

Właściwości metrologiczne i możliwości zastosowania przepływomierzy wirowych

Mirosław Kabaciński
Janusz Pospolita
Rafał Zamorowski

W artykule przedstawiono szereg przepływomierzy wirowych wykorzystujących zjawisko ścieżki wirowej von Karmana, a także ich rozwiązania konstrukcyjne jako urządzeń służących do pomiaru strumienia objętości oraz strumienia masy gazów i cieczy. Podano właściwości metrologiczne oraz możliwości zastosowania takich urządzeń. Przedstawiono również typy czujników pomiarowych zastosowanych w pierwszych jak i współczesnych przepływomierzach wirowych.

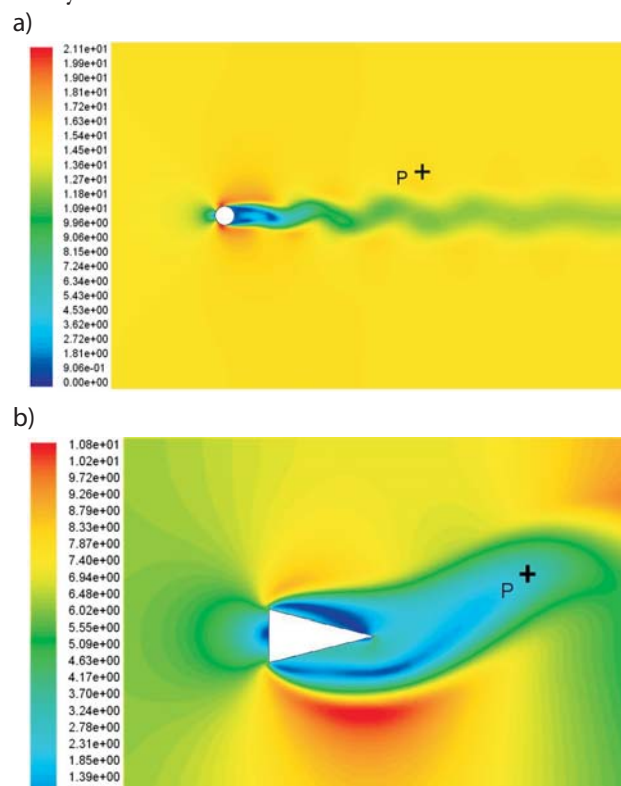
Pierwsze przepływomierze wirowe ukazały się na rynku amerykańskim i japońskim na początku lat siedemdziesiątych. Ich głównymi zaletami były stosunkowo mała strata ciśnienia na przepływomierzu, szeroki zakres temperatury mierzonego czynnika i brak części ruchomych. W początkowej fazie rozwoju tego typu przepływomierzy, ze względu na ograniczone możliwości ówczesnej elektroniki, główny nacisk kładziono na jakość przetwarzania sygnału pomiarowego. W późniejszym okresie więcej uwagi poświęcono samym generatorom wirów ścieżki von Karmana, koncentrując się na tym, aby generowany sygnał miał względnie dużą amplitudę, jak również aby generowana częstotliwość wirów zachowywała proporcjonalność do prędkości przepływu płynu. Ostatnie wymaganie jest spełnione, gdy charakteryzująca analizowany przepływ liczba Strouhala St zachowuje stałą wartość w możliwie szerokim zakresie zmian mierzonych strumieni.

Jedną z pierwszych firm, która wprowadziła na rynek swój przepływomierz, była Yokogawa. Współczesny rynek przepływomierzy wirowych oferuje szeroki wachlarz urządzeń, zróżnicowany pod względem sposobu detekcji ścieżki wirowej (metoda piezoelektryczna, ultradźwiękowa), sposobu zabudowy przepływomierza (pomiaru uśrednionego profilu prędkości lub prędkości lokalnej), jak i odmian wyposażonych w dodatkowe czujniki temperatury, pozwalające określić gęstość płynu, a docelowo strumień masy płynu.

Zasada działania przepływomierza

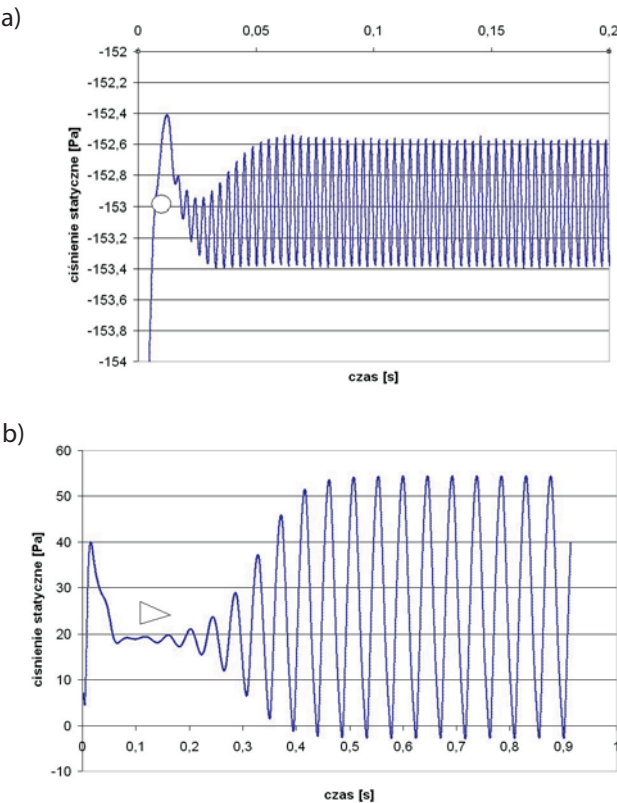
Przepływomierze wirowe mierzą częstotliwość pulsacji ciśnienia w płynie wywołanej przez ścieżkę wirową. Ścieżka ta wytwarzana jest przez generator wirów, umieszczony w strudze płynu. Struga, napotykając ciało, rozdziela się. Istnienie warstwy przyściennej po-

woduje, że płyn w bezpośrednim sąsiedztwie ciała porusza się wolniej niż w warstwach zewnętrznych. Na powierzchni opływającego ciała (po obu stronach) następuje oderwanie warstwy przyściennej. Dla małych wartości liczby Reynoldsa Re , charakterystycznych dla opływu, warstwy łączą się ponownie praktycznie zaraz za opływającym kształtem. Przy wzroście wartości liczby Re w odrywającej się warstwie przyściennej pojawiają się wiry. Następujące po sobie w jednoczesnych odstępach czasu, raz z jednej raz z drugiej strony, wiry tworzą ścieżkę wirową określaną również jako ścieżka wirowa von Karmana. Na rys. 1 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń rozkładów prędkości przy opływie dwóch różnych kształtów.



Rys. 1. Rozkłady prędkości wokół generatorów $Re = 1,1 \cdot 10^5$: a) walca, b) przekroju trójkątnego

dr inż. Mirosław Kabaciński, dr hab. inż. Janusz Pospolita, mgr inż. Rafał Zamorowski (doktorant)
– Wydział Mechaniczny Politechniki Opolskiej

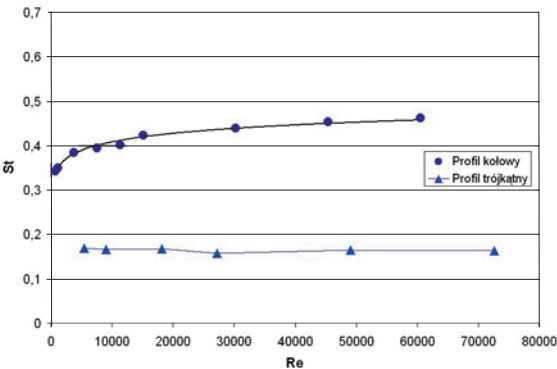


Rys. 2. Zmiany ciśnienia statycznego w punktach P (rys. 1) dla generatorów o przekrojach: a) kołowym, b) trójkątnym

Rys. 2 przedstawia zmiany ciśnienia w wybranych punktach zaznaczonych na rys. 1. Zmiany te wynikają z wirów okresowo spływających z generatora wirów. Symulacje numeryczne przeprowadzono Metodą Objętości Skończonych z użyciem oprogramowania Fluent. Zauważono, że dla pewnych profili generatorów częstotliwość odrywania się wirów jest proporcjonalna do prędkości przepływu. Można to zapisać następująco:

$$St = idem \tag{1}$$

gdzie $St = f \cdot D/w$ jest liczbą podobieństwa Strouhala, f – częstotliwością odrywania się wirów, w – prędkością przepływu płynu, a D – wymiarem charakterystycznym dla danego profilu. Na rys. 3 przedstawiono (dla profili z rys. 1) wyznaczoną numerycznie zależność liczby Strouhala w funkcji liczby Reynoldsa.



Rys. 3. Zależność liczby Strouhala w funkcji liczby Reynoldsa dla opływu generatora kołowego i trójkątnego

Zależność częstotliwości odrywania się wirów od prędkości przepływu jest podstawą omawianej metody pomiaru przepływu. W przepływomierzu wirowym strumień objętości płynu wyznacza się na podstawie pomiaru (wykonywanego jedną z kilku metod) częstotliwości generowania wirów na czujniku przepływomierza. Dolną granicę zakresu pomiarowego stanowi strumień, przy przepływie którego zanika generacja wirów, bądź towarzyszące im zmiany ciśnienia lub prędkości są zbyt małe, aby detektor mógł je wykryć. W zależności od kształtu generatora wirów, granica ta występuje dla liczb $Re=10^4-2 \cdot 10^4$. Górną granicę stanowi przepływ występujący, gdy ścieżka wirowa zanika, zmienia się wyraźnie współczynnik oporu aerodynamicznego, a za opływającym ciałem występuje ślad o intensywnej turbulencji. Nieliniowości przebiegu $St = f(Re)$ mogą być uwzględnione w mikroprocesorowych układach przetwarzania sygnału pomiarowego.

Budowa przepływomierza wirowego

Głównym elementem przepływomierza wirowego jest zanurzony w medium generator ścieżki wirowej von Karmana. Jest to podłużny profil mocowany na stałe w gardzieli przepływomierza. Do pomiaru pulsacji ciśnienia służy czujnik, z reguły piezoelektryczny, który jest przymocowany do generatora lub zespolony z osobnym elementem (skrzydełkiem) umieszczonym w medium. Aktualnie przepływomierze wirowe to urządzenia oparte przede wszystkim na czujnikach piezoelektrycznych.

Profile geometryczne generatorów, stosowane w przepływomierzach wirowych

Współcześnie stosowane profile generujące ścieżkę wirową są zróżnicowane pod względem konstrukcyjnym. Najczęściej spotykane są profile trójkątne, trapezoidalne i kołowe. W tab. 1 przedstawiono przykładowe profile generatorów stosowane w przepływomierzach wirowych.

Tab. 1. Kształty generatorów przepływomierzy dostępnych na rynku

Profil przepływomierza				
Phd firmy Emco [1]	VX firmy Aalborg [2]	Rosemount 8800D firmy Emerson [3]	firmy Racine [4]	podwójnego badanego w pracy [5]

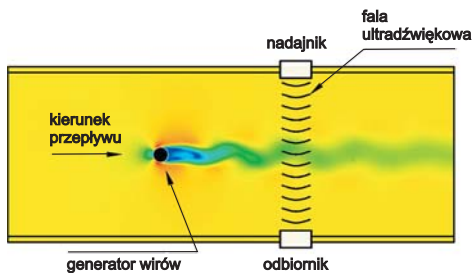
W pracy [6] sugeruje się, że jakość generowanej ścieżki wirowej z użyciem profili generatorów z ostrym końcem (przypadek b) z punktu widzenia metrologii przepływów jest niska. Wiąże się to z generacją wtórnej ścieżki wirowej, która zaburza amplitudę pulsacji ciśnienia ścieżki pierwotnej, tym samym osłabiając sygnał pomiarowy.

Obecnie wdrażane są urządzenia z podwójnym generatorem w układzie tandem [7, 8]. Zaletą tego typu rozwiązania jest zwiększenie pulsacji ciśnienia i – co jest z tym związane – zwiększenie mocy sygnału pomiarowego. Zadaniem optymalizacyjnym w generatorach typu tandem jest dobór odpowiedniego odstępu pomiędzy nimi.

Rodzaje stosowanych detektorów

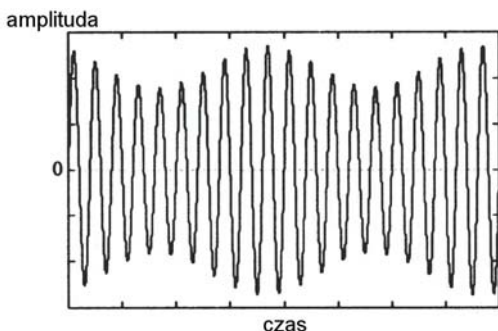
Detektory ultradźwiękowe

Do detekcji okresowych zmian w przepływie za generatorem stosowane są detektory ultradźwiękowe. W tym przypadku nadajnik i odbiornik są zamontowane za generatorem, w korpusie przepływomierza, prostopadle do kierunku przepływu (rys. 4).



Rys. 4. Zasada działania przepływomierza wirowego z detektorem ultradźwiękowym

Użycie fali ultradźwiękowej powoduje przesunięcie procesu mierzenia do obszaru wysokich częstotliwości (z około 500 Hz do 111 kHz). Zmienne parametry płynu w ścieżce wirowej powodują modulację amplitudy fali dźwiękowej. Tak fala dźwiękowa, jak i zaburzenie spowodowane wirami mają podobny charakter (ciśnieniowy), więc oddziałują na siebie. Po nałożeniu się obu fal, amplituda fali nośnej (ultradźwiękowej) zmienia się w sposób sinusoidalny z częstotliwością odpowiadającą przebiegowi ścieżki wirowej. Każdy wir generuje minimum w amplitudzie wysyłanego sygnału. Natężenie



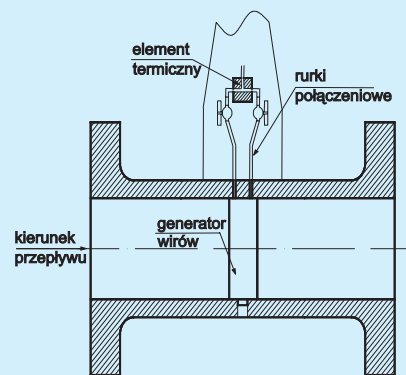
Rys. 5. Amplituda fali ultradźwiękowej po interferencji z zaburzeniami wywołanymi przez ścieżkę wirową [9]

dźwięku zmienia się wraz z temperaturą i ciśnieniem. Widmo sygnału po nałożeniu się obu fal zaprezentowane jest na rys. 5.

Zaletą przepływomierzy z detekcją ultradźwiękową jest ich duża czułość. Układ ultradźwiękowy nie wymaga aż tak wielkiej amplitudy pulsacji ciśnienia w porównaniu z przepływomierzami wyposażonymi w czujniki naciskowe piezoelektryczne (czujnik zespolony z generatorem lub ze skrzydełkiem). Również generator może mieć mniejszą średnicę, co zmniejsza stratę ciśnienia w przepływomierzu.

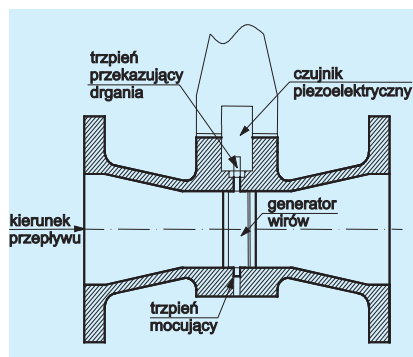
Detektory termiczne – czujniki pomiarowe we wczesnych modelach przepływomierzy

Jedne z pierwszych modeli przepływomierzy wirowych były wyposażone w układy pomiarowe z termooanemometrem (typu *hot wire*, *hot film*). Są to detektory, których podstawowym elementem jest grzane włókno. Opór elektryczny włókna zmienia się wraz z jego temperaturą. Włókno jest wpięte w mostek kompensujący Wheatstone'a, aby utrzymać stałą temperaturę mimo zmiennego odbioru ciepła, spowodowanego wahaniami prędkości medium. Zmiany natężenia prądu płynącego we włóknie odwzorowują zmiany prędkości w obszarze za generatorem. Dla gazów elementem kluczowym jest grzane włókno, natomiast w cieczach, gdzie siły masowe są większe i wymagana jest większa trwałość elementu cieplnego, stosuje się platynowe, platynowo-irydowe filmy napyłane np. na kwarcowe rdzenie. Urządzenia te najczęściej spotyka się w laboratoriach.

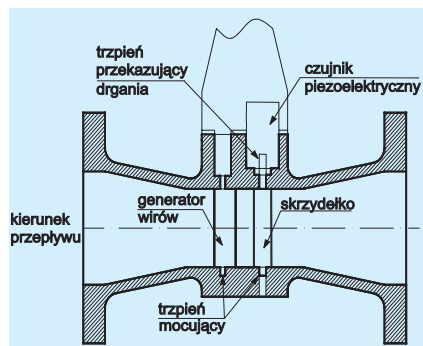


Rys. 6. Sposób zabudowy detektora termicznego termistorowego [10]

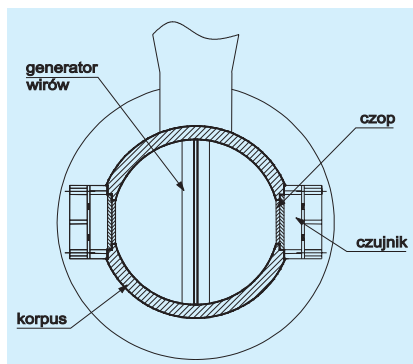
W instalacjach przemysłowych spotykane są natomiast urządzenia z ogrzewanym termistorem, pełniącym funkcję podobną do termooanemometru z grzanym włóknom. Przykładem takiego przepływomierza jest urządzenie zaprojektowane przez S. Bakera, R. Ennisa i P. Herndona [10]. Czujnik został umieszczony na zewnątrz korpusu przepływomierza; pulsacje ciśnienia przekazywane są do czujnika za pośrednictwem rurek połączeniowych, do obu stron generatora wirów. Gniazdo (korpus) czujnika jest wyposażone w zawory odcinające umożliwiające demontaż detektora bez ingerencji w układ przepływowy.



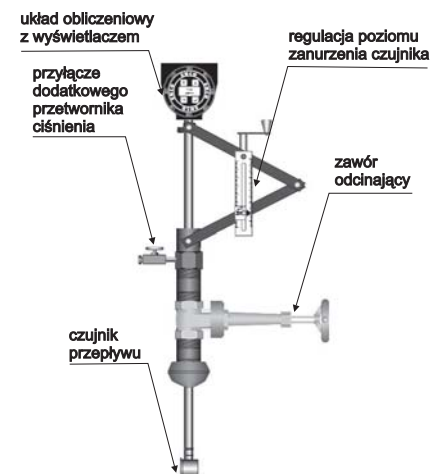
Rys. 7. Budowa przepływomierza wirowego z czujnikiem piezoelektrycznym zespolonym z generatorem



Rys. 8. Budowa przepływomierza wirowego z czujnikiem piezoelektrycznym zamocowanym w skrzydełku



Rys. 9. Budowa przepływomierza wirowego z czujnikiem ultradźwiękowym (nadajnik i odbiornik)



Rys. 10. Widok ogólny przepływomierza wirowego próbkującego firmy EMCO [12]

Detektory piezoelektryczne

Popularną metodą detekcji pulsacji ciśnienia jest metoda piezoelektryczna. Detektory te odpowiadają na oscylację ciśnienia niskonapięciowym sygnałem o takiej samej częstotliwości jak częstotliwość oscylacji. Czujniki mogą być zamontowane wewnątrz lub na zewnątrz korpusu przepływomierza. Na detektory wewnętrzne oddziałuje bezpośrednio ciśnienie pochodzące od pulsacji wirowych. Czujniki zewnętrzne umieszczone są poza kanałem przepływomierza i siły pulsacji ciśnienia pochodzące od ścieżki wirowej przekazywane są za pośrednictwem profilu, bądź osobnego elementu zwanego skrzydełkiem.

Detektory optyczne

Ciekawym rozwiązaniem jest układ optyczny składający się z diod laserowych. Różnice gęstości płynu wywołane przez wiry powodują załamanie wiązki światła, która jest emitowana przez diodę laserową, następnie skupiana przez zespół soczewek. Po refrakcji wiązka jest ponownie skupiana przez soczewki i kierowana do fotodiody. Moc diody jest rzędu 20 mW, długość fali wynosi 780 nm [11]. Takie rozwiązanie zastosowano do celów medycznych w aparacie do przyskręcania krwi.

Konstrukcja przepływomierzy

Na rys. 7 przedstawiono konstrukcję popularnego przepływomierza z czujnikiem piezoelektrycznym do zabudowy kołnierzowej. Generator wirów osadzony jest w korpusie przepływomierza za pomocą trzpienia; drgania wywołane przez powstałą ścieżkę wirową są przekazywane do czujnika piezoelektrycznego. Przepływomierze te coraz częściej są wyposażane w czujniki temperatury (zabudowane na profilu generującym ścieżkę), pozwalające pośrednio obliczyć strumień masy.

Inną odmianą konstrukcyjną jest model, gdzie funkcję generowania ścieżki wirowej i przekazywania drgań do czujnika rozdzielono na dwa elementy. Elementem przekazującym drgania czujnikowi jest skrzydełko zamocowane bezpośrednio za generatorem wirów. Jest to jeden z najczęściej spotykanych typów przepływomierzy wirowych dostępnych na rynku. Przykład konstrukcji takiego przepływomierza przedstawiono na rys. 8.

Rys. 9 przedstawia przepływomierz wyposażony w ultradźwiękową detekcję pulsacji ciśnienia. Przepływomierze wirowe z ultradźwiękową detekcją wirów cechują się mniejszym wymiarem charakterystycznym generatora, ze względu na dużą czułość układu pomiarowego.

Przepływomierze wirowe omówione wcześniej to urządzenia do zabudowy kołnierzowej, których pomiary prędkości odnoszą się do przepływu średniego. Do pomiaru prędkości lokalnej mogą posłużyć przepływomierze próbkujące z regulowaną głębokością zanurzenia czujnika. Mają one zastosowanie przy pomiarze profilu prędkości. Może on być również mniej dokładnym estymatorem prędkości średniej na danym promieniu w rurociągu. Na rys. 10 widzimy urządzenie typu próbkującego firmy EMCO V-Bar-600/60S.

Warunki pracy

Zaletą przepływomierzy wirowych jest możliwość pracy w dużym zakresie temperatury np. od temperatury -200°C , panującej w instalacjach kriogenicznych, do 450°C występującej przy przepływie pary przegrzanej. Zakres pomiarowy dla cieczy zawiera się w granicach od 0,3 m/s do 10 m/s, dla gazów od 2 m/s do 80 m/s. Dolne granice mierzonych wartości wynikają z faktu, iż przy małych prędkościach, np. dla gazów rzędu 1–3 m/s, wartość liczby Strouhala jest ściśle związana z liczbą Reynoldsa (ma przebieg nieliniowy) jak również pulsacje

ciśnienia są często niedostatecznie duże do poprawnej detekcji sygnału. Dolne wartości mierzonych strumieni określone są poprzez podanie minimalnej wartości liczby Re (określonej dla średnicy rurociągu). Na ogół minimalne wartości liczb Re mieszczą się w granicach 10^4 – $2 \cdot 10^4$. Niepewność pomiaru dla cieczy sięga 0,7–1 %, natomiast w przypadku gazów mieści się w granicach 1,2–1,5 % wartości strumienia objętości. Przepływomierze wirowe (ze względu na swoją konstrukcję) powodują niewielką stratę ciśnienia (pole powierzchni czołowej generatora zajmuje ok. 9 % przekroju przepływowego). W celu osiągnięcia jak największej dokładności pomiaru powinno się zapewnić możliwie długi, prosty odcinek rurociągu przed i za przepływomierzem (ze względu na szczególnie zaburzeniowy charakter pracy układu) oraz odpowiednio oddaloną lokalizację wszelkiej armatury. Przykładowe wymagania dotyczące zabudowy podano w tab. 2.

Tab. 2. Wymagania projektowe dotyczące zabudowy przepływomierza w rurociągu (producent EMCO, ONICON) [1, 13]

Element instalacji przed przepływomierzem	Producent			
	EMCO		ONICON	
	odległość przed przepływomierzem	odległość za przepływomierzem	odległość przed przepływomierzem	odległość za przepływomierzem
pompa	30D	10D	-	-
zawór	30D	5D	25D	5D
zwężka	10D	5D	10D	5D
ekspansja	20D	5D	10D	5D
kolano 90	9D	5D	10D	5D

Przykłady zastosowań

Przepływomierze wirowe znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Mogą służyć do pomiaru strumienia powietrza, gazu ziemnego, innych gazów i ich mieszanin, wody zasilającej kocioł, pary nasyconej, przegrzanej. Przepływomierze są przeznaczone do pomiaru cieczy czystych, czynników jednofazowych.

Ciekawym zastosowaniem jest pomiar strumienia helu w warunkach zmian ciśnienia w zakresie $p = 0,2 - 9$ MPa, przy wysokiej temperaturze rzędu $t = 350$ °C na rurociągu $\phi 8''$. Do pomiaru pulsacji ciśnienia zastosowany jest układ wyposażony w czujnik termiczny. Osiągnięto niepewność 1,75 % wartości mierzonej w zakresie gęstości 46:1 [10]. Kolejnym interesującym zastosowaniem jest pomiar strumienia wody tłoczonej do złoża ropy naftowej (zwiększenie ciśnienia w złożu i łatwiejsze jej wydobywanie). Proces ten odbywa się przy ciśnieniu $p = 29$ MPa i temperaturze $t = 90$ °C.

Przepływomierze wirowe są wrażliwe zarówno na pulsacje strumienia, jak również na wibracje rurociągów i innych elementów układów przepływowych, oraz na udary mogące w tych układach wystąpić. Jeśli częstotliwość pulsacji jest bliska częstotliwości wirów generowanych przez przepływomierz, trudno jest wyeliminować zakłócenia np. drogą filtracji mierzonego sygnału, a niepewność pomiaru może wzrosnąć do kilkunastu procent. Dlatego też, spodziewając się pulsacji strumienia w układzie pomiarowym, należy poszukiwać alternatywnych w stosunku do przepływomierza wirowego rozwiązań pomiaru strumienia. Wpływ wibracji, drgań oraz uderów na właściwości eksploatacyjne i metrologiczne były przedmiotem wielu badań, w wyniku których padły m.in. propozycje znacznego ich ograniczenia. W pracy [14] przedstawiono metodę eliminacji tego typu zakłóceń poprzez analizę falową i odpowiednią obróbkę sygnału pomiarowego. Jak podkreślają autorzy, metoda ta pozwala m.in. rozszerzyć dolną granicę zakresu pomiarowego, a także poprawić właściwości metrologiczne przepływomierza poprzez

Tab. 3. Zestawienie danych przepływomierzy wirowych dostępnych na rynku światowym

Producent		Zastosowanie	Typ czujnika
EMCO	Phd	para nasycona, przegrzana, woda, gaz ziemny, oleje, CO ₂ , powietrze, produkty ropopochodne	piezoelektryczny
Emmerson	Rosemount 8800D	para nasycona, woda powietrze, inne gazy i ciecze	
Aalborg	VX in line	para nasycona, powietrze, woda	
Onicon	seria F-2200	para nasycona, woda	
Racine	Seria RWG bezkołnierzowa	powietrze (do spalania, sprężone), gaz ziemny, azot, przemysł chemiczny, biogaz	ultradźwiękowy
	Seria RNG typu próbkującego	gaz ziemny, gaz odpadowy do spalania w pochodniach, biogaz	
	Seria RWL typ bezkołnierzowy	woda (chłodnie kominowe, komunalne oczyszczanie ścieków, woda kotłowa, baseny)	
Yokogawa	Model DY Reduced Bore	para nasycona, przegrzana, powietrze, ogólnie ciecze czyste i gazy	
Yokogawa	Model DY MV		

zwiększenie powtarzalności wskazań przyrządu. Podobne rozwiązanie problemu podaje się w [15], gdzie do analizy i przekształcenia sygnału pomiarowego proponuje się transformację Hilberta-Huanga. Analiza ta pozwala na wyodrębnienie z widma zmierzonego sygnału (zakłóconego różnymi przypadkowymi impulsami, niejednokrotnie o charakterze periodycznym) wartości impulsów generowanych przez czujnik przepływomierza. Podobnie jak w [7], autorzy stwierdzają, że metoda ta pozwala na obniżenie dolnej granicy zakresu pomiarowego oraz na zmniejszenie błędu pomiaru (w granicach 1 %) w warunkach występowania zakłóceń.

Odmienne rozwiązanie podaje się w [16]. Aby ograniczyć wpływ wibracji, a także przypadkowych zakłóceń w postaci uderzeń w układzie przepływowym, zaproponowano zasadniczo inny sposób montażu czujnika w generatorze drgań. Elastyczna otulina umożliwiła tłumienie drgań od przypadkowych zaburzeń (uderzeń) w układzie pomiarowym, a dolna analiza wielkości mierzonej właściwy sygnał do wyznaczenia strumienia płynu.

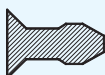
Kierunki rozwoju przepływomierzy wirowych

Współczesne badania przepływomierzy wirowych prowadzone są w dwóch kierunkach: pierwszy z nich doty-

czy urządzeń z podwójnym generatorem wirów (układ tandem) [7, 8, 17], drugi – urządzeń z ultradźwiękową detekcją pulsacji ciśnienia. Badania dotyczyły m.in. optymalizacji geometrii profilu trójkątnego, odległości między generatorami podwójnymi, jak i porównania siły pulsacji ciśnienia generowanego przez przegrody pojedyncze oraz podwójne [8]. Kryterium optymalizacyjnym było uzyskanie największych sił pulsacji ciśnienia i minimalnych oporów przepływu wytwarzanych przez generator. Pulsacje ciśnienia przy prędkościach z dolnej granicy zakresu pomiarowego przepływomierzy są niewielkie i często niewystarczające do wykrycia przez czujniki piezoelektryczne, celowe jest więc zwiększenie ich siły. W pracy [8], jako rozwiązanie optymalne proponuje się generator (podwójny) o wymiarach $d_1 = d_2 = 13$ mm (d_1 i d_2 to długości podstaw trójkątów skierowane czołowo i w kierunku prostopadłym do przepływu), $b_1 = b_2 = 17$ mm (wysokości trójkątów leżące w osi przepływu). Stwierdzono, że najsilniejsze i najbardziej regularne wiry są wytwarzane w odległości między profilami $L = 60 \div 65$ mm. Dla porównania, wymiary profilów stosowanych w urządzeniach z detekcją ultradźwiękową (dla profilu trójkątnego) wynoszą: długość podstawy trójkąta 4 mm, wysokość trójkąta 8 mm, natomiast dla profilu kołowego średnica $d = 3$ mm [1].

Drugim kierunkiem badań są prace nad doбором geometrii generatora przystosowanego specjalnie do

Tab. 4. Zestawienie właściwości metrologicznych przepływomierzy wirowych dostępnych na rynku światowym (dane wg producentów) [1-4, 13 12, 18]

Producent		EMCO	EMMERSON	AALBORG	ONICON
		Phd	Rosemount 8800D	VX in line	seria F-2200
Zakres pomiarowy strumienia objętości	gazy	7,8 ÷ 79 m/s	2 ÷ 76 m/s		6,4 ÷ 89,5 m/s
	ciecz	0,5 ÷ 9 m/s	0,22 ÷ 7,6 m/s	0,4 ÷ 8,6 m/s	–
Dolna granica zakresu pomiaru (dla śr. rurociągu)		$Re = 2 \cdot 10^4$	$Re = 10^4$ dla $\frac{1}{2}'' \div 4''$, $Re = 20000$ dla $6'' \div 12''$	$Re = 10^4$	–
Temperatura mierzonego medium		-40 °C ÷ 400 °C	-40 °C ÷ 232 °C opcja: -200 °C ÷ 427 °C	-73 °C ÷ 232 °C opcja: do 316 °C	maks. 240 °C
Kształt profilu (przegrody)					–
Niepewność		ciecz 0,7 % gaz 1,25 %	ciecz 0,65 % gaz 1,35 %	0,5 %	1 % dla $1'' \div 8''$ 2 % dla $3/8'' \div 3/4''$
Materiał korpusu		stal 316L, St 37, stop kwasoodporny C-22	316L	stal 304SS lub 316SS	stal 316L lub 304
Materiał przegrody		stal 316L, St 37, stop kwasoodporny C-23	316L	stal 304SS lub 316SS	Tytan
Odmiana		kołnierkowa, bezkolnierkowa	kołnierkowa, bezkolnierkowa, dual, redukcyjna	kołnierkowa	kołnierkowa

detekcji pulsacji ciśnienia falami ultradźwiękowymi. Ze względu na wysoką czułość takich układów nie jest wymagana aż tak duża amplituda pulsacji ciśnienia i, co za tym idzie, charakterystyczny wymiar liniowy generatora może również być mniejszy. W pracy [1] badano wpływ kształtu przegrody generującej na jakość otrzymanego sygnału pomiarowego przy użyciu techniki ultradźwiękowej. Kształty generatorów podzielono na dwie grupy: duże profile projektowane dla detekcji ciśnieniowej i profile o mniejszym wymiarze charakterystycznym, przeznaczone dla detektorów ultradźwiękowych. Do pierwszej grupy należały: 24-milimetrowy profil trójkątny i 10-milimetrowy profil typu T, natomiast do drugiej grupy zaliczono: 4-milimetrowy profil trójkątny i 3-milimetrowy gwintowany pręt. Stwierdzono, że najbardziej stabilna i powtarzalna ścieżka wirowa została osiągnięta dla gwintowanego pręta, a straty ciśnienia w porównaniu z dużymi generatorami przeznaczonymi dla detektorów ciśnieniowych były pomijalnie małe. W poniższej tabeli (tab. 4) przedstawiono właściwości metrologiczne komercyjnie dostępnych przepływomierzy wirowych.

Podsumowanie

Wśród różnych odmian przepływomierzy wirowych najbardziej obiecujące pod względem rozwojowym są urządzenia wyposażone w detektory ultradźwiękowe,

ze względu na dużą czułość układu pomiarowego, większą niż dla metod ciśnieniowych. Niewątpliwą zaletą przepływomierzy wirowych są niskie straty ciśnienia przepływającego medium w porównaniu z przepływomierzami kryzowymi (pole powierzchni czołowej generatora wirów w stosunku do przekroju przepływowego jest ok. 9 %). Przepływomierze te mogą również pracować w szerokim zakresie temperatury od -200 °C do 350 °C. Przepływomierze wirowe najczęściej stosowane są dla następujących prędkości:

- dla gazów od 2 m/s do 80 m/s
- dla cieczy od 0,3 do 10 m/s.

Minimalna liczba Reynoldsa przepływu, wymagana ze względu na liniowość charakterystyki przepływomierza w większości przypadków wynosi 10⁴. Ważnym aspektem od strony eksploatacji i serwisu jest brak ruchomych elementów. Większość dostępnych na rynku przepływomierzy to urządzenia z jednym generatorem, wyposażone w czujnik piezoelektryczny. Czujniki te wymagają wysokich pulsacji ciśnienia, dlatego też rozwijane są urządzenia z dwoma profilami w układzie tandem [7, 8, 17], mającymi zwiększyć amplitudę pulsacji ciśnienia. Nowsze rozwiązania wykorzystują technikę ultradźwięków do detekcji wirów. Ze względu na jej większą czułość można stosować generatory o mniejszych przekrojach, powodujące mniejsze straty ciśnienia w przepływie.

RACINE			YOKOGAWA	
Seria RWG bezkolnierzowa	Seria RNG typu próbującego	Seria RWL typ bezkolnierzowy	Model DY Reduced Bore	Model DY MV
30 ÷ 1018 m ³ /h	0,6 ÷ 43 m/s		2 ÷ 80 m/s	2 ÷ 80 m/s
-	-	0,6 ÷ 6 m/s	0,3 ÷ 10m/s	0,3 ÷ 10 m/s
			Re = 5000	Re = 5000
-28 °C ÷ 182 °C	-28 °C ÷ 182 °C	-28 °C ÷ 182 °C	-29 °C ÷ 260 °C -196 °C ÷ 100 °C -29 °C ÷ 450 °C	-29 °C ÷ 260 °C -196 °C ÷ 100 °C -29 °C ÷ 450 °C
			-	-
1 %	1 %	1 %	ciecz 0,75 %, gazy lub para 1 % dla v < 35 m/s 1,5 % dla 35 m/s < v < 80 m/s	2 % zmierzonej wartości strumienia masy
stal nierdzewna powlekana teflonem	stal nierdzewna powlekana teflonem	stal nierdzewna powlekana teflonem	stal nierdzewna CF8M	stal nierdzewna CF8M
-	-	-	stal nierdzewna CD4MCu	stal nierdzewna CD4MCu
bezkolnierzowa	typu próbującego	bezkolnierzowa	z redukcją wewnętrzną	z czujnikiem temperatury klasy A, (przeliczenie gęstości pary nasyconej ze zmierzonej temp.) pomiar strumienia masy

Bibliografia

1. *Dokumentacja techniczno-ruchowa przepływomierza wirowego PhD EMCO* www.emcoflow.com.
2. *Dokumentacja techniczno-ruchowa przepływomierza wirowego VX Vortex In Line Flowmeter*, www.aalborg.com.
3. *Dokumentacja techniczno-ruchowa przepływomierzy wirowych serii Rosemount 8800D.00813-0100- 4004, Rev BA*, www.emersonprocess.com/rosemount.
4. *Dokumentacja techniczno-ruchowa przepływomierza wirowego Racine*, www.racinevortex.com.
5. Igarashi T.: *Performance of new type vortex shedder for vortex flowmeter*, Fluocom 2000, Proceedings of the Sixth Triennial International Symposium on Fluid control, Measurement and Visualization, Canada.
6. Hans V., Windorfer H.: *Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flowmeters*, Measurement vol. 33, s. 121-133.
7. Bentley J. P., Benson R. A., Shanks A. J.: *The development of dual bluff body vortex flowmeters*, Flow Meas. Instrum. Vol. 7, s. 85-90, School of Science and Technology, The University of Teeside, UK.
8. Peng J., Fu X., Chen Y.: *Flow measurement by a new type vortex flowmeter of dual triangulate bluff body*, Sensors and Actuators A 115 (2004), s. 53-59, State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University China.
9. Lavante E., Perpeet S., Hans V., Poppen G.: *Vortex shedding flowmeters and detection: signal processing and influence of bluff body geometry*, Flow measurement and Instrumentation, vol. 9, s. 79-82, Institute of measurement and Control, Institute for Turbomachinery, University of Essen.
10. Baker S. P., Ennis R. M., Herndon P. G.: *Application of a vortex shedding flowmeter to the wide range measurement of high temperature gas flow*, Flow, its measurement and control in science and industry, vol. 2 1981 St. Louis.
11. Susumu Saito, Motonubu Hashimoto, Takashi Wada: *Development of Karman Vortex flowmeter by use of Laser diode – Measurement of flow rate in pipe with small cross section*. FLOMEKO'93, Preprints of the 6th International Conference on Flow Measurement, Seoul, Korea 1993.
12. *Dokumentacja techniczno-ruchowa przepływomierza wirowego Model V-Bar-600/60S, V-Bar-700, V-Bar-910/960 firmy EMCO*, www.emcoflow.com.
13. *Dokumentacja techniczno-ruchowa przepływomierza wirowego serii F-2200 Steam Meter*, www.onicon.com.
14. Tao Zhang, Hongjun Sun, Peng Wu: *Wavelet denoising applied to vortex flowmeters*, Flow Measurement and Instrumentation 15 (2004) 325-329
15. Sun Zhi-Qiang, Zhou Jie-Min, Zhou Ping: *Application of Hilbert-Huang transform to denoising in vortex flowmeter*, J. Cent. Univ. Technol. Vol.13 no 3 2005r
16. Y. Tanida, A. Okajima, Y. Watanabe: *Stability of a circular cylinder oscillating in uniform flow or in a wake*, J. Fluid Mech. 61 (4) (1973) 769-784.
17. Fu X., Chen Y.: *Effect of pressure unsteadiness on vortex shedding frequency from dual bluff body*, State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang Univ. China.
18. *Dokumentacja techniczna przepływomierzy digital YEWFLOW Vortex Flowmeter*, www.yokogawa.com.