

Dr inż. Paweł PIETKIEWICZ

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.283

Dr inż. Wojciech MIĄSKOWSKI

Dr inż. Krzysztof NALEPA

Piotr LESZCZYŃSKI

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

ANALIZA ROZKŁADU CIŚNIEŃ I PRĘDKOŚCI W PRZEWODZIE O ZMIENNYM PRZEKROJU

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań rozkładu prędkości i ciśnienia powietrza przepływającego przez przewód o zmiennej średnicy. Przewód stanowi model dydaktyczny do sprawdzenia słuszności równania Bernoulliego. Analizę przeprowadzono trzema metodami. Wykonano obliczenia numeryczne, przeprowadzono obliczenia analityczne. Otrzymane wyniki zweryfikowano doświadczalnie. Przedstawione w artykule wyniki są podstawą do wnioskowania na temat przydatności metod numerycznych w analizie przepływów.

ANALYSIS OF PRESSURE DISTRIBUTION AND VELOCITY IN THE LINE WITH CHANGING CROSS SECTION

Abstract: The article presents results of the investigations of the distribution of velocity and the pressure of the air flowing through. The line makes up the didactic model for checking the legitimacy of the Bernoulli equation. The analysis was conducted using three methods. Numeric calculations as well analytic calculations were carried out. Received results were verified experimentally. Results presented in the article are the basis to conclude about the usefulness of numeric methods in the flow analysis.

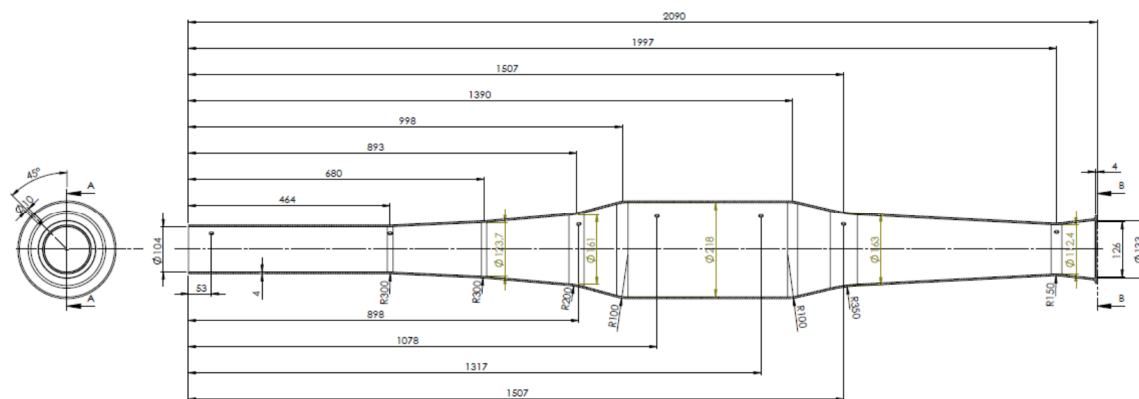
Słowa kluczowe: rozkład ciśnień, równanie Bernoulliego, przewód o zmiennym przekroju

Keywords: pressure distribution, Bernoulli equation, line with changing cross station

1. CEL BADAŃ

Celem badań było określenie rozkładu prędkości przepływu oraz ciśnienia statycznego w przewodzie o zmiennym przekroju poprzecznym, którym przepływa powietrze. Badany przewód jest modelem dydaktycznym, którego zastosowanie wiąże się z realizacją zajęć laboratoryjnych z przedmiotu mechanika płynów na Wydziale Nauk Technicznych UWM w Olsztynie. Geometria przewodu została przedstawiona na rys. 1.

W przewodzie wykonano siedem otworów piezometrycznych na powierzchni walcowej służących do pomiaru ciśnienia statycznego, zmieniającego się wraz ze zmianą średnicy przewodu.

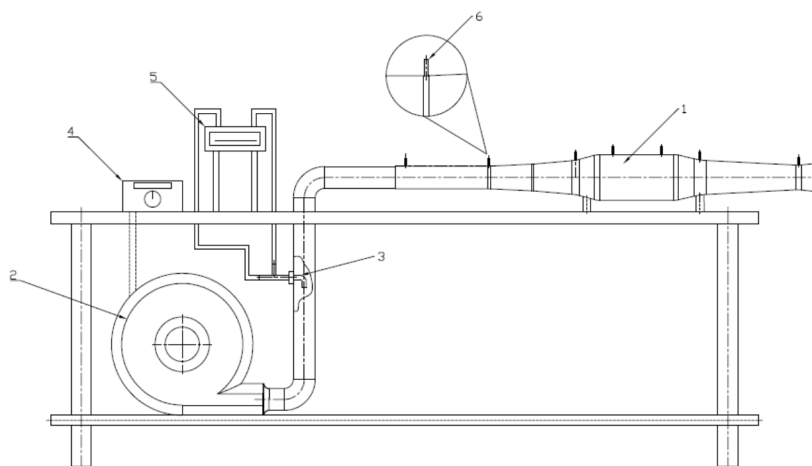


Rys. 1. Schemat przewodu służącego do przeprowadzenia badań

Pierwszy z otworów wykonano w odległości 53 mm od wlotu do przewodu, drugi znajduje się 464 mm od wlotu do przewodu. Oba otwory znajdują się na odcinku o stałej średnicy równej 104 mm. Otwór trzeci znajduje się w odległości 893 mm od wlotu do przewodu, przy średnicy 161 mm. Otwory czwarty i piąty znajdują się w odległościach odpowiednio 1078 mm i 1317 mm od wlotu do przewodu, przy średnicy 218 mm. Otwór szósty umieszczono w odległości 1507 mm od wlotu do przewodu, przy średnicy 163 mm. Otwór siódmy znajduje się w przewężeniu o średnicy ok. 112 mm w odległości 1997 mm od wlotu do przewodu.

Na rys. 2 przedstawiono schemat całego stanowiska, na którym przeprowadzono badania. Powietrze włączane wentylatorem 2 o zmiennej wydajności wpływa do przewodu 1 od lewej strony. Następnie struga przepływa przewodem do wylotu po prawej stronie (rys. 1).

Zakłada się, że natężenie przepływu powietrza jest stałe. Jego wartość ustalana jest na podstawie pomiaru ciśnienia dynamicznego w osi przewodu tłocznego wentylatora zasilającego stanowisko w powietrze (rys. 2). Pomiaru dokonywano za pomocą rurki Prandtla 3 i manometru różnicowego 5. Przepływ powietrza w przewodzie ma charakter turbulentny.



Rys. 2. Schemat budowy stanowiska: 1 – badany przewód o zmiennym przekroju; 2 – wentylator; 3 – rurka Prandtla do pomiaru ciśnienia dynamicznego (podstawa obliczenia prędkości); 4 – panel sterowniczy; 5 – manometr różnicowy współpracujący z rurką 3; 6 – króciec w punkcie pomiarowym

W zakresie badań znalazła się analiza zmienności ciśnienia statycznego w siedmiu różnych punktach oraz zmienności średniej prędkości przepływu w przekrojach poprzecznych odpowiadających otworom piezometrycznym, a także zależność między ciśnieniem statycznym i średnią prędkością w poszczególnych przekrojach. Przedstawione w niniejszej pracy wyniki dotyczą prędkości powietrza na wlocie do przewodu równej 10 m/s. Liczba Reynoldsa wynosiła ok. 70 000.

2. PLAN BADAŃ. WYNIKI

Założono cztery etapy przeprowadzenia analizy:

- obliczenia analityczne,
- pomiary empiryczne,
- obliczenia numeryczne,
- porównanie i analiza wyników.

2.1. Obliczenia analityczne

Do wyznaczenia prędkości przepływu oraz ciśnienia statycznego w kolejnych przekrojach pomiarowych przewodu posłużono się dwoma podstawowymi prawami dotyczącymi przepływającej strugi płynu. Biorąc pod uwagę umieszczenie przewodu o zmiennej średnicy w poziomie oraz założenia przedstawione we wprowadzeniu, zależność ciśnienia i średniej prędkości przepływu można opisać szczególną postacią równania Bernoulliego [1, 2, 3]:

$$\frac{c_i^2}{2g} + \frac{p_i}{\gamma} = \text{const.}, \quad (1)$$

gdzie:

c_i – prędkość średnia przepływu powietrza w i -tym przekroju;

p_i – ciśnienie statyczne w i -tym przekroju;

g – przyspieszenie ziemskie;

γ – ciężar właściwy powietrza.

Przy znanej prędkości średniej powietrza na wlocie do przewodu oraz znanym ciśnieniu (barometrycznym) otoczenia na wylocie z przewodu, można wyznaczyć poszczególne wartości prędkości średniej oraz ciśnienia statycznego za pomocą zależności (1) oraz wiedząc, że natężenie przepływu powietrza jest stałe [1, 2, 3]:

$$Q = c_i \cdot A_i = \text{const.}, \quad (2)$$

gdzie:

Q – natężenie przepływu;

A_i – i -ta powierzchnia przekroju poprzecznego.

Na podstawie obliczeń wykorzystujących powyższe zależności uzyskano wyniki, które przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki obliczeń

Nr pkt.	Prędkość średnia c [m/s]	Ciśnienie statyczne p [Pa]
1	10,01	-31,9
2	9,97	-31,4
3	4,17	17,3
4	2,28	24,5
5	2,28	24,5
6	4,07	17,8
7	8,57	-16,0

2.1. Pomiary empiryczne

Wartość prędkości ustalono metodą pośrednią, przy założeniu stałej wartości natężenia przepływu. Przed podłączeniem badanego przewodu do wentylatora wykonano pomiar prędkości przepływu powietrza w osi przewodu tłoczego wentylatora, a także prędkości średniej na wylocie z przewodu tłoczego. Wykonane pomiary wykazały, że w wybranym zakresie prędkość średnia pomierzona anemometrem na wylocie z przewodu tłoczego wentylatora jest zgodna z prędkością w osi przewodu wyznaczoną na podstawie pomiaru ciśnienia dynamicznego rurką Prandtla. Założono zatem, że prędkość przepływu powietrza wyznaczona na podstawie pomiaru ciśnienia dynamicznego odpowiada wartości prędkości średniej. Na podstawie wykonanych pomiarów oraz pomiaru średnicy przewodu tłoczego wentylatora określono natężenie przepływu, wykorzystując zależność (2). Jako wyniki pomiarów wartości prędkości średniej w poszczególnych przekrojach przyjęto wyniki z tabeli 1.

Pomiar wartości ciśnienia statycznego w kolejnych przekrojach przewodu odbywał się za pomocą manometru różnicowego podłączonego do króćców pomiarowych umieszczonych na powierzchni walcowej przewodu (rys. 2).

Wstępne pomiary zmienności ciśnienia statycznego na długości przewodu wykazały, że straty hydrauliczne mieszczą się w granicach błędu pomiaru. Założono, że straty ciśnienia są pomijalne.

W tabeli 2 zamieszczono wyniki pomiarów.

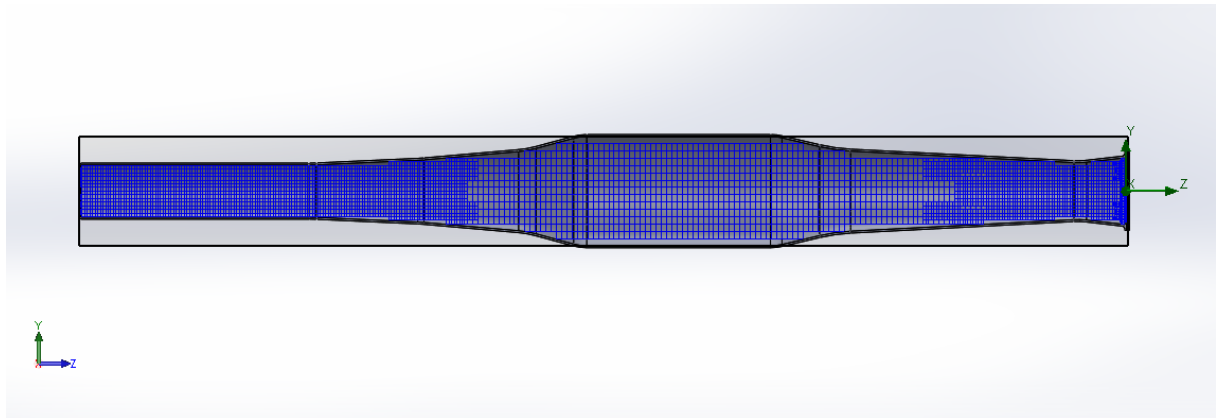
Tabela 2. Wyniki pomiarów

Nr pkt.	Prędkość średnia c [m/s]	Ciśnienie statyczne p [Pa]
1	10,01	-31,0
2	9,97	-33,5
3	4,17	13,7
4	2,28	18,2
5	2,28	20,8
6	4,07	13,5
7	8,57	-36,5

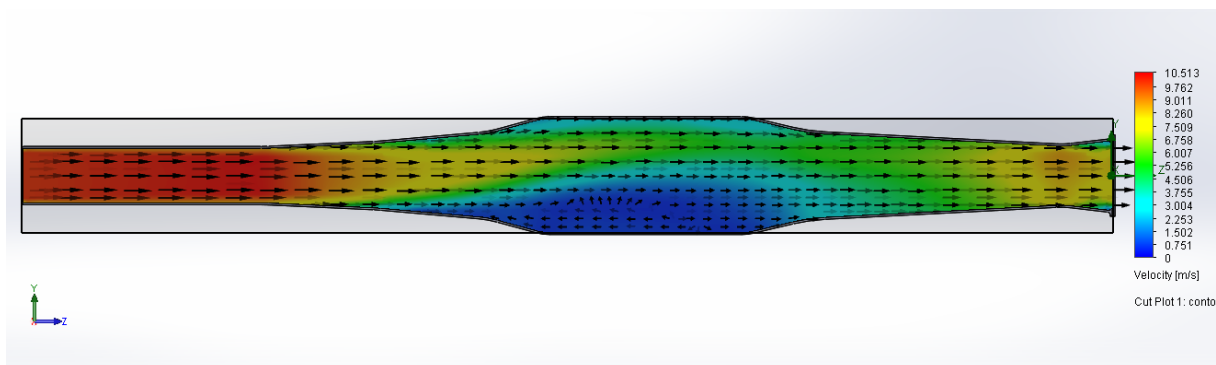
2.2. Obliczenia numeryczne

Do wykonania obliczeń numerycznych użyto oprogramowania SolidWorks z dodatkiem Flow Simulation. Po zbudowaniu modelu przewodu, zgodnie z założeniami zadano warunki brzegowe dotyczące wartości prędkości średniej na wlocie do przewodu oraz ciśnienia otoczenia na wylocie z przewodu.

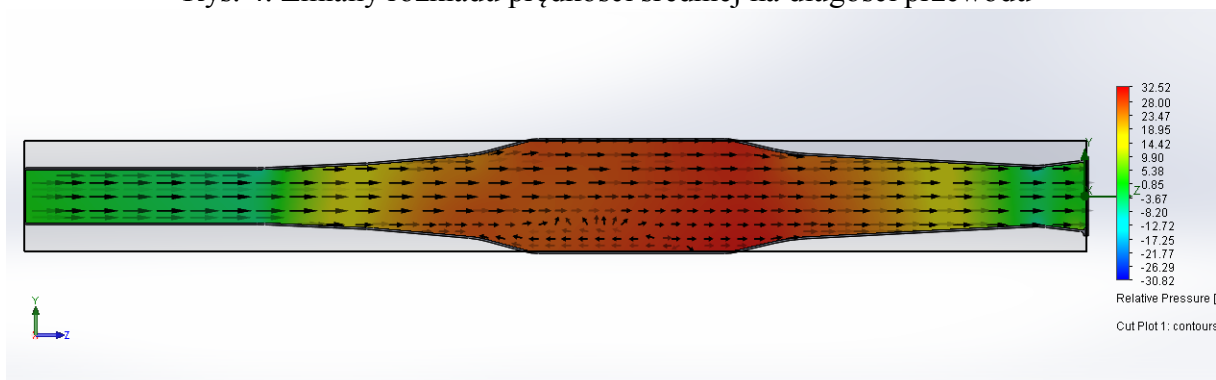
Na rys. 3 zamieszczono przyjętą siatkę obliczeniową, natomiast na rys. 4 i 5 otrzymane wyniki obliczeń.



Rys. 3. Siatka przyjęta do obliczeń



Rys. 4. Zmiany rozkładu prędkości średniej na długości przewodu



Rys. 5. Zmiany ciśnienia statycznego na długości przewodu

Zgodnie z równaniem Bernoulliego największa prędkość przepływu została wyznaczona dla przekroju o najmniejszej średnicy (rys. 3). W tym przekroju zaobserwowano także najniższe ciśnienie. W punktach 4 i 5 zaobserwowano wyraźne obniżenie prędkości przepływu przy wzroście ciśnienia statycznego. Obliczenia numeryczne wskazały także na nierównomierny rozkład prędkości w przekrojach 4 i 5, a nawet lokalny ruch poprzeczny powietrza. Stanowiło

to utrudnienie w ustaleniu średniej wartości uzyskanych wyników dla przekrojów oraz wymagało podjęcia próby wyjaśnienia, czy otrzymane wyniki są błędne, czy też stanowią odzwierciedlenie zjawisk fizycznych, których nie można rozpoznać, stosując tradycyjne metody pomiarowe.

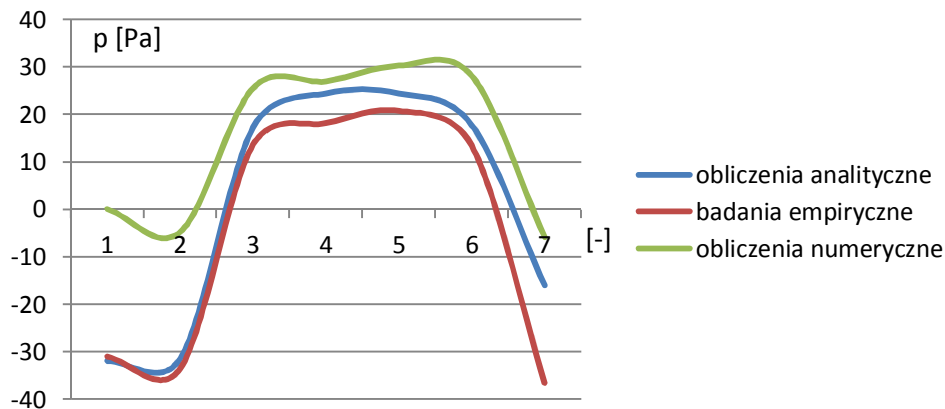
W tabeli 3 zamieszczono wartości średnie parametrów wyznaczonych dla poszczególnych punktów pomiarowych.

Tabela 3. Wyniki obliczeń numerycznych

Nr pkt.	Prędkość średnia c [m/s]	Ciśnienie statyczne p [Pa]
1	6,47	0,09
2	9,99	-4,73
3	2,94	25,59
4	1,83	27,02
5	1,71	30,32
6	3,00	28,21
7	5,99	-5,77

2.4. Porównanie i analiza wyników

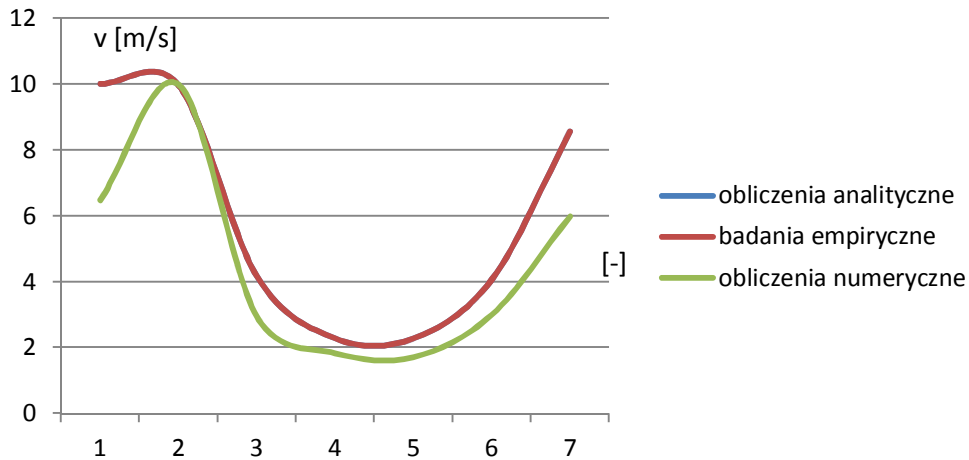
Na rys. 6 zamieszczono przebieg zmienności ciśnienia statycznego wyznaczonego trzema metodami stosowanymi w badaniu.



Rys. 6. Przebieg zmienności ciśnienia statycznego. Wyniki uzyskane trzema metodami

Przebieg zmienności ciśnienia statycznego odpowiada powszechnej wiedzy na temat równania Bernoulliego. Najwyższe wartości ciśnienia obserwowane są w punktach pomiarowych, w których przekrój przewodu jest największy, najniższe wartości zarejestrowano w punktach, gdzie przekrój poprzeczny przewodu jest najmniejszy. Na uwagę zasługuje fakt, że wyniki otrzymane każdą z metod utrzymują się w podobnej tendencji. Wyjątek stanowią punkty pomiarowe 1 i 2, w przypadku których zaobserwowano znacznie większą rozbieżność wyników obliczeń numerycznych od uzyskanych pozostałymi metodami.

Na rys. 7 przedstawiono wyniki dotyczące przebiegu zmienności prędkości przepływu w kolejnych punktach pomiarowych.



Rys. 7. Przebieg zmienności prędkości średniej. Wyniki uzyskane trzema metodami

Na rys. 7 umieszczono wyniki obliczeń dotyczących prędkości. Z uwagi na fakt, że nie istniała możliwość bezpośredniego pomiaru prędkości przepływu powietrza w poszczególnych przekrojach przewodu, w badaniach empirycznych przyjęto wartości pochodzące z obliczeń analitycznych, na podstawie równania Bernoulliego. Na rys. 7 skutkuje to całkowitym pokryciem się dwóch krzywych. Podobnie jak w przypadku porównania wyników dotyczących ciśnienia statycznego, w przypadku prędkości zaobserwować można wysoką zbieżność między obliczeniami numerycznymi i analitycznymi. Charakter zmian wartości prędkości średniej odpowiada także równaniu Bernoulliego. Najniższa wartość prędkości średniej występuje w największym przekroju przewodu, najwyższa w najmniejszym. Znacząca rozbieżność wystąpiła w punkcie pomiarowym nr 1. W trakcie analizy wyników wysunięto także hipotezę, że nieco większe różnice wartości prędkości w punktach pomiarowych 4 i 5 są skutkiem dużej zmienności wartości prędkości przepływu wzdłuż średnicy.

3. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów i obliczeń dotyczących stosunkowo prostego problemu, jakim jest przepływ powietrza przez prosty przewód o zmiennym przekroju. Otrzymano wyniki, które odpowiadają ogólnej i powszechnej wiedzy na temat zależności ciśnienia statycznego i prędkości przepływu w zamkniętych przewodach. Zaobserwowano jednak, że tradycyjne metody pomiarowe oraz obliczenia analityczne nie dają możliwości obserwacji zjawisk, jakie pozwala analizować zastosowanie metod numerycznych. Niestety autorzy nie mają pewności, czy otrzymane wyniki, przedstawione na rys. 4, są obarczone błędem, czy też stanowią odzwierciedlenie zjawisk nieustalonych zachodzących podczas przepływu powietrza ze znaczną prędkością. Ciekawą tezą jest w tym wypadku możliwość wystąpienia tzw. bifurkacji [4], których nie da się stwierdzić poprzez pomiar ciśnienia statycznego przy ścianie przewodu. Tezę tę mogłyby potwierdzać duże wahania wartości

podczas pomiaru manometrem różnicowym, co niewątpliwie mogłoby wskazywać na występowanie zjawisk zmiennych w czasie.

Otrzymane wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, że zbudowane i przygotowane do zastosowania dydaktycznego stanowisko można uznać nie tylko za sprawne i gotowe do użytku, lecz także za stanowiące potencjał do badań nad zjawiskami niestacjonarnymi zachodzącymi podczas przepływów płynów przy dużych wartościach liczby Reynoldsa.

LITERATURA

- [1] Mitosek M.: *Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska*, PWN, Warszawa, 2001.
- [2] Nałęcz T.: *Przykłady i zadania z mechaniki płynów*, Druk Gryf Centrum Graficzne, Olsztyn, 2007, ISBN 978-83-929781-0-7.
- [3] Nałęcz T.: *Laboratorium z mechaniki płynów*, Druk Gryf Centrum Graficzne, Olsztyn, 2007.
- [4] Sobieski W.: *Numerical Analysis Of Flow Bifurcations In A Closed-Off Channel*, "Technical Sciences", No. 12 (2009), pp. 272-285. ISSN 1505-4675.