Dariusz GRYGO¹
Wojciech SOBIESKI²
Seweryn LIPIŃSKI³

ETAPY PRACY TARANA WODNEGO

W artykule przedstawiono szczegółowo zasadę działania urządzenia zwanego taranem wodnym oraz omówiono etapy jego pracy w odniesieniu do zjawiska uderzenia hydraulicznego, stanowiącego podstawę działania tego typu urządzeń. W poszczególnych punktach opisano historię taranów wodnych, klasyczną teorię uderzenia hydraulicznego opracowaną w roku 1889 przez Nikolaja Żukowskiego oraz jej współczesne rozszerzenia, omówiono budowę typowego tarana wodnego, scharakteryzowano funkcje poszczególnych jego elementów oraz przedstawiono warunki, przy których taran wodny może poprawnie pracować. Najważniejszym elementem pracy jest opis cyklu pracy tarana wodnego z podziałem na etapy. Motywacją do napisania artykułu było spostrzeżenie, że w literaturze fachowej, zarówno polskiej jak i zagranicznej, brak jest podobnego typu opisów, a materiały popularno-naukowe, spotykane głównie na różnych stronach internetowych, są przeważnie zbyt ogólne (a czasami i błędne), przez co nie spełniają wymogów źródeł naukowych. Najważniejszą nowością zawartą w pracy, a zarazem głównym jej celem, jest połączenie opisu działania taranów wodnych z przebiegiem uderzenia hydraulicznego. Artykuł stanowi kontynuację cyklu związanego z poszukiwaniem obecnych możliwości praktycznego wykorzystania taranów wodnych w możliwie szerokim obszarze zastosowań.

Słowa kluczowe: taran wodny, uderzenie hydrauliczne, energia przepływu wody, zasada działania

1. Wprowadzenie

Historia wynalezienia tarana wodnego sięga roku 1772, w którym to John Whitehurst z Cheshire w Wielkiej Brytanii wynalazł urządzenie podające wodę bez udziału energii elektrycznej. Pompowanie wody odbywało się w nim dzięki energii strumienia wody przepływającego przez urządzenie, wymuszanego przez

---

¹ Autor do korespondencji: Dariusz Grygo, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, ul. M. Oczapowskiego 11, 10-719 Olsztyn, katedra 89 523-32-55, pr. 602 199 665, dariusz.grygo@gmail.com

² Wojciech Sobieski, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, ul. M. Oczapowskiego 11, 10-719 Olsztyn, katedra 89 523-32-55, wojciech.sobieski@uwm.edu.pl

³ Seweryn Lipiński, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, ul. M. Oczapowskiego 11, 10-719 Olsztyn, katedra 89 523-36-03, seweryn.lipinski@uwm.edu.pl

różnicę poziomów wody na wlocie i wylocie. Zasadniczą wadą wynalazku była konieczność ręcznego nadzorowania pracy urządzenia. Problem ten rozwiązał w roku 1796 francuz Joseph Michael Montgolfier, który to dodał specjalne zawory uderzeniowe. Dzięki nim praca tarana wodnego, po rozruchu, mogła odbywać się samoczynnie, co skutkowało z kolei nieprzerwaną dostawą wody. W kolejnych latach prowadzone były różne badania i eksperymenty, ale żadna teoria nie została opracowana. Stan ten nie przeszkadzał w masowej produkcji taranów wodnych, rozpoczętej już w roku 1834. Naukowe wyjaśnienie działania taranów wodnych umożliwiła opracowana w 1898 przez Nikolaja Żukowskiego teorii uderzenia hydraulicznego, opisana pokrótce w dalszej części pracy. Teoria ta obejmuje również zależności między czasem zamykania zaworów a przyrostem ciśnienia uderzenia hydraulicznego oraz prędkością rozprzestrzeniania się fali uderzeniowej. Na początku XX wieku, po upowszechnieniu się elektrycznych pomp wodnych, a także wskutek obniżania się jakości wód powierzchniowych, rola taranów wodnych zaczęła stopniowo maleć. Po drugiej Wojnie Światowej tarany wodne były już w Europie wielką rzadkością. Jednym z nielicznych wyjątków jest działający nieprzerwanie od 1897 roku system dystrybucji wody w Kajnach koło Olsztyna (Rys. 1).

Rys. 1. System dystrybucji wody w Kajnach: taran (po lewej) i wieża ciśnień (po prawej)

Fig. 1. Water distribution system in Kajny: ram (left) and tower (right)

Obecnie tarany wodne traktuje się jako ciekawostkę techniczną, marginalnie wzmiankowaną w literaturze fachowej. Ogólnodostępnym źródłem informacji jest Internet (Appropedia, 2013; Clemson, 2007; Derkor, 2014; Meribah Ram Pump, 2014; Mohamed, 2007; Sheikh, S. i in., 2013; SolarLogic, 2014; Tarasiewicz, 2012), przy czym podawane w nim informacje są zazwyczaj bardzo ogólne.

W poprzedniej publikacji (Grygo i Sobieski, 2014) przedstawiono obecne możliwości stosowania taranów wodnych, wytypowano grupy potencjalnych odbiorców, scharakteryzowano cechy ujęć wody w kontekście wykorzystywania tego typu urządzeń, a także podano motywacje do rozpoczęcia badań. Bieżący artykuł stanowi kontynuację tych badań, tym razem nakierowaną na wyjaśnienie

przebiegu uderzenia hydraulicznego w kontekście taranów wodnych. Okazuje się, że w literaturze brak jest takich informacji (co wynika z faktu, że w czasach najintensywniejszych badań taranów wodnych nie było technicznych możliwości rejestracji przebiegu uderzeń hydraulicznych) – powszechnie podaje się tylko, że zjawisko to stanowi podstawę działania tych urządzeń. Motywacją do rozpoczęcia przedstawionych w pracy badań była chęć uzupełnienia tej istotnej luki. Aby to osiągnąć zdefiniowano następujące cele jednostkowe: uporządkowanie wiedzy o etapach pracy taranów wodnych; opracowanie systemu rejestracji przebiegu uderzenia hydraulicznego w instalacji z taranem wodnym; określenie rzędu możliwych do wystąpienia ciśnień maksymalnych; zbadanie możliwości pojawienia się uderzenia hydraulicznego pochodzącego od drugiego zaworu zwrotnego (w literaturze mówi się zawsze o jednym uderzeniu). Jako cel główny przyjęto powiązanie przebiegu zjawisk z opisywanymi w literaturze etapami pracy taranów wodnych.

2. Budowa i zasada działania tarana wodnego

2.1. Uderzenie hydrauliczne

Uderzeniem hydraulicznym nazywa się gwałtowną zmianę ciśnienia w układzie przepływowym spowodowaną nagłymi zmianami prędkości przepływu cieczy. W przypadku gazów uderzenie hydrauliczne nie występuje ze względu na dużą ściśliwość tego typu materii. Uderzenie hydrauliczne występuje głównie podczas otwierania lub zamykania zaworów lub podczas uruchamiania bądź zatrzymywania znajdujących się w układzie maszyn roboczych. Jeśli zjawisko zachodzi podczas zamykania zaworów lub podczas zatrzymania pracy pomp, to w układzie przepływowym występuje nagły wzrost ciśnienia – jest to tzw. uderzenie hydrauliczne dodatnie. W przeciwnym przypadku ma miejsce zjawisko odwrotne, czyli uderzenie ujemne. Podwyższenie lub obniżenie wielkości ciśnienia jest wynikiem bezwładności mas cieczy przepływającej przez układ. Jeżeli czas działania czynnika generującego falę (czas zamykania przewodu) jest krótszy od okresu fali uderzeniowej, zjawisko takie nazywa się uderzeniem prostym, w przeciwnym przypadku uderzenie nazywane jest złożonym. Maksymalny przyrost ciśnienia występuje przy uderzeniu prostym [Badur i in., 1999; Gryboś, 1995; Kowalski, 2007; Mitosek, 1997; Nałęcz i Pietkiewicz, 2000]. Przyrost ciśnienia Δp dla uderzenia prostego można obliczyć ze wzoru [Gryboś, 1998; Kowalski, 2007; Nałęcz i Pietkiewicz, 2001; Mitosek, 1997]

$$\Delta p = \pm \rho \cdot u \cdot (c_0 - c), \text{ dla } t_z \leq T, \quad (1)$$

gdzie: Δp – maksymalny przyrost ciśnienia [Pa],

ρ – gęstość cieczy [kg/m^3],

u – prędkość propagacji fali uderzeniowej [m/s],
 c_0 – średnia prędkość cieczy w ruchu ustalonym (przed wystąpieniem uderzenia hydraulicznego) [m/s],
 c – końcowa średnia prędkość cieczy [m/s],
 t_z – czas zamykania zaworu [s],
 T – okres fali uderzeniowej [1/s].

W przypadku uderzenia złożonego

$$\Delta p = \pm \rho \cdot u \cdot (c_0 - c) \cdot \frac{t}{t_z}, \text{ dla } t_z > T \quad (2)$$

gdzie: t – czas przejścia fali przez przewód o długości L [s].

Prędkości propagacji fali uderzeniowej we wzorach (1) i (2) opisuje zależność [Nałęcz i Pietkiewicz, 2000]

$$u = \frac{\sqrt{\frac{1}{B \cdot \rho}}}{\sqrt{1 + \frac{d}{B \cdot E \cdot \delta}}} \quad (3)$$

gdzie: B – moduł ściśliwości cieczy [m^2/MN],
 d – wewnętrzna średnica przewodu [m],
 E – moduł sprężystości materiału przewodu [MPa],
 δ – grubość ścianki przewodu [m].

Wzór (3) stosuje się dla ścianek jednowarstwowych, jednak istnieje również szersza teoria, uwzględniająca możliwość wykonania przewodów hydraulicznych z kilku ścianek o różnych właściwościach [Badur i in., 1999; Nałęcz i Pietkiewicz, 2000; Nałęcz i Pietkiewicz, 2003]. Wzór (3) nie uwzględnia również wpływu rozpuszczonego w wodzie powietrza, które to, dzięki wysokiej ściśliwości, tłumí zjawisko i obniża maksymalną wartość ciśnienia fali [Nałęcz i Pietkiewicz, 2000].

2.2. Ogólna budowa i zasada działania tarana wodnego

Taran wodny (ang. hydraulic ram, hydram; niem. Hydraulischer Widder, Stoßheber, Druckstoß-Pumpe, Wasserstößer) jest to rodzaj pompy wodnej napędzanej energią przepływającego przez nią strumienia wody (Rys. 2). Urządzenie może być zasilane z dowolnego ujęcia wodnego [Piekarek, 2006]: jeziora, sta-

The diagram illustrates a water hammer experiment setup. It features a horizontal pipe (1) and a vertical pipe (2) connected by a valve (3). The valve is actuated by a solenoid (4) and a control system (5, 6, 7, 8, 9). The water level difference between the two pipes is labeled Δh . The valve is labeled A and the control system is labeled B.

Fig. 2. Schematic of typical historical ram water

Podczas otwarcia zaworu impulsowego (8), w strefie **A** urządzenia odbywa się swobodny spływ wody. Otwarcie zaworu odbywa się zazwyczaj ręcznie i jest potrzebne jedynie w fazie rozruchu pompy. W tym czasie zawór zwrotny (7) pozostaje zamknięty. W momencie zamknięcia się zaworu impulsowego (8), w wodzie przepływającej przez taran generowane jest zjawisko uderzenia hydraulicznego. Zjawisko to powoduje propagację wsteczną (w górę strumienia zasilającego) dodatniej fali ciśnieniowej. Wartość maksymalna ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego jest kilka lub kilkanaście razy większa od ciśnienia w fazie poprzedzającej. Stopień wzrostu wartości ciśnienia zależy głównie od sztywności materiału, z którego wykonany jest taran (najczęściej stosuje się żeliwo lub stal) oraz przewody doprowadzające wodę, a także od zawartości powietrza w wodzie. Cofająca się fala uderzeniowa dochodzi do zaworu zwrotnego (7), który to otwiera się na chwilę i przepuszcza do strefy **B** pewną porcję wody. Istotne jest, że ciśnienie w strefie **B** wzrasta i po pewnym czasie od rozruchu ustala się na poziomie znacznie wyższym niż średnie ciśnienie w strefie **A**. Strefa **B** ma postać zbiornika (6) i posiada pewien obszar niezalany wodą. W fazie otwarcia zaworu (7) poduszka powietrzna jest ściskana i wzrasta w niej ciśnienie. Ciśnienie to wykorzystywane jest do cyklicznego przepompowania niewielkich porcji wody przewodem (3) do dowolnego odbiornika. Drugą funkcją poduszki powietrznej jest tłumienie pulsacji w przewodzie odprowadzającym (3). W opisanym tu procesie istotne jest to, że ciśnienie występujące w strefie **B** umożliwia pompowanie wody na wysokości znacznie większe, niż wysokość

zbiornika zasilającego (1). W literaturze wspomina się, że wysokość pompowania taranów wodnych może dochodzić nawet do kilkudziesięciu metrów (Clarke, 1900). Po przejściu fali uderzeniowej, gdy otwarty jest zawór zwrotny a zamknięty zawór impulsowy, ciśnienie w strefie **A** stopniowo maleje wskutek przepływu wody ze strefy **A** do strefy **B**. W tym okresie masy spływającej wody ulegają chwilowemu zatrzymaniu. Gdy ciśnienie w układzie spadnie poniżej ciśnienia średniego, oba zawory odwracają swoje stany. Po otwarciu zaworu impulsowego i zamknięciu zaworu zwrotnego, ciśnienie w strefie **A** najpierw gwałtownie spada, a następnie stopniowo rośnie wskutek przyspieszania masy wody. Cykl zaczyna się od nowa.

Warto wspomnieć, że w kontekście zjawiska uderzenia hydraulicznego, budowa przewodu odpływowego nie wpływa istotnie na skuteczność działania tarana, gdyż jego rola ogranicza się jedynie do przesylu wody, a nie do wspomaganie magazynowania energii uderzenia. Ciśnienie panujące w przewodzie odpływowym maleje wraz z wysokością według zależności [Bukowski, 1959; Gryboś, 1998; Jeżowiecka i Szewczyk, 2001]

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (4)$$

gdzie: p – ciśnienie hydrostatyczne [Pa],
 ρ – gęstość cieczy [kg/m^3],
 g – przyspieszenie grawitacyjne [m/s^2],
 h – wysokość rozporządzalna cieczy [m].

W literaturze brak jest zgodności, co do liczby etapów pracy typowego tarana wodnego. W nielicznych pracach na ten temat wspomina się, że jeden powtarzalny cykl pracy tarana wodnego może być podzielony na: trzy etapy [Agriculture and Agri-Food Canada, 2014; Brown, 2006], cztery etapy [Calhoun, 2003; Jong, 2014; Mohammed, 2007; Sheikh i in., 2013; SolarLogic, 2014], pięć etapów [Clemson, 2007], sześć etapów [Meribach Ram Pump, 2014]. W niektórych publikacjach etap rozruchowy uznawany jest za pierwszy etap pracy tarana [Sheikh i in., 2013]. Zjawisko uderzenia hydraulicznego, tzn. opis zjawiska oraz przebieg tego zjawiska w kontekście taranów wodnych jest zupełnie pomijane.

W niniejszej pracy inicjowanie pracy tarana wodnego nie jest wliczane w cykl pracy tarana. Czynność ta wykonywana jest raz i nie bierze później udziału w procesie samoczynnego generowania uderzenia hydraulicznego oraz pompowania wody. Aby jednak przedstawić kompletny opis działania tarana, w dalszej części pracy opisano również i ten aspekt.

3. Stanowisko badawcze

Schemat stanowiska laboratoryjnego służącego do badania przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego w taranach wodnych przedstawiono na Rys. 3. Elementy stanowiska opisano w Tabeli 1. Symbole h_s i h_c występujące na rysunku oznaczają odpowiednio wysokość źródła wody oraz wysokość pompowania wody.

Podczas przeprowadzania badań temperatura powietrza wynosiła 21.6 [°C], temperatura wody 15.5 [°C], ciśnienie w strefie **A** wynosiło 47043.73728 [Pa] (0.4798 [kg/cm²]), natomiast w strefie **B** 148971.83472 [Pa] (1.5195 [kg/cm²]).

Szczegółowy opis badania planuje się opisać w kolejnym artykule. Analiza wyników badań eksperymentalnych pozwoliła na sformułowanie opisów poszczególnych etapów pracy tarana wodnego. Opisy te przedstawiono w kolejnych punktach.

Tabela 1. Opis elementów stanowiska badawczego

Table 1. Description of The elements of test bench

Numer	Nazwa i opis
1.	Źródło wody – zbiornik 1000 [dm ³]
2.	Przewód dopływowy – rura PE 25 [mm], dł. 7000 [mm]
3.	Przewód odpływowy – wąż PCV 12 [mm], dł. 20000 [mm]
4.	Zawór zamykający – stalowy zawór kulowy ½ [in]
5.	Zbiornik powietrzny – pojemność 2 [dm ³]
6.	Zbiornik powietrzny – rura PE 65 [mm], dł. 873 [mm]
7.	Zawór zwrotny mosiężny – ½ [in]
8.	Zawór zwrotny mosiężny – ½ [in]
9.	Kolektor – zbiornik 1 [dm ³]
10.	Przewód odpływowy – wąż PCV 12 [mm], dł. 20000 [mm]
11.	Elektroniczny przetwornik ciśnienia – A-10 WIKA
12.	Manometr – zakres 6 [kg/m ²], ± 1
13.	Zawór zamykający – stalowy zawór kulowy ½ [in]
14.	Zawór zamykający – stalowy zawór kulowy ½ [in]
15.	Manometr – zakres 0.6 [kg/m ²], ± 0.4
16.	Zawór zamykający – stalowy zawór kulowy ½ [in]
17.	Elektroniczny przetwornik ciśnienia – A-10 WIKA
18.	Zawór zamykający – stalowy zawór kulowy ½ [in]
19.	Zawór zamykający – stalowy zawór kulowy ½ [in]
20.	Zawór zamykający – stalowy zawór kulowy ½ [in]
21.	Strefa A tarana – rura stalowa ½ [in], dł. 200 [mm]
22.	Strefa B tarana – rura stalowa ½ [in], dł. 500 [mm]

Rys. 3. Układ pomiarowy

Fig. 3. Measuring system

4. Etapy pracy tarana wodnego

4.1. Inicjowanie pracy tarana wodnego

Aby zainicjować samopowtarzalny cykl pompowania, należy w pierwszej kolejności wykonać rozruch tarana wodnego. Pierwszą czynnością jest otwarcie zaworu zamykającego dopływ wody do tarana (4) (Rys. 4) znajdującego się na rurze dopływowej (2). Po otwarciu zaworu zamykającego woda przepływa przewodem dopływowym (2) ze źródła (1) przez strefę A tarana i wypływa przez otwarty zawór impulsowy (8) na zewnątrz. Zwiększające się wskutek bezwładności wody natężenie przepływu wody powoduje zwiększanie naporu hydrodynamicznego na głowicę zaworu (8) i ostatecznie jego zamknięcie. Podczas rozruchu pompy należy kilka razy ręcznie otworzyć zawór uderzeniowy poprzez wciskanie głowicy (8) aż do momentu, kiedy pompa zacznie samoczyn-

nie pracować. Celem inicjowania pracy tarana jest wypełnienie wodą strefy **B** oraz przewodu odpływowego (3). W zbiorniku powietrznym następuje sprężenie powietrza do wartości odpowiadającej wysokości słupa wody podczas pompowania.

Przedstawiony opis dotyczy tarana zamontowanego na stanowisku badawczym, jest jednak zgodny z informacjami literaturowymi, np. instrukcją obsługi tarana według Meribah Ram Pump [2014].

Przeprowadzone badania wykazały, że inicjowanie odbywa się tylko w przypadku, kiedy strefa **B** i przewód wypływowy (3) nie jest w całości wypełniony wodą. W przypadku, gdy strefa **B** i przewód wypływowy (3) jest w całości wypełniony wodą, taran rozpoczyna pracę samoczynnie po otwarciu zaworu zamykającego (4) (Rys. 4).

Można przypuszczać, że łatwość oraz czas uruchomienia tarana zależy również od konstrukcji zaworu impulsowego.

Rys. 4. Inicjowanie pracy tarana wodnego

Fig. 4. Initiating work of ram water

Na etapie rozruchu tarana wodnego częstotliwość impulsów ciśnienia jest nieregularna, co wynika z ręcznego sterowania procesem, a parametry wody odpływowej niskie. Ciśnienie w poduszce powietrznej (5) ustala się dopiero po kilkunastu lub kilkudziesięciu cyklach, zależnie od konstrukcji, i dopiero po tym okresie taran osiąga pełną wysokość pompowania oraz pełną wydajność.

4.2. Etap 1 – przyspieszanie

Za pierwszy etap pracy tarana wodnego uważa się w literaturze okres, w którym zawór impulsowy pozostaje otwarty (Rys. 5). Opis tego etapu jest u różnych autorów podobny i nie spotyka się w tej kwestii większych rozbieżności [Calhoun, 2003; Claemson, 2007; Jong, 2014; Mohammed, 2007; Sheikh i in., 2013; Silver, 1977; SolarLogic, 2014]. Podczas trwania etapu pierwszego, woda ze źródła (1) dostarczana jest przewodem dopływowym (2) do tarana wodnego, a następnie przepływa przez strefę A i wypływa na zewnątrz otwartym zaworem uderzeniowym (8). W tym okresie prędkość przepływu, a także ciśnienie w strefie A, stopniowo wzrasta. Przepływająca przez zawór impulsowy woda wywołuje napór hydrodynamiczny na powierzchnię głowicy zaworu impulsowego, zgodnie ze wzorem

$$N = \rho \cdot \dot{V} \cdot (c - u) \quad (5)$$

gdzie: N - siła naporu na głowicę zaworu w kierunku zgodnym z głównym kierunkiem ruchu mas wody [N],

ρ - gęstość wody [kg/m^3],

$\dot{V}$ - objętościowe natężenie przepływu (strumień objętości) [m^3/s],

c - średnia prędkość strumienia wody [m/s],

u - prędkość ruchu głowicy [m/s].

Rys. 5. Schemat położenia zaworów oraz kierunków przepływu wody pierwszego etapu cyklu pracy tarana wodnego

Fig. 5. Schematic positions of valves and flow directions of the first stage of the water cycle ram

Podczas przyspieszania mas wody głowica zaworu impulsowego pozostaje w spoczynku, a zatem $u = 0$. Ponieważ gęstość wody jest stała a geometria obszaru przepływowego niezmienna, to siła naporu hydrodynamicznego zależy wyłącznie od średniej prędkości wody. Gdy prędkość ta osiągnie odpowiednio dużą wartość, siła naporu na głowicę spowoduje jej zamknięcie [Agriculture and Agri-Food Canada, 2014; Appropedia, 2013; Derkor, 2014; Meribah Ram

Pump, 2014; Sheikh, S. i in., 2013; SolarLogic, 2014]. W literaturze wspomina się, że czas zamykania jest niezwykle krótki [Jeffery i in., 1992; Watt, 1975] – można zatem przyjąć, że zmiana stanu układu następuje skokowo. W literaturze przyjmuje się, że zamknięcie zaworu uderzeniowego (8) kończy pierwszy etap cyklu pracy tarana wodnego [Appropedia, 2013; Calhoun, 2003; Clarke, 1900; Clemson, 2007; Sheikh, i in., 2013; Meribah Ram Pump, 2014; Mohamed, 2007]. Podczas trwania etapu pierwszego, zawór zwrotny pozostaje cały czas zamknięty.

Na Rys. 6. przedstawiono przykładowy przebieg ciśnień zarejestrowany w trakcie uderzenia hydraulicznego. Etap pierwszy zaznaczony jest na tym rysunku linią szarą. Wartość ciśnienia absolutnego w okresie przyspieszania zmienia się od około 0.272 [bar] do wartości średniej, wynoszącej 1.472 [bar] (wartość średnia określona została na etapie kalibracji czujników i została zweryfikowana analitycznie). Umieszczone w artykule wyniki dokładnych pomiarów czasu i ciśnienia zostały pozyskane przy pomocy oscyloskopu cyfrowego, umożliwiającego zaznaczenie kursorami i analizę właściwego fragmentu wykresu. Tam gdzie było to możliwe, pomierzone w ten sposób wartości widoczne są po prawej stronie wykresów z rysunków: 6, 7, 9, 10, 12 i 13. Na tych samych rysunkach, pod wykresami, widoczne są: podstawa czasu, dająca bezpośrednią informację na temat czasowych parametrów przebiegu, oraz czułości obu kanałów oscyloskopu, na których to mierzone napięcie może być wprost przekładane na wartości ciśnienia - w każdym przypadku 1[V] odpowiada 1 [bar]. Duża początkowa wartość podciśnienia wynika prawdopodobnie z bezwładności mas wody. Czas trwania etapu pierwszego wynosił 71.38 % czasu trwania pojedynczego cyklu (około 207 [ms]) (Rys. 7). Jest to więc etap najdłuższy, co zgadza się z informacjami podawanymi w literaturze [Taye, 1998; Watt, 1975].

Rys. 6. Przebieg uderzenia hydraulicznego w taraniu wodnym z zaznaczeniem czasu trwania etapu pierwszego (czujnik dolny)

Fig. 6. Motion stroke hammer in ram water, indicating the duration of the first stage (lower sensor)

Po rozpoczęciu tego etapu (jest on zaznaczony linią szarą na Rys. 9), na skutek dużej różnicy ciśnienia między strefą **A** a strefą **B**, przez zawór zwrotny zaczyna przepływać woda. W tym momencie w strefie **B** wzrasta gwałtownie ciśnienie, powodując wystąpienie na czujniku górnym dodatniego uderzenia hydraulicznego (Rys. 10). Wskutek przepływu wody do strefy **B**, a także wskutek ściśliwości poduszki powietrznej, ciśnienie rejestrowane na czujniku dolnym powoli maleje (Rys. 9). Poduszka absorbuje energię ciśnienia zmniejszając tym samym swoją objętość (od tego zjawiska przyjęto nazwę etapu). Etap kończy się w momencie, w którym poziom lustra wody w zbiorniku powietrznym tarana osiąga wysokość maksymalną. W przypadku analizowanym w pracy, czas trwania etapu drugiego wynosił 28 [ms], co stanowi 9.65 % czasu trwania pojedynczego cyklu.

Rys. 9. Przebieg uderzenia hydraulicznego w taraniu wodnym z zaznaczeniem czasu trwania etapu drugiego (czujnik dolny)

Fig. 9. Motion stroke hammer in ram water, indicating the duration of the second stage (lower sensor)

Rys. 10. Przebieg uderzenia hydraulicznego w taraniu wodnym z zaznaczeniem czasu trwania etapu drugiego (czujnik górny)

Fig. 10. Motion stroke hammer in water, indicating the duration of the second stage (upper sensor)

W początkowej fazie etapu kompresji, trwającej tylko kilka milisekund, rejestruje się najwyższe ciśnienie w całym cyklu pracy tarana wodnego. Wielokrotne pomiary wykazały, że ciśnienie to dochodzi do 3.32 [bar], przy czym nie za każdym razem osiąga ten sam pułap. Przyczyną tego stanu może być ograniczona rozdzielczość czasowa czujników ciśnienia (które to zamiast maksimów fali rejestrują czasem wartość na którymś z jej zboczy) lub też zakłócenia pochodzące z systemów dystrybucji wody (zarówno przewody doprowadzające jak i odprowadzające nie były zamocowane na sztywno i podlegały widocznym drganiom).

4.4. Etap 3 – dekompresja (odrzut)

Etap trzeci rozpoczyna się w chwili, w której sprężysta poduszka powietrzna zaczyna oddawać zgromadzoną energię ciśnienia. Poziom lustra cieczy w zbiorniku tarana zaczyna się obniżać, a woda w strefie **B** przepychana jest w kierunku zaworu zwrotnego oraz przewodu odprowadzającego (Rys. 11).

Rys. 11. Schemat położenia zaworów oraz kierunków przepływu wody drugiego etapu cyklu pracy tarana wodnego

Fig. 11. Schematic positions of valves and flow directions of the second stage of the water cycle ram

Istotną cechą tego etapu jest to, że energia ciśnieniowa rozprężającej się poduszki powietrznej zapobiega spadkowi ciśnienia w strefie **A**, podtrzymując tym samym stan otwarcia zaworu zwrotnego. W przypadku, gdy poduszka powietrzna zostanie odcięta (co zrealizowano przez zamknięcie dodatkowego zaworu znajdującego się przed zaworem zwrotnym), etap ten nie występuje wcale (Rys. 13). Ponieważ ilość zgromadzonej przez poduszkę powietrzną energii jest ograniczona, czas trwania wspomnianego podtrzymania również jest skończony. W przypadku przedstawionym na Rys. 12 czas ten wynosi około 55 [ms]. Stanowi to 18.97 % czasu trwania pojedynczego cyklu pracy.

Rys. 12. Przebieg uderzenia hydraulicznego w taranie wodnym z zaznaczeniem czasu trwania etapu drugiego (czujnik dolny)

Fig.12. Motion stroke hammer in ram water, indicating the duration of the second stage (lower sensor)

Rys. 13. Przebieg uderzenia hydraulicznego w taranie wodnym bez poduszki powietrznej (czujnik dolny)

Fig. 13. Motion stroke hammer in ram water without airbag (lower sensor)

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwoliły sformułować następujące wnioski końcowe:

1. Sposób inicjalizowania pracy tarana zależy od stanu zalania przewodu odprowadzającego oraz od ciśnienia w strefie **B**. Jeżeli ciśnienie to odpowiada nominalnemu ciśnieniu pracy tarana (co dodatkowo oznacza, że przewód odprowadzający zalany jest całkowicie wodą), to rozruch tarana odbywa się automatycznie po otwarciu zaworu odcinającego zasilanie. W przeciwnym przypadku konieczna jest ingerencja człowieka oraz rozruch ręczny. Aspekt badania rozruchu tarana wodnego doprowadził do pojawienia się dwóch nowych kwestii (do zbadania lub rozważenia w przyszłości): czy rozruch automatyczny możliwy jest przy dowolnej wysokości źródła, przy której taran działa oraz, czy możliwe jest takie zaprojektowanie urządzenia, aby zupełnie wyeliminować w tej fazie potrzebę ingerencji człowieka.
2. Analiza przebiegu uderzenia hydraulicznego (a właściwie serii uderzeń) doprowadziła do konkluzji, że najlepiej jest podzielić cykl pracy na trzy etapy: przyśpieszenie, kompresję i dekompresję. Ostatnie dwie nazwy związane są z zachowaniem się poduszki powietrznej, mającej – jak udowodniono – kluczowe znaczenie na przebieg występujących w taranie zjawisk. Warto podkreślić, że bardzo dobrym pomysłem, ułatwiającym analizę zjawisk, okazało się zbadanie przebiegu uderzenia hydraulicznego z odciętą strefą **B**, a także zastosowanie dwóch czujników, po jednym w każdej ze stref. Duże znaczenie poduszki powietrznej generuje kolejną kwestię do rozważenia w przyszłości: jak zmienia się praca tarana (a także przebieg zjawisk) w zależności od objętości strefy powietrznej? Pytanie to pozostaje na razie otwarte.
3. Podawane standardowo w literaturze informacje o tym, że podstawą działania tarana hydraulicznego jest zjawisko uderzenia hydraulicznego są mało precyzyjne. Jak wykazano, podczas pojedynczego cyklu pracy występuje jedno uderzenie inicjujące oraz kilka uderzeń wtórnych (prace, w których byłaby o tym mowa nie są autorom znane). Dodatkowo przebieg zmian ciśnień jest inny w obu analizowanych strefach tarana. Istotne jest też, aby podczas wyjaśniania przebiegu zjawisk brać uwagę na znaki uderzeń (dodatnie czy ujemne) w poszczególnych strefach.
4. Najdłuższym etapem cyklu pracy tarana wodnego jest etap przyśpieszania, stanowiący około 71 % czasu całego cyklu. Etapy kompresji i dekompresji są krótsze i wynoszą odpowiednio około 10 % i 19 %. Przypuszcza się, że czasy te mogą zależeć od konstrukcji tarana, np. od masy głowicy zaworu impulsowego.
5. W przedstawionym podziale na etapy przyjęto, że zmiany stanów zaworów na początku etapu drugiego i na końcu etapu trzeciego odbywają się jednocześnie. Kwestię tę należy zbadać dokładniej, gdyż nie wyklucza się występowanie niewielkich przesunięć w czasie pomiędzy zmianami stanów poszczególnych zaworów. Otwarta pozostaje również kwestia pomiaru (uwzględnienia) czasów zamykania się lub otwierania tych zaworów.

Przeprowadzone badania pozwoliły osiągnąć zarówno założony cel główny, jak i wszystkie cele jednostkowe. Wydaje się też, że zarówno samo stanowisko badawcze, jak i wykonane analizy wyników są nowością w literaturze dotyczącej taranów wodnych i wniosą pewien wkład w poznanie zjawisk zachodzących podczas pracy tego typu urządzeń. Warto podkreślić, że podczas badań pojawiło się szeregu kolejnych pytań i wątków, sugerując dalsze kierunki badań oraz świadcząc o dużym potencjale naukowym obranej tematyki.

Literatura

- [1] Agriculture and Agri-Food Canada: Water-powered water pumping systems for livestock watering, 2014, [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/ba3468a2a8681f69872569d60073fde1/42131e74693dcd01872572df00629626/\\$FILE/wpower.pdf](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/ba3468a2a8681f69872569d60073fde1/42131e74693dcd01872572df00629626/$FILE/wpower.pdf) [dostęp: 1 lutego 2014].
- [2] Appropedia: Hydraulic ram pumps, 2013, http://www.appropedia.org/Hydraulic_ram_pumps [dostęp: 1 lutego 2014].
- [3] Badur, J., Nałęcz, T.J., Pietkiewicz, P.: Wyznaczanie wartości ciśnienia uderzenia hydraulicznego w przewodach wielowarstwowych. *Mechanika'99 Forum Młodych*, Gdańsk 1999, s. 345-348.
- [4] Bukowski, J.: *Mechanika płynów*, PWN; Warszawa 1965.
- [5] Brown, L.: Ministry of Agriculture and Lands. Using a hydraulic ram to pump livestock water, 2006, <http://www.agf.gov.bc.ca/resmgmt/publist/500Series/590305-9.pdf> [dostęp: 1 lutego 2014].
- [6] Calhoun, J.: Home built hydraulic ram pumps, 2003. <http://www.inthefieldministries.org/jscallo/Home%20Built%20Hydraulic%20Ram%20Pumps.pdf> [dostęp: 1 lutego 2014].
- [7] Clarke, J. W.: Hydraulic rams ther principle and construction, 1900, <https://archive.org/details/hydraulicramsth03clargoog> [dostęp: 18 stycznia 2014].
- [8] Clemson.: Home-made Hydraulic Ram Pump, 2007, <http://www.clemson.edu/irrig/equip/ram.htm#Links> [dostęp: 1 lutego 2014].
- [9] Derkor: How does hydraulic ram work, 2014, <http://www.rampumps.net/face/20120410150106.html> [dostęp: 27 marca 2014].
- [10] Gryboś, R.: *Mechanika płynów z hydrauliką*, 1995, Wydawnictwo Graficzne Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Gliwice, ISBN 0434-0825.
- [11] Gryboś, R.: *Podstawy mechaniki płynów*, PWN, Warszawa.1998, ISBN 83-01-12553-5
- [12] Grygo, D., Sobieski, W.: *Możliwości i obszary stosowania taranów wodnych w obecnych warunkach polskich*, 2014, (wysłano do: wydawnictwa ITP, Woda - Środowisko - Obszary Wiejskie).
- [13] Jeffery, T. D., Thomas, T. H., Smith, A. V., Glover, P. B., Fountain, P. D.: *Hydraulic ramp pumps*, 1992, Intermediate Technology Publications 1992, ISBN 1 85339 172 7.
- [14] Jeżowiecka, K., Szewczyk, H.: *Mechanika płynów*. Wrocław. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001, ISBN 83-7085-597-0. s. 314.
- [15] Jong, P.: Hydraulic rams. 2014, <http://www.slideshare.net/Fatin62c/hydraulic-ram-pump-consumers-guide-delft-university-of-technology> [dostęp: 1 maja 2014].
- [16] Kowalski, P.: Analiza zdolności tłumienia uderzenia hydraulicznego w rurociągu stalowym z bocznikiem z tworzywa sztucznego, 2007, http://pbc.gda.pl/Content/3910/phd_kowalski_pawel.pdf [dostęp: 1 lutego 2014].
- [17] Meribah Ram Pump: Sequences of Operation, 2014, <http://www.meribah-ram-pump.com/index.php?id=32> [dostęp: 27 marca 2014].

- [18] Mitosek, M.: *Mechanika płynów w inżynierii środowiska*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997, ISBN 83-87012-54-8.
- [19] Mohammed, S. N.: Design and Construction of a Hydraulic Ram Pump. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 2007, http://lejpt.academicdirect.org/A11/059_070.pdf [dostęp: 18 stycznia 2014].
- [20] Nałęcz T.J., Pietkiewicz P.: Empiryczna weryfikacja metody wyznaczania prędkości propagacji ciśnieniowej fali uderzeniowej. XI Konferencja Badanie, Konstrukcja, Wytwarzanie i Eksploatacja Układów Hydraulicznych, Cylinder '2001, Szczyrk 2001, s. 255-264.
- [21] Nałęcz T.J., Pietkiewicz P.: Wyznaczanie wartości prędkości fali uderzeniowej w zamkniętych przewodach wielowarstwowych dla przepływów dwufazowych. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Bałtechmasz-2000, Kaliningrad 2000, s. 155-156.
- [22] Nałęcz T.J., Pietkiewicz P.: Wpływ powietrza jako drugiej fazy na prędkość rozchodzenia się fali uderzeniowej w przewodzie wielowarstwowym. X Konferencja Badanie, Konstrukcja, Wytwarzanie i Eksploatacja Układów Hydraulicznych, Cylinder '2000, Szczyrk 2000.
- [23] Nałęcz T.J., Pietkiewicz P.: Wyznaczanie prędkości propagacji ciśnieniowej fali uderzeniowej w hydraulicznych przewodach zamkniętych z uwzględnieniem powietrza, jako drugiej fazy. XII Krajowa Konferencja Pneuma'2000, Kielce 2000, s. 255-262.
- [24] Piekarek, M.: Instalacja urządzeń lokalnych ujęć wody. 713[02].Z1.07, 2006, [http://www.zsb.gliwice.pl/pdf/monter_instalacji_i_urz_san/Monter_instalacji_i_ur-san_713\[02\]_Z1.07_u.pdf](http://www.zsb.gliwice.pl/pdf/monter_instalacji_i_urz_san/Monter_instalacji_i_ur-san_713[02]_Z1.07_u.pdf) [dostęp: 18 stycznia 2014].
- [25] Sheikh, S. i in.: Design methodology for hydraulic ram Pump (hydram), 2013, http://ijmerr.com/ijmerradmin/upload/ijmerr_524d02574aef3.pdf [dostęp: 7 marca 2014].
- [26] Silver, M.: Use of hydraulic rams in Nepal, 1977, <http://www.slideshare.net/Fifi62z/ram-pump66> [dostęp: 1 maja 2014].
- [27] SolarLogic: How a Ram Pump Works, 2014, <http://www.homepower.com/how-ram-pump-works> [dostęp: 28 marca 2014].
- [28] Tarasewicz, S.: Tartak Raphaelsonów zyskał pierwszy eksponat, 2012, <http://naszolsztyniak.pl/75199,Tartak-Raphaelsonow-zyskal-pierwszy-eksponat.html#axzz2qb61vxTw> [dostęp: 18 stycznia 2014].
- [29] Taye, T: Hydraulic ram pump, 1998, *Journal of the ESME*, Vol II, No. 1, July 1998, http://www.africantechforum.org/ESME/hydram1/HydRam1.htm#OPERATION_OF_A_HYDRAM, [dostęp: 1 maja 2014].
- [30] Watt, S. B.: A manual on the hydraulic Ram for pumping water, 1975, [http://www.watersanitationhygiene.org/References/EH_KEY_REFERENCES/WATER/Water%20Pumping/Ram%20Pumps/Hydraulic%20Ram%20Pump%20Manual%20\(ITDG\).pdf](http://www.watersanitationhygiene.org/References/EH_KEY_REFERENCES/WATER/Water%20Pumping/Ram%20Pumps/Hydraulic%20Ram%20Pump%20Manual%20(ITDG).pdf) [pozyskano: 1 maja 2014].

STAGES OF WORK RAM WATER

Summary

The article presents in detail the principle of operation of a device called a ram pump and discusses the operational steps of its work in relation to the water hammer phenomenon, which is the basis of operation of this type of equipment. In different points of article described history rams water, classical theory of hammer developed at the Nikolai Zhukovsky in 1889 and it a modern extension, described the typical ram of water, characterized the function of each of its components and presents the conditions under which water ram can properly work. The most important

element of the work is the description of the water cycle ram broken down into stages. The motivation to write this article was the observation that in the literature, both Polish and foreign, there is a similar type descriptions, and popular-science materials, mostly found on various websites are often too general (and sometimes incorrect), which not meet the requirements of scientific sources. The most important new feature included in the work, and at the same time its main objective is to combine the description of action rams the course of the water hammer. The article is a continuation of the cycle associated with the exploration of current possibilities of practical use of rams water as possible a wide range of applications.

Keywords: ram water, water hammer, energy flow, the principle of action

DOI:10.7862/rb.2014.49

Przesłano do redakcji: lipiec 2014 r.

Przyjęto do druku: wrzesień 2014 r.