

BADANIA TEORETYCZNO-EKSPERYMENTALNE PRZEPŁYWU PŁYNU NIEŚCISLIWEGO PRZEZ KRYŻĘ SZCZELINOWĄ

Barbara Tomaszewska

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej

Streszczenie. W praktyce pomiarowej coraz częściej stosuje się prototypowe rozwiązania konstrukcyjne przepływomierzy zwężkowych. Na uwagę zasługują kryzy szczelinowe, gdzie jeden centralny otwór zastąpiony jest szczelinami. W pracy przedstawiono wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych prototypowego rozwiązania konstrukcyjnego kryzy szczelinowej. Ruch płynu opisano równaniami Reynoldsa, domkniętymi k-ε modelem turbulencji. Obliczenia przeprowadzono przy użyciu pakietu ANSYS Fluent. Rozpatrywano przepływ płynu przez kryżę standardową i szczelinową o przewężeniu $\beta = 0,5$. Wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów. Stwierdzono dobrą jakościową i ilościową zgodność wyników badań dla współczynnika przepływu C. Wykazano, że kryża szczelinowa generuje znacznie mniejszą trwałą stratę ciśnienia niż kryża standardowa przy porównywalnej niepewności pomiaru.

Słowa kluczowe: kryża standardowa, kryża szczelinowa, CFD, rozkład ciśnienia, współczynnik przepływu

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF INCOMPRESSIBLE FLUID FLOW THROUGH A SLOTTED ORIFICE

Abstract. Prototype designs of orifice flowmeters are commonly used in measurements. One area which has attracted considerable interest includes slotted orifices, where a single central opening is replaced by the use of several slots. This paper reports the results of numerical and experimental research of a prototype design of a slotted orifice plate. The movement of the fluid was described with use of Reynolds equations closed by the k-ε turbulence model. The calculations were performed using ANSYS Fluent software package by consideration of the fluid flow through an orifice plate and slotted orifice with the equal β ratio = 0.5. The results of calculations are compared with the measurements. Good qualitative and quantitative conformity was obtained during the study for the C flow coefficient. It was indicated that the slotted orifice generates a considerable lower pressure drop in comparison to an orifice plate while maintaining comparable level of measurement uncertainty.

Keywords: standard orifice, slotted orifice, CFD, pressure distribution, flow coefficient

Wstęp

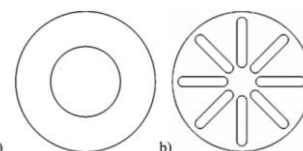
Z uwagi na wysoką dokładność pomiarów, prostotę budowy oraz niski koszt produkcji, zwężki są najczęściej stosowaną grupą przepływomierzy w przemyśle. Prowadzone przez lata badania pozwoliły na wyznaczenie charakterystyk zwężek przy przepływie płynu jednorodnego [9, 12, 13]. Zasady pomiaru przepływomierzami zwężkowymi są bardzo dobrze udokumentowane w normach. W Polsce obowiązuje norma PN-EN ISO 5167-1 [11], która zawiera informacje niezbędne podczas projektowania, prowadzenia pomiarów oraz obliczania strumienia masy bądź objętości płynów jednorodnych.

W literaturze znaleźć można również alternatywne rozwiązania konstrukcyjne zwężek, do których zaliczyć można kryzy szczelinowe, fraktalne i perforowane [1, 4, 5, 7–10]. Przeznaczone są one do pomiarów przy zdeformowanym polu prędkości lub pomiaru mieszanin dwufazowych, np. pary mokrej [4, 8, 10]. Przy projektowaniu kryz szczelinowych napotyka się na istotne problemy związane z określeniem kształtu i liczby otworów w kryzy w celu zapewnienia wymaganej dokładności pomiarów i zmniejszenia trwałej straty ciśnienia w odniesieniu do pomiarów kryzą standardową.

Celem pracy jest porównanie wyników otrzymanych na podstawie badań numerycznych oraz eksperymentalnych podczas przepływu płynu przez kryżę standardową oraz prototypową kryżę szczelinową.

1. Zakres i metodyka badań

Badania numeryczne i eksperymentalne dotyczyły przepływu płynu przez kryżę. Schematy badanych kryz przedstawiono na rys. 1, gdzie: a) kryża standardowa b), kryża szczelinowa. Kryża standardowa posiada otwór koncentryczny, natomiast kryża szczelinowa posiada osiem szczelin które są rozmieszczone promieniowo w taki sposób, że wewnętrzne brzegi otworów znajdują się blisko krawędzi ściany. Szczeliny są rozmieszczone równomiernie w całym przekroju rurociągu. Obie kryzy charakteryzują się jednakowym przewężeniem, które jest równe $\beta = 0,5$. Kryża umieszczona jest w prostym odcinku rurociągu o średnicy 0,078 m i długości 3 metrów.



Rys. 1. Schemat badanych kryz: a) standardowa, b) szczelinowa

1.1. Model matematyczny

Ruch płynu lepkiego, nieściśliwego, opisano równaniem ruchu (1) i równaniem ciągłości strugi (2)

$$\rho \nabla \cdot \nabla U = -\nabla p + \nabla \mu_{ef} \cdot (\nabla U + \nabla U^T) + \frac{2}{3} \rho \nabla k \quad (1)$$

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (2)$$

gdzie: U – wektor prędkości, ρ – gęstość płynu, k – energia kinetyczna turbulencji, ε – prędkość dyssypacji energii turbulencji, μ_{ef} – współczynnik lepkości efektywnej, μ_t – tzw. lepkość turbulenta

Układ równań (1) i (2) domknięto równaniami modelu turbulencji. W obliczeniach numerycznych wykorzystano model turbulencji k-ε. W pracy [3] wykazano, że model ten zapewnia poprawne wyniki obliczeń w odniesieniu do danych eksperymentalnych. Wartości k i ε obliczono na podstawie układu równań:

$$\rho \nabla \cdot \varepsilon U = \nabla \frac{\mu_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon + \frac{\varepsilon}{k} (c_1 \mu_{ef} G - c_2 \rho \varepsilon) \quad (3)$$

$$\rho \nabla \cdot k U = \nabla \frac{\mu_{ef}}{\sigma_k} \nabla k + \mu_{ef} G - \rho \varepsilon \quad (4)$$

gdzie: c_1 , c_2 – stałe empiryczne, σ_k i σ_ε – turbulentna liczba Prandtl / Schmidt dla k i ε, G – generacja energii kinetycznej turbulencji [2, 3, 6].

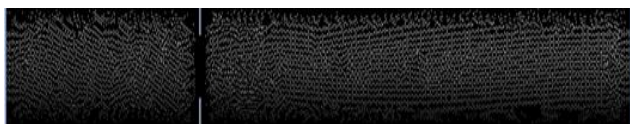
Lepkość efektywną μ_{ef} obliczono ze wzoru:

$$\mu_{ef} = \mu + c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

W obliczeniach przyjęto następujące wartości stałych empirycznych: $\sigma_k = 1,00$, $\sigma_\varepsilon = 1,30$, $c_1 = 1,44$, $c_2 = 1,92$, $c_\mu = 0,09$

1.2. Zarys metodyki obliczeń

Proces numerycznego modelowania przepływu składał się z dwóch etapów. Pierwszy polegał na przygotowaniu modelu geometrii układu i wygenerowaniu siatki obliczeniowej. Drugim etapem było obliczanie pola przepływu, po wcześniejszym określeniu warunków brzegowych. Przed przystąpieniem do obliczeń numerycznych, przeprowadzono badania zależności wpływu liczby i rozmieszczenia węzłów siatki na wyniki obliczeń. Badania wpływu siatki na wyniki obliczeń prowadzono przy stopniowym zwiększeniu liczby węzłów. Stwierdzono, że przy liczbie węzłów większej niż 350000 nie obserwuje się istotnego wpływu ich liczby na wyniki obliczeń. Geometrię modelu stworzono przy użyciu programu SolidWorks, natomiast siatkę obliczeniową (rys. 2) utworzono z wykorzystaniem modułu ANSYS Meshing.



Rys. 2. Geometria modelu oraz siatka obliczeniowa

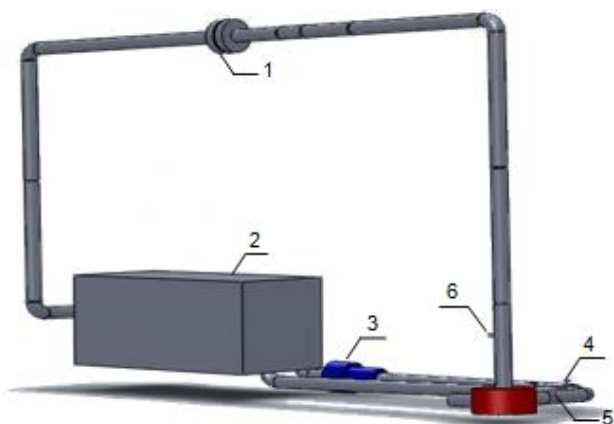
Obliczenia symulacyjne prowadzono dla przepływu trójwymiarowego przez kryzę standardową i szczelinową przy założeniu identycznych warunków brzegowych w każdym przypadku. W obliczeniach przyjęto płyn nieściśliwy o gęstości $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$ oraz lepkości $\eta = 0,001003 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Wszystkie obliczenia symulacyjne dotyczące zależności ciśnienia różnicowego od strumienia masy płynu oraz zależności współczynnika przepływu od liczby Reynoldsa prowadzono dla takich samych warunków brzegowych.

Badania numeryczne dotyczące rozkładu ciśnienia wzdłuż rurociągu oraz pola prędkości płynu prowadzono dla średniej prędkości na wlocie równej $1,316 \text{ m/s}$.

1.3. Metodyka badań eksperymentalnych

Na rysunku 3 przedstawiono schemat stanowiska eksperymentalnego do pomiaru strumienia masy. Głównym elementem stanowiska jest przepływomierz zwężkowy.



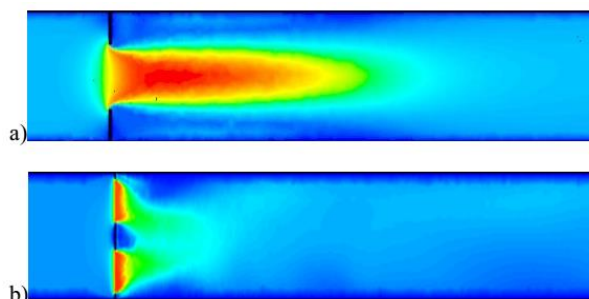
Rys. 3. Schemat stanowiska do pomiaru przepływu cieczy: 1) kryza pomiarowa, 2) zbiornik, 3) pompa, 4) zawór regulujący przepływ, 5) przepływomierz elektromagnetyczny, 6) czujnik temperatury

Strumień badanej cieczy mierzono przy użyciu przepływomierza elektromagnetycznego. Wartości strumienia masy mieściły się w zakresie $2,16\text{--}6,66 \text{ kg/s}$ co odpowiadało liczbie Reynoldsa z zakresu $34294\text{--}105608$. Strumień przepływającej cieczy regulowano zaworem. Dodatkowo pomiarowi podlegała temperatura oraz wytworzona na kryzie różnica ciśnień. W celu zmierzenia różnicy ciśnień na kryzie zastosowano przytarczowy odbiór ciśnienia. Pomiary przeprowadzono dla 50 różnych wartości strumienia masy co pozwoliło na otrzymanie charakterystyk pomiarowych dla obu badanych kryz. Sygnały pomiarowe przetwarzane były przez karty do akwizycji danych i opracowywane przez program LabVIEW.

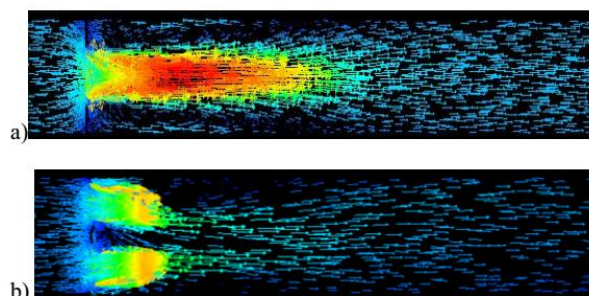
2. Wyniki badań

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych dotyczące przepływu płynu nieściśliwego przez badane kryzy przy liczbie Reynoldsa $Re = 105916$.

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład prędkości cieczy w formie modułów prędkości w obszarze przepływu dla kryzy standardowej (4a) i kryzy szczelinowej (4b). Na rysunku 5 pokazano wyniki badań symulacyjnych dotyczące rozkładu wektorów prędkości w obszarze przepływu.



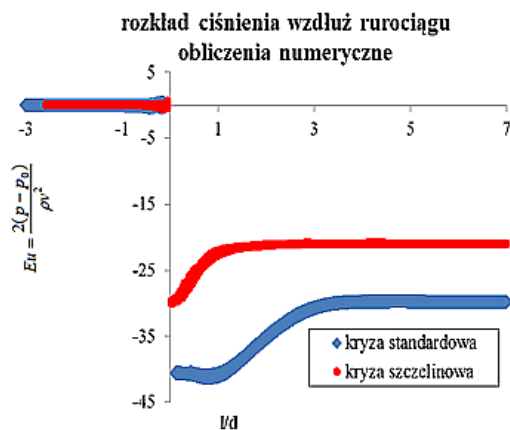
Rys. 4. Moduły prędkości: a) kryza standardowa, b) kryza szczelinowa



Rys. 5. Wektory prędkości: a) kryza standardowa, b) kryza szczelinowa

Strumień przepływającej cieczy w przypadku obu kryz ulega dużej deformacji, formując się, po przejściu przez przeszkodę, w swobodnie płynącą strugę. W przypadku kryzy szczelinowej, struga ulega rozdzieleniu na kilka mniejszych strug, tworząc przy tym bardziej rozproszony strumień. W przypadku kryzy standardowej struga ulega dużemu przewężeniu, generując następnie toroidalny obszar recyrkulacji. Jego obecność jest główną przyczyną strat energii oraz długiego odcinaka stabilizacji przepływu.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki badań numerycznych dotyczące rozkładu ciśnienia statycznego wzdłuż ścianki rurociągu.



Rys. 6. Rozkład ciśnienia wzdłuż rurociągu

Z rysunku wynika, że spadek ciśnienia na kryzie zależy od jej konstrukcji. W przypadku kryzy standardowej wartość ΔP jest znacznie większa niż dla kryzy szczelinowej. Odzysk ciśnienia jest jednak znacznie wolniejszy, a długość odcinka stabilizacji strugi większa niż dla kryzy szczelinowej. Główną przyczyną trwałej straty ciśnienia są straty związane z ekspansją strugi oraz obecnością obszaru recyrkulacji. W przypadku kryzy szczelinowej struga główna rozdziela się na kilka mniejszych strug co sprawia, że sumaryczny efekt związany z ich przepływem przez szczeliny powoduje niższą niż w przypadku kryzy standardowej trwałą stratę ciśnienia.

Na rys. 7 przedstawiono wyniki badań dotyczące zależności współczynnika przepływu C od liczby Reynoldsa odpowiednio dla kryzy standardowej (a) oraz kryzy szczelinowej (b).

Strumień przepływającej cieczy obliczono ze wzoru:

$$Q = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} A_0 \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (6)$$

gdzie: C – współczynnik przepływu [-], β – przewężenie kryzy [-], A_0 – pole otworu kryzy, w przypadku kryzy szczelinowej jest to suma powierzchni szczelin [m^2], Δp – różnica ciśnienia wytworzona na kryzie [Pa], ρ – gęstość przepływającego płynu [kg/m^3].

Przewężenie kryzy dla kryzy szczelinowej wyznaczano ze wzoru:

$$\beta = \sqrt{\frac{A_{ot}}{A}} \quad (7)$$

gdzie: A_{ot} jest polem powierzchni wszystkich otworów, A jest polem poprzecznym przekroju rurociągu

Współczynnik przepływu C określony został na podstawie równania Readera – Harrisa/Gallaghery [11]

$$C = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0,7} + \quad (8)$$

$$(0,0188 + 0,0063A)\beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3} + (0,043 + 0,080e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1})$$

$$(1 - 0,11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0,031(M_2' - 0,8M_2^{1,1})\beta^{1,3} + 0,011(0,75 - \beta) \left(2,8 - \frac{D}{25,4} \right)$$

gdzie:

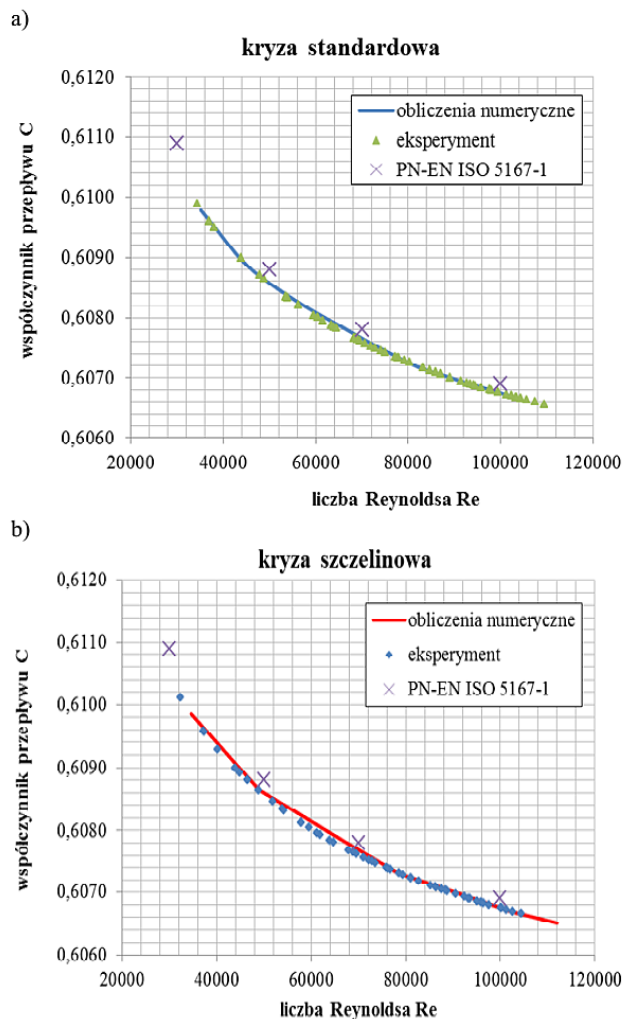
$$A = \left(\frac{19000\beta}{Re_D} \right)^{0,8} \quad (9)$$

oraz

$$M_2' = \left(\frac{2L_2'}{1 - \beta} \right) \quad (10)$$

We wzorze (8) przyjęto: Re_D – liczba Reynoldsa odniesiona do średnicy rurociągu. $L_1 = L_2' = 0$ dla stosowanego przytarczowego odbioru ciśnienia różnicowego.

W celu podniesienia czytelności rysunku, wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono w formie łamanej linii ciągłej, łączącej punkty dla poszczególnych wartości liczby Reynoldsa.

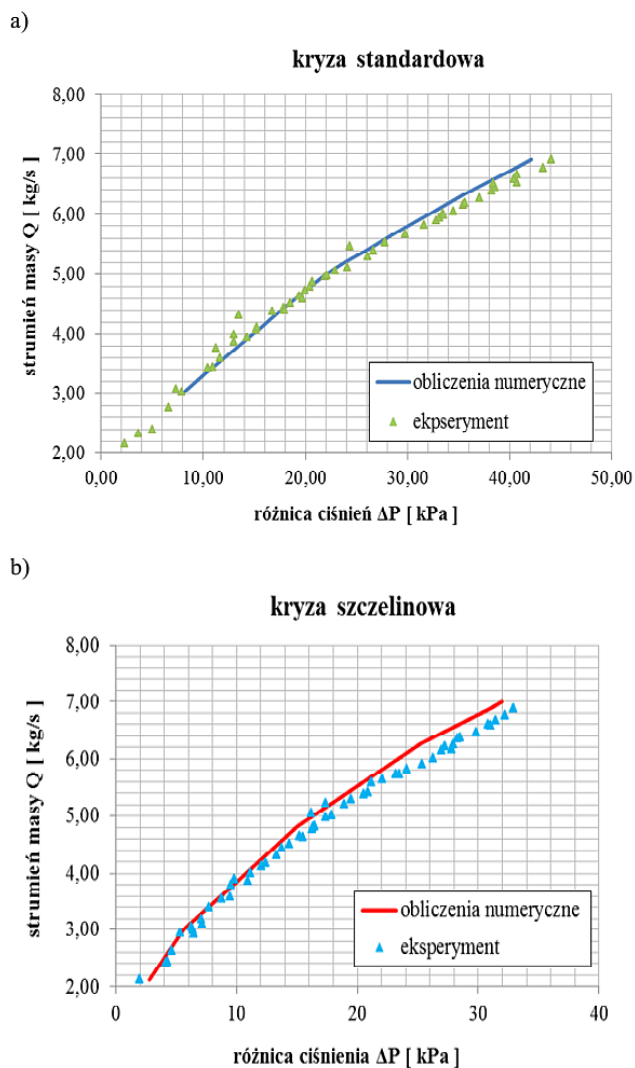
Rys. 7. Zależność współczynnika przepływu C od liczby Reynoldsa: a) kryza standardowa, b) kryza szczelinowa

Analizując powyższe rysunki można zauważyć dużą zgodność otrzymanych wyników badań eksperymentalnych z numerycznymi oraz normą [11].

Porównując wartości współczynnika przepływu C dla badanych kryzy można stwierdzić, że w rozważanym przypadku, kryzę szczelinową można traktować w obliczeniach jako kryzę standardową o ekwiwalentnej powierzchni otworu A_0 .

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki badań dotyczące zależności strumienia masy przepływającego płynu od różnicy ciśnienia wytworzonego na kryzie. Zestawiono wyniki badań otrzymanych na drodze eksperymentu z wynikami obliczeń numerycznych odpowiednio dla a) kryzy standardowej, b) kryzy szczelinowej.

Podobnie jak w przypadku rysunku 7, wyniki obliczeń numerycznych aproksymowano linią ciągłą łamaną. Daje się zauważyć dobrą ilościową i jakościową zgodność wyników pomiarów.



Rys. 8. Zależność strumienia masy Q od ciśnienia różnicowego ΔP : a) kryza standardowa, b) kryza szczelinowa

3. Wnioski

Przeprowadzone badania symulacyjne oraz eksperymentalne pozwoliły na porównanie charakterystyk przepływu płynu jednofazowego dla kryzy standardowej i szczelinowej. Badania numeryczne wykazały, że w przypadku kryzy szczelinowej

przepływ ulega stabilizacji w mniejszej odległości za kryzą w porównaniu do kryzy standardowej. Zastąpienie pojedynczego otworu równomiernie rozmieszczonymi szczelinami ma wpływ na znaczne zmniejszenie trwałej straty ciśnienia. Stwierdzono, że współczynnik przepływu C ma dla obu kryz zbliżoną wartość. Wyniki obliczeń wskazują na celowość kontynuacji prac nad optymalizacją konstrukcji kryz szczelinowych.

Literatura

- [1] Abou El-Azm Aly A., Chong A., Nicollean F., Beck S.: Experimental study of the pressure drop after fractal-shaped orifices in turbulent pipe flows, *Experimental Thermal and Fluid Science* 34, 2010, 104–111.
- [2] ANSYS FLUENT Theory Guide (2011)
- [3] Dobrowolski B., Kręcis K., Spyra A.: Usability of selected turbulence models for simulation flow through a pipe orifice, *Task Quarterly* 9(4)/2005, 439–448.
- [4] Geng Y., Zheng J., Shi T.: Study on the metering characteristics of a slotted orifice for wet gas flow, *Flow Measurement and Instrumentation* 17/2006, 123–128.
- [5] Guo B. Y., Hou Q. F., Yu A. B., Li L. F., Gou J.: Numerical modeling of the gas flow through perforated plates, *Chemical Engineering Research and Design* 91, 2013, 403–408.
- [6] Huang S., Ma T., Wang D., Lin Z.: Study on discharge coefficient of perforated orifices as a new kind of flowmeter, *Experimental Thermal and Fluid Science* 46 2013, 74–83.
- [7] Jaworski Z.: Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej, Akademia Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.
- [8] Kumar P., Wong Ming Bing M.: A CFD study of low pressure wet gas metering using slotted orifice meters, *Flow Measurement and Instrumentation* 22/2011, 33–42.
- [9] Morrison G. L., Hall K. R., Holste J. C., Macek M. L., Ihfe L. M., DeOtte R. E., Terracina D.: Comparison of orifice and slotted plate flowmeters, *Flow measurement and Instrumentation* 5(2)/1994, 71–77.
- [10] Morrison G.L., Terracina D., Brewer C., Hall K.R.: Response of a slotted orifice flow meter to an air/water mixture, *Flow Measurement and Instrumentation* 12/2001, 175–180.
- [11] PN-EN ISO 5167-1: Pomiar strumienia płynu za pomocą zwęzek pomiarowych
- [12] Steven R., Hall A.: Orifice plate meter wet gas flow performance, *Flow Measurement and Instrumentation* 20/2009, 141–151.
- [13] Taler D.: Pomiar ciśnienia, prędkości i strumienia przepływu płynu, Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2001.

Barbara Tomaszewska
e-mail: b.tomaszewska@po.opole.pl

Asystent w Katedrze Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej. Przewód doktorski realizowany jest w dziedzinie: Mechanika. W swojej pracy naukowej zajmuje się badaniami dotyczącymi przepływu płynu jednofazowego i dwufazowego przez kryzy o różnym kształcie geometrycznym. Obszarem zainteresowań są zagadnienia związane z eksperymentalną i numeryczną mechaniką płynów.



otrzymano/received: 20.06.2016

przyjęto do druku/accepted: 01.06.2017