

Adam ADAMKOWSKI
Kazimierz STELLER

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
Gdańsk

ZMIANY CIŚNIENIA SPOWODOWANE NARUSZENIEM CIĄGŁOŚCI PRZEPIŁYU CIECZY W UKŁADZIE POMPOWYM

Streszczenie: W pracy rozpatrzono nieciągłość przepływu cieczy w układzie pompowym spowodowaną szybkim zamknięciem zaworu na tłoczeniu. Przedstawiono model matematyczny tego zjawiska, przeprowadzono obliczenia numeryczne związane z opisanym zakłóceniem oraz porównano wyniki obliczeń teoretycznych z wynikami doświadczeń.

1. Wstęp

Podczas naruszenia ciągłości przepływu cieczy w przewodach zamkniętych powstają obszary wypełnione pęcherzykami parowo-gazowymi (obszary objęte kawitacją). Zjawisko to występuje w miejscu przewodu, w którym ciśnienie spadnie do wartości krytycznej, bliskiej wartości ciśnienia parowania cieczy w danej temperaturze. Obserwujemy je między innymi w przewodach zamkniętych układów pompowych podczas nieustalonego przepływu cieczy wymuszonego, np. podczas szybkiego odcinania przepływu cieczy lub po awaryjnym wyłączeniu silnika napędzającego pompę. Nieustalonemu przepływowi cieczy towarzyszą fale ciśnienia rozprzestrzeniające się wzdłuż przewodów. Falowy charakter zmian ciśnienia może być przyczyną cyklicznego powstawania i zanikania kawitacji. Przy bardzo szybkim zanikaniu obszarów objętych kawitacją mogą następować zderzenia mas cieczy - rozdzielonych uprzednio przez te obszary - połączone z dużymi hałasami. Zjawiskom tym towarzyszą gwałtowne zmiany ciśnienia, które obciążają elementy całego układu hydraulicznego. Umiejętność przewidywania przebiegów zmian ciśnienia pozwoli zapobiegać destrukcyjnym skutkom tych obciążeń.

Przy braku ogólnej teorii przepływu cieczy z kawitacją buduje się uproszczone modele matematyczne opisujące to zjawisko [1,2,3]. W pracy tej przedstawiono propozycję modelu matematycznego opisującego nieustalony przepływ cieczy z kawitacją w układzie pompowym. Model ten zweryfikowano doświadczalnie w laboratorium Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku.

2. Model obliczeniowy

Model matematyczny opisujący nieustalony przepływ cieczy z kawitacją w układzie pompowym zbudowano w oparciu o:

1. Założenia dotyczące ciągłego nieustalonego przepływu cieczy w układzie pompowym
 - ruch cieczy w przewodach traktuje się jako ruch jednowymiarowy,
 - straty hydrauliczne są proporcjonalne do kwadratu chwilowej wartości prędkości cieczy,
 - ciecz i ścianki rurociągu odkształcają się sprężysto,
 - parametry ruchu agregatu pompowego podczas przepływu nieustalonego zmieniają się tak jak podczas przepływu ustalonego, a więc zgodnie z charakterystykami statycznymi.
2. Założenia dotyczące utraty ciągłości przepływu cieczy
 - w całym przekroju hydrometrycznym przewodu, w którym ciśnienie statyczne spadnie do wartości ciśnienia pary nasyconej cieczy p_v , powstaje nieciągłość przepływającej cieczy w postaci obszaru objętego kawitacją,
 - rozwój kawitacji zależy tylko od parametrów przepływu cieczy, nie

zależy natomiast od własności fizykochemicznych cieczy,

- ciśnienie w obszarze kawitacji jest równe ciśnieniu pary nasyconej cieczy p_v przez cały czas utrzymywania się tego obszaru,
- zniknięcie kawitacji jest równoznaczne z przywróceniem ciągłości przepływu cieczy.

Ciągły jednowymiarowy nieustalony ruch cieczy opisują dwa równania:
- równanie ciągłości z uwzględnieniem sprężystości ścianek rurociągu i ściśliwości cieczy [1,4,5] w postaci:

$$\frac{\partial v}{\partial x} + (k_p + k_f) \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} \right) + v \frac{d(\ln F)}{dx} = 0 \quad (1)$$

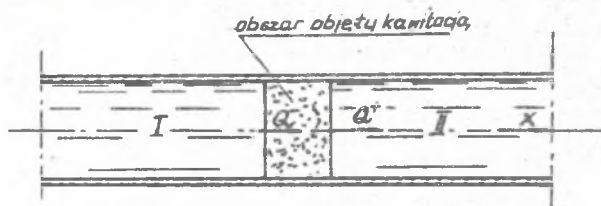
- równanie ruchu cieczy [1,2,4,3] w postaci:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g(\sin \beta - \frac{\lambda}{D} \frac{v|v|}{2g}) = 0, \quad (2)$$

gdzie: x - oznacza współrzędną długości, t - czas, p - ciśnienie statyczne, v - prędkość cieczy, ρ - gęstość cieczy, g - przyspieszenie ziemskie, λ - współczynnik strat tarcia, F - pole powierzchni przekroju poprzecznego rurociągu, D - średnica wewnętrzna rurociągu, β - kąt pochylenia rurociągu do poziomu, a k_p i k_f są określone wzorami:

$$k_p = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad ; \quad k_f = \frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial p} \Big|_{x = \text{const}}$$

W przypadku naruszenia ciągłości przepływu cieczy obszar kawitacji stanowiący nieciągłość cieczy rozdziela ją na dwa obszary ciągłe - I i II (rys.1). Ruch cieczy w każdym z tych obszarów opisuje układ równań (1) i



Rys.1. Wyidealizowany przepływ cieczy z kawitacją.

ki kawitacyjne można obliczać według następującego wzoru:

$$V_k(t) = \int_{t_0}^t [Q^+(t) - Q^-(t)] dt, \quad (3)$$

gdzie: t - oznacza czas, t_0 - czas pojawienia się kawitacji, Q^+ i Q^- - objętościowe natężenie przepływu cieczy z prawej i lewej strony obszaru kawitacji. Wartość V_k wzrasta w czasie rozwijania się kawitacji, a następnie maleje, gdy kawitacja zanika. $V_k=0$ oznacza zniknięcie kawitacji i powrót do ciągłego ruchu cieczy.

Równania (1) i (2) tworzą zamknięty układ równań różniczkowych cząstkowych typu hiperbolicznego o nieznanach funkcjach $v(x,t)$ i $p(x,t)$. Układ ten można rozwiązać dla dowolnych warunków granicznych.

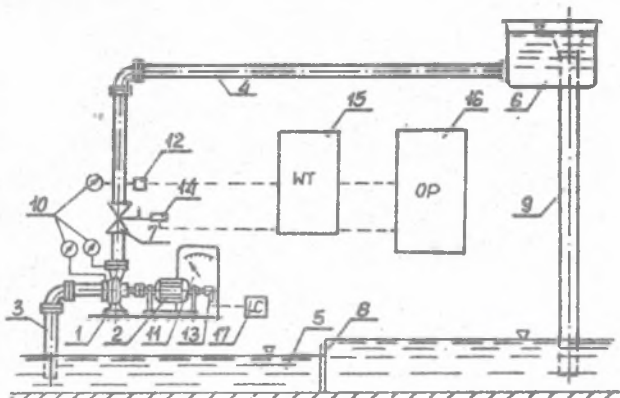
Poniżej przedstawione wyniki obliczeń numerycznych otrzymano dla przypadku odcinania przepływu wody w układzie złożonym z dolnego zbiornika wody, rurociągu ssawnego o długości 10,2 m i wewnętrznej średnicy 125 mm, pompy odśrodkowej 100 N 210, przepustnicy z ręczną dźwignią, rurociągu tłocznego o długości 20,3 m i średnicy wewnętrznej 70 mm oraz górnego zbiornika wody (rys.2).

Obliczenia wykonano w Ośrodku Obliczeniowym IMP PAN na maszynie cyfrowej Riad IS-32 w języku Fortran 4.

3. Badania doświadczalne

Badania doświadczalne przeprowadzono na stanowisku pompowym w labora-

torium Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Schemat tego stanowiska przedstawiono na rysunku 2. Celem badań była weryfikacja przedstawionego wyżej modelu matematycznego. Badania te polegały przede wszystkim



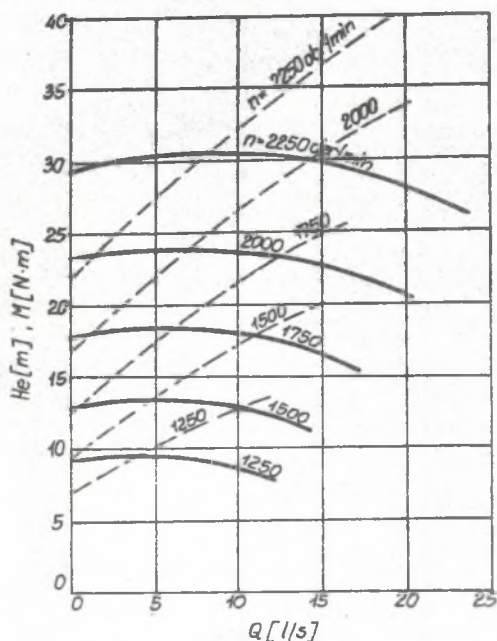
Rys.2. Schemat stanowiska doświadczalnego, 1-pompa odśrodkowa 100N210, 2-elektrodynamometr KS26-4, 3-rurociąg ssawny o dł.10,2 m i śr.wewn. 125 mm, 4-rurociąg tłoczny o dł.20,3m i śr.wewn.70 mm, 5-zbiornik ssawny, 6-zbiornik tłoczny, 7-przepustnica z ręczną dźwignią, 8-przelew Ponceleta, 9-rurociąg przelewowy, 10-manometry prężne, 11-waga do pomiaru momentu obrotowego, 12-przetwornik ciśnienia, 13-przetwornik obrotów, 14-przetwornik kąta obrotu motyla przepustnicy, 15-wzmacniacz tensometryczny TT6c, 16-oscylograf pętlicowy K115, 17-licznik cyfrowy.

na pomiarze zmian ciśnienia podczas naruszenia ciągłości przepływu wody w rurociągu tłocznym układu pompowego. Naruszenie ciągłości następowało podczas szybkiego zamykania przepustnicy za pomocą dźwigni ręcznej przedstawianej (zamykanie przepustnicy rozpoczynano po wyłączeniu silnika napędzającego pompę z pewnym opóźnieniem).

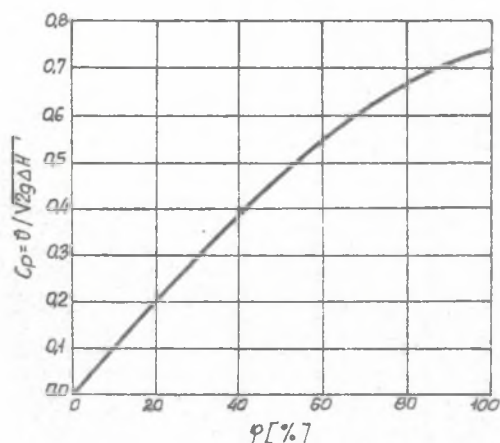
Przebiegi zmian ciśnienia pomierzono i rejestrowano posługując się indukcyjnym przetwornikiem ciśnienia IPCO 27/8 połączonym w układzie półmostka ze wzmacniaczem tensometrycznym TT6c i oscylografem pętlicowym K115. Ciśnienie odbierano w odległości 0,2 m od przepustnicy za pomocą rurki miedzianej o średnicy wewnętrznej 4 mm i długości 30 mm. Równocześnie z pomiarem ciśnienia rejestrowano przebieg zamykania przepustnicy za pomocą potencjometru obrotowego mechanicznie sprzęgniętego z motylem przepustnicy i elektrycznie połączonego ze wzmacniaczem tensometrycznym i oscylografem pętlicowym. Badania obejmowały również pomiar parametrów stanu ustalonego agregatu pompowego i odpowiadających im parametrów przepływu ustalonego wody w rurociągach. Na podstawie tych pomiarów wyznaczono charakterystyki statyczne pompy (rys.3) oraz zależność współczynnika przepływu wody przez przepustnicę od stopnia jej otwarcia (rys.4.).

Na rysunku 5 przedstawiono dwa wybrane przebiegi zamykania przepustnicy i odpowiadające im przebiegi zmian ciśnienia. W końcowej fazie zamykania przepustnicy wystąpiło rozzerwanie objętości przepływającej wody. Ciśnienia za przepustnicą spadło do wartości bliskiej ciśnieniu parowania wody i utrzymywało się na tym poziomie przez pewien czas, po czym nastąpił impulsowy przyrost ciśnienia o dużej wartości. Zmiany ciśnienia powtarzały się cyklicznie przy słabnącej amplitudzie i rosnącej częstotliwości. Wraz z upływem czasu oscylacje ciśnienia były coraz mniej tłumione, przechodząc w oscylacje harmoniczne o ustalonej częstotliwości oraz na przemian malejących i rosnących amplitudach. Łatwo zauważyć następujące cechy charakterystycznych przebiegów:

- łagodny charakter zmian ciśnienia w poszczególnych fazach utraty ciągłości przepływu wody,
- wzrost minimalnych wartości ciśnienia w kolejnych fazach utraty ciągłości,
- różnicę między wartością parowania wody równą - 9,8 m słupa wody dla 17,5°C a zmierzoną wartością minimalnego ciśnienia w fazach powsta-



Rys. 3. Charakterystyki pompy
 ————— krzywe diawienia przepływu wody $He(Q)$
 - - - - - krzywe momentu na wale $M(Q)$



Rys. 4. Zależność współczynnika przepływu przepustnicy c_p od jej otwarcia φ

tości zajętej przez pęcherzyki kawitacyjne w kolejnych fazach utraty ciągłości przepływu wody wskazuje zarówno zwiększenie częstotliwości pojawiania się impulsów ciśnienia, jak również obniżanie maksymalnych wartości

wania pierwszego obszaru kawitacji wynoszącą w rozpatrywanych przypadkach - 9.2 m słupa wody,

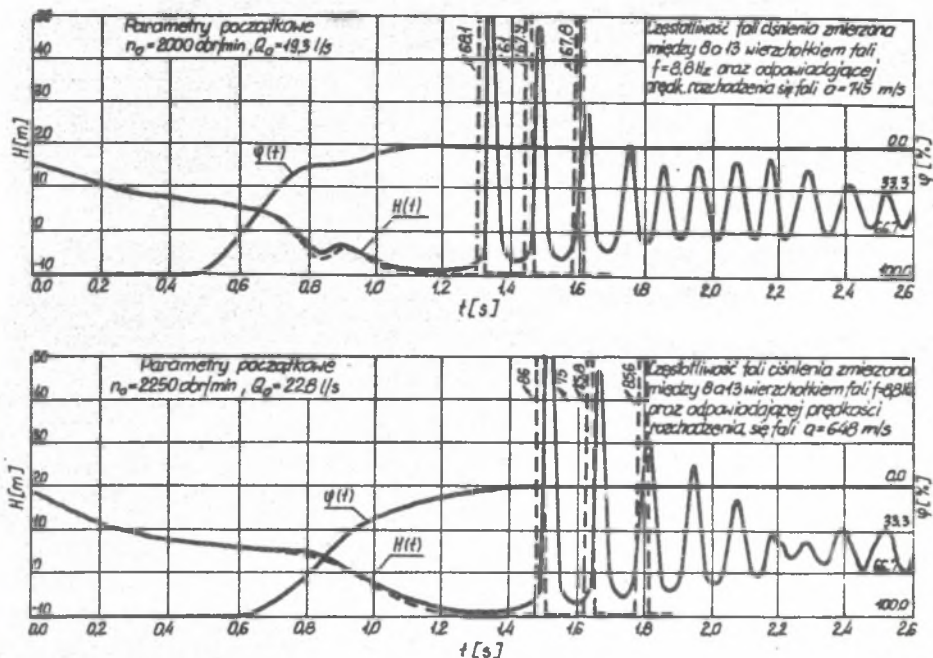
d/ różnicę w wartościach, częstotliwości harmonicznych oscylacji ciśnienia pomierzonych dla obydwu przypadków między 8 a 13 wierzchołkiem fali, a tym samym różnica w wartościach prędkości rozchodzenia się fal ciśnienia,

e/ znaczne zmniejszenie prędkości rozchodzenia się fal ciśnienia w rozpatrywanych przypadkach (715 m/s i 648 m/s) w porównaniu z prędkością rozchodzenia się fal ciśnienia powstających w przypadkach nie poprzedzonych rozzerwaniem cieczy (około 1200 m/s).

Wymienione wyżej cechy a i c wskazują między innymi na wpływ zawartości rozpuszczonych gazów w wodzie. Wpływ ten wyjaśnić można na podstawie prawa Daltona, jako że mierzone ciśnienie w czasie występowania kawitacji można uważać przy dużych sprężeniach jako ciśnienie całkowite mieszaniny parowo-gazowej, równe sumie ciśnień cząstkowych pary i gazów. Ponieważ ciśnienie parowania cieczy jest stałe dla danej temperatury, to ciśnienie mieszaniny parowo-gazowej zależy od względnej zawartości gazów w tej mieszaninie. Dlatego ciśnienie mierzone w czasie występowania kawitacji (odpowiadające ciśnieniu krytycznemu) zmienia się na skutek zmiany objętości zajętej przez pęcherzyki pary.

Wzrastające minimalne wartości ciśnienia w kolejnych fazach występowania kawitacji (cecha b) świadczyć może zarówno o zmniejszającej się objętości zajętej przez pęcherzyki pary w kolejnych cyklach, jak również o wydzielaniu się rozpuszczonych gazów w wodzie. O wydzielaniu się gazów świadczy zmniejszenie prędkości rozchodzenia się fali ciśnienia poprzedzonej rozzerwaniem objętości cieczy w porównaniu z prędkością rozchodzenia się fali ciśnienia powstającej w przypadku, gdy rozzerwanie takie nie występowało (cecha e).

Natomiast na zmniejszanie objętości zajętej przez pęcherzyki kawitacyjne w kolejnych fazach utraty ciągłości przepływu wody wskazuje zarówno zwiększenie częstotliwości pojawiania się impulsów ciśnienia, jak również obniżanie maksymalnych wartości



Rys.5. Przebiegi zmian ciśnienia w przekroju rurociągu tłocznego za przepustnicą i odpowiadające im przebiegi zamykania przepustnicy $\varphi(t)$. ————— krzywe doświadczalne, ————— krzywe teoretyczne.

tych impulsów.

4. Porównanie pomierzonych i obliczonych przebiegów zmian ciśnienia

Pomierzone przebiegi zmian ciśnienia w przekroju rurociągu tłocznego za przepustnicą porównano z odpowiadającymi im przebiegami otrzymanymi na podstawie obliczeń numerycznych (rys.5). Z porównania tego wynika, że istnieje względnie dobra zgodność teorii z doświadczeniem w fazie - od początku wymuszenia niestabilnego przepływu wody do początku powstawania drugiego z kolei obszaru objętego kawitacją (początek drugiej fazy obniżonego ciśnienia). W następnej fazie - tłumienia impulsowych przystosów ciśnienia - występują duże rozbieżności. W rozpatrywanych przypadkach rozbieżności dotyczą przede wszystkim maksymalnych i minimalnych wartości ciśnienia oraz szybkości tłumienia osyłkacji ciśnienia i ich częstotliwości. Pomierzone maksymalne wartości ciśnienia są niższe od obliczonych wartości maksymalnych o około 15%. W rzeczywistości szybkość tłumienia impulsowych zmian ciśnienia jest bardzo duża w porównaniu z nieznaczną szybkością tłumienia wynikającą z obliczeń. Różnice między pomierzonymi i wynikającymi z obliczeń częstotliwości zmian ciśnienia są małe tylko dla pierwszych trzech impulsów. Częstotliwość wynikająca z modelu zmienia się nieznacznie, natomiast w rzeczywistości częstotliwość wzrasta wraz z tłumieniem i ustala się, gdy zmiany ciśnienia przechodzą w osyłkacje harmoniczne.

Należy przypuszczać, że główne przyczyny tych rozbieżności są związane z dużymi uproszczeniami modelu matematycznego, nie uwzględniającego złożonego charakteru zjawiska kawitacji. Uproszczony obraz obszaru objętego kawitacją, nieuwzględnienie efektów dysypacji energii towarzyszącej zjawisku kawitacji oraz nieuwzględnienie wpływu zawartości gazów nierozpuszczonych w cieczy i zjawiska kawitacji gazowej są prawdopodobnie

głównymi przyczynami tych rozbieżności. Pęcherzyki kawitacyjne ze względu na swój niestacystyczny charakter wielokrotnie pojawiają się i zanikają w każdej fazie obniżonego ciśnienia, w której występuje kawitacja. Powoduje to intensywne mieszanie się cieczy w sąsiedztwie pęcherzyków, wskutek czego wzrastają straty energii.

Należy przypuszczać, że duża część energii jest pochłaniana przez ścianki rurociągu tłoczego i jego podpory podczas wzajemnego oddziaływania fal ciśnienia z falami naprężeń w ściankach rurociągów. Na to oddziaływanie wskazuje powtarzające się zmniejszanie wzrost oscylacji ciśnienia w końcowej fazie tłumienia fali ciśnienia.

5. Wnioski końcowe

Zaproponowany model obliczeniowy oddaje tylko jakościowy charakter zmian ciśnienia po naruszeniu ciągłości przepływu cieczy. W związku z tym wymaga on doskonalenia. W obecnej postaci może mieć tylko ograniczone zastosowanie do przewidywania przebiegów opisanych przyjętymi założeniami.

Otrzymane wyniki badań wskazują na kierunki dalszych prac w dziedzinie niustalonego przepływu cieczy z kawitacją, a mianowicie na:

- potrzebę wizualizacji obszarów objętych kawitacją,
- potrzebę identyfikacji zjawisk dyssypacji energii towarzyszącej procesom pojawiania się i zanikania pęcherzyków kawitacyjnych,
- celowość określania zawartości nierozpuszczonych gazów w cieczy oraz szybkości wydzielania się gazów rozpuszczonych w cieczy,
- ustalenie wzajemnego oddziaływania procesów falowych w cieczy i materiale przewodów.

Literatura

- [1] Balzer R.A.: Column Separation Accompanying Liquid Transients in Pipes, Journal of Basic Engineering Trans. ASME, December 1967
- [2] Safwet H.H., Polder J.: Experimental and Analytic Data Correlation Study of Water Column Separation, Journal of Fluids Engineering March 1973
- [3] Weyler M.E., Streeter V.L., Larsen P.S.: An Investigation of the Effect of Cavitation Bubbles on the Momentum Loss in Transient Pipe Flow, Journal of Basic Engineering, Trans. ASME, March 1971.
- [4] Bednarczyk S.: Ruch nieustalony cieczy w przewodach pod ciśnieniem Archiwum Hydrotechniki, tom XXI, z.4. 1979
- [5] Wylie E.B., Streeter V.L.: Fluid transients, Mc Graw-Hill, New York, 1978.

ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВЫЗВАННЫ НАРУШЕНИЕМ НЕПРЕРЫВНОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В НАСОСНОЙ СИСТЕМЕ

Резюме

В работе рассматривается разрыв в течении жидкости в насосной системе вызванный быстрым закрытием клапана. Представлено математическую модель явления, проведено численное исчисление связанное с описанным возмущением, сравнено результаты теоретического исчисления с результатом эксперимента.

THE PRESSURE VARIATIONS DUE TO THE LIQUID FLOW CONTINUITY DISTURBANCE IN A PUMPING SYSTEM

Summary

The discontinuity of a liquid flow in a pumping system due to a fast valve closing is discussed. A mathematical model of the phenomenon has been presented and numerical calculations concerning the described disturbance have been carried out. Numerical results have been compared with experimental ones.