

Apoloniusz Kodura

## Wpływ długości przewodu za zaworem kulowym na parametry uderzenia hydraulicznego w rurociągu z polietylenu o dużej gęstości

Podczas projektowania instalacji ciśnieniowych – zwłaszcza wodnych – niezbędne jest wykonanie obliczeń hydraulicznych dotyczących zadanych stanów eksploatacyjnych, w których zazwyczaj przyjmowane są warunki ruchu ustalonego lub *quasi*-ustalonego. Znacznie mniej uwagi poświęca się natomiast przepływowi nieustalonemu, którego typowym przykładem jest uderzenie hydrauliczne, wywołane gwałtowną zmianą prędkości przepływu cieczy. Bezpośrednimi czynnikami sprzyjającymi wywołaniu zjawiska uderzenia hydraulicznego są układy pompowe (ich gwałtowne załączanie i wyłączanie), szybkosprawną armaturą odcinającą, systemy automatycznej regulacji oraz awarie armatury (zasuwę płaskie i nożowe) [1, 2]. Jedną z powszechnie stosowanych i zalecanych do stosowania metod ograniczania skutków wystąpienia potencjalnego uderzenia hydraulicznego jest wydłużenie czasu zamykania różnego rodzaju zasuw, szczególnie w rejonie pomp i pompowni, gdzie zjawisko to występuje najczęściej [2–4]. Szerokie spektrum czynników inicjujących oraz oddziałujących na to zjawisko utrudnia opracowanie jego opisu matematycznego i fizycznego [1, 5, 6]. Uderzenie hydrauliczne jest zjawiskiem niepożądanym w przewodach ciśnieniowych, gdyż wytwarza falę uderzeniową o znaczących wartościach przyrostu ciśnienia oraz dużej częstotliwości, co sprzyja powstawaniu awarii elementów armatury oraz zaburzeniom w procesie transportu cieczy [2, 3]. Dane literaturowe wskazują, że ponad 80% awarii ciśnieniowych systemów wodociągowych, w sieciach niezabezpieczonych przed skutkami uderzenia hydraulicznego, spowodowane jest oddziaływaniem uderzeń hydraulicznych. Chociaż zjawisko to jest ogólnie niepożądane, znane są także metody jego wykorzystywania, na przykład do wyznaczania lokalizacji nieszczelności w przewodach ciśnieniowych [7].

Pojęcie uderzenia hydraulicznego pojawia się w literaturze naukowej w XIX w. [1–3] z uwzględnieniem podziału na dwie grupy – proste uderzenie hydrauliczne (*rapid water hammer*) oraz złożone (*slow water hammer*) [1, 2, 8]. Pojęcie uderzenia prostego odnosi się do sytuacji, gdy czas zamykania zaworu jest krótszy od czasu powrotu fali odbitej, natomiast uderzenie złożone opisuje sytuację, gdy czas zamykania zaworu jest dłuższy od czasu powrotu fali odbitej. Zagadnienie uderzenia prostego doczekało się szeregu

rozwiązań i modeli matematycznych [5, 9, 10], z których zdecydowana większość zajmuje się opisem układu powyżej lub poniżej zaworu inicjującego to zjawisko. Uderzenie złożone (nieproste) analizowane jest natomiast w mniejszym stopniu, między innymi ze względu na złożony przebieg oraz mniejsze wartości zmian ciśnienia [3, 11].

### Podstawowe równania opisujące uderzenie hydrauliczne

W praktyce inżynierskiej stosowana jest jedna z najstarszych formuł – wzór Żukowskiego-Allievi'ego, określający pierwszy maksymalny przyrost ciśnienia ( $\Delta p$ ) w uderzeniu prostym [1, 2]:

$$\Delta p = \Delta v \rho a \quad (1)$$

w którym:

$\Delta v$  – zmiana prędkości przepływu, m/s

$\rho$  – gęstość cieczy, kg/m<sup>3</sup>

$a$  – prędkość przemieszczania się fali uderzeniowej, m/s

Pojęcie uderzenia dodatniego stosuje się do określenia zjawiska będącego skutkiem zatrzymania płynącego strumienia cieczy. Jeśli podczas tego zjawiska występuje przyspieszanie strumienia, wówczas określa się je mianem uderzenia ujemnego. Podczas uderzenia dodatniego, przy całkowitym zatrzymaniu przepływu ( $\Delta v = v_0$ ), przyrost ciśnienia osiąga wartość maksymalną. Prędkość przemieszczania się fali uderzeniowej ( $a$ ) wyraża związek czasu powrotu fali odbitej i długości przewodu w postaci [1, 2]:

$$a = 2L/T_R \quad (2)$$

w której:

$L$  – długość przewodu, m

$T_R$  – czas powrotu fali odbitej, s

Za pomocą równania (2) można dokonać klasyfikacji uderzeń na proste – gdy proces zamykania zaworu zakończy się przed powrotem fali odbitej i złożone, gdy zamykanie zaworu trwa dłużej. W przypadku uderzenia prostego czas zamykania zaworu ( $T_c$ ) i czas powrotu fali odbitej ( $T_R$ ) spełniają zależność:

$$T_c < T_R \quad (3)$$

Jeśli czas zamykania zaworu jest dłuższy od okresu fali, wówczas do zaworu powraca fala odbita o przeciwnym znaku i ogranicza przyrost ciśnienia wywoływany jego zamykaniem.

## Analiza złożonego uderzenia hydraulicznego

Przy omawianiu zjawiska uderzenia hydraulicznego ważną kwestią jest relacja czasu wystąpienia zmiany prędkości przepływu do czasu powrotu fali odbitej. W rozważaniach inżynierskich stosowana jest formuła Michauda [12], która nie znajduje potwierdzenia w badaniach doświadczalnych [13]:

$$\Delta p = 2\rho v_o L / T_c \quad (4)$$

w której:

$v_o$  – prędkość w ruchu ustalonym, poprzedzającym zjawisko uderzenia hydraulicznego, m/s

Metoda zaproponowana przez Wooda i Jonesa polega na wprowadzeniu nowych parametrów charakteryzujących zjawisko uderzenia hydraulicznego – bezwymiarowego przyrostu ciśnienia i bezwymiarowego czasu zamykania zaworu [2, 14]. Bezwymiarowy przyrost ciśnienia określany jest jako stosunek maksymalnego przyrostu ciśnienia do przyrostu w danym czasie zamykania zaworu:

$$\Delta p_m = \Delta p_{maks} / (\Delta v \rho a) \quad (5)$$

w którym:

$\Delta p_m$  – maksymalny bezwymiarowy przyrost ciśnienia

$\Delta p_{maks}$  – maksymalny przyrost ciśnienia, Pa

Bezwymiarowy czas zamykania zaworu ( $t_c$ ) wyrażony jest natomiast relacją czasu jego zamykania i czasu powrotu fali odbitej [14]:

$$t_c = T_c a / (2L) \quad (6)$$

Wprowadzenie bezwymiarowych parametrów czasu i ciśnienia pozwoliło na porównanie różnych charakterystyk zmian ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego. Ważnym aspektem metody Wooda i Jonesa jest wprowadzenie parametru  $\alpha$ , charakteryzującego typ zaworu (kulowy, zasuwka płaska, iglicowy, przepustnica itp.) w postaci [14]:

$$\alpha = g h_o / \Delta v a \quad (7)$$

w której:

$h_o$  – strata ciśnienia podczas przepływu cieczy przez zawór podczas przepływu ustalonego, tuż przed wywołaniem uderzenia hydraulicznego, mH<sub>2</sub>O

$\Delta v$  – zmiana prędkości przepływu, m/s

Obliczenie przyrostu ciśnienia z wykorzystaniem metody Wooda i Jonesa polega na obliczeniu wartości współczynnika  $\alpha$  w przypadku danego zaworu, następnie wyznaczeniu wartości bezwymiarowego czasu zamykania i dalej na podstawie charakterystyk  $\alpha$  określeniu wartości maksymalnego przyrostu ciśnienia.

Równanie (7) wprowadza do analizy zjawiska opór hydrauliczny występujący podczas przepływu cieczy przez zawór. Możliwe jest zatem przeanalizowanie zjawiska ruchu nieustalonego jako przepływu przez otwór zatopiony. Przyjmując taki schemat można stwierdzić, że wartość wydatku jest efektem różnicy ciśnień. Analizując proces zamykania zaworu, jako sekwencję jego kolejnych niewielkich przysięgnięć, można przyjąć hipotezę, że każdorazowe przysięgnięcie zaworu wywołuje nową różnicę ciśnień, która pociąga za sobą chwilową zmianę prędkości cieczy. Z jednej strony przysięgnięcie zaworu uzyskuje się zwiększenie oporu w przekroju zamknięcia, zaś z drugiej rosnąca różnica ciśnień wywołuje chwilowy i lokalny wzrost prędkości cieczy. Jeśli ta hipoteza jest prawdziwa, wówczas

spodziewany jest wpływ długości przewodu poniżej zaworu na przebieg zjawiska uderzenia hydraulicznego. Jednakże w celu weryfikacji tej hipotezy niezbędne jest wykonanie badań eksperymentalnych. Pewne podobieństwa do tej hipotezy można odnaleźć w metodzie Sharpa [15]. Wychoząc z równania Torricellego:

$$v = b\sqrt{h} \quad (8)$$

w którym:

$v$  – chwilowa prędkość przepływu, m/s

$h$  – chwilowa wartość strat ciśnienia podczas przepływu przez zawór, mH<sub>2</sub>O

$b$  – parametr zaworu, m<sup>1/2</sup>/s

Sharp definiuje parametr  $b$  w postaci następującej zależności [16, 17]:

$$b = \frac{\sqrt{2gC_d A_v}}{A_p} \quad (9)$$

w której:

$C_d$  – chwilowy współczynnik wydatku w polu przekroju zaworu ( $A_v$ )

$A_p$  – pole przekroju przewodu, m<sup>2</sup>

Prędkość przepływu cieczy w przekroju zamykanego zaworu opisana jest równaniem, w którym indeks 1 określa parametry pełnego otwarcia zaworu [16, 17]:

$$v = \frac{\beta v_1 \sqrt{h}}{\sqrt{h_1}} \quad (10)$$

natomiast współczynnik  $\beta$  jest stosunkiem iloczynu chwilowej wartości współczynnika wydatku otworu (zamknięcia) i chwilowego pola przekroju zamykanego zaworu do iloczynu obu wartości w stanie całkowitego otwarcia [16, 17]:

$$\beta = \frac{b}{b_1} = \frac{C_d A_v}{C_{d1} A_{v1}} \quad (11)$$

Ostatecznie wartość chwilowej prędkości przepływu cieczy przez zawór można opisać w postaci następującej zależności [15, 17]:

$$v_n = \beta_n K \sqrt{Y_n} \quad (12)$$

w której:

$v_n$  – chwilowa prędkość przepływu cieczy przez zawór przy danym stopniu zamknięcia, m/s

$Y_n$  – chwilowa wartość ciśnienia powodującego przepływ cieczy przez zawór, Pa

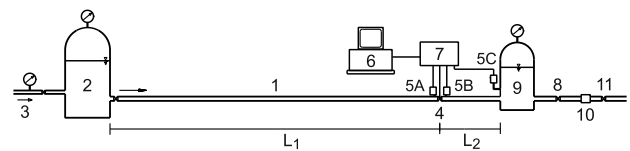
Wartości współczynników niezbędnych do określenia chwilowych parametrów przepływu –  $C_d$  oraz  $\beta$  – przyjmowane są na podstawie krzywych uwzględniających wpływ charakterystyki zaworu na przebieg uderzenia hydraulicznego, wartości chwilowego pola przekroju zamykanego zaworu i lokalnych strat energii [15, 17]. Podobnie jak w przypadku metody Wooda i Jonesa, zjawisko uderzenia hydraulicznego analizowane jest przez pryzmat wpływu zamykania zaworu. Problemem jest jednak określenie chwilowych parametrów oporów w przekroju zaworu.

Należy podkreślić, że analiza zjawiska uderzenia hydraulicznego odnosi się do klasycznego układu – zbiornik-przewód-zawór. W praktyce za zaworem odcinającym znajduje się przewód odprowadzający o pewnej długości. Podczas zamykania, w odcinku powyżej zaworu wywoływane jest zjawisko uderzenia dodatniego, a poniżej ujemnego. Zamykanie zaworu wywołuje więc wzrost ciśnienia w przekroju powyżej, a spadek ciśnienia w przekroju tuż

poniżej zaworu. Tym samym przekrój zamknięcia charakteryzuje się zmienną w czasie różnicą ciśnień podczas ruchu nieustalonego. Ponieważ zjawisko przepływu nieustalonego jest zjawiskiem falowym, proces zamykania zaworu wywołuje dwie różne fale ciśnienia o przeciwnych początkowo amplitudach, przy czym okres fali jest wynikiem prędkości rozprzestrzeniania się zaburzenia oraz długości przewodu. Uwzględniając wcześniejsze analizy, można postawić hipotezę o wpływie długości przewodu za zaworem na przebieg uderzenia hydraulicznego, której sprawdzenie jest możliwe na drodze eksperymentalnej.

## Badania doświadczalne

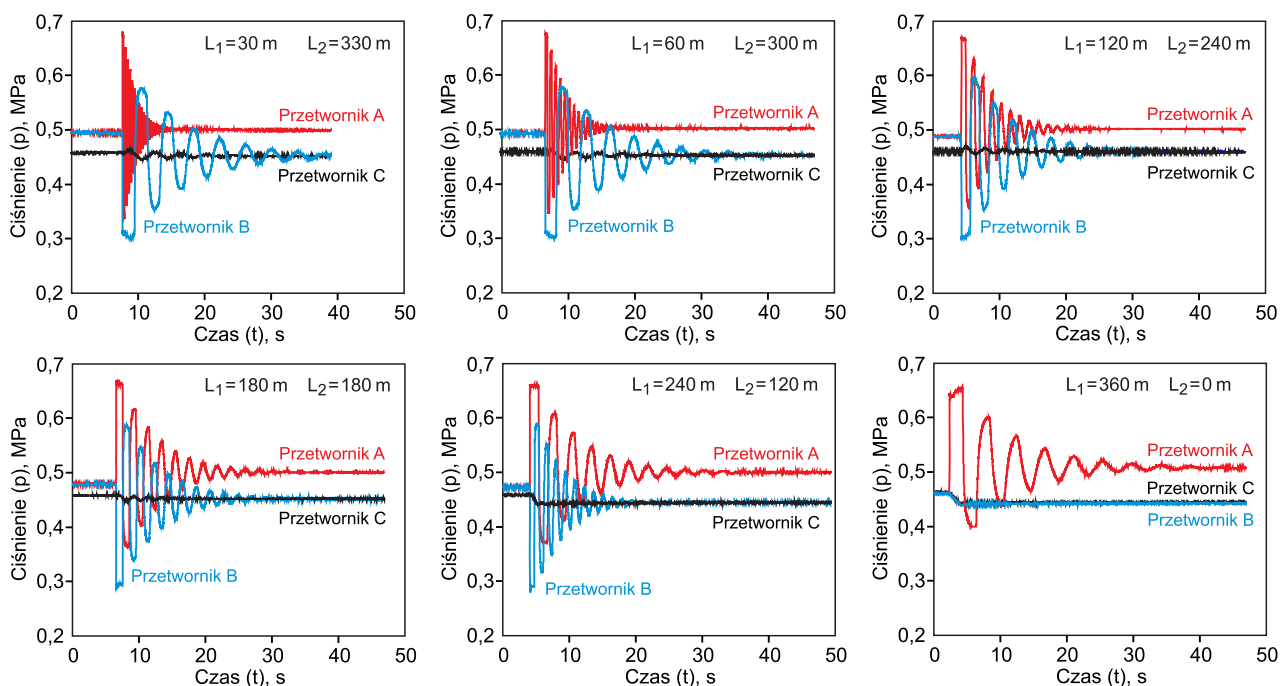
W celu sprawdzenia wpływu długości przewodu na parametry uderzenia hydraulicznego zostało zbudowane stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawiono na rysunku 1. Składało się ono z dwóch zbiorników hydroforowych – początkowego (2) o stałym ciśnieniu, zasilanego z sieci wodociągowej (3) i końcowego (9). Hydrofor był połączony przewodem (1) z polietylenu o dużej gęstości (HDPE) o średnicy zewnętrznej 40 mm, grubości ścianki 2,4 mm, chropowatości  $k=0,05$  mm i długości całkowitej 360 m, która była sumą długości odcinków przed ( $L_1$ ) i za ( $L_2$ ) zaworem kulowym z rejestracją czasu zamykania (4), który służył do wywoływania uderzenia hydraulicznego. Stanowisko było wyposażone w przetworniki ciśnienia zlokalizowane w trzech przekrojach – przed zaworem (5A), za zaworem (5B) oraz w hydroforze na wyjściu (5C). Próbkowanie przetworników ciśnienia odbywało się z częstotliwością 2 kHz. Zastosowano przetworniki o zakresie pomiarowym od  $-0,1$  MPa do  $1,2$  MPa i niepewności pomiarowej 0,5%, charakteryzujące się liniową zależnością pomiędzy wartością mierzoną a rejestrowanym ciśnieniem w całym zakresie, ze współczynnikiem korelacji  $R \geq 0,999$ . Zestaw składający się z karty analogowo-cyfrowej (7) podłączonej do komputera (6) pozwalał na rejestrację charakterystyk



Rys 1. Schemat stanowiska pomiarowego  
Fig 1. Scheme of experimental setup

ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego. Znajdujący się na końcu zawór regulacyjny (8) służył do ustalenia wartości przepływu wody w ruchu ustalonym. Stanowisko było wyposażone w przepływomierz elektromagnetyczny (10), pozwalający na regulację przepływu w warunkach ruchu ustalonego oraz zamek wodny na końcu (11) chroniący układ przed zapowietzeniem.

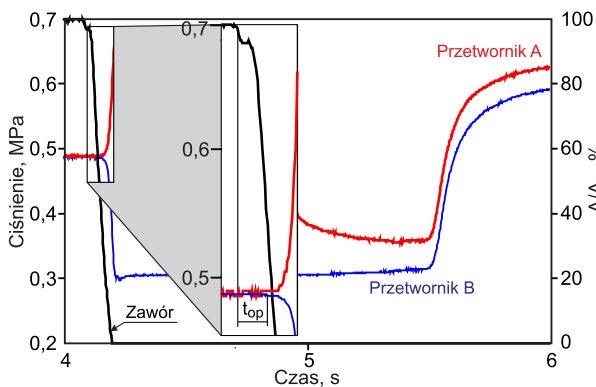
Podczas eksperymentu dokonywano rejestracji charakterystyk ciśnienia oraz zamykania zaworu przy różnych czasach zamykania. Zawór odcinający zlokalizowany był w kilku przekrojach na długości przewodu. Tym samym możliwe było przeanalizowanie przebiegu zjawiska przy różnych proporcjach długości przewodu przed i za zaworem. Warunki ruchu ustalonego – ciśnienie w hydroforach oraz prędkość przepływu – były porównywalne we wszystkich seriach pomiarowych. Przykładowe pomierzone charakterystyki fali ciśnienia przedstawiono na rysunku 2. Linia opisana nazwą „przetwornik A” odzwierciedla charakterystykę ciśnienia w przekroju przed zaworem, „przetwornik B” – za zaworem, a „przetwornik C” – w hydroforze na końcu przewodu. Zmiany ciśnienia w hydroforze na końcu były skutkiem wpływania poszczególnych porcji wody do zbiornika podczas uderzenia hydraulicznego w drugim odcinku przewodu. Wraz ze skracaniem odcinka poniżej zaworu, zmniejszała się jego objętość i tym samym rosła zdolność rozpraszania energii przez hydrofor końcowy. Doświadczenia wykonywano przy różnych czasach zamykania i następujących proporcjach długości przewodów przed i za zaworem ( $L_1/L_2$ ): 30 m/330 m, 60 m/300 m, 120 m/240 m, 180 m/180 m, 240 m/120 m oraz 360 m/0 m.



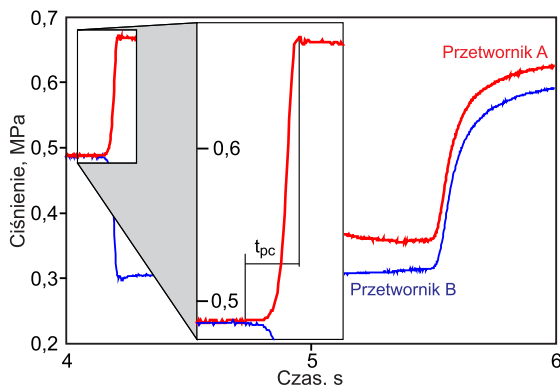
Rys. 2. Przykładowe zmierzone charakterystyki ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego przy prędkości przepływu wody w ruchu ustalonym równej 0,5 m/s

Fig. 2. Exemplary measured pressure characteristics during the water hammer for a steady-state water flow velocity of 0.5 m/s

Analiza wyników pomiarowych polegała na wyznaczeniu wartości klasycznych parametrów charakterystycznych – przyrostu ciśnienia, czasu powrotu fali odbitej, czasu zamykania oraz prędkości rozprzestrzeniania się zaburzenia. Dodatkowo dokonano analizy pierwszej fazy przyrostu ciśnienia. Zbliżenie na pierwszą fazę zmian ciśnienia pozwoliło na stwierdzenie pewnej prawidłowości – zmiany ciśnienia były rejestrowane z pewnym opóźnieniem w stosunku do rozpoczęcia procesu zamykania zaworu. Fakt ten mógł świadczyć o podtrzymywaniu przepływu przez zawór w pierwszej fazie przymknięcia. Dopiero znaczne przymknięcie zaworu powodowało wywołanie fali ciśnienia. Do analizy zjawiska wprowadzone zostało nowe pojęcie – opóźnienie ( $t_{op}$ ), rozumiane jako różnica czasu pomiędzy rozpoczęciem procesu zamykania zaworu a pojawieniem się zmiany ciśnienia. Na rysunku 3 zamieszczono przykładowy sposób odczytania tej wartości. Należy podkreślić, że zarówno przyrost, jak i spadek ciśnienia rozpoczynał się w tym samym momencie. Drugim nowym parametrem wprowadzonym do analizy zjawiska był czas przyrostu ciśnienia ( $t_{pc}$ ), który został zdefiniowany jako przesunięcie czasowe pomiędzy rozpoczęciem przyrostu ciśnienia a osiągnięciem jego wartości maksymalnej (rys. 4). Wartości obu parametrów zostały określone w przypadku każdej z zarejestrowanych charakterystyk. W kolejnym kroku dokonano zbiorczych zestawień uzyskanych wyników w formie wykresów.

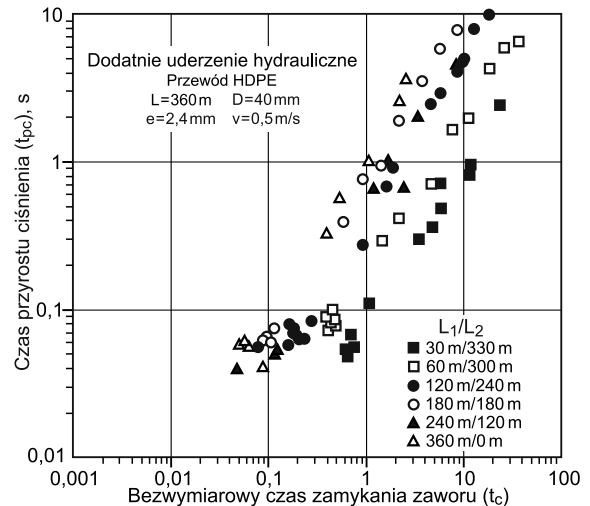


Rys. 3. Zbliżenie na pierwszą fazę – czas opóźnienia ( $t_{op}$ ) (różnica czasu między rozpoczęciem procesu zamykania zaworu – linia „Zawór” a początkiem przyrostu ciśnienia – linia „Przetwornik A”)  
Fig. 3. A close-up view of the first phase – delay time ( $t_{op}$ ) (time difference between the start of valve closure – line “Zawór” and the start of pressure increase – line “Przetwornik A”)



Rys. 4. Zbliżenie na pierwszą fazę – czas przyrostu ciśnienia ( $t_{pc}$ ) (przesunięcie czasowe pomiędzy rozpoczęciem przyrostu ciśnienia a maksymalnym ciśnieniem – linia „Przetwornik A”)  
Fig. 4. A close-up view of the first phase – time of pressure increase ( $t_{pc}$ ) (time shift between the start of pressure increase and the maximum pressure – line “Przetwornik A”)

Na rysunku 5 zamieszczono zależność między bezwymiarowym czasem zamykania zaworu (stosunek czasu zamykania do czasu powrotu fali odbitej) a czasem przyrostu ciśnienia. Na wykresie tym naniesiono punkty uzyskane w każdej serii pomiarowej, wyróżniając poszczególne proporcje długości przewodu przed i za zaworem. Bezwymiarowy czas zamykania zaworu został odniesiony do odcinka przewodu powyżej zaworu.

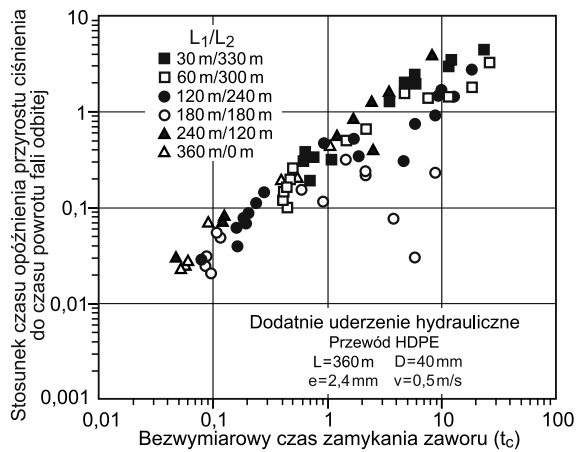


Rys. 5. Zależność między bezwymiarowym czasem zamykania zaworu a czasem przyrostu ciśnienia

Fig. 5. Relationship between the dimensionless valve closure time and the time of pressure increase

Otrzymane rezultaty wskazały na występowanie zależności pomiędzy długością przewodu poniżej zaworu a analizowanymi parametrami. W przypadku zadanego bezwymiarowego czasu zamykania, najdłuższe czasy przyrostu ciśnienia odpowiadały zerowej długości przewodu poniżej zaworu. Wraz z wydłużeniem długości przewodu za zaworem, czasy przyrostu ciśnienia były odpowiednio krótsze. Zależność ta występowała zarówno w przypadku uderzenia prostego (bezwymiarowy czas zamykania mniejszy od 1), jak i złożonego. Najkrótsze czasy charakteryzowały przewód o znacznej długości poniżej zaworu. Wyjątkiem od tej reguły były wartości uzyskane w przypadku zaworu zlokalizowanego w połowie długości przewodu. Czas przyrostu ciśnienia był długi i prawie porównywalny z wartościami, kiedy zawór był umieszczony na końcu przewodu. W przypadku analogicznych długości przewodów przed i za zaworem obie fale znajdowały się w przeciwfazie, czego efektem była niezmienna różnica ciśnień przed i za zaworem, co sprzyjało długiemu przyrostowi ciśnienia. W pozostałych przypadkach niezgodność fazy powyżej i poniżej zaworu zaburzała przebieg zjawiska i skracala czas przyrostu ciśnienia. Najkrótsze czasy wystąpiły w przypadku najdłuższego odcinka przewodu poniżej zaworu.

Na rysunku 6 naniesiono charakterystyczne wartości uzyskane z pomiarów – związek między bezwymiarowym czasem zamykania zaworu a stosunkiem czasu opóźnienia przyrostu ciśnienia do czasu powrotu fali odbitej. Widoczne było wyraźne rozgraniczenie pomiędzy uderzeniem prostym a złożonym – w przypadku uderzenia prostego najdłuższe czasy opóźnienia charakteryzowały zawór zlokalizowany na końcu przewodu, a najkrótsze – w połowie długości przewodu. Podczas uderzenia złożonego najdłuższe czasy opóźnienia charakteryzowały skrajne położenia zaworu – blisko początku lub końca przewodu. Najkrótsze i jednocześnie najbardziej zmienne były natomiast czasy

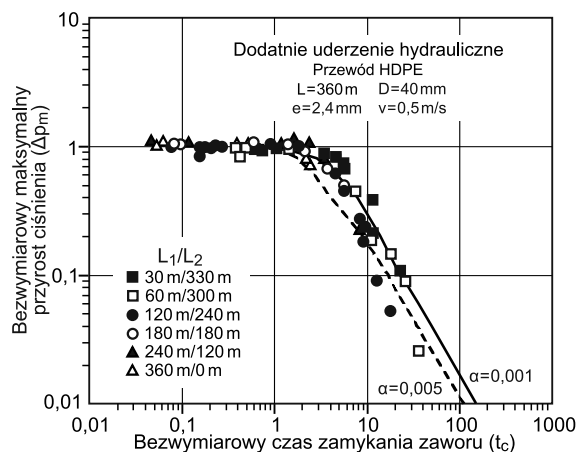


Rys. 6. Zależność między bezwymiarowym czasem zamykania zaworu a stosunkiem czasu opóźnienia przyrostu ciśnienia do czasu powrotu fali odbitej

Fig. 6. Relationship between the dimensionless valve closure time and the ratio of the delay time in pressure increase to the time of the reflected wave return

w przypadku zaworu zlokalizowanego w połowie przewodu. Analiza wykresu wykazała silny wpływ zmian ciśnienia powyżej i poniżej zaworu na przebieg zjawiska uderzenia hydraulicznego. W przypadku uderzenia prostego (bezwymiarowy czas zamykania zaworu był mniejszy bądź równy jedności), najdłuższy czas opóźnienia obserwowano w seriach pomiarowych, w których długość przewodu powyżej różniła się znacznie od długości przewodu poniżej zaworu. Świadczyło to o istotnym wpływie chwilowej różnicy ciśnień przed i za zaworem na wywołanie zjawiska uderzenia hydraulicznego. W przypadku znacznej różnicy długości przewodu wykonanego z tego samego materiału, uderzenie hydrauliczne w obu odcinkach charakteryzowało się różnymi prędkościami rozprzestrzeniania się zaburzenia. W efekcie następowało nakładanie się fal o różnych fazach, co wydłużało cały proces.

Dokonano także porównania pomierzonych charakterystyk ciśnienia z wartościami wyznaczonymi za pomocą metody Wooda i Jonesa. Na rysunku 7 zamieszczono wyniki pomiarów w formie związku między bezwymiarowym czasem zamykania zaworu (stosunek czasu zamykania do czasu powrotu fali odbitej) a bezwymiarowym przyrostem ciśnienia (stosunek zarejestrowanego przyrostu ciśnienia do wartości maksymalnej obliczonej ze wzoru Żukowskiego-Allieviego). Na wykresie wartości bezwymiarowego



Rys. 7. Porównanie wyników pomiarów z charakterystykami według Wooda i Jonesa w przypadku przewodu z HDPE  
Fig. 7. Comparison of the measurement results with the characteristics by Wood and Jones for HDPE pipeline

czasu zamykania mniejsze i równe 1 opisywały uderzenie proste, natomiast pozostałe wartości były związane z wydłużeniem procesu zamykania i odnosiły się do uderzenia złożonego.

Liniami ciągłymi zaznaczono charakterystyki zaworu kulowego, wyznaczone zgodnie z metodą Wooda i Jonesa, na podstawie pomierzonej różnicy ciśnień w ruchu ustalonym. Dwie charakterystyki zaworu ( $\alpha$ ) zamieszczone na wykresie opisywały ekstremalne punkty obliczone na podstawie danych doświadczalnych. Na wykresie naniesiono punkty uzyskane z bezpośredniej analizy charakterystyk pomiarowych, zaznaczając oddzielnie zbiory reprezentujące odpowiednie proporcje długości przewodu. W zakresie bezwymiarowego czasu zamykania zaworu nie większego niż 2, przyrosty ciśnienia we wszystkich przypadkach były porównywalne i równe wartości przyrostu maksymalnego. Oznaczało to, że wydłużenie czasu zamykania do podwojonej wartości czasu powrotu fali odbitej nie powodowało zmniejszenia uzyskanych przyrostów ciśnienia i w tym zakresie pomierzone przyrosty ciśnienia odpowiadały wartościom obliczonym ze wzoru Żukowskiego-Allieviego. W celu uzyskania zmniejszenia przyrostów ciśnienia niezbędne było znaczne wydłużenie czasu zamykania zaworu. Wraz z wydłużaniem czasu zamykania wzmocnieniu ulegał wpływ długości przewodu za zaworem. Najszybciej ograniczeniu ulegały przyrosty ciśnienia w krótkich przewodach za zaworem. Wraz z wydłużaniem się odcinka za zaworem, malała intensywność spadku ciśnienia. Przy analogicznych bezwymiarowych czasach zamykania zaworu, różnice w osiągniętych przyrostach ciśnienia sięgały 40%.

## Podsumowanie

Analiza literaturowa oraz wykonane badania eksperymentalne potwierdziły wpływ lokalizacji zaworu na parametry uderzenia hydraulicznego. Zamykanie zaworu było czynnikiem inicjującym uderzenie hydrauliczne dodatnie przed zaworem i jednocześnie uderzenia ujemne za zaworem. Różne proporcje długości przewodów prowadziły do nakładania się faz o różnych znakach i częstotliwościach. Fakt ten znalazł odzwierciedlenie w mniejszym wpływie wydłużenia czasu zamykania zaworu na spadek przyrostów ciśnienia. Zaobserwowana prawidłowość dotyczyła układów, w których długość przewodu za zaworem była znacznie większa niż przed nim. Rzeczywiste przyrosty ciśnienia były do 20% większe niż obliczone za pomocą metody Wooda i Jonesa. Wyniki eksperymentalne wykazały, że w celu obniżenia przyrostów ciśnienia niezbędne było co najmniej 3-krotne wydłużenie czasu zamykania zaworu w stosunku do czasu powrotu fali odbitej. Przy krótszych czasach przyrosty ciśnienia były porównywalne z uderzeniem prostym.

Długość przewodu za zaworem wpływała istotnie na skrócenie czasu przyrostu ciśnienia – najdłuższy czas rejestrowano w przypadku zaworu zlokalizowanego na końcu przewodu. Wzrost długości przewodu za zaworem przekładał się na skrócenie czasu przyrostu ciśnienia. Wyjątkiem była sytuacja, gdy zawór zlokalizowano w połowie długości – wówczas czas przyrostu ciśnienia był nieznacznie krótszy od wartości uzyskanej w przypadku zaworu zlokalizowanego na końcu przewodu. Długość przewodu za zaworem wpływała także na opóźnienie przyrostu ciśnienia. W przypadku tej samej długości przewodu przed i za zaworem opóźnienia przyrostu ciśnienia były najmniejsze. Najdłuższe czasy opóźnienia zaobserwowano w skrajnych położeniach zaworu – blisko początku lub końca przewodu.

## LITERATURA

1. S. MAMBRETTI: Water Hammer Simulations. WIT Press, Southampton 2014.
2. A. R. D. THORLEY: Fluid Transients in Pipeline Systems: A Guide to the Control and Suppression of Fluid Transients in Liquids in Closed Conduits. ASME Press, New York 2004.
3. M. NIEŁACNY: Uderzenia hydrauliczne w systemach wodociągowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.
4. D. KOWALSKI, A. CHOMA: Propozycja metody zabezpieczenia pomp odśrodkowych przed skutkami uderzenia hydraulicznego. *Gaz Woda i Technika Sanitarna* 2016, nr 4, ss. 418–423.
5. M. MITOSEK, R. SZYMKIEWICZ: Influence of reservoir on pressure wave propagation in steel pipes. *Journal of Hydraulic Engineering* 2016, Vol. 142, No. 8, pp. 1–5.
6. A. KODURA, P. STEFANEK, K. WEINEROWSKA-BORDS: An experimental and numerical analysis of water hammer phenomenon in slurries. *Journal of Fluids Engineering* 2017, Vol. 139, No. 12, pp. 1–9.
7. K. MISZTA-KRUK: Wykorzystanie krótkotrwałych stanów przejściowych w sieciach wodociągowych do wykrywania wycieków wody (Employment of the inverse transient analysis to leakage detection in water distribution networks). *Ochrona Środowiska* 2016, vol. 38, nr 1, ss. 39–43.
8. H. RAMOS, A. B. de ALMEIDA: Parametric analysis of water hammer effects in small hydro schemes. *Journal of Hydraulic Engineering* 2002, Vol. 128, No. 7, pp. 689–696.
9. K. WEINEROWSKA-BORDS: Alternative approach to convolution term of viscoelasticity in equations of unsteady pipe flow. *Journal of Fluids Engineering* 2015, Vol. 137, No. 5, pp. 1–9.
10. R. SZYMKIEWICZ, M. MITOSEK: Alternative convolution approach to friction in unsteady pipe flow. *Journal of Fluids Engineering* 2014, Vol. 136, No. 1, pp. 1–9.
11. M. NIEŁACNY, I. WISZNIEWSKA-ORACZEWSKA: Analiza wpływu typu oraz czasu zamykania zasuw, zaworu na przyrost ciśnienia w przewodzie. *Gaz Woda i Technika Sanitarna* 2000, nr 8, ss. 316–321.
12. M. MITOSEK: Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
13. A. KODURA: An analysis of the impact of valve closure time on the course of water hammer. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics* 2016, Vol. 63, No. 1, pp. 35–45.
14. D. J. WOOD, S. E. JONES: Water-hammer charts for various types of valves. *Journal of Hydraulic Division* 1973, Vol. 99, No. 1, pp. 167–178.
15. B. B. SHARP: Water Hammer: Problems and Solutions. Edward Arnold Publisher Ltd., London 1981.
16. B. B. SHARP: Water hammer gate characteristics. *Water Power* 1969, Vol. 21, pp. 352–354.
17. B. B. SHARP: Discussion of water hammer charts for various types of valves. *Journal of Hydraulic Division* 1974, Vol. 100, No. 2, pp. 323–326.

**Kodura, A. Influence of Downstream Pipe Length on the Water Hammer Parameters in HDPE Pipelines. *Ochrona Środowiska* 2018, Vol. 40, No. 4, pp. 15–20.**

**Abstract:** Transient flow with water hammer characteristics is not a common occurrence in pressure systems. However, its effects can lead to serious problems in the management of pressure networks. This complex phenomenon is influenced by several factors. One of them is the impact of the pressure wave downstream of the valve that enforces the phenomenon. This involves concurrent excitation of pressure waves with opposite signs in the upstream and downstream conduit. The research confirmed significant influence of the downstream pipeline length on the hydraulic impact parameters. In particular, this applies to the primary phase of the phenomenon. The effect of the pipeline length on delay of the phenomenon was

demonstrated, namely on the time between the start of the valve closure and start of the pressure increase. Furthermore, the pipe length influenced the time of pressure increase and the value of pressure increments. For equal lengths of the pipe upstream and downstream of the valve, delays in the pressure increase were the smallest. The biggest delay time values were observed in the extreme valve positions – near the beginning or the end of the pipe. For a simple water hammer, the measured values differed slightly from those calculated from the Joukovsky formula. For non-simple (complex) impacts, the variations between the pressure increases obtained for different pipe lengths reached up to 40%.

**Keywords:** Time of valve closure, time of pressure increase, delay time of pressure increase, pressure characteristics, transient flow, water hammer, downstream pipeline length.