

DOI: 10.5604/01.3001.0010.4842

ANALIZA WPLYWU GĘSTOŚCI SIATKI NUMERYCZNEJ NA WYNIKI SYMULACJI ŚCIEŻKI WIROWEJ VON KARMANA

Beata Czapla, Mariusz Rząsa

Politechnika Opolska, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej

Streszczenie. Praca zawiera badania numeryczne polegające na symulacji ścieżki wirowej von Karmana. Znajomość ścieżki wirowej stanowi istotne zagadnienie w projektowaniu przepływomierzy typu vortex. Jednym z istotnych elementów w symulacji numerycznej jest odpowiednia siatka obliczeniowa. W pracy przedstawiono wyniki numerycznej analizy wpływu gęstości siatki na wyniki symulacji. W obliczeniach numerycznych duży wpływ na poprawność wyników ma właściwe przygotowanie modelu do obliczeń pod względem doboru gęstości siatki. Wykazano, że gęstość siatki wpływa na jakość otrzymanych wyników. Jednak istnieje optymalna liczba elementów siatki, dla której dalsze zwiększanie jej elementów nie poprawia znacząco wyników symulacji. W pracy przedstawiono optymalne wartości liczbowe dla przykładowego generatora wirów.

Słowa kluczowe: przepływomierz wirowy, numeryczna mechanika płynów, modele turbulencji, siatka obliczeniowa

ANALYSIS OF INFLUENCE OF NUMERICAL MESH DENSITY ON RESULTS OF SIMULATION OF VON KARMAN VORTEX STREET

Abstract. The paper includes numerical studies of simulating the von Karman vortex street. Knowledge of the vortex street is an important consideration in the design of vortex flowmeters. One of the important elements of the numerical simulation is suitable computational mesh. The paper presents the results of numerical analysis of the effect of mesh density on the simulation result. In numerical calculations a big impact on the correctness of results has the right to prepare a model for the calculation in terms of choice of mesh density. It has been shown that the density of the mesh affects the quality of the results. However be optimum number of elements of mesh, for which further increasing of its elements does not significantly improve results of simulation. In the paper presents the optimal numerical values for the exemplary vortex generator.

Keywords: vortex flowmeter, CFD, turbulent models, computational mesh

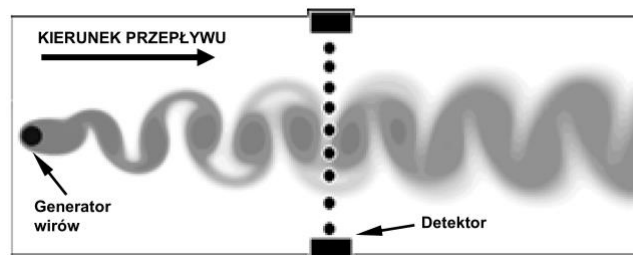
Wstęp

Pomiar przepływu płynu jest nieodzownym elementem wielu procesów technologicznych. Urządzenia do pomiaru przepływu powinny pracować w szerokim zakresie temperatur oraz poprawnie mierzyć w możliwie szerokim zakresie zmian wielkości mierzonej. W pomiarach przepływów istotnym elementem jest odporność na wibracje, pola magnetyczne i elektryczne oraz inne zakłócenia. Bardzo ważny jest też koszt wytworzenia i eksploatacji oraz niezawodność przepływomierza. Pożądaną cechą przepływomierzy niewątpliwie jest możliwość pracy z różnymi mediami, odporność na zanieczyszczenia, małe straty ciśnienia na czujniku, brak części ruchomych, stała konstrukcja oraz duża dokładność pomiaru w szerokim zakresie pomiarowym. Wiele z tych cech posiadają przepływomierze wirowe [11, 15, 17], które są stosowane w pomiarach przemysłowych.

Przepływomierze wirowe inaczej nazywane przepływomierzami oscylacyjnymi są wykorzystywane do pomiaru prędkości lub strumienia objętości czystych i zanieczyszczonych cieczy i gazów. Błąd pomiaru wartości aktualnej strumienia 0,5÷1% dla cieczy i ok. 2% dla gazów. 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. Zasada działania polega na tym, że przeszkoda umieszczona na drodze ruchu cieczy lub gazu, powoduje powstanie turbulencji w wyniku których, struga cieczy lub gazu ulega zawirowaniu. Powstałe zawirowania przyczyniają się do periodycznych zmian ciśnienia przepływającego medium. Na rysunku 1 przedstawiono ścieżkę wirową von Karmana powstająca za przeszkodą. Unormowana częstotliwość wirów jest miarą prędkości przepływu strugi i wyrażona jest liczbą podobieństwa Strouhala [10, 13, 18]:

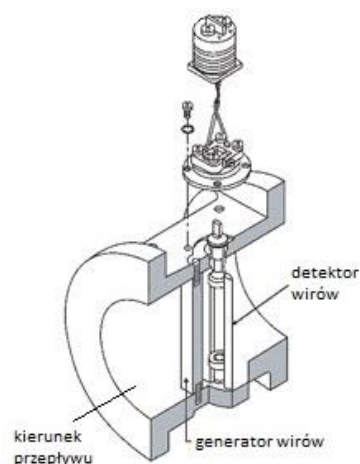
$$St = \frac{fd}{v} \quad (1)$$

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



Rys. 1. Zasada działania przepływomierza wirowego

Przepływomierze wirowe nie posiadają części ruchomych, co czyni te przyrządy trwałymi, niezawodnymi i do pewnego stopnia odpornymi na zanieczyszczenia. Ponadto są tanie w eksploatacji oraz koszty ich wytworzenia są niewielkie. Na rysunku 2 przedstawiono typową konstrukcję przepływomierza [17]. Składa się on z generatora wirów, który zakłóca przepływ medium. 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.



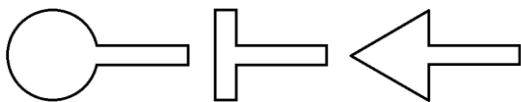
Rys. 2. Budowa przepływomierza wirowego

Generator stanowi główny element przepływomierza wirowego determinujący jego parametry. Jak wykazano w pracy [4] kształt generatora wirów ma istotny wpływ na charakterystykę i własności metrologiczne przepływomierza. Głównym problemem podczas projektowania przepływomierzy wirowych jest poprawne zaprojektowanie generatora wirów. Generowane na przeszkodzie wiry są podstawą działania przepływomierza wirowego. Generator wirów powinien zapewniać tworzenie regularnych wirów i o stosunkowo dużej amplitudzie [11]. Pierwszy komercyjny przepływomierz wyprodukowano w 1968 roku przez firmę Yokogawa. W początkowych latach produkcji przepływomierzy wirowych producenci stosowali generatory wirów w kształcie cylindra. Przepływ wokół cylindra badany był w wielu pracach [7, 9, 14]. Achenbach eksperymentalnie wyznaczył lokalne ciśnienie oraz współczynnik tarcia wokół cylindra w szerokim zakresie liczby Reynoldsa [1]. Zauważył, że punkt oderwania warstwy przyściennej nie jest stały dla całego zakresu liczby Reynoldsa. Jest to bardzo niekorzystne, gdyż aby liczba Strouhala była stała w całym zakresie pomiarowym wymagany jest stały punkt oderwania warstwy przyściennej. Kształt cylindryczny nie zapewnia wysokiej stabilności wirów oraz nie można go stosować w szerokim zakresie pomiarowym. Singh eksperymentalnie udowodnił, że rozmiar oraz kształt generatora wirów odgrywa znaczną rolę w poprawnej pracy przepływomierza wirowego, a także, że pożądane jest poszukiwanie optymalnych kształtów generatora wirów [4, 16]. Wahed przeanalizował kształty takie jak: cylinder, prostokąt, trapez oraz generator w kształcie litery T. Uznał, że kształt T jest najbardziej odpowiedni [18]. Miao zasugerował profil o symetrii osiowej w kształcie pierścienia. Zaletą takiego pierścienia są niskie straty ciśnienia w odniesieniu do konwencjonalnych kształtów. Miao również przeanalizował profil w kształcie litery T. Kształt ten pozwala na uzyskanie stabilnych wirów oraz liniowej charakterystyki przepływomierza [6]. Innym rozwiązaniem są generatory wirów ze szczeliną wewnątrz przeszkody (rys. 3). Tego typu kształty po raz pierwszy zostały zbadane przez Igarashiego [5]. Generator ze szczeliną w kształcie cylindra powoduje znaczną poprawę intensywności i regularności wytwarzanych wirów. W przeszkodzie tej zasysanie i odpychanie od powierzchni przeszkody warstwy przyściennej następuje na wysokości szczeliny, naprzemiennie na obu jej końcach. Wprowadzenie w przedniej części generatora zmiany w postaci trójkąta spowodowało dalszą poprawę jakości sygnału pomiarowego oraz mniejszy spadek ciśnienia na czujniku.



Rys. 3. Generatory wirów ze szczeliną

Popiel i in., wprowadzili generatory z płaszczyznami rozdzielającymi (rys. 4) (ang. splitter plate), kształty takie zapewniają stałość liczby Strouhala w szerokim zakresie liczby Reynoldsa (250 do 43×10^3) [12].



Rys. 4. Generatory wirów z płytą rozdzielającą

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 przygotowaniu narzędzia, które pozwoli na weryfikację numeryczną różnych kształtów generatorów wirów. Zagadnienie to jest istotne z punktu widzenia projektowania generatorów wirowych. Przeprowadzenie badań symulacyjnych upraszcza proces projektowania, gdyż ocena wpływu zmiany

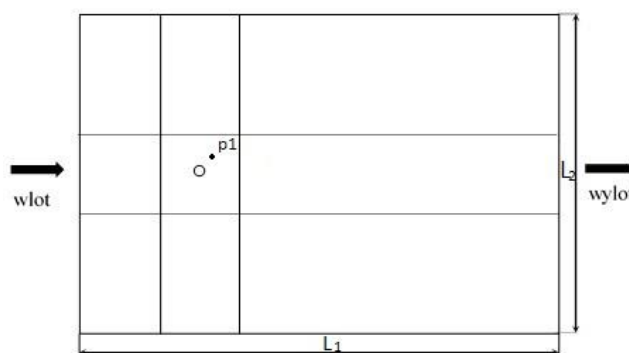
kształtu generatora wirów na drodze symulacji numerycznej pozwala na optymalizację kształtu bez konieczności wykonywania prototypu. Praca zawiera badania numeryczne nad doбором odpowiedniej siatki obliczeniowej do symulacji ścieżki wirowej von Karmana. W pracy przedstawiono wyniki numerycznej analizy wpływu gęstości siatki na wyniki symulacji.

1. Metodyka badań numerycznych

Głównym celem badań jest opracowanie aplikacji umożliwiającej symulowanie ścieżki wirowej von Karmana dla różnych kształtów generatora wirów. Założono że wiry tworzą się jedynie na powierzchniach generatorów opływanych przez płyn. Obszar obliczeniowy jest na tyle duży aby można było pominąć wpływ powierzchni bocznych na tworzenie się ścieżki wirowej.

Jednym z istotnych elementów w badaniach numerycznych jest dobór odpowiedniej siatki obliczeniowej. Na poprawny wynik obliczeń ma wpływ zarówno rodzaj siatki jak i jej gęstość. Optymalnym sposobem na ocenę, jakości siatki numerycznej jest porównanie wyników obliczeń z wynikami uzyskanymi na podstawie eksperymentu. Jednak nie zawsze dysponuje się odpowiednimi wynikami eksperymentalnymi. Dlatego niejednokrotnie poszukuje się innych sposobów oceny, jakości wyników obliczeń numerycznych. Jedną z metod polega na zwiększaniu liczby elementów siatki i porównywaniu ze sobą wyników obliczeń. Siatkę zagęszcza się tak długo, dopóki różnica otrzymanych wyników jest na tyle mała, że można ją uznać za zadowalającą.

Analizę numeryczną przeprowadzono w programie ANSYS Design Modeler. Na rysunku 5 przedstawiono geometrię modelu generatora wirów. Obszar obliczeniowy obejmował prostokątny kanał o długości $L_1 = 900$ mm i szerokości $L_2 = 600$ mm. Wewnątrz kanału umieszczono prostopadłe do przepływu cylinder o średnicy 20 mm. Punkt P1 oznacza miejsce obserwacji zmian ciśnienia. Obszar siatki podzielono na 9 podobszarów. W każdym z podobszarów możliwe jest zadanie odmiennej gęstości siatki. Z uwagi na symetryczny charakter zjawiska powstawania wirów dobierano poszczególne podobszary w taki sposób aby były one symetryczne względem osi poziomej.



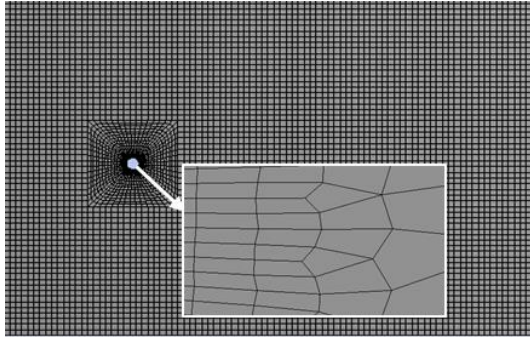
Rys. 5. Geometria obszaru obliczeniowego

Zbyt duża liczba elementów siatki prowadzi do znacznego wydłużenia czasu obliczeń natomiast nie poprawia ona jakości otrzymanych wyników. Celowe zatem jest określenie optymalnej liczby elementów siatki. W celu określenia wpływu gęstości siatki, na jakość otrzymanych wyników przeprowadzono obliczenia dla różnych gęstości siatek. Siatkę wygenerowano za pomocą programu ANSYS Meshing. Generowano różne siatki składającej się z 7 395 elementów oraz 7 666 węzłów, aż do siatki składającej się z 738 815 elementów oraz 740 682 węzłów. Siatkę zagęszczano proporcjonalnie we wszystkich obszarach, jedynie poszczególne obszary różniły się liczbą elementów.

Do obliczeń przyjęto siatkę o elementach w kształcie czworokąta. Elementy siatki nie są regularne. Znacznie zagęszczono liczbę elementów siatki w obszarze gdzie znajduje się generator (rys. 6). Jest to uzasadnione występowaniem w tym

obszarze szeregu zjawisk związanych z odrywaniem się wirów od warstwy przyściennej.

Równania modelu matematycznego rozwiązano metodą objętości skończonych [3] z użyciem programu ANSYS Fluent. Użyto model turbulencji $k-\omega$ SST [2] dla dwuwymiarowego pola prędkości i przepływu niestacjonarnego. Równania Reynoldsa dla przepływu ustalonego i nieściśliwego przyjęto zgodnie z [8]. Ostateczny układ równań różniczkowych modelu standard $k-\omega$ SST równania opisano w pracy [2].



Rys. 6. Siatka obliczeniowa

Obliczenia przeprowadzono dla założenia, że na wlocie do kanału występuje równomierny rozkład prędkości $v = 1\text{ m/s}$ oraz dla parametrów reologicznych cieczy odpowiadających wodzie.

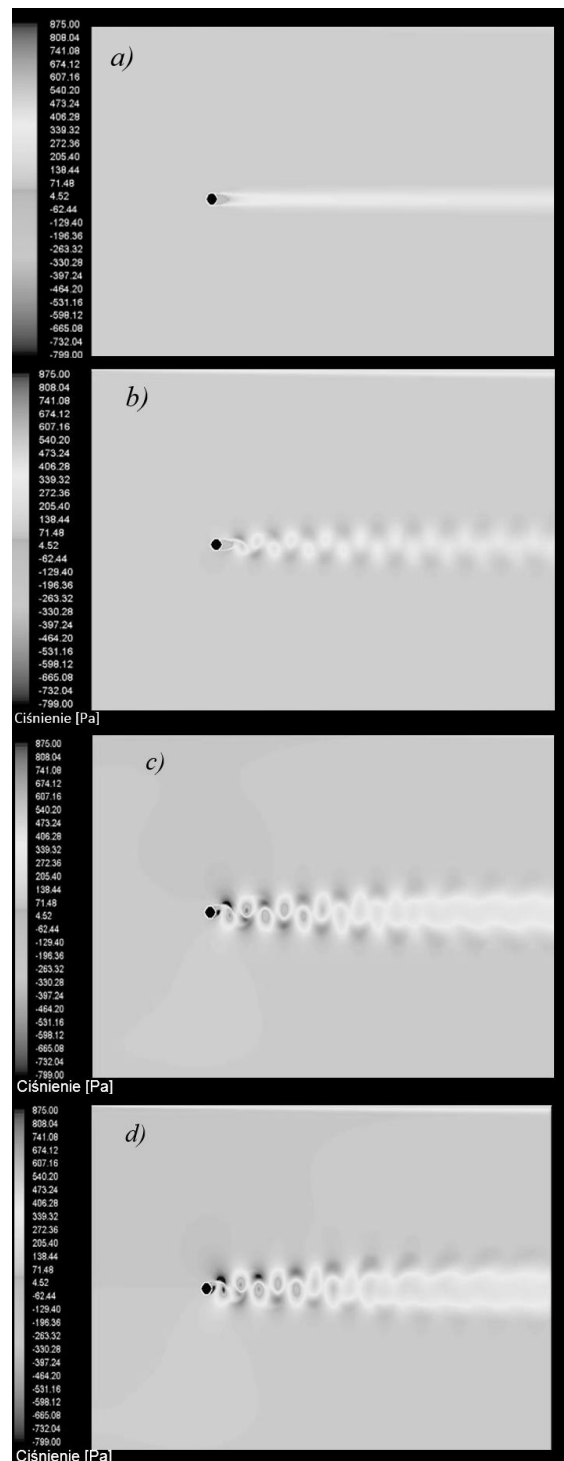
2. Wyniki obliczeń

Ze względu na pracę przepływomierza wirowego istotnymi parametrami pomiarowymi wpływającymi na błąd pomiaru jest wartość zmian amplitudy ciśnienia i stabilność częstotliwości. Wartość zmiany amplitudy ciśnienia ma bezpośredni wpływ na czułość pomiarową. Dlatego jako kryterium oceny optymalnej gęstości siatki przyjęto niezależność wartości zmiany amplitudy ciśnienia od liczby elementów siatki obliczeniowej.

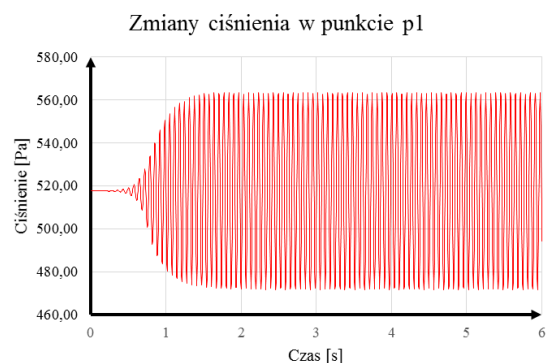
Przeprowadzono badania symulacyjne tworzenia się ścieżki wirowej von Karmana dla różnych gęstości siatek. Badania mają na celu ocenę wpływu gęstości siatki na sposób tworzenia się ścieżki wirowej. Na rysunku 7 przedstawiono wybrane symulacje rozkładu ciśnienia całkowitego dla czterech gęstości siatek. Na podstawie przeprowadzonej analizy wizualnej tworzących się ścieżek wirowych wnioskuje się, że zbyt mała liczba elementów siatki (rys. 7a) prowadzi do uśrednienia wyników, co uniemożliwia obserwację ścieżki wirowej. Dla większej liczby elementów siatki obserwuje się w pełni rozwiniętą ścieżkę wirową z charakterystycznym obszarem zanikania wirów (rys. 7c i 7d).

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji zmian ciśnienia w punkcie P1 dla siatki o gęstości 57735 elementów. Jak wynika z przedstawionego przebiegu stabilne wartości zmian ciśnienia, zarówno dla tej gęstości siatki, jak i pozostałych, uzyskuje się dopiero po 2 s. Zatem do oceny wyników przyjęto wartości zmiany ciśnienia dla czasów większych od 2 s.

Na rysunku 9 przedstawiono wyniki obliczeń uśrednionych zmian amplitudy ciśnienia w zależności od liczby elementów siatki. Na tej podstawie stwierdzono, że optymalną wartością jest liczba elementów siatki zawierają się w przedziale od 400 000 – 500 000 elementów. Zakres ten gwarantuje uzyskanie stabilnej wartości amplitudy ciśnienia, co jest istotnym parametrem pomiarowym. Dla mniejszej liczby elementów siatki obserwuje się znaczące odchylenia wartości amplitudy. Świadczy to, że przyjęcie mniejszej liczby elementów siatki może wprowadzać duże błędy otrzymanych wyników. Zwiększenie liczby elementów siatki nie będzie poprawiało znacząco uzyskanych wyników a jedynie zwiększy czas obliczeń.

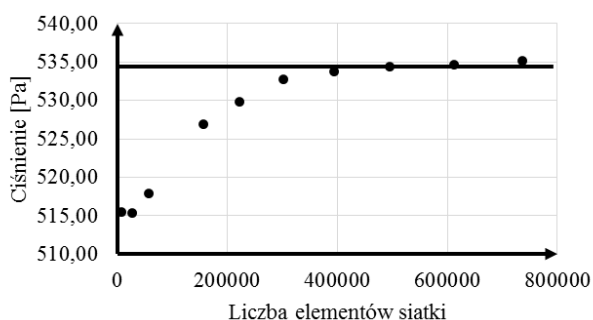


Rys. 7. Rozkład ciśnienia całkowitego dla: a) 7 395 elementów, b) 57 735 elementów, c) 393 360 elementów, d) 611 400 elementów



Rys. 8. Rozkład ciśnienia w punkcie p1 dla siatki z liczbą elementów 57735

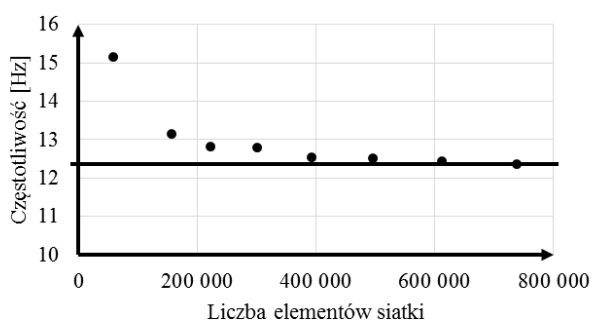
Zmiany ciśnienia w punkcie p1



Rys. 9. Wartość uśrednionej zmiany ciśnienia w zależności od liczby elementów siatki

Ponieważ w przepływomierzu wirowym wielkością mierzoną na podstawie, której wyznacza się strumień, jest częstotliwość, z tego względu postanowiono sprawdzić, jaki wpływ ma liczba elementów siatki na wartość obliczonej częstotliwości. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 10. Podobnie jak w przypadku obliczeń zmian amplitudy ciśnienia tak i w przypadku określania częstotliwości optymalne jest przyjęcie liczby elementów siatki z przedziału 400 000–500 000 elementów. Z perspektywy analizy odchyłki wyliczonej częstotliwości wystarczające byłoby zastosowanie siatki o znaczenie mniejszej liczbie elementów. Z uwagi jednak, na analizę amplitudy ciśnienia zawyżono ten przedział chcąc mieć pewność, iż wyniki symulacji będą prawidłowo odzwierciedlały oba istotne parametry pomiarowe.

Częstotliwość



Rys. 10. Zależność częstotliwości od liczby elementów siatki

3. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych stwierdzono, że w celu poprawnej symulacji ścieżki wirowej von Karmana dla generatorów, których wymiar charakterystyczny wynosi 20mm optymalną liczbą elementów siatki jest liczba powyżej 400 000 elementów. Jak wykazano w niniejszej pracy właściwy dobór liczby elementów ma istotny wpływ na poprawność wyników obliczeń. Wyniki pracy posłużą do ustawienia optymalnych parametrów w aplikacji służącej do symulacji działania generatorów wirów. Przeprowadzono badania jedynie dla jednej wybranej prędkości przepływu płynu. W celu określenia wpływu kształtu generatora na rodzaj generowanych wirów konieczne jest przeprowadzenie symulacji dla różnych prędkości przepływu. Jednakże z uwagi na ocenę gęstości siatki dla której będą prowadzone dalsze badania zastosowanie jednej prędkości jest wystarczające. Dalsze prace badawcze będą ukierunkowane na poszukiwaniu wpływu wybranych obszarów powierzchni generatora wirów na jakość i intensywność powstających wirów.

Literatura

- [1] Achenbach E.: 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(4)/1968, 625–639.
- [2] Ansys Fluent Theory Guide 12.0, Ansys Inc., 2009.
- [3] Flaga A., Błazik-Borowa E., Podgórski J.: *Aerodynamika smukłych budowli i konstrukcji prętowo-ciągnionych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004.
- [4] Gandhi B.K., Singh S.N., Seshadri V., Singh J.: Effect of bluff body shape on vortex flow meter performance. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* 11/2004, 378–384.
- [5] Igarashi T.: Fluid flow around a bluff body used for a Karman vortex flow meter. *Proc. Of International Symposium on Fluid Control and Measurement Fluome Tokyo'85*, 2-6 September 1985, Tokyo, 1017–1022.
- [6] Miao J.J., Liu T.W.: Vortex flowmeter designed with wall pressure measurement. *Rev. Sci. Instrum.* 61/1992, 2676–2681.
- [7] Mustafa S., Yavuz T.: Subcritical flow around bluff bodies. *A.I.A.A. J.* 40/2003, 1257–1268.
- [8] Nieto F., Hargreaves D.M., Owen J.S. & Hernández S.: On the applicability of 2D URANS and SST $k - \omega$ turbulence model to the fluid-structure interaction of rectangular cylinders. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 9(1)/2015, 157–173.
- [9] Norberg C.: Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. *J. Fluids Struct.* 17/2003, 57–96.
- [10] Panknin G.: Analiza zjawisk fizycznych występujących w przepływomierzu wirowym. *Przegląd Elektroniczny* 9a/2011, 121–126.
- [11] Panknin G.: Przepływomierz wirowy – analiza zjawiska generacji wirów. Współczesne metody badań i wizualizacji ścieżki wirowej von Karmana. *Prace naukowe. Elektronika*, z. 168, OWPW, Warszawa 2009
- [12] Popiel C.O., Robinson D.I., Turner J.T.: Vortex shedding from a circular cylinder with a slit and concave rear surface. *Applied Scientific Research* 51/2015, 209.
- [13] Pospolita J., Kabaciński M., Zamorowski R.: Właściwości metrologiczne i możliwości zastosowania przepływomierzy wirowych. *Pomiary, Automatyka Robotyka* 11/2007, 13–20.
- [14] Prasad A., Williamson C.H.K.: Three-dimensional effects in turbulent bluff body wakes. *J. Fluid Mech.* 343/1997, 235–265.
- [15] Shiba H.: A speed meter of new type. *Trans. Japanese Shipbuilding* 97/1960, 127–134.
- [16] Singh S.N., Seshadri V., Swaroop A.: Effect of size and shape of the bluff body on Strouhal number in pipe flow, 20th National Conf on FMFP, 1993.
- [17] Venugopal A., Amit Agrawal, Prabhu S.V.: Review on vortex flowmeter – Designer perspective. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011.
- [18] Wahed A.K.E., Johnson M.W., Sproston J.L.: Numerical study of ovortex shedding from different shaped bluff bodies. *Flow Meas. Instrum.* 4/1993, 233–240.

Mgr inż. Beata Czaplą

e-mail: b.czapla@doktorant.po.edu.pl

Absolwentka kierunku Inżynierii Środowiska Politechniki Opolskiej, o specjalności gospodarka wodno-ściekowa. Od 2012 roku jest doktorantką na Wydziale Mechanicznym, z dziedziny naukowej Mechanika. Jej obszarem zainteresowań naukowych jest mechanika płynów, numeryczna mechanika płynów.



Dr hab. inż. Mariusz R. Rząsa

e-mail: m.rzasa@po.opole.pl

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Opolskiej o specjalności Automatyka i metrologia elektryczna. Zatrudniony w Katedrze Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej Politechniki Opolskiej. Posiada stopień doktora o specjalności Budowa i Eksploatacja Maszyn. Habilitację uzyskał na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechniki Częstochowskiej. Prace naukowe prowadzi z zakresu pomiaru przepływów dwufazowych.



otrzymano/received: 05.09.2016

przyjęto do druku/accepted: 01.06.2017