

Numeryczne modelowanie zjawiska kawitacji w dwuwymiarowych zwężkach zbieżno-rozbieżnych z zastosowaniem podejścia homogenicznego

Numerical modeling of cavitation phenomenon in a two-dimensional converging-diverging nozzle using a homogeneous approach

AGNIESZKA NIEDŹWIEDZKA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.71>

Artykuł prezentuje wyniki symulacji numerycznych zjawiska kawitacji w zwężce zbieżno-rozbieżnej, z zastosowaniem podejścia homogenicznego. Analizowane są trzy modele: model Schnerra i Sauera, model Singhala i in. oraz model Zwart i in. Symulacje są niestacjonarne. Geometria jest planarna. W symulacjach numerycznych wykorzystano oprogramowanie Fluent. Celem pracy jest ocena możliwości zastosowania planarnych symulacji numerycznych przepływu kawitacyjnego dla niewielkowymiarowych zwęzek zbieżno-rozbieżnych. Motywacją do przeprowadzenia symulacji numerycznych zjawiska kawitacji dla planarnej geometrii są trudności w uzyskaniu wyników odzwierciedlających przeprowadzone pomiary eksperymentalne, zarówno dla geometrii dwu-, jak i trójwymiarowej. Otrzymane wyniki symulacji numerycznych wykazują duże podobieństwo do pomiarów eksperymentalnych dla wszystkich analizowanych modeli.

SŁOWA KLUCZOWE: numeryczna mechanika płynów, kawitacja, podejście homogeniczne, zwężka zbieżno-rozbieżna

The article presents results of numerical simulations of cavitation phenomenon in a converging-diverging nozzle using the homogeneous approach. Three cavitation models are considered: the Schnerr and Sauer model, the Singhal et al. model and the Zwart et al. model. The simulations are performed for transient. The geometry is two-dimensional and planar. In the numerical calculations Fluent software was used. The aim of the work is to estimate the possibility of applying of two-dimensional planar numerical simulations of cavitating flows for small-sized converging-diverging nozzles. The motivation to conduct numerical simulations for two-dimensional and planar geometry are difficulties in obtaining results, which reflect experimental measurements, both for two- and three-dimensional geometry. The achieved results show a big similarity between the results of performed numerical simulations and the material from the experimental measurements for all the analyzed models.

KEYWORDS: numerical fluid mechanics, cavitation, homogeneous approach, convergent-divergent nozzle

Kawitacja jest zjawiskiem parowania płynu w obszarach, w których ciśnienie statyczne płynu spada poniżej ciśnienia nasycenia pary w danej temperaturze.

Do dziś zjawisko to wzbudza więcej negatywnych niż pozytywnych emocji. Kawitacja jest kojarzona przede wszystkim z erozją i hałasem. Prawie nikt nie pamięta o jej pozytywnych aspektach, zwłaszcza że w literaturze dominują obrazy zniszczonych pędników i elementów systemów hydraulicznych [2].

Tymczasem kawitacja nie jest wyłącznie przyczyną licznych problemów z urządzeniami mechanicznymi, lecz w wielu przypadkach stanowi czynnik warunkujący poprawne działanie maszyn.

Bardzo dobrym przykładem urządzeń, które pokazują pozytywne zastosowanie kawitacji, są być wtryskiwacze silników diesla. Dzięki pęcherzykom kawitacyjnym pojawiającym się w przewężeniu zwężki wtryskiwaczy zmniejsza się ich średnica i wzrasta maksymalna prędkość przepływu. Ponadto kawitacja ma pozytywny wpływ na kąt rozpylania paliwa [1].

Podstawy teoretyczne

Podejście homogeniczne w klasyfikacji numerycznych metod modelowania zjawiska kawitacji mieści się w obszarze metod jednopłynowych. W metodzie jednopłynowej płyn traktowany jest jako wielofazowa mieszanina o średniej gęstości, dla której rozwiązywany jest jeden zestaw równań bilansowych masy, pędu i energii. W podejściu homogenicznym oprócz wspomnianego zestawu równań należy rozwiązać jeszcze jedno dodatkowe równanie transportu wybranego składnika, najczęściej pary:

$$\frac{\partial \rho_v \alpha_v}{\partial t} + \text{div}(\rho_v \alpha_v \vec{u}) = \dot{m}^+ + \dot{m}^- \quad (1)$$

gdzie: ρ_v – gęstość pary [kg/m³], α_v – udział objętościowy pary, t – czas [s], u – prędkość [m/s], m – źródło masowe [kg/(m³·s)].

Równanie transportu jest wyrażane za pomocą dwóch członów źródłowych, które opisują procesy parowania i kondensacji.

* Mgr inż. Agnieszka Niedźwiedzka (agnieszka.niedzwiedzka@uwm.edu.pl) – Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Nauk Technicznych, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

TABLICA. Wykaz członów źródłowych analizowanych homogenicznych modeli zjawiska kawitacji

Źródło masowe dla procesu kondensacji		Źródło masowe dla procesu parowania	
$\dot{m}^+ = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2(p - p_{sat})}{\rho_l}}$	(2)	$\dot{m}^- = -\frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{\rho_l}}$	(3)
$\dot{m}^+ = C_p \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p - p_{sat})}{\rho_l}} f_v$	(4)	$\dot{m}^- = -C_d \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{\rho_l}} (1 - f_v - f_g)$	(5)
$\dot{m}^+ = C_p \frac{3\alpha_v \rho_v}{R} \sqrt{\frac{2(p - p_{sat})}{\rho_l}}$	(6)	$\dot{m}^- = -C_d \frac{3\rho_v (1 - \alpha_v) \alpha_{nuc}}{R} \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{\rho_l}}$	(7)

Objaśnienia: C_p – stała parowania, C_d – stała kondensacji, f_g – udział masowy gazów, f_v – udział masowy pary, k – energia kinetyczna turbulencji [m^2/s^2], R – promień pęcherzyka [m], p – ciśnienie statyczne płynu [Pa], p_{sat} – ciśnienie nasycenia pary [Pa], α_{nuc} – udział objętościowy fazy zarodkowania, ρ_l – gęstość cieczy [kg/m^3], ρ_m – gęstość mieszaniny [kg/m^3], σ – napięcie powierzchniowe [N/m]

W symulacjach numerycznych zostały wykorzystane trzy modele homogeniczne, dostępne bezpośrednio z interfejsu programu. Źródła masowe tych modeli zostały zestawione w tabeli.

Pierwszy analizowany w symulacjach model to model Schnerra i Sauera z 2001 r. [5]. W źródłach masowych tego modelu nie występują żadne stałe empiryczne (równania (2) i (3)). Model opiera się wyłącznie na ilościowych danych parametrów fizycznych.

Kolejnym analizowanym modelem jest model Singhala i in. z 2002 r. [6]. Źródła masowe tego modelu (równania (4) i (5)) zawierają zarówno stałe empiryczne dla procesów parowania i kondensacji, jak i dodatkowe parametry fizyczne w postaci energii kinetycznej turbulencji oraz napięcia powierzchniowego.

Ostatnim analizowanym modelem jest model Zwarta i in. z 2004 r. [7]. Człony źródłowe tego modelu (równania (6) i (7)) charakteryzują się najprostszą budową w odniesieniu do wcześniej zaprezentowanych modeli, jednakże podobnie jak model Singhala i in. mają w zapisie stałe empiryczne parowania i kondensacji.

Wspomniane modele są dostępne bezpośrednio z interfejsu programu. Z literatury znana jest większa liczba możliwych do zastosowania modeli [4].

Materiał i metody

Symulacje numeryczne przepływu kawitacyjnego przeprowadzono w programie Fluent, który jest częścią pa-

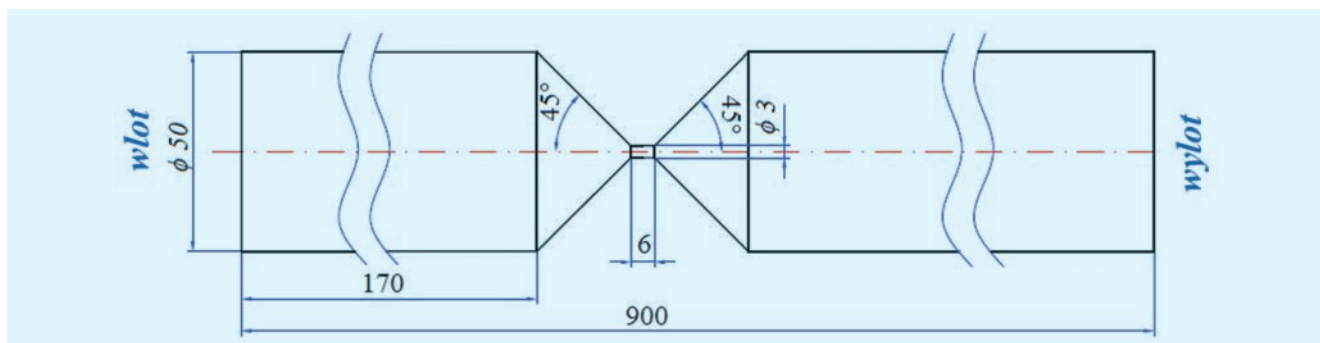
kietu Ansys. Przepływający czynnik to woda. Zastosowano krok czasowy $t = 0,001$ s. Wymiary analizowanej zwężki zbieżno-rozbieżnej przedstawiono na rys. 1. Całkowita długość zwężki wynosi 900 mm, a długość części wlotowej – 170 mm. Średnica zewnętrzna zwężki wynosi 50 mm, średnica przewężenia – 3 mm, natomiast długość przewężenia – 6 mm. Kąty zbieżności i rozbieżności są sobie równe i wynoszą 45° . W symulacjach numerycznych ta geometria jest planarna. Ze względu na niesymetryczny charakter zjawiska zrezygnowano z zastosowania geometrii osiowosymetrycznej.

W symulacjach numerycznych uwzględniono dane z pomiarów eksperymentalnych [4]. Przykładowe zdjęcie chmury kawitacyjnej, wykonane kamerą do szybkich zdjęć, przedstawiono na rys. 2. Prędkość strumienia na wlocie wynosi 0,5 m/s, a ciśnienie na wylocie jest równe ciśnieniu atmosferycznemu 101 325 Pa. Zastosowany model turbulencji to model k- ϵ .

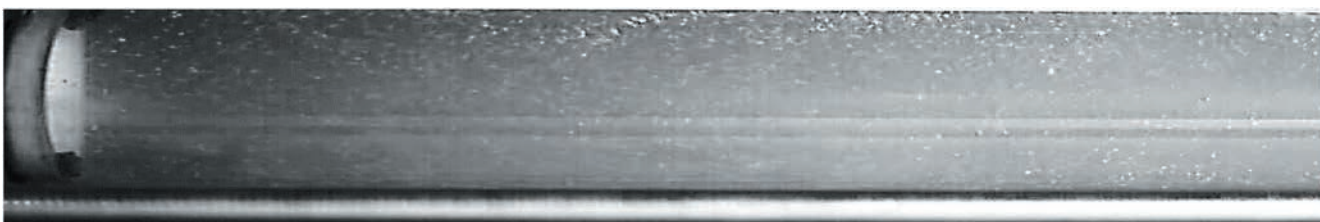
Analizie poddano trzy gęstości siatki. W pierwszym przypadku liczba komórek wynosi 996, na drugim poziomie zagęszczenia wzrasta do 3984, a na ostatnim – do 15 936.

Wyniki i dyskusja

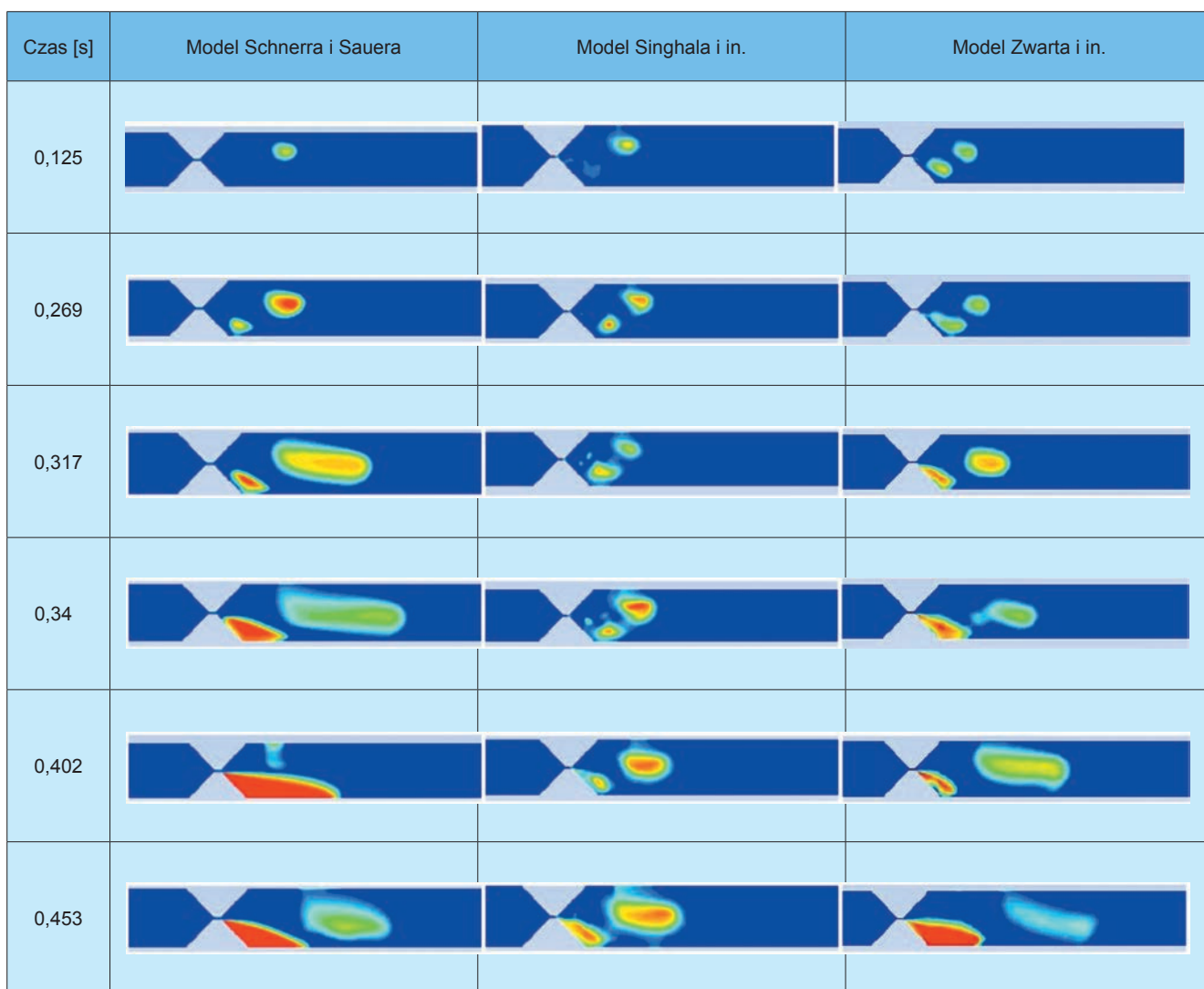
W symulacjach numerycznych zjawiska kawitacji najistotniejszymi danymi wyjściowymi są kontury udziału objętościowego pary. Na rys. 3 przedstawiono rozwój chmury kawitacyjnej dla siatki o najwyższym poziomie



Rys. 1. Wymiary analizowanej zwężki



Rys. 2. Przykładowe zdjęcie chmury kawitacyjnej (źródło: Niedźwiedzka i Sobieski, 2016)



Rys. 3. Kontury udziału objętościowego pary w wybranych kroków czasowych dla modeli Schnerra i Sauera, Singhala i in. oraz Zwarta i in.

zagęszczenia dla poszczególnych modeli. W każdym z nich rozwój chmury kawitacyjnej rozpoczyna się od niewielkiego obszaru pary, pojawiającego się tuż za przewężeniem, który rośnie z upływem czasu, w miarę oddalania się od przewężenia. Charakterystyczne jest również ciągłe utrzymywanie się obszaru pary w pobliżu dolnej krawędzi. Analizując rys. 3, można zauważyć, że kształt uzyskanej chmury kawitacyjnej tuż za wzbudnikiem kawitacji nie zmierza ku osi symetrii rury, lecz ku jej dolnej krawędzi. Dopiero w dalszej części komory kawitacyjnej chmura kawitacyjna rozprzestrzenia się w całym obszarze komory.

Wnioski

Uzyskany kontur udziału objętościowego pary zasadniczo odzwierciedla obraz chmury kawitacyjnej z pomiarów eksperymentalnych. Można uznać, że hakowy kształt zaobserwowany podczas pomiarów eksperymentalnych został odwzorowany – tuż za przewężeniem udział objętościowy pary zmierza ku dolnej krawędzi, a następnie obserwowany jest obłok kawitacyjny w centralnej części komory.

Zastosowanie geometrii planarnej w numerycznej analizie zjawiska kawitacji z zastosowaniem podejścia homogenicznego w zwężkach zbieżno-rozbieżnych powin-

no zostać poddane dalszym badaniom. Kolejnym etapem symulacji numerycznych będzie analiza przepływu kawitacyjnego na podstawie uzyskanych danych eksperymentalnych z zastosowaniem geometrii trójwymiarowej.

LITERATURA

- Andriotis, A., Gavaises Manolis, Arcoumanis C. "Vortex flow and cavitation in Diesel injector nozzles". *Journal of Fluid Mechanics*. 610 (2008): s. 195–215.
- Gupta Manoj Kumar, Sharma Dharmendra S., Lakhera Vikas J. "Vapor bubble formation, forces, and induced vibration: A review." *Applied Mechanics Reviews*. 68, 3 (2016): s. 030801.
- Niedźwiedzka A., Schnerr G.H., Sobieski W. "Review of numerical models of cavitating flows with the use of the homogeneous approach". *Archives of Thermodynamics*. 2 (2016): s. 71–88.
- Niedźwiedzka A., Sobieski W. "Experimental investigations of cavitating flows in a Venturi tube". *Technical Sciences*. 19, 2 (2016): s. 151–164.
- Schnerr Günther H., Sauer Jürgen. "Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics". *Proc. of the 4th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2001)*. New Orleans (USA), 2001.
- Singhal Ashok K., Athavale Mahesh M., Li Huiying, Jiang Yu. "Mathematical basis and validation of the full cavitation model". *Journal of Fluids Engineering*. 124 (2002): s. 617–624.
- Zwart P.J., Gerber A.G., Belamri Thabet. "A two-phase flow model for prediction cavitation dynamics". *Proc. of the 5th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2004)*. Yokohama (Japan), 2004. ■