

Analiza dokładności wskazań przepływomierza ultradźwiękowego w pomiarze za kolaniem rurociągu

Streszczenie. W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań przepływu za łukiem hamburskim przeprowadzonych przy pomocy przepływomierza ultradźwiękowego z głowicami nakładanymi na rurociąg w układzie typu Z. Stwierdzono, że w odpowiednim układzie głowic ultradźwiękowych możliwe jest wykonanie pomiaru strumienia przepływu w wypełnionym rurociągu przy zastosowaniu współczynnika poprawkowego.

Abstract. The paper presents the preliminary results of studies of liquid flow rate behind the Hamburg arc carried out using an ultrasonic flow meter with Z-type clamp-on sensors on pipeline. It has been found that in a suitable arrangement of ultrasonic clamp-on sensors on pipeline it is possible to measure flow in a filled pipeline using a correction factor. (Analysis of the accuracy of the ultrasonic flow meter in the measurement behind the pipe's elbow).

Słowa kluczowe: miernictwo energetyczne, ultradźwiękowy pomiar przepływu, przepływ zaburzony.

Keywords: Energy measurement, ultrasonic flow measurement, disturbance flow.

Wstęp

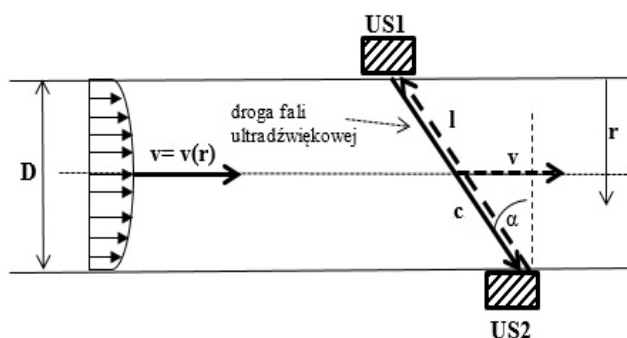
W przemysłowych pomiarach bilansowych mających na celu pomiar strumienia przepływu występującego w różnych instalacjach, między innymi energetycznych, coraz częściej wykorzystywane są urządzenia bezinwazyjne. Do tego typu urządzeń zaliczyć można przepływomierze ultradźwiękowe oraz elektromagnetyczne. W artykule rozważane będą pomiary wykonywane metodą ultradźwiękową, jako podstawowa metoda bezinwazyjna, nie wprowadzająca strat ciśnienia oraz dodatkowych zaburzeń przepływu. Stosowanie tego typu rozwiązań jest ekonomicznie uzasadnione, ze względu na brak konieczności zatrzymania urządzeń pracujących w trybie ciągłym do montażu innych urządzeń pomiarowych, ingerujących w strukturę rurociągu. Deklarowana przez producentów dokładność przepływomierzy ultradźwiękowych wynosi 2% wyświetlonej wartości strumienia przepływu. Taka dokładność jest porównywalna z innymi urządzeniami pomiarowymi wykorzystywanymi do pomiarów przepływu, które ingerują zarówno w rurociąg, jak i w strumień przepływu [1] [2]. Uzyskanie takiej dokładności obarczone jest warunkiem zachowania odpowiedniego rozwinięcia profilu prędkości. Pomiar strumienia objętości metodami ultradźwiękowymi może napotkać na trudności techniczne. Urządzenia te są wrażliwe na zaburzenia przepływu związane z niezachowaniem deklarowanych przez producentów odcinków prostych zarówno przed jak i za punktem pomiarowym [3].

Celem pracy jest sprawdzenie możliwości pomiaru strumienia przepływu cieczy za elementem zaburzającym profil prędkości, którym jest łuk hamburski, w przypadku niezachowania zalecanych przez producenta przepływomierza odcinków prostych. Badania doświadczalne wykonano dwoma przepływomierzami ultradźwiękowymi: Prosonic Flow 92 oraz Prosonic Flow 93T.

Zasada pomiaru

Oba przepływomierze, które zostały wykorzystane do przeprowadzenia pomiarów pracują w oparciu o zasadę Transit-Time, jest to metoda pracy urządzenia, która polega na pomiarze różnicy czasu przejścia fali ultradźwiękowej między dwoma czujnikami. Fala ultradźwiękowa przechodzi zgodnie z prądem przepływającego płynu oraz w kierunku przeciwnym do prądu przepływającego płynu, natomiast różnica czasów przejścia jest proporcjonalna do prędkości płynu. [4] Jednostka centralna przepływomierza, po

wprowadzeniu parametrów geometrycznych rurociągu, tj. obwodu lub średnicy rurociągu i grubość ścianki przelicza zgodnie z równaniem ciągłości strumień objętości płynu, co pozwala na wyświetlaczu prezentować chwilową wartość strumienia objętości. Możliwe jest także rejestrowanie sygnału z minimalnym interwałem próbkowania, który został określony dla każdego z przepływomierzy [5]. Zasadę pomiarową w przypadku pojedynczego przejścia fali ultradźwiękowej między czujnikami (metoda „Z”) przedstawia rysunek 1. (bez uwzględnienia grubości ścianek rurociągu).



Rys. 1. Realizacja pomiaru strumienia przepływu – metoda typu „Z” (objaśnienia w tekście)

Metoda pomiarowa w układzie typu „Z” jest bardzo często wykorzystywana w pomiarach przeprowadzanych dla rurociągów o dużych średnicach, ponieważ pozwala ona dokładniej wykonać pomiar czasów przejścia fali ultradźwiękowej między czujnikami. Stosowanie metody typu „Z” zalecane jest ze względu na zmniejszenie wpływu tłumienia fali ultradźwiękowej. Różnica czasów przejścia fali ultradźwiękowej $\Delta t = t_2 - t_1$ między czujnikami US2 i US1 przedstawiona została w równaniu (4):

$$(1) \quad t_1 = \frac{l}{c + v \cdot \sin \alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{c_i}$$

$$(2) \quad t_2 = \frac{l}{c - v \cdot \sin \alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{c_i}$$

Równania (1) i (2) przedstawiają czasy przejścia fali ultradźwiękowej z prądem oraz pod prąd, gdzie l - droga

przebyta przez falę ultradźwiękową w cieczy, l_i – droga przebyta przez falę ultradźwiękową w klinach głowic oraz w ściankach, v – średnia prędkość płynu w rurociągu, c – prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w płynie, c_i – prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w klinach głowic i ściankach, α – kąt pomiędzy drogą fali ultradźwiękowej a średnicą rurociągu.

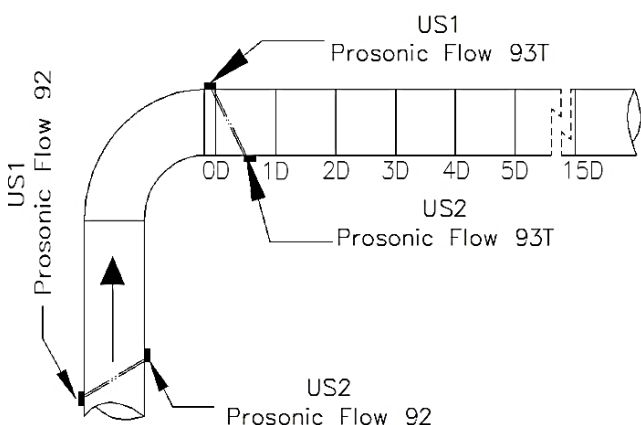
Równanie (3) przedstawia ogólną postać różnicy czasu przejścia fali ultradźwiękowej, pomiędzy głowicami dla przypadku, w którym głowice przepływomierza ultradźwiękowego rozmieszczone są po promieniu rurociągu w tak zwanym układzie typu „Z” [4].

$$(3) \quad \Delta t = \left(\frac{l}{c - v \cdot \sin \alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{c_i} \right) - \left(\frac{l}{c + v \cdot \sin \alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{c_i} \right)$$

$$(4) \quad \Delta t = - \frac{2 \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha}{(v \cdot \sin \alpha - c) \cdot (v \cdot \sin \alpha + c)}$$

Sposób realizacji pomiarów

Pomiar został wykonany przy pomocy dwóch przepływomierzy ultradźwiękowych firmy Endress+Hauser Prosonic Flow 92 oraz Prosonic Flow 93T. Pierwszy przepływomierz został zamontowany zgodnie z zaleceniami producenta przy zachowaniu odpowiedniego rozwinięcia profilu prędkości na odcinku dopływowym do łuku hamburskiego przedstawionego na rysunku 2 **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..** Badania wykonywane były na stalowym rurociągu w odcinku tłoczonym, co daje pewność wypełnienia rurociągu w całym przekroju. Takie rozwiązanie układu pomiarowego daje pewność wykonania pomiaru niezaburzonego występowaniem fazy gazowej w instalacji. Ponieważ taki przypadek zaburzenia fazą gazową może w znaczący sposób wpłynąć na dokładność wykonywanych pomiarów, co jest zauważalne w odchyleniach standardowych wartości prędkości. Wynika to ze zmiany prędkości fali ultradźwiękowej podczas przejścia przez granicę faz ciec-zgaz.

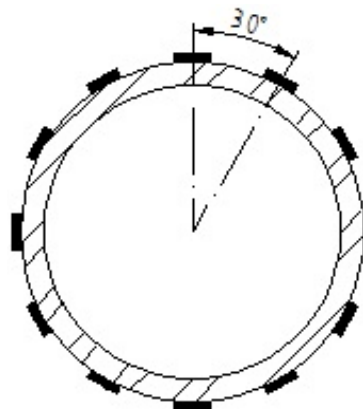


Rys. 2. Schemat pomiarowy za łukiem hamburskim w zależności od odległości wyrażonej w DN

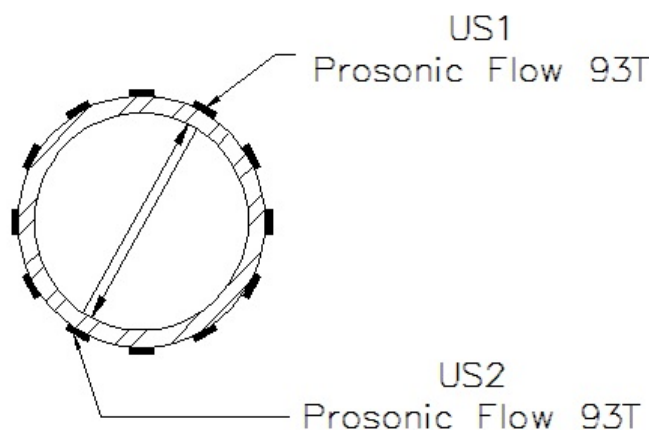
Pomiar był wykonywany w odległościach od 0 do 15 średnic nominalnych za kolaniem, w różnych płaszczyznach montażowych, wokół osi podłużnej rurociągu. Głowice przepływomierza Prosonic Flow 93T były montowane pod kątami od 0° do 330° w interwale co 30°. Schemat montażowy został w sposób szczegółowy przedstawiony na rysunku 3 **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..**

Takie rozwiązanie pozwala na sprawdzenie wskazań przepływomierza zarówno w zalecanych przez producenta układach montażowych, jak również w układach niestandardowych, które nie zostały przewidziane przez producenta urządzenia pomiarowego w dokumentacji technicznej.

Celem badań jest wyznaczenie współczynników poprawkowych, mających za zadanie wskazanie prawidłowego wyniku pomiaru wykonanego w warunkach niestandardowych za łukiem hamburskim, w zależności od odległości za elementem zaburzającym przepływ oraz w zależności od kąta płaszczyzny pomiarowej wyznaczonej względem płaszczyzny elementu zaburzającego przepływ.



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia głowic ultradźwiękowych względem osi długiej rurociągu



Rys. 4. Przejście fali ultradźwiękowej w systemie transit-time dla określonej płaszczyzny pomiarowej w układzie typu "Z"

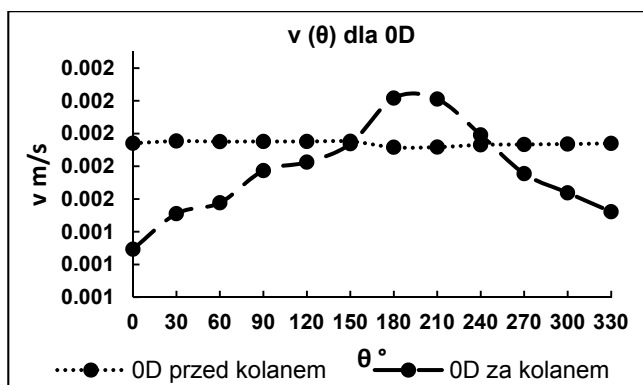
Wyniki pomiarów

W tabelach 1, 2, 3 przedstawiono poglądowo zbiorcze dane, uzyskane dla przykładowych odległości za łukiem hamburskim o promieniu $r=2DN$. W tabelach znajdują się prędkości uzyskane zarówno przed łukiem jak i za łukiem wyrażone zostały w m/s oraz przedstawione odpowiednio symbolami v_p i v_z . Otrzymane prędkości pozwoliły otrzymać bezwymiarową wartość liczby Reynoldsa, określającej rodzaj przepływu w rurociągu. Można zauważyć, że wszystkie przepływy zarówno przed łukiem, jak i za nim charakteryzują się turbulencją. Zilustrowane zostało to na rysunkach 5, 7, 9. W tabelach przedstawiono również bezwymiarowe stosunki prędkości przed łukiem do prędkości za łukiem, które w zależności od kąta ustawienia czujników zostały zobrazowane na rysunkach 6, 8, 10 jako współczynnik poprawkowy K^* określający błąd, jaki

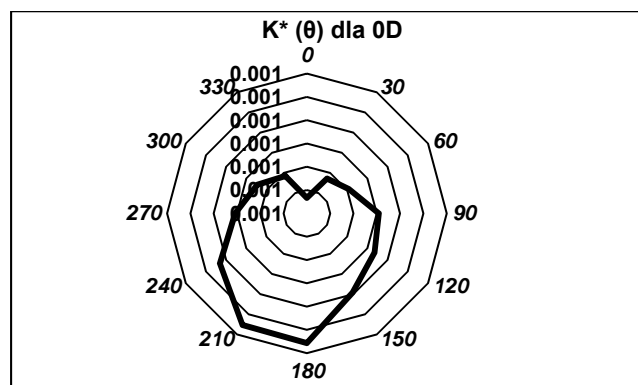
popetnia się wykonując pomiar za łukiem pod określonym kątem.

Tabela 1. Zestawienie prędkości przed kolanem i za kolanem wyrażonych przy pomocy liczby Reynoldsa w odpowiednich płaszczyznach pomiarowych dla płaszczyzny 0D za kolanem

0D	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
v_p m/s	1,941	1,954	1,951	1,952	1,951	1,952	1,916	1,917	1,931	1,933	1,936	1,940
Re_p -	100406	101106	100915	100987	100965	101004	99134	99176	99910	100022	100166	100352
v_z m/s	1,293	1,510	1,577	1,774	1,825	1,937	2,217	2,210	1,992	1,755	1,638	1,522
Re_z -	66904	78137	81600	91766	94444	100234	114702	114352	103048	90811	84730	78765
v_z/v_p -	0,666	0,773	0,809	0,909	0,935	0,992	1,157	1,153	1,031	0,908	0,846	0,785



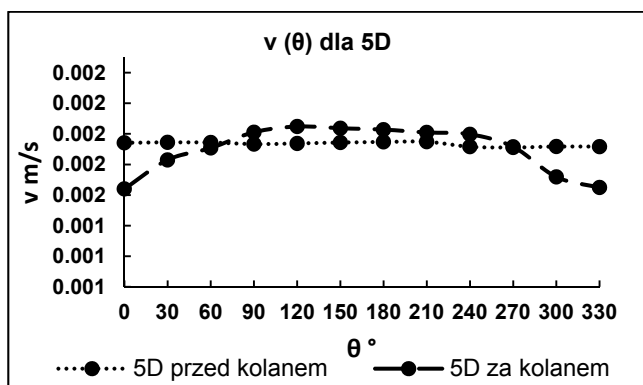
Rys. 5. Wykres prędkości w zależności od kąta θ ustawienia głowic, dla przekroju pomiarowego 0D za łukiem hamburskim



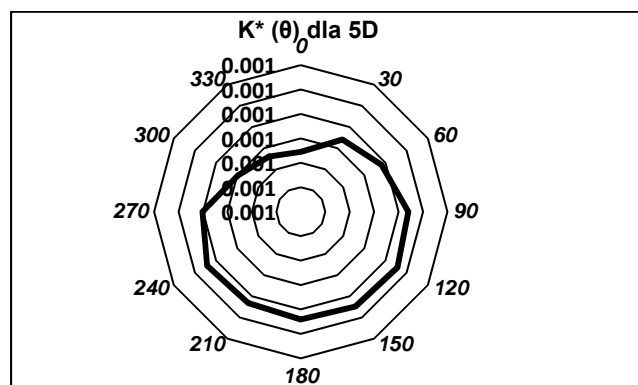
Rys. 6. Wykres współczynnika K^* w zależności od kąta θ ustawienia głowic, dla przekroju pomiarowego 0D za łukiem hamburskim

Tabela 2. Zestawienie prędkości przed kolanem i za kolanem wyrażonych przy pomocy liczby Reynoldsa w odpowiednich płaszczyznach pomiarowych dla płaszczyzny 5D za kolanem

5D	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
v_p m/s	1,941	1,945	1,943	1,933	1,937	1,943	1,947	1,948	1,916	1,911	1,917	1,917
Re_p -	100439	100613	100548	100015	100236	100539	100744	100802	99123	98876	99181	99162
v_z m/s	1,640	1,830	1,908	2,011	2,048	2,037	2,028	2,009	1,997	1,915	1,718	1,649
Re_z -	84862	94669	98699	104027	105944	105386	104904	103949	103319	99083	88909	85312
v_z/v_p -	0,845	0,941	0,982	1,040	1,057	1,048	1,041	1,031	1,042	1,002	0,896	0,860



Rys. 7. Wykres prędkości w zależności od kąta θ ustawienia głowic, dla przekroju pomiarowego 5D za łukiem hamburskim



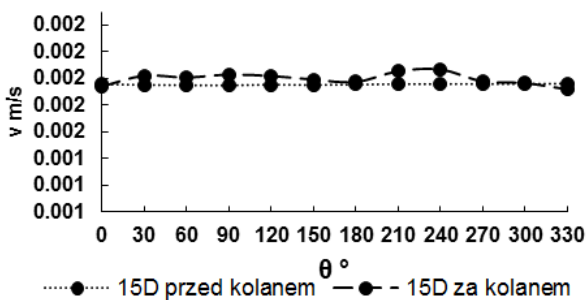
Rys. 8. Wykres współczynnika K^* w zależności od kąta θ ustawienia głowic, dla przekroju pomiarowego 5D za łukiem hamburskim

Tabela 3. Zestawienie prędkości przed kolanem i za kolanem wyrażonych przy pomocy liczby Reynoldsa w odpowiednich płaszczyznach pomiarowych dla płaszczyzny 15D za kolanem

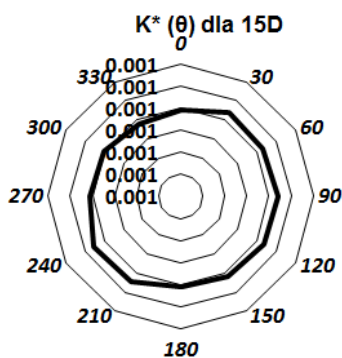
15D	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
v_p m/s	1,958	1,952	1,950	1,949	1,954	1,952	1,955	1,9584	1,9591	1,959	1,959	1,9625
Re_p -	101285	100992	100884	100825	101083	100974	101129	101323	101357	101361	101374	101533
v_z m/s	1,941	2,021	2,008	2,0296	2,0191	1,992	1,974	2,054	2,068	1,979	1,966	1,9184

Re_z -	100422	104561	103868	105009	104464	103057	102134	106284	106969	102364	101693	99252
v_z/v_p -	0,991	1,035	1,030	1,041	1,033	1,021	1,010	1,049	1,055	1,010	1,003	0,978

v (θ) dla 15D



Rys. 9. Wykres prędkości w zależności od kąta θ ustawienia głowic, dla przekroju pomiarowego 15D za łukiem hamburskim



Rys. 10. Wykres współczynnika K* w zależności od kąta θ ustawienia głowic, dla przekroju pomiarowego 15D za łukiem hamburskim

Poniżej przedstawiono matematyczne modele rozkładu profilu prędkości oparte na równaniu Prandtla i udoskonalone przez Salamiego [6]. Uzyskane wyniki zamieszczone w tabeli Tabela 4 pozwalają wnioskować, który model w przypadku zaburzenia, którym jest łuk hamburski, daje najmniejszy błąd wskazania prędkości w zależności od kąta, pod którym ustawiono czujniki. W modelach Salamiego wykorzystano następujące oznaczenia, nieco odmienne od dotychczasowo przyjętych: v_z - średnią prędkość zmierzoną przed zaburzeniem, v_t - teoretyczna prędkość występująca za zaburzeniem r - odsunięcie od osi kanału, kąt θ odchylenie od płaszczyzny elementu zaburzającego [7]. W teoretycznych modelach 1 – 14 uwzględniono współczynniki k , n , m , które są zależne od liczby Reynoldsa oraz równania Prandtla [7]

Model nr 1

$$(5) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot \theta \cdot \sin \theta \right]$$

gdzie: $n=9, k=4, m = -\frac{0,5}{\pi}$

Model nr 2

$$(6) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot \theta \cdot \sin \theta \right]$$

gdzie: $n=7, k=9, m = -\frac{0,4}{\pi}$

Model nr 3

$$(7) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot (\theta^2 - 1) \cdot (1 - \cos \theta)^2 \right]$$

gdzie: $n=9, k=4, m = \frac{0,04}{\pi}$

Model nr 4

$$(8) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-0,5\theta} \cdot \sin \theta \right]$$

gdzie: $n=9, k=0,5, m = 3,3170$

Model nr 5

$$(9) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-0,2\theta} \cdot \sin \theta \right]$$

gdzie: $n=7, k=9, m = \frac{e^{0,1\pi}}{2}$

Model nr 6

$$(10) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-0,2\theta} \cdot \sin \theta \right]$$

gdzie: $n=7, k=9, m = -\frac{e^{0,1\pi}}{2}$

Model nr 7

$$(11) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot \theta^2 \cdot (2\pi - \theta)^2 \right]$$

gdzie: $n=9, k=4, m = -\frac{2}{\pi^5}$

Model nr 8

$$(12) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot \theta \cdot (1 - \cos^2 \theta) \right]$$

gdzie: $n=9, k=4, m = \frac{1}{\pi^2}$

Model nr 9

$$(13) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot \theta \cdot (2\pi - \theta) \cdot \sin^2 \theta \right]$$

gdzie: $n=9, k=4, m = \frac{2}{\pi^3}$

Model nr 10

$$(14) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-0,1\theta} \cdot \sin^2 \theta \right]$$

gdzie: $n=9, k=9, m = 0,6813$

Model nr 11

$$(15) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-0,2\theta} \cdot \sin^2 \theta \right]$$

gdzie: $n=7, k=9, m = e^{0,1\pi}$

Model nr 12

$$(16) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-0,5\theta} \cdot \sin \theta \right]$$

gdzie: $n=9, k=0,5, m = -6,7501$

Model nr 13

$$(17) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)^{\frac{1}{k}} \cdot (2\pi - \theta)^2 \cdot \theta \cdot \sin 3\theta \right]$$

gdzie: $n=7, k=9, m = \frac{1}{2\pi^2}$

Model nr 14

$$(18) \quad v_t = v_z \cdot \left[(1-r)_n^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1-r)_k^{\frac{1}{k}} \cdot e^{-0,3\theta} \cdot \sin^2 5\theta \right] \quad \text{gdzie: } n=4, k=9, m = \frac{e^{0,15\pi}}{2}$$

Tabela 4. Zestawienie błędów pomiarowych w funkcji kąta ustawienia głowic, uzyskanych na podstawie matematycznych modeli rozkładu prędkości L.A. Salamiego

Model nr	Błąd 0°	Błąd 30°	Błąd 60°	Błąd 90°	Błąd 120°	Błąd 150°	Błąd 180°	Błąd 210°	Błąd 240°	Błąd 270°	Błąd 300°	Błąd 330°	Błąd średni
-	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	11,07	12,47	15,91	19,46	20,76	18,06	11,07	1,28	8,31	14,11	13,16	4,32	12,50
2	13,73	15,11	18,51	22,00	23,28	20,62	13,73	4,09	5,36	11,07	10,13	1,42	13,25
3	11,07	11,07	11,06	10,44	7,81	2,35	4,10	7,44	4,85	2,00	8,24	10,82	7,60
4	11,07	1,38	1,85	0,41	3,42	7,67	11,07	13,08	13,75	13,45	12,66	11,77	8,46
5	13,73	0,99	6,14	6,93	2,39	5,35	13,73	20,53	24,33	24,76	22,33	18,20	13,29
6	13,73	26,47	33,61	34,40	29,85	22,11	13,73	6,94	3,13	2,71	5,13	9,26	16,76
7	11,07	9,07	4,47	0,95	5,82	9,13	10,30	9,13	5,82	0,95	4,47	9,07	6,69
8	11,07	10,62	8,40	5,72	5,72	8,84	11,07	7,95	0,38	4,96	2,29	6,17	6,93
9	11,07	9,43	2,16	4,96	3,18	5,87	11,07	5,87	3,18	4,96	2,16	9,43	6,11
10	11,07	4,39	7,95	13,00	6,06	5,65	11,07	6,19	2,83	6,51	1,44	7,11	6,94
11	13,73	0,99	20,69	27,60	14,19	5,35	13,73	6,94	4,63	8,32	1,16	9,26	10,55
12	11,07	30,78	37,35	34,43	26,64	17,99	11,07	6,97	5,60	6,21	7,83	9,63	17,13
13	13,73	22,64	13,73	86,78	13,73	59,91	13,73	66,34	13,73	10,62	13,73	17,04	28,81
14	21,49	14,42	3,36	0,83	8,25	17,72	21,49	18,74	14,43	13,44	16,33	20,02	14,21

Wnioski

W tabeli numer Tabela 4 wyróżnione zostały błędy znajdujące się w zakresie 2% dodatkowej niepewności pomiaru przepływomierza ultradźwiękowego, wynikającej z montażu przepływomierza. Na podstawie uzyskanych wyników wnioskować można, że najdokładniejszym modelem matematycznym jest model 4, który z punktu widzenia jednostkowego podejścia do pomiaru w określonym kącie ustawienia głowic jest najdokładniejszy. Jednakże, gdyby spojrzeć całościowo to najdokładniejszymi modelami są modele 7-10, których średni błąd nie przekracza 7%. Na podstawie powyższego można stwierdzić, że możliwy jest pomiar bezpośrednio za zaburzeniem, którym jest łuk hamburski, przy nie zastosowaniu się do zaleceń montażowych producenta przepływomierzy, jednakże pomiar ten będzie obciążony określonym błędem, zwiększającym niepewność pomiaru średnio o ok. 12% Pozwoli to na estymowanie uzyskanych wartości do wartości natężenia przepływu bliskim rzeczywistego przepływu.

Autorzy: mgr inż. Piotr Synowiec, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: piotr.synowiec@pwr.edu.pl; inż. Piotr Piechota, student Politechniki Wroclawskiej, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: p-piechot@wp.pl; dr inż. Wiesław Wędrychowicz, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: wieslaw.wedrychowicz@pwr.edu.pl; dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz prof. PWR, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: artur.andruszkiewicz@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Cichoń M., Bezinwazyjne pomiary przepływu, czyli rozprawa z mitami – cz. I, *Pod Kontrolą, Automatyka i Pomiary*, 2014, nr 4, 11-13
- [2] Cichoń M., Bezinwazyjne pomiary przepływu, czyli rozprawa z mitami – cz. II, *Pod Kontrolą, Automatyka i Pomiary*, 2015, nr 1, 11-13
- [3] Synowiec P., Wędrychowicz W., Andruszkiewicz A., Pomiary strumieni przepływów metodami ultradźwiękowymi za rozszerzeniem rurociągu, *Elektronika: technologie, konstrukcje, zastosowania*, 2016, nr 09, 98-100
- [4] Waluś S., *Przepływomierze ultradźwiękowe: Metodyka stosowania*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997
- [5] Synowiec P., i inni, Badania możliwości pomiaru strumienia objętości czynnika dwufazowego przepływomierzem ultradźwiękowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 10, 179-182
- [6] Moore P. I., Brown G. J., Stimpson B. P., Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology, *Measurement Science and Technology*, 11 (2000), 1802-1810
- [7] Salami L. A. Errors in the velocity area method of measuring asymmetric flows in circular pipes, *Modern developments in Flow measurement*, 21 September 1971, 381-399