



JOANNA DULIŃSKA, *jdulinsk@pk.edu.pl*

JANUSZ KAWECKI, *jkawec@pk.edu.pl*

Politechnika Krakowska, Instytut Mechaniki Budowli

## AWARIE I KATASTROFY BUDOWLI WYWOŁANE DZIAŁANAMI DYNAMICZNYMI

### FAILURES AND DISASTERS OF ENGINEERING STRUCTURES CAUSED BY DYNAMIC INFLUENCES

**Streszczenie** W artykule przedstawiono przykłady naruszenia bezpiecznej eksploatacji budowli na skutek działań o charakterze szybkozmiennym w czasie. Analiza przyczyn prezentowanych awarii i katastrof wskazuje, że podstawowym czynnikiem prowadzącym do ich wystąpienia jest słabe rozpoznanie działań dynamicznych na budowle. Zdarza się również, że rozeznanie i opisanie zjawisk powstałych w wyniku działań dynamicznych dotyczy budowli o znaczeniu priorytetowym. Natomiast w procedurach projektowych konstrukcji o mniejszym znaczeniu pomija się sprawdzenie zjawisk dynamicznych, co może doprowadzić do ich awarii. W pracy zaprezentowano przykłady katastrof (most Tacoma w USA, chłodnie kominowe Ferrybridge w Anglii), które w znaczący sposób w skali światowej przyczyniły się do postępu badań teoretycznych i doświadczalnych dotyczących dynamicznego działania wiatru na konstrukcje inżynierskie, m.in. wzbudzenia wirowego, zjawiska flatteru aerodynamicznego oraz zjawiska interferencji obiektów wielkogabarytowych. Z kolei zaprezentowana analiza przyczyn awarii kładki Millennium w Londynie doprowadziła do rozeznania wpływu zsynchronizowanego ruchu pieszych na odpowiedź dynamiczną tego typu obiektów. W opracowaniu wskazano realizacje obiektów budowlanych i sposoby ich zabezpieczenia (tłumiki drgań komina stalowego, rozwiązania antysejsmiczne rurociągu TAPS), które są przykładem wykorzystania w praktyce inżynierskiej wcześniejszych doświadczeń z awarii i katastrof spowodowanych działaniami dynamicznymi. Wystąpienie sytuacji awaryjnych budowli o nowych, niestosowanych wcześniej rozwiązaniach konstrukcyjnych albo eksploatowanych w nowych warunkach pobudza zazwyczaj podjęcie badań naukowych w celu rozpoznania i opisanie działań dynamicznych. Umożliwia to uwzględnienie nowych zjawisk dynamicznych w modelowaniu i w projektowaniu kolejnych podobnych obiektów inżynierskich.

**Abstract** The paper presents examples of breach of safe exploitation of structures caused by influences quickly varying in time. The analysis of reasons of presented failures and disasters shows that the main cause of their occurrence was an insufficient recognition of dynamic influences on structures. It also occurs that a diagnosis and a description of dynamic phenomena concern structures of significant importance, while in structural designing procedures of objects of less importance dynamic safety check is usually omitted. This fact can result in their collapse. Some examples of the disasters presented in the paper (Tacoma Bridge, USA; Ferrybridge cooling towers, UK) are of significant importance, in global scale, when it comes to a progress in theoretical analyses as well as experimental investigations of dynamic wind influences are taken into consideration (i.e. a Karman vortex analysis, a phenomenon of aerodynamic flutter, an interference of large-dimensional structures). Also a failure of Millennium footbridge in London is shown. The analysis of the failure resulted in diagnosis of influence of synchronized movements of pedestrians on such objects. The realizations of engineering structures as well as their protection against dynamic influences, which are excellent examples of making use of lessons learnt from previous dynamic disasters, are also provided in the studies (i.e. dampers of a steel chimney, the TAPS pipeline). The failures of the engineering objects in which new structural solutions

never used before are adopted or which are exploited under new conditions usually activate undertaking theoretical and experimental studies. These studies lead up to a deeper exploration and more precise description of unknown dynamic effects and, in consequence, they enable to take new dynamic phenomena into consideration during designing and modeling similar further structures.

### 1. Cel opracowania i jego zakres

Działania dynamiczne na budowie należą nadal do stosunkowo mniej rozpoznanych i opisanych modelami obliczeniowymi, zweryfikowanymi na obiektach w skali naturalnej. Jeśli są one ujmowane w zapisach normowych, to przeważnie w postaci uproszczonej, która – ze względu na te uproszczenia – ma ograniczony zakres stosowania. Wznoszenie budowli coraz bardziej smukłych oraz eksploatowanych w nowych, słabo jeszcze rozpoznanych sytuacjach może stać się przyczyną wystąpienia nowych zjawisk. Generowane wówczas działania o charakterze szybko zmiennych w czasie mogą wpływać na naruszenie warunków bezpiecznej eksploatacji tych budowli. To zaś z kolei może prowadzić do awarii, a nawet katastrof tych budowli.

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie na wybranych przykładach, że:

- słabe rozpoznanie działań dynamicznych na budowie może doprowadzi do ich awarii, nawet katastrofy,
- pomimo rozpoznania i opisanie zjawisk powstałych w wyniku działań dynamicznych na budowie o dużym znaczeniu bywa, że pomija się sprawdzenie tych zjawisk na innych konstrukcjach o mniejszym znaczeniu, co również może doprowadzi do awarii tych mniej ważnych budowli,
- wystąpienie sytuacji awaryjnych i katastrof budowli o nowych, niestosowanych wcześniej rozwiązaniach konstrukcyjnych albo eksploatowanych w nowych warunkach zazwyczaj pobudza podjęcie badań naukowych w celu rozpoznania i modelowego opisanie działań dynamicznych, to zaś umożliwi uwzględnienie tego modelu w projektowaniu następnych tego typu obiektów.

Przykłady przywołane w niniejszym opracowaniu posłużą – w końcowej części – do sformułowania wskazówek przydatnych w praktyce inżynierskiej i to nie tylko dotyczących ujęcia działań dynamicznych na budowie podobne do opisanych, ale równie do przedstawienia procedur umożliwiających dalszą bezpieczną eksploatację budowli, w których stwierdzono wystąpienie stanu przed awaryjnego lub awaryjnego.

W tym miejscu trzeba byłoby również przywołać wiele publikacji z opisaniem działań dynamicznych na budowie, które to działania doprowadziły do awarii i katastrof tych budowli. W materiałach dotychczasowych konferencji poświęconych problemom awarii i katastrof budowlanych takich prac opublikowano już wiele. Ważne dla praktyki są przede wszystkim te, w których autorzy przedstawiają uogólnienia w postaci syntezy analizowanych różnych przypadków szczegółowych. Taki charakter ma na pewno opracowanie [1], dotyczące awarii mostów wywołanych działaniami dynamicznymi, a także opracowanie [2], w którym podano rodzaje i formy uszkodzeń budowli wywołanych działaniami dynamicznymi..

### 2. Wzbudzenie wirowe

Wzbudzenie wirowe zaliczane jest do działań dynamicznych, które badane w wielu ośrodkach naukowych coraz lepiej jest rozpoznawane. Początek intensywnym badaniom zjawiska wzbudzenia wirowego przeważnie wiąże się z katastrofą mostu Tacoma. Wystąpiła ona 17 listopada 1940 r. Podczas silnego wiatru (prędkość osiągała 67 km/h) pojawiły się drgania skrętne przeszła środkowego mostu (rys. 1) z częstotliwością 0,2 Hz. Maksymalna amplituda drgań wyniosła 8,5 m przy kącie skrećania 45°. Po 30 minutach nastąpiło odpad-

nięcie pierwszego fragmentu mostu, a po następnych 30 minutach katastrofa i zniszczenie przęsła środkowego mostu (rys. 2).

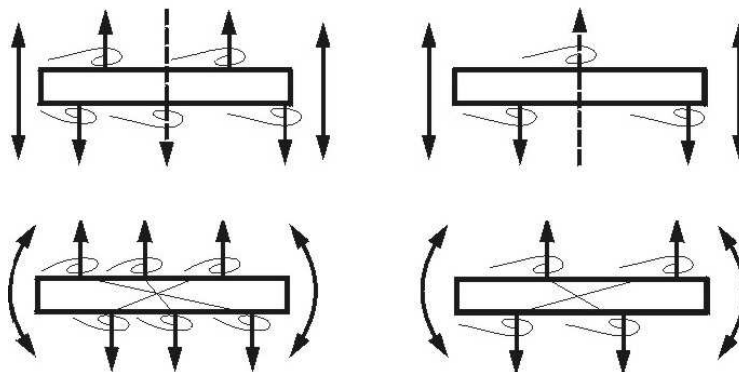


Rys. 1. Drgania skrętne mostu poprzedzające katastrofę



Rys. 2. Zniszczenie przęsła środkowego mostu

Już po wybudowaniu mostu Tacoma podjęto prace badawcze nad rozpoznaniem zjawiska opływu mostu strugą powietrza. Podejrzewano, iż tworzące się wiry powyżej i poniżej przekroju poprzecznego mogą generować drgania pionowe albo skrętne przęsła mostu. Pokazano to na rys. 3.



Rys. 3. Opływ przekroju poprzecznego mostu przez powietrze może powodować wystąpienie drgań pionowych albo skrętnych przęsła

Po katastrofie mostu podejmowane były coraz to nowe próby wyjaśnienia i opisanie zjawiska, które doprowadziło do katastrofy (por. np. [3]). Wyraźnie widać, iż katastrofa mostu Tacoma znacząco wpłynęła na zintensyfikowanie badań nad zjawiskiem wzbudzenia wirowego. W kolejno ustanawianych normach odnoszących się do oddziaływania wiatru na budowle wprowadzano coraz pełniejsze ujęcia modelowe opisywane zjawiska (por. normy ostatniego okresu: [4, 5, 6, 7]).

Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na to, iż w normie [7] podano dwie procedury uwzględniania wzbudzenia wirowego na konstrukcje. Jedna z nich nawiązuje do modelu stosowanego wcześniej np. w normach [4, 5], druga zaś do modelu wprowadzonego wcześniej do normy [6]. Zasadnicze różnice w rezultatach obliczeń przeprowadzonych z zastosowaniem tych modeli dotyczą przedziału scharakteryzowanego małymi wartościami liczby Scrutona ( $S_c$ ), która stosunkowo dobrze charakteryzuje wrażliwość konstrukcji na wzbudzenie wirowe. Liczbę Scrutona definiuje wzór:

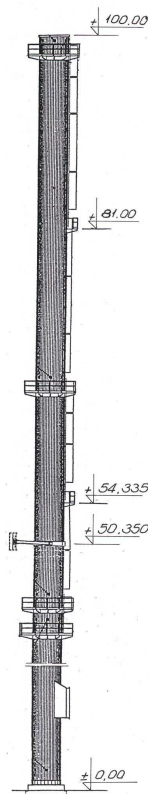
$$S_c = \frac{2\delta_s m_{i,e}}{\rho b^2}$$

gdzie:

- $\delta_s$  – współczynnik opisujący tłumienie konstrukcyjne wyrażony przez wartość logarytmicznego dekrementu,
- $\rho$  – gęstość powietrza,
- $m_{i,e}$  – masa równoważna konstrukcji na jednostkę długości przy drganiach z  $i$ -tą postacią drgań,
- $b$  – szerokość odniesienia przekroju poprzecznego.

W [8] przedstawiono interesujący przykład komina stalowego o wysokości 100 m i wewnętrznej średnicy trzonu 2,5 m, który tu przedstawiono na rys. 4. 11 segmentów tworzących trzon komina łączono śrubami sprężającymi M16. Dodatkowo wykonano od wnętrza spoiny

w miejscach przylegania kołnierzy kolejnych segmentów trzonu. Miało to poprawić szczelność między przylegającymi pierścieniami, doprowadziło zaś do zmniejszenia wartości wielkości opisującej właściwości tłumiące konstrukcji. Oprócz oparcia na fundamencie komin był jeszcze wsparty na wysokości 50,35 m na stalowej konstrukcji budynku usytuowanego obok.

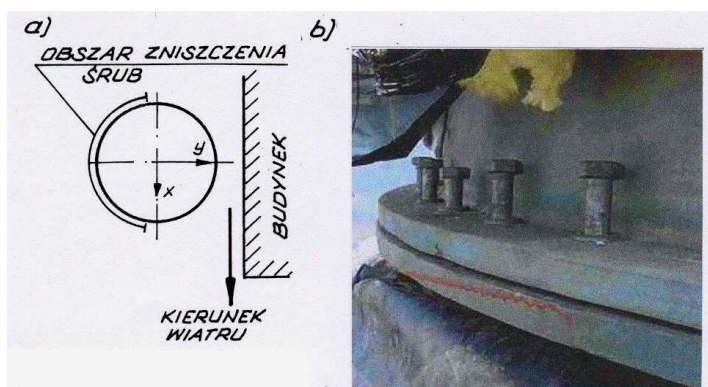


Rys. 4. Komin analizowany w [8], którego uszkodzenia wywołane były wzbudzeniem wirowym

Na zewnątrz trzonu umieszczono izolację termiczną z wełny mineralnej ( $t = 80$  mm) w osłonie z blachy trapezowej. Bezpośrednio po wybudowaniu obiektu stwierdzono występowanie drgań poprzecznych do kierunku wiatru. Pierwsza awaria komina wystąpiła przy prędkości wiatru ok. 9 m/s. Zauważono występowanie drgań, których amplitudę na wysokości wierzchołka komina oceniono na ok. 1,0 m. W pewnym momencie, podczas takich drgań usłyszano huk i natychmiast potem drgania komina ustąpiły. Ogląd konstrukcji komina od wewnątrz wykazał wystąpienie pęknięcia spoiny łączącej kołnierze w poziomie 47,37 m (por. rys. 5). Po odsłonięciu tego połączenia od zewnątrz stwierdzono (por. rys. 6), iż 31 śrub łączących kołnierze na tym poziomie ma zerwany gwint i 1 śruba została rozerwana. Po naprawie uszkodzonego połączenia oraz zeszlifowaniu spoin łączących przylegające kołnierze kolejnych segmentów wykonano pomiary drgań. Na podstawie pomiarów dynamicznych uzyskano informacje o podstawowej częstotliwości drgań własnych ( $n_{1y} = n_{1x} = 0,65$  Hz) oraz właściwościach tłumiących ( $\delta = 0,058 \div 0,06$ ) konstrukcji. Wykorzystano te informacje przy kształtowaniu modelu komina, który zastosowano przy wyznaczaniu optymalnych parametrów mechanicznego tłumika drgań. Przeprowadzono odpowiednie obliczenia, wyznaczono optymalne parametry tłumika i opracowano wytyczne do projektu tłumika.



Rys. 5. Połączenie segmentów trzonu komina w poziomie 47,37 m. Widok od wnętrza komina



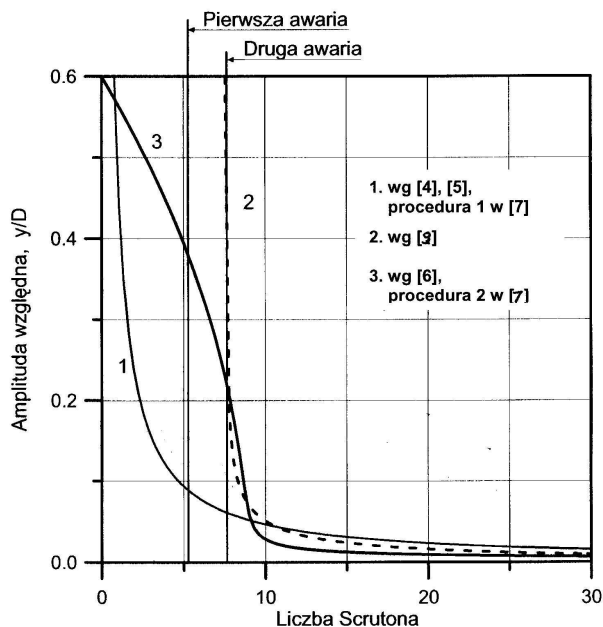
Rys. 6. Połączenie segmentów w poziomie 47,37 od zewnątrz. Obszar uszkodzenia śrub (a), widok na uszkodzone miejsca połączenia

Mechaniczny tłumik drgań umieszczono przy wierzchołku komina. Po wykonaniu tłumika przystąpiono do procedury dostrajania. Podczas pomiarów z zablokowanym tłumikiem stwierdzono wystąpienie różnych częstotliwości drgań w kierunkach  $x$  i  $y$ . Uzyskano:  $n_{1x} = 0,56$  Hz oraz  $n_{1y} = 0,44$  Hz. Na wystąpienie takich różnic nie wskazywała konstrukcja komina. Ponownie odstąpiło połączenie segmentów w poziomie 47,37 m. Tym razem stwierdzono uszkodzenie śrub (ścięcia gwintów) z obydwu stron. Dotyczyło to 24 i 23 śrub.

Wykonano odpowiednią naprawę uszkodzonego połączenia wzmacniając je, a następnie dostrojono tłumik do konstrukcji. Po tej operacji uzyskano:  $n_{1x} = n_{1y} = 0,56$  Hz oraz  $\delta = 0,25$ .

Rozważając powyższy przykład warto zwrócić uwagę na usytuowanie trzech analizowanych sytuacji komina na wykresach ilustrujących wpływ liczby Scrutona na amplitudę drgań wierzchołka komina wyznaczaną na podstawie procedur opisanych w różnych normach. Na rys. 7 podano wykresy trzech funkcji opisujących  $y/D = f(Sc)$ , z których: linia 1 odpowiada modelowi wzbudzenia wirowego przyjętemu w normach [4, 5], który jest zgodny z procedurą pierwszą podaną w [7], linia 2 – modelowi przyjętemu w [9] i linia 3 – modelowi przyjętemu w [6] oraz w procedurze drugiej opisanej w [7]. Widać więc, że w przedstawionej sytuacji opis linią 3 najlepiej odpowiadał występującym zdarzeniom. Po włączeniu do współpracy z kominem tłumika drgań wartość liczby Scrutona znacząco wzrosła ( $Sc = 39,9$ ), spodziewane zaś amplitudy drgań wyznaczone za pomocą wszystkich procedur różniły się już nieznacznie.





Rys. 7. Amplitudy drgań komina w funkcji liczby Scrutona wg różnych ujęć normowych

Wydawałoby się, że te i inne przykłady podawane w publikacjach w wystarczającym stopniu uwrażliwiają projektantów na problemy wynikające z możliwości wystąpienia zjawiska wzbudzenia wirowego. Jednakże okazuje się, że w odniesieniu do innych konstrukcji, które nie są tak szczegółowo analizowane zapomina się o konieczności sprawdzenia ich podatności na wzbudzenie wirowe. Do takich konstrukcji należą np. stalowe maszty wspornikowe z sygnalizacją świetlną zlokalizowane przy drogach kołowych. Przykład podany na rys. 8 przedstawia dwa maszty wspornikowe usytuowane przy drodze kołowej.



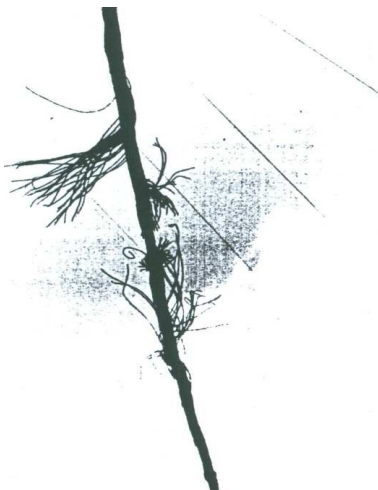
Rys. 8. Dwa maszty wspornikowe przy drodze. Maszt po lewej stronie wykonuje drgania wywołane wzbudzeniem wirowym, po prawej zaś – takich drgań nie wykazuje

Każdy z masztów charakteryzuje się różnymi wartościami częstotliwości drgań własnych. Prędkość wiatru występująca w czasie wykonywania fotografii była zgodną z wartością prędkości krytycznej wyznaczonej dla masztu po lewej stronie. Masztowi po prawej stronie odpowiada prędkość krytyczna wiatru inna od występującej podczas wykonywania fotografii, gdyż inna jest wartość częstotliwości własnej tego masztu. Maszt po prawej stronie nie wykonuje widocznych drgań.

### 3. Zerwanie odciągów masztów

W IASS działa WG „Masts and Towers”, która skupia osoby zajmujące się konstrukcjami masztów i wież. Tam również prowadzona jest rejestracja katastrof masztów z odciągami. Lista znanych przypadków takich katastrof obejmuje wiele obiektów z całego świata. Ciekawe informacje na ten temat zostały podane w [10]. W cytowanym tam raporcie o katastrofach masztów z odciągami zapisano: „Maszt z odciągami jest jednym z najbardziej skomplikowanych systemów, z jakimi ma do czynienia inżynier. Liczba katastrof masztów z odciągami jest stosunkowo wiele większa niż dla innych typów konstrukcji”. Do opisanych w zestawieniu masztów, które uległy katastrofie włączony został z datą 8 sierpnia 1991 maszt w Gąbinie o wysokości 646 m. Przyczyny katastrofy tego masztu badały różne grupy ekspertów, a wyniki swych dociekań autorzy opisali w „Inżynierii i Budownictwie” z 1992 r. (por. [11] i następne, podane tam artykuły).

W [10] zestawione zostały główne przyczyny katastrof masztów z odciągami. Wśród nich ważne miejsce zajmują – pomijając błędy konstrukcji i montażu – zerwania odciągów oraz wpływy aerodynamiczne. Przyczyną zerwania odciągów mogą być ich osłabienia wywołane korozją (por. rys. 9), albo wielokrotnym wystąpieniem zjawiska galopowania odciagu, wywołanego nagłym silnym uderzeniem w odciąg albo działaniem wandalii.



Rys. 9. Uszkodzenia odciagu wywołane korozją

Zobowiązanie do przeprowadzania analiz odnoszących się do działań wyjątkowych na konstrukcje, masztu zapisane są w odpowiednich normach projektowania (dot. Oddziaływań wyjątkowych), przykłady zaś obliczania masztów na tego typu działania z uwzględnieniem różnych modeli obliczeniowych zamieszczono np. w [12]. Wyniki tych obliczeń i badań można skonfrontować z informacjami zbieranymi podczas specjalnie przeprowadza-



nych eksperymentów. Jeden z takich eksperymentów przeprowadzono na maszcie o wysokości 320 m w Finlandii. Po 32 latach eksploatacji zaplanowano usunięcie masztu. Wówczas zdecydowano, że zostanie on usunięty przez zastosowanie sterowanego zerwania (za pomocą ładunku wybuchowego) odpowiednio osłabionych połączeń dwóch odciągów (po jednym w kolejnych poziomach ich mocowania) z blokami fundamentowymi. Przebieg zdarzenia zarejestrowano kilkoma kamerami i ujęto w filmie [13]. Kadr z filmu podano na rys. 10.



Rys. 10. Kadr z filmu dokumentującego zniszczenie masztu po nagłym zerwaniu dwóch odciągów

W ten sposób zebrane informacje wykorzystano w weryfikacji modeli obliczeniowych masztów i przykładanych do nich działań dynamicznych opisujących zerwanie odciagu.

Zjawisko galopowania odciągów pojawia się przy wystąpieniu sprzyjających temu warunków (odpowiednia prędkość wiatru, deszcz, zmniejszenie siły napinającej odciąg). Na filmie [14] zarejestrowano wiele masztów z odciągami podczas drgań wywołanych opływem powietrza. Wśród zarejestrowanych występują również drgania odciągów wywołane zjawiskiem galopowania. Na rys. 11 podano kadr z filmu [14]. Odnosi się on do drgań odciagu masztu w Sandale w listopadzie 1994 r., gdy prędkość wiatru przy powierzchni ziemi wyniosła 16 m/s.



Rys. 11. Kadr z filmu [14] z odciągami od strony czołowej, który wykazuje drgania wywołane zjawiskiem galopowania

Do niedawna korzystano ze wzoru na prędkość krytyczną galopowania podaną w normie [5] starając się przy projektowaniu zapewnić warunek, aby prędkość taka przyjmowała wartości bardzo duże albo ujemne. W normie [7] podano również wzór na prędkość wiatru  $v_{cG}$ , przy której rozpoczyna się galopowanie:

$$v_{cG} = \frac{2S_c}{a_G} n_{1,y} b \quad (2)$$

gdzie:  $S_c$  – liczba Scroutona,

$n_{1,y}$  – częstotliwość podstawowa drgań własnych konstrukcji (odciągu) w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiatru,

$b$  – szerokość opływanego elementu,

$a_G$  – współczynnik niestateczności typu galopowanie.

W celu uniknięcia wystąpienia zjawiska galopowania odciągów wymaga się spełnienia warunku:

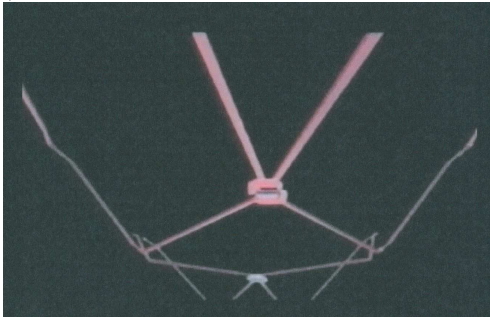
$$v_{cG} > 1,25 v_m \quad (3)$$

gdzie:  $v_m$  – średnia prędkość wiatru obliczona na wysokości spodziewanego wystąpienia zjawiska galopowania

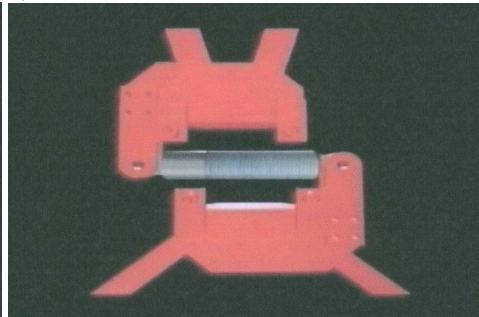
#### 4. Działania dynamiczne ludzi na konstrukcje

W normie [15] w rozdziale A1.4.4 poświęconym drganiom, wymieniono wśród działań dynamicznych, które zaleca się uwzględniać w obliczeniach takie działania jak: kroki oraz zsynchronizowane poruszanie się ludzi. Skierowano przy tym korzystającego z normy [15] do opracowania ISO [16]. Konieczność uwzględnienia tego rodzaju działań dynamicznych wykazana została po oddaniu do użytku kładki dla pieszych „Millennium” w Londynie. Podczas otwierania obiektu w dniu 10 czerwca 2000 r. stwierdzono zbyt duży poziom drgań wywołany przechodzeniem tłumy po kładce (por. [1]). Po zamknięciu obiektu podjęto badania oraz wykonano niezbędne analizy. Zdecydowano się na wprowadzenie do współpracy z konstrukcją kładki tłumików wiskotycznych (por. rys. 12) i masowych. Obiekt oddano ponownie do eksploatacji ponad 1,5 roku po pierwszym jego otwarciu.

a)



b)



Rys. 12. Tłumiki wiskotyczne umieszczone pod pomostem kładki „Millennium”. Usytuowanie tłumików (a) i element tłumiący przemieszczenia poziome kładki (b)

Obecnie w projektowaniu kładek stalowych rozważa się ich podatność na zsynchronizowane ruchy ludzi uwzględniając informacje o wartościach charakteryzujących wymuszenie dynamiczne podane w [16].

### 5. Uderzenia dużych ciężarów w sąsiedztwie

Coraz częściej zachodzi konieczność usuwania obiektów wyeksploatowanych za pomocą materiałów wybuchowych. Zadania te realizowane są również w odniesieniu do obiektów, w otoczeniu których usytuowane są inne, nadal eksploatowane obiekty budowlane. Wówczas konieczne jest wykonanie prognozy odnośnie do wpływu wyburzenia na otoczenie. Oprócz fali ciśnieniowej przekazywanej przez powietrze uderzenie dużych ciężarów o podłoże generuje drgania przekazywane z podłoża na fundamenty budowli usytuowanych w pobliżu.

W obliczeniach przydatne mogą być tu informacje zawarte w [17] oraz wyniki pomiarów drgań uzyskiwane podczas wyburzania. Interesujące są w tym zakresie informacje zamieszczone w [18], które uzyskano podczas wyburzania komina w Elektrowni „Konin” (por. rys. 13).

Podobna sytuacja generująca działania dynamiczne przekazywane przez podłoże na sąsiednie budynki wystąpiła podczas wyburzania budynku wcześniej uszkodzonego wybuchem gazu i zapadnięciem się całego obiektu o dwie kondygnacje w dół (wgniecenie parteru i I piętra w przestrzeń zajmowaną przez piwnice). Katastrofa budynku opisana była na Konferencji Awaryjne Budowlane przez Główny Urząd Nadzoru Budowlanego. Na rys. 14 podano zrzut z ekranu podczas relacjonowania operacji wyburzania budynku przez Telewizję Gdańsk.

Warto w tym miejscu odnotować zalecenie, aby każdorazowo przed przystąpieniem do usuwania obiektu za pomocą materiału wybuchowego przeprowadzać przegląd obiektów znajdujących się w otoczeniu wyburzanej budowli. W dokumentacji z przeglądu zapisuje się informacje o stwierdzonych uszkodzeniach obiektów. Po zrealizowaniu wyburzenia należy również przeprowadzić taki przegląd tych obiektów. Informacje te służą nie tylko do oceny zasadności ewentualnych roszczeń użytkowników obiektów z sąsiedztwa, ale również do oceny wiarygodności wykonanych wcześniej prognoz odnośnie do wpływu drgań na te obiekty. Ponadto upowszechnienie tak zbieranych informacji poprzez ich publikacje umożliwia wykorzystanie ich w prognozowaniu wpływów dynamicznych wywołanych nowymi wyburzeniami.



Rys. 13. Usuwanie wyeksploatowanego komina za pomocą materiału wybuchowego. Upadek na przygotowane pryzmy piasku poprzedzony został rozdzieleniem obiektu w połowie jego długości



Rys. 14. Zrzut z ekranu podczas realizacji telewizyjnej z operacji wyburzania budynku po katastrofie w dniu 17 kwietnia 1995 r.

### 6. Działanie wiatru na duże obiekty zgrupowane

Dobrym przykładem ilustrującym wpływ wiatru na duże obiekty zgrupowane może być katastrofa chłodni kominowych Ferrybridge, która wystąpiła 1 listopada 1965 r. [19]. Działanie wiatru doprowadziło do zawalenia się trzech chłodni (por. rys. 15a).

Interesujące było zdjęcie jednej z chłodni podczas jej zniszczenia (por. rys. 15b). Z opracowania będącego rezultatem poszukiwania przyczyn katastrofy wynika, że nie uwzględniono dynamicznego działania wiatru podczas porywów wiatru oraz nie uwzględniono interferencji budowli wielkogabarytowych sąsiadujących ze sobą. Na rys. 16 podano usytuowanie chłodni w stosunku do kierunku wiatru oraz przebieg sił południkowych w chłodni wywołany ciężarem własnym i działaniem wiatru.

a)

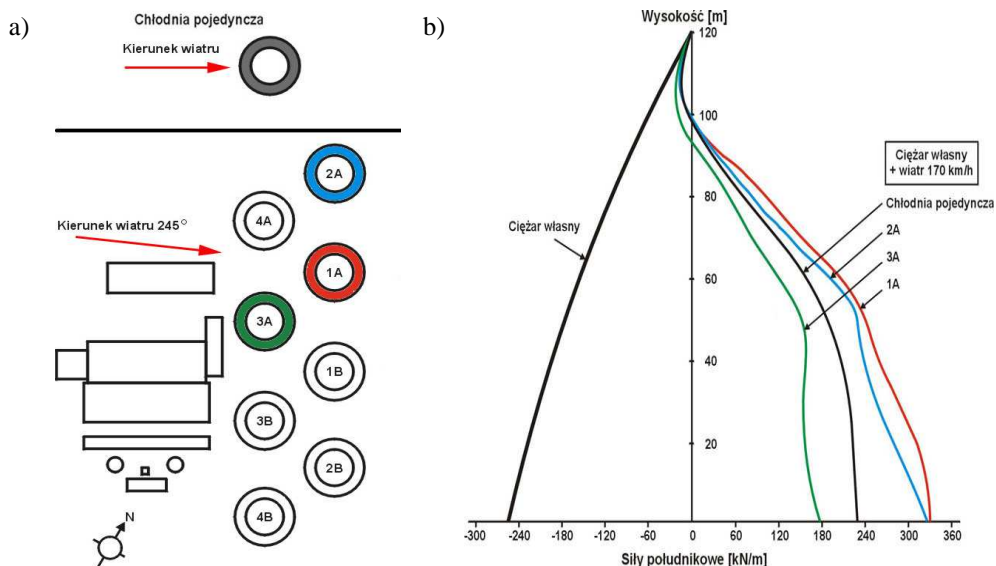


b)



Rys. 15. Widok na obiekty po zawaleniu się trzech chłodni [19]; kolejność zawalenia się chłodni: chłodnia A – godz. 10.30, chłodnia B – godzina 10.40, chłodnia C – godz. 11.20 (a) oraz moment katastrofy chłodni C (b)

Katastrofa przyczyniła się do podjęcia obszernych badań in-situ, w tunelach aerodynamicznych oraz prac teoretycznych nad ujęciem obliczeniowym działań dynamicznych wiatru na chłodnie kominowe z uwzględnieniem wpływu interferencji tego typu budowli sąsiadujących ze sobą.



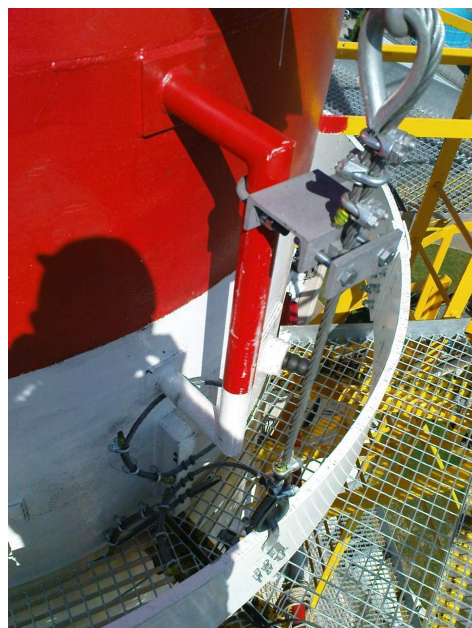
Rys. 16. Usytuowanie chłodni (a) oraz rozkład sił południkowych (b) w powłokach zaznaczonych chłodni

## 7. Wykorzystanie w praktyce doświadczeń z awarii i katastrof wywołanych działaniami dynamicznymi

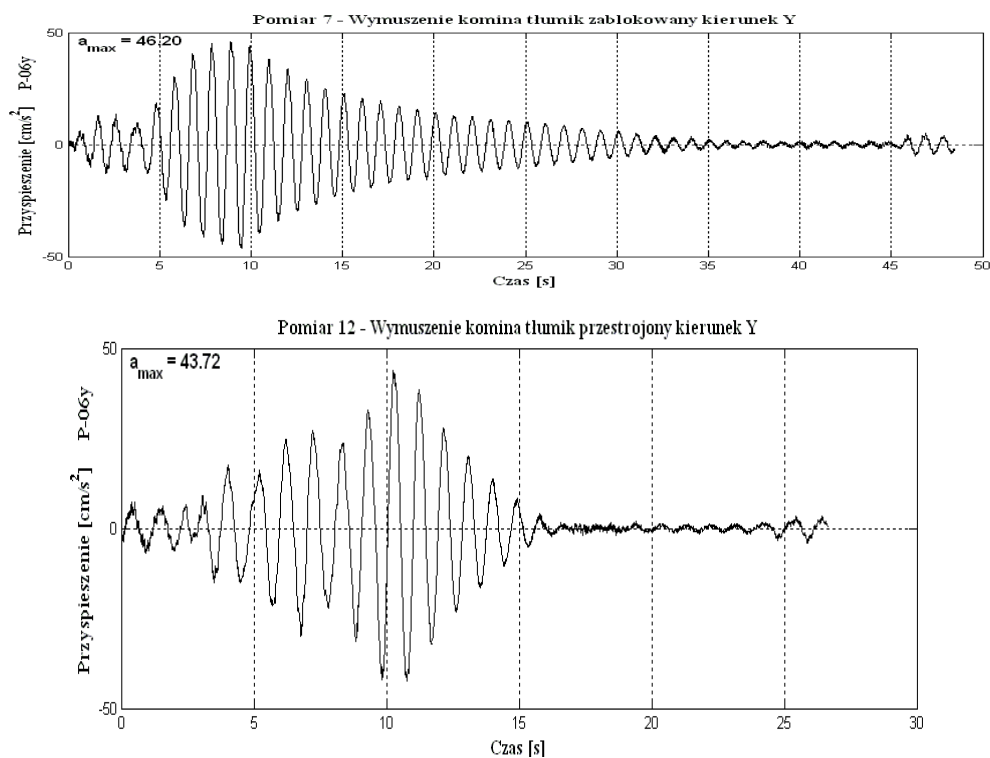
Awarie i katastrofy wywołane nowymi działaniami dostarczają informacji, które powinny inspirować badania umożliwiające rozpoznanie zjawisk i opracowanie metod uwzględnienia ich w projektowaniu nowych, podobnych obiektów albo podanie zasad takiego ich kształtowania, by można było uniknąć sytuacji doprowadzających do wystąpienia podobnych awarii i katastrof. Przykłady przedstawione w niniejszym opracowaniu świadczą o prawdziwości powyższego stwierdzenia.

Badania i analizy na temat wzbudzenia wirowego zintensyfikowane szczególnie po katastrofie mostu Tacoma doprowadziły do opracowania i wprowadzenia do norm i wytycznych projektowania odpowiednich modeli obliczeniowych uwzględniających tego rodzaju działanie dynamiczne. Z kolei prace nad wyeliminowaniem możliwości wystąpienia tych zjawisk doprowadziły do skutecznych rozwiązań konstrukcyjnych w tym zakresie. Chodzi tu nie tylko o działania prowadzące do uniemożliwienia jednoczesnego odrywania się wirów (spirale Scrutona) ale także różnego rodzaju tłumiki drgań. Przykładowe rozwiązanie techniczne tłumika skutecznie zmniejszającego drgania komina opisanego w [8] podano na rys. 17. O skuteczności zastosowanego rozwiązania świadczą wyniki pomiarów drgań komina podczas dostrajania zestawione na rys. 18.





Rys. 17. Rozwiązania konstrukcyjne tłumika drgań zastosowanego w kominie stalowym



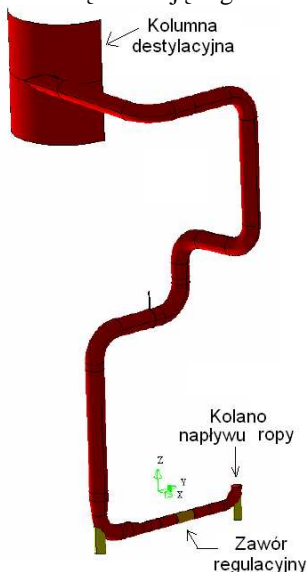
Rys. 18. Drgania wierzchołka komina przy tłumiku zablokowanym (a) oraz dostrojonym do konstrukcji (b)



O zapisach dot. wzbudzenia wirowego wprowadzonych do norm projektowania nie zawsze jednak pamiętają analizujący nowe konstrukcje. Pokazano to już powyżej na przykładzie masztów z sygnalizacją świetlną przydrogową. Projektując tego typu konstrukcje należało spodziewać się wystąpienia warunków sprzyjających drganiom generowanym wzbudzeniem wirowym, przeprowadzając zaś odpowiednie analizy można było uniknąć wystąpienia tego rodzaju drgań.

Doświadczenia zebrane w wyniku drgań kładki „Millennium” spowodowały nie tylko rozpoznanie i zapisanie w normach odpowiednich informacji o źródle drgań (por. [16]), ale również zauważanie przez projektantów problemu wynikającego z tego rodzaju działań dynamicznych i uwzględnienie go przy projektowaniu nowych obiektów.

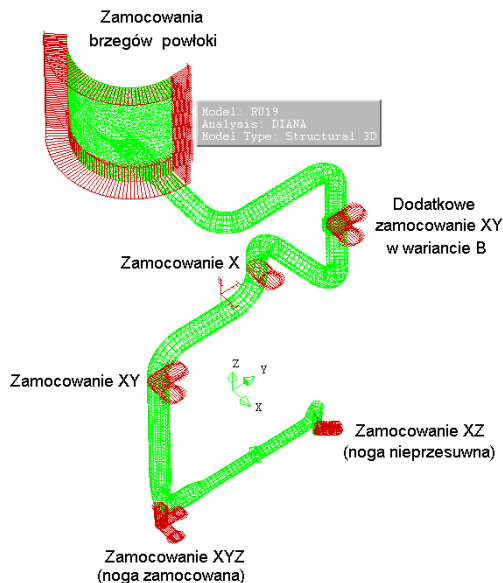
Bywa jednak, iż zjawiska wywołane działaniem dynamicznym pojawiają się sporadycznie, a wynikają z wyeksploatowania obiektu, którego nagle wyłączenie z eksploatacji stwarzałoby znaczne trudności organizacyjne i straty finansowe ponoszone przez użytkownika. Wówczas badania ekspertów mogą umożliwić warunkową dalszą eksploatację obiektu w określonym czasie z zapewnieniem stałej obserwacji tego obiektu za pomocą monitorowania zmian wybranych wielkości charakteryzujących stan konstrukcji. W [20] przedstawiono w jaki sposób wykorzystano wyniki badań doraźnych uzupełnionych innymi pomiarami systematycznymi do przedłużenia czasu bezawaryjnej eksploatacji pewnej konstrukcji przemysłowej. W [21] z kolei przedstawiono, w jaki sposób można było wyeliminować nadmierne drgania rurociągu doprowadzającego ropę do kolumny destylacyjnej (por. rys. 19). W celu redukcji drgań rurociągu wprowadzono dodatkowe więzi nałożone na rurociąg w poziomie 12,75 (por. rys. 20). Doprowadziło to do zmiany charakterystyki dynamicznej rurociągu i uzyskano wyraźnie widoczną redukcję drgań.



Rys. 19. Układ rurociągu doprowadzającego ropę do kolumny destylacyjnej wg [21]

Już przykłady wymienione w niniejszej pracy świadczą, iż ważne jest nie tylko kształcenie inżynierów budownictwa przez wskazywanie korzystania z procedur stosowania wymagań określonych w normach. Trzeba również przekazywać doświadczenia wynikające z analizy awarii i katastrof obiektów budowlanych. Powinno to pomóc w kształtowaniu nawyków do pełniejszego, poza normowego spojrzenia na projektowane przez nich konstrukcje

budowlane. Dotyczy to w szczególności projektowania obiektów odpowiedzialnych o dużym znaczeniu technicznym, ekonomicznym i ekologicznym.

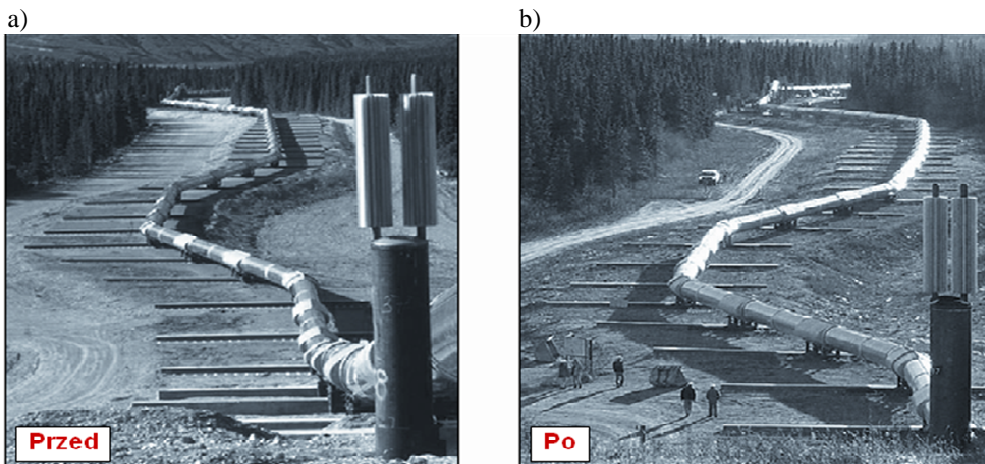


Rys. 20. Więzy istniejące na rurociągu i dodatkowa nałożona w celu redukcji drgań

Dobrym przykładem w tym zakresie jest postępowanie zastosowane przy projektowaniu TAPS (Trans Alaska Pipeline System). Rurociąg powstał w 1977 r. (por. [22]) i służy do transportu ropy przez Alaskę z miejsca jej wydobycia do portu, stąd statkami jest transportowana do miejsca przeznaczenia (por. rys. 21). Rurociąg o długości 1287 km, średnicy rury 1219 mm i jej grubości 50,8 mm przebiega zarówno pod ziemią (61 km) jak i na jej powierzchni (676 km). Na trasie rurociągu występują obszary o różnej intensywności sejsmicznej, w których prognozowana magnituda wynosi od 5,5 do 8,5. Rurociąg przechodzi również nad uskokiem (uskok Denali), co stwarzało konieczność opracowania takich rozwiązań konstrukcyjnych, które umożliwią bezpieczne przeniesienie przez tę konstrukcję działań dynamicznych przekazywanych na rurociąg.



Rys. 21. Trasa rurociągu TAPS



Rys. 22. Rozwiązania konstrukcyjne w miejscu prognozowanego uskoku przed (a) i po (b) wystąpieniu trzęsienia ziemi w 2002 r.

Na rys. 22a przedstawiono zastosowane rozwiązania konstrukcyjne w strefie prognozowanego uskoku. W 2002 r. (3 listopada) wystąpiło trzęsienie ziemi, którego parametry były zbliżone do prognozowanych, na które obliczano konstrukcję. Przegląd rurociągu po wystąpieniu tego trzęsienia ziemi wykazał, iż cała konstrukcja bezpiecznie przeniosła działania dynamiczne i powszechnie uznano ten fakt jako triumf nauki i techniki.

### Literatura

1. Radomski W.: Dynamiczne przyczyny awarii mostów, XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna: Awary Budowlane, Politechnika Szczecińska, Szczecin-Międzyzdroje, 23÷26 maja 2007, s. 131÷150.
2. Ciesielski R.: Awary i uszkodzenia budowli na skutek wpływów dynamicznych. Rodzaje i formy uszkodzeń., Konferencja Naukowo-Techniczna: Awary Budowlane, Politechnika Szczecińska, 1994, t. 1, s. 15÷30.
3. Ruscheweyh H.: Dynamische Windwirkung an Bauwerken. Praktische Anwendungen, Bauverlag GMBH, Wiesbaden und Berlin,
4. DIN 4133: Schornsteine aus Stahl, Nov. 1991
5. PN-93/B-03201: Konstrukcje stalowe. Kominy. Obliczenia i projektowanie.
6. CICIND: Model Code for Steel Chimneys, March 2002 (C3.3).
7. PN-EN 1991-1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływanie wiatru.
8. Kawecki J., Żurański J. A.: Cross-wind vibration of steel chimneys – A new case history, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 95, issues 9-11, October 2007, s. 1166÷1175.
9. ISO 4354, 1997 Wind action on structures
10. Ciesielski R.: O katastrofach i defektach stalowych masztów radiowo-telewizyjnych, Inżynieria i Budownictwo, nr 3, 1992, s. 73÷78.
11. Żółtowski W., Kleśta L.: Katastrofa masztu radiowego w Gąbinie. Przyczyny, przebieg, skutki, Inżynieria i Budownictwo, nr 9, 1992, s. 340÷346.
12. Kozioł K.: Prętowe konstrukcje z odciągami – analiza odpowiedzi dynamicznej na obciążenia wyjątkowe, Politechnika Krakowska, rozprawa doktorska, Kraków 2008, stron 178.
13. Film „Oulun van han TV – maston kaato, 22.09.1994” (udostępniony przez Jorma Laiho).

14. Film „BBC Transmission Mast Vibration”, 1995.
15. PN-EN 1990: Podstawy projektowania konstrukcji.
16. ISO 10137: Bases for design of structures Serviceability of buildings and walkways against vibrations, 2007.
17. PN-85/B-02170: Ocena szkodliwości drgań przekazywanych na budynki z podłoża.
18. Maciąg E., Lewicki J., Winzer J.: Wyburzenie żelbetowych kominów Elektrowni „Konin” i oddziaływanie upadku ich masy na sąsiednie obiekty, *Czasopismo Techniczne, Budownictwo*, z 11, nr 3-B/2010.
19. Report of the Committee of Inquiry into Collapse of Cooling Towers at Ferrybridge, Monday 1 November 1965, printed and published by the Central Electricity Generating Board, Sudbury House, London, 1966.
20. Abratański A., Kawecki J.: Wykorzystanie wyników doraźnych badań dynamicznych w diagnostyce uszkodzonej konstrukcji przemysłowej, XXI Konferencja Naukowo-Techniczna: Awarie Budowlane, Politechnika Szczecińska, Szczecin-Międzyzdroje, 20-23 maja 2003, s. 303÷310.
21. Ciurej H., Kawecki J.: Wpływ zmiany warunków podparcia na drgania rurociągu, WIBROTECH 2006, XII Konferencja Naukowa Wibrotechniki i Wibroakustyki, Kraków 2006, s. 49÷58.
22. Hall W.J., [et al.], Performance of the Trans-Alaska Pipeline in the November 3, 2002 Denali Fault Earthquake, Proc. 6th U.S. Conference and Workshop on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Long Beach, California, August, 2003.