

SZYMON IMIEŁOWSKI¹⁾BARTOSZ ŚNIEGOCKI²⁾

PROTECTION OF PIPELINE BRIDGES AGAINST VIBRATIONS CAUSED BY A WATER HAMMER

ZABEZPIECZENIE MOSTÓW RUROCIĄGOWYCH PRZED DRGANIAMI WYWOŁANYMI UDERZENIEM HYDRAULICZNYM

STRESZCZENIE. W systemach transportu rurociągowego mosty są obiektami, bardziej niż inne elementy instalacji, narażonymi na działanie obciążeń wyjątkowych i związane z nimi awarie. Przykładem takiego obciążenia jest uderzenie hydrauliczne, zjawisko polegające na gwałtownej zmianie ciśnienia cieczy spowodowanej np. nagłym zamknięciem lub otwarciem zaworu, awarią pomp lub nagłym wyłączeniem energii elektrycznej. W artykule omówiono przyczyny uderzenia hydraulicznego i możliwe zniszczenia nim spowodowane. Zawarto przegląd aktualnie stosowanych metod ochrony przed uderzeniem hydraulicznym i wskazano możliwości rozwoju konstrukcji służących do tego urządzeń. Wykonano porównanie efektywności trzech wybranych systemów ochrony przed uderzeniem hydraulicznym. W pracy zwrócono uwagę na fakt, że w przypadku mostów rurociągowych o dużych rozpiętościach, zwłaszcza mostów wiszących, częstości drgań własnych mostu mogą odpowiadać częstości zmian ciśnienia fali uderzenia hydraulicznego i być powodem wzmocnienia drgań rurociągu. Wskazano na możliwości redukcji drgań rurociągu przez zastosowanie eliminatorów drgań lub elastycznych podpór. Podkreślono wagę wnikliwej analizy dynamicznej konstrukcji, wyznaczenia spektrum częstości własnych i odpowiadających im kształtów form własnych.

SŁOWA KLUCZOWE: częstości drgań własnych rurociągowych mostów wiszących, mosty rurociągowy, ochrona przed uderzeniem hydraulicznym, uderzenie hydrauliczne.

ABSTRACT. In pipeline systems, bridges are much more exposed to exceptional loadings and related failures than other elements of hydraulic plants. Water hammer, a phenomenon of abrupt change in fluid pressure caused by e.g. the sudden closing or opening of a valve, pump failure or a power cut, is an example of such a loading. The reasons for this phenomenon and the possible failure it can cause are discussed in the article. An overview of the currently used protection methods against a water hammer and the possibilities of the protection devices development are shown. The effectiveness of three selected systems of protecting against a water hammer is discussed in detail. It is underlined that in the case of large-span pipeline bridges, especially suspension bridges, natural frequencies of the bridge can coincide with the frequency of the fluid pressure wave caused by a water hammer. This resonance can cause excitation of pipeline bridge vibrations. The possibilities of eliminating pipeline vibrations by applying vibration absorbers or flexible supports are pointed out. The importance of the need of detailed structural dynamic analysis and the determination of eigenfrequencies with their corresponding eigenforms is highlighted.

KEYWORDS: eigenfrequencies of pipeline suspension bridges, pipeline bridges, protection against water hammer, water hammer.

DOI: 10.7409/rabdim.017.005

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa; szymon.imielowski@is.pw.edu.pl (✉)

²⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska; bartosz.sniegocki@is.pw.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Ze względu na niskie koszty eksploatacji w porównaniu do innych metod, transport rurociągowy jest bardzo często wykorzystywany do przesyłu na duże odległości różnego rodzaju mediów: wody, ścieków, ropy naftowej i jej produktów czy też zawiesin np. produktów odpadowych kopalni węgla, miedzi. Istotnym elementem drogi transportu są przeprawy przez przeszkody naturalne, rzeki i wąwozy, czy też obiekty inżynierskie takie jak drogi czy linie kolejowe. W przypadku gdy przejście podziemne nie jest możliwe, np. z powodu zbyt słabego gruntu lub niekorzystnego oddziaływania na środowisko, stosuje się przeprawy mostowe. Mogą to być rurociągi zamocowane bezpośrednio do istniejącego mostu lub konstrukcje samodzielne, takie jak konstrukcje samonośne lub rurociągi zamocowane do konstrukcji wsporczej, belkowej, łukowej lub kratownicowej czy też konstrukcje wiszące. Przykłady przedstawiono na Rys. 1 i 2.



a)



b)



c)

1. INTRODUCTION

Pipeline transport, due to the low costs of exploitation when compared to other methods, is very often used to deliver various types of media over long distances e.g. water, sewage, oil and its products and also suspensions such as waste products from coal or copper mines. Passages through natural obstacles, rivers, valleys or other engineering structures such as roads or railways are an important element of a transport system. Bridge passages are used in cases when the execution of an underground passage is not possible e.g. when the soil is too weak or due to harmful influences on the environment. They could be in the form of pipelines that are assembled directly to an existing bridge, or independent structures such as self-supporting or suspension structures like pipelines that are attached to a supporting beam, arch or truss structure. Examples are shown in Figs. 1 and 2.

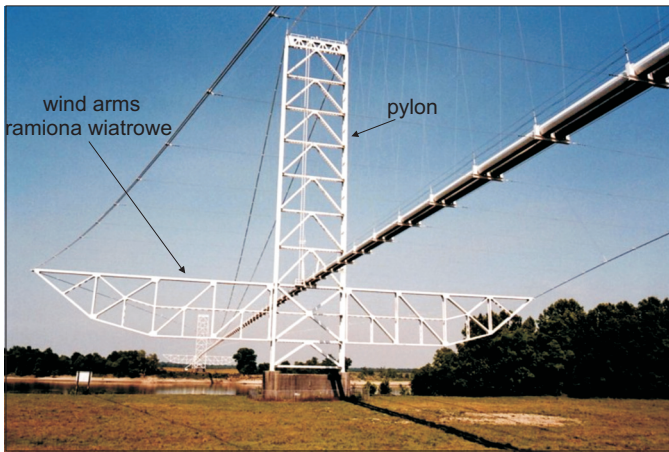
Fig. 1. Examples of pipeline bridge structures: a) a conduit attached directly to an existing bridge, Pomorski Bridge in Wrocław, photo by W. Skupin [1], b) conduits attached to a supporting truss structure, bridge in Chavara, India [2], c) a self-supporting structure, the Brody-Adamowo pipeline [3]

Rys. 1. Przykłady konstrukcji mostów rurociągowych: a) przewód zamocowany bezpośrednio do istniejącego mostu, Most Pomorski we Wrocławiu, fot. W.Skupin [1], b) przewody zamocowane do wsporczej konstrukcji kratownicowej, most w Chavara, Indie [2], c) konstrukcja samonośna, rurociąg Brody-Adamowo [3]

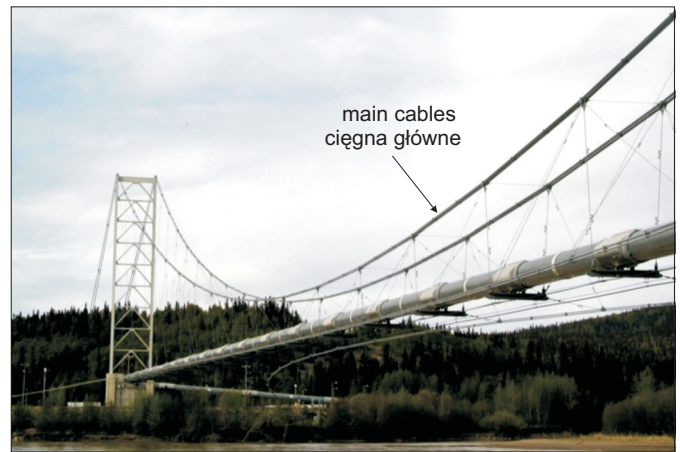
Awaria rurociągowych systemów transportowych może spowodować odcięcie zaopatrzenia w wodę dużych skupisk ludności czy też ośrodków przemysłowych, a w przypadku transportu materiałów ropopochodnych zanieczyszczenie

The failure of pipeline transport systems may result in the cutting off of the water supply to major population or industrial centres, and in the case of the transport of petroleum products can cause a contamination of the natural

środowiska naturalnego. Niepożądane jest również wywołane awarią obniżenie założonych projektem parametrów użytkowych konstrukcji. Z tego powodu należy przewidzieć możliwe sytuacje i mechanizmy prowadzące do jej zniszczenia, które mogą wystąpić podczas eksploatacji czy też konserwacji konstrukcji rurociągu. Konieczne jest określenie własności mechanicznych i dynamicznych konstrukcji, wyznaczenie częstości drgań i form własnych.



a)



b)

Fig. 2. Exemplary constructions of suspension pipeline bridges: a) view of a pylon and wind arms, Atchafalaya River-Melville, Louisiana, USA [5], b) view of a pipeline that is suspended on hangers, Tanana River - Big Delta, Alaska, USA [5]

Rys. 2. Przykłady konstrukcji wiszących mostów rurociągowych: a) widok pylonu i ramion wiatrowych, Atchafalaya River-Melville, Louisiana, USA [5], b) widok zawieszenia rurociągu na ciężnach, Tanana River - Big Delta, Alaska, USA [5]

W porównaniu do mostów drogowych i kolejowych mosty rurociągowy są konstrukcjami, których własności dynamiczne są stosunkowo słabo zbadane. Powstające nowe rozwiązania konstrukcyjne, zmienne warunki ich użytkowania, a także potrzeba wyjaśnienia przyczyn awarii istniejących konstrukcji, wskazują na konieczność ciągłego podejmowania takich badań. Najczęstszym powodem awarii jest zwykle nieprawidłowa eksploatacja, np. wywołanie uderzenia hydraulicznego, czy też pojawienie się obciążeń wyjątkowych, takich jak trzęsienia ziemi lub porywy wiatru. Konstrukcja mostu rurociągowego powinna być dobrze przygotowana na wypadek takich zdarzeń.

Dużą wrażliwość na obciążenia dynamiczne wykazują mosty wiszące o dużych rozpiętościach. Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych i liczne przykłady zamieszczono w pracy [4]. Typową konstrukcją mostu przedstawiono na Rys. 2. Sztywność i nośność mostu wiszącego są zapewnione poprzez system ciężni umieszczonych w płaszczyźnie pionowej i poziomej, zamocowanych do pionowych pylonów i poziomych wsporników tzw. ramion wiatrowych. W tego typu konstrukcjach dźwigarem mostu jest zwykle zawie-

environment. The failure may also cause an undesirable reduction of predicted by designer serviceability of a structure. For this reason, possible situations and mechanisms that lead to destruction and can occur during the operation or maintenance of a pipeline construction should be anticipated. The mechanical and dynamic properties of a structure should be recognized and the frequency of vibrations and eigenforms should be determined.

The dynamic properties of pipeline bridges, when compared to road and railway bridges, are relatively poorly researched. New structural solutions, the variable conditions of their exploitation and the need to explain the reasons of existing structures failures indicate the need to continuously undertaken research. The most common reasons of failure is usually the improper exploitation, that e.g. can bring about the water hammer, as well as occurrence of exceptional loads as earthquakes or wind gusts. The construction of a pipeline bridge should be well prepared for cases of such events.

Long spans suspension bridges are highly sensitive to dynamic loads. A review of constructional solutions and numerous examples are provided in study [4]. A typical bridge structure is shown in Fig. 2. The stiffness and load-bearing capacity of a suspension bridge are ensured by a system of tendons that are located in a vertical and horizontal plane and mounted to vertical pylons and horizontal cantilevers (so-called "wind arms"). In these types of structures, the pipeline conduit creates the bridge girder. It is usually suspended by ropes and is

szony na linach, charakteryzujący się dużą smukłością, przewód rurociągu. Przenoszenie bocznych obciążeń jest zapewnione dzięki układowi poziomych odciągów bocznych, tzw. ciągów wiatrowych.

W przypadku mostów rurociągowych mogą wystąpić istotne różnice pomiędzy projektowanymi i rzeczywistymi wartościami parametrów konstrukcji, w tym własności materiałowych, sił naciągu ciągów czy częstości drgań własnych. Częstości drgań własnych wiszącego mostu rurociągowego, związane z jego sztywnością, w dużej mierze zależą od siły naciągu ciągów, która ulega zmianom podczas eksploatacji. Przyczynami tych zmian są np. relaksacja naprężeń, zmiany sztywności wywołane oblodzeniem, awarie ciągów wywołane obciążeniami wyjątkowymi. Bardzo ważnym elementem analizy aerodynamicznej jest zwłaszcza zjawisko oblodzenia ciągów. Zwykle wpływa ono niekorzystnie na parametry eksploatacyjne, np. drgania wywołane galopowaniem, ale może mieć również wpływ korzystny. W pracy [6] autorzy stwierdzili, że podwójny wzrost masy rurociągu spowodowany oblodzeniem może wzmocnić jego odporność na obciążenie wiatrem o 160%. W procesie projektowania należy również uwzględnić zmiany własności materiału rurociągu podczas eksploatacji, które mogą być spowodowane zmianami reologicznymi, zmęczeniowymi czy też korozją.

Przykład rurociągu podwieszono do istniejącego mostu przedstawiono na Rys. 1a. W tym przypadku istotny wpływ na charakterystyki dynamiczne ma sposób zamocowania przewodu do mostu. Drgania mostu wywołane głównie ruchem pojazdów, poprzez podpory, mogą być przenoszone na rurociąg stanowiąc dodatkowe źródło wzbudzenia. Istotne jest więc, aby elementy mocujące rurociąg zachowywały elastyczność w szerokim zakresie temperatur występujących w ciągu roku. Tę tematykę podejmują autorzy prac [7-9].

2. UDERZENIE HYDRAULICZNE

W systemach transportu cieczy mosty rurociągowie są szczególnie wrażliwe na zagrożenia związane ze zjawiskiem uderzenia hydraulicznego, polegającym na gwałtownej zmianie ciśnienia w przewodzie transportującym ciecz pod ciśnieniem. Przyczyną uderzenia hydraulicznego może być według [10-11]:

- nagłe otwarcie lub zamknięcie zaworu,
- uruchomienie lub zatrzymanie pomp, np. w wyniku awarii pomp lub niespodziewanego wyłączenia energii elektrycznej zasilającej zespoły pompujące,
- zgromadzone powietrze w wyniku awarii zaworów odpowietrzających,

characterized by a high slenderness ratio. For carrying side loads a set of horizontal side struts (so-called “wind tendons”) is provided.

Significant differences between the designed and actual values of structural characteristics, including material properties, tendons tension forces or eigenfrequencies, can occur in the case of pipeline bridges. Particularly the eigenfrequencies of a pipeline suspension bridge, which relates to its rigidity, can significantly vary during the bridge exploitation. The reason for that is variation of the tendons tension force due to stress relaxation, changes in stiffness caused by icing or failures of tendons caused by exceptional loads. A very important element of aerodynamic analysis is the phenomenon of tendons icing. It usually has a negative influence on serviceability like vibrations induced by galloping, however, it can also be beneficial. In study [6], the authors found that a double increase in the weight of a pipeline due to ice can strengthen its wind load resistance by 160%. Design process should include variation of the pipeline material properties during its exploitation, caused e.g. by rheological changes, fatigue or corrosion.

An example of a pipeline connected to an existing bridge is shown in Fig. 1a. In this case, the method of attaching the conduit to the bridge significantly influences on its dynamic characteristics. The vibrations of the bridge, caused mainly by vehicle traffic, can be transferred to the pipeline through supports being an additional source of excitation. It is therefore essential that the pipeline assembly elements should remain flexible over the wide temperature range that occurs in a calendar year. This issue was undertaken by the authors of studies [7-9].

2. THE WATER HAMMER

In transport systems of liquids, pipeline bridges are particularly sensitive to danger influence associated with the water hammer phenomenon, a sudden change of pressure in a conduit that transports liquid under pressure. A water hammer can be caused, according to [10-11], by the following conditions:

- a sudden opening or closing of a valve,
- the starting or stopping of pumps, e.g. as a result of pump failure or an unexpected shutdown of the electricity that supplies pump units,
- air concentration due to a vent valve failure,
- badly designed safety valves that protect against overpressure or the failures of such valves.

- nieprawidłowo zaprojektowane zawory zabezpieczające przed wzrostem ciśnienia lub ich awarie.

Wskutek uderzenia hydraulicznego energia kinetyczna cieczy ulega zamianie na energię ściśliwości cieczy i sprężystości rur. Powstaje fala ciśnienia charakteryzująca się dużymi zmianami ciśnienia, które można wyznaczyć ze wzoru Żukowskiego [10]:

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot \Delta v, \quad \Delta v = v_o - v_k, \quad (1)$$

$$\Delta v \approx v_o, \quad c = \frac{a}{\sqrt{1 + \psi \frac{KD}{Ee}}}, \quad a = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (2)$$

gdzie:

Δp	zmiana ciśnienia cieczy,
ρ	gęstość cieczy,
c	prędkość fali zmian ciśnienia,
v_o	prędkość początkowa (np. w ruchu ustalonym),
v_k	prędkość końcowa (po zmianie prędkości w czasie),
K	współczynnik ściśliwości cieczy,
D	średnica przewodu,
e	grubość ścianki przewodu,
E	moduł Younga ścianki przewodu,
ψ	współczynnik uwzględniający sposób zamocowania rurociągu: $\psi = 1,25 - \mu$ dla rurociągu zamocowanego w jednym końcu, $\psi = 1 - \mu^2$ dla rurociągu zamocowanego na całej długości, $\psi = 1 - 0,5 \cdot \mu$ dla rurociągu wyposażonego w połączenia kompensacyjne, μ - wsp. Poissona.

Wzór Żukowskiego jest spełniony w miejscu wywołania zjawiska. Obliczane z tej zależności przyrosty ciśnienia będą zachowane na długości rurociągu w przypadku pominięcia strat ciśnienia.

Wzrost ciśnienia powoduje wzrost obciążenia rurociągu. Na przykład, w poziomym przewodzie o rozmiarze DN 200 mm i długości 500 m transportującym wodę z prędkością 3 m/s w temperaturze otoczenia, w wyniku szybkiego zamknięcia zaworów ciśnienie może wzrosnąć od 6 bar przy przepływie stacjonarnym do 40 bar w warunkach uderzenia hydraulicznego. W tym samym czasie obciążenie ścianek przewodu, uwzględniając ciężar i siły tarcia wzrasta od 1-5 kN do około 125 kN [12]. Obciążenie powstałe w wyniku uderzenia hydraulicznego może być powodem uszkodzenia przewodu lub połączeń pomiędzy jego elementami,

As a result of a water hammer, a fluid kinetic energy is converted into energy of liquid compressibility and pipe elasticity. A pressure wave characterized by large changes in pressure is formed. It can be determined from the Żukowski formula [10]:

where:

Δp	the change in the pressure of a fluid,
ρ	fluid density,
c	velocity of the pressure variation wave,
v_o	the initial velocity (i.e. in a stationary flow),
v_k	the final velocity (after the change in velocity over time),
K	the liquid compressibility coefficient,
D	pipe diameter,
e	pipe wall thickness,
E	the Young's modulus of a conduit wall,
ψ	the coefficient that refers to the pipeline supporting conditions: $\psi = 1.25 - \mu$ for a pipeline supported at one end only, $\psi = 1 - \mu^2$ for a pipeline mounted along its entire length and $\psi = 1 - 0.5 \cdot \mu$ for a pipeline that has expansion joints, μ - Poisson's ratio.

The Żukowski formula is valid in the location where the phenomenon was induced. Pressure increment calculated from this formula are valid along the length of the pipeline for cases when pressure decreases are omitted.

Pressure jump that follows water hammer phenomenon is a reason of a significant increase of pipeline loading. For example, in a horizontal DN 200 mm conduit with a length of 500 m that transports water with a speed of 3 m/s at an ambient temperature, after the rapid closure of valve the pressure may increase from 6 bars at a stationary flow to 40 bars during a water hammer. At the same time, the load on the conduit's walls, including weight and friction forces, increases from 1-5 kN to about 125 kN [12]. The load caused by a water hammer can damage a conduit or the connections between its elements, as well as pumps,

uszkodzeń pomp, zaworów, zainstalowanej aparatury pomiarowej a także uszkodzeń podpór jak również niekorzystnych wibracji przewodu i hałasu. Przykłady zniszczeń rurociągu wywołanych uderzeniem hydraulicznym przedstawiono na Rys. 3. W wyniku uderzenia hydraulicznego ciśnienie cieczy w przewodzie może spaść do wartości mniejszej niż wartość ciśnienia atmosferycznego i doprowadzić do kawitacji lub kolapsu rurociągu (Rys. 3a).



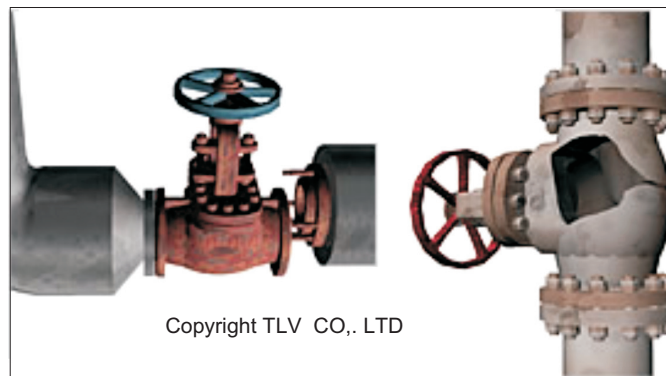
a)



c)



b)



Copyright TLV CO., LTD

d)

Fig. 3. Selected effects of a water hammer: a) collapsing [11], b) cracking of a pipe [11], c) weakening of a seal [11], d) destruction of the valve connection and valve casing [13]

Rys. 3. Wybrane skutki uderzenia hydraulicznego: a) kolaps [11], b) pęknięcie przewodu [11], c) osłabienie uszczelki [11], d) zniszczenie przyłącza zaworu i obudowy zaworu [13]

3. OCHRONA RUROCIĄGU PRZED SKUTKAMI UDERZENIA HYDRAULICZNEGO

Koszty ochrony konstrukcji przed zniszczeniami wywołanymi uderzeniem hydraulicznym są znaczne, jednak koszty napraw awarii spowodowanych uderzeniem hydraulicznym mogą przewyższyć wielokrotnie poniesione nakłady. Istnieje wiele sposobów zabezpieczenia rurociągu przed skutkami uderzenia hydraulicznego, przedstawionych np. w [10-17], które można stosować w mostach rurociągowych.

3. PROTECTION OF A PIPELINE AGAINST THE EFFECTS OF A WATER HAMMER

The cost of protecting a structure against damage caused by a water hammer is substantial. However, the repairing costs of the failures caused by a water hammer can significantly exceed the incurred expenditure. There are many methods of protecting a pipeline against the effects of a water hammer, which were described e.g. in [10-17], and which can be used in pipeline bridges.

Najprostsze metody zmniejszenia przyrostów ciśnienia cieczy polegają na niedopuszczeniu do powstania uderzenia hydraulicznego poprzez prawidłową eksploatację systemu transportu cieczy. Przykładem takiego działania może być np. odpowiednio długi czas zamykania/otwierania zaworów t_z . Gdy ten czas przekroczy co najmniej 5-krotnie czas powrotu fali odbitej T_R , $t_z > 5 T_R$, powstanie efekt uderzenia nieprostego i w konsekwencji znaczące ograniczenie wartości przyrostu ciśnienia. W hydraulice określa się czas powrotu fali odbitej $T_R = 0,5 T$, gdzie T jest okresem zmian ciśnienia wywołanego uderzeniem hydraulicznym. Innymi metodami łagodzenia skutków uderzenia hydraulicznego są: napowietrzanie strumienia płynącej cieczy zwiększające jej ściśliwość, spowolnienie napełniania sieci poprzez użycie pomp o dużej bezwładności wirnika bądź też zastosowanie falowników zmniejszających obroty [10].

W przypadku uderzenia, które może pojawić się w sposób nieprzewidziany, np. wskutek awarii pompy lub wyłączenia zasilania sieci w energię elektryczną, stosuje się montowane do przewodu dodatkowe zewnętrzne urządzenia zabezpieczające. Często stosowanymi urządzeniami są zawory bezpieczeństwa. Otwarcie zaworów wysokociśnieniowych (Rys. 4a) jest spowodowane bezpośrednio naporem cieczy. W przypadku zaworów niskociśnieniowych (Rys. 4b) zmiana ciśnienia powoduje podniesienie poziomu wody w zbiorniku i zmianę położenia pływaka, którego ruch wzmocniony przełożeniem dźwigni powoduje otwarcie zaworu. Ciecz wypływa na zewnątrz lub do zbiornika wyrównawczego.

Na terenach zurbanizowanych lub gdy transportowana ciecz ma niekorzystny wpływ na środowisko naturalne nie dopuszcza się do wypływu cieczy na zewnątrz. W tym przypadku stosuje się montowane do rurociągu zewnętrzne urządzenia zabezpieczające. Przyrost energii cieczy wywołany uderzeniem hydraulicznym jest rozpraszany bezpośrednio w tych urządzeniach. Urządzeniami zabezpieczającymi mogą być:

- Zbiorniki wodno-gazowe (Rys. 4c), w których zwiększone ciśnienie cieczy powoduje kompresję gazu. Zbiornik przejmuje część cieczy, wydłuża czas hamowania strumienia i tym samym tłumi przyrost ciśnienia wywołany uderzeniem hydraulicznym;
- Zawory o regulowanej prędkości zamykania. W rozwiązaniu przedstawionym na Rys. 4d, w obudowie zaworu umieszczono dodatkowy tłok, pod który, podczas otwierania zaworu, jest włączany gaz o regulowanym ciśnieniu. Powstała w ten sposób poduszka gazowa spowalnia ruch powrotny tłoka wydłużając czas zamykania zaworu. W zaworze na Rys. 4e, ruch kłapy jest regulowany tłumikiem lepko-sprężystym. Prędkość ruchu kłapy jest

The simplest methods of reducing of the pressure jump is to prevent the pipeline against the water hammer occurrence by an appropriate use of liquid transport system. An example of a proper exploitation is for example a sufficiently long time of the opening/closing of valves t_z . When this time exceeds at least 5 times the time of returning wave T_R ($t_z > 5 T_R$), the effect of a complex water hammer will occur and significant reduction of the the pressure increase magnitude appears. In hydraulics, the time of returning wave is determined as $T_R = 0.5 T$, where T is the period of pressure vibration caused by a water hammer. There are other methods of mitigating the effects of a water hammer, which are as follows: aeration of a stream of flowing liquid in order to increase its compressibility, slowing down the process of filling in a network by using pumps with a high inertia rotor and also the use of inverters that reduce turnovers [10].

Additional external safety devices are used in the case of a water hammer that occurs in an unexpected way e.g. as a result of pump failure or a power cut. Safety valves are often used in this case. The opening of high-pressure valves (Fig. 4a) is directly caused by liquid pressure. In the case of low-pressure valves (Fig. 4b), the variation in the pressure causes the rising of the water level in a tank and the change in the position of a float. The movement of the float, which is reinforced by a lever transmission, causes the opening of the valve. The liquid flows out or flows into the surge tank.

In urban areas or when transported liquid has a negative impact on the natural environment, leakage of liquid is not permitted. In such a case, external protection devices are mounted to the pipeline. An increase in the energy of liquid, which is caused by a water hammer, is directly dissipated by these devices. The following can be used as safety devices:

- Water-gas tanks (Fig. 4c), in which the increased pressure of liquid causes the compression of gas. The tank takes some of the liquid, extends the braking time of the stream and thus suppresses the increase in the pressure caused by a water hammer;
- Valves with a regulated velocity of closure. In the solution that is shown in Fig. 4d the valve casing has an additional piston, under which during the opening of the valve, gas with regulated pressure is pumped. The gas cushion that is created in such a way slows down the return movement of the piston and therefore extends the closing time of the valve. In the valve shown in Fig. 4e, the movement of the flap is regulated with a viscoelastic damper. The velocity of the movement

odwrotnie proporcjonalna do aktualnej prędkości cieczy. W rozwiązaniu na Rys. 4f, prędkość zamykania zaworu jest spowalniana hamulcem tarczowym. Klocki hamulcowe są połączone przewodem ciśnieniowym z rurociągiem. Wzrost ciśnienia cieczy powoduje uruchomienie klocków, hamowanie ruchu tarczy połączonej z osią zaworu i spowalnianie zamykania zaworu. Zagadnienia wpływu charakterystyki zamykania zaworu na przebieg zjawiska uderzenia hydraulicznego są tematem pracy [20];

- Wbudowane segmenty rur wykonanych z materiału o podatności większej od podatności materiału pozostałej części rurociągu;
- Dodatkowe boczniki wykonane z materiału elastycznego (Rys. 4g).

of the flap is inversely proportional to the real fluid velocity. In the solution shown in Fig. 4f, the velocity of closing the valve is slowed down with a brake disk. The brake pads are connected with a pressure conduit (brake line) to the pipeline. The increase in fluid pressure activates the brake pads, causes the slowing down of the movement of the brake disk connected to the axle of the valve and slows down the closing of the valve. The effects of closing of the valve on the course of the water hammer phenomenon is the subject of study [20];

- Built-in pipe segments made of material that is more flexible than the rest of pipeline;
- Additional bypasses made of elastic material (Fig. 4g).

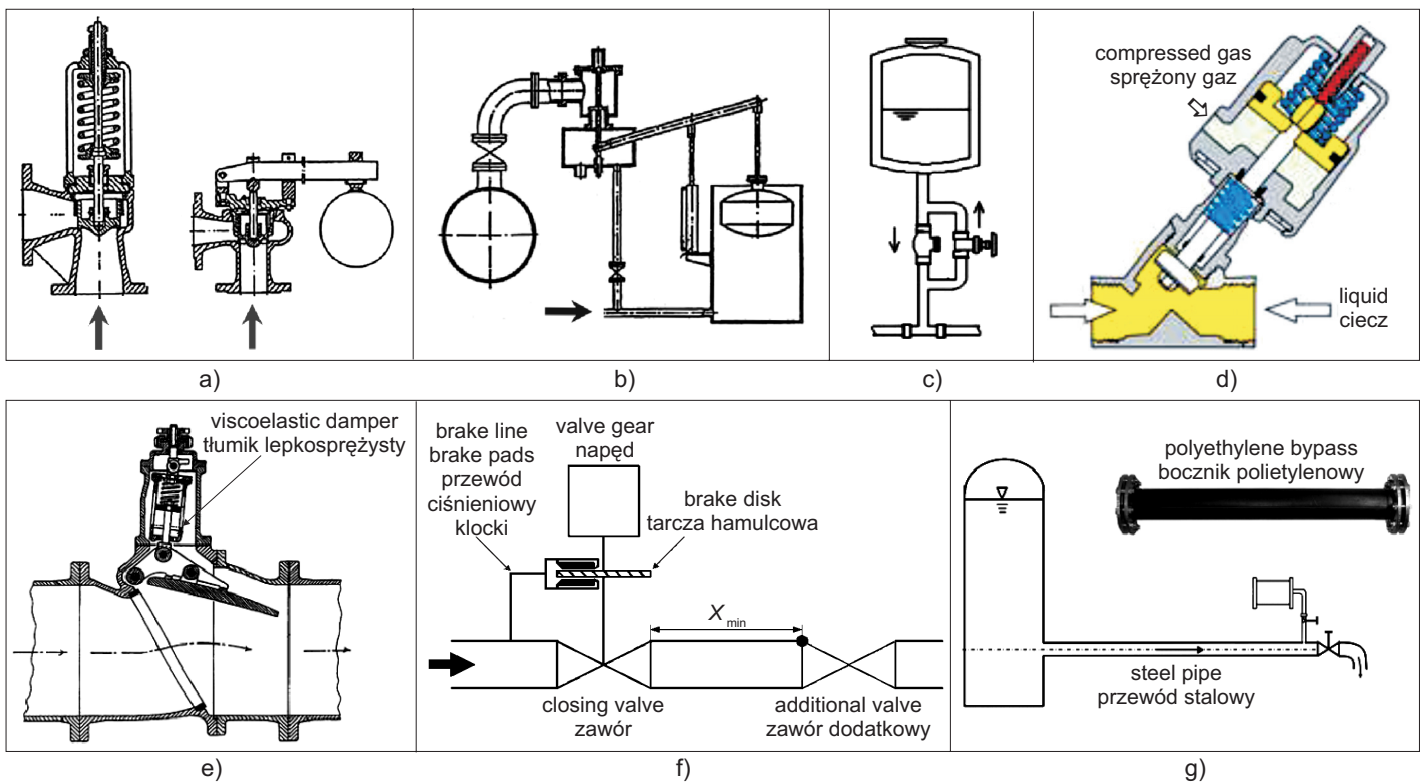


Fig. 4. Devices protecting against the effects of a water hammer: a) high-pressure safety valves [10], b) a low-pressure safety valve [10], c) a water and gas tank [10], d) a spring check valve with an air cushion that slows down the velocity of closing [15], e) a valve with a viscoelastic regulator of the velocity of closing a flap [16-17], f) a valve with a mechanism that regulates the velocity of closing that is controlled by liquid pressure [12], g) an installation with a polyethylene bypass [18-19]

Rys. 4. Urządzenia zabezpieczające przed skutkami uderzenia hydraulicznego: a) zawory bezpieczeństwa wysokociśnieniowe [10], b) zawór bezpieczeństwa niskociśnieniowy [10], c) zbiornik wodno-powietrzny [10], d) zawór zwrotny sprężysty z poduszką gazową opóźniającą prędkość zamykania [15], e) zawór z lepko-sprężystym regulatorem prędkości zamykania kłapy [16-17], f) zawór z mechanizmem regulacji prędkości zamykania sterowanym ciśnieniem cieczy [12], g) instalacja z bocznikiem polietylenowym [18-19]

W przypadku wbudowanych segmentów rur i boczników efekt tłumienia jest spowodowany różnicą pomiędzy częstotliwościami drgań własnych materiału, z którego wykonano

In the case of built-in pipe segments and bypasses, the damping effect is caused by the difference between the eigenfrequencies of a damping device material, and the

urządzenie tłumiące i częstotliwości drgań fali uderzenia hydraulicznego. W przypadku boczników wykorzystywany jest dodatkowo efekt gromadzenia objętości cieczy w boczniku [18-19, 21]. Przy określaniu częstotliwości drgań własnych przewodów i boczników polietylenowych należy wziąć pod uwagę fakt, że polietylen jest materiałem wrażliwym na prędkość odkształcenia. W warunkach zwiększonego ciśnienia wywołanego uderzeniem hydraulicznym obserwuje się wzrost modułu Younga: w przypadku polietylenu HDPE o około 25%, a polietylenu MDPE o około 45%. Badania sztywności materiałów stosowanych do wyrobu przewodów hydraulicznych były tematem prac [22-23].

Należy podkreślić, że w przypadku zbiorników wodno-powietrznych, wstawianych elementów podatnych przewodów jak i boczników, efektywność tłumienia zależy od objętości tych elementów. W przypadku tłumików pojemnościowych (boczników), wykonanych z materiałów odkształcalnych, na przykład z polietylenu, największą efektywność uzyskuje się gdy pojemność tłumika wynosi około 7-10% pojemności całej objętości rurociągu stalowego. W przypadku długich rurociągów, np. o długości 1 km, długość tłumika pojemnościowego powinna wynosić nawet do kilkudziesięciu metrów [24]. Podobnie, z powodu dużych rozmiarów zbiorników wodno-powietrznych, w praktyce stosuje się rozwiązania złożone z kilku mniejszych zbiorników. Znaczne wymiary ww. urządzeń i związane z tym duże koszty stanowią wadę omawianych rozwiązań.

Istotnym elementem projektu mostu rurociągowego jest określenie charakterystyk dynamicznych, wyznaczenie częstotliwości drgań i form własnych. W pracy [25] wyznaczono częstotliwości drgań i formy własne mostu rurociągowego Nakagawa Water-pipe Bridge w Japonii. Pierwszych 15 częstotliwości jest zawartych w zakresie $0,54 \div 1,91$ Hz. Most rurociągowy, o średnicy $D = 900$ mm i długości $L = 492$ m, transportuje wodę, dla której prędkość rozprzestrzeniania się fali wynosi $c = 1452$ m/s. Czas powrotu fali odbitej wynosi $T_R = 2L/c = 2 \cdot 492 / 1452 = 0,69$ s, okres drgań $T = 2T_R = 2 \cdot 0,69 = 1,38$ s, a częstotliwość $f = 1/T = 1/1,38 = 0,72$ 1/s. Częstotliwość drgań fali uderzenia hydraulicznego mieści się więc w zakresie wyznaczonego spektrum częstotliwości drgań własnych mostu. W opisanym przypadku może wystąpić rezonans. Taka sytuacja jest tym bardziej prawdopodobna, że częstotliwości drgań własnych mostu rurociągowego jak i charakterystyki samego rurociągu mogą ulegać zmianie. Wystąpienie częstotliwości rezonansowej powoduje, że oprócz opisanych w Rozdz. 2 zniszczeń typowych dla uderzenia hydraulicznego, wystąpią drgania poprzeczne o zwiększonej amplitudzie, a nawet awaria mostu. Szczegółowa analiza charakterystyk dynamicznych mostów rurociągowych jest niezbędna

frequencies of water hammer vibrations. In the case of bypasses, the effect of keeping of the liquid volume in a bypass is also used [18-19, 21]. When determining the frequency of the eigenvibrations of polyethylene conduits and bypasses, it should be considered that polyethylene is a strain rate sensitive material. In the conditions of increased pressure caused by a water hammer an increase in the Young's modulus can be observed: in the case of HDPE polyethylene amounts to about 25% and in the case of MDPE polyethylene to about 45%. Tests of the stiffness of materials that are used in the manufacturing of hydraulic conduits were the subject of studies [22-23].

It should be noted that in the case of water-gas tanks, inserted flexible elements of conduits and also bypasses, the damping efficiency depends on the volume of these elements. In the case of volume dampers (bypasses) made of deformable materials e.g. polyethylene, the highest efficiency is obtained when the capacity of a damper is about 7-10% of the entire volume capacity of the steel pipeline. In the case of long pipelines e.g. with a length of 1 km, the length of a volume damper should even be equal to tens of meters [24]. Similarly, because of the large size of water and gas tanks, solutions of several connected smaller tanks are used in practice. The significant dimensions of the above-mentioned devices and the high costs associated with that are a disadvantage of these systems.

An important element of a bridge pipeline design is to determine the dynamic characteristics, frequencies of vibrations and also eigenforms. In study [25], the frequencies of vibrations and eigenforms of the Nakagawa Water-pipe Bridge in Japan were determined. The first 15 frequencies are included in the range of $0.54 \div 1.91$ Hz. The pipeline bridge with a diameter of $D = 900$ mm and a length of $L = 492$ m transports water, for which the wave propagation velocity is equal to $c = 1452$ m/s. The time of returning the wave is equal to $T_R = 2L/c = 2 \cdot 492 / 1452 = 0.69$ s, the period of vibration is equal to $T = 2T_R = 2 \cdot 0.69 = 1.38$ s, and the frequency is equal to $f = 1/T = 1/1.38 = 0.72$ 1/s. The frequency of vibrations of the water hammer wave is within the designated range of the frequency of vibration of the bridge. In the described case, resonance can occur. This situation is more probable because of the fact that the frequency of the eigenvibration of the pipeline bridge, as well as the mechanical characteristics of the pipeline, can vary. The occurrence of the resonant frequency causes, apart from damage that is typical for a water hammer and which is described in Section 2, transverse vibrations with increased amplitude and even failure of the bridge. Detailed analysis of the dynamic characteristics

w przypadku mostów budowanych na terenach zagrożonych trzęsieniami ziemi. W tym przypadku charakterystyka częstotliwościowa obciążenia jest bardzo zróżnicowana [25].

Powyższe uwagi stanowią wskazówki do określenia niezbędnych funkcji zastosowanych urządzeń tłumiących drgania mostów rurociągowych, zarówno efektów uderzenia hydraulicznego jak i nadmiernych drgań wywołanych rezonansem. Urządzenia te powinny skutecznie przeciwdziałać drganiom z określoną, jedną częstotliwością jak również efektywnie działać w zakresie częstości niebezpiecznych z punktu widzenia możliwości powstania rezonansu. Wskazana jest również możliwość zmiany częstości drgań urządzenia podczas eksploatacji obiektu. Obydwa zjawiska, uderzenie hydrauliczne i rezonans powodują powstanie drgań poprzecznych rurociągu. Istnieje wiele sposobów tłumienia drgań poprzecznych. W praktyce stosuje się m.in. tłumiące drgania elastyczne podpory lub dynamiczne eliminatory drgań.

Prawidłowe podparcie rurociągu zapewniające tłumienie drgań wywołanych uderzeniem hydraulicznym jest bardzo ważne w przypadku przewodów zamocowanych do konstrukcji wsporczej lub do istniejących mostów (Rys. 1ab). Autorzy pracy [7-9] wykorzystują metody eksperymentalnego wyznaczenia naprężeń w płaszczu przewodu, zarówno przy obciążeniach statycznych jak i dynamicznych. Stwierdzili, że zastosowanie odpowiednio zaprojektowanych elastycznych podpór może zmniejszyć wartości naprężeń wywołanych obciążeniem dynamicznym nawet o 40%.

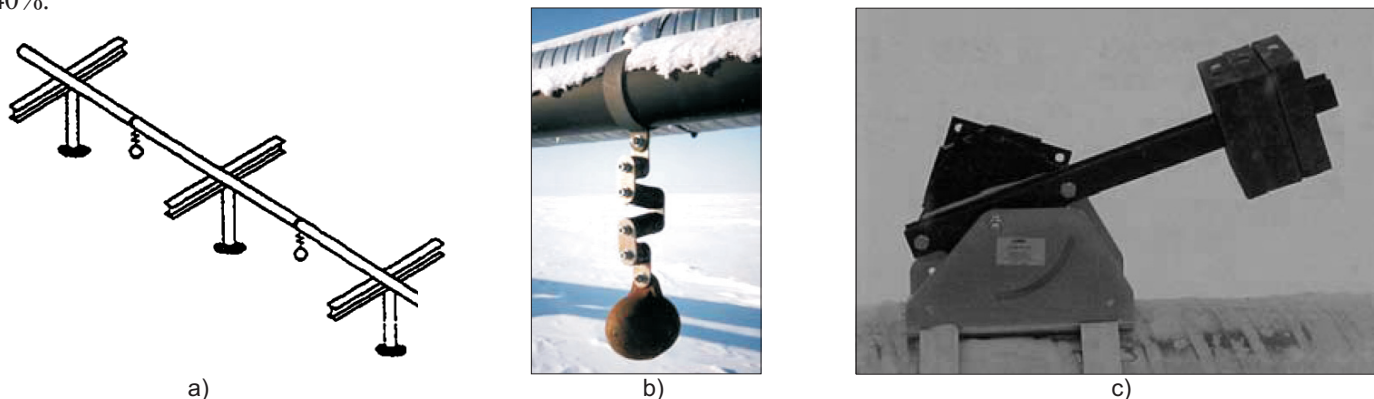


Fig. 5. Protection of the pipeline against excessive vibration with the use of dynamic dampers, Alaska, USA [26-27]:

a) view of the above ground pipeline, b) the dynamic eliminator, c) the water hammer damper

Rys. 5. Zabezpieczenie rurociągu przed nadmiernymi drganiami z wykorzystaniem tłumików dynamicznych, Alaska, USA [26-27]:

a) widok estakady rurociągu, b) eliminatory dynamiczne, c) tłumik uderzeniowy

W przypadku systemów transportu rurociągowego zastosowanie dynamicznych eliminatorów drgań w rurociągach budowanych na Alasce zaproponował *J.D. Hart* ze współpracownikami [26-27]. W tym przypadku konieczność

of pipeline bridges is essential in the cases of bridges built in areas with a risk of earthquakes. In this case, the frequency characteristics of loading are varied [25].

These observations provide clues to determine the necessary functions of the devices that are used for damping of the pipeline bridges vibrations caused by a water hammer, and also the excessive vibrations caused by resonance. These devices should effectively counteract vibrations with a specified single frequency, as well as effectively operate in the range of frequencies that are dangerous due to the possibility of occurrence of resonance. The device should have possibility to adjust its eigenfrequency during bridge exploitation. Both reasons, water hammer and resonance, reveals in transverse vibrations. There are many ways of absorbing of transverse vibrations. Vibration-damping elastic supports or dynamic vibration absorbers are used in practice.

Notice that in the case of conduits attached to a supporting structure or directly to existing bridges (Fig. 1ab), the proper pipeline supporting conditions are very important for absorbing vibrations brought about by a water hammer. The authors of studies [7-9] use experimental methods to determine the stresses in a conduit wall due to static and dynamic loads. They found that using suitably designed elastic supports can reduce the values of stresses caused by dynamic loading by up to 40%.

In the case of pipeline transport systems the use of dynamic vibration absorbers for pipelines that were built in Alaska was proposed by *J.D. Hart* and his coworkers [26-27]. In this case, heavy ground conditions and the

zapewnienia swobodnego przejścia zwierząt i niekorzystne warunki gruntowe spowodowały, że rurociąg poprowadzono na podporach w postaci estakady (Rys. 5a). Do redukcji drgań wykorzystano eliminatory dynamiczne (Rys. 5b) i tłumiki uderzeniowe (Rys. 5c).

4. PORÓWNANIE EFEKTYWNOŚCI WYBRANYCH METOD TŁUMIENIA DRGAŃ WYWOŁANYCH UDERZENIEM HYDRAULICZNYM

Na Rys. 6 zestawiono wykresy efektywności trzech wybranych metod tłumienia fali uderzenia hydraulicznego. Wyniki dotyczą urządzeń przedstawionych na Rys. 4e, 4f, 4g.

Przedstawione urządzenia są systemami pasywnymi, nie wymagają dodatkowych źródeł energii. Przy ocenie efektywności urządzenia tłumiącego uwzględniono zjawiska towarzyszące tłumieniu fali uderzenia hydraulicznego, takie jak zmniejszenie amplitudy fali ciśnienia wywołanej uderzeniem czy zmianę średniej wartości ciśnienia. Ważnym parametrem jest najmniejsza wartość ciśnienia, która wystąpi w warunkach uderzenia hydraulicznego. Ze względu na możliwość powstania kawitacji lub kolapsu (Rys. 3a), dolna wartość ciśnienia powinna być większa od zera. Nie wskazane jest podciśnienie. Mając na uwadze powyższe zjawiska do oceny efektywności przyjęto następujące definicje:

$$\eta_{Ag} = \frac{A_1 - A_{t1}}{A_1}, \quad \eta_{Ad} = \frac{A_2 - A_{t2}}{A_2}, \quad \eta_d = \frac{\Delta p}{P_{st}}, \quad \eta_{\Delta} = \frac{\Delta p}{P_{st}}, \quad (3)$$

gdzie:

η_{Ag}, η_{Ad} redukcja górnej/dolnej amplitudy fali uderzenia hydraulicznego,

η_d maksymalny spadek ciśnienia fali tłumionej,

η_{Δ} względna zmiana ciśnienia średniego,

A_1, A_2 górna i dolna amplituda fali nietłumionej,

A_{t1}, A_{t2} górna i dolna amplituda fali tłumionej,

Δp zmiana średniej wartości ciśnienia, $\Delta p = p_{sr} - p_{st}$,

p_{sr} średnia wartość ciśnienia fali tłumionej,

p_{st} średnia wartość ciśnienia przepływu stacjonarnego,

A_d dolna amplituda fali tłumionej względem ciśnienia przepływu stacjonarnego,

$$A_d = p_{st} + \Delta p - A_{t2}.$$

need of the free passage for animals caused that the conduit was placed on supports in the form of above ground pipeline (Fig. 5a). Dynamic vibration absorbers (Fig. 5b) and hammer dampers (Fig. 5c) were used to reduce vibrations.

4. COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF SELECTED METHODS OF DAMPING THE VIBRATIONS CAUSED BY A WATER HAMMER

Diagrams of the effectiveness of three selected methods of damping a water hammer wave are presented in Fig. 6. The results relate to the devices shown in Figs. 4e, 4f, 4g.

The presented devices are passive systems and they therefore do not require additional sources of energy. When evaluating the effectiveness of a damping device, phenomena associated with the water hammer wave absorbing, such as reduction of the amplitude of the pressure wave caused by a water hammer, a change in the average value of the pressure and the minimum value of pressure that occurs during a water hammer was taken into account. Due to the possibility of the occurrence of cavitation or collapsing (Fig. 3a), the lowest value of pressure should be bigger than zero. A negative pressure is inadvisable. Considering the above phenomena, the following definitions were assumed in order to assess effectiveness:

where:

η_{Ag}, η_{Ad} a reduction of the upper / lower amplitude of a water hammer wave,

η_d the maximum drop in pressure of the damped wave,

η_{Δ} the relative change in average pressure,

A_1, A_2 the upper and lower amplitude of the undamped wave,

A_{t1}, A_{t2} the upper and lower amplitude of the damped wave,

Δp the change in the average value of pressure, $\Delta p = p_{sr} - p_{st}$,

p_{sr} the average value of the pressure of the damped wave,

p_{st} the average value of the pressure of a stationary flow,

Efektywności wybranych urządzeń określono procentowo i zestawiono w Tabl. 1.

A_d the lower amplitude of the damped wave in relation to the pressure of a stationary flow,

$$A_d = p_{st} + \Delta p - A_{t2}.$$

The effectiveness of the selected devices was specified in percentage and is summarized in Table 1.

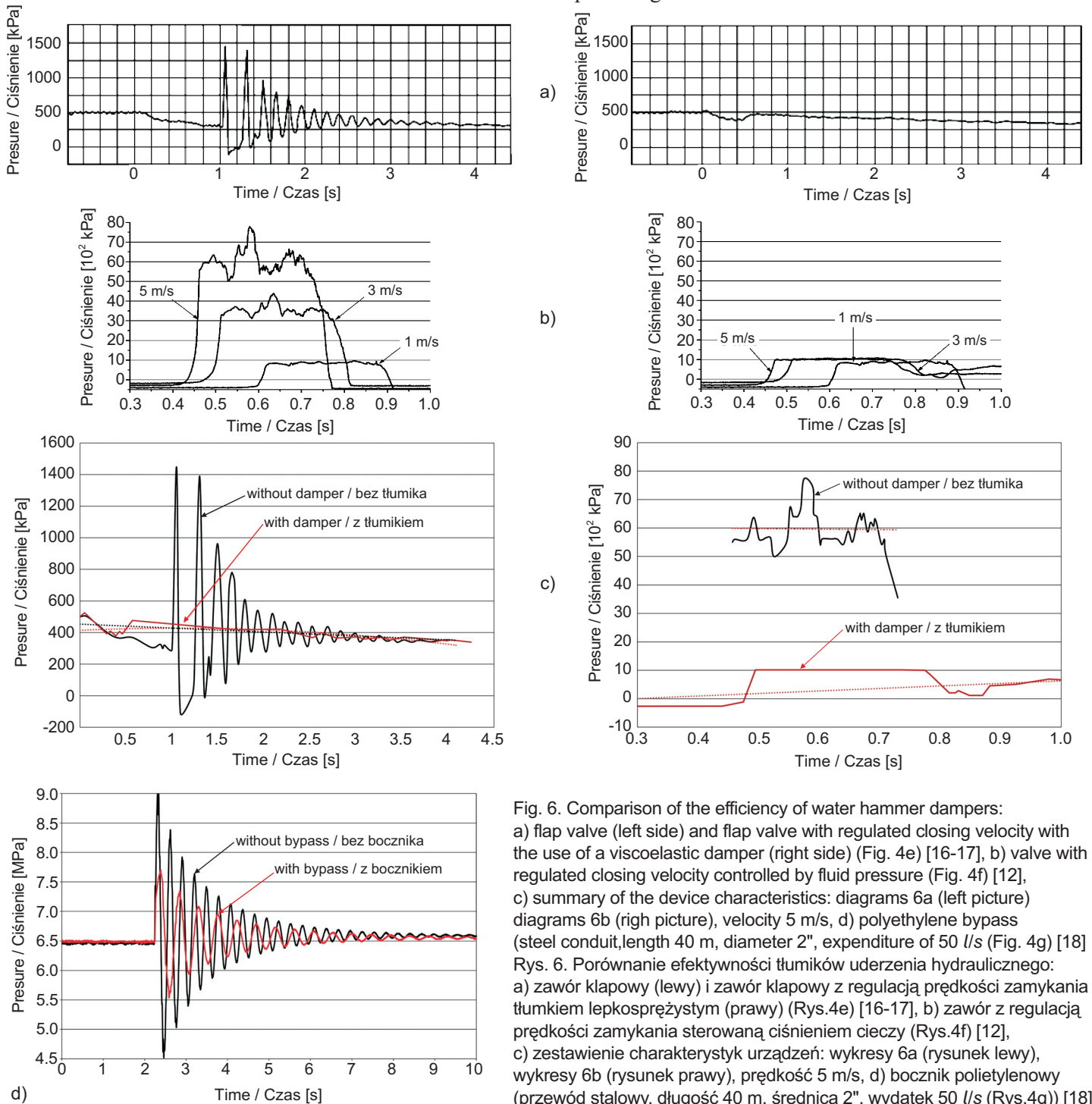


Fig. 6. Comparison of the efficiency of water hammer dampers: a) flap valve (left side) and flap valve with regulated closing velocity with the use of a viscoelastic damper (right side) (Fig. 4e) [16-17], b) valve with regulated closing velocity controlled by fluid pressure (Fig. 4f) [12], c) summary of the device characteristics: diagrams 6a (left picture) diagrams 6b (right picture), velocity 5 m/s, d) polyethylene bypass (steel conduit, length 40 m, diameter 2", expenditure of 50 l/s (Fig. 4g) [18] Rys. 6. Porównanie efektywności tłumików uderzenia hydraulicznego: a) zawór klapowy (lewy) i zawór klapowy z regulacją prędkości zamykania tłumikiem lepkosprężystym (prawy) (Rys.4e) [16-17], b) zawór z regulacją prędkości zamykania sterowaną ciśnieniem cieczy (Rys.4f) [12], c) zestawienie charakterystyk urządzeń: wykresy 6a (rysunek lewy), wykresy 6b (rysunek prawy), prędkość 5 m/s, d) bocznik polietylenowy (przewód stalowy, długość 40 m, średnica 2", wydatek 50 l/s (Rys.4g)) [18]

Table 1. Comparison of the effectiveness of selected protection methods against the effects of a water hammer
 Tablica 1. Porównanie efektywności wybranych metod ochrony przed skutkami uderzenia hydraulicznego

Diagram number in Fig. 6 Nr wykresu na Rys. 6	Pressure reduction / Redukcja ciśnienia			Drop in pressure of a damped wave Spadek ciśnienia fali tłumionej η_d [%]	Change of average pressure Zmiana ciśnienia średniego η_Δ [%]
	Upper amplitude Amplituda górna η_{Ag} [%]	Lower amplitude Amplituda dolna η_{Ad} [%]	Average value of amplitude (col. 2 and 3) Wartość średnia amplitudy (kol. 2 i 3) [%]		
1	2	3	4	5	6
a)	89.3	91.8	90.6	10.2	0
b)	68.0	-13.7	40.8	-25.1	93.4
d)	14.9	22.3	18.6	10.1	2.3

W celu oceny efektywności urządzeń pokazanych na Rys. 4e i Rys. 4f (przypadek prędkości przepływu 5 m/s), zestawiono wykresy zmian ciśnienia wybranych urządzeń. Wartości rzędnych zostały odczytane z wykresów publikowanych w pracach [12] i [16]. Dla rozwiązania prezentowanego na Rys. 4e, autorzy porównali efektywność zaworu regulowanego do zwykłego zaworu klapowego, dla którego wykres zmian ciśnienia przedstawiono na lewym wykresie Rys. 6a. W tym przypadku odwrócenie kierunku przepływu powoduje w każdym cyklu zamknięcie zaworu i odbicie cieczy od opuszczonej kłapy. Elementem korygującym prędkość zamykania kłapy zaworu regulowanego jest tłumik lepkosprężysty. Wzrost prędkości przepływu powoduje zwiększenie oporu tłumika i spowolnienie ruchu kłapy. Praca zaworu regulowanego jest bardzo efektywna bowiem następuje wygaszenie już pierwszej fali uderzenia hydraulicznego, co widać na prawym wykresie Rys. 6a.

W przypadku zaworu pokazanego schematycznie na Rys. 4f, możliwa jest adaptacja urządzenia do aktualnych zmian ciśnienia niezależnie od rodzaju i prędkości cieczy, czy długości przewodu, co zilustrowano na wykresie na Rys. 6b. Możliwe jest również ustawienie dopuszczalnego poziomu ciśnienia wyjściowego, wobec czego przyjęta powyżej definicja efektywności nie jest miarodajna. Zapisany wynik dotyczy konkretnego przykładu przedstawionego na wykresie. Autorzy pracy [12] nie podają informacji dotyczących optymalnej wartości ciśnienia i zalecanych warunków eksploatacji.

Analiza zestawionych w tablicy danych wskazuje na wysoką efektywność urządzenia „a)”. Wygaszenie fali uderzenia nie jest związane ze zmianą średniej wartości ciśnienia, w warunkach uderzenia hydraulicznego występuje tylko nieznaczny spadek ciśnienia. Wyniki przedstawione przez autorów urządzenia „b)” również wskazują na jego wysoką efektywność. Należy jednakże mieć na uwadze możliwość

In order to evaluate the effectiveness of the devices shown in Figs. 4e and 4f (a case of a flow rate of 5 m/s), diagrams of pressure variation of the selected devices were compared. The values of ordinates were read from the diagrams published in studies [12] and [16]. For the solution presented in Fig. 4e, the authors compared the efficiency of the regulated valve to the non-regulated flap valve, for which the changes in pressure is shown on the left diagram in Fig. 6a. In this case, the reversal in the flow direction causes the closure of the valve in each cycle and a reflection of fluid from the closed flap. An element that corrects the velocity of closing the flap of a regulated valve is a viscoelastic damper. The increase in the flow velocity causes an increase in the damper's resistance and the slowing down of the flap. The regulated valve is very effective because the first wave of a water hammer is effectively damped, that can be seen on the right diagram in Fig. 6a.

In the case of the valve shown schematically in Fig. 4f, the adjustment of the device to the actual pressure variations, regardless of the type and velocity of the liquid or the length of the conduit, is possible and illustrated in the diagram in Fig. 6b. It is also possible to set an acceptable level of output pressure and therefore, the above proposed definition of the efficiency is not authoritative. The recorded result refers to the specific example shown in the diagram. The authors of study [12] do not provide information regarding the optimum value of pressure and the recommended operating conditions.

Analysis of the data summarized in the table indicates the high effectiveness of device “a)”. The absorbing of the water hammer wave does not cause the change of the pressure average value, only a slight pressure drop occurs during a water hammer. The results presented by the authors for device “b)” show its high effectiveness. It should,

wystąpienia podciśnienia w początkowym etapie tłumienia oraz wkrótce po wytłumieniu fali, co jest zjawiskiem niekorzystnym. Polietylenowe boczniki wykazują najmniejszą efektywność tłumienia, ale ich zaletą jest niewielka zmiana wartości ciśnienia średniego i niewielki spadek ciśnienia. Wybór odpowiedniego urządzenia jest związany ze specyfiką każdego obiektu mostowego: średnicą przewodu, dopuszczalnym ciśnieniem czy rodzajem transportowanego medium. W przypadku zaworów mogą wystąpić ograniczenia np. średnicy czy maksymalnego ciśnienia. Takich ograniczeń praktycznie nie ma rozwiązanie polietylenowego bocznika.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Mosty rurociągowy, zwłaszcza te o dużych rozpiętościach charakteryzują się dużą podatnością i wrażliwością na obciążenia dynamiczne, dlatego są szczególnie narażone na awarie. Projekt mostu powinien przewidzieć możliwe sytuacje, obciążenia i mechanizmy prowadzące do jego zniszczenia.

Wśród obciążeń wyjątkowych, które mogą stanowić obciążenie instalacji rurociągowych szczególną uwagę należy zwrócić na uderzenie hydrauliczne. Gwałtowna zmiana ciśnienia cieczy, spowodowana np. awarią pomp lub nagłym wyłączeniem energii elektrycznej, może pojawić się podczas eksploatacji nawet w prawidłowo użytkowanej instalacji i spowodować zniszczenie nie tylko samej instalacji ale również otoczenia: odcięcia zaopatrzenia w wodę dużych skupisk ludności, zanieczyszczenia środowiska naturalnego. W pracy zawarto przegląd aktualnie stosowanych metod ochrony przed uderzeniem hydraulicznym i wskazano na możliwości rozwoju konstrukcji tych urządzeń. Wykonano porównanie efektywności trzech wybranych systemów ochrony przed uderzeniem hydraulicznym.

Projekt konstrukcji mostu powinien zawierać wyznaczenie charakterystyk dynamicznych, tzn. częstości drgań własnych i odpowiadających im form własnych. Należy uwzględnić fakt, że mogą wystąpić różnice pomiędzy projektowanymi i rzeczywistymi wartościami parametrów konstrukcji. Częstości drgań własnych mostu, zwłaszcza w konstrukcjach wiszących, mogą ulegać zmianie wskutek zmian naciągu ciągów, oblodzenia czy zmian własności materiału, z którego wykonano konstrukcję. Na przykładzie mostu rurociągowego Nakagawa Water-pipe Bridge w Japonii, zwrócono uwagę, że częstości drgań własnych mostu rurociągowego mogą odpowiadać częstościom zmian ciśnienia fali uderzenia hydraulicznego i być powodem wzbudzenia drgań rezonansowych mostu. W pracy wskazano na

however, be considered that there is a possibility of the occurrence of a negative pressure at the initial stage of damping and shortly after the damping of the wave, which is a negative phenomenon. Polyethylene bypasses have the lowest efficiency of damping, but their advantage results from the fact of small change of the average value of pressure and also the small pressure drop. The choice of the appropriate device depends on the specifics of the bridge where the device is applied: the diameter of a conduit, the permissible pressure or the type of transported medium. In the case of valves, some limitations may occur e.g. in conduit diameter or maximum pressure. The polyethylene bypass solution does not have such limitations.

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Pipeline bridges, especially large span ones, are characterized by high flexibility and sensitivity to dynamic loads and are therefore particularly exposed to failure. A bridge design should include all the possible situations, loads and mechanisms that lead to the bridge destruction.

Among the exceptional loads of pipe plants, particular attention should be paid to a water hammer. Rapid change in fluid pressure, which is caused e.g. by pump failure or a sudden power cut, may even occur during operation in properly used installations and can cause not only damage to the installation itself, but also to the environment. Cutting off the water supply of large population centres and causing environmental pollution can be followed by it. The present study provides an overview of the currently used methods of protection against a water hammer and indicates the possible development directions in designing of these devices. Comparison of the effectiveness of three selected systems of protection against a water hammer was carried out.

In the design of a bridge construction dynamic characteristics, i.e. frequencies of eigenvibrations and their corresponding eigenforms should be included. The possible differences between the designed and actual values of the parameters of a structure should be taken into account. Also the variation of a pipeline bridge eigenfrequencies, especially of suspended constructions, due to icing, variations of the tendons tension or of the properties of a material of a structure should be considered. On the basis of the example of the Nakagawa Water-pipe Bridge in Japan, it was noted that the eigenfrequencies of the pipeline bridge can correspond to the frequencies of the water hammer pressure wave and be the cause of the resonant vibrations

możliwości redukcji drgań poprzecznych rurociągu przez zastosowanie eliminatorów drgań i elastycznych podpór.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] www.wroclaw.naszemiasto.pl, 11.04.2016
- [2] www.wikimapia.org/29138573/Pipeline-Bridge, 10.02.2017
- [3] www.wgospodarce.pl, 16.07.2013
- [4] *Prokopowicz D., Bryja D.*: Wiszące mosty rurociągowo – historia i przegląd stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych. *Przegląd Budowlany*, 9, 2015, 30-37
- [5] www.bridgemeister.com, 10.02.2017
- [6] *Scott R.*: In the wake of Tacoma: Suspensions bridges and the quest for Aerodynamics Stability. ASCE, 2001
- [7] *Trebuňa F., Bocko J., Delyová I., Sivák P.*: Application of Computational Methods and Methods of Experimental Stress Analysis for Determination of Lifespan of Pipe Yards. *Acta Mechanica Slovaca*, 15, 4, 2011, 52-57
- [8] *Trebuňa F., Bocko J., Delyová I., Sivák P.*: Quantification of Force Effects in Dynamically Loaded Pipe Systems. *American Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 7, 2013, 398-402
- [9] *Sivak P., Delyova I., Hroncova D.*: ESA as a Significant Tool for Intensification of Structural Elements of Pipe Systems. *American Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 3, No. 6, 2015, 261-266
- [10] *Mitosek M.*: Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska. OWPW, Warszawa, 2007
- [11] *Allaf K.*: Ważne kryteria do obniżenia kosztu systemów ochrony długich linii transportu wody. *Napędy i sterowanie*, 6, 2015, 80-85
- [12] *Dudlik A., Handajani Schönfeld S.B., Schlüter S., Fahlenkamp H., Prasser H.M.*: Prevention of Water Hammer and Cavitation Hammer in Pipeline System. *Chemical Engineering and Technology*, 25, 9, 2002, 888-890
- [13] <http://www.tlv.com/global/TI/steam-theory/what-is-water-hammer.html>, 10.02.2017
- [14] *Mitosek M., Szymkiewicz R.*: Wave Damping and Smoothing in the Unsteady Pipe Flow. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 138, No.7, 2012, 609-628
- [15] www.ste valve.com/Air_Actuated_valve_specification-2KS.htm, 10.02.2017
- [16] www.aquadevice.com/english/04valve_slsn1.htm, 10.02.2017
- [17] US Patent 005746246A, Water hammer preventing check valve, Yokota et al., 1998
- [18] *Mitosek M., Roszkowski A.*: Empirical Study of Water Hammer in Plastics Pipes, *Plastics Pipes X*. Proceedings of the “Plastics Pipeline Systems for the Millenium” Conference, The Institute of Materials, London/Goeteborg, 1998, 233-248
- [19] *Mitosek M., Kodura A., Kolakowska A., Wrzosek K.*: Analiza doświadczalna zdolności tłumienia fali ciśnienia wywołanej uderzeniem hydraulicznym w przewodzie stalowym poprzez zastosowanie rurowego tłumika HDPE. *Prace statutowe ZBWiH PW*, 2013
- [20] *Kodura A.*: An Analysis of the Impact of Valve Closure Time on the Course of Water Hammer. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, Vol. 63, No. 1, 2016, 35-45
- [21] *Kowalski P.*: Analiza zdolności tłumienia uderzenia hydraulicznego w rurociągu stalowym z bocznikiem z tworzywa sztucznego. *Praca doktorska, Politechnika Gdańska*, 2007
- [22] *Imielowski S., Kodura A., Glinicka A., Ajdukiewicz C.*: Experimental Study on Mechanical Properties of Polyethylene HDPE in Conditions of Hydraulic Impact Simulation. *Solid State Phenomena*, Vol. 240, 2016, 149-154
- [23] *Imielowski S., Kodura A., Glinicka A., Ajdukiewicz C.*: Influence of Hydraulic Impact on Mechanical Properties of Polyethylene MDPE and PCV Pipes. *Engineering Transactions*, 2017 (in print)
- [24] *Mitosek M., Kodura A.*: Wpływ długości rurociągu na rozpraszanie energii uderzenia hydraulicznego. *Zeszyty Naukowe PW, seria: Inżynieria Środowiska*, z. 32, 2000, 63-80
- [25] *Kaminaka R., Kuwata Y.*: Damage Mechanism of the Nakagawa Water-pipe Bridge during the 2011 off The Pacific Coast of Tohoku Earthquake. *15 WCEE, Lisbona, Portugal*, 2012, http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1886.pdf, 10.02.2017
- [26] *Collins M.G., Hart J.D.*: The impact of High Frequency Wind-Induced Vibration on Arctic Pipeline Systems. *SSD Inc., Reno, Nevada, USA*, 1992, <http://www.ssdinc.com/documents/ISOPE2006-NA-02%20-030406.pdf>, 10.02.2017
- [27] *Norris M.A., Keith R., Ptak B., Zamora A., Hart D.J.*: Implementation of Tuned Vibration Absorbers for Above Ground Pipeline Vibration Control. *Proceedings of the IPC 2000 ASME International Pipeline Conference*, October 1-5, 2000, Calgary, Alberta, Canada, Vol. 1, 115-121 <http://solarenergyengineering.asmedigitalcollection.asme.org/pdfaccess.ashx?ResourceID=13598931&PDFSource=13>, 10.02.2017

of the bridge. The study indicated the possibilities of reducing the transverse vibrations of the pipeline by applying vibration eliminators and flexible supports.