

# Pomiar przepływu metodą ultradźwiękową w warunkach niestandardowych. Analiza wpływu podstawowych elementów hydraulicznych zaburzających przepływ na wynik pomiaru

Ultrasonic flow measurement under non-standard conditions. Analysis of the influence of basic hydraulic elements disturbing the flow on the measurement result

PIOTR PIECHOTA, PIOTR SYNOWIEC, WIESŁAW WĘDRYCHOWICZ, ELŻBIETA WRÓBLEWSKA, ARTUR ANDRUSZKIEWICZ

DOI 10.36119/15.2023.5.2

Artykuł dotyczy pomiarów średniej prędkości przepływu przy użyciu metody ultradźwiękowej w warunkach niestandardowych. W pracy przeanalizowano wpływ przeszkód zaburzających przepływ, w postaci powszechnie stosowanych w instalacjach przepływowych elementów: zasuw nożowej, przepustnicy i kolana hydraulicznego na błędy ultradźwiękowego pomiaru prędkości wykonanego w zmiennych odległościach od elementu zaburzającego. Rezultaty pomiarów wykonanych za przeszkodą porównywano z wynikami pomiaru wykonanego przepływomierzem referencyjnym na prostym odcinku rurociągu przed przeszkodą. Pozwoliło to ocenić wpływ przeszkód wywołujących zaburzenia i zmiany w rozkładzie prędkości przepływu na zmierzoną wartość prędkości. W warunkach przemysłowych często zdarza się, że wykonanie pomiaru z zachowaniem określonych w normach prostych odcinków rurociągu od przeszkody jest niemożliwe. Wiedza o wpływie podstawowych typów elementów hydraulicznych na wskazania przepływomierza przy pomiarze wykonywanym bez zachowania wymaganych odcinków prostych rurociągu może być praktycznie użyta do oceny możliwości wykonania pomiaru i oceny wiarygodności otrzymanych rezultatów.  
*Słowa kluczowe: przepływomierz ultradźwiękowy, pomiar przepływu, dokładność pomiaru, kolano hydrauliczne, zasawa nożowa, przepustnica*

The article deals with flow velocity measurements using the ultrasonic method under non-standard conditions. The paper analyzes the effect of flow disturbance obstacles, in the form of common flow system components: knife gate valve, butterfly valve and hydraulic elbow, on the errors of ultrasonic velocity measurements made at varying distances from the disturbance component. The results of measurements made behind the obstruction were compared with those made with a reference flow meter on a straight section of the pipeline in front of the obstruction. This made it possible to assess the influence of obstacles causing disturbance and changes in the distribution of flow velocity on the measured value of velocity. In industrial conditions, it is often impossible to make a measurement with the straight sections of the pipeline from the obstacle, as specified in the standards. Knowledge of the effect of basic types of hydraulic elements on flow meter readings when measurements are made without maintaining the required straight pipeline sections can be used practically to assess the feasibility of the measurement and evaluate the reliability of the results obtained.

*Keywords: ultrasonic flowmeter, flow measurement, measurement accuracy, hydraulic elbow, knife gate valve, butterfly valve*

## Wstęp

Pomiary strumienia przepływu należą do najważniejszych pomiarów w inżynierskiej praktyce pomiarowej [1-2]. Z ko-

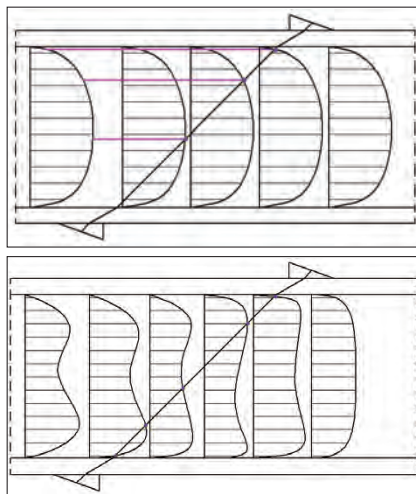
niecznością pomiaru strumienia masy lub objętości mamy do czynienia w przemyśle energetycznym, chemicznym, petrochemicznym, a także w wielu innych dziedzinach inżynierskich, takich jak budownictwo

czy inżynieria środowiska. Do najpopularniejszych metod pomiaru prędkości i strumienia przepływu należy metoda ultradźwiękowa [3-4]. Przepływomierze ultradźwiękowe zapewniają możliwość uzyskania

dr inż. Piotr Piechota <https://orcid.org/0000-0002-1447-320X>, dr inż. Piotr Synowiec <https://orcid.org/0000-0002-7750-4931>, dr inż. Wiesław Wędrychowicz <https://orcid.org/0000-0001-7437-6527>, dr inż. Elżbieta Wróblewska <https://orcid.org/0000-0002-6486-6722>, dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz <https://orcid.org/0000-0001-6401-125X> – Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Techniki Ciepłej. Adres do korespondencji/ Corresponding author: [piotr.piechota@pwr.edu.pl](mailto:piotr.piechota@pwr.edu.pl)

wyniku pomiaru z dużą dokładnością. Błąd graniczny pomiaru w przypadku przepływomierzy typu transit-time, których dotyczy artykuł, wynosi zależnie od typu przepływomierza od 0,5% do 2% wartości mierzonej. Inną istotną zaletą tej metody pomiaru, mającą wpływ na popularność i częstość stosowania, jest jej bezinwazyjność przy znajomości precyzyjnej powierzchni wewnętrznej przekroju rurociągu. Głowice ultradźwiękowe mogą być montowane na zewnętrznej powierzchni rurociągów o różnych średnicach, bez konieczności zatrzymywania pracy instalacji przepływowej. Z tego względu technika ultradźwiękowa, jako bezinwazyjna metoda pomiaru często jest jedyną możliwością wykonania pomiarów kontrolnych bez konieczności zatrzymywania pracy instalacji przepływowej. Jest to o tyle istotne, że przerywanie pracy instalacji generuje straty ekonomiczne oraz koszty związane z montażem inwazyjnej aparatury pomiarowej, zazwyczaj w takich sytuacjach stosowanej, np. zwężki pomiarowe, przepływomierze wirowe, elektromagnetyczne, termiczne. W niektórych branżach zatrzymanie i ponowne uruchomienie instalacji stanowi złożony proces technologiczny (np. zatrzymanie pracy bloku energetycznego i jego ponowny rozruch). W takim przypadku zastosowanie przepływomierzy ultradźwiękowych, np. w celu kontroli poprawności wskazań przepływomierzy zamontowanych w instalacji, jest najprostszą, najtańszą, a także najdokładniejszą metodą pomiaru strumienia przepływu.

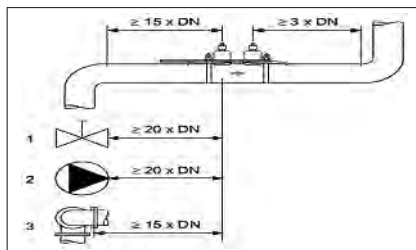
Ograniczeniem w stosowaniu przepływomierzy ultradźwiękowych jest wymóg zachowania prostych odcinków rurociągu przed i za miejscem montażu głowic przepływomierza. Struktury wirowe i zmiany rozkładu prędkości powstające w wyniku przepływu cieczy przez przeszkody (rys. 1), będące różnymi elementami hydraulicznymi instalacji (kolana, zwężki, zawory), mają bowiem duży wpływ na mierzoną przy użyciu techniki ultradźwiękowej wartość prędkości przepływu. Każda przeszkoda generuje inny typ zaburzeń przepływu, co znajduje odzwierciedlenie w wymaganych, odpowiednio długich odcinkach prostych przewodu o stałym przekroju. Długości tych odcinków są ściśle określone w normach oraz w zaleceniach montażowych sformułowanych przez producentów urządzeń [5-8]. Wykonanie pomiarów z zachowaniem wymagań zawartych w zaleceniach często jest trudne do zrealizowania. Np. w instalacjach przemysłowych stosuje się często rurociągi o dużych średnicach, ok. 0,5 – 1 m, co powoduje problem ze znalezieniem odcinków



Rys. 1. Wpływ zmian w profilu prędkości, spowodowanego przez zaburzenie, na rezultaty pomiarów przepływu wykonanych techniką ultradźwiękową  
Fig. 1. The influence of changes in the velocity profile caused by a disturbance on the results of flow measurements made using the ultrasonic technique

prostych o długości rzędu kilkunastu wielokrotności średnicy rurociągu. W przypadku występowania takich ograniczeń geometrycznych zachodzi konieczność montażu głowic ultradźwiękowych i wykonania pomiaru bez zachowania wymaganych odcinków prostych.

Z powyższych powodów podjęto się badań w celu opisanego zagadnienia wymagań stawianych pomiarom wykonywanym przy użyciu przepływomierzy ultradźwiękowych w niestandardowych warunkach pomiaru, tj. bez zachowania zawartego w normach warunku odcinków prostych rurociągu za przeszkodą. Temat ten poruszany był w wielu publikacjach naukowych [9-12], a także podejmowany w pracach autorów artykułu [13-16]. Badania zostały wykonane kompleksowo za różnymi elementami zaburzającymi przepływ, w różny sposób wpływającymi na zmianę rozkładu prędkości w rurociągu, a co za tym idzie na rezultaty pomiarów wykonanych za przeszkodą. Prze-



Rys. 2. Określone w normach odcinki proste rurociągu przy montażu przepływomierza przed/za przeszkodami różnego typu [8]  
Fig. 2. Straight sections of the pipeline specified in the standards when the flowmeter is installed in front of/behind various types of obstacles [8]

szkodami, dla których badano wpływ na wyniki pomiarów, były podstawowe elementy instalacji przepływowych: kolano hydrauliczne, przepustnica, zasuwka nożowa (rys. 2).

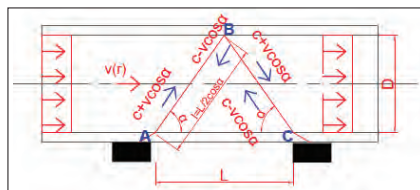
## Zasada pomiaru przepływomierzem ultradźwiękowym

Wśród przepływomierzy ultradźwiękowych, ze względu na technikę dokonania pomiaru, wyróżniamy przepływomierze typu transit-time i przepływomierze typu Dopplera. Przepływomierze wykorzystujące w procesie pomiarowym efekt Dopplera dedykowane są do pomiarów przepływów dwufazowych. Przepływomierze typu transit-time przeznaczone są natomiast do pomiarów przepływów jednofazowych, a wielkością rejestrowaną przez urządzenie jest różnica czasów przejścia fali ultradźwiękowej między ścianami rurociągu po drodze zgodnej z kierunkiem przepływu oraz po drodze przeciwno kierunkowi przepływu. Korzystając z tych wartości przepływomierz przetwarza czasy przejścia  $t_1$  i  $t_2$  na wartość prędkości  $v$  i strumienia przepływu  $q_v$ . Istnieją trzy podstawowe sposoby montażu głowic przepływomierza typu transit-time różniące się między sobą krotnością przejścia fali ultradźwiękowej między głowicami oraz dystansem dzielącym czujniki. Są to ustawienia głowic w układzie Z, w układzie V (rys. 3) i w układzie M (W). Istnieją też wielodrogowe przepływomierze ultradźwiękowe typu transit-time, wykorzystujące wiele czujników o ściśle określonym wzajemnym położeniu. Takie przepływomierze są jednak urządzeniami z głowicami montowanymi w rurociąg na stałe, co wymusza przerwanie pracy instalacji w celu ich montażu. Przepływomierze wielodrogowe pozwalają na uzyskanie większej dokładności pomiaru, lecz wymagają wyznaczenia współczynnika kształtu rozkładu prędkości  $K^*$  każdorazowo dla wszystkich dróg przejścia fali ultradźwiękowej.

W niniejszym artykule skupiono się na wykorzystaniu przepływomierza ultradźwiękowego typu transit-time w ustawieniu typu V z uwagi na niewielką średnicę rurociągu. Ustawienie głowic typu V stosuje się w instalacjach o małych średnicach rurociągu, aby przez odbicie fali ultradźwiękowej i dwukrotnie wydłużoną drogę przejścia fali zwiększyć dokładność pomiaru. Poniżej zaprezentowano sposób przetwarzania sygnału pierwotnego (pomiar czasu przejścia fali ultradźwiękowej) na wielkość docelową (prędkość przepływu  $v$ , strumień objętości przepływu  $q_v$ ) kolejno dla ustawień głowic ultradźwiękowych

w układzie V (z podwójnym przejściem fali ultradźwiękowej).

### Układ głowic typu V



Rys. 3. Schemat przejścia fali ultradźwiękowej w układzie głowic typu V  
Fig. 3. Scheme of the ultrasonic wave passage in the system of V-type transducers

$$q_v = A \cdot v \cdot K \quad (1)$$

$$t_{A-B} = \frac{l}{(c + v \cdot \cos \alpha)} \quad (2)$$

$$t_{B-C} = \frac{l}{(c + v \cdot \cos \alpha)} \quad (3)$$

$$t_{C-B} = \frac{l}{(c - v \cdot \cos \alpha)} \quad (4)$$

$$t_{B-A} = \frac{l}{(c - v \cdot \cos \alpha)} \quad (5)$$

$$\Delta t = t_{C-B} + t_{B-A} - t_{B-C} - t_{A-B} = 2t_2 - 2t_1 = 2 \cdot (t_2 - t_1) \quad (6)$$

$$\Delta t = 2 \cdot (t_2 - t_1) =$$

$$= 2 \cdot \frac{l}{(c - v \cdot \cos \alpha)} - 2 \cdot \frac{l}{(c + v \cdot \cos \alpha)} = \frac{2 \cdot l \cdot (2v \cdot \cos \alpha)}{(c - v \cdot \cos \alpha) \cdot (c + v \cdot \cos \alpha)} \quad (7)$$

$$v = \frac{c^2 \cdot 2 \cdot (t_2 - t_1)}{4 \cdot l \cdot \cos \alpha} = \frac{c^2 \cdot (t_2 - t_1)}{2 \cdot l \cdot \cos \alpha} \quad (8)$$

$$K = \frac{v_s}{v_D} = 1 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} q_v &= \frac{c^2 \cdot (t_2 - t_1) \cdot K \cdot \pi \cdot D^2}{8 \cdot l \cdot \cos \alpha} = \\ &= \frac{c^2 \cdot (t_2 - t_1) \cdot \pi \cdot D^2}{8 \cdot l \cdot \cos \alpha} = \\ &= \frac{c^2 \cdot (t_2 - t_1) \cdot \pi \cdot D^2}{8 \cdot \frac{L}{\cos \alpha} \cdot \cos \alpha} = \\ &= \frac{c^2 \cdot (t_2 - t_1) \cdot \pi \cdot D^2}{4L} \quad (10) \end{aligned}$$

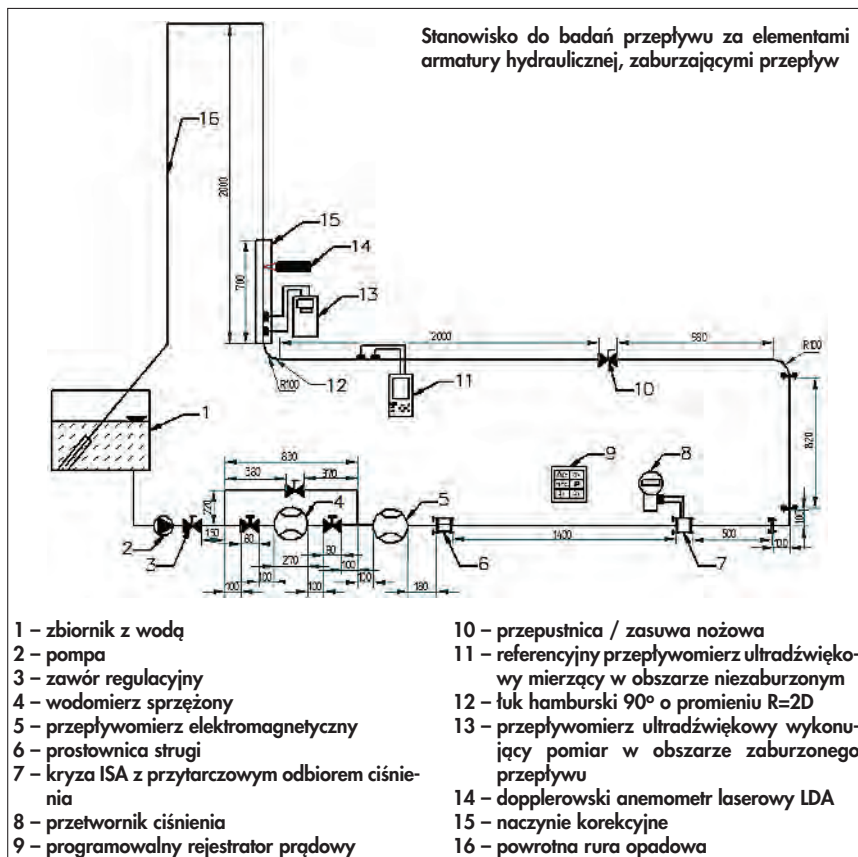
### Sposób wykonania pomiarów

Pomiary prędkości przepływu zostały przeprowadzone przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego w niestandardowych warunkach pomiaru za zasuwą nożową tj. bez zachowania określonych w normach odcinków prostych. W czasie

wykonywania pomiaru prędkości za przeszkodą w postaci zasuw/kolana hydraulicznego/przepustnicy, równocześnie prowadzono pomiar prędkości w obszarze przepływu niezaburzonego, z zachowaniem wymaganych odcinków prostych. Pomiar referencyjny prowadzony był przepływomierzem tego samego typu co za przeszkodą i służył późniejszemu określeniu wartości współczynnika  $K^*$  dla mierzonego przepływu.

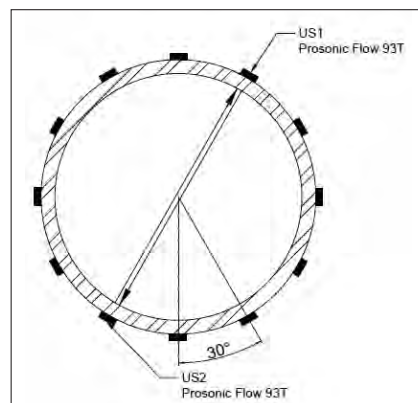
nej prędkości na dwukrotnie dłuższym odcinku przejścia fali ultradźwiękowej. Montaż głowic został przeprowadzony zgodnie z danymi konfiguracyjnymi z interfejsu przepływomierza.

Pomiary zostały wykonane w seriach pomiarowych trwających 10 minut. Czas uśredniania zapisu prędkości wynosił 5 sekund, więc zostało zapisanych 120 wyników w serii pomiarowej. Pomiarów za przeszkodami (zasuwa nożowa, przepustnica,



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego  
Fig. 4. Scheme of the measuring system

Do wykonania pomiarów posłużyło stanowisko laboratoryjne do wzorcowania przepływomierzy różnego typu (rys. 4). Głowice przepływomierza ultradźwiękowego Endress+Hauser Prosonic Flow 93T zamontowano na prostym odcinku rurociągu z zachowaniem wymaganych – w normach i dokumentacji technicznej urządzenia – odległości od elementów zaburzających przepływ. Przepływomierz referencyjny zamontowany został centralnie w przekroju poziomym rurociągu. Nakładane głowice przepływomierza zostały umieszczone na powierzchni zewnętrznej rurociągu zgodnie z metodą typu V, aby zapewnić dwukrotne przejście fali ultradźwiękowej, a co za tym idzie zmniejszyć wpływ zaburzeń przepływu na uzyskany wynik przez uśrednienie wartości mierzo-



Rys. 5. Schemat przedstawiający sposób montażu czujników ultradźwiękowych (co 30°) na obwodzie rurociągu  
Fig. 5. Scheme of the method of installing ultrasonic sensors (every 30°) on the perimeter of the pipeline



kolano hydrauliczne) dokonano w przekrojach pomiarowych 3D – 11D.

W każdym przekroju pomiarowym zmieniając położenie głowic przepływomierza umieszczonego za zaburzeniem w zakresie kątów  $\theta = 0^\circ - 360^\circ$ , obracając głowice co  $30^\circ$  wokół poziomej osi rurociągu (rys. 5).

### Wyniki pomiarów

Jak wcześniej wspomniano, pomiary zostały wykonane za trzema typami przeszkód: zasuwą nożową, przepustnicą i kolaniem hydraulicznym. Rejestrowane były: wartość prędkości przepływu przed przeszkodą  $v_{ref}$  oraz wartość prędkości przepływu za przeszkodą  $v_{mes}$ . Na wykresach zależności prędkości od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych  $v(\alpha)$  zaznaczono wartości prędkości  $v_{ref}$  i  $v_{mes}$  wraz ze słupkami błędów granicznego przepływomierza Endress+Hauser Prosonic Flow 93T  $\Delta \pm 2\%$ . Przy użyciu wartości prędkości  $v_{ref}$  i  $v_{mes}$  obliczono wartości współczynnika korekcyjnego  $K^*$  (21) dla poszczególnych przeszkód i wariantów ustawienia głowic ultradźwiękowych (odległość od przeszkody, kąt ustawienia głowic).

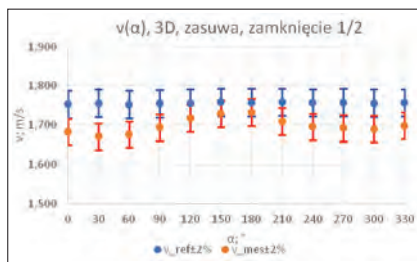
$$K^* = \frac{v_{ref}}{v_{mes}} \quad (11)$$

### Wyniki pomiarów prędkości przepływu za zasuwą nożową

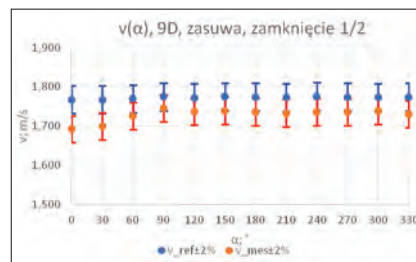
Badania za przeszkodą w postaci zasuw nożowej zostały wykonane dla zamknięcia 1/2 wysokości zasuw odpowiadającego zamknięciu ok. 40% czynnej powierzchni przepływowej (tabela 1) (rys. 6 – rys. 11).

Tabela 1. Dane pomiarowe dla badań prowadzonych przy zamknięciu 1/2 wysokości zasuw nożowej  
Table 1. Measured data for tests performed at the closing of 1/2 the height of the knife gate valve

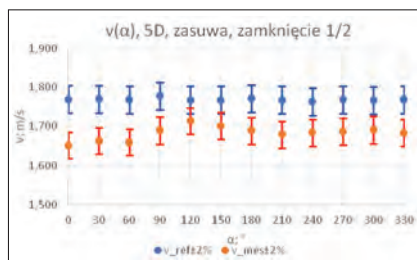
Distance	$\alpha, ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
3D	$v_{ref}$ ; m/s	1,753	1,756	1,752	1,755	1,756	1,758	1,758	1,759	1,757	1,758	1,756	1,757
	$v_{mes}$ ; m/s	1,683	1,671	1,677	1,694	1,717	1,729	1,733	1,710	1,696	1,692	1,690	1,698
	K; -	1,042	1,051	1,045	1,036	1,022	1,017	1,014	1,029	1,036	1,039	1,039	1,035
5D	$v_{ref}$ ; m/s	1,769	1,770	1,768	1,778	1,768	1,768	1,771	1,767	1,763	1,768	1,767	1,768
	$v_{mes}$ ; m/s	1,651	1,663	1,660	1,690	1,714	1,701	1,689	1,679	1,684	1,686	1,691	1,683
	K; -	1,071	1,064	1,065	1,052	1,032	1,039	1,048	1,052	1,047	1,048	1,045	1,050
7D	$v_{ref}$ ; m/s	1,747	1,749	1,749	1,749	1,750	1,749	1,751	1,752	1,755	1,758	1,770	1,768
	$v_{mes}$ ; m/s	1,685	1,685	1,691	1,704	1,703	1,700	1,700	1,695	1,710	1,707	1,714	1,704
	K; -	1,037	1,038	1,034	1,026	1,028	1,029	1,030	1,034	1,026	1,030	1,032	1,038
9D	$v_{ref}$ ; m/s	1,767	1,767	1,770	1,775	1,772	1,775	1,774	1,773	1,776	1,774	1,773	1,774
	$v_{mes}$ ; m/s	1,692	1,699	1,725	1,746	1,737	1,740	1,736	1,733	1,736	1,736	1,739	1,731
	K; -	1,044	1,040	1,026	1,017	1,020	1,020	1,022	1,023	1,023	1,022	1,019	1,025
11D	$v_{ref}$ ; m/s	1,770	1,768	1,768	1,772	1,769	1,771	1,770	1,770	1,769	1,772	1,773	1,769
	$v_{mes}$ ; m/s	1,736	1,739	1,742	1,760	1,757	1,761	1,747	1,756	1,737	1,742	1,747	1,742
	K; -	1,020	1,017	1,015	1,007	1,007	1,006	1,013	1,008	1,018	1,017	1,015	1,016



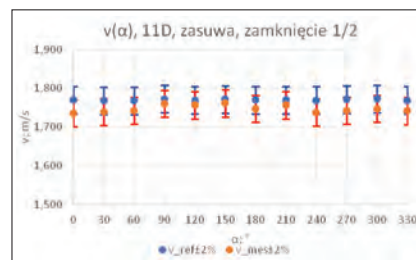
Rys. 6. Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 3D  
Fig. 6. Dependence of flow velocity on the angle of the ultrasonic heads at a 3D distance



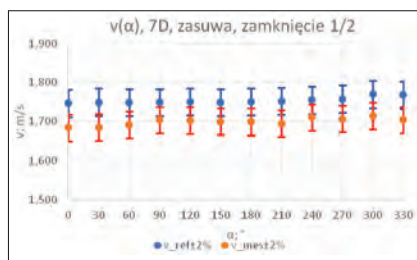
Rys. 9. Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 9D  
Fig. 9. Dependence of flow velocity on the angle of ultrasonic heads at a distance of 9D



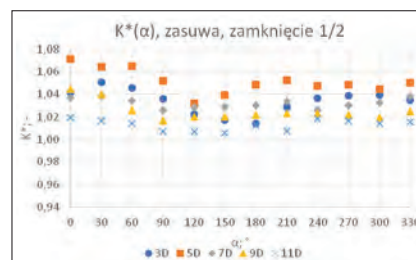
Rys. 7. Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 5D  
Fig. 7. Dependence of flow velocity on the angle of the ultrasonic heads at a distance of 5D



Rys. 10. Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 11D  
Fig. 10. Dependence of flow velocity on the angle of ultrasonic heads at a distance of 11D



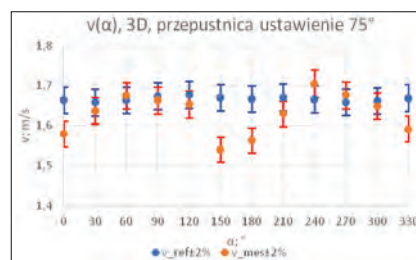
Rys. 8. Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 7D  
Fig. 8. Dependence of flow velocity on the angle of the ultrasonic heads at a distance of 7D



Rys. 11. Zależność wartości współczynnika  $K^*$  od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych i odległości montażu głowic od zasuw nożowej dla zamknięcia 1/2 wysokości zasuw  
Fig. 11. Dependence of the value of the  $K^*$  coefficient on the angle of the ultrasonic heads and the distance of the installation of the heads from the knife gate for the closing of 1/2 the height of the gate

### Wyniki pomiarów prędkości przepływu za przepustnicą

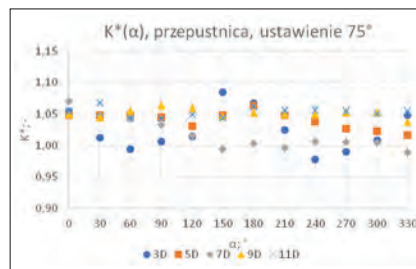
Badania za przeszkodą w postaci przepustnicy zostały wykonane dla ustawienia przepustnicy pod kątem  $75^\circ$  (tabela 2) (rys. 12 – rys. 17).



Rys. 12. Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 3D  
Fig. 12. Dependence of flow velocity on the angle of ultrasonic heads at a distance of 3D

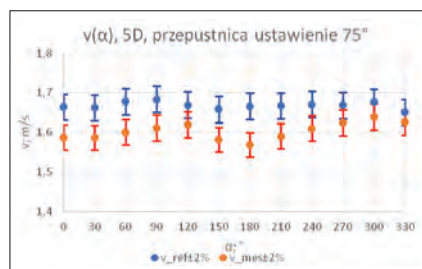
**Tabela 2. Dane pomiarowe dla badań prowadzonych przy ustawieniu przepustnicy w pozycji 75°**  
**Table 2. Measurement data for tests carried out with the throttle in the 75° position**

Distance	$\alpha_i$ , °	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
3D	$v_{ref}$ ; m/s	1,664	1,658	1,664	1,674	1,677	1,670	1,667	1,671	1,666	1,659	1,662	1,669
	$v_{mes}$ ; m/s	1,579	1,638	1,675	1,663	1,653	1,540	1,563	1,630	1,705	1,676	1,649	1,592
	K; -	1,054	1,012	0,993	1,007	1,015	1,084	1,067	1,025	0,977	0,990	1,008	1,048
5D	$v_{ref}$ ; m/s	1,664	1,662	1,678	1,684	1,669	1,658	1,666	1,667	1,671	1,668	1,676	1,651
	$v_{mes}$ ; m/s	1,587	1,586	1,600	1,611	1,619	1,581	1,568	1,590	1,610	1,624	1,639	1,625
	K; -	1,049	1,048	1,049	1,045	1,031	1,049	1,063	1,048	1,038	1,027	1,023	1,016
7D	$v_{ref}$ ; m/s	1,664	1,662	1,678	1,684	1,669	1,658	1,666	1,667	1,671	1,668	1,676	1,651
	$v_{mes}$ ; m/s	1,556	1,585	1,609	1,631	1,644	1,669	1,660	1,673	1,660	1,660	1,669	1,669
	K; -	1,069	1,049	1,043	1,032	1,015	0,993	1,004	0,996	1,007	1,005	1,004	0,989
9D	$v_{ref}$ ; m/s	1,664	1,662	1,678	1,684	1,669	1,658	1,666	1,667	1,671	1,668	1,676	1,651
	$v_{mes}$ ; m/s	1,585	1,592	1,592	1,585	1,577	1,585	1,585	1,589	1,592	1,585	1,592	1,592
	K; -	1,050	1,044	1,054	1,062	1,058	1,046	1,051	1,049	1,050	1,052	1,053	1,037
11D	$v_{ref}$ ; m/s	1,669	1,664	1,660	1,652	1,653	1,661	1,674	1,671	1,673	1,669	1,663	1,670
	$v_{mes}$ ; m/s	1,583	1,560	1,591	1,583	1,576	1,591	1,576	1,583	1,583	1,583	1,583	1,583
	K; -	1,054	1,067	1,043	1,044	1,049	1,044	1,062	1,056	1,057	1,054	1,051	1,055

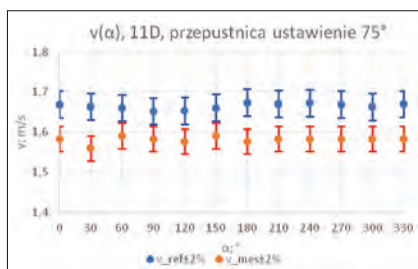


**Rys. 17.** Zależność wartości współczynnika  $K^*$  od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych i odległości montażu głowic od przepustnicy dla ustawienia przepustnicy w pozycji 75°  
**Fig. 17. Dependence of the value of the  $K^*$  coefficient on the angle of the ultrasonic heads and the mounting distance of the heads from the throttle for the throttle position of 75°**

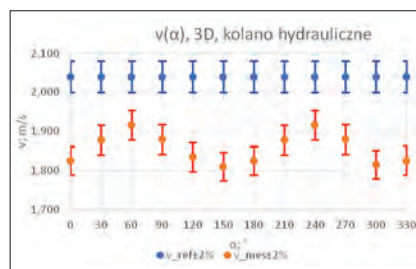
**Wyniki pomiarów prędkości przepływu za kolaniem hydraulicznym**  
 Badania za kolaniem hydraulicznym zostały wykonane dla odległości 3D – 11D (tabela 3) (rys. 18 – rys. 23).



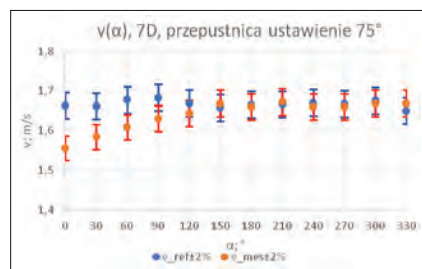
**Rys. 13.** Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 5D  
**Fig. 13. Dependence of flow velocity on the angle of ultrasonic heads at a distance of 5D**



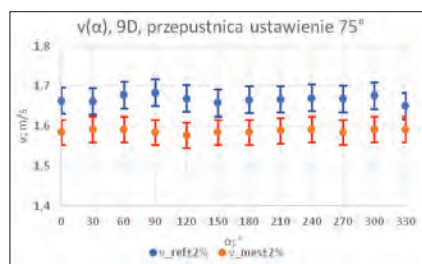
**Rys. 16.** Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 11D  
**Fig. 16. Dependence of flow velocity on the angle of ultrasonic heads at a distance of 11D**



**Rys. 18.** Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 3D  
**Fig. 18. Dependence of flow velocity on the angle of ultrasonic heads at a distance of 3D**



**Rys. 14.** Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 7D  
**Fig. 14. Dependence of flow velocity on the angle of ultrasonic heads at a distance of 7D**

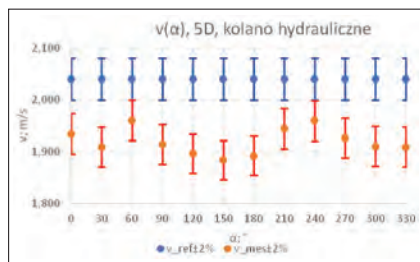


**Rys. 15.** Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 9D  
**Fig. 15. Dependence of flow velocity on the angle of ultrasonic heads at a distance of 9D**

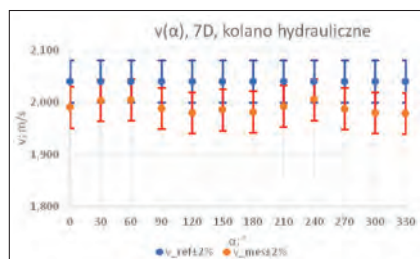
**Tabela 3. Dane pomiarowe dla badań prowadzonych za przeszkodą w postaci kolana hydraulicznego**  
**Table 3. Measurement data for tests conducted behind a hydraulic elbow obstacle**

Distance	$\alpha_i$ , °	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
3D	$v_{ref}$ ; m/s	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040
	$v_{mes}$ ; m/s	1,825	1,878	1,916	1,880	1,835	1,810	1,825	1,878	1,916	1,880	1,815	1,826
	K; -	1,118	1,086	1,065	1,085	1,112	1,127	1,118	1,086	1,065	1,085	1,124	1,117
5D	$v_{ref}$ ; m/s	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040
	$v_{mes}$ ; m/s	1,934	1,909	1,960	1,914	1,896	1,884	1,892	1,944	1,959	1,926	1,910	1,909
	K; -	1,055	1,069	1,041	1,066	1,076	1,083	1,078	1,049	1,041	1,059	1,068	1,069
7D	$v_{ref}$ ; m/s	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040
	$v_{mes}$ ; m/s	1,990	2,003	2,004	1,988	1,979	1,985	1,981	1,992	2,005	1,987	1,979	1,978
	K; -	1,025	1,018	1,018	1,026	1,031	1,028	1,030	1,024	1,017	1,027	1,031	1,031
9D	$v_{ref}$ ; m/s	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040
	$v_{mes}$ ; m/s	2,014	2,024	2,024	2,002	1,993	1,993	2,008	2,015	2,005	2,002	1,994	1,991
	K; -	1,013	1,008	1,008	1,019	1,024	1,024	1,016	1,012	1,017	1,019	1,023	1,025
11D	$v_{ref}$ ; m/s	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040	2,040
	$v_{mes}$ ; m/s	2,033	2,030	2,029	2,017	2,013	2,013	2,020	2,023	2,018	2,016	2,006	2,010
	K; -	1,003	1,005	1,005	1,011	1,013	1,013	1,010	1,008	1,011	1,012	1,017	1,015

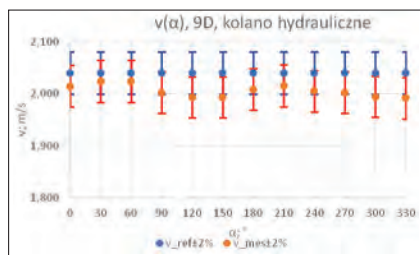




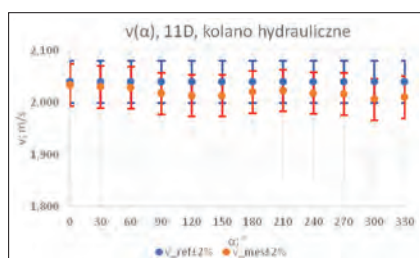
Rys. 19. Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 5D  
Fig. 19. Dependence of flow velocity on the angle of ultrasonic heads at a distance of 5D



Rys. 20. Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 7D  
Fig. 20. Dependence of flow velocity on the angle of ultrasonic heads at a distance of 7D



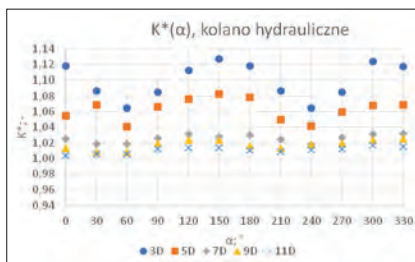
Rys. 21. Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 9D  
Fig. 21. Dependence of flow velocity on the angle of ultrasonic heads at a distance of 9D



Rys. 22. Zależność prędkości przepływu od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych w odległości 11D  
Fig. 22. Dependence of flow velocity on the angle of ultrasonic heads at a distance of 11D

### Podsumowanie wpływu różnego rodzaju przeszkód na rezultaty pomiaru prędkości

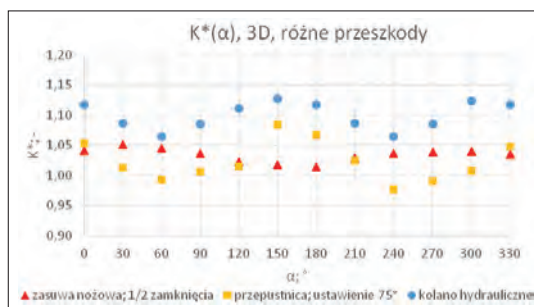
Zaprezentowane powyżej rezultaty pomiarów prędkości, wykonanych w niestandardowych warunkach pomiaru bezpośrednio za przeszkodami w postaci zasowy nożowej, przepustnicy i kolana hydraulicznego, zostały przedstawione zbiorczo na wy-



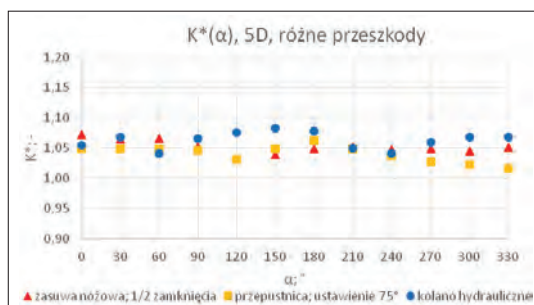
Rys. 23. Zależność wartości współczynnika  $K^*$  od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych i odległości montażu głowic od kolana hydraulicznego  
Fig. 23. Dependence of the value of the  $K^*$  coefficient on the angle of the ultrasonic heads and the distance of mounting the heads from the hydraulic elbow

kresach zależności współczynnika korekcyjnego  $K^*$  od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych dla kolejnych odległości dokonywania pomiaru (rys. 24 – rys. 28). Analiza wykresów zależności  $K^*(\alpha)$  pozwala

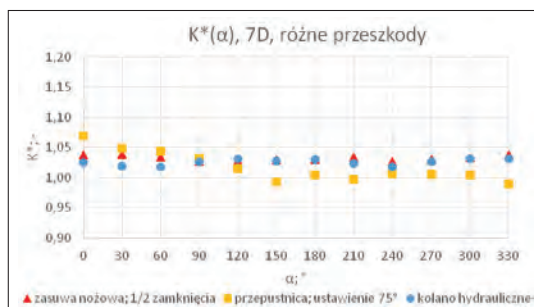
Rys. 24. Zależność wartości współczynnika  $K^*$  od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych dla różnych przeszkód zaburzających przepływ znajdujących się w odległości 3D od miejsca pomiaru  
Fig. 24. Dependence of the value of the  $K^*$  coefficient on the angle of the ultrasonic heads for various flow-disturbing obstacles located at a 3D distance from the measurement site



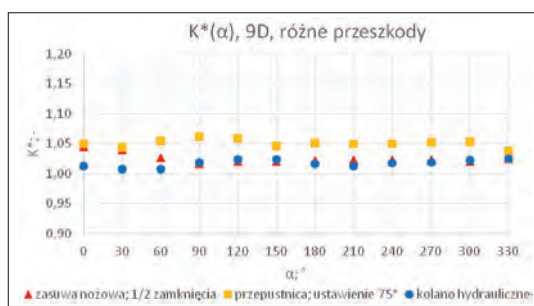
Rys. 25. Zależność wartości współczynnika  $K^*$  od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych dla różnych przeszkód zaburzających przepływ znajdujących się w odległości 5D od miejsca pomiaru  
Fig. 25. Dependence of the value of the  $K^*$  coefficient on the angle of the ultrasonic heads for various flow-disturbing obstacles located at a 5D distance from the measurement site



Rys. 26. Zależność wartości współczynnika  $K^*$  od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych dla różnych przeszkód zaburzających przepływ znajdujących się w odległości 7D od miejsca pomiaru  
Fig. 26. Dependence of the value of the  $K^*$  coefficient on the angle of the ultrasonic heads for various flow-disturbing obstacles located at a 7D distance from the measurement site



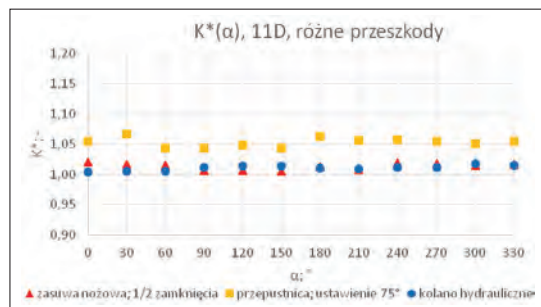
Rys. 27. Zależność wartości współczynnika  $K^*$  od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych dla różnych przeszkód zaburzających przepływ znajdujących się w odległości 9D od miejsca pomiaru  
Fig. 27. Dependence of the value of the  $K^*$  coefficient on the angle of the ultrasonic heads for various flow-disturbing obstacles located at a 9D distance from the measurement site



określić wpływ danej przeszkody na zaburzenie przepływu, a co za tym idzie na rezultat ultradźwiękowego pomiaru prędkości przepływu. Obserwacja zależności  $K^*(\alpha)$  na wspomnianych wykresach pozwala również określić optymalne miejsce do montażu głowic ultradźwiękowych i wykonania pomiaru.

### Wnioski i uwagi końcowe

W artykule przedstawiono wyniki badań prędkości przepływu zarejestrowane dzięki użyciu przepływomierza ultradźwiękowego typu transit-time z głowicami nakładanymi na rurociąg. Warto zaznaczyć, że pomiary wykonywane były bez zachowania określonych w normach i zaleceniach pomiarowych odcinków prostych rurociągu przed oraz za przeszkodami zaburzającymi przepływ. Taka sytuacja często zdarza



**Rys. 28.** Zależność wartości współczynnika  $K^*$  od kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych dla różnych przeszkód zaburzających przepływ znajdujących się w odległości 11D od miejsca pomiaru  
**Fig. 28.** Dependence of the value of the  $K^*$  coefficient on the angle of the ultrasonic heads for various flow-disturbing obstacles located at a 11D distance from the measurement site

się w przemysłowej praktyce pomiarowej i jest determinowana ograniczeniami geometrycznymi i dużymi średnicami rurociągów. Przeprowadzone badania były prowadzone w szerokim zakresie zmienności ustawień głowic ultradźwiękowych: kąta ustawienia głowic ultradźwiękowych  $\alpha$  w zakresie  $0^\circ - 360^\circ$  oraz odległości od przeszkody zaburzającej przepływ w zakresie 3D-11D. Uniwersalny charakter badań i wniosków pochodzących z ich analizy zapewniło użycie jako przeszkód trzech różnych elementów często używanych w instalacjach przepływowych: kolana hydraulicznego, zasuwę nożowej oraz przepustnicy.

Analiza wyników przedstawionych badań pozwala na identyfikację optymalnego punktu pomiarowego w odległości od przeszkody mniejszej niż określona w normach i zaleceniach. W tym celu należy sprawdzić, czy wartość obliczonego dla danych pomiarowych współczynnika  $K^*$ , mieści się w zakresie błęd granicznego  $\Delta g$  używanego przepływomierza tj. dla przeprowadzonych pomiarów w zakresie  $\langle 0,98 ; 1,02 \rangle$ .

Podsumowując rezultaty pomiarów przedstawione na wykresach rys. 6 – rys. 28 należy stwierdzić, że przeprowadzanie badań prędkości przepływomierzem ultradźwiękowym typu transit-time w warunkach niestandardowych za elementami powodującymi zaburzenia przepływu ma sens. Wskazania przepływomierza umiejscowionego za przeszkodą pokrywają się w większości przypadków (wraz z błędami granicznymi pomiarów) ze wskazaniami pomiaru wykonywanego przepływomierzem referencyjnym przed przeszkodą. Stopień zgodności wskazań obu przepływomierzy rośnie wraz ze zwiększaniem odległości od źródła zaburzenia, gdyż maleje wpływ zaburzenia przepływu generowanego przy przeszkodzie. Dobór optymalnego miejsca dokonania pomiaru powinien odbywać się z wykorzystaniem wiedzy o strukturze zaburzeń generowanych przez dany typ przeszkody zaburzającej przepływ i o rozkładzie prędkości przepływu [17 – 19] lub z wykorzystaniem symulacji przepływu przy użyciu metod numerycznych [16]. W oparciu o równania rozkładu prędkości przepływu zniekształconego przez daną przeszkodę możliwa jest kompensacja

błędu pomiarowego wykonywanego w odległości od źródła zaburzenia, mniejszej niż określona w normach przez wyznaczenie współczynnika korekcyjnego.

Pomiary wykonywane w warunkach niestandardowych były najbardziej wiarygodne, tj. zanotowano najmniejsze dysproporcje wskazań prędkości pomiędzy przepływomierzami, dla przeszkody w postaci zasuwę nożowej. Zasuwa nożowa o pionowej osi zamknięcia w trakcie wykonywania pomiarów była ustawiona w pozycji zamknięcia 1/2 wysokości zasuwę odpowiadającej zamknięciu ok. 40% powierzchni przepływowej. Wartości prędkości zmierzone za przeszkodą w postaci zasuwę nożowej pokrywają się (rys. 6 – rys. 11) (wraz z błędami pomiarów) praktycznie we wszystkich punktach pomiarowych z wartościami prędkości pomiaru referencyjnego. Mniejszy stopień pokrycia wskazań odnotowano dla przeszkody w postaci kolana hydraulicznego. Normy i zalecenia pomiarowe dla elementu tego typu [8] wskazują na konieczność zachowania odległości równej co najmniej 15D od kolana do miejsca montażu głowic ultradźwiękowych. Analizując wyniki pomiarów należy nadmienić, że zaburzenia przepływu powstałe za kolaniem hydraulicznym mają silny wpływ na błąd pomiarów wykonywanych bezpośrednio za tym elementem tj. w odległościach 3D oraz 5D (rys. 18 – rys. 19). W przekrojach pomiarowych usytuowanych w większych odległościach od kolana: 7D, 9D i 11D wskazania obu przepływomierzy (umieszczonego za kolaniem i referencyjnego) pokrywają się w zakresie błędów pomiarów (rys. 20 – rys. 22). Najmniejszy stopień pokrycia wskazań przepływomierzy odnotowano dla przeszkody w postaci przepustnicy. Opisane powyżej spostrzeżenia są doskonale widoczne na wykresach zbiorczych (rys. 24 – rys. 28).

#### BIBLIOGRAFIA

[1] M. Turkowski, Metrologia przepływów, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2018.  
 [2] E. Pistun i J. Stańda, Pomiary ilości oraz strumienia masy i objętości przepływających płynów., Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2006.  
 [3] S. Waluś, Przepływomierze ultradźwiękowe: Metodyka stosowania, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1997

[4] Y. Takeda i Y. Tasaka, „Ultrasonic Wave for Fluid Flow,” w *Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow*, Y. Takeda, Red., Tokyo, Springer Japan, 2012.  
 [5] Endress+HauserAG, „Technical Information Proline Prosonic Flow 93T Portable,” 01 07 2011. [Online]. Available: [https://portal.endress.com/wa001/dla/5000254/3000/000/02/TI00085DEN\\_1311.pdf](https://portal.endress.com/wa001/dla/5000254/3000/000/02/TI00085DEN_1311.pdf). [Data uzyskania dostępu: 21 05 2019].  
 [6] P. K. Normalizacyjny, Norma PN-M-42370, 1998.  
 [7] P. K. Normalizacyjny, Norma PN-EN ISO 5167-1:2000, 2000.  
 [8] P. K. Normalizacyjny, Norma PN-ISO 17089, 2013.  
 [9] H. Zhang, C. Guo i J. Lin, „Effects of Velocity Profiles on Measuring Accuracy of Transit-Time Ultrasonic Flowmeter,” *Applied Sciences*, 20 04 2019.  
 [10] R. S. Martins, J. R. Andrade i R. Ramos, „On the effect of the mounting angle on single-path transit-time ultrasonic flow measurement of flare gas,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020.  
 [11] S. Waluś, „SOME GUIDELINES FOR ULTRASONIC FLOWMETER SENSORS INSTALLATION FOR DISTORTED VELOCITY PROFILES,” *Molecular and Quantum Acoustics Volume 19*, pp. 91-102, 1998.  
 [12] S. Waluś, „THE USE OF THE ULTRASONIC FLOWMETER IN THE CONDITIONS OTHER THAN NORMAL,” *International Conference on Flow Measurement Melbourne 1985*, pp. 171-176, 20-23 08 1985.  
 [13] Sameh AlSaqaor, Ali Alahmer, Artur Andruszkiewicz, Piotr Piechota, Piotr Synowiec, Nabil Beithu, Wiesław Wędrychowicz, Elżbieta Wróblewska, Hussam Jouhara Ultrasonic technique for measuring the mean flow velocity behind a throttle: a metrological analysis. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022, vol. 34, art. 101402, s. 1-23.  
 [14] Piotr Synowiec, Artur Andruszkiewicz, Wiesław Wędrychowicz, Piotr Piechota, Elżbieta Wróblewska Influence of flow disturbances behind the 90° bend on the indications of the ultrasonic flow meter with clamp-on sensors on pipelines. *Sensors*. 2021, vol. 21, nr 3, art. 868, s. 1-23.  
 [15] Ahmad S. Awad\*, Zaid Abulghanam\*, Sayel M. Fayyad\*, Sameh AlSaqaor\*, Ali Alahmer\*, Nader Aljabarin\*, Piotr Piechota, Artur Andruszkiewicz, Wiesław Wędrychowicz, Piotr Synowiec Measuring the fluid flow velocity and its uncertainty using Monte Carlo method and ultrasonic technique. *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*. 2020, vol. 15, art. 17, s. 172-182.  
 [16] Piotr Piechota, Piotr Synowiec, Artur Andruszkiewicz, Wiesław Wędrychowicz; „Selection of the relevant turbulence model in a CFD simulation of a flow disturbed by hydraulic elbow : comparative analysis of the simulation with measurements results obtained by the ultrasonic flowmeter”; *Journal of Thermal Science*. 2018, vol. 27, nr 5, s. 413-420.  
 [17] L. A. Salami, „Errors in the velocity area method of measuring asymmetric flows in circular pipes,” *Modern developments in Flow measurement*, pp. 381-399, 21 September 1971.  
 [18] P. I. Moore, G. J. Brown i B. P. Stimpson, „Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology,” *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, pp. 1802-1810, 2000.  
 [19] Y. Pistun, V. Roman i F. Matiko, „Investigating the Ultrasonic Flowmeter Error in Conditions of Distorted Flow Using Multi-peaks Salami Functions,” *ERRORS AND UNCERTAINTY*, pp. 14-19, 24 10 2019.