

Symulacje numeryczne zjawiska kawitacji w zwężce Venturiego i ich walidacja z użyciem systemu optoelektronicznego

Numerical simulations of cavitation phenomenon in Venturi tube and their validation using an optoelectronic system

AGNIESZKA NIEDŹWIEDZKA
SEWERYN LIPIŃSKI *

Materiały z XX SKWPPWiE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.168

Artykuł zawiera zestawienie wyników symulacji numerycznych zjawiska kawitacji w zwężce Venturiego z danymi z badań eksperymentalnych, przeprowadzonych z użyciem optoelektronicznego systemu do pomiaru intensywności chmury kawitacyjnej. Celem artykułu jest określenie stopnia zgodności uzyskanych wyników i ocena przydatności wybranej metody walidacji. Motywacją do badań jest brak metody umożliwiającej precyzyjne określenie zawartości pary wodnej w płynie w warunkach kawitacji.

SŁOWA KLUCZOWE: kawitacja, modele homogeniczne, optoelektronika

The article presents the comparison of the results of numerical simulations of cavitation in venturi tube with data obtained in experimental investigations using an optoelectronic system for measurements of cavitation cloud intensity. The aim of the article is to determine the compliance degree of the obtained results and the evaluation of the suitability of the chosen validation method. The motivation is lack of a method for precise determination of vapour content in liquid during cavitation.

KEYWORDS: cavitation, homogeneous models, optoelectronic

Kawitacja jest zjawiskiem występującym podczas przepływu przez układy hydrauliczne zawierające np. elementy przewężzeń [2]. Charakterystycznym i często stosowanym obiektem w układach hydraulicznych, jednakże do dnia dzisiejszego niewystarczająco zbadanym, jest zwężka Venturiego. Odnacza się ona możliwością zapewnienia stałego masowego natężenia przepływu w warunkach zmiennego ciśnienia na wylocie zwężki. Iloraz wartości ciśnienia na wlocie i wylocie zwężki, poniżej którego urządzenie zapewnia stałe masowe natężenie przepływu, wynosi ok. 0,8. Z tym trybem pracy wiąże się występowanie zjawiska kawitacji [1, 3].

Podstawy teoretyczne

Dla modelu Schnerrera i Sauera równania źródeł sformułowane są następująco:

$$\dot{m}^+ = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2(p - p_{sat})}{\rho_l}} \quad p > p_{sat} \quad (1)$$

$$\dot{m}^- = -\frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{\rho_l}} \quad p_{sat} > p \quad (2)$$

gdzie: ρ_v – gęstość pary [kg/m^3] i ρ_m – gęstość mieszaniny [kg/m^3].

Dla tego modelu charakterystyczny jest brak współczynników. Model opiera się wyłącznie na ilościowych wartościach parametrów fizycznych.

* Mgr inż. Agnieszka Niedźwiedzka (agnieszka.niedzwiedzka@uwm.edu.pl); dr inż. Seweryn Lipiński (seweryn.lipinski@uwm.edu.pl) – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Model Singhala i in. określany jest pełnym modelem kawitacji, ponieważ jego źródła uwzględniają bardzo dużo parametrów fizycznych:

$$\dot{m}^+ = C_p \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_l \sqrt{\frac{2(p - p_{sat})}{\rho_l}} \quad p > p_{sat} \quad (3)$$

$$\dot{m}^- = -C_d \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{\rho_l}} (1 - Y_v - Y_g) \quad p_{sat} > p \quad (4)$$

gdzie: C_p – stała kondensacji, k – energia kinetyczna turbulencji [m^2/s^2], C_d – stała parowania, Y_v – udział masowy pary, Y_g – udział masowy nierozpuszczonych gazów.

W ostatnim rozpatrywanym modelu, sformułowanym przez Zwarta i in., źródła przedstawiane są w postaci prostej:

$$\dot{m}^+ = C_p \frac{3\alpha_v \rho_v}{R} \sqrt{\frac{2(p - p_{sat})}{\rho_l}} \quad p > p_{sat} \quad (5)$$

$$\dot{m}^- = -C_d \frac{3\rho_v (1 - \alpha_v) \alpha_{nuc}}{R} \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{\rho_l}} \quad p_{sat} > p \quad (6)$$

gdzie: α_{nuc} – udział objętościowy fazy zarodkowania.

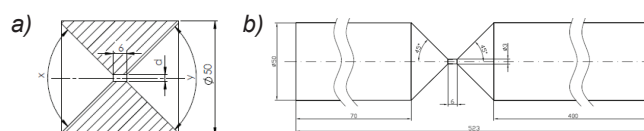
Symulacje numeryczne

Symulacje numeryczne zostały przeprowadzone w programie Fluent, będącym częścią pakietu ANSYS. Siatkę do analiz przygotowano w programie ICEM CFD. Badany przepływ jest dwuwymiarowy, a symulacje przeprowadzano w funkcji czasu.

Przewężenie analizowanej zwężki (rys. 1a) ma średnicę 3 mm i długość 6 mm. Kąty części zbieżnej i rozbieżnej są sobie równe i wynoszą 45°. Średnica zewnętrzna zwężki wynosi 50 mm. Odwzorowywana komora kawitacyjna (rys. 1b) ma całkowitą długość 523 mm, z czego długość części wlotowej przed zwężką wynosi 70 mm, a części wylotowej za zwężką – 400 mm.

Siatka nałożona w programie ICEM CFD jest siatką strukturalną, składającą się z elementów czworobocznych. W obliczeniach zastosowano trzy stopnie zagęszczenia siatki. Dla pierwszego stopnia liczba elementów wynosi 1244, dla drugiego – 4170, a dla trzeciego – 16 898.

Symulacje numeryczne przeprowadzono na trzech poziomach zagęszczenia siatki dla wybranej wartości ciśnienia na wlocie 873 326 Pa oraz ciśnienia na wylocie równego wartości ciśnienia atmosferycznego 101 325 Pa. Wartości temperatury

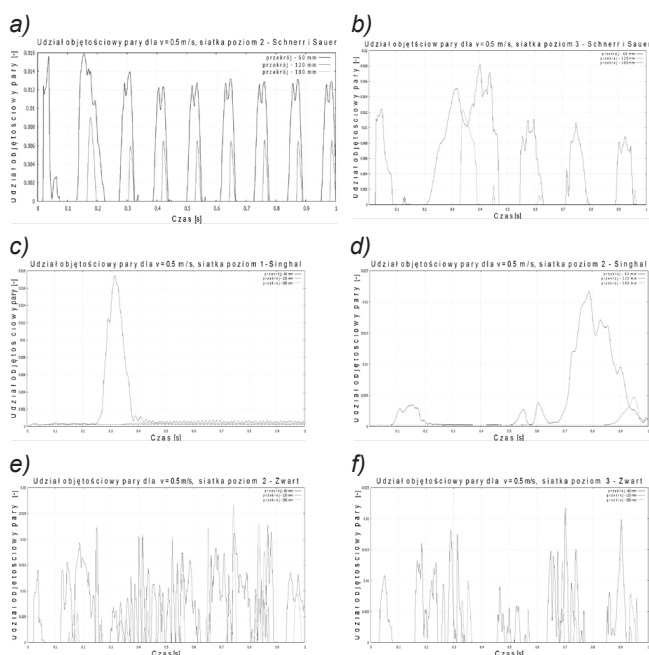


Rys. 1. Komora kawitacyjna: a) przekrój zwężki, b) wymiary

zadano następująco: na wlocie 21,4°C, na wylocie 21,7°C. Wartości pozostałych parametrów fizycznych ustalono na następujących poziomach: $\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_v = 0,02558 \text{ kg/m}^3$, $\mu_l = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\mu_v = 1,26\text{e}-06 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Zastosowano model turbulencji k- ϵ . Wartość kroku czasowego wynosi 0,001 s, a liczba iteracji w trakcie jednego kroku 20.

Wyniki symulacji numerycznych

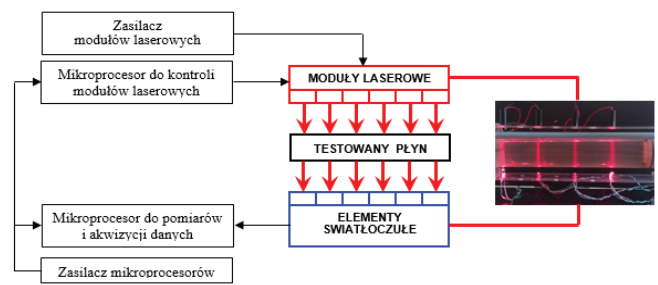
W celu określenia zmian w udziale objętościowym pary w komorze kawitacyjnej zdefiniowano trzy przekroje, w których zbierano dane. Przekroje te umieszczone są w odległości 60, 120 i 180 mm od krawędzi części rozbieżnej zwężki. Dane pobierano w każdym kroku czasowym, co pozwoliło na uzyskanie informacji o zmianie tej wielkości w czasie jednej sekundy. Rysunek 2a–b przedstawia zmiany udziału objętościowego pary w komorze kawitacyjnej dla symulacji przeprowadzonych z użyciem modeli Schnerra i Sauera. Analizowane przebiegi mają pulsacyjny charakter, widoczny zwłaszcza w przypadku zastosowania siatki o drugim stopniu zagęszczenia. Na rys. 2c zaprezentowane są wyniki zmian udziału objętościowego pary uzyskane z użyciem modelu Singhala dla drugiego poziomu zagęszczenia siatki. Zmiany nie mają już pulsacyjnego charakteru. Rysunek 2e przedstawia zmiany udziału objętościowego pary dla drugiego poziomu zagęszczenia siatki według modelu Zwarta. Pulsacyjny charakter zmian jest widoczny w stopniu mniejszym niż w przypadku symulacji z zastosowaniem modeli Schnerra i Sauera. Charakter zmian nie jest już tak regularny. Należy jednak zwrócić uwagę, iż w przypadku drugiego stopnia zagęszczenia siatki maksymalna wartość udziału objętościowego pary jest notowana dla przekroju drugiego, nie zaś – jak w poprzednich analizach – dla pierwszego.



Rys. 2. Zmiany udziału objętościowego pary w płynie dla drugiego i trzeciego poziomu siatki z użyciem modeli Schnerra i Sauera (a, b), Singhala i in. (c, d) oraz Zwarta i in. (e, f)

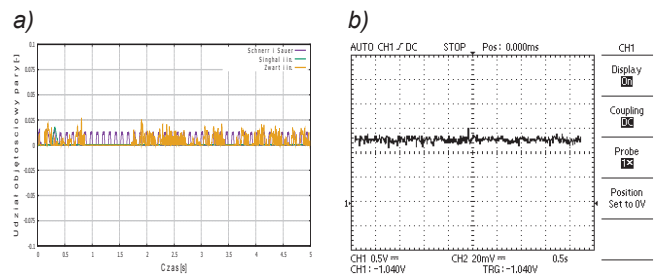
Pomiary eksperymentalne

W pomiarach eksperymentalnych wykorzystano nowoczesny system rejestracji intensywności chmury kawitacyjnej bazujący na układach optoelektronicznych (rys. 3). System wykorzystuje lasery oraz elementy światłoczułe do wykrycia zmian w udziale objętościowym pęcherzyków pary w analizowanym ośrodku, w dowolnie zdefiniowanych przekrojach komory kawitacyjnej.



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego

Wykresy udziału objętościowego pary w symulacjach numerycznych powstają z uzyskanych danych ilościowych. System optoelektroniczny nie daje jednak bezpośredniej informacji dotyczącej wartości różnicy napięcia, wynikającej z rozpraszania światła lasera na pęcherzykach pary w przepływającej wodzie. Najprostszym możliwym rozwiązaniem problemu walidacji jest wizualne porównanie wykresu zmian objętościowego udziału pary z wykresem zmian napięcia, zarejestrowanym na oscyloskopie. Rysunek 4 przedstawia zestawienie wyników symulacji numerycznych udziału objętościowego pary w pierwszym analizowanym przekroju z obrazem zmian napięcia z oscyloskopu.



Rys. 4. Porównanie udziału objętościowego pary dla pierwszego przekroju z symulacji numerycznych (a) z sygnałem napięciowym zarejestrowanym dla pierwszego czujnika (b)

Podsumowanie

Przedstawiony w artykule optoelektryczny system pozwala na rejestrację zmian napięcia na fotorezystorach wskutek rozpraszania światła lasera na pęcherzykach pary znajdujących się w przepływającej wodzie. Pozwala to na uzyskanie obrazu zmian udziału objętościowego pary w analizowanym odcinku czasu. Walidacja wyników symulacji z zastosowaniem przedstawionej metody jest problematyczna ze względu na brak możliwości przeanalizowania danych pokazanych na obrazie oscyloskopu w formie ilościowej. Postawą analiz jest kształt uzyskanego na oscyloskopie wykresu.

LITERATURA

- Abdulaziz A.M. "Performance and image analysis of a cavitating process in a small type venturi". *Experimental Thermal and Fluid Science* (2014) 53, pp. 40÷48.
- Bagieński J. „Kawitacja w urządzeniach wodociągowych i ciepłowniczych”. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1998.
- Ghassemi H., Fasih H.F. "Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter". *Flow Measurement and Instrumentation* (2011) 22, pp. 406÷412.
- Plesset M.S., Prosperetti A. "Bubble dynamics and cavitation". *Annual Review of Fluids Mechanics* (1977) 9, pp. 145÷185.
- Schnerr G.H., Sauer J. "Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics". *Fourth International Conference on Multiphase Flow (ICMF'01)* (2001).
- Singhal A.K., Athavale M.M., Li H., Jiang Y. "Mathematical basis and validation of the full cavitation Model". *Journal of Fluids Engineering* (2002) 124, pp. 617÷624.
- Zwart P.J., Gerber G., Belamri T. "A two-phase flow model for prediction cavitation dynamics". *Fifth International Conference on Multiphase Flow (ICMF'04)* (2004).