

ANALIZA PORÓWNAWCZA PROCESÓW TŁUMIENIA I WYGŁADZANIA FALI CIŚNIENIA W TRAKCIE NIEUSTALONEGO PRZEPŁYWU W RUROCIĄGACH WYKONANYCH Z RÓŻNYCH MATERIAŁÓW

Natalia Krystyna Gietka

Politechnika Gdańska

Streszczenie. Uderzenie hydrauliczne jest uważane za jeden z najważniejszych problemów nieustalonego przepływu w przewodach, dlatego nadal stanowi obiekt badań wielu naukowców. To zagadnienie może być badane na dwóch poziomach: praktycznym i teoretycznym. W artykule zaprezentowane zostały wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych na stanowisku pomiarowym nieustalonego przepływu, funkcjonującym w Laboratorium Hydraulicznym Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej. Badania polegały na pomiarach ciśnienia w charakterystycznych punktach badanego przewodu podczas przejścia fali ciśnienia. Pomiary zostały przeprowadzone dla przewodu wykonanego z polietylenu wysokiej gęstości oraz dla przewodu ze stali ocynkowanej. Na podstawie pomiarów i obliczeń porównane zostały charakterystyczne parametry fali ciśnienia. Artykuł przedstawia również wyniki symulacji numerycznych z użyciem klasycznej metody charakterystyk. Przy porównaniu wyników pomiarów i symulacji numerycznych widać wyraźnie, że wyniki obliczeń uzyskiwane na drodze rozwiązywania klasycznego układu równań znacznie różnią się od wyników pomiarów. Okazuje się, że tłumienie fali ciśnienia w przewodzie przebiega w zasadniczo odmienny sposób, a na jego przebieg ma wpływ wiele czynników, w tym materiał przewodu. Propagacja fali ciśnienia przebiega w sposób szczególnie złożony, w przypadku przewodów o różnych charakterystykach materiałowych.

Słowa kluczowe: przepływ nieustalony w przewodach, uderzenie hydrauliczne, tłumienie i wygładzanie fali ciśnienia, dyfuzja numeryczna, dyspersja numeryczna

Adres do korespondencji – Corresponding author: mgr inż. Natalia Krystyna Gietka, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Hydrotechniki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: natalia.gietka@pg.gda.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

WSTĘP

Uderzenie hydrauliczne w przewodach to proces propagacji fali ciśnienia będący następstwem szybkich w czasie zmian prędkości. Zjawisko to może wystąpić zarówno w dużych rurociągach stosowanych w hydrotechnice, jak i w powszechnie używanych przewodach domowych instalacji sanitarnych. Bywa ono jednym z powodów awarii tych systemów, m.in. powoduje uszkodzenia pomp, zaworów zwrotnych, wrażliwej armatury czy nawet zniszczenie rurociągu. Przyczynami powstawania uderzenia hydraulicznego mogą być zarówno przypadkowe zdarzenia (np. przerwy w dostawie prądu do stacji pomp), jak i niewłaściwe eksploataowanie instalacji (np. nieprawidłowe zamykanie lub otwieranie zaworów) [Niełacny 2003]. Zapobieganie temu zjawisku polega na uniemożliwianiu lub redukcji nadmiernego przyrostu ciśnienia m.in. poprzez powolne otwieranie i zamykanie zaworów, odpowiedni dobór materiału przewodu, stosowanie zbiorników wodno-powietrznych, zaworów przeciwuderzeniowych itd. Pomimo tych zabiegów zjawisko uderzenia hydraulicznego często stanowi istotny problem z jakim muszą zmierzyć się zarówno projektanci, jak i użytkownicy systemów sanitarnych. Potwierdzeniem jego istotności jest fakt nałożenia na projektantów obowiązku sprawdzania instalacji w warunkach szybkozmiennych przepływów nieustalonych. Z tego powodu poznanie tego zjawiska w możliwie jak najdokładniejszym stopniu stanowi istotne zagadnienie, zarówno naukowe, jak i praktyczne.

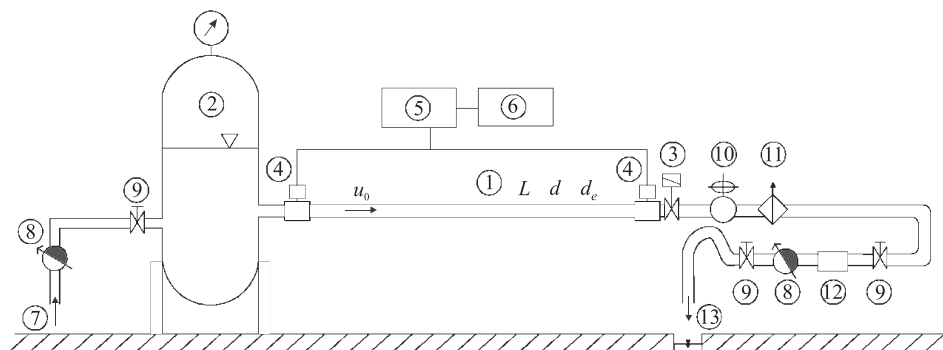
Rozwój wiedzy dotyczącej uderzenia hydraulicznego trwa już prawie od dwustu lat. Równoległe z nim postępował rozwój technik pomiarowych umożliwiających pomiar ciśnienia w rurociągach z dużą dokładnością i wysoką częstotliwością. Dzięki temu możliwe stało się konfrontowanie wyników obliczeń oraz eksperymentu fizycznego. Okazało się jednak, że wyniki badań laboratoryjnych nie pokrywają się z wynikami obliczeń uzyskiwanych na podstawie rozwiązywania układu równań uznanego dotychczas za prawidłowy model tego zjawiska, a różnice między nimi są znaczne. Dodatkowe trudności wynikają z hiperbolicznego charakteru równań. W literaturze znaleźć można wiele prób udoskonalenia klasycznego opisu zjawiska i metod rozwiązywania tak, aby obserwacje i obliczenia były jak najbardziej zgodne. Okazuje się jednak, że zgodność ta jest często konsekwencją błędów numerycznych, a nie rzeczywistego udoskonalenia opisu zjawiska. Na przestrzeni lat wielu badaczy starło się znaleźć sposób na eliminację różnicy między wynikami pomiarów a obliczeniami. Początkowo były to próby zmiany metody oszacowywania oporów w wyniku, czego powstało wiele modeli tarcia dla warunków nieustalonego przepływu pod ciśnieniem. Można je podzielić na siedem grup [Wichowski, 2002]. Jednak mimo starań modele tarcia nie wpłynęły na poprawę obliczeń numerycznych. Innym rozwiązaniem, jakie zostało zaproponowane, jest nie tylko zmiana modelu tarcia, ale także wprowadzenie dodatkowo członu dyfuzyjnego do równania dynamicznego [Szymkiewicz i Mitosek 2014]. Nadal jednak nie udało się znaleźć uniwersalnego rozwiązania pozwalającego wyeliminować różnice między wynikami empirycznymi a numerycznymi. Stąd też konieczne jest prowadzenie dalszych badań, które pozwolą na podjęcie kolejnych prób wyjaśnienia przyczyn różnic pomiędzy wynikami obliczeń a wynikami pomiarów laboratoryjnych oraz udoskonalenia opisu matematycznego uderzenia hydraulicznego. W niniejszej pracy przedstawia się wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na stanowisku pomiarowym



nieustalonego przepływu w rurociągu prostym dla dwóch przewodów wykonanych z różnych materiałów.

OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

W celu pozyskania empirycznych danych na stanowisku pomiarowym znajdującym się w Laboratorium Hydraulicznym Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej (ryc. 1 oraz ryc. 2) zostały wykonywane pomiary uderzenia hydraulicznego. Badania doświadczalne przepływów nieustalonych przeprowadzono dla pojedynczego przewodu z tworzywa sztucznego oraz stali.



Ryc. 1. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – przewód, 2 – zamknięty zbiornik hydroforowy, 3 – zawór elektromagnetyczny lub zawór kulowy, 4 – tensometryczny czujnik ciśnienia, 5 – mostek tensometryczny, 6 – komputer z kartą AD/DA, 7 – zasilanie z instalacji wodociągowej, 8 – wodomierz skrzydełkowy, 9 – zawór odcinający, 10 – tłumik uderzeń wodnych, 11 – degazator, 12 – przepływomierz elektromagnetyczny, 13 – odpływ do studzienki kanalizacyjnej, u_0 – prędkość dla warunków ustalonych, L – długość przewodu, d – średnica nominalna przewodu, d_e – grubość ścianki przewodu

Fig. 1. Schematic of the test bench: 1 – pipe, 2 – closed pressure tank, 3 – electromagnetic valve or off valve, 4 – pressure strain gauge, 5 – extensometer amplifier, 6 – computer with AD/DA card, 7 – supply pipe, 8 – wing water-meter, 9 – off valve, 10 – water hammer silencer, 11 – degasser, 12 – electromagnetic flow-meter, 13 – outflow, u_0 – speed for the steady flow, L – pipe length, d – pipe nominal diameter, d_e – pipe wall thickness

Stanowisko pomiarowe składa się z części pomiarowej oraz elementów dodatkowych. W skład właściwej części pomiarowej wchodzi: odcinek rurociągu prostego z odpowiedniego materiału (1), zamknięty zbiornik hydroforowy (2), zawór elektromagnetyczny lub zawór kulowy (3), tensometryczne czujniki ciśnienia absolutnego (4), mostek tensometryczny (5) oraz komputer z kartą AD/DA (6). Elementami dodatkowymi są: odcinek przewodu doprowadzający wodę do stanowiska pomiarowego z instalacji wodociągowej (7), dwa wodomierze skrzydełkowe na zasilaniu i na odpływie (8), trzy zawory odcinające, jeden na zasilaniu i dwa na odpływie (9), tłumik uderzenia wodnego (10), degazator (11), elektromagnetyczny przepływomierz (12) oraz odpływ wody do studzienki kanalizacyjnej znajdującej się w posadzce (13).





Ryc. 2. Fotografie wybranych elementów stanowiska pomiarowego: prawy górny róg – przewody, dla jakich wykonywano pomiary, prawy dolny róg – zawór elektromagnetyczny, środek po prawej stronie – zawór kulowy, środek – zamknięty zbiornik hydroforowy, lewy górny róg – przepływomierz elektromagnetyczny, lewy dolny róg – tensometryczny czujnik ciśnienia

Fig. 2. Photographs of selected elements of the test bench: upper right corner – pipe for which measurements were obtained, bottom right corner – electromagnetic valve, center to the right – off valve, center – closed pressure tank, upper left corner – electromagnetic flowmeter, bottom left corner – pressure strain gauge, center of the left – wing water-meter.

Woda do stanowiska dociera z instalacji wodociągowej (7). Na odcinku doprowadzającym wodę znajduje się jeden z dwóch wodomierzy skrzydełkowych (8), na którym wykonywany jest pomiar natężenia przepływu metodą objętościową z wykorzystaniem stopera oraz zawór odcinający dopływ wody do stanowiska (9). Następnie woda wpływa do zamkniętego zbiornika hydroforowego (2), który ma za zadanie utrzymać stałe ciśnienie w przewodzie. Kolejnym elementem jest odcinek rurociągu prostego z odpowiedniego materiału (1), dla którego wykonywane są pomiary, o znanej średnicy d , grubości ścianki d_c i długości L , w którym w warunkach ustalonych woda płynie z prędkością u_0 . Na przewodzie tym znajdują się dwa tensometryczne czujniki ciśnienia absolutnego (4) o maksymalnym zakresie ciśnienie równym 2,5 MPa. Pierwszy na początku przewodu, drugi na jego końcu – tuż przed zaworem elektromagnetycznym lub zaworem kulo-

wym (3), w zależności od tego, dla jakiego materiału wykonywany jest pomiar ciśnienia. Sygnał z tych czujników doprowadzany jest za pomocą specjalnych kabli do mostka tensometrycznego (5), gdzie następuje wzmocnienie sygnału, który jest przekazywany do komputera z kartą AD/DA (6), pełniącego rolę rejestratora sygnału. Na odpływie za zaworem (3) znajdują się tłumik uderzenia wodnego (10) oraz degazator (11), mające na celu zabezpieczenie przed ewentualnymi negatywnymi skutkami uderzenia hydraulicznego elektromagnetyczny przepływomierz (12), za pomocą którego wykonywane są pomiary natężenia przepływu. Wydatek w warunkach ustalonych regulowany jest za pomocą zaworu odcinającego (9) znajdującego się przed przepływomierzem elektromagnetycznym (12). Aby sprawdzać, czy pomiar za pomocą przepływomierza jest poprawny, na końcu przed odpływem zamontowany został jeszcze jeden wodomierz skrzydełkowy (8) do kontrolnego pomiaru natężenia przepływu. Woda ze stanowiska odprowadzana jest do znajdującej się w posadzce studzienki kanalizacyjnej (13). Za degazatorem (11) przewód jest wygięty, a jego dalsza część zawraca. Na dolnej części tego przewodu znajduje się przepływomierz elektromagnetyczny (12), wodomierz skrzydełkowy (8), zawór odcinający (9) oraz syfon wykonany z przewodu.

Pomiary rozpoczynają się od otwarcia zaworu odcinającego na zasilaniu celem doprowadzenia wody do stanowiska pomiarowego. Następnie wykonywane jest odpowietrzenie całej instalacji w celu pozbycia się pęcherzyków powietrza. Pierwszym elementem, jaki należy ustawić przed rozpoczęciem pomiarów, jest odpowiednie ciśnienie w zbiorniku hydroforowym. Wykonuje się to poprzez regulację poziomu wody oraz/i ilości powietrza w zbiorniku – konieczne jest, aby pamiętać, iż ciśnienie to nie może być za wysokie, ze względu na ograniczony zakres7dwyd_rw

pracy czujników (do 2,5 MPa), oraz za niskie, aby nie wystąpiło zjawisko kawitacji. W związku z tym konieczne jest odpowiednie dobranie ciśnienia w zbiorniku i prędkości przepływu w przewodzie w warunkach ustalonych. Natężenie przepływu na zasilaniu i odpływie regulowane jest za pomocą zaworów odcinających tak, aby ta sama ilość wody dopływała i odpływała ze stanowiska. Pomiar ciśnienia za pomocą tensometrycznych czujników rozpoczynany jest w warunkach ustalonych. Następnie wywoływany jest przepływ nieustalony poprzez gwałtowne zamknięcie zaworu elektromagnetycznego w przypadku przewodu z polietylenu lub zaworu kulowego w przypadku przewodu stalowego. Pomiar kończy się otwarciem zaworu elektromagnetycznego lub kulowego w momencie zarejestrowania zaniku oscylacji ciśnienia.

UKŁAD RÓWNAŃ PRZEPŁYWU NIEUSTALONEGO

Układ równań opisujący przepływ nieustalony w przewodach pod ciśnieniem składa się z dwóch równań wyprowadzonych z zasady zachowania masy oraz zasady zachowania pędu. Klasyczny układ równań uderzenia hydraulicznego stanowi [Wylie i Streeter 1987]:

– równanie dynamiczne:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda}{2d} u^2 = 0 \quad (1)$$



– równanie ciągłości:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Równania (1) i (2) zostały wyprowadzone przy następujących założeniach:

- przepływ jest jednowymiarowy,
- zmienne opisujące przepływ są uśrednione względem przekroju poprzecznego,
- przewód jest całkowicie napełniony, a wartość ciśnienia zawsze większa niż pręężność pary wodnej, dzięki czemu nie zachodzi zjawisko kawitacji,
- ciecz jest ściśliwa, a ścianki przewodu są sprężyste odkształcalne zgodnie z prawem Hooke'a,
- opory przepływu wyznaczane są jak dla warunków ustalonych,
- pomija się lokalne straty energii.

Układ równań uderzenia hydraulicznego (1) i (2) jest układem równań różniczkowych cząstkowych pierwszego rzędu typu hiperbolicznego. Formuluje się dla niego tzw. problem początkowo-brzegowy rozwiązywany w obszarze: $0 \leq x \leq L$ oraz $t \geq 0$.

- Warunek początkowy: dla $t = 0$ zakładając ruch ustalony określa się pręężkość $u(x, t = 0) = u_p(x)$ oraz ciśnienie $H(x, t = 0) = H_p(x)$ na całej długości rurociągu.
- Warunki brzegowe: na początku rurociągu dla $x = 0$ znajduje się funkcję ciśnienia $H(x = 0, t) = H_0(x)$ oraz na końcu rurociągu dla $x = L$ funkcję pręężkości $u(x = L, t) = u_L(x)$.

Rozwiązanie układu równań (1), (2) wymaga znajomości następujących charakterystyk wody oraz rurociągu:

- a) temperatura wody: T , °C;
- b) moduł sprężystości wody: K , Pa;
- c) moduł sprężystości materiału przewodu: E , Pa;
- d) nominalna średnica przewodu: d , m;
- e) grubość ścianek przewodu: d_w , m;
- f) wewnętrzna średnica przewodu: d_w , m;
- g) długość przewodu: L , m;
- h) współczynnik chropowatości bezwzględnej przewodu k , m;
- i) współczynnik Poissona materiału przewodu: ν .

Niektóre parametry są funkcją temperatury, a ich wartości należy obliczyć z następujących wzorów:

- gęstość wody ρ , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (dla temperatury średniej T , °C) [Weinerowska-Bords (red.) 2004]:

$$\rho = 1000 - \frac{(T - 4)^2 (T + 283)}{503,57 (T + 67,2)} \quad (3)$$

- dynamiczny współczynnik lepkości μ , $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ [Weinerowska-Bords (red.) 2004]:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,000221 \cdot T^2} \quad (4)$$



gdzie:

μ_0 – dynamiczny współczynnik lepkości dla temperatury $T = 0^\circ\text{C}$,
 $\mu_0 = 0,00179 \text{ N s} \cdot \text{m}^{-2}$,

- współczynnik oporów na długości λ (wzór Colebrooka-White'a):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,72d} \right) \quad (5)$$

gdzie:

Re – liczba Reynoldsa:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d_w}{\mu} \quad (6)$$

- prędkość rozchodzenia się fali ciśnienia c , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ [Chaudhry, 1979]:

$$c = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left(\frac{K \cdot d}{E \cdot d_e}\right) \cdot c_1}} \quad (7)$$

gdzie:

c_1 – współczynnik uwzględniający sposób zamocowania przewodu, obliczany dla przewodu umocowanego na całej długości (dla $d/d_e < 25$):

$$c_1 = \frac{2 \cdot d_e}{d} (1 + \nu) + \frac{d(1 - \nu^2)}{(d + d_e)} \quad (8)$$

- okres fali uderzenia hydraulicznego T , s [Mitosek, 2007]:

$$T = \frac{2 \cdot L}{c} \quad (9)$$

- maksymalny przyrost ciśnienia Δp , Pa (wzór Żukowskiego):

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot \Delta u_0 \quad (10)$$

Do rozwiązania układu (1) i (2) można wykorzystać znane metody numeryczne, np. klasyczną metodę charakterystyk ze stałą siatką węzłów, metodę różnic skończonych wykorzystującą schemat skrzynkowy, metodę elementów skończonych itd., które pozwalają na uzyskanie przybliżonego rozwiązania o określonej dokładności.

Wykorzystując metody numeryczne, należy pamiętać o tym, że generują one błędy numeryczne, których charakter i intensywność zależy od dokładności aproksymacji, a ich efekty mogą być podobne do efektów wywoływanych przez zjawiska fizyczne determi-

nujące przebieg badanego procesu [Szymkiewicz 2006]. Ważne jest więc, aby pamiętać o odseparowywaniu w rozwiązaniu efektów dyfuzji i dyspersji numerycznej od efektów dyfuzji i dyspersji fizycznej.

WYNIKI POMIARÓW

Pomiary zrealizowane zostały dla przewodu wykonanego z polietylenu o wysokiej gęstości oraz przewodu ze stali ocynkowanej. Początkowe ciśnienie absolutne w zbiorniku w warunkach ustalonych wynosiło $H_0 = 0,51$ MPa, natomiast prędkość miała wartość $u_0 = 0,44$ m · s⁻¹. Średnia temperatura wody podczas pomiarów wynosiła $T = 12^\circ\text{C}$. Liczba Reynoldsa w warunkach ustalonych miała wartość $Re_1 = 5133$ dla przewodu z PE-HD oraz $Re_2 = 5165$ dla przewodu ze stali. Moduł sprężystości wody przyjęto $K = 2,19 \cdot 10^9$ Pa. Pozostałe charakterystyczne parametry obu przewodów przedstawia tabela 1.

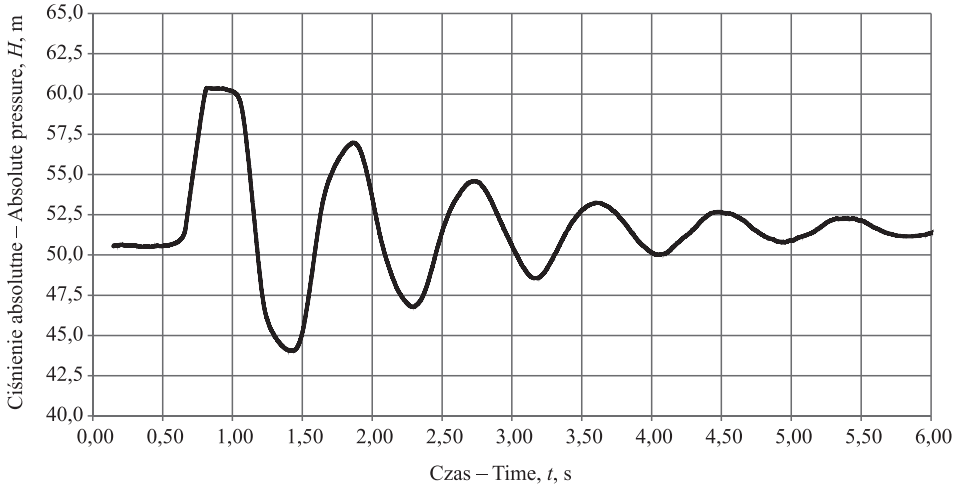
Tabela 1. Zestawienie charakterystycznych parametrów przewodów.

Table 1. Summary of characteristic parameters of pipes.

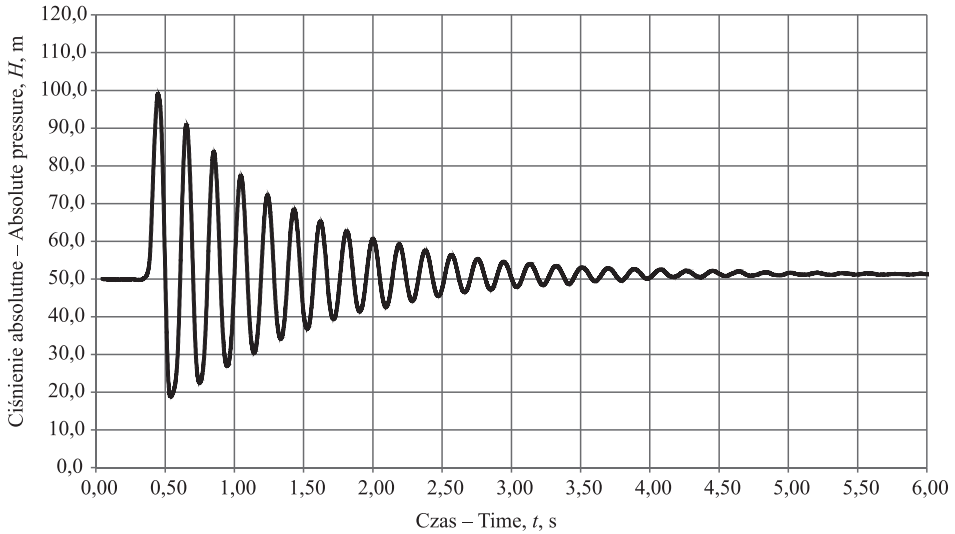
Parametr Parameter	Materiał rur Pipe material	PE-HD Polietylen	Stal ocynkowana Galvanized steel
Średnica nominalna		20,0 mm	21,3 mm
Grubość ścianki		2,0 mm	2,6 mm
Średnica wewnętrzna		16,0 mm	16,1 mm
Długość przewodu		52,32 m	52,32 m
Chropowatość bezwzględna		$7 \cdot 10^{-6}$ m	$1,5 \cdot 10^{-4}$ m
Współczynnik Poissona		0,43	0,30
Moduł Younga		$1,2 \cdot 10^9$ Pa	$206 \cdot 10^9$ Pa

Na ryc. 3 i ryc. 4 zaprezentowane zostały wyniki pomiarów ciśnienia absolutnego odpowiednio dla przewodu z polietylenu oraz ze stali wykonane za pomocą tensometrycznego czujnika ciśnienia absolutnego znajdującego się w odległości około 19 cm przed zaworem położonym na końcu badanego przewodu. Na podstawie wykresów przedstawiających zmienność ciśnienia w czasie uderzenie hydraulicznego w obu badanych przewodach można zauważyć, że proces tłumienia i wygładzania fal ciśnienia zachodzi w nich w inny sposób. W przypadku przewodu z tworzywa sztucznego prędkość fali i przyrost ciśnienia są znacznie mniejsze niż w przypadku stali, co znajduje swoje potwierdzenie w literaturze i związane jest z właściwościami mechanicznymi tych materiałów. Ponadto można dla każdego z nich zaobserwować charakterystyczny kształt fali ciśnienia.





Ryc. 3. Zmienność ciśnienia w czasie podczas przepływu nieustalonego w przewodzie z PE-HD o długości $L = 52,32$ m, średnicy zewnętrznej $d = 20$ mm, grubości ścianek $d_e = 2$ mm, przy ciśnieniu początkowym $H_0 = 0,51 \cdot 10^6$ Pa oraz prędkości początkowej $u_0 = 0,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ – Time
 Fig. 3. Pressure variability during the transient pipe flow in the PE-HD pipe of length $L = 52.32$ m outer diameter $d = 20$ mm, wall thickness $d_e = 2$ mm, at an initial pressure of $H_0 = 0.51 \cdot 10^6$ Pa, and an initial speed $u_0 = 0.44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Ryc. 4. Zmienność ciśnienia w czasie podczas przepływu nieustalonego w przewodzie ze stali ocynkowanej o długości $L = 52,32$ m, średnicy zewnętrznej $d_1 = 21,3$ mm, grubości ścianek $d_{e1} = 2,6$ mm, przy ciśnieniu początkowym $H_0 = 0,51$ MPa oraz prędkości początkowej $u_0 = 0,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
 Fig. 4. Pressure variability during the transient pipe flow in the galvanized steel pipe of length $L = 52.32$ m outer diameter $d_1 = 21.3$ mm, wall thickness $d_{e1} = 2.6$ mm, at an initial pressure of $H_0 = 0.51 \cdot 10^6$ Pa, and an initial speed $u_0 = 0.44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



W tabeli 2 zestawione zostały wartości parametrów charakteryzujących falę ciśnienia dla obu przewodów wyznaczone w oparciu o wyniki pomiarów oraz formuł teoretycznych. W drugiej części tabeli zobaczyć można różnice pomiędzy wartościami parametrów wyznaczonych empirycznie i teoretycznie. Na podstawie zestawienia można zauważyć, że wartości obliczone z formuł teoretycznych są znacznie wyższe niż wartości określone z pomiarów. Większe różnice między parametrami występują dla rurociągu polietylenowego niż stalowego. Widoczne jest to szczególnie w przypadku różnicy między wartościami maksymalnych przyrostów ciśnienia.

Tabela 2. Zestawienie parametrów fali ciśnienia wyznaczonych na podstawie formuł teoretycznych oraz empirycznych wyników badań: $T_{\text{teor.}}$ – okres fali ciśnienia określony na podstawie formuły (9), $c_{\text{teor.}}$ – prędkość fali ciśnienia wyznaczona ze wzoru (7), $\Delta p_{\text{teor.}}$ – maksymalny przyrost ciśnienia obliczony za pomocą wzoru (10), $T_{\text{emp.}}$ – okres fali ciśnienia określony na podstawie wyników pomiarów, $c_{\text{emp.}}$ – prędkość fali ciśnienia wyznaczona na podstawie wyników pomiarów, $\Delta p_{\text{emp.}}$ – maksymalny przyrost ciśnienia ustalony na podstawie wyników pomiarów

Table 2. List of parameters determined for the pressure wave on the basis of theoretical formulas and empirical research results: $T_{\text{teor.}}$ – the period of the pressure wave determined from the formula (9), $c_{\text{teor.}}$ – the pressure wave velocity determined from the formula (7), $\Delta p_{\text{teor.}}$ – maximum pressure rise calculated the formula (10), $T_{\text{emp.}}$ – the period of the pressure wave determined on the basis of the measurement results, $c_{\text{emp.}}$ – the speed of the pressure wave determined on the basis of measurements, $\Delta p_{\text{emp.}}$ – maximum pressure increase calculated on the basis of measurement results

Parametr The parameter		$T_{\text{teor.}}$	$T_{\text{emp.}}$	$c_{\text{teor.}}$	$c_{\text{emp.}}$	$\Delta p_{\text{teor.}}$	$\Delta p_{\text{emp.}}$
		s	s	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	m	m
Materiał rury Pipe material							
PE-HD		0,314	0,432	333	235	14,7	9,5
stal ocynkowana		0,074	0,096	1412	1083	62,1	48,6
Różnice między wartościami parametrów The differences between the values of the parameters							
Różnica The difference		$T_{\text{emp.}} - T_{\text{teor.}}$	$c_{\text{emp.}} - c_{\text{teor.}}$		$\Delta p_{\text{emp.}} - \Delta p_{\text{teor.}}$		
		%	%		%		
Materiał rury Pipe material							
PE-HD		37,58	41,70		51,74		
stal ocynkowana		29,73	33,38		27,78		

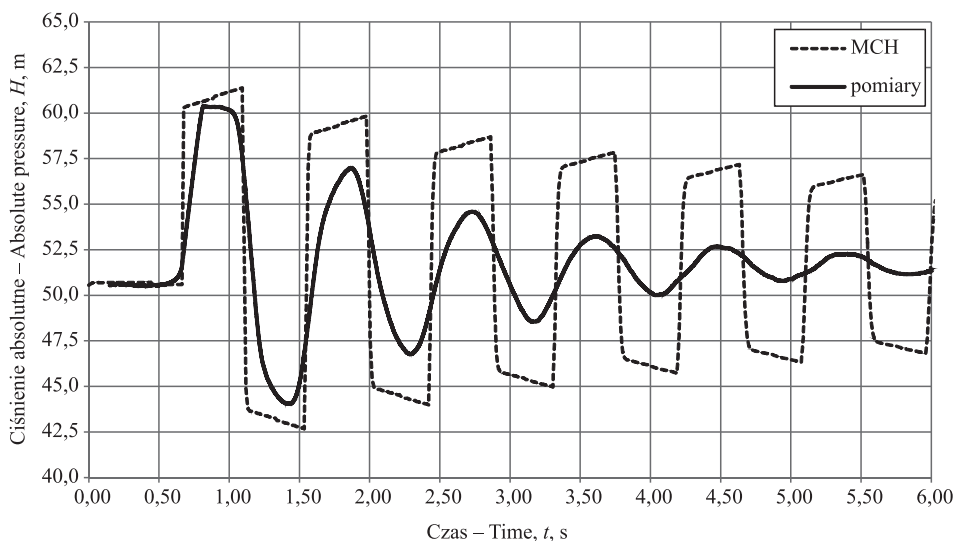
Zaobserwowane różnice wynikają z tego, że wzory teoretyczne nie uwzględniają wszystkich czynników wpływających na wartość liczonych parametrów i są wyznaczone na podstawie założeń, których w rzeczywistości nie można spełnić. Np. wzór Żukowskiego (10) wprowadzony został z założeniem, że ścianki przewodu są doskonale sztywne, a czas zamykania zaworu jest równy zero. Oba z tych założeń są niemożliwe do spełnienia w rzeczywistości. Innym czynnikiem wpływającym na wynik maksymalnego przyrostu



ciśnienia jest prędkość fali ciśnienia określana na podstawie wzoru (7), w którym jako parametr charakteryzujący materiał przewodu występuje moduł Younga. Wartość tego parametru dla danego materiału podawana jest w formie zakresu wartości, przez co jego wartość może być różna w zależności od subiektywnego wyboru osoby wykonującej obliczenia. Wpływ na wartość tego modułu mają również właściwości viskoelastyczne materiału, co ma znaczenie w przypadku przewodów z tworzyw sztucznych. Dlatego też obliczona na podstawie wzoru Żukowskiego (10) wartość przyrostu ciśnienia może stanowić jedynie wartość szacunkową dla określenia rzędu wielkości tego parametru.

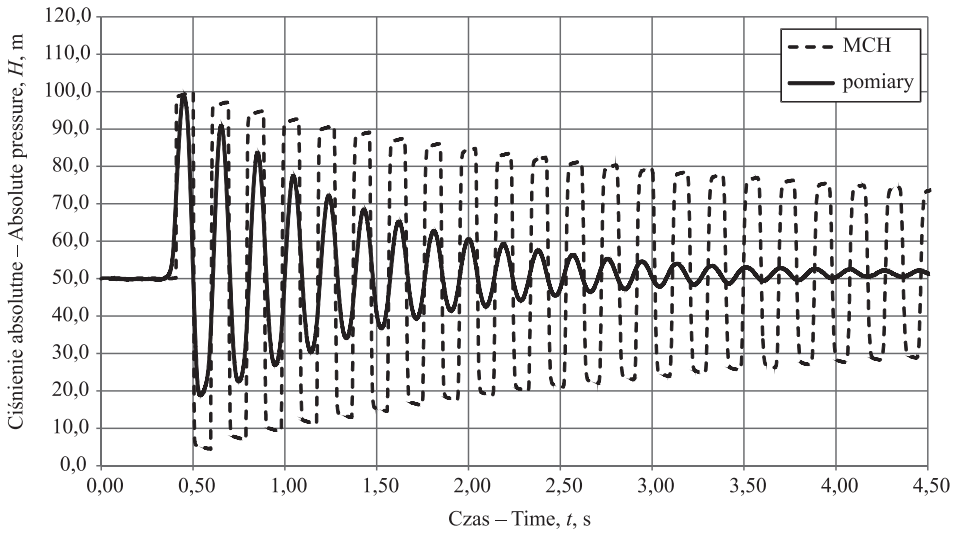
W celu porównania wyników pomiarów z wynikami symulacji numerycznej wykonane zostały obliczenia za pomocą wybranej metody numerycznej. Symulacje przeprowadzono z wykorzystaniem napisanych w języku programowania Fortran programów komputerowych. Do wykonania obliczeń konieczne było przyjęcie wartości takich parametrów jak: krok przestrzenny Δx , m, oraz krok czasowy Δt , s. Wartość tych parametrów została tak przyjęta, aby spełniony był warunek stabilności metody – liczba Couranta $Cr \leq 1$. Na ryc. 5 i ryc. 6. zostało przedstawione porównanie wyników pomiarów z wynikami symulacji numerycznych wykonanych klasyczną metodą charakterystyk ze stałą siatką węzłów (MCH). Analizując wykresy obrazujące porównanie można zauważyć, że wyniki nie pokrywają się ze sobą.

Analizując wykresy przedstawione na ryc. 4 i ryc. 5, można zauważyć, że wyniki obliczeń i pomiarów nie pokrywają się ze sobą. W przypadku przewodu stalowego można dostrzec, iż tłumienie fali ciśnienia jest niewystarczające, w rezultacie wyniki symulacji metodą charakterystyk są niezgodne z wynikami pomiarów. Fala ciśnienia dla przewodu stalowego wykazuje szybkie tłumienie i wygładzanie, zanikając już po 4, 5 sekundach, co



Ryc. 5. Porównanie pomiarów z wynikami symulacji numerycznych metodą charakterystyk (MCH) dla przewodu z polietylenu wysokiej gęstości

Fig. 5. Comparison measurements with the results of numerical simulations method of characteristics (MCH) for high-density polyethylene pipe



Ryc. 6. Porównanie pomiarów z wynikami symulacji numerycznych metodą charakterystyk (MCH) dla przewodu ze stali ocynkowanej

Fig. 6. Comparison measurements with the results of numerical simulations method of characteristics (MCH) for galvanized steel pipe

nie występuje w przypadku obliczeń, w których tłumienie jest niewystarczające, a amplituda fali jest redukowana wolniej. Niezgodność pomiędzy obserwowanymi a obliczonymi wartościami ciśnienia z wykorzystaniem klasycznego układu równań (1) i (2) dla przewodów z tworzywa sztucznego pokazuje jednoznacznie, że konieczne jest uwzględnienie w równaniach własności viskoelastycznych tego materiału [Covas i inni, 2005]. Wynika to z faktu, że w układzie równań uderzenia hydraulicznego zakłada się, iż przewód jest elastyczny, sprężyste odkształcalny zgodnie z prawem Hooke’a, a ciecz jest ściśliwa. Założenie to jest poprawne w przypadku materiałów sprężystych takich jak stal, ale nie odnosi się do tworzyw sztucznych, gdyż są to materiały o właściwościach viskoelastycznych, a zachowanie takich materiałów pod wpływem naprężenia jest zależne także od czasu i historii naprężeń. Podczas zjawiska uderzenia hydraulicznego dla takich materiałów można zaobserwować osłabienie maksymalnej i minimalnej wartości ciśnienia oraz wzrost dyspersji fali ciśnienia. Związane jest to z zachowaniem polimerów pod wpływem naprężenia, które wynika z ich charakterystycznej budowy. Każda z molekuł ma postać elastycznej nici i może nieustannie zmieniać kształt, związać się i skręcać, zmieniając energię [Ferry 1965]. Wszystko to powoduje, że efekt viskoelastyczny każdej z molekuł wpływa na odkształcenia w materiale, które są bardziej skomplikowane do opisanie. Sprawia to, że zachowanie tworzyw sztucznych jest zupełnie inne niż elastycznych materiałów takich jak stal. Polimery są materiałami, które wykazują złożone własności zbliżone zarówno do cieczy, jak i ciał stałych, przez co w jednych z nich przeważają cechy sprężyste, w innych cechy dyssypatywne związane z zjawiskiem „płynięcia” w materiale. Materiały o takich właściwościach z powodu swoich złożonych własności mechanicznych wymagają stosowania nowych rodzajów równań konstytutywnych.



Podsumowując można, jednoznacznie stwierdzić, że materiał z jakiego wykonany jest rurociąg ma istotny wpływ na proces tłumienia i wygładzania fali ciśnienia w trakcie przepływu nieustalonego w przewodach pod ciśnieniem. Rodzaj materiału wpływa na charakterystyczne parametry fali ciśnienia takie jak jej prędkość, okres czy maksymalny przyrost ciśnienia. Ponadto porównując wartości tych parametrów wyznaczonych doświadczalnie i teoretycznie zauważyć można znaczne różnice, szczególnie duże dla maksymalnego przyrostu ciśnienia, który jest istotny przy projektowaniu instalacji sanitarnych. Materiał z jakiego zbudowany jest rurociąg wpływa także na sam kształt fali ciśnienia, który jest charakterystyczny dla danego materiału i zależy od jego specyficznych właściwości. Porównanie wyniki pomiarów i symulacji numerycznych również pokazuje, że wyniki nie pokrywają się. Ma to związek z faktem, iż układ równań opisujący uderzenie hydrauliczne nadal nie oddaje w pełni charakteru tego zjawiska, co szczególnie widać w przypadku przewodów o własnościach wiskoelastycznych.

PIŚMIENNICTWO

- Chaudhry, M.H. (1979). Applied hydraulic Transients. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Covas, D., Stoianov, I., Mano, J.F., Ramos, H., Graham, N., Maksimovic, C. (2005). The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part II – model development, calibration and verification. *J. Hydraulic Res.*, 43(1), 56–70.
- Ferry, J.D. (1965). Viscoelastic Properties of Polymers. John Wiley & Sons, New York.
- Mitosek, M. (2007). *Mechanika płynów w Inżynierii i Ochronie Środowiska*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Niełacny, M. (2003). *Uderzenie hydrauliczne w przewodach wodociągowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Szymkiewicz, R. (2006). *Metody badania dyfuzji i dyspersji numerycznej w rozwiązaniach równań hydrodynamiki*. Wydawnictwo PG, Gdańsk.
- Szymkiewicz, R., Mitosek, M. (2014, January). Alternative convolution approach to friction in unsteady pipe flow. *J. Fluids Engineer.*, 136(1).
- Weinerowska-Bords, K. (red.) (2004). *Laboratorium z mechaniki płynów i hydrauliki*. Wydawnictwo PG, Gdańsk.
- Wichowski, R. (2002). *Wybrane zagadnienia przepływu w sieci wodociągowej pierścieniowej*. Wydawnictwo PG, Gdańsk.
- Wylie, E.B., Streeter, V.L. (1987). *Fluid Transients*. McGraw-Hill, New York.

COMPARATIVE ANALYSIS PROCESSES OF DAMPING AND SMOOTHING PRESSURE WAVES DURING TRANSIENT FLOW IN PIPES MADE OF DIFFERENT MATERIALS

Abstract. The water hammer problem is considered as one of the most important questions of unsteady flows in pipelines therefore, it is still a subject of research for many scientists. This phenomenon may be studied on two levels: practical and theoretical. The paper presents results of an experimental and theoretical study of the transients flow in pressurized pipe. Experimental tests have been conducted on the test bench of transient flow, operating in the Hydraulics Laboratory of the Department of Civil and Environmental



Engineering University of Gdansk. The study consisted the pressure measurements at characteristic points of tested pipe during the pressure wave propagation. Measurements were carried out with a pipe made of high density polyethylene and galvanized steel. Based on the measurements and calculations have been also compared characteristic parameters of the pressure wave. The article also shows the numerical results for classical method of characteristics. Comparing the results of measurements and numerical simulations it is clear that the results obtained through the solving classic system of equations is significantly different from the measurement results. It appears that the damping of pressure wave in pipe goes in a substantially different way, and is influenced by the many factors, including material of the pipe. The propagation of the pressure wave goes in a particularly complex way in the case of pipelines with different material characteristics.

Keywords: transient flow in pipes, water hammer, dumping and smoothing of the pressure wave, numerical diffusion, numerical dispersion

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.12.2016

Do cytowań – For citation: Gietka, N.K. (2016). Analiza porównawcza procesów tłumienia i wygładzania fali ciśnienia w trakcie nieustalonego przepływu w rurociągach wykonanych z różnych materiałów. Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 15(4), 153–166.