

Analiza numeryczna wpływu kształtu generator wirów na tworzenie się ścieżki wirowej von Karmana

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę numeryczną wpływu kształtu generatora wirów na podstawowe parametry przepływomierza wirowego. Zalicza się do nich częstotliwość generowanych wirów, wartość sygnału mierzonego oraz regularność zmian częstotliwości generowanych wirów. Modyfikacje poszczególnych płaszczyzn generatora wirów powodują zmianę charakterystyki przepływomierza oraz mają wpływ na stabilność ścieżki wirowej von Karmana

Abstract. The paper presents the numerical analysis of the effect of the shape of the vortex shedder bar on the basic parameters of the vortex flowmeter. These include the frequency of generated vortices, the value of the measured signal and the frequency of the vortices. Modifications of the individual surfaces of the vortex shedder bar cause changes in the flowmeter characteristics and affect on the stability of the von Karman vortex street. (Numerical analysis of influence of vortex shedder bar shape on generated von Karman vortex street).

Słowa kluczowe: przepływomierz wirowy, generator wirów, ścieżka wirowa von Karmana, symulacja numeryczna

Keywords: vortex flow meter, vortex shedder bar, von Karman vortex street, numerical simulation

Wstęp

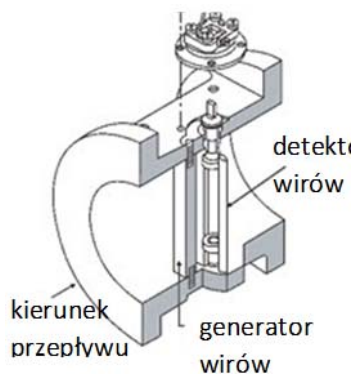
Przepływomierze wirowe są urządzeniami pomiarowymi, które mogą być zastosowane do pomiaru cieczy o różnych gęstościach i lepkościach oraz są odporne na zanieczyszczenia cieczy. Zaletą tych urządzeń jest bardzo niewielki spadek ciśnienia na przepływomierzu. Przepływomierze te mają jednak stosunkowo wąski zakres pomiarowy [1,2].

Zasada działania przepływomierza wirowego polega na wytworzeniu regularnych wirów, których częstotliwość jest funkcją przepływu. Wiry są wytwarzane za przeszkodą, której kształt ma bezpośredni wpływ na czułość i zakres pomiarowy przepływomierza. Unormowana częstotliwość wirów jest miarą prędkości przepływu strugi i wyrażona jest liczbą podobieństwa Strouhala [3]:

$$(1) \quad St = \frac{f \cdot d}{v}$$

gdzie: St – liczba Strouhala, f – częstotliwość generowanych wirów, d – wymiar charakterystyczny przeszkody, v – średnia prędkość przepływu.

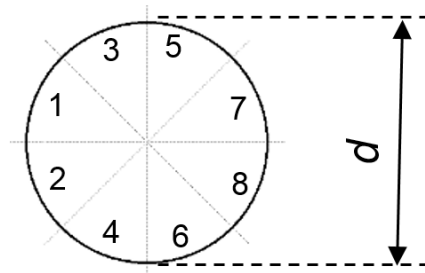
Na rysunku 1 przedstawiono typową konstrukcję przepływomierza [2]. Składa się on z generatora wirów, który zakłóca przepływ. Za generatorem tworzy się ścieżka wirowa von Karmana. W pewnej odległości za generatorem umieszczony jest detektor. Najczęściej jest nim czujnik ciśnienia o dużej dynamice pomiarowej. Sygnał z czujnika ciśnienia przetwarzany jest w układzie elektronicznym, celem określenia częstotliwości zmian ciśnienia.



Rys. 1. Budowa przepływomierza wirowego [2]

Generator ma istotny wpływ na charakterystykę i własności metrologiczne przepływomierza [4]. Bardzo istotne jest to aby generator zapewniał tworzenie się regularnych wirów. W wielu pracach badawczych opisano generatory w kształcie walca [5, 6, 7], ten kształt będzie również punktem odniesienia w niniejszej pracy. Kształt cylindryczny może być stosowany jedynie w wąskim zakresie pomiarowym, z uwagi na brak możliwości zapewnienia stabilnych wirów [8]. Ponieważ rozmiar oraz kształt generatora wirów odgrywa istotną rolę w poprawnej pracy przepływomierza wirowego [9,10], stąd celowe jest poszukiwanie nowych kształtów [11, 12].

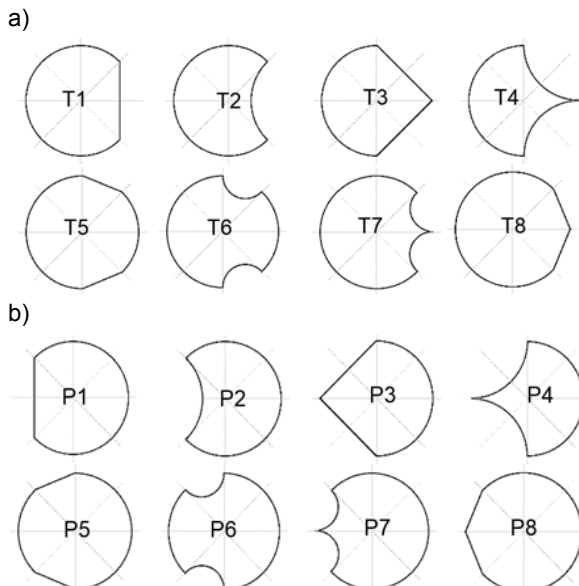
W chwili obecnej na rynku dostępnych jest wiele profili generatorów wirów. Jednak nie opracowano uniwersalnego kształtu generatora, stąd badania nad wpływem kształtu generatora na parametry przepływomierza jest tematem wciąż aktualnym. Praca jest poświęcona analizie numerycznej wpływu wybranych powierzchni generatora wirów na wybrane parametry przepływomierza wirowego.



Rys. 2. Podstawowy kształty generatorów wirów

Jako kształt podstawowy przyjęto walec o średnicy d=20 mm. (rys.2). Podzielono go na osiem symetrycznych części tak aby cztery z nich tworzyły powierzchnię natarcia, a pozostałe cztery powierzchnię spływu.

W celu określenia jaki wpływ mają poszczególne płaszczyzny na parametry ścieżki wirowej von Karmana dokonywano modyfikacji pojedynczych symetrycznych powierzchni. W wyniku czego otrzymano kształty w dwóch grupach. Pierwszą grupę stanowią kształty w których dokonano zmian w płaszczyźnie natarcia (rys. 3a). Drugą grupę stanowią kształty powstałe w wyniku zmian powierzchni spływu (rys. 3b).



Rys. 3. Kształty powstałe w wyniku modyfikacji powierzchni a) natarcia b) spływu

Metoda numeryczna

Do modelowania złożonych zagadnień przepływowych najczęściej wykorzystuje się metody numeryczne – CFD (Computational Fluid Dynamics). Modelowanie oparte jest na teorii Reynoldsa, zakładającej, że ruch płynu może być identyfikowany jako superpozycja ruchu średniego i fluktuacyjnego. Założenie to powoduje, że przekształca się równania Naviera – Stokesa do formy zawierającej dodatkowo tensor naprężeń turbulentnych. Powoduje to że w układzie równań pojawiają się dodatkowe niewiadome. W związku z tym równania Reynoldsa uzupełnia się dwuwymiarowymi modelami turbulencji takimi jak $k - \epsilon$ lub $k - \omega$ [11]. Różnorodność modeli numerycznych powoduje, że celowe jest wybranie metody numerycznej która w zadowalający stopniu będzie symulowała proces powstawania wirów von Karmana.

Model $k - \epsilon$ jest jednym z najpopularniejszych modeli, który obecnie stosowany jest do modelowania płynu nieściśliwego, o niewielkich prędkościach. W modelu $k - \epsilon$ występują dodatkowe równania różniczkowe transportu kinetycznej energii turbulencji k oraz dyssypacji energii kinetycznej turbulencji ϵ . [11].

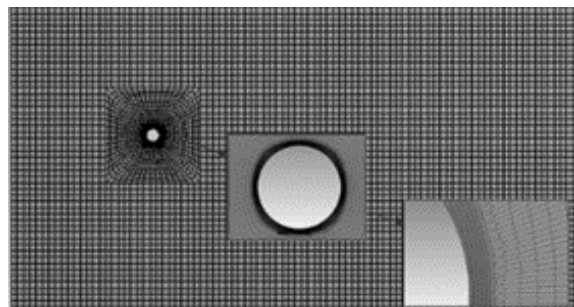
Model $k - \omega$ uwzględnia związek pomiędzy wirowością, a energią kinetyczną turbulencji [13]. Model $k - \omega$ oprócz rozwiązania energii kinetycznej turbulencji rozwiązuje człon właściwej prędkości dyssypacji energii. W modelu $k - \omega$ tak jak w $k - \epsilon$, k oznacza energię kinetyczną turbulencji, a ω została określona jak stosunek prędkości dyssypacji energii ϵ do energii kinetycznej k .

Nieco odmienne podejście rozwiązywania równań przepływu zastosowano w metodzie DNS (Direct Numerical Simulation). Polega ona na bezpośrednim rozwiązywaniu równań Naviera-Stokesa, bez wprowadzania dodatkowych modeli turbulencji [11]. Metoda DNS pozwala na bezpośrednie rozwiązanie przepływu wirowego w całym jego zakresie burzliwości, lecz wymaga bardzo gęstych siatek obliczeniowych, co znacząco wydłuża czas obliczeń. Zaletą metody DNS jest dobre odtworzenie dynamiki turbulencji.

Do uzyskania poprawnych wyników symulacji numerycznej, konieczne jest zastosowanie odpowiedniego modelu oraz określenie właściwych warunków brzegowych. W literaturze przedstawiono wiele zasad określających zakres stosowalności poszczególnych modeli obliczeniowych oraz wymagania jakie musi spełnić dyskretyzowany obszar

[12,13]. W związku z tym postanowiono przeprowadzić badania testowe wybranych modeli obliczeniowych celem wyboru optymalnego modelu do obliczeń w omawianym zagadnieniu.

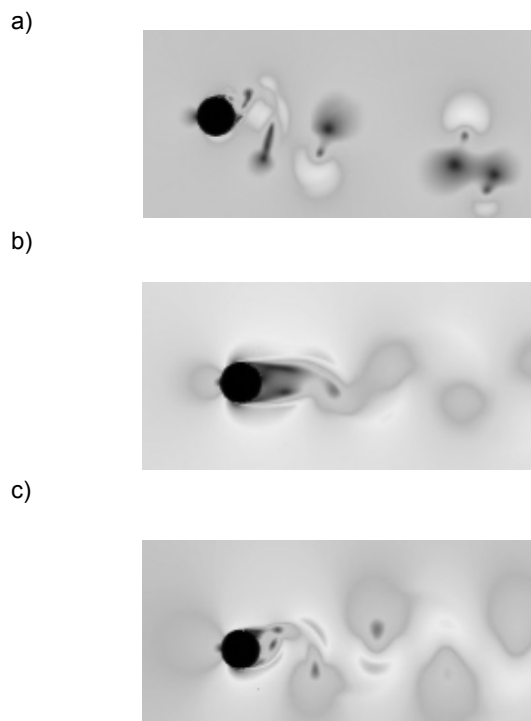
Celem doboru optymalnego modelu obliczeniowego przygotowano siatkę obliczeniową dla prostokątnego kanału o długości $L1=900\text{mm}$ i szerokości $L2=600\text{mm}$, wewnątrz którego umieszczono prostopadle do przepływu cylinder o średnicy 20mm (rys.3). Szerokość kanału dobrano tak, aby wyeliminować wpływ ścianek kanału na generację wirów powstałych za cylindrem.



Rys. 3. Siatka obliczeniowa

Dla obszaru badawczego wygenerowano siatkę blokowo – strukturalną składającą się z czworokątnych elementów o zróżnicowanym kształcie i wymiarach. Największe zagęszczenie siatki występuje w obszarze bezpośrednio przyległym do generatora wirów.

Dla tak wygenerowanej siatki przeprowadzono serię obliczeń dla wybranych modeli turbulencji. W obliczeniach założono, że wyniki zostaną porównane dla chwili czasowej $t=3\text{s}$ i założenia, że ciecz na wlocie ma stałą i równomierną prędkość $v=1\text{m/s}$.

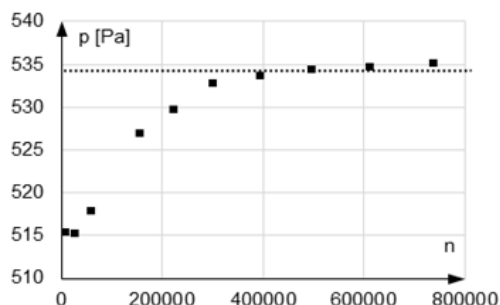


Rys. 4. Wyniki symulacji dla modeli a) DNS, b) $k - \epsilon$, c) $k - \omega$

Na rysunku 4a przedstawiono wyniki symulacji dla metody DNS. Wynika stąd, że wyniki obliczeń nie są stabilne. Jest to spowodowane zbyt małą liczbą elementów

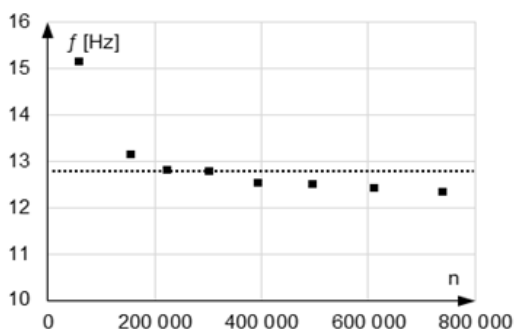
siatki. Zwiększenie liczby elementów siatki spowoduje znaczne zwiększenie czasu obliczeń lub będzie wymagało użycia maszyny obliczeniowej o dużo większej mocy obliczeniowej. Stabilne wyniki symulacji uzyskano dla modeli $k - \epsilon$ i $k - \omega$ (rys.4b i 4c). Jednak dla modelu $k - \epsilon$ obserwuje się nieprawidłowości w obszarze splotu strugi, za generatorem. Metoda ta nie w pełni oddaje dynamiczny charakter zjawiska opływu. Na podstawie tej analizy optymalnym modelem nadającym się do symulacji ścieżki wirów von Karmna jest metoda $k - \omega$.

W przepływomierzu wirowym bardzo istotna jest stabilna wartość częstotliwości wirów, gdyż bezpośrednio wpływa ona na dokładność pomiaru. Drugim ważnym parametrem jest amplituda zmian ciśnienia wywołana wirami, gdyż od tego zależy czułość przepływomierza. Dlatego te dwa parametry przyjęto jako kryterium oceny optymalnej gęstości siatki obliczeniowej. Wygenerowano dziesięć różnych gęstości siatek, zaczynając od siatki składającej się z 7 395 elementów oraz 7 666 węzłów, a kończąc na siatce składającej się z 738 815 elementów oraz 740 682 węzłów.



Rys. 5. Uśrednione wartości amplitudy zmian ciśnienia w zależności od liczby elementów siatki obliczeniowej

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki obliczeń uśrednionych zmian amplitudy ciśnienia w zależności od liczby elementów siatki. Z kolei na rysunku 6 przedstawiono wyniki obliczeń uśrednionych wartości częstotliwości powstających wirów. Na tej podstawie stwierdzono, że optymalną wartością jest liczba elementów siatki, która zawiera się w przedziale od 350 000 – 500 000 elementów. Zakres ten gwarantuje uzyskanie stabilnej wartości amplitudy ciśnienia oraz częstotliwości. Zwiększenie liczby elementów siatki poza ten zakres nie będzie poprawiało znacząco uzyskanych wyników a jedynie zwiększy czas obliczeń. Po przeprowadzeniu analizy uzyskiwania niezmiennych wyników zarówno wyliczonej częstotliwości oraz amplitudy ciśnienia przyjęto, że liczba elementów siatki dla kształtu cylindrycznego wyniesie 396 031 elementów i 400 848 węzłów.



Rys. 6. Uśrednione wartości częstotliwości powstających wirów w zależności od liczby elementów siatki obliczeniowej

Wyniki badań numerycznych

W celu określenia wpływu kształtu generatora na rodzaj generowanych wirów przeprowadzono symulacje dla

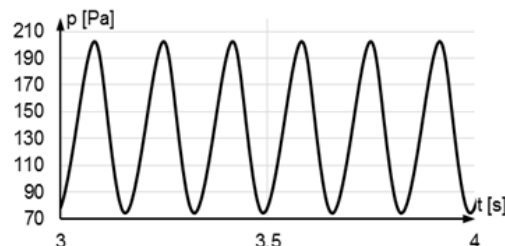
różnych prędkości przepływu, 0.5m/s, 1m/s, 2m/s. Równania modelu matematycznego rozwiązano metodą objętości skończonych z użyciem programu ANSYS Fluent. Użyto model turbulencji $k - \omega$ SST [11] dla dwuwymiarowego pola prędkości i przepływu niestacjonarnego przy kroku czasowym rzędu 10^{-4} : 10^{-5} . Obliczenia przeprowadzono dla założenia, że na wlocie do kanału występuje równomierny rozkład prędkości oraz dla parametrów reologicznych cieczy odpowiadających wodzie.

Wyniki obliczeń odniesiono do wartości dla kształtu podstawowego (rys2a). Dla tego kształtu uzyskano regularne i stabilne wyniki dla prędkości strumienia cieczy 0.5 m/s, 1 m/s i 2 m/s. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 1.

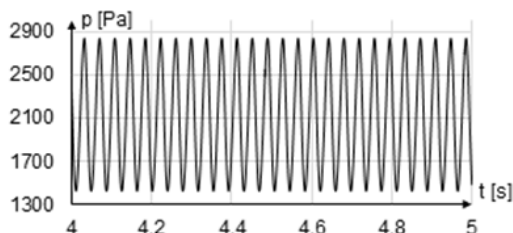
Tabela 1 Wyniki obliczeń dla kształtu generatora z rysunku 2a

v	f	Δp
0.5 m/s	6 Hz	128 Pa
1 m/s	12 Hz	442Pa
2 m/s	26 Hz	1529 Pa

a)



b)



Rys. 7. Przebieg zmian ciśnienia za generatorem wirów dla a) $v = 0.5$ m/s b) $v = 2$ m/s

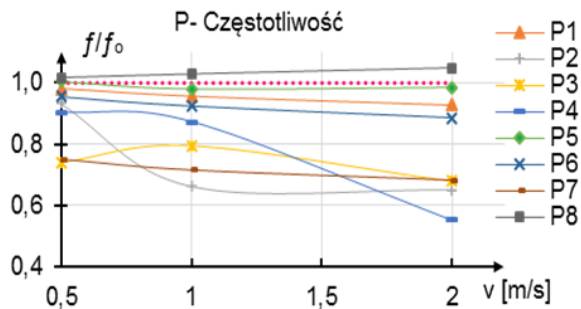
Celem badań jest określenie wpływu powierzchni opływu na częstotliwość, ciśnienie i stabilność powstawania wirów. Przeprowadzono badania numeryczne dla kształtów generatorów wirów z różną modyfikacją powierzchni natarcia i splotu (rys. 3). Na parametry przepływomierza bardzo istotny wpływ ma częstotliwość generowanych wirów. Wartość o ile zmienia się częstotliwość w zależności od zmian mierzonego strumienia płynu, stanowi bezpośrednio przełożenie na czułość przepływomierza.

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki porównania wartości zmian częstotliwości generowanych wirów dla generatora z różną modyfikacją powierzchni natarcia i splotu, w stosunku do generatora w kształcie walca. Wyniki przedstawiono jako stosunek wartości badanego generatora do wartości odniesienia z indeksem „o”. Wartość odniesienia jest wartością jaką generuje generator w kształcie walca (tabela1).

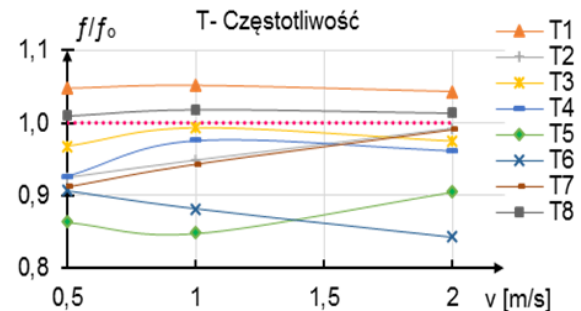
Modyfikacje, które korzystnie wpływają na czułość przepływomierza charakteryzuje nachylenie charakterystyki. Znaczący przyrost stosunku f/f_o świadczy o tym że uzyskuje się większą czułość pomiarową w przypadku zastosowania danej modyfikacji. Analizując wyniki przedstawione na rysunku 8a. Stwierdza się że jakiegokolwiek modyfikacje

powierzchni natarcia obniżają czułość przepływomierza. Dla modyfikacji powierzchni spływu poprawę czułości przepływomierza uzyskuje się dla kształtów T2 i T7. Kształty posiadają ostrą krawędź, która ułatwia odrywanie się wirów.

a)

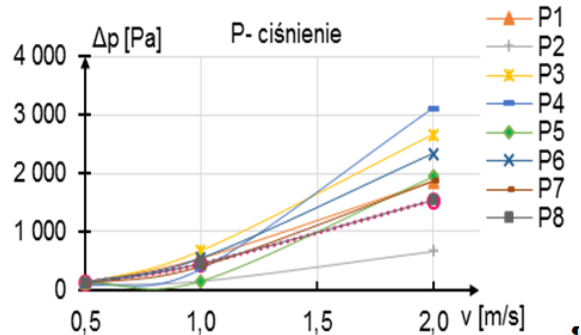


b)

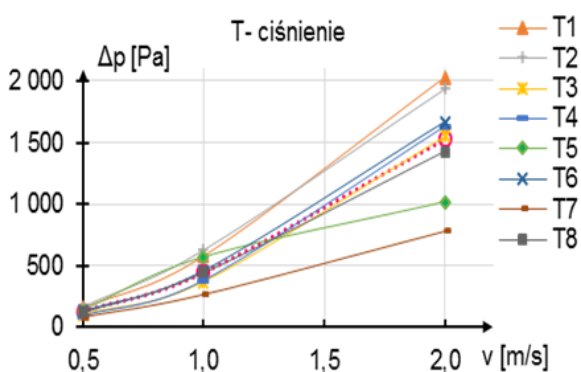


Rys. 8. Wpływ modyfikacji kształtu generatora na częstotliwość generowanych wirów a) dla modyfikacji powierzchni natarcia (kształty P1 do P7) b) dla modyfikacji powierzchni spływu (kształty T1 do T7)

a)



b)

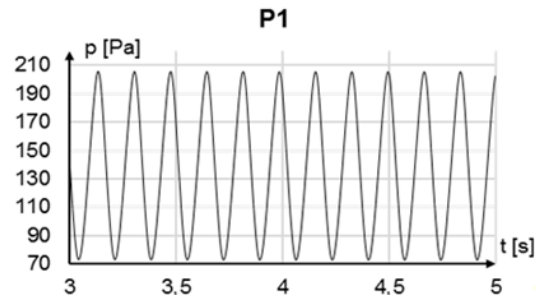


Rys. 9. Wpływ modyfikacji kształtu generatora na zmiany ciśnienia za generatorem wirów a) dla modyfikacji powierzchni natarcia (kształty P1 do P7) b) dla modyfikacji powierzchni spływu (kształty T1 do T7)

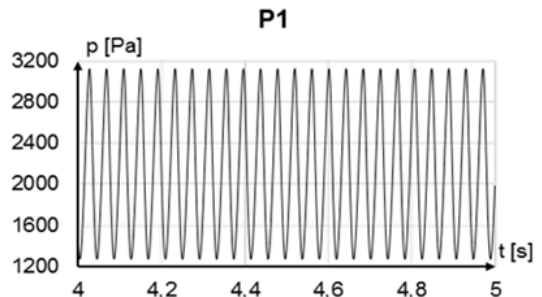
Innym parametrem poprawiającym własności przepływomierza jest wartość zmian ciśnienia generowanych wirów. Parametr ten powoduje, że wyższe zmiany ciśnienia poprawiają wartość stosunku sygnału do szumu.

Rysunek 9 przedstawia wyniki wpływu modyfikacji powierzchni natarcia i spływu na amplitudę zmian ciśnienia za generatorem wirów. Modyfikacja powierzchni natarcia polecająca na zwiększeniu współczynnika oporu powoduje wzrost różnicy ciśnień za generatorem wirów, co poprawia własności przepływomierza (rys.9a). Powoduje to jednak, że charakterystyka staje się bardziej nieliniowa. Poprawa stosunku sygnału do szumu będzie szczególnie dostrzegalna dla dużych przepływów (rys.9b).

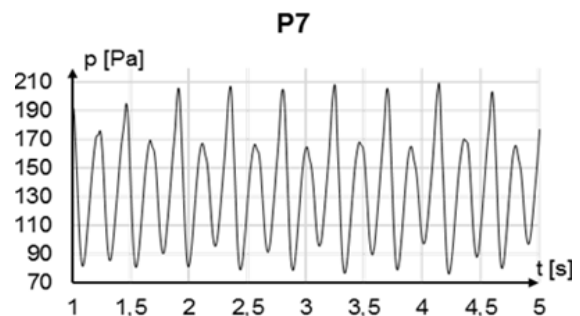
a)



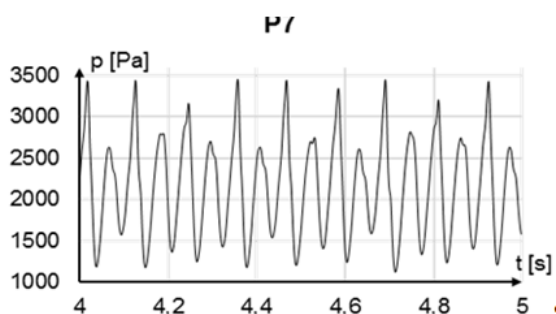
b)



c)

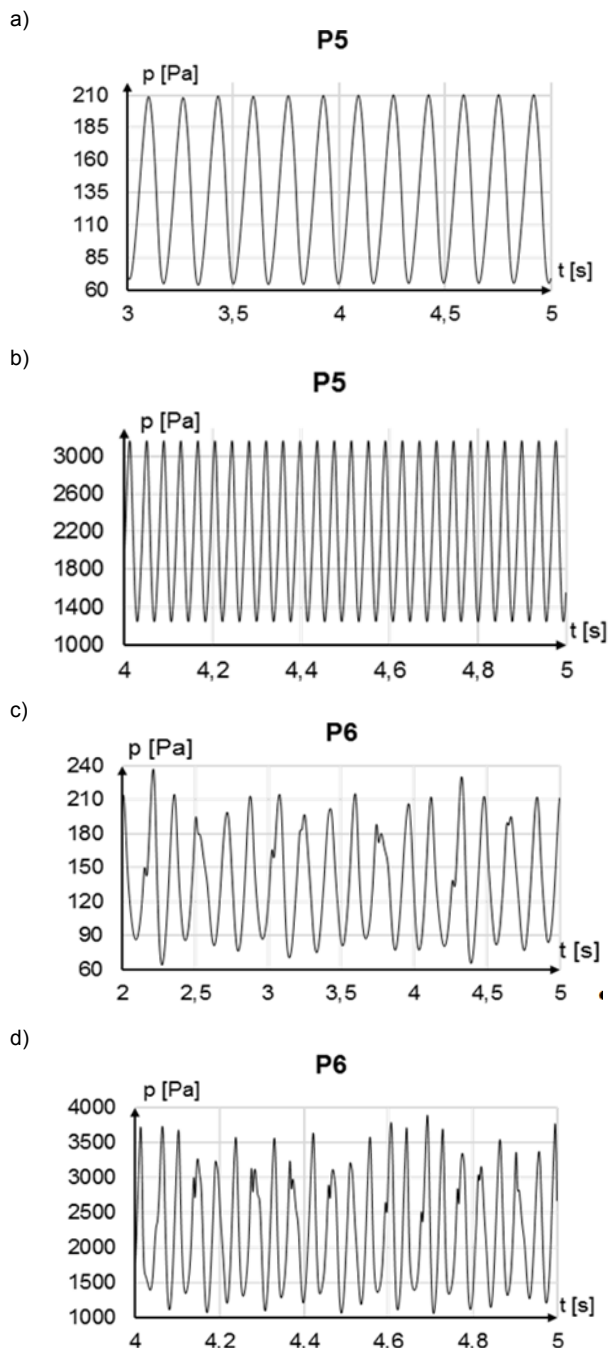


d)



Rys. 10. Wpływ modyfikacji kształtu powierzchni 1 i 2 na regularność powstawania wirów a) dla P2 przy $v = 0.5 \text{ m/s}$ b) dla P2 przy $v = 2 \text{ m/s}$ c) dla P7 przy $v = 0.5 \text{ m/s}$ d) dla P7 przy $v = 2 \text{ m/s}$.

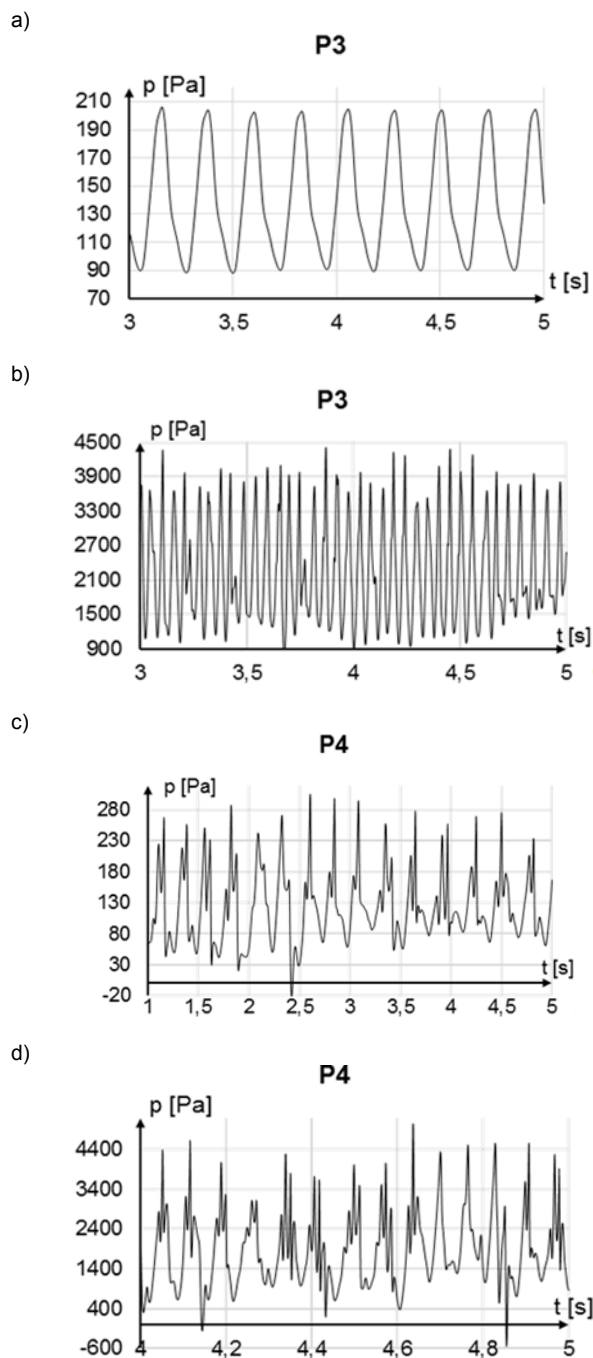
Przeprowadzono ponadto badania mające na celu określenie wpływu zmian kształtu powierzchni natarcia na stabilność ścieżki wirowej. Wprowadzenie modyfikacji dla powierzchni 1 i 2 z rysunku 2 powoduje destabilizację ścieżki wirowej dla większych wartości przepływu płynu (rys.10c i 10d). Spłaszczenie tej powierzchni nie powoduje znaczącej destabilizacji, lecz nie uzyskuje się też dla tego kształtu znaczącego wzmocnienia amplitudy powstających wirów (rys.10a i 10b). W praktyce modyfikacja tego obszaru generatora wirów będzie miała bardzo ograniczone zastosowanie.



Rys. 11. Wpływ modyfikacji kształtu powierzchni 3 i 4 na regularność powstawania wirów a) dla P5 przy $v = 0.5 \text{ m/s}$ b) dla P5 przy $v = 2 \text{ m/s}$ c) dla P6 przy $v = 0.5 \text{ m/s}$ d) dla P6 przy $v = 2 \text{ m/s}$.

Modyfikacja powierzchni oznaczonej numerami 3 i 4 (rys.3) wpływa bardzo niekorzystnie na regularność odrywania się wirów. Nawet dla małych prędkości ruchu płynu obserwuje się utratę stabilności (rys.11). Jedynie

wypłaszczenie tej powierzchni P5 nie powoduje znaczącej destabilizacji, jednak nie powoduje to też znacznego przyrostu ciśnienia za generatorem wirów. Ze względu na dużą destabilizację procesu odrywania się wirów nie zaleca się modyfikowania tych powierzchni. Wskazane są kształty które prowadzą do zmniejszenia współczynnika oporu jakie wprowadzają te powierzchnie.

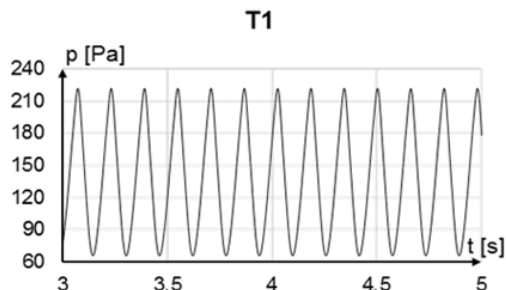


Rys. 12. Wpływ modyfikacji kształtu powierzchni 1,2,3 i 4 na regularność powstawania wirów a) dla P3 przy $v = 0.5 \text{ m/s}$ b) dla P3 przy $v = 2 \text{ m/s}$ c) dla P4 przy $v = 0.5 \text{ m/s}$ d) dla P4 przy $v = 2 \text{ m/s}$.

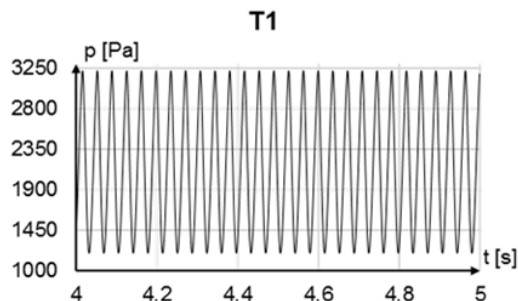
Ponadto sprawdzono wpływ modyfikacji całkowitej powierzchni natarcia (kształty P3 i P4). Wyniki badań numerycznych przedstawiono na rysunku 12. Modyfikacja tej powierzchni powoduje destabilizację ścieżki wirowej w całym zakresie badanej prędkości przepływu płynu. Zakłócenia ścieżki wirowej są już dostrzegalne dla bardzo małych prędkości $v = 0.5 \text{ m/s}$ (rys.12a). Nawet łagodne

wypłaszczenie powoduje znaczne zakłócenia. Chociaż kształt P4 posiada największe wzmocnienie amplitudy ciśnienia za generatorem wirów to tego rodzaju kształty mogą być korzystne jedynie dla bardzo małych prędkości strumienia płynu. Ponadto zawężają one zakres pomiarowy. Podsumowując przeprowadzoną analizę, stwierdza się, że do wytwarzania stabilnych i regularnych wirów najkorzystniejsze jest gdy powierzchnia natarcia jest jak najbardziej opływowa, tj. prowadzi do jak najmniejszego współczynnika oporu.

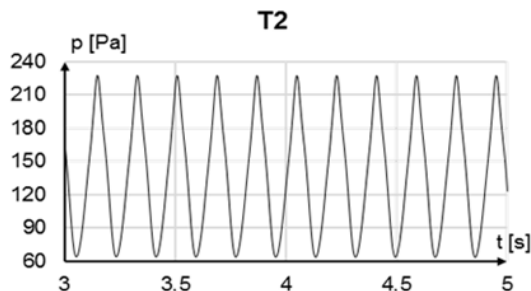
a)



b)



c)



d)

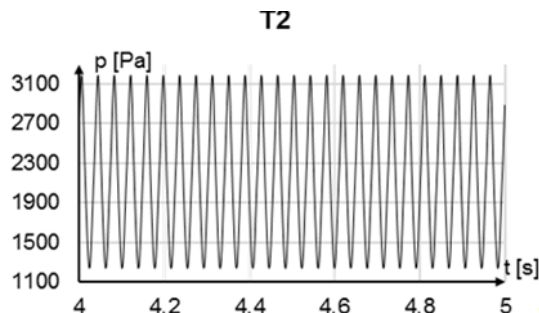
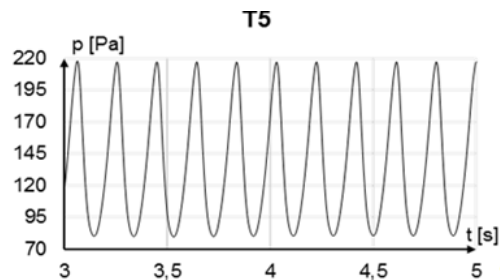


Fig. 13. Wpływ modyfikacji kształtu powierzchni 7 i 8 na regularność powstawania wirów a) dla T1 przy $v = 0.5 \text{ m/s}$ b) dla T1 przy $v = 2 \text{ m/s}$ c) dla T2 przy $v = 0.5 \text{ m/s}$ b) dla T2 przy $v = 2 \text{ m/s}$.

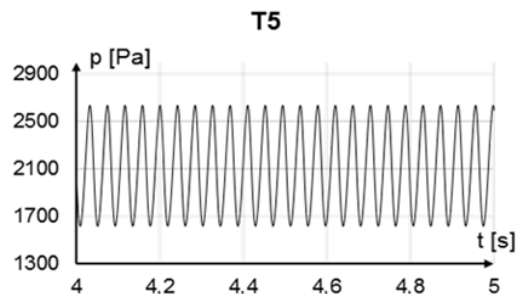
Bardzo podobne badania numeryczne przeprowadzono na kształtach, w których zmodyfikowano powierzchnię sypływu (rys. 3b). Wyniki symulacji dla modyfikacji powierzchni sypływu 7 i 8 przedstawiono na rysunku 13. Modyfikacja tej powierzchni nie powoduje istotnych zmian w stosunku do generatora w kształcie walca. Nie powoduje

destabilizacji strugi. Jest to spowodowane tym, że odrywanie się wirów odbywa się na powierzchniach 6 i 7. Mają one jednak wpływ na wartość amplitudy ciśnienia wirów.

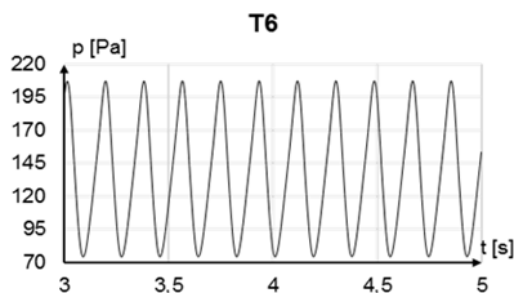
a)



b)



c)



d)

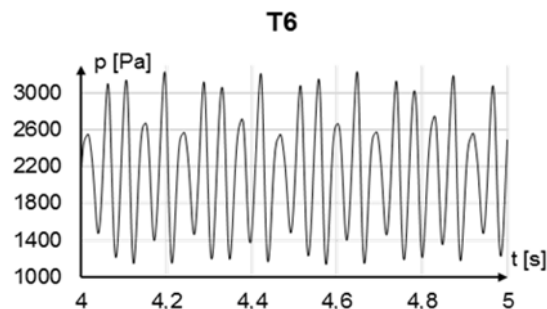
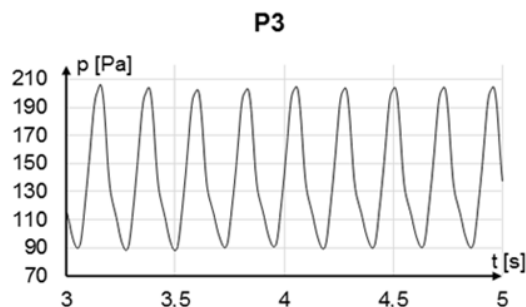


Fig. 14. Wpływ modyfikacji kształtu powierzchni 5 i 6 na regularność powstawania wirów a) dla T5 przy $v = 0.5 \text{ m/s}$ b) dla T5 przy $v = 2 \text{ m/s}$ c) dla T6 przy $v = 0.5 \text{ m/s}$ b) dla T6 przy $v = 2 \text{ m/s}$.

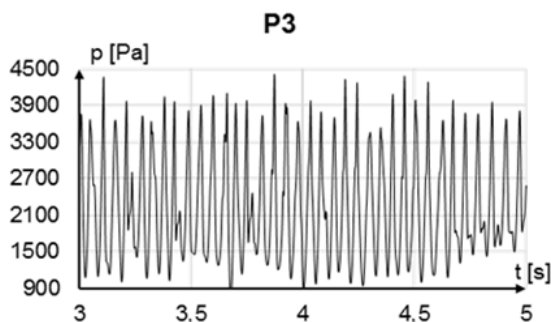
W drugiej kolejności przeprowadzono badania mające na celu określenie wpływu zmian powierzchni oznaczonej na rysunku 2 jako 5 i 6. Wyniki przedstawiono na rysunku 14. Ostra krawędź powierzchni sypływu powoduje zmiany w sposobie odrywania się wirów. Powoduje to destabilizację regularności powstawania wirów dla większych prędkości przepływu płynu. Natomiast łagodne wypłaszczenie tej powierzchni powoduje zmniejszenie amplitudy zmian ciśnienia. Dlatego modyfikacje tej powierzchni nie będą wpływały korzystnie na własności metrologiczne. Korzystne jest natomiast zachowanie jak najbardziej opływowego kształtu.

Wpływ modyfikacji całkowitej powierzchni splywu przedstawiono na rysunku 15. Modyfikacja tej powierzchni nie powoduje destabilizacji ścieżki wirowej. Zaostrzenie krawędzi odrywania się wirów wpływa korzystnie na obniżenie ciśnienia statycznego za generatorem wirów.

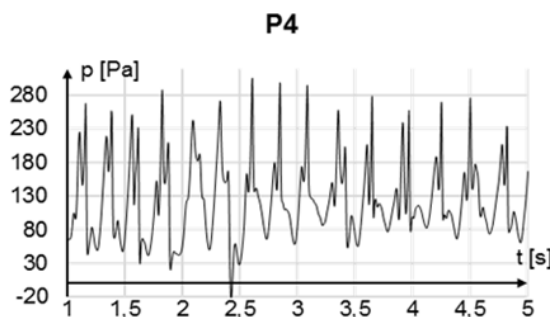
a)



b)



c)



d)

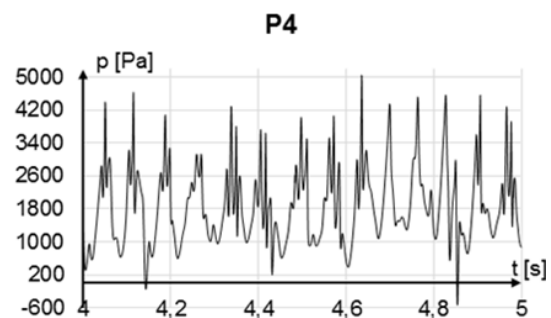


Fig. 15. Wpływ modyfikacji kształtu powierzchni 5,6,7 i 8 na regularność powstawania wirów a) dla P3 przy $v = 0.5 \text{ m/s}$ b) dla P3 przy $v = 2 \text{ m/s}$ c) dla P4 przy $v = 0.5 \text{ m/s}$ b) dla P4 przy $v = 2 \text{ m/s}$.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że modyfikacje natarcia prowadzą do wzmocnienia amplitudy ciśnienia pomiarowego, jednak powodują one destabilizację procesu powstawania wirów dla większych prędkości ruchu płynu. Zwiększenie współczynnika oporu powoduje poprawę własności przepływomierza w dolnym zakresie pomiarowym, jednak będzie zawężała jego zakres. Modyfikacja powierzchni splywu poprawia czułość przepływomierza. Szczególnie pożądane w tym zakresie będą kształty oznaczone jako T2 i T7. Przedstawione wyniki w pracy mogą posłużyć jako wskazówki przy projektowaniu generatorów wirów do zastosowania w przepływomierzach wirowych.

Obliczenia zostały wykonane przy wsparciu Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego (ICM) Uniwersytetu Warszawskiego w ramach grantu obliczeniowego nr G61-8

Autorzy: dr hab. Inż. Mariusz Rząsa, prof. PO, Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej, ul. Mikołajczyka 5, 45-001 Opole, E-mail: m.rzas@po.opole.pl; mgr inż. Beata Czapla-Niełacna, Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej, ul. Mikołajczyka 5, 45-001 Opole, E-mail: b.czapla@doktorant.po.edu.pl

LITERATURA

- [1] Shiba H. 1960. A speed meter of new type, Trans. Japanese Shipbuilding 97, s.127-134,
- [2] Venugopal A., Agrawal A., Prabhu S.V. 2011. Review on vortex flowmeter—Designer perspective, Sensors and Actuators A: Physical, India
- [3] Wahed A. K. E., Johnson M. W., Sproston J. L. 1993. Numerical study of vortex shedding from different shaped bluff bodies. Flow Meas. Instrum. 4, s. 233-240
- [4] Gandhi B.K., Singh S.N., Seshadri V., Singh J. 2004. Effect of bluff body shape on vortex flow meter performance, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 11, s. 378-384
- [5] Norberg C. 2003. Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements, J. Fluids Struct. 17 57–96.
- [6] Mustafa S., Yavuz T. 2002. Subcritical flow around bluff bodies, A.I.A.A. J. 40 (7)1257–1268.
- [7] Williamson C.H.K. 1997. Three-dimensional effects in turbulent bluff body wakes, J. Fluid Mech. 235–265.
- [8] Achenbach E. 1968. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $Re = 5 \times 10^5$, J. Fluid Mech. 34 (Part 4) 625–639
- [9] Singh S.N. Seshadri V., Swaroop A. 1993. Effect of size and shape of the bluff body on Strouhal number in pipe flow, 20th National Conf on FMFP.
- [10] Miao. J.J. Liu T.W. 1992. Vortex flowmeter designed with wall pressure measurement, Rev. Sci. Instrum. 61, s. 2676-2681
- [11] Ansys Fluent Theory Guide 15.0, Ansys Inc., 2013
- [12] Asyikin M.T. 2012. CFD Simulation of Vortex Induced Vibration of a Cylindrical Structure, Norwegian University of Science and Technology
- [13] Koutmos T., Mavridis C. 1997. A computational investigation of unsteady separated flows, Heat and Fluid Flow, Vol. 18, No. 3