



Koncepcja metody zabezpieczenia pomp odśrodkowych przed skutkami zjawiska uderzenia hydraulicznego – wyniki badań laboratoryjnych

Artur Choma, Dariusz Kowalski
Politechnika Lubelska

1. Wprowadzenie

Uderzenie hydrauliczne definiowane jest przez jako szybkozmienny ciśnieniowy przepływ w rurociągu, w którym występują fale znacznie podwyższonego lub obniżonego ciśnienia, spowodowane gwałtowną zmianą prędkości przepływu w dowolnym przekroju poprzecznym (Choon i in. 2012, Grabarczyk 2015, Mitosek 2014, Niełacny 2002, Wylie & Streeter 1983, Zou i in. 2013). Opisywane zjawisko może mieć miejsce, np. przy szybkim zamknięciu/otwarciu zaworu na przewodzie przesyłowym czy przy gwałtownym zatrzymaniu/uruchomieniu pracy pompy (Chen i in. 2015, Malesińska, 2010, Soares i in. 2012).

Cechą charakterystyczną zjawiska uderzenia hydraulicznego wywołwanego przez zatrzymanie/uruchomienie pracy pomp odśrodkowych jest jednoczesne występowanie w ich obrębie tzw. uderzenia dodatniego (początkowy wzrost ciśnienia) jak również ujemnego (początkowy spadek ciśnienia). Wówczas na pompę działają jednocześnie dwie fale – zwiększonego i zmniejszonego ciśnienia, co potęguje potencjalne efekty niszczące. Prędkość takich fal może dochodzić do ponad 1000 m/s a wartość wielkości ciśnienia oscyluje od bardzo dużych do bardzo małych (podciśnienie) (Afshar & Rohani 2008). Potencjalne skutki uderzenia mogą w konsekwencji prowadzić do uszkodzenia elementów systemu i tym samym doprowadzić do przerw w jego pracy (Budris 2014, Liu i in. 2014, Sang – Gyun i in. 2015). Wg Bonetyńskiego i Wiszniewskiej –

Oraczewskiej (2001) ok. 80% awarii występujących w przewodach dużych sieci wodociągowych nie wyposażonych w urządzenia zabezpieczające powstało w następstwie wystąpienia zjawiska uderzenia hydraulicznego. Co więcej zgodnie z badaniami Kwietniewskiego i Raka (2010) niemal 60% awarii pompowni wodociągowych w Polsce, w ostatnich 10 latach, związane było ze skutkami pojawiającego się tam uderzenia hydraulicznego.

Na rynku instalacyjnym istnieje cały szereg metod zabezpieczania pomp odśrodkowych przed skutkami uderzenia hydraulicznego (Choma 2015a). Warto jednak zwrócić uwagę na fakt iż poza metodami związanymi z wydłużeniem czasu zatrzymania/uruchomienia wirnika nie działają one w sposób kompleksowy na ograniczenie pojawiającej się różnicy ciśnienia po obu stronach pompy jednocześnie. Wydaje się zatem, że warto poszukiwać innej, nowej metody zabezpieczenia pomp, działającej jednocześnie na stronę ssawną i tłoczną jednocześnie.

Celem artykułu jest przedstawienie autorskiej koncepcji takiej metody, wraz z prezentacją wyników laboratoryjnych badań jej skuteczności.

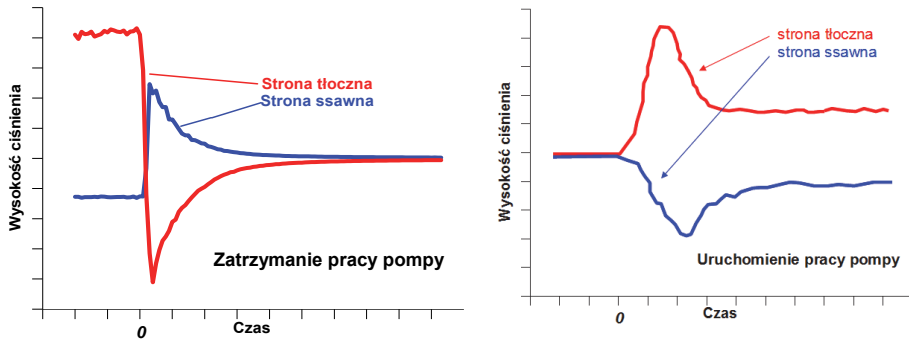
2. Koncepcja proponowanej metody

U podstaw proponowanej metody ograniczania skutków uderzenia hydraulicznego przy uruchomieniu lub zatrzymaniu pracy pomp odśrodkowych leżała obserwacja wykresów zmian ciśnienia po stronie ssawnej i tłocznej (rys. 1). Przy zatrzymaniu wirnika pompy po jej stronie ssawnej można zaobserwować tzw. dodatnie (początkowy wzrost ciśnienia), zaś po stronie tłocznej ujemne (początkowy spadek ciśnienia) uderzenia hydrauliczne. W przypadku uruchomienia wirnika pompy sytuacja jest odwrotna. W efekcie chwilowa różnica ciśnień po obu stronach pompy jest znacznie większa w momencie uruchomienia/zatrzymania niż w trakcie jej ustabilizowanej pracy.

Jako cel podjętych badań postawiono wyrównanie powstającej różnicy ciśnień po obu stronach pompy jednocześnie w trakcie uruchomienia/zatrzymania pracy jej wirnika. Proponowana metoda polega na zastosowaniu obejścia pompy, wyposażonego w specjalizowany zawór regulujący ciśnienie – rys. 2.

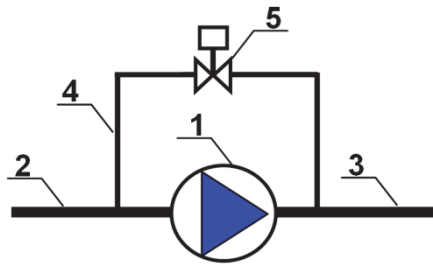
W momencie zatrzymania lub uruchomienia wirnika pompy zawór regulacyjny (5 – rys. 2) powinien być otwarty. Następnie powinien on być

stopniowo zamykany aby, szczególnie w warunkach normalnej pracy pompy nie obniżyć jej sprawności energetycznej. Otwarcie zaworu regulacyjnego powoduje przepływ wody przez obejście, w kierunku od strony ciśnienia wyższego do niższego, wyrównując jego poziom po obu stronach pompy.



Rys.1. Przykładowy przebieg zmian ciśnienia po stronie ssawnej i tłocznej w momencie zatrzymania (po lewej) oraz uruchomienia wirnika pompy odśrodkowej (po prawej). 0 – moment zatrzymania/uruchomienia

Fig.1. An example of the pressure changes on the suction and discharge side after the rotor stop (left) and start (right) of the centrifugal pump. 0 – time of the rotor stop/start moment



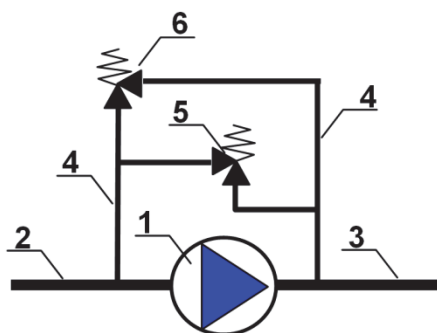
Rys.2. Schemat układu ograniczania skutków uderzenia hydraulicznego opartego o wykorzystanie obejścia pompy. 1 – pompa, 2 – przewód ssawny, 3 – przewód tłoczny, 4 – obejście, 5 – zawór regulacyjny

Fig.2. Scheme of the water hammer effects limitation method, basing on pump bypass implementation. 1 – pump, 2 – suction pipe, 3 – pipe, 4 – bypass, 5 – regulation valve

To bardzo proste rozwiązanie komplikuje się w sytuacji zastosowania automatyki sterującej pracą zaworu regulacyjnego. Zawór regula-

cyjny powinien się otwierać bardzo szybko w sytuacji zagrożenia uderzeniem. Można tu zastosować zawór elektromagnetyczny. Zawór taki charakteryzuje się możliwością bardzo szybkiego otwierania/zamykania. Do kontrolowania jego pracy konieczny jest jednak układ automatyki przemysłowej, zasilany energią elektryczną. W przypadku przerwy w jej dostawie, powodującej nagłe zatrzymanie wirnika pompy, zawór powinien się samoczynnie otworzyć. Realizują to zawory z tzw. otwartą wstępną nastawą. Utrzymanie tego zaworu w stanie zamkniętym wymaga stałej dostawy energii elektrycznej.

Zarówno konieczność stosowania automatyki sterującej, jak również wykorzystania energii elektrycznej do utrzymania zamknięcia zaworu regulacyjnego skłoniły do poszukiwania innego rozwiązania. W ich efekcie powstała koncepcja układu mechanicznego, opartego na współpracy dwóch zaworów bezpieczeństwa, przedstawiona na rys. 3 (Choma i in. 2014).



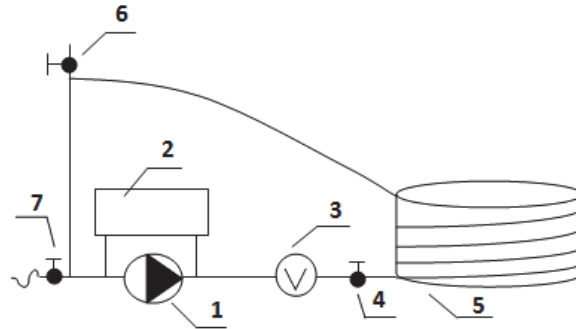
Rys.3. Schemat proponowanego układu ograniczania skutków uderzenia hydraulicznego. 1 – pompa, 2 – przewód ssawny, 3 – przewód tłoczny, 4 – bypass, 5, 6 – zawór bezpieczeństwa

Fig. 3. Scheme of proposed device of water hammer effects limitation. 1 – pump, 2 – suction pipe, 3 – discharge pipe, 4 – bypass, 5,6 – safety valve

Przedstawione na rys. 3 rozwiązanie umożliwi przepływ wody przez bypass, zarówno w kierunku od przewodu ssawnego do tłoczego pompy, jak i odwrotnym. W obu przypadkach przepływ rozpoczyna się dopiero, gdy różnica ciśnień po obu stronach pompy będzie większa od nastawy zaworu 5 lub 6. Powyższy układ pracuje niezależnie od dostawy energii elektrycznej. Nie wymaga również specjalnego układu sterowania.

3. Obiekt i metodyka badań

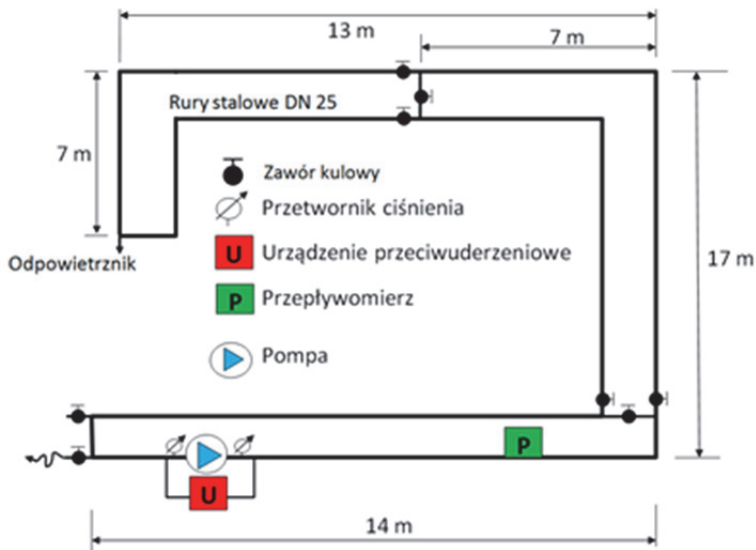
Badania laboratoryjne skuteczności zaprezentowanej powyżej metody oparto o dwa stanowiska badawcze – rys. 4 i 5.



Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego nr 1: 1 – pompa, 2 – prototyp zaworu regulacyjnego, 3 – przepływomierz, 4 – zawór, 5 – rura PE DN 32 x 3,0mm L = 56,0m, 6 – zawór odpowietrzający, 7 – uzupełnienie wody z instalacji wodociągowej (Choma 2015b)

Fig. 4. Scheme of the laboratory set no 1: 1 – pump, 2 – prototype of regulation valve, 3 – flow-meter, 4 – valve, 5 – pipe PE DN 32 x 3,0 mm L = 56 m, 6 – venting valve, 7 – supplement water from water supply system (Choma 2015b)

Prototyp zaworu regulacyjnego zbudowano w oparciu o dwa sprężynowe zawory bezpieczeństwa Herz $d=20$ mm, otwierające się przy wzroście ciśnienia. Nastawa fabryczna zaworów wynosiła 0,03 MPa. Przewody obejścia pompy wyposażono dodatkowo w zawory zaporowe które umożliwiały łatwe odłączanie i włączanie do układu badanych zaworów bezpieczeństwa i tym samym badanie przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego w warunkach braku oraz istnienia proponowanego urządzenia zabezpieczającego. Pomiar ciśnienia realizowano za pomocą dwóch przetworników ciśnienia typu Keller PR-33X. Odczyty przetworników były rejestrowane z częstotliwością 0,02 s, za pomocą połączonego z nimi komputera.



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego nr 2 zbudowanego z rur stalowych Dn25 mm, L=92 m, U – prototyp zaworu regulacyjnego, P – przepływomierz
Fig. 5. Scheme of the laboratory set no 2 realised by steel pipes Dn25 mm, L=92 m, U – prototype of regulation valve, P – flowmeter

Pierwsze stanowisko pomiarowe (rys. 4) składało się z rurociągu polietylenowego DN 32 x 3,0 mm tworzącego pętlę o długości 56,0 m. W rurociąg wmontowano pompę odśrodkową WILO typ MHIE205-1/E/3-2-2G wyposażoną w przetwornicę częstotliwości oraz przepływomierz elektromagnetyczny AOMAC SE 115ME. Stanowisko to posłużyło jedynie do badań wstępnych, testujących zastosowany układ pomiarowy. Badania realizowano przy nastawie pompy umożliwiającej osiągnięcie prędkości przepływu 1,6 m/s.

Drugie stanowisko pomiarowe (rys. 5) wykonano z rur stalowych DN 25 mm. Zainstalowany na stanowisku układ zaworów pozwalał na wykorzystanie 3 wariantów układu rurociągów – o długości 30, 74 oraz 92 m. Ograniczenie długości przewodów wynikało z charakterystyki zastosowanej pompy – im większa długość tym większa wymagana wysokość jej podnoszenia, co było bardzo istotne w warunkach maksymalnych założonych prędkości przepływu. W tym wariantcie stanowiska do badań przepływu wykorzystano przepływomierz ultradźwiękowy POR-TAFLOW 300.

Badania realizowano zarówno w warunkach uruchomienia, jak i zatrzymania pompy, stosując zasadę 3 powtórzeń każdego wariantu pomiarowego. W trakcie badań wykorzystywano nastawę obrotów pompy, umożliwiającą uzyskanie stałej prędkości przepływu wody w instalacji badawczej od 0,5 do 1,5 m/s. Wykorzystywano także 3 wskazane powyżej obiegi wody. Załączanie i wyłączanie pompy prowadzono za pomocą ręcznie sterowanego wyłącznika energii elektrycznej.

Na obu stanowiskach badania przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego związanego z uruchomieniem pompy rozpoczynano każdorazowo od warunków stagnacji wody w instalacji pomiarowej. W przypadku zatrzymania pracy pompy badania rozpoczynano w warunkach ustabilizowania przepływu w tej instalacji na założonym poziomie prędkości.

Skuteczność działania zaworu regulacyjnego wyrażoną procentowo obliczono za pomocą wzoru (1):

$$E = \frac{\Delta p_0 - \Delta p_1}{\Delta p_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

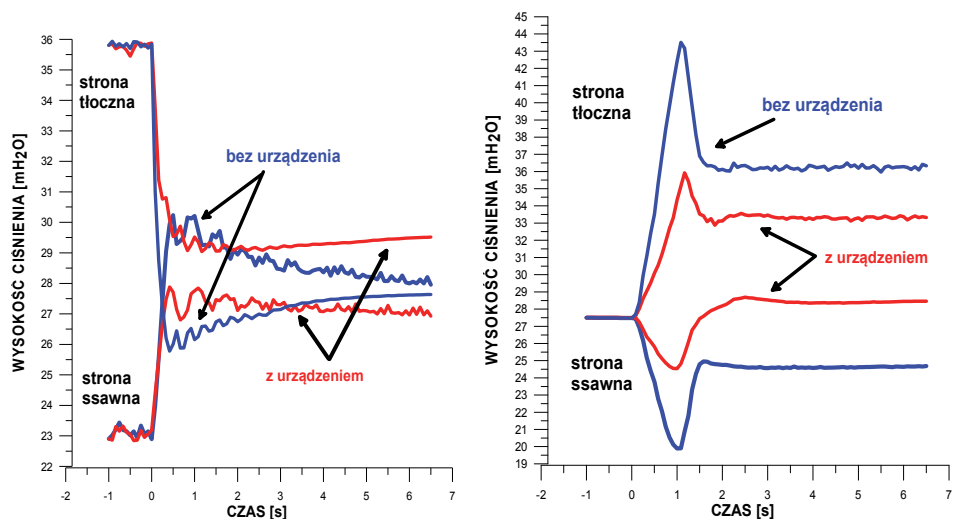
gdzie:

Δp_0 – maksymalna zmiana ciśnienia w warunkach odłączenia zaworu regulacyjnego, Δp_1 – j.w. lecz po podłączeniu zaworu.

4. Wyniki i dyskusja

Przykładowe wykresy zmian wysokości ciśnienia związanego z uderzeniem hydraulicznym przedstawiono na rysunku 6. Analizując przedstawiony tam przebieg zmian ciśnienia można stwierdzić istnienie wyraźnego oddziaływania proponowanego układu zabezpieczającego na ograniczenie skutków wywołwanego uderzenia hydraulicznego. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie wielkość tego wpływu ocenianego za pomocą wzoru 1.

Zestawione w tabeli 1 wyniki obliczeń skuteczności działania proponowanego układu zabezpieczającego wskazują na jego znacznie lepsze rezultaty zastosowania na stanowisku nr 2, zbudowanego z rur stalowych. Jest to zrozumiałe, jeżeli weźmie się pod uwagę, że na stanowisku nr 1 wykorzystano rurociąg PE, o znacznie większej elastyczności ścianek, co samo w sobie częściowo kompensuje zmiany ciśnienia wywołwanego uderzeniem hydraulicznym (Kowalski 2007).



Rys. 6. Przykładowy przebieg zmian ciśnienia na stanowisku nr 1 po stronie ssawnej i tłocznej w momencie zatrzymania wirnika pompy odśrodkowej z zastosowaniem zaworu regulacyjnego i bez, obieg $L = 56$ m, prędkość $v = 1,6$ m/s (po lewej) oraz uruchomienia wirnika pompy odśrodkowej z zastosowaniem zaworu różnicowego i bez, obieg $L = 74$ m, prędkość $v = 1,5$ m/s (po prawej)

Fig. 6. An example of the pressure changes at position number 1 on the suction and discharge side after the rotor stop of the centrifugal pump with the use of differential valve and without, circuit $L = 56$ m, velocity $v = 1,6$ m/s (left) and rotor start of the centrifugal pump with the use of differential valve and without, circuit $L = 74$ m, velocity $v = 1,5$ m/s (right)

Zgodnie z oczekiwaniami uzyskane wyniki wskazują na istnienie wpływu prędkości przepływu na wartość obliczonej skuteczności działania proponowanej metody. Zależność ta, okazała się liniowa i za razem istotna statystycznie.

Tabela 1. Zestawienie średnich arytmetycznych wyników obliczeń skuteczności funkcjonowania proponowanego układu zabezpieczającego
Table 1. The specification of average values of the calculation results of functioning efficiency of proposed safety device

Prędkość	Uruchomienie pompy		Zatrzymanie pompy	
	ssanie	łoczenie	ssanie	łoczenie
	%	%	%	%
Stanowisko nr 1, $v = 1,6$ m/s, $L = 56$ m				
$v = 1,6$ m/s	27,0	29,8	26,0	11,4
Stanowisko nr 2, $L = 74$ m				
$v = 0,5$ m/s	42,6	59,1	28,6	19,9
$v = 0,6$ m/s	52,7	59,2	20,4	22,1
$v = 0,8$ m/s	50,0	55,6	45,0	26,5
$v = 1,0$ m/s	44,4	50,8	28,1	33,5
$v = 1,2$ m/s	43,9	54,1	35,9	36,5
$v = 1,5$ m/s	60,6	49,2	55,6	27,0

Zaprezentowany w artykule układ zabezpieczający ogranicza skutki uderzenia hydraulicznego, zarówno po stronie tłocznej jak i po stronie ssawnej pompy. Wyższą skuteczność układu otrzymano na stanowisku nr 2 otrzymując w przypadku uruchomienia pompy przy prędkości $v = 1,5$ m/s wartość skuteczności tłumienia po stronie ssawnej na poziomie 60,6%, a po stronie tłocznej 49,2%. Nieco gorsze wyniki uzyskane w sytuacji zatrzymania pompy przy tej samej prędkości (odpowiednio strona ssawna 55,6% i strona tłoczna 27,0%). Przedstawione rezultaty obliczeń wskazują na wysoką skuteczność proponowanego układu zabezpieczającego. Należy jednak zwrócić uwagę na szereg problemów, które pojawiły się w trakcie badań. Pierwszy z nich związany był z brakiem powtarzalności szybkości osiągnięcia przez wirnik pompy założonych parametrów. Dotyczyło to zarówno załączenia, jak i wyłączenia pompy i było najprawdopodobniej wynikiem jej konstrukcji, jak również bezwładnością samego silnika elektrycznego lub niedoskonałością elektroniki sterującej. W warunkach badania krótkich, ok. 6,5 sekundowych przebiegów czasowych miało to istotne znaczenie. Drugim problemem okazał się, co łatwo zauważyć na rys. 4 (po prawej), brak zbieżności linii przebiegu ciśnienia w warunkach funkcjonowania i braku urządzenia zabezpieczającego, w końcowej fazie wykresów. Prawdopodob-

ną przyczyną tego problemu były nieszczelności zastosowanych zaworów bezpieczeństwa. Problemu tego nie udało się wyeliminować pomimo zastosowania zaworów 3 różnych producentów. Wynika to najprawdopodobniej ze sposobu podłączenia tych zaworów. Ich producenci zalecają odprowadzenie wody do atmosfery, natomiast w rozpatrywanym przypadku upuszczaną wodę wprowadzano do rurociągu ciśnieniowego.

5. Wnioski

Biorąc pod uwagę przedstawione w artykule badania i analizy można stwierdzić, że:

- proponowany układ zabezpieczający ogranicza w znacznym (max 60%) stopniu skutki uderzenia hydraulicznego wywołanego nagłym zatrzymaniem/uruchomieniem pompy odśrodkowej,
- efekt tłumiący uderzenie hydrauliczne jest obserwowany jednocześnie po stronie ssawnej i tłocznej pompy,
- funkcjonowanie układu zabezpieczającego nie było uzależnione od dostawy energii elektrycznej,
- prezentowany układ zabezpieczający wykazuje większą skuteczność ograniczania skutków uderzenia hydraulicznego na stanowisku wykonanym z przewodów stalowych, w stosunku do wykonanego z PE,
- zastosowanie do budowy układu zabezpieczającego dwóch zintegrowanych zaworów bezpieczeństwa wymaga odpowiedniego opracowania ich konstrukcji, która zapewni ich szczelność w trakcie normalnej, tj. pozbawionej uderzeń hydraulicznych pracy pompy,
- wdrożenie proponowanego układu zabezpieczającego do praktyki instalacyjnej wymagać będzie także testów realizowanych w pełnej skali technicznej oraz opracowania stosownych wytycznych do jego wymiarowania.

Literatura

- Afshar, M.H., & Rohani, M. (2008). Water hammer simulation by implicit method of characteristic. *Interantional Journal of Pressure vessels and piping*, 85(12), 851-859.
- Bonetyński, K., i Wiszniewska – Oraczewska, I. (2001). Strategia zapobiegania niekorzystnym skutkom uderzenia hydraulicznego w sieciach wodociągowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 8, 283-286.

- Budris, A. R. (2014). Damage Control. *WaterWorld*, 30(4), 10-13.
- Chen, T., Ren, Z., Xu, Ch. et al. (2015). Optimal boundary control for water hammer suppression in fluid transmission pipelines. *Computer and Mathematics with Applications*, 69, 275-290.
- Choma, A. (2015a). Uderzenie hydrauliczne w pompowniach wodnych – przyczyny, skutki i dotychczasowe przeciwdziałanie. *Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce*. Monografie 2015 (5), Woda – tom I, 7-13.
- Choma, A. (2015b). Zestaw przeciwdziałania skutkom uderzenia hydraulicznego w układach pompowych – rezultaty wstępnych badań. *Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce*. Monografie 2015 (5), Woda – tom I, 14-20.
- Choma, A., Kowalska, B., Kowalski, D. (2014). *Zawór różnicowy*. Urząd Patentowy RP – zgłoszenie patentowe numer P 410376 (04.12.2014r.).
- Choon, T.W., Aik, L.K., Aik, L.E., Hin, T.T. (2012). Investigation of water hammer effect through pipeline system. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 2(3), 246-251.
- Grabarczyk, Cz. (2015). *Hydraulika urządzeń wodociągowych*. Tom 2. Envirotech. Warszawa: W NT.
- Kowalski, P. (2007). *Analiza zdolności tłumienia uderzenia hydraulicznego w rurociągu stalowym z bocznikiem z tworzywa sztucznego*. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Hydrotechniki, Gdańsk.
- Kwietniewski, M. i Rak, J. (2010) *Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce*. Monografia Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, nr 67, Warszawa.
- Liu, Z., Jiang, J., Yang, X. (2014). *Research and instance analysis on joint water hammer protection of long - distance water supply system*. Fluid Machinery and Fluid Engineering, 2014 ISFMFE – 6th International Symposium on. IET. 1-7.
- Malesińska, A. (2010). Pomiar i analiza sił wywołanych przejściem fali uderzenia hydraulicznego w instalacji tryskaczowej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 7-10.
- Mitosek, M. (2014). *Mechanika Płynów w Inżynierii i Ochronie Środowiska*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Niełacny, M. (2002). *Uderzenie hydrauliczne*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- Sang-Gyun, K.I.M., Kye-Bock, L.E.E., Kyung-Yup, K.I.M. (2015). Water hammer in the pump - rising pipeline system with an air chamber. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 26(6), 960-964.

- Soares, A.K., Covas, D.I., Ramos, H.M. (2012). Damping analysis of hydraulic transients in pump – rising main systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(2), 233-243.
- Szalucki, K. (2007). Uderzenia wodne w instalacjach pary i kondensatu (cz.II). *Przegląd mleczarski*, 03, 22-25.
- Zuo, Q., Qiu, S., Lu, W. et al. (2013). Water hammer characteristics of integral pressurized water reactor primary loop. *Nuclear Engineering and Design*, 261, 165-173.

The Concept of Protection Method of Centrifugal Pumps from the Effects of Water Hammer Phenomena – Laboratory Results

Abstract

The following paper discusses the issues related to the occurrence of water Hammer phenomenon in pressure liquid transportation systems. Although the knowledge about the problem of water Hammer phenomenon has been developed over 100 years continues to demonstrate that the systems inadequately protected against the effects of impact of water hammer are exposed to numerous accidents and various maintenance problems. The devices that particularly vulnerable to the formation of water hammer phenomenon are centrifugal pumps. The article presents an original concept of centrifugal pumps security methods based on the differential valve of their own construction and the results of laboratory tests the effectiveness of the method.

Słowa kluczowe:

uderzenie hydrauliczne, pompy odśrodkowe, zawór różnicowy

Keywords:

water hammer, centrifugal pumps, differential valve