

Pomiar strumienia mokrego gazu kryzą standardową

Streszczenie W instalacjach gazowych niejednokrotnie dochodzi do wykroplenia się cieczy znajdującej w gazie. Powoduje to, ruch gazu wraz z kroplami cieczy. Powoduje to znaczny przyrost mierzonej różnicy ciśnień oraz błędne wskazania przyrządu pomiarowego. Ponadto pojawienie się fazy ciekłej zaburza przepływ i powoduje pulsacje ciśnienia. W pracy przedstawiono rozwiązanie umożliwiające korekcję wskazania mierzonego strumienia gazu w zależności od udziału masowego znajdującej się w nim cieczy.

Abstract Flow measurements basically involve gas-liquid mixture metering. For this reason, errors occur in the metering equipment resulting from the variations in the characteristics of the continuous phase, which is present in the flow. In addition, the existence of a dispersed phase leads to the development of flow disturbance and pressure pulsations. This paper reports the results of a study into the application of orifice plate meters for gas-liquid mixture flow metering. (**Measurement of the wet gas stream with a standard orifice**)

Słowa kluczowe: pomiar przepływu, kryza standardowa, gaz mokry.

Keywords: flow measurements, standard orifice, wet gas.

Wstęp

Pomiar strumienia gazu za pomocą kryz ma szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Podczas transportu gazu w warunkach przemysłowych wielokrotnie dochodzi do wykroplenia się par cieczy transportowanych wraz z gazem. Pojawienie się niewielkich kropelek cieczy powoduje, że mierząc strumień metodą zwężkową powstaje błąd wynikający ze zmiany własności fizycznych mierzonego gazu [1, 2, 3]. Gdyż gaz przestaje być gazem, a staje się mieszaniną dwufazową gaz-ciecz [4]. Zastosowane standardowych zależności jakie stosuje się do pomiaru gazu prowadzi do znacznych błędów. Znajomość prawidłowej wartości strumienia masy przepływającej cieczy jest ważna ze względu na fakt, iż występuje on w wielu procesach technologicznych, a także jego pomiar jest istotnym zagadnieniem badawczym.

Innym obszarem zastosowanie opisanej metody jest wydobywanie gazu ziemnego, gdzie bardzo często występuje przepływ gazu mokrego, czyli takiego którego udział objętościowy fazy ciekłej nie przekracza 5%. W literaturze jest wiele przykładów zastosowania przepływomierzy zwężkowych do pomiarów mieszaniny gaz – niewielka ilość cieczy. [5, 6]. W wielu ośrodkach badawczych prowadzone są badania nad poszukiwaniem nowych lub udoskonaleniem istniejących technik pomiaru strumienia gazów mokrych. Niejednokrotnie są to urządzenia o dużych gabarytach, skomplikowanej konstrukcji i wysokim koszcie wykonania. [7, 8]. Zatem istnieje duże zapotrzebowanie na przyrządy o stosunkowo prostej konstrukcji i niskim koszcie wykonania. Z uwagi na prostotę budowy, niski koszt oraz niezawodność działania przepływomierze zwężkowe stanowią jedną z najtańszych i najbardziej rozpowszechnionych grup przyrządów do pomiarów strumienia.

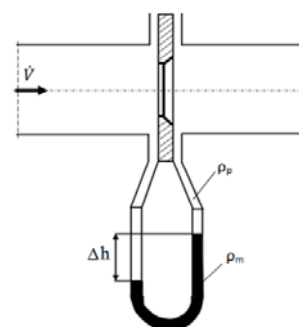
Zasada działania przepływomierzy zwężkowych

Pomiar strumienia płynu metodą zwężkową polega na wykorzystaniu zwężenia przekroju przepływowego (rys. 1). Przepływ gazu przez przewężenie powoduje wzrost prędkości przepływającego płynu, co prowadzi do powstawania różnicy ciśnień przed i za przewężeniem [9].

Z uwagi na dużą popularność tego rodzaju przepływomierzy opracowano normy określające kształt przewężenia. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest użycie kryzy standardowej bez konieczności kalibrowania przepływomierza. Stosując kryzę standardową obliczenie strumienia gazu odbywa się na podstawie wzoru:

$$(1) \quad q = \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p \rho_G}$$

gdzie: C – współczynnik przepływu zwężki [-], d – średnica kryzy [m], D – średnica wewnętrzna rurociągu [m], ε - liczba ekspansji odniesiona do warunków przed zwężką, Δp – różnica ciśnień [Pa], ρ_G – gęstość gazu [kg/m³].



Rys. 1. Zasada pomiaru strumienia kryzą.

Standardowa kryza znormalizowana zapewnia dużą dokładność pomiaru jedynie przy przepływie strumienia z udziałem jednej fazy. Obecność fazy ciekłej w przepływającym strumieniu gazu prowadzi do zmiany ciśnienia różnicowego oraz jego pulsacji, a także zmiany gęstości płynu i liczby ekspansji [11, 12, 13]. W związku z tym nie zaleca się stosowania kryz znormalizowanych do pomiaru gazów mokrych lub mieszanin wielofazowych. [9].

Modele korekty dla pomiaru gazu mokrego

Pomiar mokrego gazu następcza wielu trudności technicznych [13, 14]. Nawet niewielkie ilości cieczy w strumieniu przepływającego gazu mogą prowadzić do zaburzeń przepływu [1, 15]. Jednym z najczęściej stosowanych parametrów pozwalających określić względną ilość cieczy w przepływającym strumieniu dwufazowym jest parametr Lockhart'a–Martinelli'ego, który jest zdefiniowany wzorem (2). Dla gazu mokrego wartość parametru X_{LM} nie powinna przekroczyć 0,35 [5, 8, 11, 16].

$$(2) \quad X_{LM} = \frac{q_L}{q_G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$$

gdzie: q_L i q_G – strumień masy cieczy i gazu [kg/s], ρ_L i ρ_G – gęstość cieczy i gazu [kg/m³].

Drugim parametrem charakteryzującym przepływ mokrego gazu jest parametr GVF (Gas Volume Fraction). Jest to stosunek strumienia objętości fazy gazowej do strumienia objętości mieszaniny dwufazowej. Wartością graniczną dla przepływomierzy zwężkowych jest $GVF > 95\%$ [5].

$$(3) \quad GVF = \frac{V_G}{V_{TP}}$$

W literaturze spotyka się szereg różnych metod korekty wskazań przepływomierzy zwężkowych w zależności od parametrów charakteryzujących mokry gaz [11, 17, 18]. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest określenie zawyżonej wartości strumienia gazu, tzw. Over-Reading (OR), a następnie skorygowanie wyniku. Parametr OR jest zdefiniowany jako stosunek aktualnego strumienia masy gazu $q_{G, \text{pozorny}}$ do strumienia masy czystego gazu q_G [11, 17].

$$(4) \quad OR = \frac{q_{G, \text{pozorny}}}{q_G} \cong \sqrt{\frac{\Delta p_{TP}}{\Delta p_G}}$$

$$(5) \quad q_{G, \text{pozorny}} = \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \cdot \Delta p_{TP} \cdot \rho_G}$$

$$(6) \quad q_G = \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_G}$$

Aktualny strumień masy gazu oraz rzeczywisty strumień masy gazu wyznaczony jest na podstawie wzorów, odpowiednio (5) i (6), gdzie: Δp_{TP} to różnica ciśnień powstała przy przepływie mieszaniny gaz-ciecz oraz Δp_G różnica ciśnień dla strumienia suchego gazu.

W literaturze spotyka się wiele różnych modeli obliczenia parametru OR. Poniżej przedstawiono najbardziej znane modele.

Model przepływu dwufazowego

Model ten oparty jest o teorię przepływu dwufazowego. Powstał on na podstawie dużego zbioru danych obejmujących ogólnie rozwarstwiony przepływ dwufazowy. Jako pierwszy zaproponował go Murdocka [19]. Model jest ograniczony tylko do przepływu gazów mokrych, gdyż jak wykazał Murdock, że rodzaj struktury przepływu ma duży wpływ na błąd pomiaru.

$$(7) \quad OR = 1 + 1,26X_{LM}$$

Założenie, że korekta jest liniowa jest słuszne jedynie w wąskim zakresie pomiarowym. Dlatego powstały modyfikacje tego modelu. Lin [20] wprowadził zmienną wartość współczynnika θ_v .

$$(8) \quad OR = 1 + \theta_v X_{LM}$$

$$\theta_v = 2,04032 - 1,85145 \frac{\rho_G}{\rho_L} - 2,24484 \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^2 + 9,1817 \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^3 - 8,42128 \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^4 + 2,32846 \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^5$$

Model Chisholma [21, 22]

W 1977 Chisholm opublikował ogólną dwufazową korektę dla kryzy standardowej. Model Chisholma założył przepływ warstwowy z uwzględnieniem sił ścinających między fazami. W rezultacie uwzględnił on wpływ ciśnienia niezależnie od parametru Lockhat-Martinelli. Korelacja Chisholma jest zatem funkcją X_{LM} i ciśnienia.

$$(9) \quad OR = \sqrt{1 + \left(\left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{1/4} + \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{1/4}\right) X_{LM} + X_{LM}^2}$$

Model De Leeuwa [23]

Jest on pewną modyfikacją modelu Chisholma. De Leeuw stwierdził, że błąd wywołany przez ciecz, znajdującą się w strumieniu gazu, zależy nie tylko od ciśnienia i parametru X_{LM} ale zależy również od liczby Frouda. Wprowadził on wykładnik potęgi n , który jest zależny od liczby Frouda.

$$(10) \quad OR = \sqrt{1 + \left(\left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^n + \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^n\right) X_{LM} + X_{LM}^2}$$

gdzie:

$$(11) \quad n = \begin{cases} 0,41 & 0,5 \leq Fr_g \leq 1,5 \\ 0,606(1 - e^{-0,746 Fr_g}) & Fr_g \geq 1,5 \end{cases}$$

$$(12) \quad Fr_g = \frac{v_g}{\sqrt{gD}} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}}$$

Model Smith&Leanga [24]

Model Smitha i Leanga został opracowany dla kryzy standardowej i zwężki Venturiego. Oparty jest on o zmniejszenie pola przekroju porzecznego otworu zwężki w wyniku przepływu cieczy.

$$(13) \quad OR = \frac{1}{0,637 + 0,421x - \frac{0,00183}{x^2}}$$

gdzie: x -udział masowy gazu.

Model Stevensa [25]

Steven opracował model dla zwężki Venturiego o długości 150 mm i współczynnika przewężenia $\beta=0,55$. Badał przepływ strumienia gazu od 400 do 1000 m³/h dla ciśnień 2 MPa, 4 MPa i 6 MPa. Udział objętościowy cieczy zawierał się w przedziale 0,1-5%. Wyniki Stevensa potwierdziły ustalenia De Leeuwa, że wartość parametru Over-Reading zależy od liczby Frouda oraz ciśnienia.

$$(14) \quad OR = \frac{1 + AX_{LM} + B Fr_g}{1 + CX_{LM} + D Fr_g}$$

gdzie:

$$(15) \quad \begin{cases} A = 2454,51 \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^2 - 389,568 \frac{\rho_G}{\rho_L} + 18,146 \\ B = 61,695 \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^2 - 8,349 \frac{\rho_G}{\rho_L} + 0,223 \\ C = 1722,917 \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^2 - 272,92 \frac{\rho_G}{\rho_L} + 11,752 \\ D = 57,387 \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^2 - 7,679 \frac{\rho_G}{\rho_L} + 0,195 \end{cases}$$

Stanowisko badawcze

W celu porównania jakości korekty podczas stosowania poszczególnych modeli zbudowano stanowisko pomiarowe na którym przeprowadzono badania kryzy standardowej dla różnych udziałów masowych cieczy. Do badań użyto powietrza mieszanego z wodą.

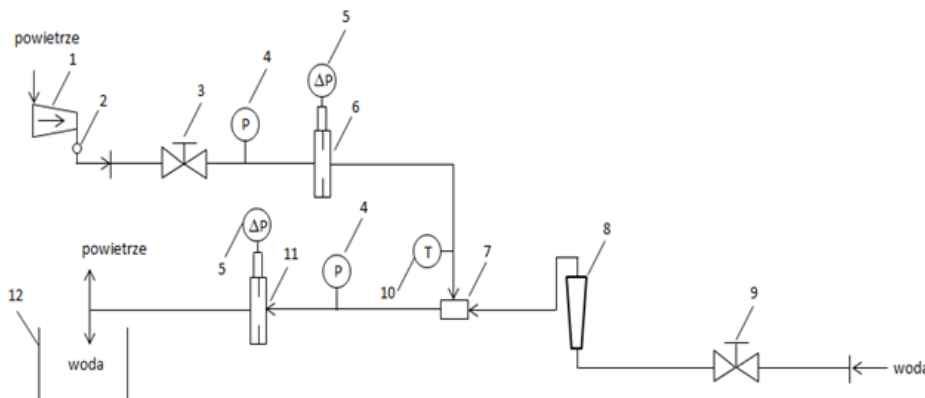
Budowę stanowiska przedstawiono na rysunku 2.

Stanowisko zasilane jest powietrzem z sieci pneumatycznej o ciśnieniu 6 barów 1, które dostarczane jest poprzez reduktor ciśnienia 2, co zapewnia stałą wartość ciśnienia. Strumień powietrza jest regulowany za pomocą zaworu 3. Parametry strumienia gazu są kontrolowane w układzie pomiarowym składającym się z czujnika ciśnienia 4, temperatury 10 oraz przepływomierza zwężkowego 5,6. W komorze mieszającej 7 jest przygotowywana mieszanina dwufazowa. Woda do komory jest dostarczana z sieci wodociągowej, poprzez zawór regulujący 9. Strumień wody jest mierzony rotametrem 8. Na poziomym odcinku

rurociągu zamontowano układ do badania kryz 11. Różnicę ciśnienia na kryzie mierzą czujnikami różnicy ciśnień 5. Jednocześnie kontrolowano wartość ciśnienia statycznego w rurociągu 9. Na wylocie z rurociągu znajduje się separator 12. Wartości sygnałów z czujników pomiarowych były rejestrowane w sposób ciągły na komputerze podczas

czasu trwania eksperymentu. Do rejestracji wartości mierzonych wykorzystano autorską aplikację napisaną w LabVIEW.

W badaniach eksperymentalnych wykorzystano kryżę standardową o współczynniku przewężenia $\beta=0,5$.



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego (opis w tekście)

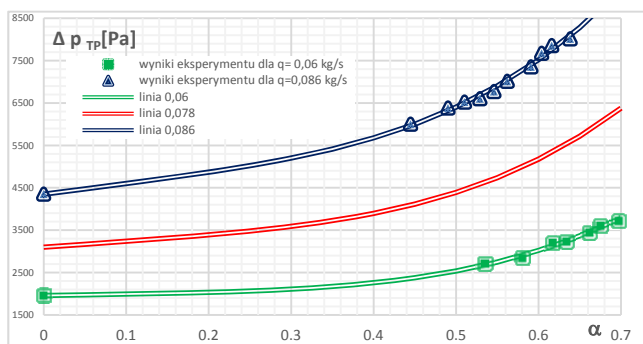
Model korekty zaproponowany przez autorów

Autorzy pracy opracowali własny model określania strumienia gazu. Model ten jest oparty na wyliczeniu wartości ciśnienia jakie powstałoby na kryzie, gdyby przez nią przepływał gaz suchy. Podstawową obliczeń jest znajomość udziału masowego gazu oraz wartość ciśnienia zmierzona dla przepływu gazu mokrego. Na podstawie szeregu danych z pomiarów opracowano zależność empiryczną.

$$(16) \quad \Delta p_{TP} = A \cdot \alpha^4 + B \cdot \alpha + C$$

gdzie: α - udział masowy cieczy.

Na rysunku 3 zestawiono wyniki obliczenia ciśnienia pomiarowego Δp_{TP} na podstawie wzoru (16) z danymi pomiarowymi dla dwóch wybranych strumieni powietrza.



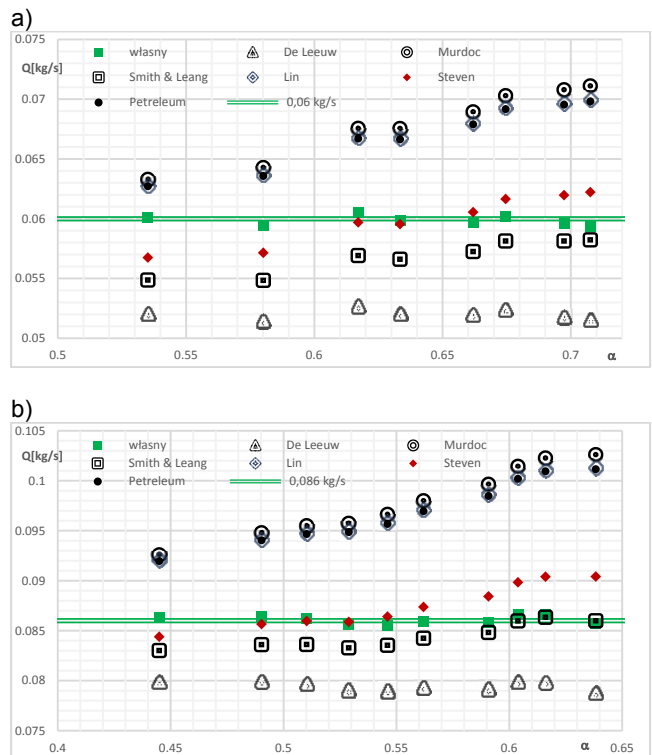
Rys. 3. Zależność wzoru (16) od danych pomiarowych

Linia 0,078 została wyznaczona dla pośredniej wartości strumienia gazu 0.078 kg/s. Jak wynika z danych eksperymentalnych nieliniowość krzywej pomiarowej rośnie wraz z wzrostem strumienia gazu. Linie teoretyczne 0.06, 0.078 i 0.086 dobrze odzwierciedlają charakter wpływu udziału masowego wody na wartość ciśnienia mierzonego.

Współczynniki A, B i C wyrażone są równaniami, w których zmienną jest ciśnienie jakie powstaje przy danym strumieniu gazu suchego. Równania zostały sformułowane na podstawie wyników doświadczalnych dla mieszaniny woda powietrze.

$$(17) \quad \begin{cases} A = 2.59 \cdot \Delta p_G + 1650 \\ B = 0.905 \cdot \Delta p_G - 1460 \\ C = \Delta p_G \end{cases}$$

Po podstawieniu równań (17) do równania (16) oblicza się wartość ciśnienia Δp_G , która odpowiada ciśnieniu jakie powstałoby przy przepływie gazu suchego. Ciśnienie to stanowi podstawę do obliczenia wartości strumienia gazu na podstawie zależności (6).

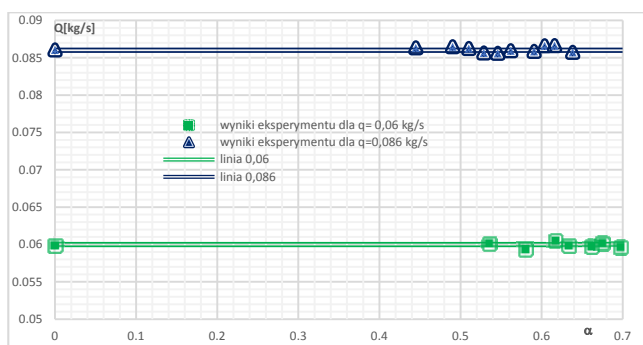


Rys. 4. Wyniki korekty pomiaru strumienia powietrza dla a) strumienia gazu 0.06 kg/s b) strumienia gazu 0.086 kg/s

Porównanie wyników

Przeprowadzono serię badań eksperymentalnych dla dwóch strumieni powietrza. Na tej podstawie obliczono wartość strumienia gazu stosując różne modele korekty (rys.4).

Wyniki porównania modeli literaturowych wykazały znaczne rozbieżności otrzymanych rezultatów. Stąd pojawia się potrzeba poszukiwania innych metod korekty wskazań, gdyż trudno jest zaproponować uniwersalną metodę. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki korekty dla modelu zaproponowanego przez autorów pracy. Model ten wykazuje dużą zbieżność w rzeczywistym strumieniu gazu zarówno dla małych jak i dużych strumieni. Wymaga on jednak indywidualnej kalibracji dla krzywej pomiarowej.



Rys. 5. Wyniki korekty pomiaru strumienia powietrza za pomocą modelu zaproponowanego przez autorów

Wnioski

Przeprowadzona analiza dotycząca porównania parametru OR wykazała, że znane uniwersalne modele korekty pomiaru strumienia gazu mokrego prowadzą do znacznych błędów. Znacznie lepsze rezultaty uzyskano dla modelu zaproponowanego przez autorów pracy. Model ten jednak wymaga eksperymentalnego dobrania współczynników liniowych funkcji korygujących indywidualnie dla każdej krzywej. Może to w niektórych sytuacjach znacznie utrudniać jego zastosowanie. Istnieje jednak wiele procesów, w których opłacalne jest zadanie sobie takiego trudu [25].

Autorzy: dr hab. inż. Mariusz R. Rząsa, Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, E-mail: m.rzasa@po.edu.pl, mgr inż. Barbara Tomaszewska-Wach, Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, E-mail: b.tomaszewska@po.edu.pl

LITERATURA

- [1] Falcone G., Hewitt G., Alimonti C., Multiphase Flow Metering: Principles and Applications, *Developments in petroleum science* 54, (2009)
- [2] Yadigaroglu G., Hewitt G. F., Introduction to Multiphase Flow Basic Concepts, *Applications and Modelling*, (2018)
- [3] Hanus R., Application of the Hilbert Transform to measurements of liquid-gas flow using gamma ray densitometry, *International Journal of Multiphase Flow* 72 (2015), 210–217
- [4] 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

- [5] Hua C., Geng Y., Wet gas meter based on the vortex precession frequency and differential pressure combination of swirlmeter, *Measurement* 45 (2012), 763 – 768
- [6] Hua C., Geng Y., Wet gas technique based on slotted orifice and swirlmeter, *Flow Measurement and Instrumentation* 30 (2013), 138 – 143
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Taler D., Pomiar ciśnienia, prędkości i strumienia przepływu płynu, Wydawnictwo Naukowo-dydaktyczne, Kraków 2006
- [10] Gólijanek-Jędrzejczyk A., Świsulski D., Hanus R., Zych M., Petryka L., Uncertainty of the liquid mass flow measurement using the orifice plate, *Flow Measurement and Instrumentation* 62, (2018), 84–92
- [11] Bai B., Zheng X., Comparison of the two-phase mass flow coefficient and the over-reading for wet gas flow metering with DP meters, *Experimental Thermal and Fluid Science* 90, (2018), 14–21
- [12] Hua C., Geng Y., Wet gas technique based on slotted orifice and swirlmeter, *Flow Measurement and Instrumentation* 30, (2013), 138 – 143
- [13] 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
- [14] 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
- [15] Yadigaroglu G., Hewitt G. F., Introduction to Multiphase Flow Basic Concepts, *Applications and Modelling*, (2018)
- [16] Steven R., Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter, *Flow Measurement and Instrumentation* 12, (2002), 361–372
- [17] Zheng X., He D., Yu Z., Bai B., Error analysis of gas and liquid flow rates metering method based on differential pressure in wet gas, *Experimental Thermal and Fluid Science* 79, (2016), 245–253
- [17] Steven R., Hall A., Orifice plate meter wet gas flow performance, *Flow Measurement and Instrumentation* 20, (2009), 141–151
- [18] 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
- [19] Murdock J.W., Two-phase flow measurements with orifices, *Journal of Basic Engineering* 84,(1962), 419–433
- [20] Lin Z.H., Two-phase flow measurements with sharp-edged orifices, *International Journal of Multiphase Flow* 8, (1982), 683–693
- [21] Chisholm D., Flow of incompressible two-phase mixtures through sharp-edged orifices, *Journal of Mechanical Engineering Science* 9, (1967), 72–78
- [22] Chisholm D., Research note: two-phase flow through sharp-edged orifices, *Journal of Mechanical Engineering Science* 19, (1977), 128–130
- [23] De Leeuw R., Liquid correction of Venturi meter readings in wet gas flow, *North Sea Flow Measurement Workshop*, (1997) Norway
- [24] Smith R. V., Leang J.T., Evaluations of correlations for two-phase flowmeters: three current-one new, *Journal of Engineering for Power* 97, 1975, 589–593
- [25] Andres D., Rząsa M.R., The possibility of composting animal waste products, *Environment protection engineering* Vol. 23 6(2007), 2157–2161