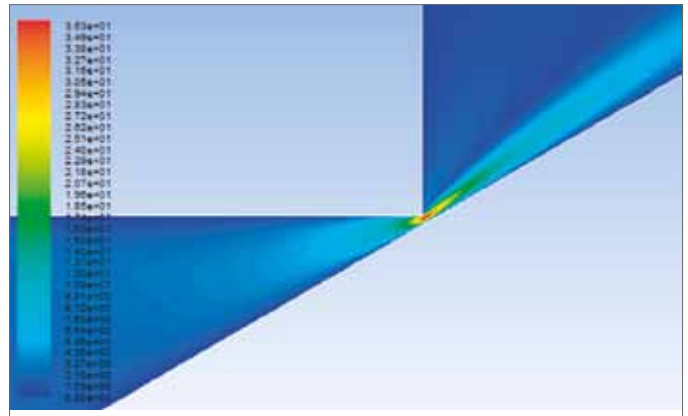
Badania symulacyjne wykazały, że przy zachowaniu tej samej liczby Reynoldsa, definiowanej zgodnie ze wzorem (2), rozkład prędkości jest identyczny. Zmienia się tylko skala prędkości. Dzieje się tak dlatego, że badane układy grzybek – gniazdo przy zachowaniu stałej liczby Reynoldsa cechują się w pewnym stopniu nie tylko podobieństwem geometrycznym, ale także podobieństwem zjawisk fizycznych. Jako przykład na rysunkach 5 oraz 6 przedstawione zostały rozkłady prędkości uzyskane na drodze badań symulacyjnych dla tych samych liczb Reynoldsa. Mimo że przemieszczenia grzybka i spadki ciśnień były różne, to rozkłady prędkości były tutaj niemal identyczne.

Rysunki 7 oraz 8 przedstawiają rozkłady prędkości dla innych liczb Reynoldsa. Rysunek 7 przedstawia przepływ przejściowy przy wyższych liczbach Reynoldsa, natomiast rysunek 8 przedstawia przepływ laminarny.

Podczas badań symulacyjnych zauważono, że związek pomiędzy natężeniem przepływu  $Q$  a różnicą ciśnień  $\Delta p$  oraz najmniejszą powierzchnią, przez którą płynie ciecz  $A$ , można opisać za pomocą wyrażenia (1), w którym współczynnik prze-



Rys. 5. Rozkład prędkości dla przemieszczenia  $z = 20 \mu\text{m}$  oraz natężenia przepływu  $0,4 \text{ l/min}$  w powiększeniu (liczba Reynoldsa 72,1; spadek ciśnienia  $11,5 \text{ MPa}$ )



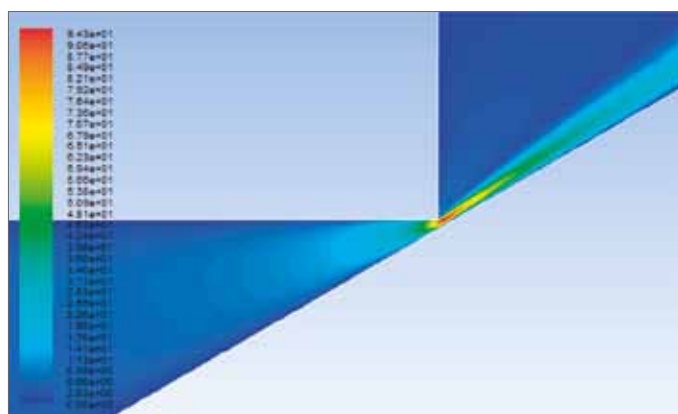
Rys. 6. Rozkład prędkości dla przemieszczenia  $z = 80 \mu\text{m}$  oraz natężenia przepływu  $0,4 \text{ l/min}$  w powiększeniu (liczba Reynoldsa 73,1; spadek ciśnienia  $0,73 \text{ MPa}$ )

prędkości  $C_d$  jest jednoznacznie funkcją liczby Reynoldsa. Dla różnych przemieszczeń grzybka funkcja ta jest taka sama. Funkcja ta jednak nieznacznie różni się od tej uzyskanej na podstawie badań w pracy [2]. Może to być spowodowane tym, że w warunkach rzeczywistych dochodzą dodatkowe czynniki nieuwzględnione w modelowaniu.

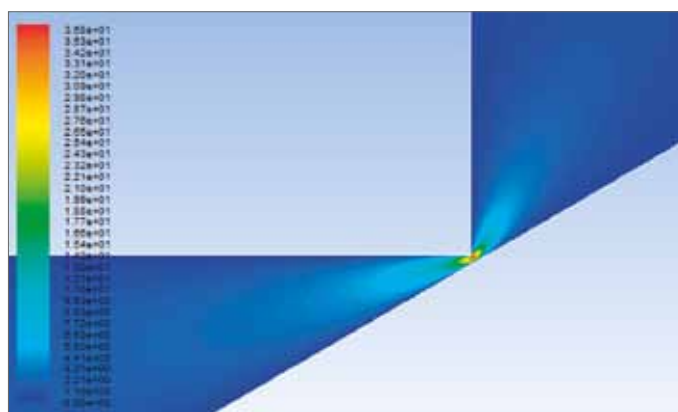
Warto dodać, że badania symulacyjne wykazały również, że dla układu grzybek – gniazdo powiększonego 5 razy (średnica gniazda  $10 \text{ mm}$  oraz przemieszczenie  $250 \mu\text{m}$ ) współczyn-

nik  $C_d$  jest taką samą funkcją liczby Reynoldsa, jak dla układu zmminiaturyzowanego. Różnica jednak polega na zakresie liczb Reynoldsa, w jakich układ pracuje. W przypadku układu zmminiaturyzowanego maksymalne liczby Reynoldsa są związane z maksymalnym przepływem, jaki może podać mikropompa wyporowa (dla  $1 \text{ l/min}$  maksymalna liczba Reynoldsa to 181).

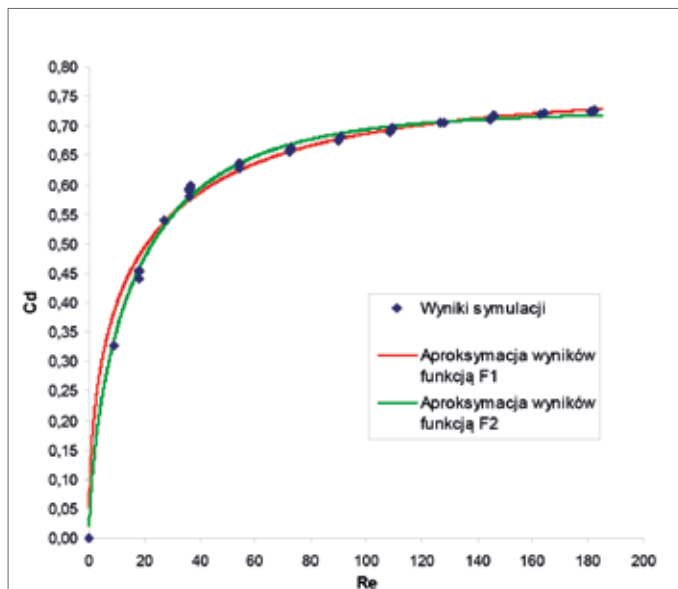
Zależność między współczynnikiem przepływu a liczbą Reynoldsa uzyskaną na drodze symulacji zaproksymowano funkcją (3). Parametry tej funkcji wyniosły  $C_{dconst} = 0,76$  oraz



Rys. 7. Rozkład prędkości dla przemieszczenia  $z = 60 \mu\text{m}$  oraz natężenia przepływu  $0,8 \text{ l/min}$  w powiększeniu (liczba Reynoldsa 145,5)



Rys. 8. Rozkład prędkości dla przemieszczenia  $z = 20 \mu\text{m}$  oraz natężenia przepływu  $0,1 \text{ l/min}$  w powiększeniu (liczba Reynoldsa 18)



Rys. 9. Zależność między współczynnikiem przepływu a liczbą Reynoldsa aproksymowana dwiema różnymi funkcjami

$a = 0,2341$ . Parametr  $C_{dconst}$  został określony na podstawie symulacji dla liczby Reynoldsa równej 400, przy której parametr  $C_d$  utrzymuje już stałą wartość.

Na rysunku 9 przedstawiono kolorem czarnym wyniki badań symulacyjnych, natomiast kolorem czerwonym ich aproksymację funkcją (3), oznaczoną na wykresie jako F1.

Funkcja (3) daje dobre oszacowanie wyników dla większych liczb Reynoldsa, natomiast dla bardzo małych liczb Reynoldsa błędy oszacowania są znaczne (dla liczby Reynoldsa 9 błąd wynosi 20%).

W klasycznej hydraulice funkcja (3) to dobre oszacowanie zależności łączącej współczynnik przepływu z liczbą Reynoldsa, dlatego że rozbieżności, jakie mają miejsce przy bardzo małych liczbach Reynoldsa – przepływie laminarnym – mają znikome znaczenie. Ważne jest natomiast, aby funkcja dobrze odwzorowywała rzeczywistość dla większych liczb Reynoldsa, gdzie występuje przepływ przejściowy lub burzliwy, przy którym współczynnik przepływu jest stały. W mikrohydraulice sprawa wygląda zupełnie inaczej. Tutaj bardzo ważne jest dokładne oszacowanie dla mniejszych liczb Reynoldsa. Dokładność oszacowania dla przepływu burzliwego jest bez znaczenia, jeżeli przy maksymalnej przewidywanej liczbie Reynoldsa taki przepływ nie występuje. Dlatego też badaną funkcję  $C_d(Re)$  należy oszacować najdokładniej, jak jest to możliwe, ale można brać pod uwagę tylko zakres liczb Reynoldsa, w jakim będzie pracował układ.

Zaproponowano więc inną postać funkcji oznaczonej wzorem (4), która powstała w wyniku pewnej modyfikacji funkcji (3).

$$c_d = a(1 - \exp(-b Re^c)) \quad (4)$$

Parametry dla powyższej funkcji, które dawały najlepsze oszacowanie, są następujące:  $a = 0,7231119$ ;  $b = 0,139472$ ;  $c = 0,681067$ .

Aproksymacja danych uzyskanych podczas symulacji funkcją (4) jest przedstawiona na rysunku 9 kolorem zielonym i oznaczona jako F2. Widać wyraźnie, że funkcja bardzo dobrze pokrywa się z wynikami symulacji dla całego zakresu liczb Reynoldsa, przy jakich będzie pracował układ grzybek – gniazdo.

Warto zwrócić uwagę, że współczynnik  $a$  w funkcji (4) nie jest równy współczynnikowi  $C_{dconst}$  w funkcji (3). Będzie to powodować błędy w zakresie wyższych liczb Reynoldsa, które jednak nie mają większego znaczenia, gdyż takie liczby Reynoldsa nie są przewidywane podczas pracy układu.

#### 4. Podsumowanie

Artykuł poświęcony został zjawiskom przepływowym w układzie grzybek – gniazdo, który jest często wykorzystywany w zaworach hydraulicznych. Ze względu na swoje właściwości idealnie nadaje się on również do zastosowań w mikrozaworach. Pomiarów wielkości fizycznych w elementach zminiaturyzowanych są bardzo utrudnione, dlatego zdecydowano się, po uprzedniej weryfikacji, na przeprowadzenie badań symulacyjnych metodami CFD.

Na podstawie badań stwierdzono, że zjawiska przepływowe w zminiaturyzowanym układzie grzybek – gniazdo są podobne przy zachowaniu tej samej liczby Reynoldsa.

Badania wykazały, że współczynnik przepływu jest jednoznacznie funkcją liczby Reynoldsa. Funkcja ta ma taką samą postać zarówno dla elementów klasycznych, jak i zminiatury-

zowanych. Różnica między zaworami klasycznymi a mikro-zaworami polega jednak na tym, w jakim zakresie tej funkcji zawory pracują. Zawory klasyczne pracują przy wyższych liczbach Reynoldsa, natomiast zminiaturyzowane przy dużo niższych liczbach Reynoldsa. W związku z tym aproksymowanie funkcji określającej współczynnik przepływu powinno być realizowane dla zakresu liczb Reynoldsa, przy jakim zawory pracują.

W artykule zostało wykazane, że funkcja, która dobrze odzwierciedla współczynnik przepływu dla dużych liczb Reynoldsa, wcale nie musi być poprawna dla małych liczb Reynoldsa. Zaproponowano funkcję opisującą zależność współczynnika przepływu od liczby Reynoldsa poprawnych dla mniejszych wartości tych liczb, jakie występują w mikro-zaworach.

Wnioski z badań symulacyjnych wymagają weryfikacji doświadczalnej. W rzeczywistym układzie mogą wystąpić zjawiska pominięte w założeniach upraszczających.

## Literatura

- [1] DINDORF R., WOŁKOW J.: *Mikrohydraulika*. „Hydraulika i Pneumatyka”, 6/1999.
- [2] KOLLEK W., KUDZMA Z.: *Wpływ geometrii grzybka i gniazda zaworów wzniosowych na współczynnik przepływu*. „Sterowanie i Napęd Hydrauliczny”, 6/1983.
- [3] OPDENBOSCH P., SADEGH N., BOOK W., MURRAY T., YANG R.: *Modelling an Electro-hydraulic Poppet Valve*. „International Journal of Fluid Power”, 10/2009, No. 1
- [4] TOMASIAK E.: *Wybrane zagadnienia dynamiki zaworów*. „Sterowanie i Napęd Hydrauliczny”, 6/1983.
- [5] TOMCZYK J.: *Modele dynamiczne elementów i układów napędów hydrostatycznych*. Warszawa 1999.
- [6] WONG A.P., BULLOUGH W.A., CHIN S.B., CHUA Y. S.: *Performance of the piezo-poppet valve. Part 1. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. „Journal of Systems and Control Engineering”, Jan 1, 2006, Vol. 220, Issue 6.
- [7] Wong A.P., Bullough W.A., Chin S.B.: *Performance of the piezo-poppet valve. Part 2 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: „Journal of Systems and Control Engineering”*, Jan 1, 2006, Vol. 220, Issue 6.
- [8] <http://www.hoerbiger.com/Micro-Fluid.937.0.html?&L=1>
- [9] [http://www.hydroeduc.com/site/en\\_index.php](http://www.hydroeduc.com/site/en_index.php)
- [10] <http://www.latchtool.com>
- [11] <http://www.theleeco.com>

Wacław Kollek, Grzegorz Łomotowski – Zakład Napędów i Automatyki Hydraulicznej, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska

artykuł recenzowany

reklama