



Mosty Tacoma Narrows, 2007 i 1950

Mosty Tacoma Narrows



■ Krzysztof Dąbrowiecki

W światowej historii budownictwa lądowego wybijają się do rangi symbolu trzy mosty wiszące, nieprzeciętne budowle, które wzbudzają uczucia podziwu i zachwytu, ale też i niedowierzania, jak w przypadku tragedii mostu Tacoma Narrows.

Brooklyn Bridge w Nowym Jorku, zaprojektowany przez Johna Roeblinga i jego syna Washingtona (1883), był pierwszą konstrukcją mostową o tak ogromnej skali. Jej rozmiar i kształt pobudzały wyobraźnię i udowadniał, że niemożliwe może stać się realne, a umysł ludzki, upór i mozolna praca mają nieograniczony potencjał. Golden Gate Bridge w San Francisco (projektanci: Leon Moisseiff, Charles Ellis i Joseph Strauss, 1937 r.), przy rozmiarach ponad dwa i pół razy większych niż Brooklyn Bridge, zachwyca prostotą linii, lekkością konstrukcji, magią proporcji, barwy i gry światła. Tacoma Narrows Bridge w pobliżu Seattle (projekt Moisseiffa z 1940 r.) stał się symbolem klęski inżynierii w obliczu nie do końca zbadanych sił przyrody i punktem zwrotnym w podejściu do projektowania wszystkich rodzajów mostów. Szczęśliwym zbiegiem okoliczności ostatnie chwile przed całkowitym zniszczeniem konstrukcji zostały sfilmowane. Amatorski film pokazuje niewiarygodny obraz destrukcji, niekontrolowanej oscylacji

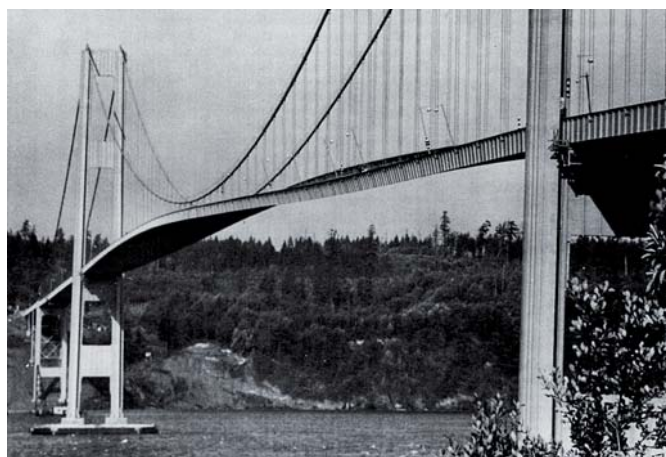
i niespotykanej amplitudy przęsła środkowego dochodzącej do wysokości 8 m. Raporty, które pojawiły się w kolejnych latach po dramacie, i próby wyjaśnienia występujących wtedy zjawisk uświadomiły następnym pokoleniom studentów budownictwa lądowego i praktykującym inżynierom zagrożenia wynikające po części z wieloletniej rutyny, drastycznego obniżenia kosztów budowy czy chęci przełamania kolejnej inżynierskiej bariery bez dostatecznych prac modelowych.

Projektantem pierwszego mostu Tacoma Narrows, oddanego do eksploatacji 4 lipca 1940 r., był Leon Moisseiff (1872–1943). Należał on w latach 20. i 30. XX w. do najwybitniejszych inżynierów budownictwa mostowego. Jego niepodważalny autorytet jako teoretyka w dziedzinie projektowania mostów wiszących powodował, że był autorem lub konsultantem niemalże wszystkich mostów wiszących budowanych w tamtych latach w USA. Jego nowoczesne podejście do rozwiązywania trudnych problemów

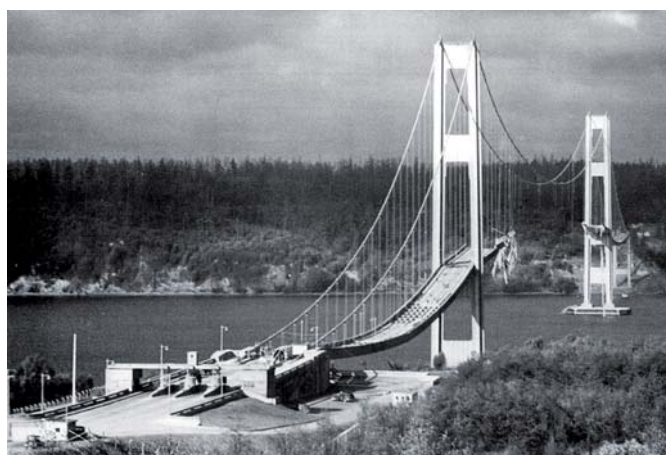
wielkich rozmiarów mostów budziło respekt i podziw wśród rzesz inżynierów. Miało ono również ogromny wpływ na przełamanie stereotypów analizowania i projektowania konstrukcji o wymiarach, w ówczesnym czasie, bijących rekordy długości i proporcji konstrukcji mostowych. Kariera inżynierska Moisseiffa, budowana mozolnie przez lata i potwierdzana wielokrotnie jego obecnością w dziesiątkach zespołów (Lindenthal, Modjeski, Steinman, Ammann, Strauss, Nichols, Purcell) i w prestiżowych projektach mostów (Manhattan, Benjamin Franklin, Ambassador, George Washington, Golden Gate, San Francisco-Oakland Bridge, Bronx-Whitestone), runęła gwałtownie tak, jak runął most Tacoma Narrows.

Leon Solomon Moisseiff, urodzony i wychowany w Rydze, po dwóch latach studiów w Bałtyckim Politechnicznym Instytucie, zmuszony z powodów politycznych do wyjazdu z kraju, wyemigrował wraz z rodziną w 1891 r. do Nowego Jorku. Studiował na Uniwersytecie Columbia, uzyskując w 1895 r. dyplom inżyniera budownictwa lądowego. Po studiach początkowo pracował jako kreślarz w kilku inżynierskich firmach, by w 1898 r. objąć stanowisko szefa kreślarzy w nowojorskim Departamencie Mostów, a później awansować na asystenta projektanta. W tym okresie brał udział w pracach kreślarskich nad mostami wiszącymi w Williamsburg i Queensboro, których projektantem i głównym inżynierem był Gustaw Lindenthal (1850–1935). W 1901 r. Lindenthal jako komisarz Departamentu Mostów Nowego Jorku, przygotował projekt nowego mostu Manhattan, będącego w pierwotnej wersji połączeniem niektórych elementów mostów Brooklyn i Williamsburg. Koncepcja mostu została zatwierdzona, chociaż do 1904 r. trwały dyskusje nad jej ostateczną wersją. Kolejnym, zgłaszanym przez Lindenthala propozycjom, zarzucano masywność stalowych pylonów i zbyt głębokie kratownice usztywniające oraz odrzucenie tradycyjnej, linowej konstrukcji wiszącej i zastąpienie jej łańcuchowym rozwiązaniem z oczkowymi wieszakami. Po kontrowersjach wokół projektu Lindenthala i gorących dyskusjach, w tym politycznych, nowym komisarzem został George Best, który na głównego inżyniera nadzorującego budowę mostu Manhattan mianował Othniela Fostera Nicholasa. Doradcą Nicholasa został Ralph Modjeski (1861–1940), mający już wtedy wieloletnie doświadczenie jako główny inżynier różnych budów w kraju. Modjeski, po konsultacjach, wybrał rozwiązanie czterokablowego mostu wiszącego. Obliczenia konstrukcji zrobił Moisseiff, używając nowej, mało jeszcze znanej i rzadko stosowanej teorii zginania. Most Manhattan nad East River z przęsłem o długości 441 m, otwarty dla ruchu 31 grudnia 1909 r., był ogromnym sukcesem Moisseiffa i nowej metody obliczeniowej.

Moisseiff, adaptując teorię zginania Wilhelma Rittera (1847–1906) i Josefa Melana (1854–1941) do potrzeb mostów wiszących, obliczał reakcje konstrukcji i kabli pod wpływem obciążenia grawitacyjnego i wiatru. Udowadniał, że im dłuższe przęsło, tym większy jego ciężar, a więc tym mniejsze usztywnienie potrzebne do utrzymania stanu równowagi sił składowych mostu. Twierdził, że kratownice o dużej sztywności redukują w niewielkim stopniu ugięcie mostu. W przeciwieństwie do zachowania się zwykłych usztywnień wzdłużnych i kratownic, pionowe ugięcie mostu nie jest proporcjonalne do momentu bezwładności kratownicy, ale zależy ono od ciężaru i proporcji konstrukcji. Uważał, że można zredukować wysokość kratownicy bez większego wpływu na sztywność mostu. Kontynuując wywód myślowy, konkludował, iż użycie niskich kratownic usztywniających naturalnie prowadzi do teowych usztywnień wzdłużnych, które mają wiele zalet nie tylko konstrukcyjnych, prefabrykacyjnych, ale także konserwacyjnych. Następnie zakładał, że kabłe mają zdolność kontrolowa-



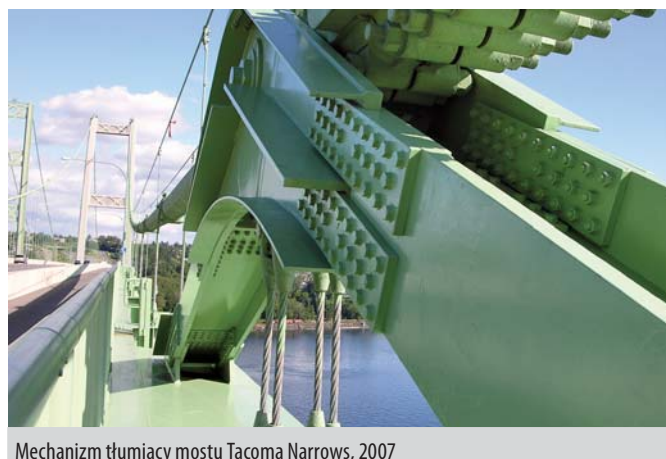
Zdjęcie archiwalne mostu Tacoma Narrows, 1940, WSDOT



Zdjęcie archiwalne mostu Tacoma Narrows, 1940, WSDOT



Mechanizm tłumiący mostu Tacoma Narrows, 1950



Mechanizm tłumiący mostu Tacoma Narrows, 2007

nia i usztywniania mostu wiszącego, a przez spłaszczenie krzywej kabli można zmniejszyć elastyczność mostu. Usztywnienia wzdłużne traktował jako mniej ważne elementy w przenoszeniu obciążenia i ograniczaniu ugięcia. Uważał je za elementy konstrukcji odpowiedzialne w przeciwdziałaniu siłom wiatru, które uznawał jako znaczące przy długich i wąskich przęsłach.

Moisseiff nie był jedynym w tamtym czasie entuzjastą zastosowania nowej teorii ugięcia do obliczania mostów wiszących. David Bernard Steinman (1886–1960), późniejszy projektant mostów Florianopolis, Mt Hope, St Johns, Mackinac, obronił pracę doktorską poświęconą mostom wiszącym i łukowym. W 1913 r. przetłumaczył na angielski ważne opracowanie prof. Melana z 1888 r. *Theory of Arches and Suspension Bridges* (Teoria mostów łukowych i wiszących), a 10 lat później opublikował własną książkę *A Practical Treatise on Suspension Bridges. Their Design, Construction and Erection* (Praktyczny traktat o mostach wiszących. Projektowanie, konstrukcja i budowa). W 1934 r. Steinman wydał bardziej szczegółowe opracowanie *Deflection Theory for Continuous Suspension Bridges* (Teoria ugięcia dla ciągłych mostów wiszących). Wszystkie te pozycje omawiają praktyczne zastosowanie teorii ugięcia w obliczeniach mostów wiszących i wykazują jej zalety w porównaniu z przybliżoną teorią Rankina (1858). W 1932 r. Steinman zaprezentował również swoją teorię mostów wiszących z ciągłym dźwigarem na forum I Kongresu Międzynarodowego Stowarzyszenia Inżynierii Mostów i Konstrukcji (IABSE) w Paryżu. Podając przykład mostu wiszącego z głównym przęsłem 240 m, wykazywał, że momenty gnące w ciągłych dźwigarach usztywniających obliczone na podstawie teorii ugięcia mogą być zredukowane średnio o 45% w porównaniu do obliczeń wykonanych na podstawie teorii sprężystości. Udowodnił tym samym ekonomiczność i zasadność stosowania tej metody.

Przy okazji rozwoju teorii ugięcia dla mostów wiszących powstało wiele nowoczesnych metod obliczeniowych, wśród nich na uwagę zasługuje metoda prof. Stephena Timoshenki (1878–1972), który w serii artykułów przedstawił sposób rozwiązania podstawowego równania różniczkowego teorii ugięcia przy zastosowaniu ciągów trygonometrycznych Fouriera. Podał również algorytm do szybszego obliczenia ugięcia i momentów gnących w dźwigarach usztywniających.

Interesujący jest fakt spotkania się prof. Timoshenki z Moisseiffem w Filadelfii (1922), o czym Timoshenko wspomina w autobiografii *As I Remember*: „Któregoś dnia rano przyszedł do mojego pokoju Akimow z gościem, znanym projektantem kilku mostów w Nowym Jorku. Z rozmowy dowiedziałem się, że był on absolwentem Politechniki w Rydze. Nie zapomniał rosyjskiego i ucieliśmy sobie pogawędkę. Dowiedziałem się też, że był konsultantem budowniczym mostu przez rzekę Delaware w Filadelfii. Budowa filarów była już w toku, dlatego był zainteresowany problemami wytrzymałości kabli. Szczególnie interesował go sposób łączenia drutów wchodzących w skład kabla. Kiedy byłem konsultantem wojskowych sił powietrznych w Petersburgu, przeprowadziłem znaczną liczbę prób wytrzymałościowych na różne rodzaje połączeń wykorzystywanych do łączenia segmentów drutów, więc mogłem dać mu precyzyjną odpowiedź. Po rozstrzygnięciu tej kwestii zaczął mówić o pozycji inżynierów w Ameryce i na temat edukacji w amerykańskich szkołach inżynierskich. Kiedy zaczął pracować w nowojorskim wydziale do spraw mostów, to szybko zauważył, że jego teoretyczne przygotowanie było lepsze niż amerykańskich inżynierów. Dzięki dobremu przygotowaniu zyskiwał promocję i wiodącą pozycję w budowaniu niektórych największych mostów w Nowym Jorku, zwłaszcza mostów wiszących. To był mój pierwszy kontakt z amerykańskim specjalistą od mostów

wiszących. Później zainteresowałem się teorią mostów wiszących i opracowałem kilka metod obliczania tych ogromnych budowli”.

W 1933 r. Moisseiff przeprowadził weryfikacyjny eksperyment, który utwierdził go w przekonaniu, że można planować długie przęsła jeszcze odważniej, a zarazem bardziej ekonomicznie. Udział w projektowaniu mostu Tacoma Narrows nie mógł być lepszą okazją dla potwierdzenia eksperymentu w praktyce. Budżet na budowę mostu był bardzo ograniczony (6,4 mln USD), odległość pomiędzy brzegami przeprawy wynosiła ponad 1,7 km. Według pomiarów natężenia komunikacyjnego dwa pasy ruchu powinny w pełni zapewnić płynność ruchu na moście. W 1938 r. przedstawił projekt mostu wiszącego o całkowitej długości 1810 m, przęsła środkowym 840 m, szerokości 10,97 m, z dwuteowymi usztywnieniami wzdłużnymi o wysokości 2,44 m.

Most szybko stał się atrakcją dla kierowców ze względu na nietypowe zachowanie się konstrukcji pod wpływem obciążenia przejeżdżających samochodów. Wielokrotne, pionowe oscylacje mostu były nietypowe i zabawne. To, co bawiło kierowców, wprawiało w zakłopotanie Stanowy Zarząd Mostów, dlatego zwrócono się do Fredericka Farquharsona (1895–1970), profesora mechaniki Uniwersytetu Washington, o zbadanie tego zjawiska i przebadanie modelu w tunelu aerodynamicznym. Farquharson po testach poradził zaciśnięcie kabli nośnych od strony zakotwienia i przewiercenie otworów w usztywnieniach wzdłużnych lub założenie opływowej osłony dla poprawy swobodnego przepływu strumienia powietrznego wokół płaszczyzn dwuteowych usztywnień. Niestety, nie wszystkie zalecenia te zostały zastosowane, gdyż 7 listopada 1940 r. most pod działaniem wiatru dochodzącego do 60 km/h zaczął niebezpiecznie falować, a następnie kołysać się. W rezultacie wzrastającej amplitudy i niekontrolowanych sił skrętnych przęsła środkowego, most uległ zniszczeniu.

Po katastrofie mostu została powołana komisja (Othmar Ammann, George Woodruff, Theodore von Karman) w celu określenia przyczyn i zjawisk tragedii. W konkluzji komisja nie obciążyla za błędy Moisseiffa, uznając, że most Tacoma Narrows był zaprojektowany zgodnie z istniejącą wiedzą i standardami oraz spełniał warunki bezpieczeństwa sił statycznych, włączając obciążenie od sił wiatru, zwykle brane pod uwagę we wszystkich podobnych projektach. Stwierdziła natomiast, że nie było świadomości, że siły aerodynamiczne i niestabilność aerodynamiczna, w przeszłości niszczące dużo lżejsze i krótsze mosty, mogą mieć wpływ na konstrukcje takich rozmiarów, jak most Tacoma Narrows.

Potwierdzając wnioski komisji, w podobnym tonie o tragedii pisał Steinman w książce *Bridges and Their Builders* (Mosty i ich budowniczy): „Most Tacoma był całkowicie bezpieczny dla wszystkich obciążeń i sił, dla których został zaprojektowany, czyli dla obciążenia stałego, obciążenia ruchomego, temperatury i obciążenia statycznego od działania wiatru. W porównaniu z innymi mostami nie został jednak zaprojektowany na przeciwdziałanie dynamicznym efektom powstającym w wyniku wiatru. Rozumie się przez to efekt stałego obciążenia wiatrem, działający na elastyczną strukturę niektórych rodzajów przekrojów, wytwarzając zmieniającą się wypadkową siłą, automatycznie synchronizującą się w czasie i kierunku z harmonicznym ruchem konstrukcji, powodując przez to stopniowe wzbudzenie się ruchów przęsła do niebezpiecznej lub destrukcyjnej amplitudy”.

I dalej analizując proces w środowisku inżynierskim, który przyczynił się do zaniedbań w sprawdzaniu i kwalifikowaniu nowych rozwiązań, konkludował: „Most Tacoma oznacza zakończenie trendu w konstrukcji mostów. Wiek temu inżynierowie mostów zaczęli zdawać sobie sprawę, że konieczne jest usztywnienie mostów wiszących w celu zmniejszenia ugięcia

pod obciążeniem i żeby zapobiec zniszczeniu konstrukcji przez wiatr. Usztywnienie kratownic przęseł zostało wprowadzone przez Johna A. Roeblinga i jego współczesnych. Kolejne usztywnienia kratownic były coraz głębsze i głębsze, osiągając szczyt w oczywisty sposób nadmiernych i niezgrabnych proporcjach, jak most Williamsburg, ukończony w 1903 r. Następnie trend uległ odwróceniu. Wprowadzenie »teorii ugięcia« w odniesieniu do projektowania mostów wiszących pokazało, że wcześniejsze przęsła zostały proporcjonalnie niepotrzebnie, nadmiernie głębokie w przekroju i kierując się względami ekonomicznymi położyła nacisk na projektowanie konstrukcji bardziej elastycznych. Zwiększony nacisk na artystyczny wygląd przyniósł kolejną korzyść w postaci gracji i smukłości. Kratownice usztywniające wykonane były w coraz płytszych głębokościach. Pylony zostały zredukowane do coraz smuklejszych i elastycznych rozwiązań. Następnie, począwszy od ok. 1929 r. od przykładu takiego, jak most Kolonia-Muhlheim na Renie o rozpiętości przęsła 325 m, zaczęto stosować dźwigary zamiast kratownic usztywniających, w wyniku czego została osiągnięta maksymalnie artystyczna prostota linii. Tak więc poprawa analizy, wymagania ekonomiczne i względy estetyczne – wszystko razem przyspieszyło trend w kierunku zwiększenia smukłości proporcji. Około 1935 r. zaczęto rozwijać badania nad opracowaniem specyfikacji dla niezbędnego minimum sztywności wiszących przęseł. Zostały opracowane wzory i wykresy dla oceny porównawczej sztywności, ale nie wydają się one być sposobem ustalenia właściwego kryterium wymaganej sztywności. Gdzie powinna być granica oddzielająca odpowiednie od nieodpowiednich współczynników sztywności? Jak daleko możemy bezpiecznie pójść? Brakowało odpowiedzi na te pytania. Teraz mamy odpowiedź. Cztery mosty wybudowane w latach 1938 i 1939 mają współczynniki sztywności poniżej określonej wartości i w tych czterech mostach są pewne problemy ze względu na działanie sił aerodynamicznych i ich elastyczność wymaga sprawdzenia. Potem wybudowano w 1940 r. most Tacoma, przęsło miało jeszcze niższy współczynnik sztywności i było ekstremalnie elastyczne. Stąd teraz wiemy, gdzie postawić granicę. Poniżej pewnego poziomu sztywności możemy spodziewać się problemów wymagających działań korekcyjnych, a jeśli pójdziemy jeszcze poniżej wskazanego, niskiego wskaźnika sztywności, możemy spodziewać się katastrofy”.

Powyższe rozumowanie Steinmana odnośnie do współczynnika sztywności, jakkolwiek słuszne, oparte jest tylko i wyłącznie na metodzie prób i błędów, a nie na badaniach i analizach modelowych. Katastrofa mostu Tacoma Narrows ujawniła niedoskonałości teorii ugięcia w projektowaniu mostów wiszących. Brakowało w niej analizy aerodynamicznej konstrukcji, tak ważnej, jak się okazało, nie tylko w przypadku mostu Tacoma. Od tego właśnie momentu analiza aerodynamicznej stabilności konstrukcji stała się integralną częścią projektowania mostów wiszących. Badania modelowe w tunelu aerodynamicznym stały się także wymaganiem amerykańskiego rządu dla wszystkich mostów budowanych z funduszy federalnych.

W 1950 r. oddano do użytku drugi most wiszący Tacoma Narrows (projektanci: Dexter R. Smith i Charles E. Andrew). Zaproponowana wersja projektu nowego mostu wymagała testów. Ze względu na to, że inżynierowie w tamtym czasie niewiele wiedzieli o zjawiskach, które doprowadziły do zniszczenia poprzedniego mostu, a czysto matematyczne rozwiązanie było niemożliwe, Charles Andrew przyjął następującą strategię: „Jedyną drogą do rozwiązania problemu jest zaprojektowanie mostu, a następnie wykonanie modelu na podstawie projektu i przetestowanie go w specjalnym tunelu aerodynamicznym. Jeśli testy



Zamocowanie wieszaków do kabla mostu Tacoma Narrows, 2007



Ogranicznik ustroju nośnego Tacoma Narrows, 2007



Wzdłużne ciągi otworów w ustroju nośnym Tacoma Narrows, 1950



Kratownica usztywniająca mostu Tacoma Narrows, 1950



Mechanizm kompensacji odkształceń wzdłużnych mostu Tacoma Narrows, 2007

wykażą jakieś problemy, wtedy projekt będzie zmieniony i model będzie testowany ponownie do czasu aż powstanie dobre rozwiązanie”. Wstępne badania modelu przeprowadził Farquharson na Uniwersytecie Washington oraz von Karman w Kalifornijskim Instytucie Technologicznym w Pasadenie. Farquharson przetestował prawie 200 różnych konfiguracji uderzenia wiatru w most w płaszczyźnie prostopadłej do pomostu w zakresie od +45 do -45 stopni. Model pokazał dobrą stabilność konstrukcji. Następnie Farquharson wprowadził wzdłużne ciągi otworów w jezdni pozwalające na swobodny przepływ powietrza i redukcję ciśnienia wiatru. Model nie wykazał właściwie żadnego ruchu skrętnego. Smith i Farquharson zdecydowali się na dodatkowe kroki eliminujące, jak tylko jest to możliwe, ruchy falowania i kołysania. Dodali boczne usztywnienia kratownicy dla zwiększenia sztywności skrętnej i amortyzatory hydrauliczne, mechanizm tłumienia oscylacji w trzech niewrażliwych miejscach, w środku pomiędzy kablami głównymi i pomostem oraz na każdym z pylonów.

Z innych widocznych zmian w porównaniu z pierwszym mostem Tacoma Narrows było zwiększenie głębokości kratownic usztywniających z 2,45 m do 10,06 m, zastąpienie dwóch dźwigarów dwuteowych kratownicami typu Warren, powiększenie szerokości pomiędzy kablami nośnymi z 13,1 do 18,3 m, zmniejszenie odstępów pomiędzy wieszakami z 15 do 9,6 m, zwiększenie średnicy kabla z 0,444 do 0,514 m, zwiększenie ciężaru przęsła środkowego o 27%. Zaproponowana wersja stała się wskaźnikiem zmian w przyszłościowym projektowaniu mostów o długich przęsłach. Potwierdzeniem tych zmian były zaprojektowane i wybudowane w kolejnych latach potężne mosty wiszące: Mackinac (Steinman, 1957), Verrazano-Narrows (Ammann, 1964) czy Akashi-Kaikyo (1998), których autorzy projektów bezpośrednio korzystali z doświadczeń obu mostów Tacoma (1940, 1950).

Próby wyjaśnienia ciekawego zjawiska, które wprawilo most w destrukcyjne kołysania skrętne, do dziś budzi kontrowersje i kreuje różne hipotezy wśród inżynierów na całym świecie (Dunn, Bleich, Scanlan, Tomko, Tanaka, Sekata). Wydaje się, że Alan Larsen, inżynier aerodynamiki z firmy COWI w Danii, i Jens H. Walter z EHT w Zurychu na podstawie badań modelowo-komputerowych są najbliżsi wytłumaczenia tego fenomenu i znalezienia brakującego ogniwa. Ich badania zostały przedstawione w seriach artykułów (IABSE, Wind Engineering) i konferencjach (MIT). Wyjaśnili oni istotę powstawania samowzbudzającego się mechanizmu dla przęsła o przekroju litery H, wykorzystując oprogramowanie DVMFLOW, dwuwymiarowej metody dyskretnych wirów.

Po 15 latach eksploatacji drugiego mostu Tacoma Narrows okazało się, że jego przepustowość jest niewystarczająca i rozpoczęto

debatę nad możliwością modernizacji konstrukcji. Zasadniczo rozważano dwa warianty: dodanie drugiego poziomu jezdni do istniejącego mostu lub wybudowanie nowego mostu równoległego. W ogólnym referendum zatwierdzony został wariant drugi, czyli budowy nowego mostu.

Trzeci most wiszący, wybudowany po stronie zachodniej mostu z 1950 r., został oddany do użytku w 2007 r. Jest to konstrukcja wisząca na wskroś współczesna, oddaje nowe trendy w budownictwie mostów wiszących. W przypadku tej budowy nie mianowano głównego projektanta. Projekt jest dziełem współpracującego zespołu inżynierów dwóch firm: Parsons Transportation Group (PTG) i HNTB Inc. PTG wywodzi się ze znanej nowojorskiej firmy projektowania mostów założonej przez Davida Steinmana. Ze strony Departamentu Transportu Stanu Washington (WSDOT) na stanowisko inżyniera odpowiedzialnego za zgodność projektu z wymaganiami kodów stanowych i federalnych został powołany Tim Moore. Most o długości 1620 m i przęśle środkowym 840 m, ma betonowe pylony o wysokości 153 m. Szerokość jezdni umożliwia ruch w stronę miasta Tacoma po czterech 3,3 m szerokości pasach ruchu. Po zachodniej stronie mostu jest trzymetrowa ścieżka dla pieszych i rowerzystów. Konstrukcja fundamentów pylonów, kratownicy usztywniającej, zakotwienia kabli została zaprojektowana dla ewentualnego dodania w przyszłości drugiego poziomu pomostu. Podobnie jak most z 1950 r., oba modele mostów wybudowane w skali zostały przetestowane w tunelu aerodynamicznym. Badania przeprowadziła kanadyjska firma Rowan, Williams, Davis & Irwin w kooperacji z Kanadyjskim Instytutem Lotniczym. Przeprowadzone testy były pierwszymi badaniami dwóch równolegle zbudowanych mostów wiszących. Celem było ustalenie wpływu zachowania się przepływu strumienia powietrznego w obrębie obu konstrukcji, wykrycie ewentualnych zjawisk mogących mieć wpływ na zniszczenie mostów. Modele wykazały bezpieczne zachowanie obu konstrukcji, bez występującego skrętnego kołysania (*torsional flutter*) przy wietrze o prędkości 250 km/h.

Podziwiając dzisiaj piękne mosty Tacoma drugiej i trzeciej generacji, trudno nie zgodzić się z opinią Richarda Hobbesa, autora książki *Catastrophe to Triumph. Bridges of the Tacoma Narrows* (Od katastrofy do triumfu. Mosty Tacoma Narrows), który napisał: „Mosty Tacoma Narrows, dzieło lat prób, błędów, tragedii i wytrwałości, są znakomitym przykładem triumfu ludzkiego umysłu i ducha”.

Literatura

1. Timoshenko S.: *As I Remember*, D. Van Nostrand, 1968
2. Pugsley A.: *The Theory of Suspension Bridges*, Edward Arnold Publishers, 1968
3. Steinman D., Watson R.: *Bridges and Their Builders*, Dover Publications, 1957
4. Petroski H.: *Engineers of Dreams*, Vintage Books, 1996
5. Hobbs R.: *Catastrophe to Triumph. Bridges of the Tacoma Narrows*, Washington State University, 2006
6. Scott R.: *In the Wake of Tacoma*, ASCE Press, 2001
7. Larsen A.: *Aerodynamics of the Tacoma-Narrows Bridge-60-years later*, IABSE, 2000
8. Larsen A., Walther J.: *Discrete Vortex Simulation of Vortex Excitation and Mitigation in Bridge Engineering*, MIT Conference, 2003

