

## NUMERYCZNA ANALIZA WPLYWU ZMIANY KSZTAŁTU GENERATORA WIRÓW NA PARAMETRY PRZEPLYWOMIERZA WIROWEGO

Beata CZAPLA-NIEŁACNA<sup>1</sup>, Mariusz RZAŚA<sup>2</sup>

1. Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej  
e-mail: b.czapla@doktorant.po.edu.pl
2. Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej  
e-mail: m.rzasa@po.opole.pl

**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. Wydłużenie profilu generatora wirów lub wprowadzenie elementów zakłócających opływ w postaci szczeliny powoduje zmianę charakterystyki przepływomierza, oraz ma wpływ na stabilność ścieżki wirowej.

**Słowa kluczowe:** przepływomierz wirowy, generator wirów

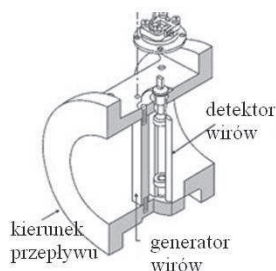
### 1. WPROWADZENIE

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. Zjawisko to opisane jest liczbą podobieństwa Strouhala [3]:

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

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



Rys. 1. Budowa przepływomierza wirowego [2]

Na rysunku 1 przedstawiono typową konstrukcję przepływomierza wirowego [2]. Składa się on z generatora wirów, za którym tworzy się ścieżka wirowa von Karmana. W pewnej odległości za generatorem umieszczony jest detektor. Najczęściej jest nim czujnik ciśnienia o dużej dynamice. Służy on do pomiaru częstotliwości powstających wirów.

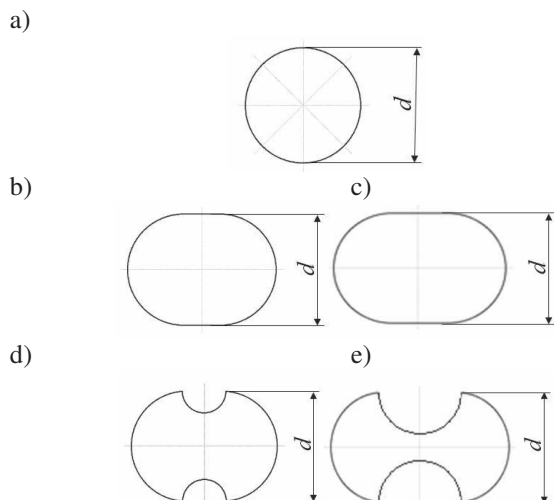
Generator ma istotny wpływ na charakterystykę i własności metrologiczne przepływomierza [4]. Bardzo istotne jest to, aby generator zapewniał tworzenie się regularnych wirów. Bardzo dobrze opisany w literaturze jest generator w kształcie walca [5, 6, 7]. Kształt cylindryczny pomimo wielu zalet, umożliwia pomiar jedynie w stosunkowo wąskim zakresie pomiarowym [8]. Celowe jest zatem poszukiwanie nowych kształtów [9, 10], które będą miały istotny wpływ na poprawę parametrów przepływomierza [3, 4].

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 zmiany kształtu na wybrane parametry przepływomierza wirowego.

Jako kształt odniesienia przyjęto walec o średnicy  $d=20$  mm. Na tej podstawie opracowano dwa kształty które poddano badaniom numerycznym (rys. 2). Zachowując we wszystkich przypadkach ten sam wymiar charakterystyczny.

### 2. WYBÓR METODY NUMERYCZNEJ

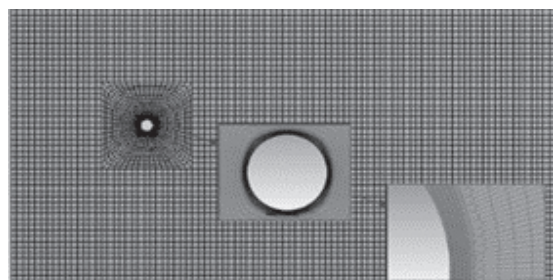
Do modelowania opływu generatora przez ciecz wykorzystano metodę numeryczną – CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Model obliczeniowy oparty jest na teorii Reynoldsa, przy założeniu, że ruch płynu może być identyfikowany jako superpozycja ruchu średniego i fluktuacyjnego. Założenie to powoduje, że przekształca się równania Naviera – Stokesa do formy zawierającej tensor naprężeń turbulentnych. Powoduje to, że w układzie równań pojawiają się dodatkowe niewiadome. W związku z tym konieczne jest uzupełnienie równań Reynoldsa o dodatkowe dwa równania. Uzupełnia się to w oparciu o różne dwuwymiarowe modele turbulencji np.  $k - \epsilon$  lub  $k - \omega$  [11]. Wybór modelu ma wpływ na dynamikę odwzorowania proces powstawania wirów von Karmana.



Rys. 2. Kształty generatorów wirów: a) kształt podstawowy, b) wydłużenie o 6 mm - owal, c) wydłużenie o 12 mm – owal, d) owal ze szczeliną o promieniu 3 mm, e) owal ze szczeliną o promieniu 6 mm

Obecnie stosowana jest również metoda 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.

We wszystkich metodach numerycznych w celu uzyskania poprawnych wyników symulacji, konieczne jest określenie parametrów symulacji. 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, w celu wyboru optymalnej metody.



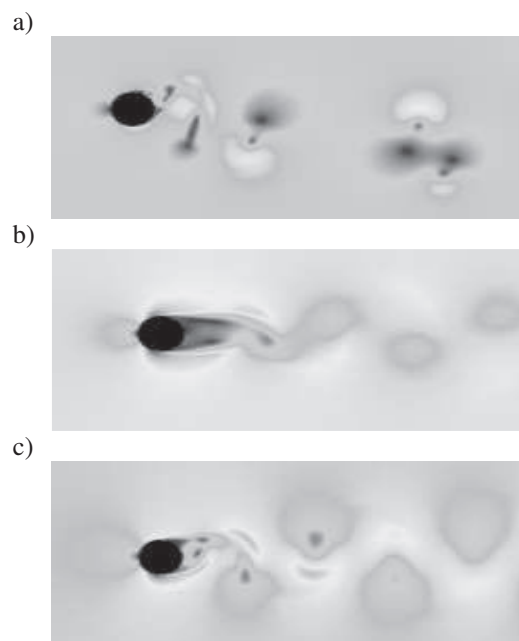
Rys. 3. Siatka obliczeniowa

W tym celu przygotowano siatkę obliczeniową dla prostokątnego kanału o długości 900mm i szerokości 600mm, we wnętrzu którego umieszczono prostopadle do przepływu cylinder o średnicy  $d = 20$  mm (rys.3). Szerokość kanału dobrano tak, aby wyeliminować wpływ ścianek kanału na generację wirów powstałych za cylindrem. Dla tego obszaru 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.

Założono, że obliczenia zostaną przeprowadzone dla pięciosekundowych okresów generowania wirów, a porównanie nastąpi dla czasu  $t = 3$  s. Ponadto założono, że ciecz na wlocie do kanału ma stałą prędkość  $v = 1$  m/s w całym przekroju poprzecznym kanału. Własności cieczy odpowiadają wodzie w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$ . Założono, że przepływ

odbywa się w kanale otwartym, w związku z tym w obliczeniach nie wprowadzono ciśnienia statycznego.

Na rysunku 4a przedstawiono wyniki symulacji dla metody DNS. Dla siatki składającej się z 380 000 elementów oraz 395 000 węzłów nie uzyskano stabilnych wyników. 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 spływu strugi, za generatorem. Metoda ta w pełni nie oddaje dynamicznego charakteru zjawiska opływu. Zadowolające rezultaty uzyskano dla modelu  $k-\omega$ . Uwzględnia on prawidłowo dynamikę powstających wirów, oraz nie wymaga on bardzo gęstych siatek obliczeniowych.



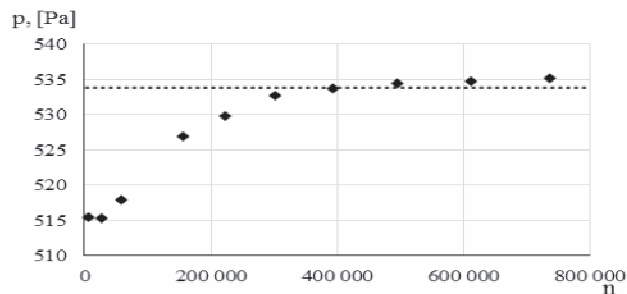
Rys. 4. Wyniki symulacji dla modeli a) DNS, b)  $k-\epsilon$ , c)  $k-\omega$

W przepływowym wirowym bardzo istotnym parametrem jest regularność powstawania wirów, co powoduje niezmienną w czasie mierzoną częstotliwość. Drugim ważnym parametrem jest amplituda zmian ciśnienia wywołana wirami, gdyż od tego zależy czułość przepływomierza. Zatem ciśnienie i częstotliwość stanowią podstawowe parametry które przyjęto jako kryterium doboru siatki obliczeniowej. Wygenerowano dziesięć siatek o różnym zagęszczeniu od siatki składającej się z 7 395 elementów oraz 7 666 węzłów, do siatki składającej się z 738 815 elementów oraz 740 682 węzłów. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki obliczeń zmiany amplitudy ciśnienia  $p$  w zależności od liczby elementów siatki  $n$ . Wartości ciśnienia stanowią średnią arytmetyczną dla około dziesięciu następujących po sobie obliczeniach.

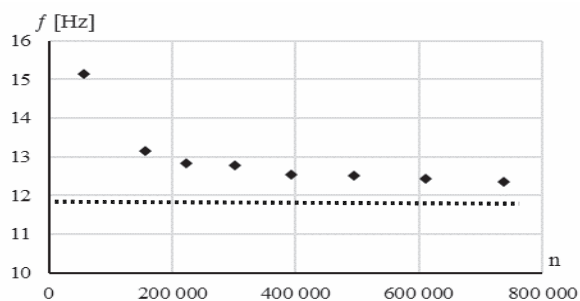
Z kolei na rysunku 6 przedstawiono wyniki obliczeń uśrednionych wartości częstotliwości po przeanalizowaniu otrzymanych wyników stwierdzono, że liczby elementów siatki należy poszukiwać w przedziale od 350 000 – 500 000 elementów.

Zakres ten gwarantuje uzyskanie stabilnej wartości amplitudy ciśnienia oraz częstotliwości. Większa liczba elementów siatki nie będzie znacząco poprawiała uzyskanych wyników, a jedynie zwiększy czas obliczeń. Przyjęto, że

liczba elementów siatki dla kształtu cylindrycznego wyniesie 396 031 elementów i 400 848 węzłów.



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



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

### 3. WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNYCH

W celu określenia wpływu kształtu generatora na parametry generowanych wirów przeprowadzono symulacje dla różnych prędkości przepływu, 0,5 m/s, 1 m/s, 2 m/s o równomiernym rozkładzie prędkości na wlocie do kanału. Równania modelu matematycznego rozwiązano metodą elementów skończonych w programie ANSYS Fluent. Zastosowano model turbulencji  $k-\omega$  SST [11] dla dwuwymiarowego pola prędkości i przepływu niestacjonarnego przy obliczeniowym kroku czasowym  $10^{-4}$  s. Wyniki obliczeń dla kształtu podstawowego z rys. 2a zamieszczono w tabeli 1.

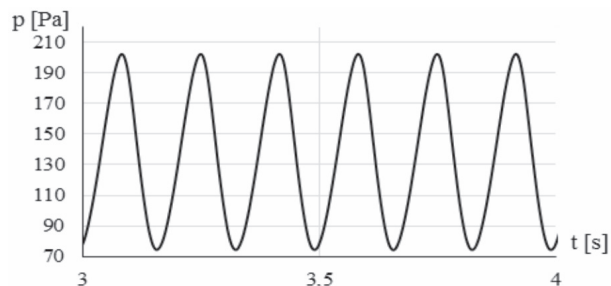
Tabela 1. Wyniki obliczeń dla kształtu generatora z rys. 2a

$v$	$f$	$\Delta p$
0.5 m/s	6 Hz	128 Pa
1.0 m/s	12 Hz	442 Pa
2.0 m/s	26 Hz	1529 Pa

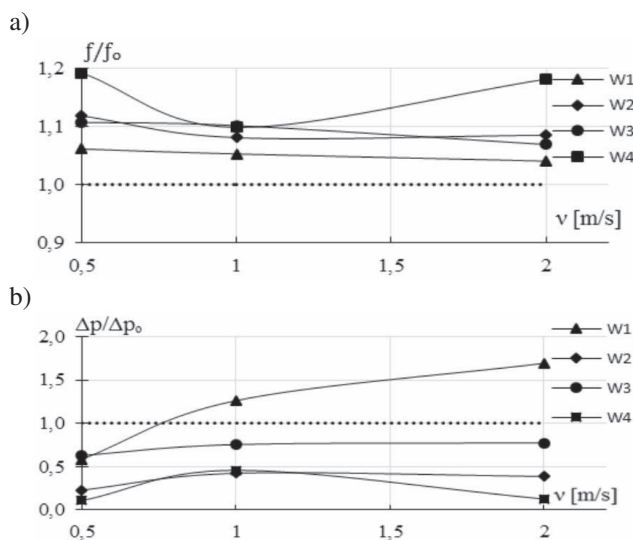
Parametry zamieszczone w tabeli obliczono na podstawie przebiegów czasowych wygenerowanych zmian ciśnienia za generatorem wirów. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowy przebieg zmian dla przepływu 0,5 m/s.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania mające na celu określenie wpływu wydłużenia powierzchni opływu. Wydłużenie powierzchni opływu powoduje zmniejszenie wartości ciśnienia statycznego oraz amplitudy ciśnienia za generatorem wirów (rys. 8).

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki porównania wartości zmian ciśnienia i częstotliwości generowanych wirów dla generatorów o wydłużonej powierzchni opływu w stosunku do generatora o kształcie podstawowym (cylindrycznym). Wyniki przedstawiono jako stosunek wartości badanego generatora przez wartość odniesienia z tabeli 1.



Rys. 7. Przebieg zmian ciśnienia za generatorem wirów



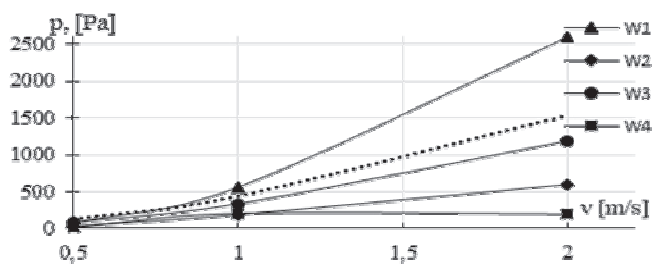
Rys. 8. Wpływ wydłużenia powierzchni opływu na a) częstotliwość generowanych wirów b) amplitudy ciśnienia generowanych wirów

Wraz z wydłużeniem powierzchni opływu wzrasta częstotliwość generowanych wirów. Dodanie elementu zakłócającego przepływ opływającej cieczy w postaci szczeliny, powoduje znaczny wzrost częstotliwości generowanych wirów jedynie dla wybranych częstotliwości, co powoduje, że charakterystyka staje się nieliniowa (rys. 8a). Generalnie wydłużenie powierzchni opływu zmniejsza amplitudę zmian ciśnienia za generatorem, powodując zmniejszenie czułości w dolnym zakresie pomiarowym (rys. 8b). Jednak jak to obrazuje charakterystyka W1 zwiększa to czułość w górnym zakresie pomiarowym. Można jednak wnioskować, że tego rodzaju modyfikacja będzie miała uzasadnienie do poprawy parametrów generatora przy pomiarach przy wyższych prędkościach przepływu. Zławszcza, że wydłużenie powierzchni opływu stabilizuje strugę wirów przy większych prędkościach.

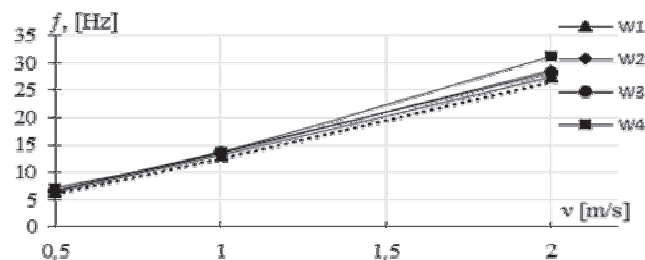
Rysunek 9 przedstawia wyniki wpływu wydłużenia powierzchni opływu na amplitudę zmian ciśnienia za generatorem wirów. Wprowadzenie zakłócenia lub wydłużenia powierzchni opływu będzie powodowało zmniejszenie amplitudy ciśnienia generowanych wirów. Skutkuje to zmniejszeniem czułości pomiarowej w dolnym zakresie pomiarowym. Zastosowanie szczeliny powoduje, że charakterystyka przetwarzania staje się nieliniowa, co może utrudniać dopasowanie odpowiedniego przetwornika pomiarowego.

Na rysunku 10 przedstawiono charakterystykę częstotliwościową generatorów wirów. Jak wynika z przedstawionych wyników wydłużenie powierzchni opływu powoduje niewielką nieliniowość. Oceniając, że przyrost częstotliwości generowanych wirów nie jest duży w stosunku do generatora w kształcie cylindra można wnioskować, że wydłużenie nie wpływa znacząco na

charakterystykę i częstotliwość generowanych wirów, poprawia to jedynie stabilność dla wyższych prędkości przepływu cieczy.



Rys. 9. Charakterystyka amplitudy ciśnienia



Rys. 10. Zmiany częstotliwości generowanych wirów w zależności od prędkości przepływu dla generatorów z wydłużoną powierzchnią opływ

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono wyniki badań numerycznych dotyczące wpływu zmiany powierzchni opływu generatora na parametry ścieżki wirowej von Karmana. Wydłużenie lub wprowadzenie elementów zakłócających opływ w postaci szczeliny powoduje, że charakterystyka staje się nieliniowa oraz obniża czułość w dolnym zakresie pomiarowym, natomiast poprawia regularność powstawania wirów dla dużych prędkości opływu. Tego rodzaju modyfikacje mogą być korzystne dla przepływomierzy pracujących przy dużych prędkościach przepływu cieczy.

Przedstawione wyniki stanowią część szerszego opracowania, które obejmuje przeprowadzenie szeregu badań eksperymentalnych na stanowisku laboratoryjnym. Z uwagi na czas potrzebny do przeprowadzenia takich badań, zarówno porównanie wyników numerycznych z wynikami ekspe-

rymentalnymi jak i ocena błędów metody numerycznej będzie tematem kolejnych artykułów.

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

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Shiba H.: A speed meter of new type, Trans. Japanese Shipbuilding 97, 1960, s.127-134,
2. Venugopal A., Agrawal A., Prabhu S.V.: Review on vortex flow meter—Designer perspective, Sensors and Actuators A: Physical, India 2011.
3. Wahed A. K. E., Johnson M. W., Sproston J. L.: Numerical study of vortex shedding from different shaped bluff bodies. Flow Meas. Instrum. 4, 1993, s. 233-240
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, s. 378-384
5. Norberg C.: Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements, J. Fluids Struct. 17, 2003, s. 57–96.
6. Mustafa S., Yavuz T.: Subcritical flow around bluff bodies, A.I.A.A. J. 40, 2002, s. 1257–1268.
7. Williamson C.H.K.: Three-dimensional effects in turbulent bluff body wakes, J. Fluid Mech., 1997, s. 235–265.
8. 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 (Part 4) 1968, s. 625–639
9. Singh S.N., Seshadri V., Swaroop A.: Effect of size and shape of the bluff body on Strouhal number in pipe flow, 20<sup>th</sup> National Conf on FMFP, 1993.
10. Miao J.J. Liu T.W.: Vortex flow-meter designed with wall pressure measurement, Rev. Sci. Instrum. 61, 1992, s. 2676-2681
11. Ansys Fluent Theory Guide 12.0, Ansys Inc., 2009
12. Asyikin M.T.: CFD Simulation of Vortex Induced Vibration of a Cylindrical Structure, Norwegian University of Science and Technology, 2012.
13. Koutmos T., Mavridis C.: A computational investigation of unsteady separated flows, Heat and Fluid Flow, Vol. 18, No. 3, 1997.

### NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECTS OF CHANGES OF BLUFF BODY SHAPE ON THE PARAMETERS OF THE FLOWMETER

A lot of profiles of bluff bodies are currently commercially available. However, a universal form of the bluff body has not still been achieved to this time. Hence the study of the influence of the shape of the bluff body on the parameters of the flow meter is a current one. The work is concerned with the numerical analysis of the impact of selected surfaces of bluff body on selected parameters of the vortex flowmeter. In order to determine the effect of the shape of vortex shedder on the type of generated vortices, simulations were carried out for different flow velocities, i.e. 0.5m/s, 1m/s, 2m/s. The equations forming the mathematical model were solved by finite volume method using ANSYS Fluent. Turbulence k- $\omega$  SST model was applied for numerical calculations. Computations were performed for the assumption that at the inlet channel had a uniform distribution of the speed. The use of elongation or flow disturbing elements around in the form of a gap resulted in either the change in the characteristics of the flow meter, and reduction of its sensitivity in the lower measuring range. Such a modification may be beneficial to the vortex flowmeters with significant flow rates of liquid.

**Keywords:** vortex flowmeter, bluff body shape, von Karman vortex street.