

Wiszące mosty ruropięgowe – historia i przegląd stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych

Mgr inż. Dawid Prokopowicz, dr hab. inż. Danuta Bryja, prof. nadzw.,
Politechnika Wroclawska

1. Wprowadzenie

Transport ruropięgowy jest jedną z najtańszych metod przesyłu różnego rodzaju mediów na duże odległości. Ruropięgów używa się najczęściej do transportu produktów naftowych (ropy, biopaliw, itp.), gazu ziemnego, ścieków, wody, a także materiałów stałych (na przykład mieszaniny pyłu węglowego z wodą). Jednym z podstawowych problemów przy budowie linii ruropięgowej jest sposób przeprowadzenia przez najróżniejsze przeszkody, zarówno naturalne (rzeki, wąwozy, kaniony), jak i stworzone przez człowieka (drogi, linie kolejowe). W celu pokonania tych przeszkód dostępne są dwa podstawowe rozwiązania: przejście podziemne oraz konstrukcje mostowe. Pierwszy wariant jest zdecydowanie tańszy, jednak nie zawsze możliwy. Zasadniczym problemem jest osiągnięcie wymaganej stabilności podłoża, zwłaszcza wtedy gdy ruropięg planuje się przeprowadzić pod dnem rzeki. Jedną z głównych trudności jest wówczas określenie głębokości, na której znajduje się stabilna warstwa materiałów umożliwiająca budowę podziemnego ruropięgu. Analiza możliwości budowy ruropięgu podziemnego nie ogranicza się tylko do wyznaczenia wymaganej głębokości posadowienia, lecz składa się z wielu szczegółowych zagadnień, takich jak na przykład wpływ konstrukcji na środowisko naturalne.

Alternatywną metodą przeprawy ruropięgu jest zastosowanie obiektu mostowego. Najprostszym sposobem na taką przeprawę jest umieszczenie ruropięgu na istniejącym moście drogowym lub kolejowym. Takie rozwiązanie ma swoje zalety: niski koszt, mniejszy wpływ na środowisko, uproszczony proces projektowy, zgrupowanie z innymi instalacjami, ale także ma wady: miejsce przejścia ruropięgu jest narzucone przez lokalizację mostu, konstrukcja mostu może nie pozwalać na instalację danego ruropięgu, wymagana jest zgoda zarządcy mostu [1]. Zatem przy podejmowaniu decyzji o podwieszeniu ruropięgu do istniejącego mostu należy wziąć pod uwagę wiele czynników, między

innymi: możliwość awarii oraz konieczność konserwacji ruropięgu i związane z tym ewentualne wstrzymanie ruchu pojazdów na czas remontu, odległość planowanego przesunięcia linii ruropięgu w celu dopasowania do lokalizacji mostu, która może okazać się zbyt duża w przypadku miejsc słabo zaludnionych, średnicę ruropięgu utrudniającą lub nawet uniemożliwiającą właściwe podwieszenie. Należy też rozważyć problemy związane ze wzajemnym ruchem mostu i ruropięgu, tzn. różnicą w przemieszczeniach mostu i ruropięgu, wynikającą na przykład z ciężaru transportowanego medium, wpływu temperatury, ciśnienia panującego wewnątrz ruropięgu, wiatru, trzęsień ziemi, a także obciążeń użytkowych mostu. Zbyt duże przemieszczenia ruropięgu względem konstrukcji mostu mogą prowadzić do nadmiernych naprężeń w materiale ruropięgu [1]. W przypadku gdy najlepszym sposobem przeprawy mostowej ruropięgu okaże się jednak budowa samodzielnego mostu, należy rozważyć wszystkie dostępne typy rozwiązań konstrukcyjnych: belkowe, łukowe, kratownicowe, wantowe oraz wiszące.

Najliczniejszą obecnie grupę mostów ruropięgowych o dużych rozpiętościach (dochodzących nawet do 700 m) stanowią mosty wiszące. Ruropięgowe mosty wiszące wykorzystują technologię znaną z mostów komunikacyjnych, aby przenosić obciążenia stałe, to znaczy system podwieszenia składa się z ciągów głównych (nośnych) oraz wieszaków. Wśród istniejących mostów można się spotkać zarówno z klasycznymi rozwiązaniami, gdzie wyróżnia się dwie pionowe płaszczyzny podwieszenia oraz sztywny pomost, na którym układane są ruropięgi, jak i nietypowymi, gdzie system podwieszenia stanowi przestrzenny dźwigar ciągnowy o złożonej strukturze, a ruropięg jest w wielu przypadkach bezpośrednio podwieszany do ciągów nośnych za pomocą wieszaków.

Różnorodność układów konstrukcyjnych stosowanych w ruropięgowych mostach wiszących jest bardzo duża. Wiele rozwiązań można uznać za unikatowe na skalę światową, na przykład: most wiszący wybudowany

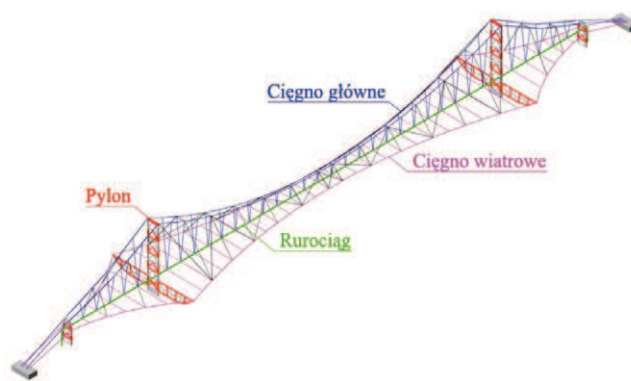
w 1922 roku w Szwajcarii, w którym dwa ciężna wspierają wodociąg oraz kładkę dla pieszych, znajdujący się na wysokości 190 m nad wąwozem – służy obecnie do skoków na bungie; most wiszący o rozpiętości 337 m przenoszący kilka rurociągów oraz chodnik roboczy, wybudowany w 1998 roku w Argentynie, dla którego przy projektowaniu inspirowano się mostami linowymi Inków, oraz most wiszący znajdujący się w Australii o rozpiętości 439 m między zakotwieniami, gdzie ciężna zakotwiono bezpośrednio do ścian skalnych, bez pylonów.

Widać zatem, że trudno jest jednoznacznie wyłonić jeden schemat konstrukcyjny, charakteryzujący wszystkie rurociągowy mosty wiszące. Pomimo tego w większości tych konstrukcji można wyróżnić kilka cech wspólnych, takich jak: nachylone płaszczyzny podwieszenia, w których ciężna główne mają często duży zwis, dźwigar w postaci rurociągu charakteryzujący się dużą smukłością, a także zastosowanie systemu bocznych ciężen, które są odpowiedzialne za zachowanie prawidłowego kształtu rurociągu oraz przenoszenie bocznych obciążeń wiatrem. Układ ciężen bocznych, nazywanych też wiatrowymi, jest w zasadzie stosowany tylko w wiszących mostach rurociągowych. Próby przeniesienia tego rozwiązania do mostów komunikacyjnych nie przyjęły się [2], poza nielicznymi wyjątkami, na przykład: kładka o największej rozpiętości na świecie między wieżami o wysokości 500 m i długości pomostu 467 m, znajdująca się w pobliżu zapory Wanjiashai w Chinach; kładka dla pieszych o całkowitej długości przęsła 1453 m w Nepalu oraz kładka dla pieszych Kokonoe „Yume” Otsurhashi w Japonii, o rozpiętości przęsła 390 m.

2. Historia i rozwój wiszących mostów rurociągowych

Pierwszy wiszący most rurociągowy o dużej rozpiętości został zbudowany w 1926 roku nad rzeką Red River w pobliżu Byers w stanie Texas na terenie Stanów Zjednoczonych. Most ten o całkowitej długości 628 m został zaprojektowany przez biuro projektowe Matthews & Kenan. Do roku 1931 opracowano w tym biurze projekty kolejnych sześciu mostów o podobnej konstrukcji: nad rzekami Beaver oraz Cimarron w Panhandle w Oklahomie; nad rzeką Little Blue w pobliżu Hollenberg w Kansas, nad rzekami Big Blue, Platte i Elkhorn, wszystkie w stanie Nebraska [3]. Most nad rzeką Little Blue o 152-metrowym przęśle głównym oraz przęsłach bocznych o długości 70 m reprezentuje wszystkie typowe cechy mostów budowanych w tamtym okresie. Ralph Alan Dusseau, autor wielu prac związanych z mostami rurociągowymi, nazwał ten typ mostu „klasycznym wiszącym mostem rurociągowym” [4]. Cechą charakterystyczną tego typu mostów jest jedno przęsło główne oraz opcjonalnie jedno lub dwa przęsła boczne, podparte kratownicowymi podpórami pośrednimi. Podpory główne stanowią tutaj dwa stalowe, kratownicowe pylony.

Po obu stronach pylonu mocowane są wspornikowe ramiona, służące jako wsparcie dla ciężen „wiatrowych” leżących w płaszczyźnie poziomej lub nieznacznie nachylonej względem poziomu. Ciężna wiatrowe połączone z rurociągiem za pomocą wieszaków zwiększają sztywność boczną konstrukcji. Dwa ciężna główne wraz z wieszakami leżą w nachylonych płaszczyznach zwróconych ku rurociągowi (rys. 1). Odciaży diagonalne, które łączą ciężna główne i wiatrowe, mają za zadanie przenieść ciężar ciężen wiatrowych oraz zwiększyć sztywność konstrukcji. Stosowane są także odciaży diagonalne łączące ciężna główne i rurociąg, które poprzez usztywnienie konstrukcji mostu służą zmniejszeniu efektów dynamicznych związanych z oddziaływaniami wiatru lub trzęsieniami ziemi.



Rys. 1. Widok klasycznego wiszącego mostu rurociągowego

Kolejne lata to dalszy rozwój rurociągowych mostów wiszących autorstwa biura Matthews & Kenan, budowanych na terenie Stanów Zjednoczonych. W tym czasie wznoszono mosty o coraz większych rozpiętościach przęsła głównego, zachowując przy tym układy konstrukcyjne bardzo podobne do wcześniejszych. W roku 1931 powstał most nad rzeką South Canadian w Borger w Texasie. Składał się on z ośmiu przęsła, każde o długości 97 m oraz dwóch przęsła bocznych o długości 49 m. W następnym roku wybudowano most nad rzeką Missouri w Ponca w Nebrasce, z przęsem głównym o długości 390 m, rozciągniętym pomiędzy pylonami o wysokości 40 m i masie 82 t, natomiast rozpiętość ramion niezbędnych do umocowania ciężen wiatrowych przekraczała 42 m. W 1940 roku biuro Matthews & Kenan zaprojektowało most nad rzeką Missouri w Sioux City w stanie Iowa, w którym przekroczono barierę 400 m. Długość głównego przęsła tego mostu wynosiła 402 m, przęsła bocznych 201 m oraz zakotwień 137 m, dając razem odległość 1079 m. Wysokość pylonów wynosiła 35 m, podpór pośrednich 15 m, a rozpiętość ramion pylonów sięgała 47 m. Co ciekawe, most został wzniesiony w zaledwie 135 dni roboczych [3].

Lata powojenne przyniosły gwałtowny wzrost liczby budowanych mostów rurociągowych w Stanach



Rys. 2. a) most w Clayton nad rzeką Coosa, Alabama, USA (fot. Patrick S. O'Donnell) {1}, b) most w Plattsmouth nad rzeką Missouri, Nebraska, USA (fot. Patrick S. O'Donnell) {1}, c) most w pobliżu Fairbanks nad rzeką Tanana, Alaska, USA (fot. Patrick S. O'Donnell) {2}

Zjednoczonych, możliwy między innymi dzięki znacznemu postępowi wiedzy na temat obciążeń aerodynamicznych. W 1947 roku powstał gazociąg z Teksasu do Kalifornii, a wraz z nim, jako niezbędny element projektu, pięć mostów rurociągowych: nad rzeką Canadian w stanie Texas, Pecos w stanie New Mexico, San Pedro i Gila w stanie Arizona oraz nad rzeką Colorado w Kalifornii. W przypadku mostu nad rzeką Pecos, przęsło główne miało długość 146 m, a rozpiętości przęseł pozostałych mostów zawierały się w przedziale 311-366 m. Mosty nad rzekami Colorado oraz Gila, krótko po budowie zostały wyposażone w trójkatne skrzydełka wiatrowe, przyspawane do rurociągu w celu ograniczenia pionowych drgań spowodowanych wzbudzeniem wirowym [5].

Podczas budowy rurociągu z Teksasu do Nowego Yorku w latach 1950-1951 ujęto w projekcie cztery wiszące mosty rurociągowy. Każdy z tych mostów miał za zadanie przenieść dwa rurociągi o średnicy 76 cm. Były to mosty przeprowadzone przez rzeki Colorado i Brazos w stanie Texas, Atchafalaya w Melville, Louisiana oraz Coosa w Clayton, Alabama (rys. 2a). Ze względu na często pojawiające się pionowe drgania rurociągu, o dużej amplitudzie, spowodowane oddziaływaniem wiatru, most nad rzeką Coosa został dodatkowo wzmocniony ukośnymi odciągami łączącymi ciężną główną i rurociąg [6]. Drugim wartym uwagi mostem z tego okresu jest most nad rzeką Atchafalaya w Melville, zaprojektowany ponownie przez zespół inżynierów Matthews & Keenan. W roku 1951 przejął on miano najdłuższego wiszącego mostu rurociągowego na świecie. Odległość między pylonami tego mostu wynosi 610 m, a długości przęseł bocznych 198 i 304 m, co daje łącznie dystans 1112 m (1426 m między blokami kotwiącymi). Cztery lata później powstał kolejny wiszący most rurociągowy wybudowany nad rzeką Mississippi w Grand Tower w Illinois, o długości głównego przęsła 655 m. Jest to obecnie najdłuższy most rurociągowy na terenie USA. Co ciekawe, w przypadku tego mostu nie zastosowano podpór pośrednich między pylonami a zakotwieniem. Dystans między zakotwieniami ciężni tego mostu wynosi 1125 m, a rozpiętość ramion „wiatrowych” – 100 m znacznie przekracza wysokość pylonów – 75 m. Warto zwrócić uwagę, że w trakcie budowy tego mostu napotkano na problemy

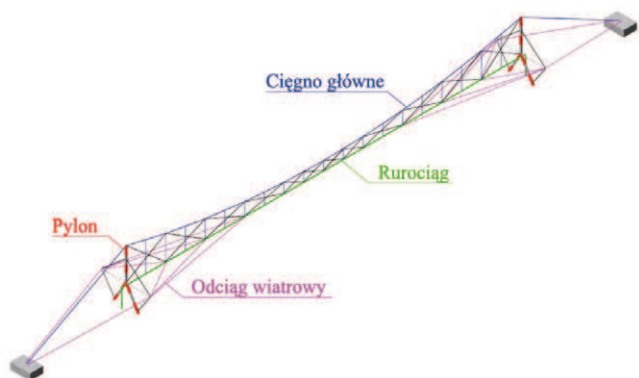
z posadowieniem jednego z pylonów, z uwagi na bardzo trudne warunki gruntowo-wodne. W związku z tym zastosowano kesony do wykonania fundamentów na głębokości 50 m, a ilość zużytego betonu sięgała 5500 m³ [7]. W 1957 roku ukończono budowę innego mostu rurociągowego o dużej rozpiętości, położonego nad rzeką Missouri w Plattsmouth w Nebrasce (rys. 2b). Pomimo iż rozmiary tego mostu nie są tak imponujące, to jest wart omówienia, ma bowiem układ niesymetryczny ze względu na różne warunki topograficzne po obu stronach rzeki. Przęsło główne ma długość 457 m, przęsło boczne 229 m, a po drugiej stronie rzeki wykonano przęsło kratownicowe o długości 47 m, będące przedłużeniem pylonu. Całkowita odległość między blokami kotwiącymi wynosi 1015 m [8].

W latach siedemdziesiątych XX wieku, podczas budowy rurociągu Trans-Alaska wybudowano most rurociągowy nad rzeką Tanana w pobliżu Fairbanks na Alasce (rys. 2c). Ten jednoprzęsłowy most o klasycznej konstrukcji i rozpiętości 366 m przeprowadza rurociąg o średnicy wynoszącej aż 122 cm, jednej z największych w wiszących mostach rurociągowych. Podobny most o rozpiętości głównego przęsła 235 m został wybudowany na północ od koła podbiegunowego w Hammond na Alasce. Robotnicy pracujący przy konstrukcji tego mostu musieli się zmagać z temperaturą dochodzącą do minus 55°C. Budowę obu mostów wraz z rurociągiem przez Alaskę ukończono w 1977 roku [9].

Warto jeszcze wspomnieć o dwóch klasycznych rurociągowych mostach wiszących wybudowanych na terytorium USA. Są to: most przenoszący rurociąg do transportu gazu ziemnego w rezerwacie Flaming Gorge w Wyoming, o rozpiętości 585 m, oraz most nad rzeką Skagit w Washington, o rozpiętości 213 m. W przypadku obu mostów można zaobserwować duże nachylenie rurociągu, wynikające z różnic wysokości terenu po obu stronach przeszkody [9].

Cechą wspólną wszystkich wspomnianych wyżej mostów, charakteryzujących się klasycznym układem konstrukcyjnym, był bardzo duży koszt budowy i duże koszty utrzymania. Dlatego w kolejnych latach zaczęły pojawiać się rurociągowy mosty wiszące o innej konstrukcji. Pierwszym takim mostem był most wybudowany w 1962 roku nad rzeką Ohio, w Portsmouth w stanie

Ohio, zaprojektowany przez W.F. Appelt. Jest to jeden z największych i najcięższych istniejących wiszących mostów rurociągowych. Most ten różnił się od konstrukcji budowanych wcześniej. Dusseau w swoich pracach na temat rurociągów odróżnił ten most od powstałych przed rokiem 1962, nazywając go „nowoczesnym wiszącym mostem rurociągowym” [4]. Jedną z cech charakterystycznych tzw. „nowoczesnych



Rys. 3. Widok nowoczesnego wiszącego mostu rurociągowego

mostów rurociągowych” są podpory stalowe o przekroju zamkniętym, w kształcie odwróconej litery Y, do których opcjonalnie mocuje się ramiona wiatrowe. Ramiona te stanowią podparcie dla zestawu odciągów wiatrowych leżących w płaszczyźnie poziomej. Za przenoszenie obciążeń pionowych odpowiedzialne jest jedno ciężno główne, leżące wraz z wieszakami w płaszczyźnie pionowej. Stosowane są także ciężna diagonalne łączące ciężna główne i rurociąg, które zmniejszają podatność konstrukcji na oddziaływanie wiatru. Nie stosuje się podpór pośrednich i przęseł bocznych (rys. 3).

We wspomnianym wyżej moście nad rzeką Ohio odległość między pylonami wynosi 635 m, a wysokość pylonów sięga 82 m. Siła zrywająca ciężna głównego wynosi 20 MN. Godna uwagi jest technologia wzniesienia tego mostu, utrudniona przez ograniczenia terenu, które nie dawały możliwości nasunięcia rurociągu na most, prostopadłe do brzegu rzeki. Pylony mostu złożono na miejscu budowy z elementów o długości 12 m,

następnie zamocowano je zawiasowo do fundamentów, wierzchołkiem w stronę rzeki. Rurociąg o długości 701 m złożono na brzegu rzeki, równoległe do nurtu. Został on przetestowany pod ciśnieniem w celu kontroli szczelności i pomalowany. W kolejnym kroku przymocowano do rurociągu wieszaki razem z ciężnem głównym i podniesiono całość za pomocą 17 dźwigów rozstawionych w równych odległościach. Rurociąg nasuwany pod określonym kątem odbierano następnie na rzece z użyciem sześciu barek. Później zakotwiono ciężno główne do wierzchołków pylonów leżących poziomo po obu stronach rzeki i rozpoczęto proces ustawiania podpór do pozycji pionowej. Rurociąg podczepiony za pomocą wieszaków do naciąganego ciężna głównego został w ten sposób uniesiony na wysokość 82 m nad poziomem rzeki. W ostatnim kroku drugi rurociąg zaczopowano z obu stron i nasunięto na rzekę, a następnie wciągnięto go za pomocą lin opuszczonych z podwieszzonego już rurociągu i umocowano pod pierwszym rurociągiem [3].

Most w Portsmouth nie był pierwszym, gdzie zastosowano pylony w kształcie odwróconej litery Y. Taki pylon zastosowano wcześniej w wiszącym moście rurociągowym wybudowanym w 1961 roku w Ponca, na granicy stanów Nebraska i South Dakota. Most ten charakteryzował się niesymetrycznym schematem konstrukcyjnym, w którym ze względu na dużą różnicę wysokości terenu po obu stronach rzeki Missouri, na jednej stronie wzniesiono wysoki pylon w kształcie odwróconej litery Y, a na drugim brzegu niski pylon w kształcie litery A. Inną cechą wyróżniającą ten most była prawie paraboliczna trasa rurociągu, zgodna z trasą ciężni głównych na niemal całej rozpiętości (rys. 4a). Co ciekawe, odległość między pylonami wynosiła ponad 800 m i byłby to najdłuższy istniejący most rurociągowy na świecie, gdyby nie został rozebrany w 2007 roku.

W latach 1975-1981 wybudowano osiem mostów rurociągowych wzdłuż Wax Lake Outlet w pobliżu St. Mary Parrish w Louisianie (rys. 4b, 4c). Są to mosty typu nowoczesnego, o bardzo podobnych układach konstrukcyjnych i rozpiętościach przęseł między 245 a 305 m, leżące bardzo blisko siebie (w rozstawach około 1 km). Dwa z tych mostów: Calumet Loop Aerial Crossing o rozpiętości 245 m oraz Patterson Loop Aerial Crossing

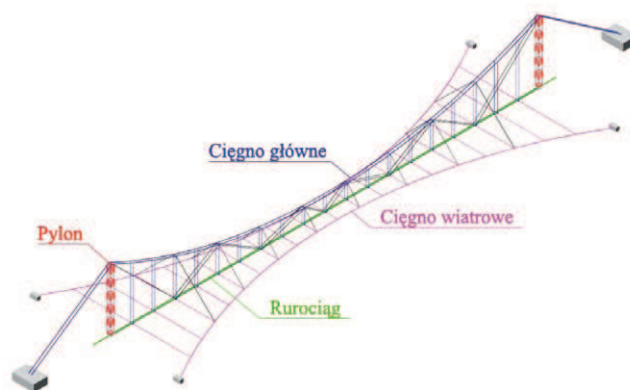


Rys. 4. a) most w Ponca nad rzeką Missouri, Nebraska, USA (fot. Patrick S. O'Donnell) {1}, b) most nad kanałem Wax Lake Outlet, Louisiana, USA (fot. Patrick S. O'Donnell) {1}, c) most nad kanałem Wax Lake Outlet, Louisiana, USA (fot. Patrick S. O'Donnell) {1}

o długości przęsła 259 m krótko po ukończeniu budowy zaczęły wykazywać duże pionowe drgania pod wpływem działania wiatru. W celu zredukowania amplitudy tych drgań zamontowano ukośne liny łączące ciężna główne oraz rurociąg, powielając rozwiązanie zastosowane wcześniej w moście nad rzeką Coosa [10].

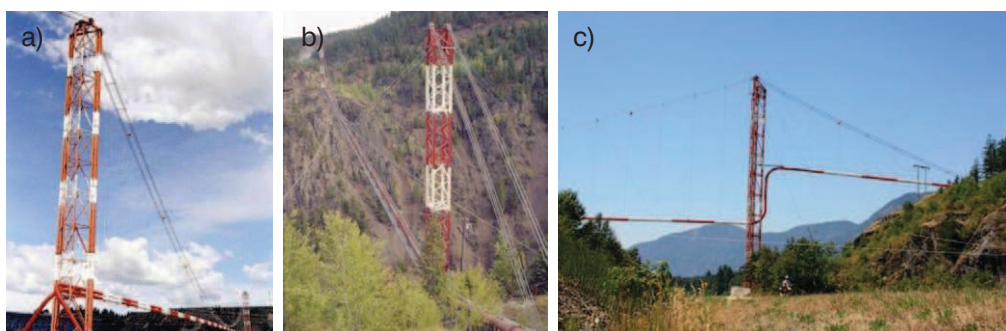
Wiszące mosty rurociągowo cieszyły się popularnością także w Kanadzie. W prowincji Alberta, biuro Matthews & Keenan znane ze Stanów Zjednoczonych zaprojektowało most rurociągowy nad rzeką Saskatchewan w pobliżu Empress, o rozpiętości 320 m. Także w Alberta wzniesiono dwa wiszące mosty rurociągowo nad rzeką Bow w pobliżu Cochrane, o długościach przęsła 183 i 201 m. Natomiast w prowincji British Columbia, podczas prac nad linią rurociągową, wybudowano pięć mostów, których projektantem była firma T. Lamb, McManus & Associates: nad rzeką Fraser – dwa mosty o rozpiętości 183 m, jeden 393-metrowy i drugi 448-metrowy oraz most o rozpiętości 510 m nad rzeką Peace (rys. 6a). Bardzo ważnym elementem podczas projektowania tych mostów było uwzględnienie zjawiska osadzania się lodu na rurociągach w analizie aerodynamicznej. Okazało się, że podwójny wzrost wagi rurociągu spowodowany oblodzeniem wzmocnia odporność na obciążenie wiatrem o 160% [9].

Wspomniane mosty, chociaż podobne pod względem konstrukcji do rurociągowych mostów wiszących budowanych na terenie Stanów Zjednoczonych, jednak różniły się od nich w kilku aspektach. W kanadyjskich mostach pylony wykonywano jako słupy kratownicowe o przekroju poprzecznym w kształcie kwadratu lub trójkąta, czyli o kształcie obelisku. W kierunku poprzecznym pylony wspierano odciągami bocznymi. Za przeniesienie ciężaru rurociągu oraz ewentualnych chodników serwisowych odpowiedzialne były zazwyczaj dwa położone blisko siebie ciężna główne leżące wraz z wieżakami w prawie pionowych płaszczyznach. Ciężna głównych nie przeciągano nad podporami, mocowano je na szczytach pylonów, a zakotwienie odbywało się poprzez osobne odciągi przytwierdzone do wierzchołków słupów. Ciężna wiatrowe kotwiono bezpośrednio w blokach betonowych lub wspierano na konstrukcjach niezwiązanych z pylonem. Ciężna diagonalne, łączące ciężna główne i wiatrowe oraz ciężna główne i rurociąg, spełniały tę samą rolę jak w przypadku klasycznych mostów rurociągowych (rys. 5).

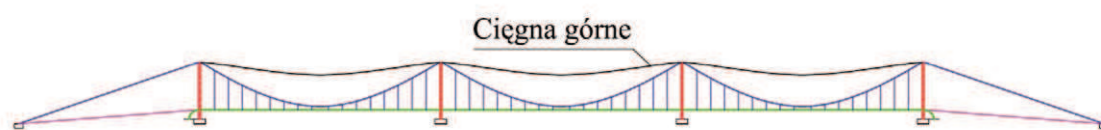


Rys. 5. Widok wiszącego mostu rurociągowego z pylonem w kształcie obelisku

Korzyści płynące z zastosowania lekkich pylonów w kształcie obelisków widać zwłaszcza w moście wybudowanym w roku 1972 na terenie kopalni miedzi, nad głębokim na 183 m kanionem rzeki Similkameen w pobliżu Princeton w prowincji British Columbia (rys. 6b), gdzie teren przeznaczony na budowę mostu był bardzo ograniczony. Na początku, projektanci firmy Bechtel Corp. rozważali budowę mostu łukowego, jednak most wiszący okazał się bardziej konkurencyjny ze względu na mniejszy koszt i szybszy czas realizacji. Wybudowany most przeprowadza trzy rurociągi umieszczone w układzie pionowym oraz chodnik roboczy, odległość między pylonami wynosi 290 m, a nachylenie pomostu 10%. Ze względu na różnice poziomów po obu stronach kanionu, wysokość słupów nie jest jednakowa i wynosi 41 oraz 37 m. System parabolicznych bocznych ciężen wiatrowych, kotwionych do brzegów kanionu, nie jest symetryczny z uwagi na ukształtowanie terenu [11], [12]. Drugi most o niemal identycznej budowie i rozpiętości 404 m jest oddalony o 800 m od pierwszego. Jednak ten powstały w roku 1980 most, zaprojektowany przez biura Buckland & Taylor oraz Robert McLellan & Co, przenosi taśmociąg do transportu rudy. Innym wartym wspomnienia jest most rurociągowy wybudowany w 1991 roku w Hope, w prowincji British Columbia, nad rzeką Fraser (rys. 6c). Rozpiętość tego mostu prowadzącego wodociąg wynosi 200 m, a projekt sporządziło biuro Buckland & Taylor. Ameryka Północna nie była jednym kontynentem, na którym powstawały wiszące mosty rurociągowo dużych rozpiętości, chociaż już nie na tak dużą skalę. Już w latach



Rys. 6. a) most w Taylor nad rzeką Peace, British Columbia, Kanada (fot. Patrick S. O'Donnell) {1}, b) most nad kanionem Similkameen, British Columbia, Kanada (fot. Eric Sakowski) {3}, c) most w Hope nad rzeką Fraser, British Columbia, Kanada (fot. B&B-Traveller) {4}



Rys. 7. Widok wiszącego mostu rurociągowego wieloprzęstowego z cięgnami górnymi



Rys. 8. a) most w pobliżu Wiednia nad rzeką Dunaj Austria (fot. Karl Gruber) {5}, b) most w pobliżu Wiednia nad rzeką Dunaj Austria (fot. Karl Gruber) {5}, c) most we Wrocławiu nad Odrą, Polska (fot. z archiwum autora)

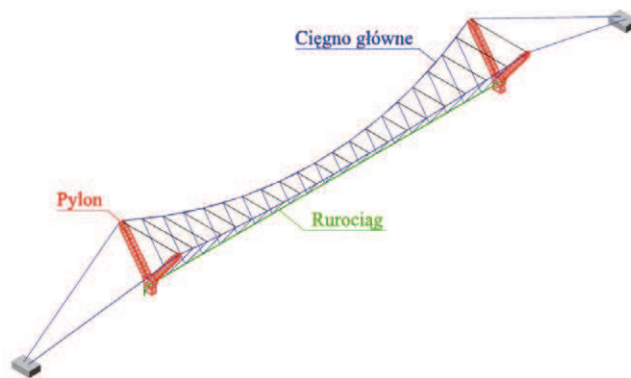
pięćdziesiątych XX wieku, we Włoszech nad rzeką Pad wybudowano dwuprzęsłowy most o rozpiętościach przęsła 320 m, z przęsłami bocznymi o długości 140 m. W tym moście, podobnie jak w przypadku mostów rurociągowych budowanych na terenie USA, po obu stronach kratownicowych pylonów przypominających słupy trakcyjnej są umieszczone szerokie ramiona wspierające cięgna wiatrowe. Należy tutaj wspomnieć także o innym wieloprzęstowym moście rurociągowym o analogicznej budowie, oddanym do użytku w roku 1971, w pobliżu Adria nad rzeką Pad. Ten trójprzęstowy most, o długości pojedynczego przęsła 255 m, charakteryzuje się tym, że oprócz klasycznego zestawu cięgien głównych ma dodatkowe cięgna górne, łączące ze sobą szczyty pylonów (rys. 7). Ich funkcją jest przenoszenie podłużnych sił od oddziaływania wiatru, a także zwiększenie sztywności mostu podczas nierównomiernego obciążenia poszczególnych przęsła [6]. We Włoszech powstały także inne mosty rurociągowy, o mniejszych rozpiętościach przęsła nie przekraczających 320 m [13].

W latach 1957 i 1961 na terenie Austrii powstały dwa nowatorskie mosty rurociągowy o rozpiętościach kolejno 260 i 320 m (rys. 8a, 8b), zaprojektowane i opatentowane przez firmę Waagner-Biro. Te dwie konstrukcje wybudowano na południe od Wiednia, nad rzeką Dunaj, w odstępnie około 5 km. W obu przypadkach podpory stanowią pylony kratownicowe w kształcie litery V. Do szeroko rozstawionych ramion przymocowano cięgna główne, które dodatkowo zostały spięte ze sobą poziomymi cięgnami, które równoważą poziomą składową ciężaru własnego oraz usztywniają system podwieszenia. Cięgna główne o parabolicznej trasie zostały ułożone wraz z wieszakami w dwóch nachylonych płaszczyznach (rys. 9). Most powstały w 1961 roku przenosi aż 13 rurociągow [9] (rys. 8b). Analogiczne rozwiązanie konstrukcyjne zastosowano w moście wiszącym

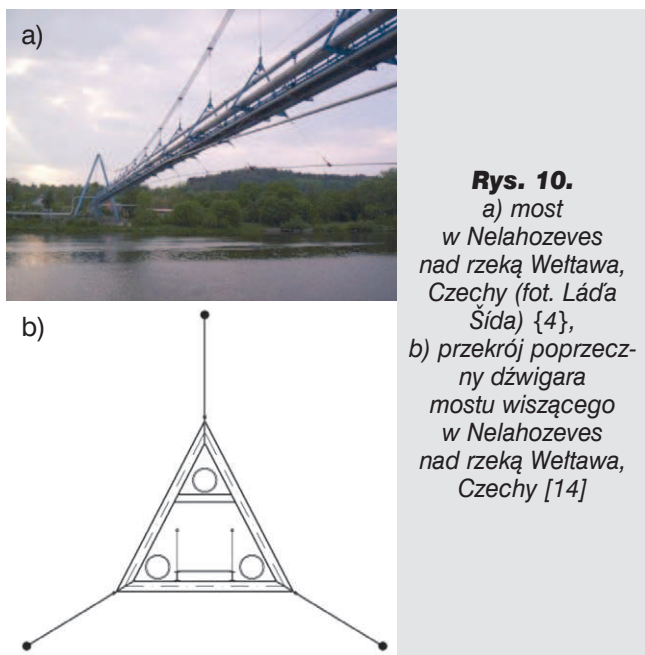
wybudowanym nad Odrą we Wrocławiu, o rozpiętości przęsła głównego 320 m (rys. 8c).

Z innych mostów powstałych na terenie Polski należałoby wspomnieć o rurociągowym moście wiszącym o nowoczesnej budowie, wybudowanym w 1963 roku w Płocku, którego rozpiętość między pylonami wynosiła 350 m. Jednak most ten został rozebrany w 1987 roku, ponieważ po powodzi zatorowej z 1982 spiętrzona krawężnikowa łóżyska tego mostu i zagrażała zniszczeniu innego mostu drogowo-kolejowego. Rurociągi ułożono ostatecznie pod dnem Wisły w specjalnych rurach osłonowych [6]. Drugim wartym uwagi mostem jest klasyczny rurociągowy most wiszący w Brzegu Dolnym, o trzech płaszczyznach podwieszenia i rozpiętości 200 m.

Ciekawym przykładem sposobu realizacji podwieszenia rurociągu jest most nad Wełtawą w miejscowości Nelažozevy w Czechach. Most wiszący o rozpiętości przęsła głównego 170 m wyróżnia się trzema płaszczyznami podwieszenia: jedną pionową oraz dwiema odchylonymi o 30° w odniesieniu do poziomu. Przenosi on chodnik serwisowy oraz trzy rurociągi, które



Rys. 9. Widok wiszącego mostu rurociągowego z pylonami w kształcie litery V

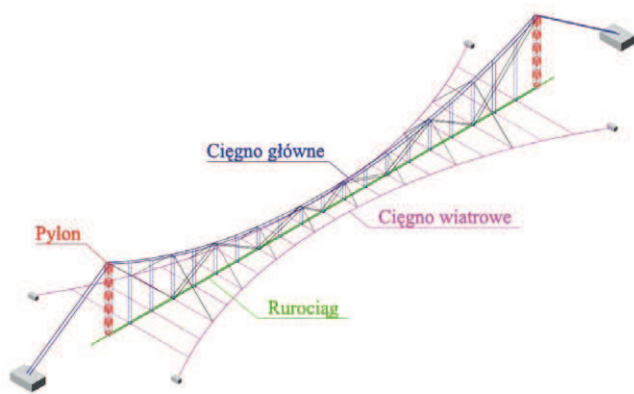


Rys. 10.
a) most w Nelahozeves nad rzeką Wełtawa, Czechy (fot. Láďa Šída) {4},
b) przekrój poprzeczny dźwigara mostu wiszącego w Nelahozeves nad rzeką Wełtawa, Czechy [14]

podwieszono za pomocą wieszaków w trójkątnych ramkach [14] (rys. 10a, 10b).

Na terenie byłego Związku Radzieckiego powstał w roku 1974 jednoprzęsłowy most wiszący o rozpiętości 660 m, położony nad rzeką Amu-Darya w pobliżu Qarqin (na granicy dzisiejszego Turkmenistanu i Afganistanu). Pylony tego mostu, o wysokości 85 m i kształcie litery A, wspierają dwa ciągną główne rozstawione w odległości 2,8 m. Ciągną główne są połączone za pomocą wieszaków do kratownicowego pomostu przenoszącego rurociąg. Układ tych wieszaków przypomina budowę kratownicy (rys. 11). W angielskojęzycznej literaturze ten typ podwieszenia określa się mianem „kratownicy ciągnowej” (ang. cable truss) [9]. Rurociąg jest dodatkowo usztywniony poziomym układem cięgien wiatrowych zakotwionych na obu brzegach rzeki.

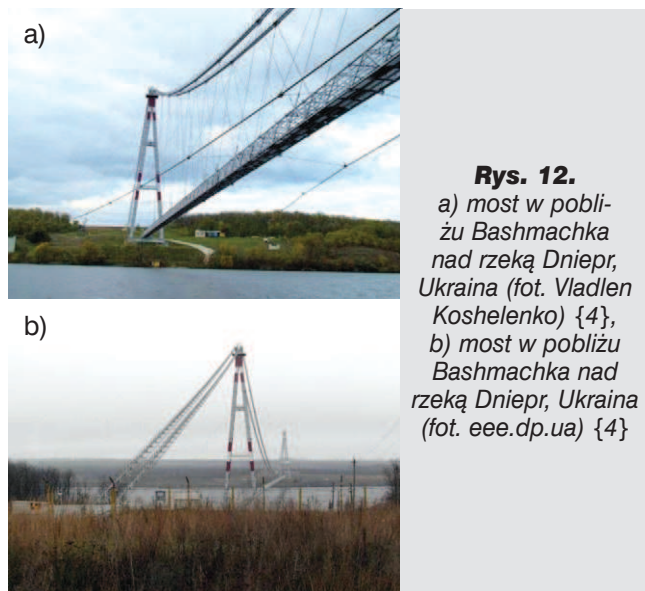
W 1978 roku wybudowano niemal identyczny most nad rzeką Dniepr w pobliżu Bashmachka (teren dzisiejszej Ukrainy). Rozpiętość przęsła tego mostu wynosi 740 m, a wysokość pylonów 87 m [15]. Jest to obecnie najdłuższy



Rys. 11. Widok wiszącego mostu rurociągowego z podwieszeniem w formie przestrzennej kratownicy

wiszący most rurociągowy na świecie (rys. 12a, 12b). W późniejszych latach opracowano jeszcze jeden projekt analogicznego mostu o rozpiętości 950 m, który miał leżeć nad rzeką Amu-Darya, jednak realizacja tego pomysłu nie doszła do skutku [15].

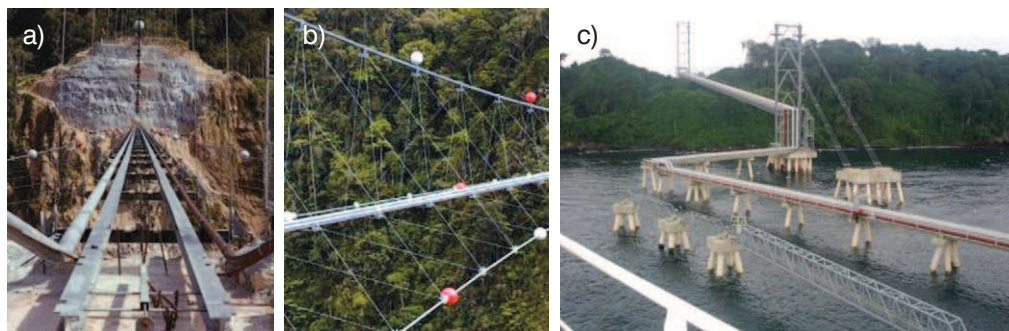
Spośród najnowszych mostów godnym uwagi jest most rurociągowy nad wąwozem Hegigio w Papua Nowa Gwinea, ukończony w 2005 roku. Zastosowano tutaj pomost, na którym znajdują zarówno rurociągi jak i belki służące do przejazdu wózka serwisowego (rys. 13a). Wyróżnić można jedno ciągną główne oraz dwa cięgną wiatrowe leżące w niemal poziomej płaszczyźnie. Z cięgną głównego poprowadzono dwa rzędy wieszaków połączonych z pomostem, na którym spoczywają rurociągi. Ponadto ciągną główne jest połączone z cięgnami wiatrowymi za pomocą lin (rys. 13b). Cięgną wiatrowe zakotwiono bezpośrednio do ścian wąwozu. Po jednej stronie podporę stanowi pylon w kształcie litery A o wysokości 36 m, a po drugiej o wysokości 5 m. Projekt tego mostu sporządził Ken



Rys. 12.
a) most w pobliżu Bashmachka nad rzeką Dniepr, Ukraina (fot. Vladlen Koshelenko) {4},
b) most w pobliżu Bashmachka nad rzeką Dniepr, Ukraina (fot. eee.dp.ua) {4}

Ross. Rozpiętość mostu wynosi 470 m. Most przeprowadzono nad wąwozem o głębokości 393 m i jest to aktualnie drugi najwyższy wiszący most na świecie (po moście wiszącym w Yesanguanzhen w Chinach, który znajduje się nad kanionem o głębokości 496 m).

Warto także wspomnieć o wybudowanym w 2006 roku rurociągowym moście wiszącym na wyspie Bioko, należącej do Gwinei Równikowej (rys. 13c). Most ten łączy rafinerię gazu ziemnego na lądzie z platformą na morzu, przy której odbywa się tankowanie gazu na statki. Początkowo, projektanci biura Buckland & Taylor rozważali budowę lekkiego mostu wiszącego z układem płaszczyzn podwieszenia w kształcie litery V. Jednak ze względu na dużą niestabilność podłoża na brzegu nie było możliwości budowy zakotwień dla cięgien wiatrowych. W związku z tym zdecydowano się na budowę klasycznego mostu wiszącego o rozpiętości 350 m,



Rys. 13.
 a) most nad wąwozem Hegigio, Papua Nowa Gwinea (fot. Ken Ross) {7},
 b) most nad wąwozem Hegigio, Papua Nowa Gwinea (fot. Ken Ross) {7}
 c) most na wyspie Bioko, Gwinea Równikowa (fot. Seriy Volk) {4}

ze sztywnym kratownicowym pomostem o szerokości 12 m i wysokości 3,3 m. Z powodu dużej różnicy wysokości między poziomem posadowienia pylonów, nachylenie pomostu wynosi 9% [16].

3. Podsumowanie

Z przedstawionego przeglądu wiszących mostów rurociągowych wynika, że są to konstrukcje istotnie różniące się od konwencjonalnych mostów komunikacyjnych. Dotyczy to zwłaszcza mostów o dużych rozpiętościach, które są konstrukcjami nietypowymi, a ich odpowiedź dynamiczna na obciążenie wiatrem lub na działanie innych obciążeń zmiennych znacznie odbiega od tych znanych w mostach komunikacyjnych, gdzie przemieszczenia są w dużej mierze zależne od sztywnego pomostu. Metody modelowania i analizy numeryczne używane w przypadku klasycznych mostów wiszących nie mogą być zatem bezpośrednio zastosowane do mostów rurociągowych. W analizach tych mostów powinny być uwzględnione duże zwisy cięgien głównych i wiatrowych, geometryczna nieliniowość spowodowana dużymi przemieszczeniami cięgien i wiotkiego rurociągu, a także przepływ cieczy przez rurociąg, której masa jest istotna w porównaniu z masą mostu. Te charakterystyczne cechy konstrukcji wymagają, aby każdy projektowany wiszący most rurociągowy był poddany indywidualnej analizie dynamicznej.

BIBLIOGRAFIA

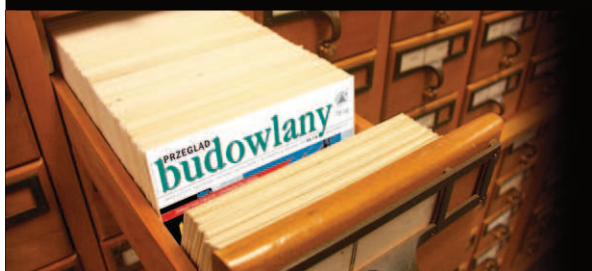
- [1] ASCE, 1996, Pipeline Crossings (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 89).
- [2] Gimsing N.J., Georgakis C.T., Cable supported bridges, concept and design (Third edition), John Wiley & Sons, 2012

- [3] Cain J. F., Fifty-year development – construction of steel pipeline suspension bridges, Journal of the Construction Division, ASCE, vol. 101, nr 4, 1975, s. 733-749
- [4] Dusseau R. A., The evolution of pipeline suspension bridges in North America since 1952, Proceedings of the Pipeline Division International Conference (PIPELINES 2002), Cleveland, Ohio, USA, August 4-7, 2002, s. 1-10
- [5] Baird R. C., Wind-induced vibration of a pipe-line suspensions bridge and its cure, ASME Transactions, vol. 77, nr 6, 1955, s. 797-803
- [6] Steinman D. B., Pipeline bridge stabilized with diagonal rope stays, Civil Engineering, ASCE, vol. 22, nr 3, 1952, s. 25-27
- [7] Paul M. J., Thompson J. E., Leach R., World's longest pipeline bridge, The Oil and Gas Journal, vol. 53, nr 36, 1955, s. 78-80
- [8] Reynolds C. A., Twin 30 in. lines span river via super suspension bridge, The Petroleum Engineer, vol. 29, nr 2, 1957, D-34 – D-38
- [9] Scott R., In the Wake of Tacoma: Suspensions bridges and the Quest for Aerodynamic Stability, ASCE, 2001
- [10] Dusseau R. A., Haddad M. E., Pipeline suspension bridge modal analysis, Proceedings of the 1987 ANSYS Conference, Newport Beach, California, USA, March 31-April 2, 1987, s. 8.27-8.37
- [11] Chen S. C., McMullan J. G., Similkameen pipeline suspension bridge, Journal of Transportation Engineering, ASCE, vol. 100, nr 1, 1974, s. 207-219
- [12] Chen S. C., McMullan J. G., Suspension bridge carries pipelines cross canyon, Civil Engineering, ASCE, vol. 44, nr 5, 1974, s. 58-61
- [13] Contri L., Schrefler B., A stability investigation of cable suspended pipelines, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 11, nr 3, 1977, s. 521-531
- [14] Studničková M., Vibrations and aerodynamic stability of a prestressed pipeline cable bridge, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, nr 17, 1984, s. 51-70
- [15] Streletsky N. N., Long Span Pipeline Suspension Bridges in the UdSSR, 11th Congress – International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Introductory Report, 1980, s. 779-784
- [16] Rouse S., LNG suspension bridge, Canadian Consulting Engineer, vol. 48, nr 2, 2007, s. 41-42

ŹRÓDŁA INTERNETOWE

- www.bridgemeister.com
- www.flickr.com
- www.highestbridges.com
- www.panoramio.com
- commons.wikimedia.org
- www.plock24.pl
- structurae.net

www.przegladbudowlany.pl/archiwum



Archiwum od ręki
 archiwalne spisy treści
 na stronach www