

Numeryczne i eksperymentalne badanie ograniczników przepływu

Grzegorz Peczkis¹, Dorota Homa^{1*}

¹ Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice

* Autor do korespondencji: dorota.homa@polsl.pl

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki pozytywnie zakończonych poszukiwań urządzenia hydraulicznego pozwalającego na samoczynne ograniczenie strumienia przepływającej cieczy w zależności od jej prędkości napływu. Urządzenie takie jest wykorzystywane do samoczynnej regulacji ilości wody płynącej ze zbiorników wody (np. deszczowej) do cieków wodnych (rzek, kanałów itp.). Idea prezentowanego urządzenia została zgłoszona do opatentowania w Polskim Urzędzie Patentowym i po upływie kilku lat uzyskała ochronę Patentową. Przedstawione rozwiązanie poddano badaniom laboratoryjnym w trakcie których ustalono dla jednej typowości cechy konstrukcyjne w zależności od żądanych parametrów przepływowych. W trakcie badań laboratoryjnych potwierdzono założenia przepływowe prezentowanej konstrukcji.

Słowa kluczowe: kontrola przepływu wody, ograniczanie przepływu, eksperymentalna mechanika płynów, numeryczna mechanika płynów

Numerical and experimental investigation of flow reducers

ABSTRACT

The paper concerns the flow reducers which allow the flow to be self-limited as the velocity of flow increases. This kind of reducers can be successfully applied to control water flow rate from reservoirs (for example rainwater reservoirs) to watercourse (rivers, channels etc.). The concept of such device has been submitted to the Polish Patent Office and now is under patent protection. The presented construction has been tested experimentally. As a result of the construction features, a function of demanded flow parameters has been determined. During experiments, the design assumptions have been proven. The numerical simulation of the flow through the reducer was also carried out. The pressure distributions, as well as force acting on the plate of the reducer, were determined.

Keywords: water flow control, flow reducers, experimental fluid mechanics, computational fluid mechanics

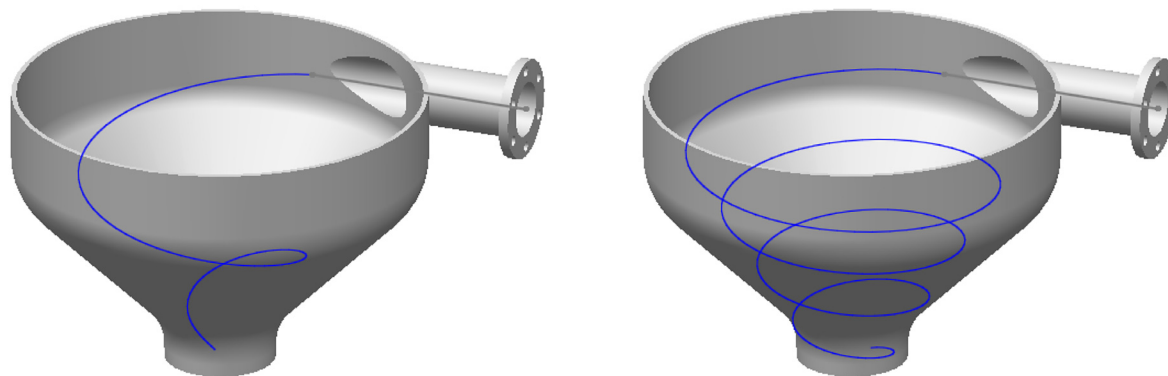
WSTĘP

Urządzenia kontroli przepływu są istotnymi elementami systemów odwadniających [Andoh i in. 2009, Faram i in. 2010]. Istniejące, rozpowszechnione na rynku samoczynne ograniczniki ilości przepływającej cieczy bazują na opatentowanym rozwiązaniu w którym ciecz przepływa przez stożkowy element i doprowadzona do niego promieniowo na zewnętrznej średnicy. Zwiększający się strumień przepływającej cieczy wytwarza zawirowanie, które narastając zwiększa stratę przepływu i uniemożliwia jego wzrost powyżej określonych wartości (rys. 1). Zagadnienie

to było przedmiotem wielu zakończonych prac badawczych [Kotowski 2010, Wójtowicz 2007, Wójtowicz 2008]. Prezentowane w artykule rozwiązanie różni się względem znanego odmiennym sposobem działania oraz sposobu realizacji ograniczenia przepływu, które zachodzi na skutek wzrostu prędkości przepływającej cieczy.

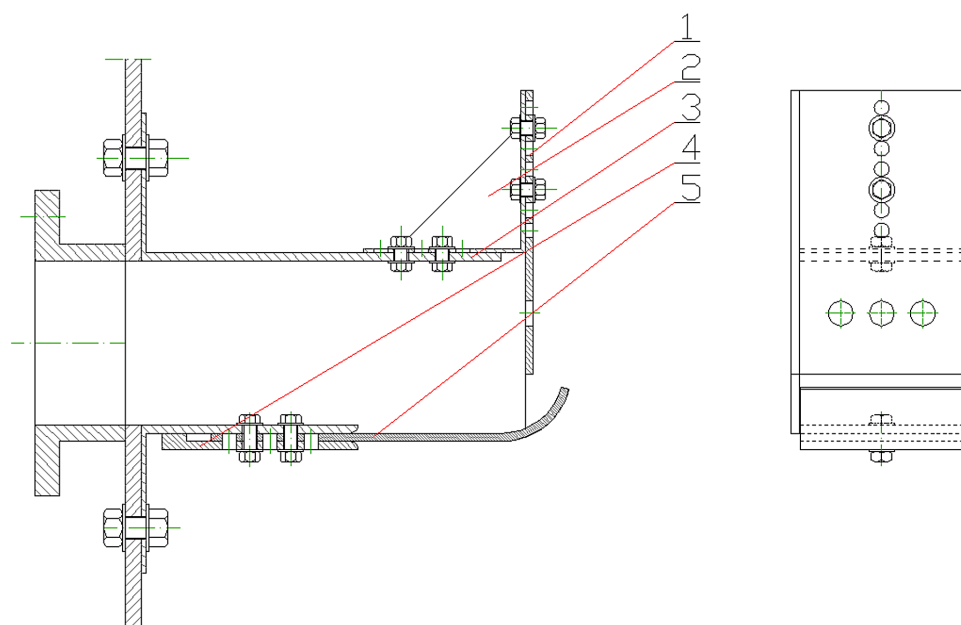
BADANE URZĄDZENIE

Schemat urządzenia przedstawiono na rysunku 2. Nieruchomy kadłub urządzenia jest przytwierdzony śrubunkiem poprzez kołnierz do ściany



Rys. 1. Klasyczny ogranicznik przepływu w którym ciecz ulega większemu zawirowaniu wskutek zwiększenia prędkości. Po lewej stronie przepływ z niedużą wysokością napływu cieczy. Po prawej stronie przepływ z większą wysokością napływu cieczy

Fig. 1. An ordinary flow rate reducer of cone shape. The fluid is forced to rotary movement so that the flow is reduced. On the left – flow with low velocity head, on the right – flow with higher velocity head



Rys. 2. Schemat urządzenia badawczego: 1 – nieruchoma przesłona otworu, 2 – żebro usztywniające, 3 – kadłub o przekroju poprzecznym prostokątnym, 4 – mocowanie płytki sprężystej, 5 – płytka sprężysta (widoczny wariant płytki zakrzywionej)

Fig. 2. The scheme of the investigated device: 1 – the fixed screen of the channel hole, 2 – stiffening fin, 3 – casing of rectangular cross-section, 4 – elastic plate fixing, 5 – elastic plate (the case of bend plate)

zbiornika z wodą. Kadłub ma pole przekroju prostokątne. Do dolnej ściany kadłuba przytwierdzona jest sprężysta płytka. Poza obszarem przylegania płytki do kadłuba jest ona swobodna i może się wyginać do środka kadłuba. Wygięciu temu towarzyszy przymyknięcie kanału kadłuba.

W wyniku wzrostu wysokości wody w zbiorniku zwiększa się prędkość przepływu wody przez urządzenie. Wzrost prędkości przepływu na skutek powstającej na płycie różnicy ciśnień wywołuje siłę, której wypadkowa zagina płytkę

w kierunku zgodnym z przepływem cieczy. Zaginanie płytki jest tym większe im większa jest prędkość przepływającej cieczy i w skrajnym przypadku prowadzi do zamknięcia kanału wyginającą się sprężystą płytką. Po jego zamknięciu wypływ cieczy ze zbiornika odbywa się poprzez nieszczelności pomiędzy sprężystą płytką a nieruchomym kadłubem. W trakcie badań stosowano również płytki sprężyste w których wykonane były otwory umożliwiające większy przepływ wody ze zbiornika w stanie przymknięcia kanału

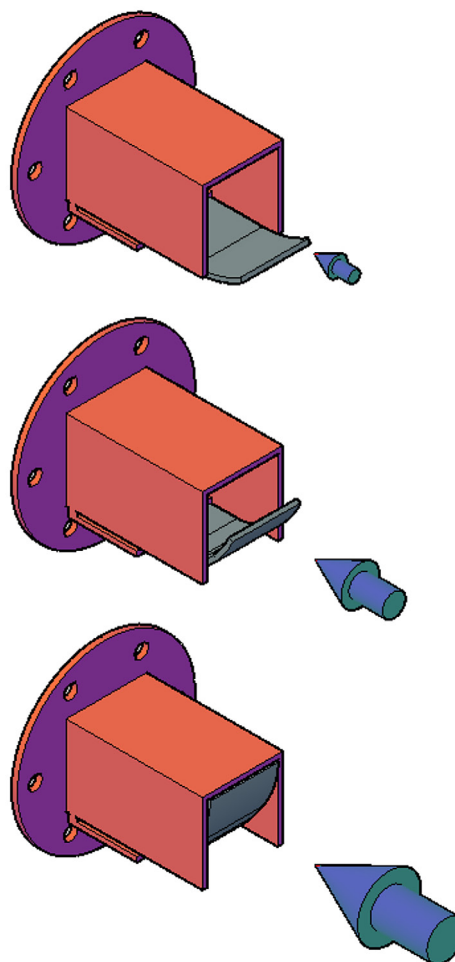
płytką sprężystą. Wzrost powierzchni otworów powoduje również zmniejszenie podatności płytki na zamykanie się przy wzrastającej prędkości przepływu wody.

Zamknięcie kanału następuje przy większych prędkościach niż ma to miejsce dla wariantu płytki bez otworów. Na rysunku schematu płytka jest w wersji zagiętej na stałym promieniu. W badaniach testowano płytki o różnych geometriach zakrzywień, zaokrąglenia oraz proste. Kształt zagięcia, zakrzywienia płytki ma pomijalnie mały wpływ na charakter zjawiska, które występuje w urządzeniu. W trakcie badań stosowane były różne materiały z których wykonane były płytki (stale sprężyste oraz tworzywa sztuczne). W celu uziarnienia ich sprężystości uziarniano ich grubość.

Projektowane urządzenie ograniczające przepływ ma być stosowane do zbiorników z wodą deszczową, w których poziom wody zwiększa się gwałtownie na skutek obfitych opadów deszczu i gwałtownych roztopów. Wymóg nie przekraczania maksymalnego przepływu dopuszczalnego jest ograniczeniem instalacji odprowadzającej wodę deszczową. Woda gromadzona w zbiornikach może tylko do ściśle określonych wartości granicznych zwiększać wypływ do instalacji wody deszczowej wraz ze wzrostem wysokości cieczy w zbiorniku. Powyżej dopuszczalnych wartości granicznych powinno nastąpić zatrzymanie zwiększania się wypływu cieczy ze zbiornika. Schemat działania ogranicznika przedstawiono na rysunku 3.

STANOWISKO BADAWCZE

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 4. W trakcie budowy stanowiska wzięto pod uwagę ograniczenia wysokości laboratorium w którym prowadzone były badania i postanowiono zwiększanie wysokości słupa wody na urządzeniu badawczym realizować poprzez zwiększanie podciśnienia na wypływie z urządzenia. W tym celu urządzenie badawcze zainstalowane wewnątrz wypełnionego wodą do poziomu około metra zbiornika jest połączone rurociągiem z króćcem ssawnym pompy wirowej. Za urządzeniem badawczym zainstalowano czujnik ciśnienia mierzący wartość podciśnienia. Wzrost prędkości przepływu cieczy, czyli spadku ciśnienia na urządzeniu badawczym był regulowany otwarciem zasuwki umieszczonej na tło-

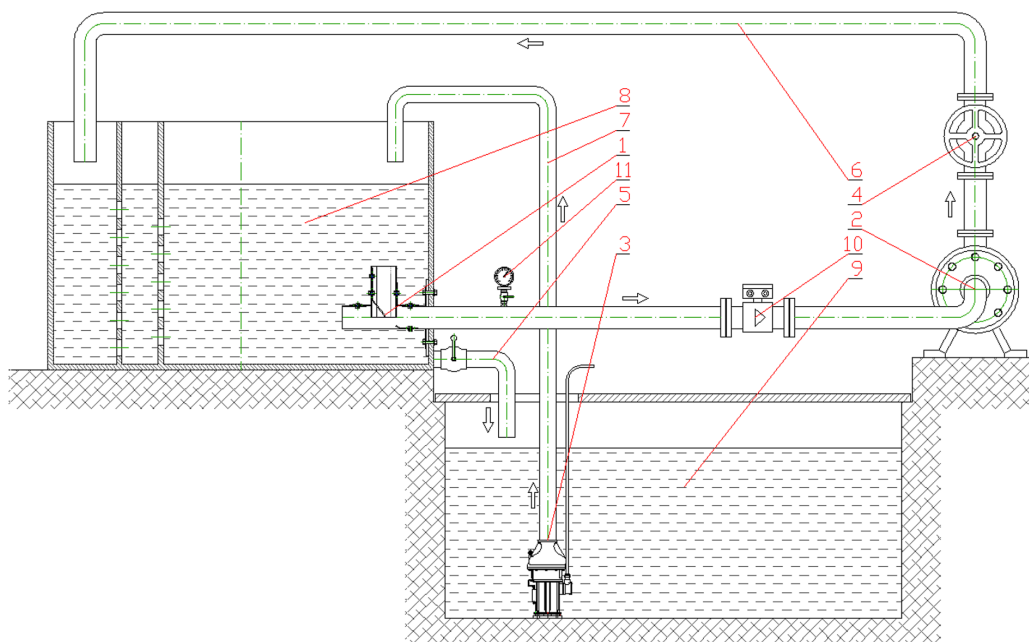


Rys. 3. Schemat działania urządzenia wskutek wzrostu prędkości napływu cieczy. Większą prędkość napływu reprezentuje większa strzałka wskazująca kierunek przepływu cieczy

Fig. 3. Working principle of the investigated device. The biggest arrow represents the highest flow rate

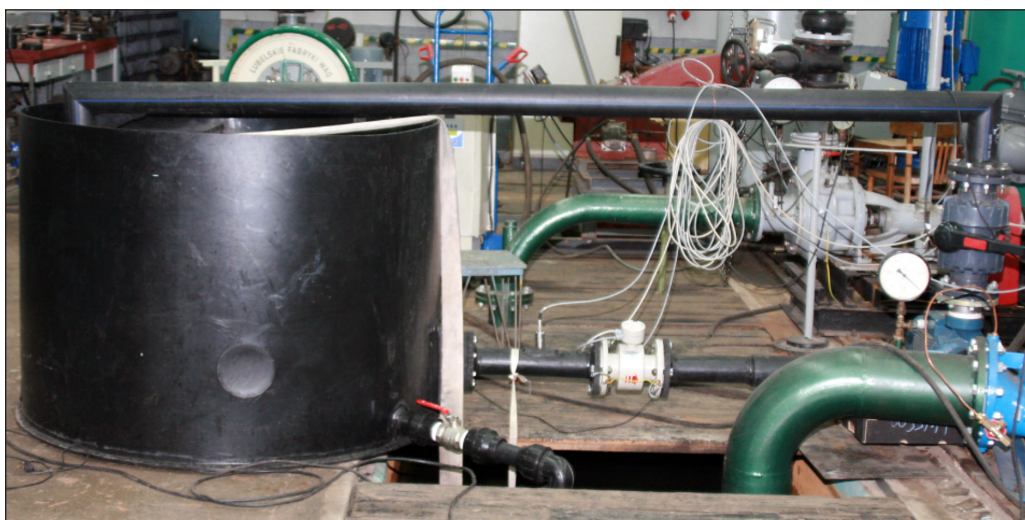
czeniu pompy. Woda tłoczona rurociągiem przez pompę poprzez przepływomierz elektromagnetyczny jest kierowana powrotnie do zbiornika. W celu uniknięcia zaburzenia działania urządzenia strugą napływającej wody z rurociągu tłoczego jest on separowany poprzez dwie przegrody sitowe w których następuje uspokojenie przepływu. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 5.

Przed każdym etapem badań, w których urządzenie było modyfikowane z uwagi na geometrię konstrukcji i rodzaj użytych materiałów płytki sprężystej, woda ze zbiornika była spuszczana do zbiornika zewnętrznego. Przed przystąpieniem do pomiarów napełniano zbiornik pomiarowy wodą ze zbiornika zewnętrznego.



Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego: 1 – urządzenie badane, 2 – rurociąg ssawny, 3 – pompa zasilająca układ obiegowy, 4 – zasuwa dławiąca, 5 – rurociąg odpływowy zbiornika, 6 – rurociąg tłoczny, 7 – rurociąg zasilający zbiornik, 8 – zbiornik układu obiegowego, 9 – zbiornik zasilający, 10 – przepływomierz elektromagnetyczny, 11 – wakuometr

Fig. 4. Scheme of the measurement circuit: 1 – the investigated device, 2 – suction pipeline, 3 – pump, 4 – damper, 5 – tank discharge pipeline, 6 – pressure pipeline, 7 – feeding tank pipeline, 8 – water system tank, 9 – feeding tank, 10 – electromagnetic flow meter, 11 – vacuum meter

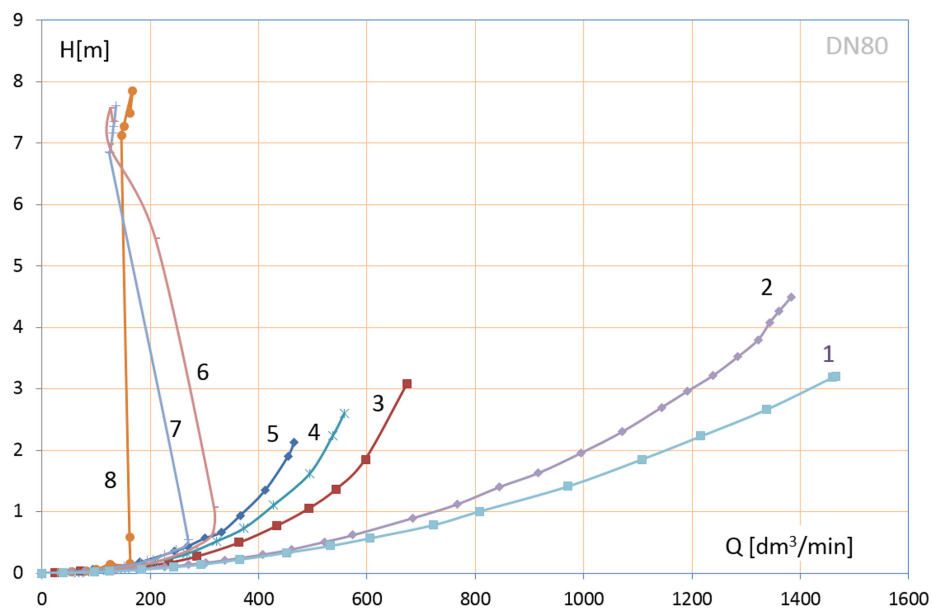


Rys. 5. Widok stanowiska badawczego w laboratorium
Fig. 5. View of the measurement circuit in the laboratory

WYNIKI PRZEPROWADZONYCH POMIARÓW

Otrzymane w badaniach laboratoryjnych wyniki tworzą rodziny krzywych wykładniczych, których intensywność nachylenia i graniczna maksymalna wydajność są różne, lecz wzajemnie podobne. Na rysunku 6 pokazano wybrane, repre-

zentatywne wyniki dla wybranych wariantowych cech konstrukcyjnych urządzenia badawczego. Zmienność uzyskanych wyników jest związana z uzmiennianiem cech geometrycznych urządzenia badawczego i odpowiada powszechnie znaną zasadą przepływu np. wypływu cieczy przez otwory. Kluczowa graniczna, maksymalna wydajność przy której następuje zapadnięcie ele-



Rys. 6. 1 – płytkę stalową płaską grubość 2,5 mm, 2 – płytkę stalową płaską grubość 2 mm, 3 – płytkę stalową zagiętą z dwoma otworami $\Phi 7$, 4 – płytkę stalową zagiętą z dwoma otworami $\Phi 5$, 5 – płytkę stalową zagiętą z jednym otworami $\Phi 5$, 6 – płytkę z ABS grubość 6mm zagiętą, 7 – płytkę z ABS grubość 5 mm zagiętą, 8 – płytkę z ABS grubość 4 mm zagiętą.

Fig. 6. 1 – steel plate of thickness 2.5 mm, 2 – steel plate of thickness 2 mm, 3 – steel plate bended with 2 holes $\Phi 7$, 4 – steel plate bended with two holes $\Phi 5$, 5 – steel plate bended with one hole $\Phi 5$, 6 – ABS plate, bended of thickness 6 mm, 7 – ABS plate, bended of thickness 5 mm, 8 – ABS plate, bended of thickness 4 mm

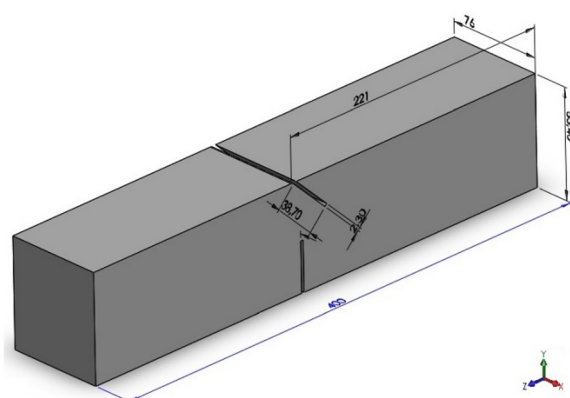
mentu sprężystego przymykającego przepływ została wyznaczona dla rozpatrywanych przypadków założonych luzów i nieszczelności badanego urządzenia.

SYMULACJA NUMERYCZNA PRACY OGRANICZNIKA PRZEPŁYWU

W celu zbadania rozkładu ciśnienia na płycie sprężystej wykonano symulację numeryczną przepływu przez ogranicznik. Geometria płynu przepływającego przez ogranicznik została odwzorowana w programie SolidWorks, w skali 1:1. Schemat geometrii przedstawiono na rysunku 7.

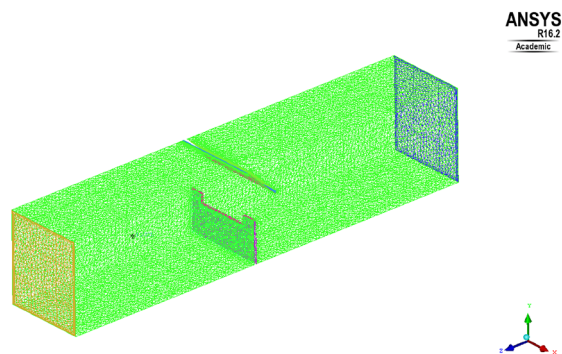
Do stworzenia siatki numerycznej użyto oprogramowania ICEM CFD. W celu prawidłowego zamodelowania zjawisk występujących w warstwie przyściennej elementy blisko ścian są znacznie mniejszych rozmiarów niż te znajdujące się w środku przepływu. Widok siatki przedstawiono na rysunku 8.

Siatka składała się z 680 tys. elementów oraz 220 tys. węzłów. Warstwa przyścienna została zamodelowana za pomocą 6 warstw elementów o współczynniku przyrostu (aspect ratio) 1,2. Pierwszy element od ściany ma wysokość ok. 0,1 mm.



Rys. 7. Geometria płynu przepływającego przez kanał z płytką

Fig. 7. The view of the fluid that flows through the channel of reducer



Rys. 8. Widok siatki numerycznej

Fig. 8. The view of the numerical grid

Siatka została wyeksportowana do środowiska ANSYS CFX i zaadaptowana do dalszych obliczeń.

WYNIKI SYMULACJI

Analizę numeryczną przeprowadzono przy założeniu warunków ustalonych przepływu, czyli przypadku *steady state*. Czynnikiem roboczym jest woda, ciśnienie referencyjne to 1 atm. Założono izotermiczność przepływu oraz temperaturę czynnika (wody) 20°C. Model turbulencji przyjęty do symulacji to k-epsilon. Jest to model dwurównaniowy, dobrze sprawdzający się w obliczeniach przepływów o stosunkowo niedużych gradientach ciśnień [Bardina i in. 1997, Wilcox 1998]. Na wlocie i wylocie do kanału przyjęto warunki brzegowe ciśnienie statyczne. Po ustabilizowaniu się obliczeń odczytywano strumień masy wody. W każdym przypadku przyjęto ciśnienie względne na wylocie 0 kPa. Przeanalizowano cztery przypadki dla następujących ciśnień na wlocie: 40, 30, 20 i 10 kPa. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Kolejnym etapem było oszacowanie siły oddziałującej na wygiętą płytkę stalową. Siłę wyznaczono jako iloczyn różnicy ciśnień działającej na płytkę i jej powierzchni zgodnie z zależnością:

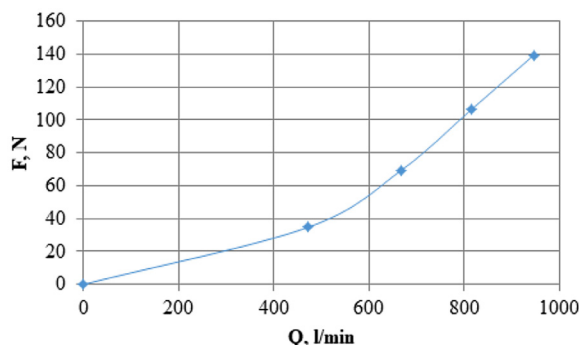
$$F = \Delta p \cdot A \quad (1)$$

gdzie: F – siła, N

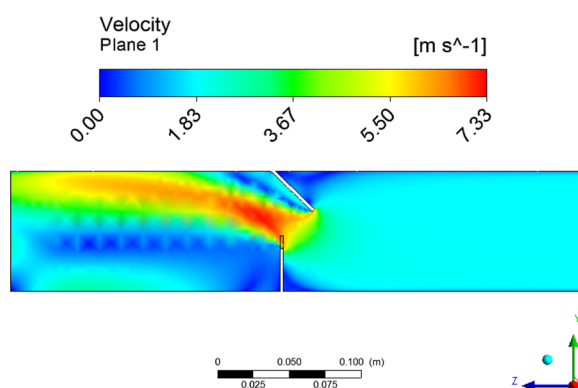
Δp – różnica ciśnień na obu ścianach płytki, Pa

A – średnia powierzchnia płytki, w badanym przypadku $A = 2,897 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

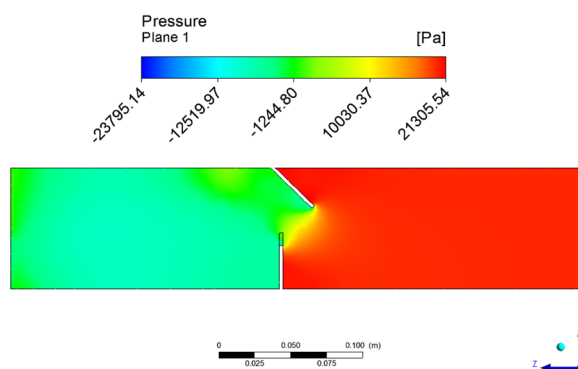
Na rysunku 9 przedstawiono zależność siły F oddziałującej na płytkę od strumienia Q cieczy. Siła wzrasta wraz ze wzrostem strumienia objętościowego cieczy. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono rozkład prędkości i ciśnienia w kanale dla ciśnienia wlotowego p_{in} równego 20 kPa.



Rys. 9. Zależność siły F od strumienia cieczy Q
Fig. 9. Force F as a function of flow rate Q



Rys. 10. Rozkład prędkości w kanale z płytką
Fig. 10. The velocity distribution in the channel



Rys. 11. Rozkład ciśnienia w kanale z płytką
Fig. 11. The pressure distribution in the channel

Tabela 1. Wyniki symulacji
Table 1. Results of flow simulation

p_{in} (kPa)	p_{out} (kPa)	Q (l/min)	m (kg/s)	H (m)	Δp (Pa)	F (N)
0	0	0	0	0	0	0
10	0	472.0	7.85	1.02	12190	34.8
20	0	668.5	11.12	2.04	24400	69.6
30	0	815.2	13.56	3.06	37306	106.4
40	0	945.7	15.73	4.08	48830	139.3

Średnia prędkość na wlocie dla ciśnienia wlotowego 20 kPa to 1,78 m/s. W przewężeniu utworzonym przez płytkę sprężystą prędkość wzrasta do ponad 7 m/s. Ciśnienie w okolicach płytki sprężystej spada do wartości ok. 77,5 kPa w skali absolutnej. Istotny z punktu widzenia wygięcia płytki jest rozkład ciśnienia na jej ściankach, od strony wlotu płynu i od strony wylotu. Średnie ciśnienie na powierzchni płytki od strony wlotu płynu to 19,6 kPa. Po drugiej stronie panuje podciśnienie, o średniej wartości 4 kPa. Oznacza to że siła działająca na płytkę wynosi ok. 70 N.

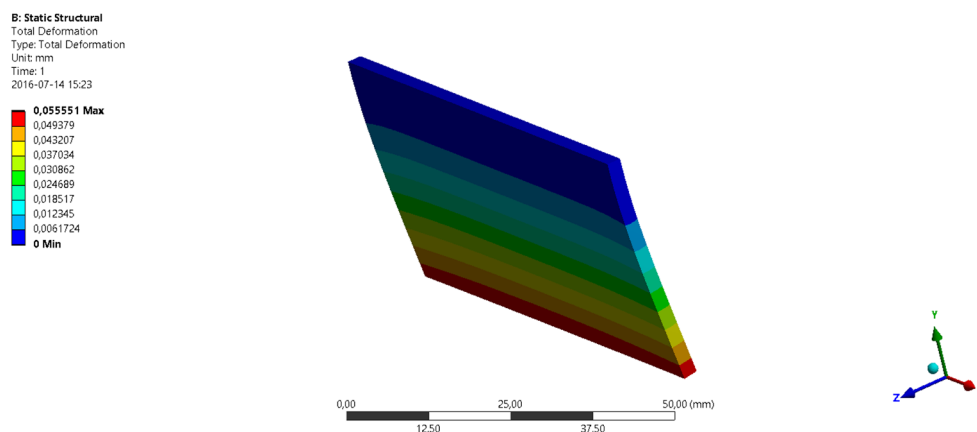
ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA

Dysponując rozkładem ciśnienia po obu stronach płytki sprężystej przeprowadzono także analizę MES pozwalającą określić naprężenia w płytce oraz jej odkształcenie na skutek panującej różnicy ciśnień. Dla różnicy

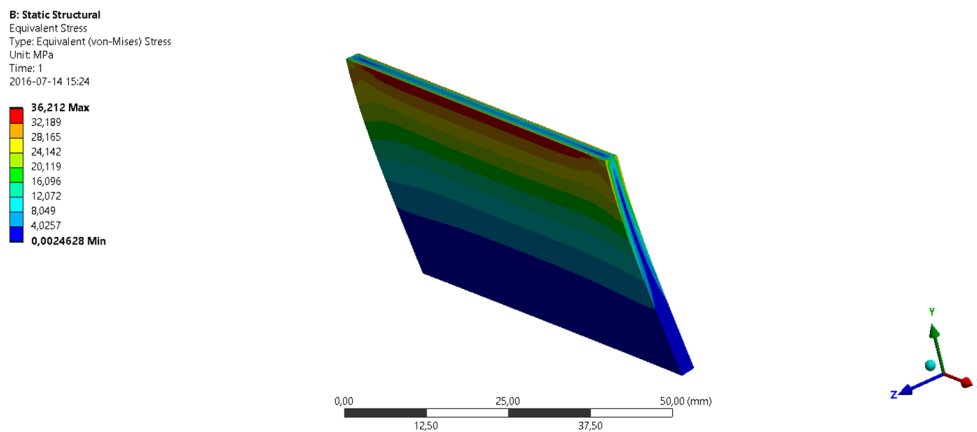
ciśnienia 48 kPa (maksymalne) otrzymano maksymalne odkształcenie na poziomie 0,05 mm oraz naprężenia zredukowane ok. 36 MPa. Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono wyniki analizy mechanicznej.

PORÓWNANIE WYNIKÓW SYMULACJI NUMERYCZNEJ Z WYNIKAMI EKSPERYMENTALNYMI

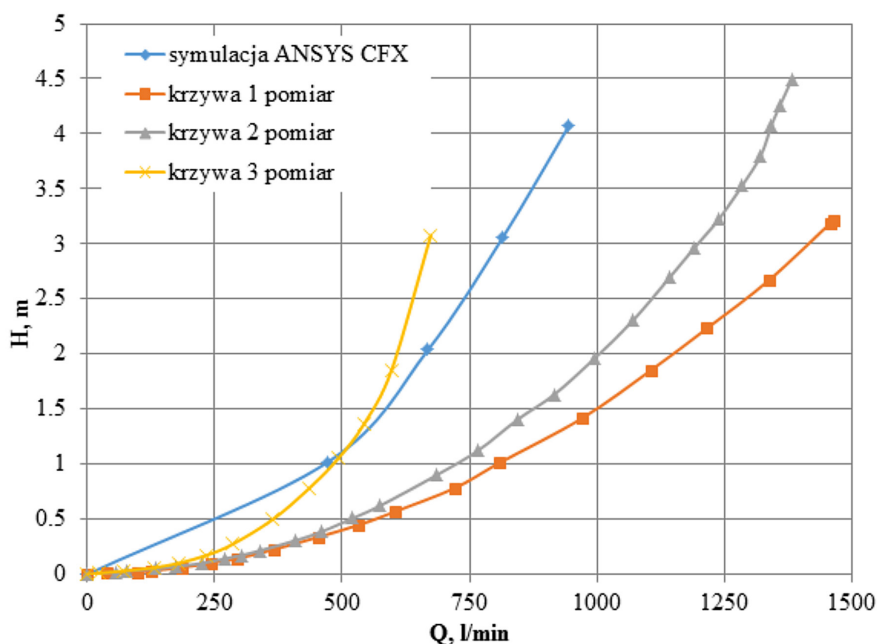
Na rysunku 14 porównano charakterystyki ograniczników otrzymane w wyniku przeprowadzenia symulacji numerycznej z krzywymi wyznaczonymi eksperymentalnie. Krzywa otrzymana numerycznie znajduje się pomiędzy krzywymi oznaczonymi cyframi 2 i 3 na rysunku 6. Dla symulacji numerycznej otrzymano bardziej stromą charakterystykę. Może to wynikać z faktu, iż ilość zmiennych determinujących wynik pomiarów jest trudna do przewidzenia w



Rys. 12. Odkształcenia całkowite
Fig. 12. Total deformation



Rys. 13. Naprężenia zredukowane
Fig. 13. Equivalent stress



Rys. 14. Porównanie wyniku eksperymentu i symulacji numerycznej
 Fig. 14. The comparison between the numerical simulation results and experimental data

przeprowadzanych badaniach numerycznych, co jest związane ze skomplikowaną strukturą przepływu wirowego oraz nakładającym się na działanie urządzenia sprężystą podatnością elementu roboczego.

PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych ograniczników przepływu, które mają za zadanie ograniczenie strumienia przepływającej cieczy w zależności od jej prędkości napływu. Ograniczenie przepływu następuje samoczynnie poprzez wygięcie płytki zamontowanej na drodze płynu. W zależności od materiały płytki oraz jej grubości otrzymano różne charakterystyki przepływu przez ogranicznik.

Przeprowadzono także symulację przepływu przez ogranicznik z zamontowaną stalową płytką o grubości 2,3 mm. Charakterystyka otrzymana w wyniku symulacji CFD ma podobny kształt do krzywych otrzymanych eksperymentalnie. Wyznaczono także różnicę ciśnień powstającą po obu stronach płytki podczas przepływu cieczy. Dzięki temu można było określić średnie siły działające na płytkę oraz jej wygięcie.

LITERATURA

1. Andoh, R.Y.G., Faram, M.G. and Osei, K. 2009. Vortex flow controls in integrated stormwater management for urban environments. Proceedings of the 6th Int. Water Sensitive Urban Design Conf. and Hydropolis #3, Australia, 5–8 May.
2. Bardina J.E., Huang P.G., Coakley T.J. 1997. Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development. NASA Technical Memorandum 110446.
3. Faram, M.G. Stephenson, A.G. and Andoh, R.Y.G. 2010. Vortex flow controls: state of the art review and application (from the catchbasin to the dam). Proceedings of NOVATECH 2010 - 7th Int. Conf. on Sustainable Techniques and Strategies for Urban Water Management, France,
4. Kotowski A., Wójtowicz P. 2010. Analysis of hydraulic parameters of conical vortex regulators, Polish Journal of Environmental Studies, 19(4), 749-756.
5. Wilcox D.C. 1998. Turbulence Modeling for CFD. Second edition. Anaheim: DCW Industries.
6. Wójtowicz P., Kotowski A. 2008. Badania modelowe stożkowych regulatorów hydrodynamicznych, Ochrona Środowiska, 30(3), 37-44.
7. Wójtowicz P. 2007. Wpływ parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych wybranych regulatorów wirowych na ich charakterystykę hydrauliczną. Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Raport PRE nr 6/2007 Wrocław 2007.