

WPLYW PARAMETRÓW HYDRAULICZNYCH PRZEWODÓW CIŚNIENIOWYCH NA PRZEBIEG NIESTACJONARNEGO PRZEPŁYWU Z KAWITACJĄ

KAMIL URBANOWICZ

*Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Szczecińska
e-mail: kurbanowicz@ps.pl*

Streszczenie. W pracy podjęto próbę oszacowania wpływu parametrów przewodów zamkniętych na wartości maksymalnych ciśnień występujących w wyniku uderzenia hydraulicznego, jak i na czas utrzymywania się przepływu niestabilnego z kawitacją. Niezbędne do realizacji pracy liczne badania numeryczne wykonano z wykorzystaniem własnych programów napisanych w Matlabie, bazujących na efektywnych modelach kawitacji przejściowej, w których uwzględniono niestacjonarne opory hydrauliczne. W szczególności rozpatrywano wyniki otrzymane z dwóch kluczowych modeli: kawitacji pęcherzykowej (bubbly cavitation model - BCM) oraz rozerwania słupa cieczy (column separation model – CSM).

1. WSTĘP

Przepływy niestacjonarne w układach hydraulicznych występują w wyniku gwałtownych zmian prędkości przepływu. Najczęściej zmiany te spowodowane są gwałtownym otwieraniem i zamykaniem zaworu oraz gwałtownym włączaniem i wyłączaniem pompy zasilającej układ. Przepływowi takim często towarzyszy zjawisko zwane uderzeniem hydraulicznym. Występuje wówczas gwałtowna pulsacja ciśnienia, która ma silnie destrukcyjny charakter (występują ciśnienia znacznie przewyższające wartości nominalne) i często jest przyczyną groźnych w skutkach awarii. Często dochodzi również do pojawienia się kawitacji, odpowiedzialnej w szczególności za występowanie wysokich ciśnień niekorzystnie wpływających na wytrzymałość materiału ścianek rurociągu. Kawitacja wpływa także na erozję kawitacyjną elementów układów hydraulicznych. Kluczowym zagadnieniem staje się więc szacowanie maksymalnych wartości ciśnień wówczas występujących jak i czasów utrzymywania się przepływu niestabilnego z kawitacją.

W wyniku wcześniej przeprowadzonych prac udało się stworzyć modele matematyczne przepływu niestacjonarnego z kawitacją uwzględniające niestacjonarne opory hydrauliczne (model kawitacji pęcherzykowej BCM oraz model rozerwania słupa cieczy CSM), które w dość wierny sposób oddają fizykę zagadnienia [7,8,9] przepływu niestacjonarnego z kawitacją. Powstała możliwość przeanalizowania wpływu parametrów hydraulicznych na przebieg niestacjonarny, natomiast analiza dała pogląd na wpływ poszczególnych parametrów

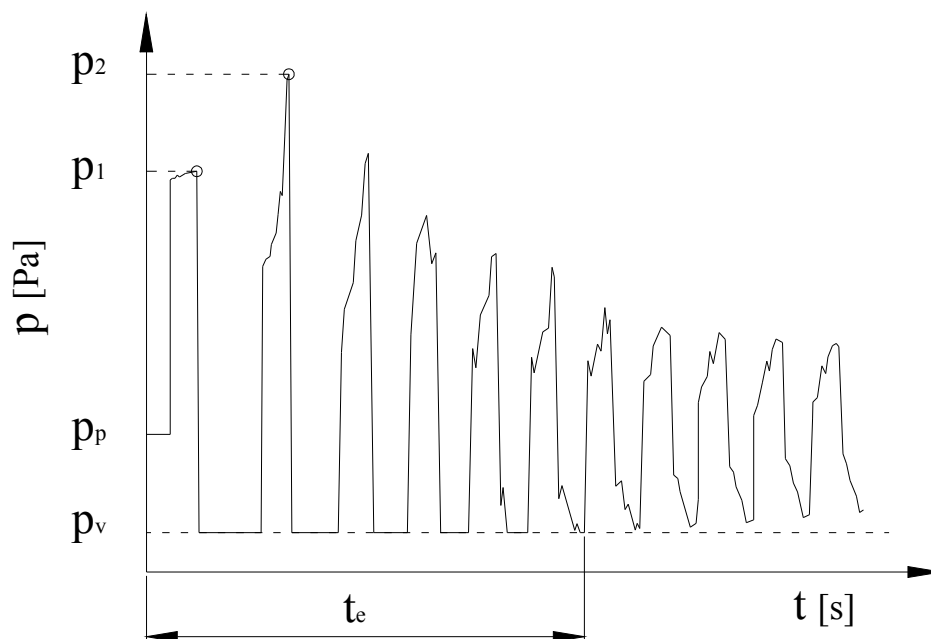
(analizowanych pojedynczo) na wartości maksymalnych ciśnień i czas utrzymywania się przepływu nieustalonego z kawitacją.

Badania symulacyjne przeprowadzono były dla danych eksperymentalnych z dwóch znanych w literaturze układów hydraulicznych (Berganta–Simpsona oraz Sanady–Kitagawy–Takenaki – informacje dotyczące układów znajdują się w załączniku A) [2,3,4,5]. Pozwoliło to na uwiarygodnienie zaobserwowanych tendencji. Wyniki analizy przedstawiono w postaci wykresów, na których zaprezentowano tendencje zmian ciśnienia i czasu utrzymywania się przebiegu nieustalonego z kawitacją.

Znajomość takich tendencji dla wszystkich parametrów opisujących układ hydrauliczny może być wykorzystana przy analizie i projektowaniu nowych układów hydraulicznych, jak i przy modernizacjach układów istniejących.

2. WYNIKI SYMULACJI

Poniżej przedstawiono wyniki symulacji komputerowych, w których badany był wpływ parametrów hydraulicznych na przepływ nieustalony z kawitacją. Maksymalne wartości ciśnienia analizowano dla pierwszej „ p_1 ” i drugiej „ p_2 ” amplitudy ciśnienia (rys. 1). Powszechnie bowiem wiadomo, że czasem w wyniku nakładania się fal ciśnieniowych powstałych po gwałtownym zamknięciu zaworu, a następnie obszaru kawitacyjnego, ciśnienie maksymalne wystąpić może nie przy pierwszej, lecz przy drugiej amplitudzie ciśnienia [1,6]. Czas utrzymywania się przepływu nieustalonego z kawitacją „ t_e ” przyjęto traktować jako czas pojawienia się ostatniego obszaru kawitacyjnego (rys. 1).



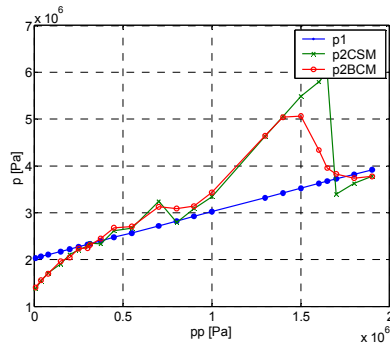
Rys. 1. Analizowany przebieg ciśnienia

Szczegółowej analizie poddano wpływ następujących parametrów: ciśnienia początkowego „ p_p ”, prędkości początkowej „ v_o ”, długości rurociągu „ L ”, prędkości propagacji fali ciśnienia „ c ”, lepkości cieczy „ ν ”, gęstości cieczy „ ρ ”, średnicy wewnętrznej rurociągu „ D ” na przebieg

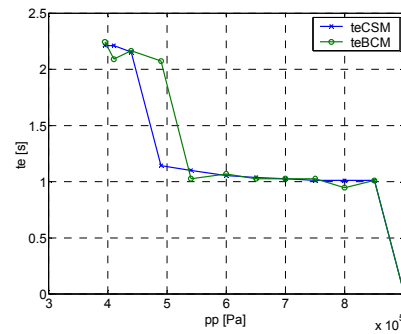
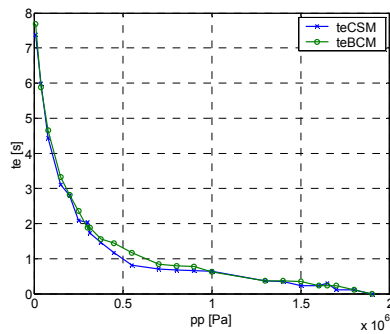
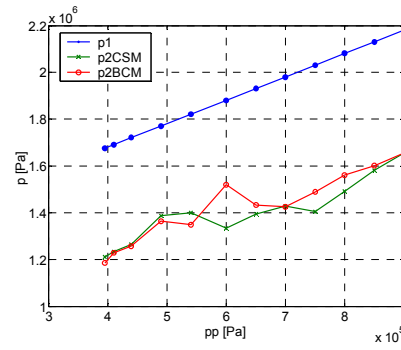
zmian ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego z uwzględnieniem kawitacji przejściowej. Przedstawiono to graficznie na rys. 2-8.

a) Wpływ ciśnienia początkowego p_p ($p_p = \text{var}$; $(v_o, L, c, v, \rho, D) = \text{const}$)

Układ Berganta-Simpsona



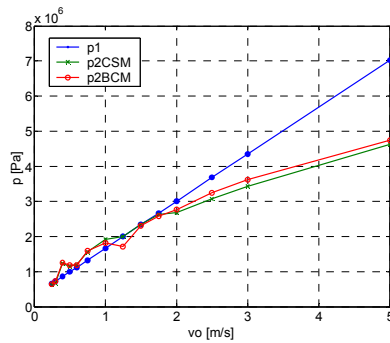
Układ Sanady-Kitagawy-Takenaki



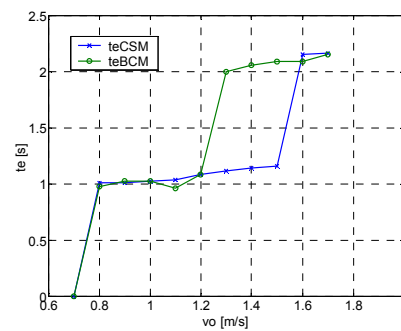
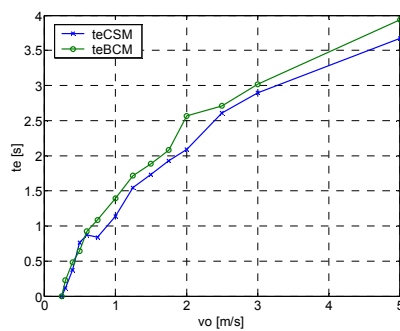
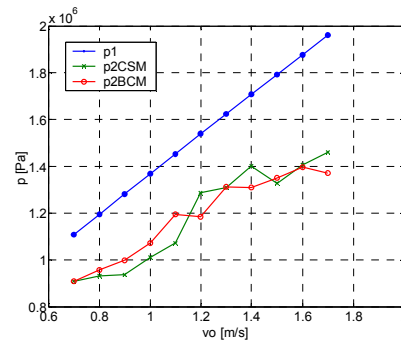
Rys. 2. Wpływ ciśnienia początkowego p_p

b) Wpływ prędkości początkowej v_o ($v_o = \text{var}$; $(p_p, L, c, v, \rho, D) = \text{const}$)

Układ Berganta-Simpsona



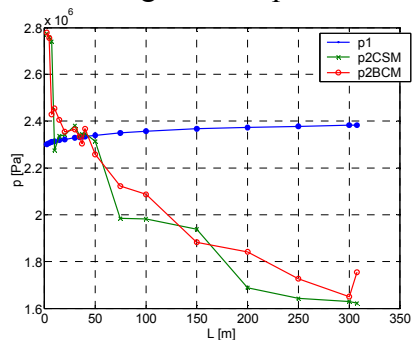
Układ Sanady-Kitagawy-Takenaki



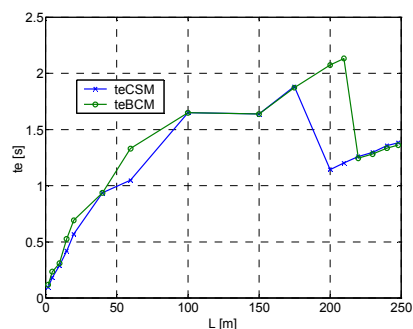
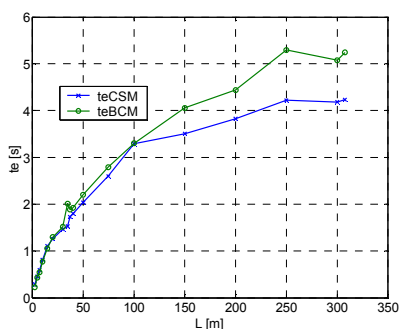
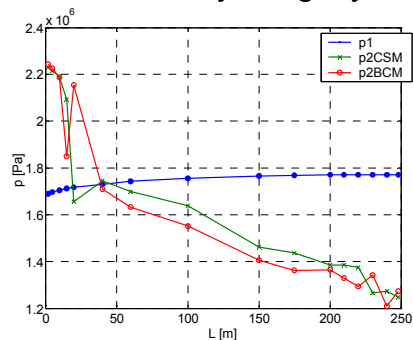
Rys. 3. Wpływ prędkości początkowej v_o

c) Wpływ długości rurociągu L ($L=\text{var}$; $(p_p, v_o, c, v, \rho, D)=\text{const}$)

Układ Berganta-Simpsona



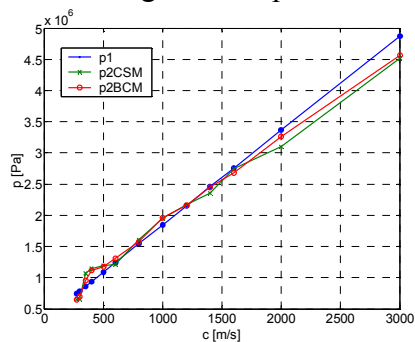
Układ Sanady-Kitagawy-Takenaki



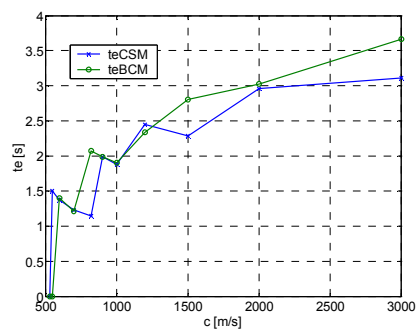
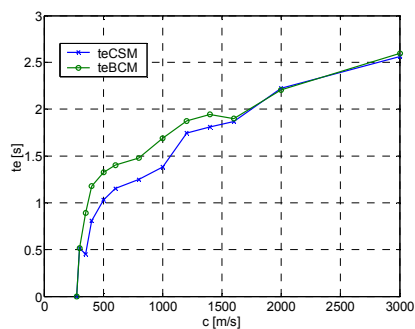
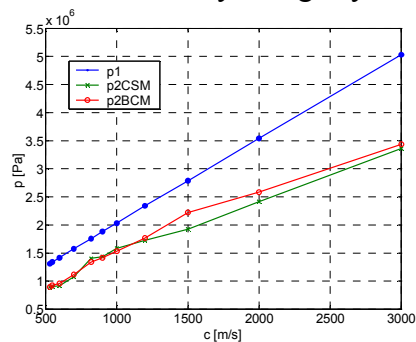
Rys. 4. Wpływ długości rurociągu L

d) Wpływ prędkości propagacji fali ciśnienia c ($c=\text{var}$; $(p_p, v_o, L, v, \rho, D)=\text{const}$)

Układ Berganta-Simpsona



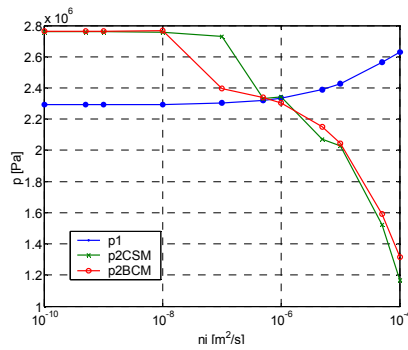
Układ Sanady-Kitagawy-Takenaki



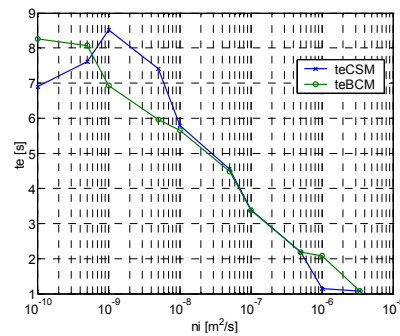
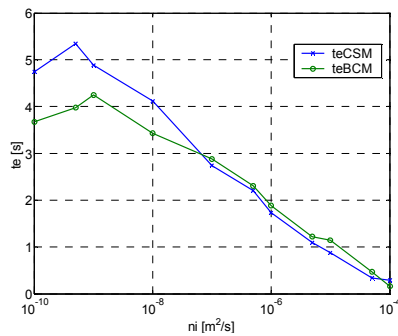
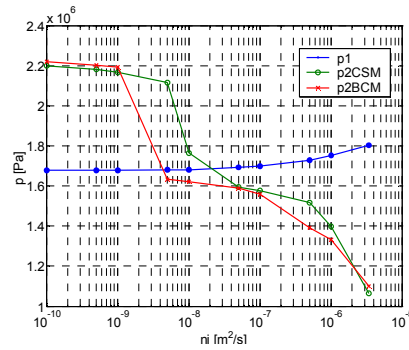
Rys. 5. Wpływ prędkości propagacji fali ciśnienia c

e) Wpływ lepkości kinematycznej cieczy ν ($\nu = \text{var}$; $(p_p, v_o, L, c, \rho, D) = \text{const}$)

Układ Berganta-Simpsona



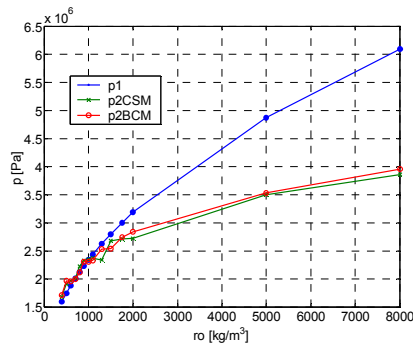
Układ Sanady-Kitagawy-Takenaki



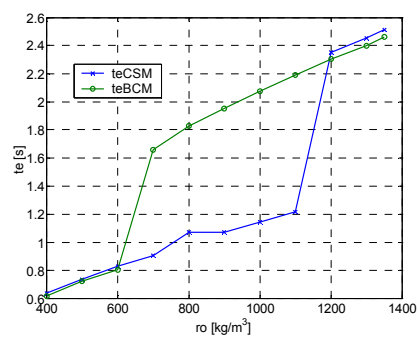
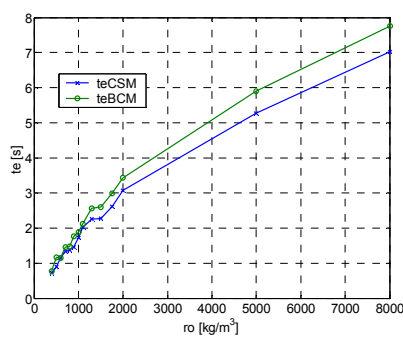
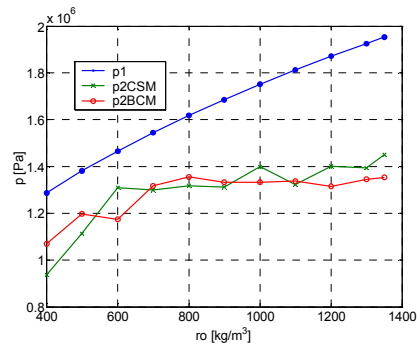
Rys. 6. Wpływ lepkości kinematycznej cieczy ν

f) Wpływ gęstości cieczy ρ ($\rho = \text{var}$ oraz $c(\rho) = \text{var}$; $(p_p, v_o, L, \nu, D) = \text{const}$)

Układ Berganta-Simpsona

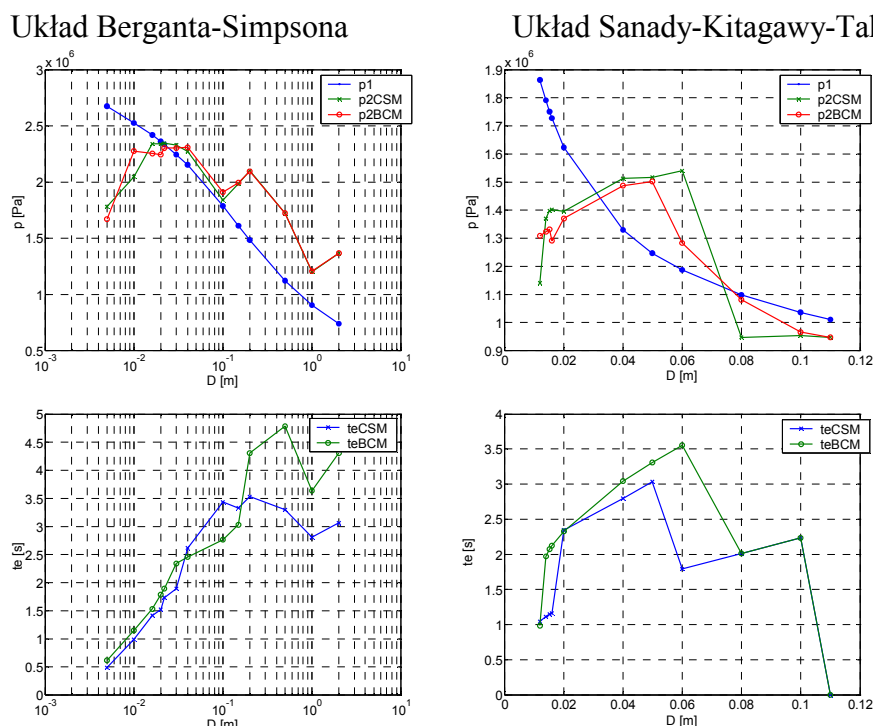


Układ Sanady-Kitagawy-Takenaki



Rys. 7. Wpływ gęstości cieczy ρ

g) Wpływ średnicy wewnętrznej rurociągu D ($D=\text{var}$ oraz $c(D)=\text{var}$; $(p_p, v_o, L, v, \rho)=\text{const}$)



Rys. 8. Wpływ średnicy wewnętrznej rurociągu D

Na przedstawionych wykresach (rys. 2 – rys. 8) wyraźnie widoczne są pewne tendencje maksymalnych wartości zarówno ciśnienia w przekroju przy zaworze odcinającym przepływ, jak i czasu utrzymywania się przepływu nieustalonego z kawitacją. Szczególnej uwadze należy podać wykres maksymalnych ciśnień (rys. 2) dla układu Berganta-Simpsona przy zmiennym ciśnieniu początkowym „ p_p ” oraz wykresy obrazujące tendencję wpływu średnicy wewnętrznej rurociągu „ D ” (rys. 8).

Przy analizie wpływu ciśnienia początkowego „ p_p ” widoczny jest pewien interesujący schodkowy spadek ciśnienia maksymalnego przy zaworze dla ciśnień początkowych rzędu 1,6 MPa. Spadek ten można tłumaczyć brakiem nakładania się fal ciśnieniowych, wynikającym ze zbyt krótkiego czasu utrzymywania się obszaru nieciągłości pomiędzy pierwszą a drugą amplitudą ciśnienia (rys. 2 – układ Berganta-Simpsona; wykres t_e - p_p). Zauważono również przy wielu innych symulacjach, nieprezentowanych w tej pracy, że utrzymywanie się stosunku p_1/p_2 większego od jedności (maksymalne ciśnienie uderzenia hydraulicznego występuje na pierwszej amplitudzie ciśnienia) występuje zawsze, gdy dochodzi do bardzo krótkiego rozerwania słupa cieczy, czyli gdy powstaje jednorazowo mały obszar kawitacyjny.

Analiza wyników charakteryzujących wpływ średnicy wewnętrznej rurociągu „ D ” na maksymalne ciśnienie w przewodzie ciśnieniowym i na czas utrzymywania się przepływu nieustalonego kawitacją jest skomplikowana. Trudno jest wytłumaczyć, dlaczego przy spadającym ciśnieniu „ p_1 ” przy amplitudzie, ciśnienie przy amplitudzie drugiej „ p_2 ” początkowo rośnie (od wartości, w której stosunek p_1/p_2 jest zdecydowanie większy od jedności), by następnie zacząć spadać. Podobna sytuacja widoczna jest również na wykresach obrazujących czasy utrzymywania się przepływu nieustalonego z kawitacją „ t_e ”. Taki przebieg „ p_2 ” można tłumaczyć skomplikowanym wpływem średnicy wewnętrznej na przepływ nieustalony z kawitacją. Zmiana wartości średnicy odpowiada za zmianę wartości

współczynnika oporów hydraulicznych oraz prędkości propagacji fali ciśnienia. Wraz z jej wzrostem zarówno straty hydrauliczne jak i prędkość propagacji fali ciśnienia maleją.

3. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznych z wykorzystaniem efektywnych modeli kawitacji przejściowej. Z przedstawionych porównań widać, że dla dwóch różnych układów hydraulicznych (Berganta-Simpsona i Sandy-Kitagawy-Takenaki) tendencje zmian ciśnienia i utrzymywania się przepływu nieustalonego z kawitacją są bardzo zbliżone. Można więc zakładać, że dla innych układów hydraulicznych takie tendencje również zostaną zachowane.

Analizowanie każdego parametru osobno pozwoliło ustalić wpływ tego parametru na maksymalne ciśnienie i czas utrzymywania się przepływu nieustalonego z kawitacją. I tak, podsumowując, można w wyniku analizy wykresów zapisać, że gdy:

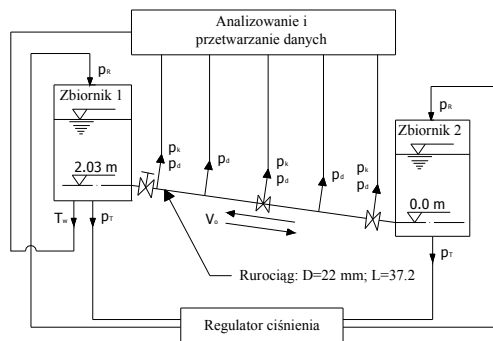
$p_p \uparrow$	to	$p_1 \uparrow$	oraz	$p_2 \uparrow$	oraz	$t_e \downarrow$
$v_o \uparrow$	to	$p_1 \uparrow$	oraz	$p_2 \uparrow$	oraz	$t_e \uparrow$
$L \uparrow$	to	$p_1 \uparrow \rightarrow$	oraz	$p_2 \downarrow$	oraz	$t_e \uparrow$
$c \uparrow$	to	$p_1 \uparrow$	oraz	$p_2 \uparrow$	oraz	$t_e \uparrow$
$v \uparrow$	to	$p_1 \rightarrow \uparrow$	oraz	$p_2 \downarrow$	oraz	$t_e \downarrow$
$\rho \uparrow$	to	$p_1 \uparrow$	oraz	$p_2 \uparrow$	oraz	$t_e \uparrow$
$D \uparrow$	to	$p_1 \downarrow$	oraz	$p_2 \uparrow \downarrow$	oraz	$t_e \uparrow \downarrow$

LITERATURA

1. Bergant A., Simpson A.R., Tijsseling A.S.: Water hammer with column separation: a historical review. "Journal of Fluids and Structures" 2006, 22, s. 135-171.
2. Bergant A., Simpson A.R.: Interesting lessons from column separation experiments. Proceedings of the 7th International Conference on Pressure Surges and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels. Publication 19, BHR Group, Harrogate, UK, 1996, s. 83-97.
3. Bergant A., Simpson A.R.: Pipeline column separation flow regimes. „Journal of Hydraulic Engineering” 1999, August, s. 835-848.
4. Sanada K., Kitagawa A., Takenaka T.: A study on analytical methods by classification of column separations in a water pipeline. Transaction of Japan Society Mechanical Engineering. Ser B 1990; 56 (523), s. 585-593.
5. Shu J. J.: Modelling vaporous cavitation on fluid transients. "Intern. Journal of Pressure Vessels and Piping" 2003, vol. 80, s. 187-195.
6. Simpson A.R., Wylie E. B.: Large water-hammer pressures for column separation in pipelines. "Journal of Hydraulic Engineering" 1991, Vol. 117, No. 10, s. 1310-1316.
7. Urbanowicz K., Zarzycki Z., Kudźma S.: Numerical simulations of transient cavitating turbulent flow using time dependent frictional losses. W: Conference Proceedings Modelling Fluid Flow (CMFF '06). Budapest, Hungary, 2006, s. 760-767
8. Zarzycki Z., Urbanowicz K.: Modelowanie przebiegów przejściowych w przewodach z uwzględnieniem kawitacji. „Modelowanie Inżynierskie” 2006, t. 1, nr 32, s.491-498.

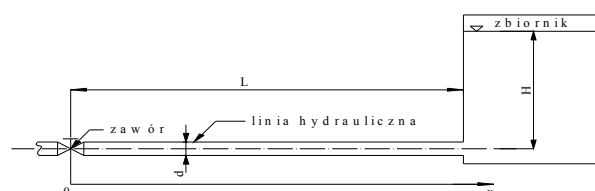
9. Zarzycki Z., Urbanowicz K.: Modelowanie stanów nieustalonych podczas uderzenia hydraulicznego z uwzględnieniem kawitacji przejściowej w przewodach ciśnieniowych. „Chemical and Process Engineering” 2006, t. 27, z. 3/1, Tom 27, 2006, s. 915-933.

ZAŁĄCZNIK A



Układ eksperymentalny I (Bergant-Simpson)

Lepkość kinematyczna cieczy: $1 \cdot 10^{-6}$ [m²/s]
 Długość przewodu: $L=37.2$ [m]
 Średnica wewnętrzna rurociągu: $D=0,0221$ [m]
 Prędkość początkowa cieczy (w ruchu ustalonym):
 $v_0=1,50$ [m/s]
 Gęstość cieczy: $\rho_l=1000$ [kg/m³]
 Gęstość pary: $\rho_v=0,8$ [kg/m³]
 Prędkość propagacji fali ciśnienia: $c=1319$ [m/s]



Układ eksperymentalny II
 (Sanada-Kitagawa-Takenaki)

Lepkość kinematyczna cieczy: $1 \cdot 10^{-6}$ [m²/s]
 Długość przewodu: $L=200$ [m]
 Średnica wewnętrzna rurociągu: $D=0,0152$ [m]
 Prędkość początkowa cieczy (w ruchu ustalonym):
 $v_0=1,45$ [m/s]
 Gęstość cieczy: $\rho_l=1000$ [kg/m³]
 Gęstość pary: $\rho_v=0,8$ [kg/m³]
 Prędkość propagacji fali ciśnienia: $c=820$ [m/s]

THE INFLUENCE OF HYDRAULIC PARAMETERS OF PRESSURE CONDUITS ON TRANSIENT FLOW WITH CAVITATION

Summary. The paper attempts to assess the influence of hydraulic parameters of closed conduits on the values of maximum pressure during water hammer and also on at the time of unsteady flow with cavitation. The numerical simulation essential for conducting this research were performed using programs written in Matlab environment, which were based on effective transient cavitation models including unsteady friction. The paper particularly discusses the results from two crucial models: bubbly cavitation model - BCM and liquid column separation model - CSM.