

WPLYW KSZTAŁTU KRYZY NA POMIAR RÓŻNICY CIŚNIENIA PRZY PRZEPŁYWIE STRUMIENIA MIESZANINY GAZ - CIECZ

Barbara TOMASZEWSKA-WACH¹, Mariusz R. RZĄSA², Bolesław DOBROWOLSKI³

1. Politechnika Opolska, Katedra techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej
e-mail: b.tomaszewska@po.opole.pl
2. Politechnika Opolska, Katedra techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej
tel.: +48 449 80 71 e-mail: m.rzasa@po.opole.pl
3. Politechnika Opolska, Katedra techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej
e-mail: b.dobrowolski@po.opole.pl

Streszczenie: Pomiar gazu metodą zwężkową jest bardzo często stosowany w pomiarach przemysłowych. Podczas przepływu gazu niejednokrotnie dochodzi do wykroplenia się cieczy. W efekcie zamiast przepływu jednofazowego mierzy się mieszaninę gaz – ciecz. Z tego powodu pojawiają się błędy wskazań przyrządów pomiarowych wynikające ze zmiany właściwości fazy ciągłej, którą jest gaz. Ponadto pojawienie się dodatkowej fazy prowadzi do powstawania zaburzeń przepływu i pulsacji ciśnienia. Dlatego poszukuje się nowych metod i narzędzi do pomiaru przepływu mieszaniny gaz-ciecz, które umożliwiają uzyskanie zadowalającej dokładności pomiaru, w momencie gdy pojawia się zakłócenie w postaci fazy ciekłej. Zakres badań przedstawionych w obecnej pracy obejmował zastosowanie kryz szczelinowych do pomiaru mieszanin gaz-ciecz. Przeprowadzona została analiza wpływu geometrii kryzy szczelinowej na pomiar strumienia mieszaniny dwufazowej. Badaniom eksperymentalnym poddano kryzę standardową oraz dwie konstrukcje kryz szczelinowych o różnej geometrii otworów. Eksperyment obejmował pomiar przepływu powietrza z niewielką ilością wody rozproszonej w postaci kropelek. Wyniki badań porównano z wynikami uzyskanymi dla kryzy standardowej.

Słowa kluczowe: kryza pomiarowa, kryza szczelinowa, pomiar strumienia gazu, mieszanina powietrze-woda.

1. WPROWADZENIE

W wielu gałęziach przemysłu do pomiaru strumienia gazu stosuje się różnego rodzaju kryzy lub zwężki. Podczas transportu gazu w warunkach przemysłowych wielokrotnie dochodzi do wykroplenia się cieczy z par transportowanych wraz z gazem. Pojawienie się niewielkich kropelek cieczy powoduje, że mierząc strumień metodą zwężkową powstaje błąd wynikający ze zmiany właściwości fizycznych mierzonego gazu. Przepływający gaz przestaje być strumieniem jednofazowym i staje się mieszaniną dwufazową gaz-ciecz. [1] Zastosowanie standardowych zależności opisujących przepływ jakie stosuje się do pomiaru gazu prowadzi do znacznych błędów wyników. Z wielu powodów, pomiary mieszanin dwufazowych należą to jednych z trudniejszych i zarazem najlepiej rozwijających się dziedzin w mechanice płynów. [2]

Pomiary strumienia masy mieszaniny gaz - ciecz mają duże znaczenie w wielu dziedzinach nauki i techniki. Z przepływem strumienia mieszaniny dwufazowej gaz – ciecz można spotkać się między innymi w: meteorologii, chemii, w energetyce, przemyśle petrochemicznym i chemicznym. Właściwości przepływów dwufazowych decydują o wydajności procesów i urządzeń w których te przepływy występują. Dokładność prowadzonego pomiaru jest istotna ze względu na utrzymanie odpowiednich parametrów procesów przemysłowych oraz rozliczeń. Pomiary mieszaniny dwufazowej należą do jednych z najtrudniejszych zagadnień w metrologii przepływów. Dzieje się tak, ponieważ pojawienie się dodatkowej fazy prowadzi do zmian właściwości fizycznych fazy podstawowej. [1-5]

Innym obszarem zastosowania przepływomierzy zwężkowych jest wydobywanie gazu ziemnego gdzie bardzo często następuje wykraplanie się cieczy, pod wpływem obniżenia temperatury lub ciśnienia. Prowadzi to do wystąpienia przepływu gazu mokrego, czyli takiego którego udział objętościowy fazy ciekłej nie przekracza 5%. [2] W związku z rozwojem możliwości wydobywania gazu z obszarów morskich, pustynnych i trudnodostępnych, konieczne jest posiadanie systemów pomiarowych o dużej niezawodności, niewielkich rozmiarach oraz stosunkowo niskim koszcie. [3-4] W wielu ośrodkach badawczych i instytucjach naukowych od lat prowadzone są badania nad poszukiwaniem nowych i udoskonaleniem istniejących już technik pomiaru strumienia mieszaniny dwufazowej. Bardzo często są to urządzenia o dużych gabarytach, skomplikowanej konstrukcji i wysokim koszcie wykonania. Istnieje zatem duże zapotrzebowanie na przyrządy o prostej konstrukcji i niskim koszcie wykonania. Ze względu na prostotę budowy, niski koszt oraz niezawodność działania przepływomierze zwężkowe stanowią jedną z najtańszych i najbardziej rozpowszechnionych grup przyrządów do pomiarów strumienia, które są stosowane w przemyśle. W literaturze można znaleźć wiele przykładów zastosowania

przepływomierzy zwężkowych do pomiarów mieszaniny gaz – niewielka ilość cieczy. [5-6]

2. POMIAR STRUMIENIA MASY MIESZANINY GAZ-CIECZ Z WYKORZYSTANIEM METODY ZWĘŻKOWEJ

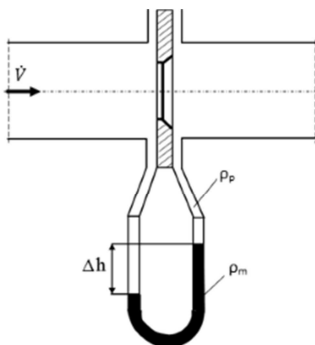
Wśród przepływomierzy zwężkowych wyróżnia się: kryzę, dyszę ISA oraz zwężkę Venturiego. [7]

Zwężka jest elementem w instalacji stanowiącym przeszkodę dla przepływającego strumienia. Przepływomierze tego typu prowadzą do zmiany prędkości i ciśnienia przepływającego płynu. Wraz ze zmianą prędkości następuje spadek ciśnienia statycznego czyli wywołanie różnicy ciśnienia na zwężce. Powstała różnica ciśnień Δp jest miarodajna przy wyznaczaniu strumienia masy bądź objętości płynu. [7-8]

$$\dot{m} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (1)$$

gdzie: C – współczynnik kryzy, ε -liczba ekspansji,
 β – współczynnik przewężenia, d – średnica kryzy,
 Δp – różnica ciśnień, ρ – gęstość płynu.

W niniejszej pracy badaniom poddano kryzę standardową, której schemat został przedstawiony na rysunku 1, oraz jej odmianę.



Rys. 1. Schemat zwężki pomiarowej [7]

2.1. Kryza standardowa

Biorąc pod uwagę konstrukcję, kryza standardowa w porównaniu do dyszy ISA i zwężki Venturiego, jest najprostsza. Jest również najczęściej stosowana przy pomiarach strumienia gazu, cieczy jak i zawiesin. Kryza standardowa jest bardzo wytrzymała i umożliwia prowadzenie pomiarów w szerokim zakresie ciśnień i temperatur. Jedną z wielu zalet stosowania kryz jest łatwość wymiany płytki, celem np. zmiany zakresu pomiarowego, bez konieczności demontażu dużych odcinków pomiarowych. [8,10]

Standardowa kryza znormalizowana zapewnia dużą dokładność pomiaru jedynie przy przepływie strumienia z udziałem jednej fazy. Pojawienie się np. fazy ciekłej w przepływającym strumieniu gazu prowadzi między innymi: do zmiany ciśnienia różnicowego, powstania pulsacji ciśnienia różnicowego, zmiany gęstości płynu, liczby ekspansji itp. W związku z powyższym nie zaleca się stosowania kryz znormalizowanych do pomiaru gazów mokrych lub mieszanin wielofazowych. [11] Od wielu lat prowadzone są badania nad opracowaniem procedur

umożliwiających zastosowanie kryz do pomiaru strumienia gazów mokrych i mieszanin dwufazowych.

W kanałach w których przepływa gaz mogą pojawić się procesy kondensacji prowadzące do wykraplania się na ściankach rurociągu niewielkich ilości cieczy w postaci kropeł, prowadząc do pojawienia się gazu mokrego. Z kolei prowadzi to do powstania zaburzeń przepływu.

Aby określić czy dana mieszanina gaz – ciecz znajduje się w zakresie przepływu gazu mokrego należy określić względną ilość cieczy w przepływającym strumieniu dwufazowym. Najczęściej stosuje się parametr Lockhart–Martinelli, który wyrażony jest wzorem [2, 3, 5]:

$$X_{LM} = \frac{m_L}{m_G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \quad (2)$$

gdzie: m_L i m_G to strumień masy odpowiednio fazy ciekłej i gazowej, ρ_L , ρ_G to gęstość cieczy i gęstość gazu.

Dla mokrego gazu wartość parametru X_{LM} nie przekracza 0,35.

2.2. Kryza szczelinowa

Dopuszczalne jest zastosowanie metod zwężkowych do pomiaru przepływu gaz - niewielka ilość cieczy, należy jednak znaleźć odpowiednią konstrukcję kryzy pomiarowej. W literaturze opisanych zostało wiele rozwiązań które są odmianą kryzy standardowej. Są to tak zwane kryzy specjalne wśród których wyróżnić można kryzy: szczelinowe, perforowane, fraktalne oraz kryzy o różnych kształtach otworów np.: kwadrat, trójkąt, owal. [11-15]

Po raz pierwszy pojęcie kryzy szczelinowej zostało użyte przez Hall i Holste,. Badaniami nad nowym rodzajem kryzy zajęli się między innymi Macek pod nadzorem Morrisona. W pracy [9] badaniom poddany został przepływ płynu jednofazowego przez kryzę szczelinową oraz kryzę standardową. Wyniki otrzymanych badań wykazały, że kryza szczelinowa generuje mniejsze różnice ciśnień i zapewnia szybszy odzysk ciśnienia za kryzą.

Geng [1] poddał badaniom numerycznym i eksperymentalnym kryzę standardową i szczelinową. Badania symulacyjne i doświadczalne odbywały się w warunkach przepływu jedno i dwufazowego. Geng wykazał, że w celu ustabilizowania przepływu kryza szczelinowa nie wymaga tak długich odcinków rurociągu jak w przypadku zastosowania kryzy standardowej. Z badań wynika również, że kryza szczelinowa prowadzi do wyeliminowania efektu zatrzymania cieczy przed kryzą. Wykazał także, że kryzy o niskim współczynniku β są bardziej wrażliwe na obecności cieczy w przepływie.

Kumar wraz z Bing prowadzili badania nad optymalnym kształtem kryzy szczelinowej w zakresie odzysku ciśnienia za kryzą i spadków ciśnienia wywołanych w wyniku ich instalacji. W badaniach symulacyjnych użyte zostały cztery kryzy o różnych kształtach otworów (prostokątne i okrągłe). Wyniki otrzymanych badań porównali z danymi dotyczącymi kryzy standardowej. Stwierdzili oni, że kształt szczelin nie ma większego wpływu na odzysk ciśnienia [16].

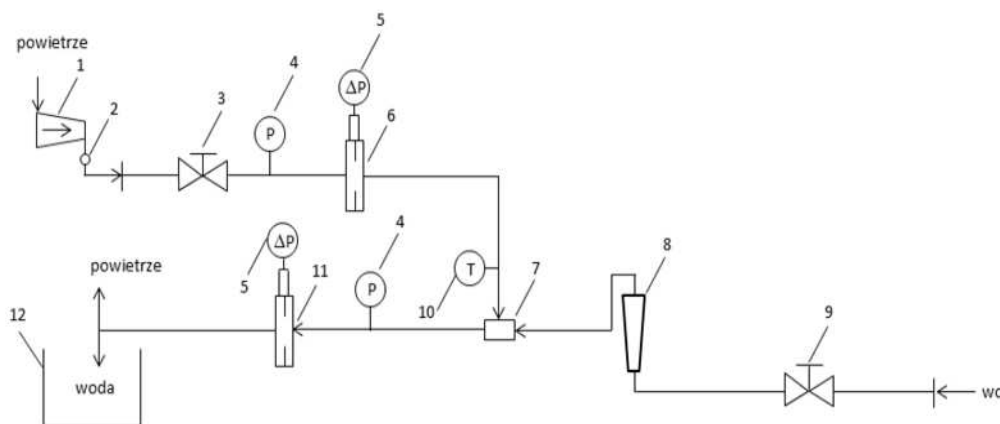
Annamalai [17] badał zjawisko homogenizacji mieszaniny dwufazowej za kryzą szczelinową. Badany

przepływ obejmował strukturę pęcherzykową i ślimakową. Annamalai wykazał, że możliwe jest użycie kryzy szczelinowej jako stabilizatora strugi który przekształca struktury przepływu dwugazowego w jednorodną mieszaninę. W swoich badaniach wykazał również, że optymalne ujednorodnienie przepływu dwufazowego przez kryzę szczelinową występuje w odległości 1,5D do 2,5D za przeszkodą.

Z uwagi na swoją konstrukcję kryza standardowa, przy przepływie gazu nawet z niewielkim udziałem procentowym cieczy, powoduje między innymi zatrzymanie cieczy przed kryzą, co prowadzi do powstania zaburzeń przepływu oraz zawyżonej wartości zmierzonej różnicy ciśnienia Δp . Zastąpienie pojedynczego otworu koncentrycznie rozmieszczonymi szczelinami prowadzi między innymi do ograniczenia skutków początkowych zaburzeń przepływu. Poprzez rozdzielenie przepływającego strumienia mieszaniny, w całym przekroju rurociągu, eliminowany jest między innymi efekt kumulowania się cieczy przed przeszkodą oraz powstawania dużych zawirowań za przeszkodą.

3. STANOWISKO BADAWCZE

Celem prowadzonych badań było określenie wpływu geometrii kryzy szczelinowej na powstałą różnicę ciśnień przy przepływie mieszaniny gaz – ciecz. W tym celu zbudowane zostało stanowisko badawcze, którego schemat przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat stanowiska do pomiaru przepływu dwufazowego:
 1 – sprężarka objętościowa, 2 – reduktor ciśnienia, 3 – zawór regulujący przepływ powietrza, 4 – czujnik ciśnienia, 5 – przetwornik różnicy ciśnienia, 6 – przepływomierz z wązkowy, 7 – mieszalnik, 8 – rotametr, 9 – zawór regulujący przepływ cieczy, 10 – czujnik temperatury, 11 – kryza szczelinowa, 12 – zbiornik na ciecz

Stanowisko zasilane było powietrzem z sieci pneumatycznej o ciśnieniu 6 barów (1). Powietrze dostarczane było do stanowiska poprzez reduktor ciśnienia (2), który zapewniał stałą wartość ciśnienia na wlocie. Strumień powietrza regulowany był przy użyciu zaworu (3). Parametry strumienia gazu były kontrolowane w układzie pomiarowym składającym się z czujnika ciśnienia (4), czujnika temperatury (10) oraz przepływomierza z wązkowy (5), (6). W komorze mieszającej (7) przygotowywana była mieszanina dwufazowa. Woda do komory mieszania dostarczana była z sieci wodociągowej, poprzez zawór regulujący jej

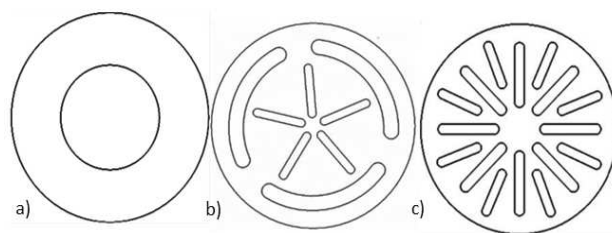
przepływ (9). Przepływ wody mierzony był rotametrem (8). Na poziomym odcinku rurociągu zamontowany został układ do badania kryz szczelinowych (11). Różnicę ciśnienia na kryzie szczelinowej mierzono czujnikiem różnicy ciśnienia (5). Wartość ciśnienia statycznego w rurociągu mierzona była czujnikiem (9). Na wylocie rurociągu pomiarowego zamontowany został separator (12). Wartości sygnałów z czujników pomiarowych rejestrowane były w sposób ciągły na komputerze podczas czasu trwania eksperymentu. Do rejestracji wartości mierzonych wykorzystano autorską aplikację napisaną w systemie LabView.

Eksperymenty przeprowadzone zostały dla trzech różnych strumieni powietrza, które wynosiły 0,06 kg/s, 0,078 kg/s i 0,086 kg/s. Po ustabilizowaniu się przepływu gazu do instalacji wprowadzany został strumień wody, który był rozpylany w postaci kropelek. Strumień przepływającej cieczy mieścił się w zakresie od 0,06 kg/s do 0,16 kg/s.

Badaniom eksperymentalnym poddano kryzę standardową oraz dwie kryzy szczelinowe o różnej geometrii otworów (rys.3). Wielkości i liczbę szczelin dobrano w taki sposób aby współczynnik przewężenia wszystkich badanych wynosił $\beta = 0,5$. Dla kryz szczelinowych współczynnik β oblicza się na podstawie wzoru:

$$\beta = \sqrt{\frac{A_{\text{szczelin}}}{A_{\text{przekroju rury}}}} \quad (4)$$

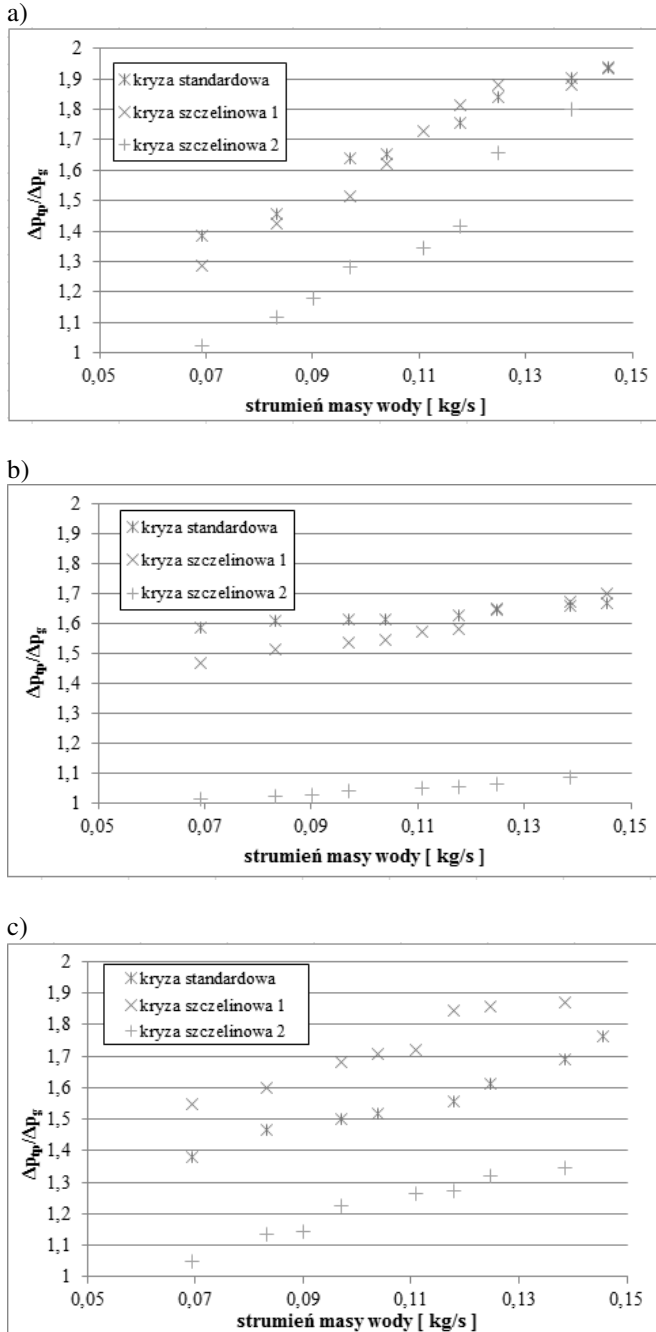
gdzie: A_{szczelin} – pole powierzchni szczelin, $A_{\text{rurociągu}}$ – pole przekroju poprzecznego rurociągu



Rys. 3 Kryzy wykorzystane w badaniach eksperymentalnych:
 a) kryza standardowa, b) kryza szczelinowa 1, c) kryza szczelinowa 2

4. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Na rysunku 4 przedstawione zostały wyniki otrzymanych badań eksperymentalnych. Badania dotyczyły pomiaru różnicy ciśnienia w zależności od strumienia masy wody. Badania prowadzone były dla trzech różnych stałych strumieni powietrza na wlocie, odpowiednio dla: a) 0,06kg/s, b) 0,078 kg/s, c) 0,087 kg/s.



Rys.4. Zależność $\Delta p_{tp}/\Delta p_g$ od strumienia masy wody przy stałym strumieniu masy powietrza dla:

- a) strumień powietrza 0,06kg/s, b) strumień powietrza 0,078 kg/s, c) strumień powietrza 0,086 kg/s

Analizując wyniki pomiarów, które przedstawiono na rysunku 4, można stwierdzić, że obecność cieczy w przepływającym stałym strumieniu powietrza prowadzi do zmiany ciśnienia różnicowego powstałego na kryzie. Im większy jest strumień masy wody w przepływającym strumieniu powietrza, tym większa jest powstała różnica

ciśnienia. Rozkład zmiany różnicy ciśnienia na kryzie w zależności od strumienia masy wody jest także rozkładem nieliniowym.

5. PODSUMOWANIE

Podsumowując, przy przepływie mieszaniny dwufazowej powietrze – woda kryzy szczelinowe, w porównaniu do kryzy standardowej, generują mniejszą różnicę ciśnienia, jednak w odniesieniu do różnicy ciśnienia powstałej przy przepływie czystego gazu stosunek tych różnic ciśnień dla kryzy standardowej i kryzy szczelinowej 1 jest porównywalny. Oznacza to, że jedynie kryza szczelinowa 2 wykazuje najmniejszą czułość na zmiany zawartości cieczy w gazie. Jest to spowodowane tym, że w tego typu rozwiązaniu występuje równomierny lokalny stosunek przewężenia w całym przekroju poprzecznym rurociągu. Porwane kropelki cieczy bardzo swobodnie przepływają przez przeszkodę wraz ze strumieniem powietrza, a jedynie tylko niewielka ilość cieczy zostaje zatrzymana przez kryzę. Szczeliny które rozmieszczone są w całej objętości rury umożliwiają ponowne porwanie kropek cieczy przez strumień gazu w przeciwieństwie między innymi do standardowego rozwiązania. Mierząc strumień mieszaniny za pomocą kryzy standardowej dodatkowym utrudnieniem jest to, że część cieczy zostaje zatrzymana na kryzie, a spływająca ciecz gromadzi się przed kryzą, powodując niekorzystne zaburzenia przepływu.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Falcone G., Hewitt G., Alimonti C., Multiphase Flow Metering: Principles and Applications, Developments in petroleum science 54, (2009)
2. 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
3. Hua C., Geng Y., Wet gas technique based on slotted orifice and swirlmeter, Flow Measurement and Instrumentation 30 (2013) 138 – 143
4. Zheng G.B., De Jin N., Jia X.H., Lv P.J., Liu L.B., Gas–liquid two phase flow measurement method based on combination instrument of turbine flowmeter and conductance sensor. International Journal of Multiphase Flow 34 (2008) 1031–1047
5. Steven R., Hall A., Orifice plate meter wet gas flow performance, Flow Measurement and Instrumentation 20 (2009) 141-151
6. Fang L., Zhang T., Jin N., A comparison of correlations used for Venturi wet gas metering in oil and gas industry. Journal of Petroleum Science and Engineering 57 (2007) 247–256
7. PN-EN ISO 5167 – 1 Pomiar strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych.
8. Taler D., Pomiar ciśnienia, prędkości i strumienia przepływu płynu, Wydawnictwo Naukowo-dydaktyczne, Kraków 2006
9. Measurement of fluid flow by means of pressure-differential devices- Guidelines for the specification of orifice plates, nozzles and Venturi tubes beyond the scope of ISO 5167, 2007

10. 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, No. 2 (1994), 71 – 77,
11. 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
12. Morrison G. L., Hall K. R., Holste J. C., DeOtte R. E., Macek M. L., Ihfe L. M., Slotted Orifice Flowmeter, *AIChE Journal* October 1994 Vol. 40, No. 10
13. Bayazit Y., Sparrow M., Joseph D., Perforated plates for liquid management: Plate geometry effects and flow regime. *International Journal of Thermal Sciences* 85 (2014) 101-111
14. 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
15. Abou El-Azm Aly A., Chong A., Nicolleau F., Beck S., Experimental study of pressure drop after fractal-shaped orifice in turbulent pipe flow. *Experimental Thermal and Fluid Science* 34 (2010) 104-111
16. 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
17. Annamalai G., Pirouzpanah S., Gudigopuram S. R., Morrison G. L., Characterization of flow homogeneity downstream of a slotted orifice plate in a two - phase flow using electrical resistance tomography, *Flow Measurement and Instrumentation* 50 (2016) 209 – 215,

EFFECT OF ORIFICE DESIGN ON DIFFERENTIAL PRESSURE MEASUREMENT IN TWO TWO PHASE AIR-WATER MIXTURE FLOW

Gas measurements employing various slotted orifice designs are often employed in industrial applications. In the conditions of gas flow in the pipelines, we have to do with liquids condensation. As a result, the flow measurements basically involve gas-liquid mixture. For this reason, considerable errors occur in the measurement conducted by instruments resulting from the variations in the properties of the continuous phase, which is formed by gas. In addition, the occurrence of an additional phase results in flow interferences and pulsations of differential pressure. Therefore, new methods and tools are being sought with the aim of measuring the flow of gas-liquid mixtures, which will provide satisfactory accuracy of measurements in the case when flow interference occurs in the form of the liquid phase. The paper reports the results of a study concerned with the use of slotted orifices in the conditions of measurements of gas-liquid mixtures. Experimental research was carried out by application of a standard orifice and two designs of the slotted orifice with various slot geometries. The experiment involved the measurement of the air flow with a small amount of water, which was dispersed in the form of droplets. The results of the experiment were subsequently compared with the results recorded for the case of a standard orifice. The occurrence of liquid in the constant flow of air leads to the variations in the differential pressure developed at the orifice. As a result of the greater mass flow rate of water in the air flow, the value of the differential pressure developed at the orifice is the greater as well. In the conditions of the measurements of two-phase mixture, slotted orifice generate a smaller differential pressure compared to the standard orifice. Slotted orifices also demonstrate lower sensitivity to the variations in the flow rate of liquid in the gas. This is due to the fact that in this type of designs, we have to do with a local change in the beta ratio across the entire cross-section of the pipeline. The liquid droplets are entrained along with the air flow and freely pass through the obstacle, and only a small amount of liquid is held-up at the orifice. The gaps that are located across the entire volume of the tube allow the liquid drops to be carried away again by the gas stream in contrast to the standard solution. During flow measurements involving mixtures by the application of the standard orifice, an additional difficulty is associated with the fact that a large portion of the liquid is stopped at the orifice, as the flowing liquid accumulates in front of the orifice causing flow disturbances.

Keywords: standard orifice, slotted orifice, gas mass flowrate, two phase flow, air-liquid flow.