

# PROJEKTOWANIE ZE WZGLĘDU NA WIATR

## rola badań w tunelach aerodynamicznych

**prof. dr hab. inż. Andrzej Flaga**  
Politechnika Krakowska,  
Laboratorium Inżynierii Wiatrowej

Inżynieria wiatrowa stanowi dzisiaj obszar zainteresowania inżynierów konstruktorów, architektów, urbanistów, specjalistów z dziedziny wentylacji i inżynierii środowiska, inżynierów mechaników i innych. Dynamiczny jej rozwój pozwala współczesnym projektantom nie tylko na uwzględnienie wpływu wiatru na budowle i konstrukcje inżynierskie czy na człowieka jako mieszkańca lub przechodnia, lecz także na redukcję ryzyka ewentualnych katastrof w warunkach ekstremalnych.

W artykule przedstawiono ogólną charakterystykę zagadnień współczesnej inżynierii wiatrowej oraz rolę badań modelowych w tunelach aerodynamicznych w zapobieganiu katastrof i uszkodzeń budowli i konstrukcji spowodowanych wiatrem. Przedstawiono wybrane badania modelowe zrealizowane w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej.

### Współczesna inżynieria wiatrowa

Inżynieria wiatrowa jest interdyscyplinarną dziedziną wiedzy [1, 2, 3]. Burzliwy jej rozwój nastąpił w ostatnim 50-leciu. Powodem takiego stanu rzeczy były liczne katastrofy obiektów inżynierskich spowodowane wiatrem. Przykłady dwóch najsłynniejszych takich katastrof pokazano na rys. 1 i 2. Inżynieria wiatrowa obejmuje ogół zagadnień związanych z wpływami wiatru na budowle, obiekty, konstrukcje inżynierskie, ludzi, środowisko (otoczenie człowieka), jak również zagadnień związanych z wykorzystaniem wiatru jako źródła energii, bezpieczeństwem i niezawodnością budowli i konstrukcji poddanych działaniu wiatru, kłeskami żywiołowymi spowodowanymi wiatrami ekstremalnymi (cyklona-

mi, tajfunami, tornadami, trąbami powietrznymi itp.), jak również normalizacją (kodyfikacją) zagadnień wymienionych wyżej. Ogólną klasyfikację współczesnej inżynierii wiatrowej przedstawia rys. 3. W inżynierii wiatrowej mają zastosowanie wybrane działy następujących dyscyplin naukowych: meteorologii, aerodynamiki, mechaniki budowli, wiatroenergetyki, badań eksperymentalnych w skali naturalnej i laboratoryjnej (w tunelach aerodynamicznych), teorii procesów i zmiennych losowych, statystyki, teorii symulacji pól turbulentnych, obliczeniowej (komputerowej) dynamiki płynów, teorii bezpieczeństwa i niezawodności budowli i konstrukcji, analizy i szacowania ryzyka (hazard wiatrowy), medycyny (kryteria komfortu mieszkańców i przechodniów) i inne.

### Metody wyznaczania oddziaływań aerodynamicznych

W inżynierii wiatrowej w ogóle, a szczególnie przy wyznaczaniu oddziaływań aerodynamicznych na budowle i konstrukcje, zwykle stosowane są następujące grupy metod:

- normowe (nominalne), zgodne z normami (standardami), przepisami, zaleceniami i dokumentami normalizacyjnymi (kodami);
- w pełni obliczeniowe (analityczne lub numeryczne), według znanych modeli matematycznych określających oddziaływanie wiatru i przy znanych parametrach tych modeli (np. współczynnikach aerodynamicznych);
- półempiryczne, według znanych modeli matematycznych określających oddziaływanie wiatru lecz przy nieznanymi parametrach tych modeli, które trzeba wyznaczyć doświadczalnie;
- empiryczne, na podstawie doświadczeń in situ lub w tunelu aerodynamicznym.

**Metody normowe** dotyczą przypadków prostych, typowych, bez interferencji aerodynamicznej (budowla odosobniona), oraz przypadków, gdy oddziaływanie wiatru ma znaczenie drugorzędne, szacuje się je zgrubnie, z zapasem, stosując znaczne uproszczenia. Oddziaływanie wiatru na budowle i konstrukcje specyfikowane w normach, kodach itp. są oparte zwykle na badaniach modelowych w tunelach aerodynamicznych, częściowo weryfikowanych w naturze. Wartości normowe oddziaływania wiatru mogą odbiegać – i na ogół znacząco odbiegają – od tych jakie otrzymuje się w badaniach modelowych czy w skali naturalnej. Główną przyczyną jest tu interferencja aerodynamiczna danej budowli czy konstrukcji z sąsiadującą zabudową, w wyniku której np. pro-

Wartości normowe oddziaływania wiatru na ogół znacząco odbiegają od tych, jakie otrzymuje się w badaniach modelowych czy w skali naturalnej.

fil średniej prędkości wiatru czy też charakterystyki składowej fluktuacyjnej prędkości wiatru zupełnie nie odpowiadają tym wyspecyfikowanym w normach. Ponadto silnie zależą one od kierunku wiatru, tak jak i charakter sąsiadującej zabudowy zmienia się wraz ze zmianą kierunku napływającego powietrza. Należy także zwrócić uwagę na fakt, że w budowlach rzeczywistych występuje wiele detali konstrukcyjnych i architektonicznych, które mogą znacząco zmieniać rozkłady ciśnień wiatru na ścianach czy dachach budowli. Nie bez znaczenia są tu także warunki meteorologiczne.

Istotny wpływ na rozkład ciśnień wiatru mogą mieć takie czynniki jak np. typ naroży, krawędzi i załamania (ostre lub wyokrąglone); obecność attyk i gzymsów; wystawianie elementu o ostrych krawędziach czy narożach poza obrys ścian czy dachu; szorstkość powierzchni ściany, dachu, komina, rurociągu, liny; oblodzenie; duża wilgotność powietrza lub padający deszcz itp.

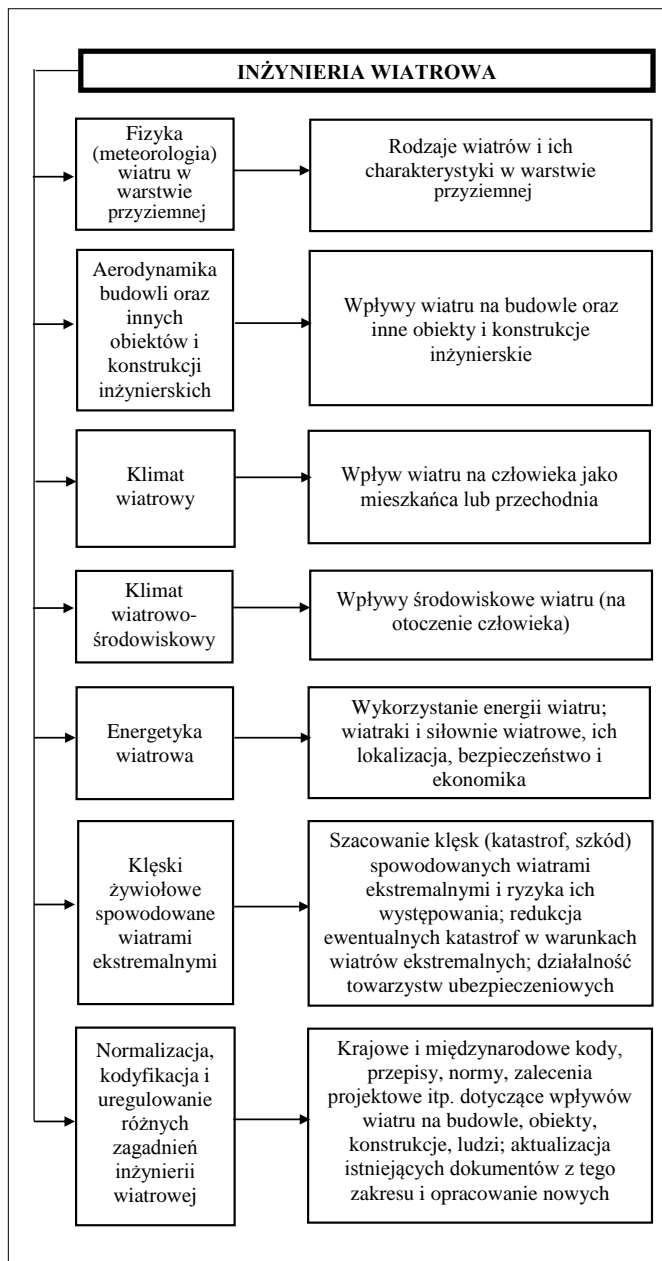
I tak np. istotny wpływ na rozkład ciśnień wiatru mogą mieć następujące czynniki: typ naroży, krawędzi i załamania (ostre lub wyokrąglone); obecność attyk i gzymsów; wystawianie elementu o ostrych krawędziach czy narożach poza obrys ścian czy dachu; szorstkość powierzchni ściany, dachu, komina, rurociągu, liny; oblodzenie; duża wilgotność powietrza lub padający deszcz itp. Wszystko to powoduje, że opływ powietrza wokół danej budowli czy konstrukcji, a następnie wynikający stąd roz-



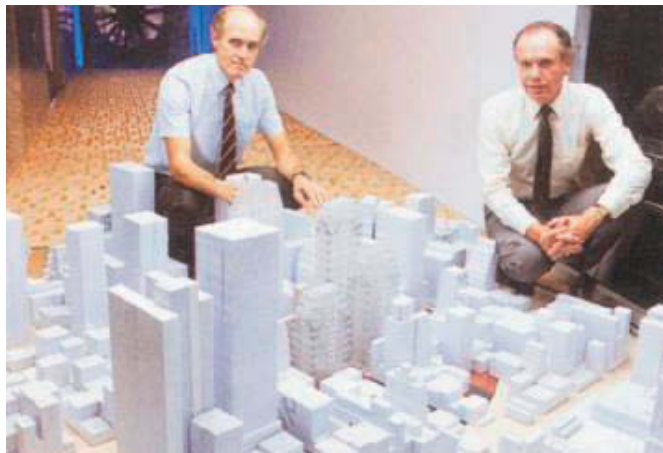
Rys. 1. Katastrofa trzech z ośmiu ponad 100-metrowych żelbetowych chłodni kominowych w Ferrybridge, Wielka Brytania. Zniszczeniu uległy chłodnie zawietrzne. Przyczyną katastrofy były zjawiska interferencji aerodynamicznej chłodni zawietrznych z nawietrznymi o charakterze nieustalonym, które wywołały nadmierne drgania chłodni zawietrznych [4]



Rys. 2. Katastrofa mostu wiszącego w Tacoma Narrows, blisko Seattle, USA, w wyniku flateru giętno-skrętnego przęsła mostu przy silnym wietrze (1940 r.) [4]



Rys. 3. Ogólna klasyfikacja (działy) współczesnej inżynierii wiatrowej



Rys. 4. Model zabudowy wielkomiejskiej wraz z modelem sztywnym wysokiego budynku do badań rozkładu ciśnień wiatru na ścianach budynku, z uwzględnieniem zjawisk interferencji aerodynamicznej, pochodzących od sąsiadującej zabudowy – tunel aerodynamiczny RWDI w Guelph (Ontario, Kanada)





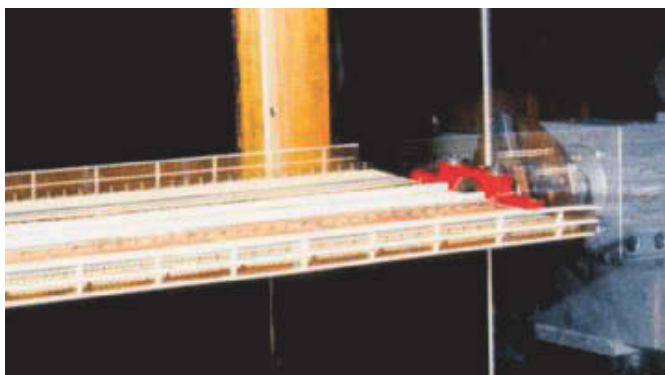
Rys. 5. Model stadionu sportowego z nietypowym ruchomym przekryciem (Sky Dome), wraz z sąsiadującą zabudową, do badań rozkładu ciśnień wiatru na przekryciu – tunel aerodynamiczny RWDI w Guelph (Ontario, Kanada)



Rys. 6. Model chłodni kominowych i sąsiadującej zabudowy (budynek i kominy elektrociepłowni) do badań rozkładów ciśnienia wiatru na ścianach chłodni, z uwzględnieniem zjawisk interferencji aerodynamicznej – tunel aerodynamiczny Uniwersytetu w Rio Grande do Sul (Brazylia)



Rys. 7. Model aeroelastyczny głównego przęsła mostu wiszącego (Great Belt East Bridge) w tunelu aerodynamicznym im. Martina Jensena w DMI Lyngby (Dania)



Rys. 8. Model aeroelastyczny sekcji przęsła mostu podwieszono – tunel aerodynamiczny DMI w Lyngby (Dania)

kład ciśnień wiatru, i dalej, rozkład sił i momentów aerodynamicznych może być – i na ogół jest – znacząco różny od tego, jaki jest wyspecyfikowany w danej normie czy kodzie. Dlatego też niektóre z nich wprost zalecają wykonanie badań w tunelu aerodynamicznym dla budowli (konstrukcji), które:

- mają nietypowy kształt geometryczny;
- mają nietypowe charakterystyki odpowiedzi dynamicznej;
- są położone w śladzie aerodynamicznym budowli nawierzchny lub sąsiadujących;
- dla których pożądane jest bardziej dokładne rozeznanie oddziaływania wiatru (np. budowle czy konstrukcje, dla których oddziaływanie wiatru jest oddziaływaniem podstawowym).

**Metody obliczeniowe** oraz półempiryczne dotyczą również na ogół przypadków prostych, mało skomplikowanych, typowych, dla których znane są modele matematyczne oddziaływania wiatru na budowle czy konstrukcje.

**Metody eksperymentalne** dotyczą przypadków złożonych, o nietypowej geometrii, nie w pełni rozpoznanych aerodynamicznie, przy silnych wpływach interferencji aerodynamicznej (sąsiadującej zabudowy), przy występowaniu sprzężeń aerodynamicznych (wzajemnego wpływu drgań budowli na jej oddziaływanie wiatru), przypadków budowli szczególnie ważnych, dla których oddziaływanie wiatru jest oddziaływaniem podstawowym (wysokie budynki, mosty wiszące i podwieszane, lekkie

W projektowaniu wielu współczesnych rozwiązań lekkich ścian osłonowych lub różnych systemów pokrycia ścian i dachów, włączając w to szkło i cienkie panele kamienne, konieczne jest przeprowadzenie dokładniejszej analizy lokalnych oddziaływań wiatru

ładki dla pieszych, dachy wiszące, przekrycia dużych rozpiętości, komin, wieże, wiszące rurociągi, maszty itp.) (rys. 4-8).

Metody eksperymentalne są również chętnie stosowane do identyfikacji stref i wartości lokalnych oraz nadmiernych oddziaływań wiatru. W projektowaniu wielu współczesnych rozwiązań lekkich ścian osłonowych lub różnych systemów pokrycia ścian i dachów, włączając w to szkło i cienkie panele kamienne, konieczne jest przeprowadzenie dokładniejszej analizy lokalnych oddziaływań wiatru. Szczytowe wartości oddziaływań wiatru na ściany i dachy budowli odnoszą się zwykle do małych obszarów ścian czy dachów. Badania w tunelu aerodynamicznym umożliwiają identyfikację tych stref w celu wzmocnienia elementów osłonowych i pokrycia ścian i dachów w tych obszarach i rezygnacji z takiego zabiegu w pozostałych obszarach. W efekcie może to doprowadzić do znacznych oszczędności, jeśli np. uwzględni się fakt, że ściany osłonowe mogą stanowić w bilansie kosztów dużą część całkowitych kosztów (np. współczesne biurowce). W dodatku koszty napraw odpadnięcia pojedynczego panelu szklanego czy kamiennego (np. blisko wierzchołka wysokiego budynku) mogą być znaczne (spadający element może uszkodzić liczne panele znajdujące się poniżej, które także będą wymagały wymiany).

W badaniach modelowych stosowane są dwa rodzaje modeli:

- **Modele sztywne**, umożliwiające pomiary ciśnień wiatru na ścianach modelu przy pomocy czujników ciśnienia, oraz pomiary sił i momentów aerodynamicznych przy pomocy wagi aerodynamicznej (rys. 4, 5, 6);
- **Modele aeroelastyczne** (podatne), spełniające odpowiednie kryteria podobieństwa dynamicznego zjawisk, umożliwiające pomiary sił i momentów aerodynamicznych na wadze aeroelastodynamicznej, oraz pomiary odpowiedzi modelu wywołanej wiatrem przy pomocy czujników elektrooporowych, indukcyjnych lub metodami fotogrametrycznymi. Te ostatnie modele będą albo pełnymi modelami elastycznymi (rzadko – rys. 7), albo modelami sztywnymi zamocowanymi elastycznie (na ogół – tzw. modele sekcyjne) (rys. 8).

## Tunel aerodynamiczny Politechniki Krakowskiej

Laboratorium Inżynierii Wiatrowej z tunelem aerodynamicznym z warstwą przyścienną, umożliwiającym symulację wiatru w warstwie przyziemnej, zostało zrealizowane w 2001 r.

W Laboratorium Inżynierii Wiatrowej realizowane są prace eksperymentalne i obliczeniowe z następujących działów inżynierii wiatrowej [1, 2, 3]:

- fizyka wiatru w warstwie przyziemnej;
- aerodynamika budowli i konstrukcji;
- aerodynamika ruchomych obiektów inżynierskich;
- klimat wiatrowy i wiatrowo-środowiskowy;
- energetyka wiatrowa;
- normalizacja, kodyfikacja i regulowanie różnych zagadnień inżynierii wiatrowej.

Wymienione działy inżynierii wiatrowej stanowią obszar zainteresowania inżynierów konstruktorów, architektów, urbanistów, specjalistów z dziedziny wentylacji i inżynierii środowiska, inżynierów mechaników i innych.

## Rodzaj prac eksperymentalnych realizowanych w tunelu aerodynamicznym

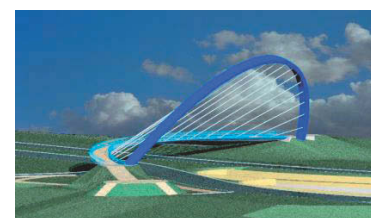
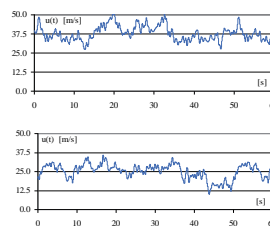
- pomiary prędkości przepływu i jego turbulencji (termoanemometry, anemometry skrzydełkowe, sonda grzebieniowa);
  - pomiary ciśnienia wiatru w przepływie (sondy ciśnieniowe, sonda grzebieniowa, czujniki ciśnienia);
  - pomiary ciśnienia wiatru na ścianach modeli (manometr baterijny na 100 p.p., dwa moduły czujników ciśnienia wiatru ze skanerami ciśnienia na 64 p.p.);
  - pomiary sił i momentów aerodynamicznych działających na cały model lub na sekcję modelu w przepływie płaskim (5-składnikowa waga aerodynamiczna dla modeli pionowych i trójskładnikowa waga aerodynamiczna dla modeli poziomych);
  - pomiary drgań modeli aeroelastycznych (akcelerometry, tensometry, czujniki drogi);
  - wizualizacja opływu (5-kanalowa dymownica do wizualizacji dymowej oraz sonda grzebieniowa)
  - badania symulacyjne obciążenia śniegiem dachów w warunkach opadu i redystrybucji pokrywy śnieżnej (system fotogrametryczny)
  - pomiary mocy i momentu obrotowego wirników wiatrowych (urządzenie elektromechaniczne z hamulcem hydraulicznym i magnetycznym).
- Na fot. 9-11 pokazano przykładowe prace naukowo-badawcze zrealizowane w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej. ■

### Literatura

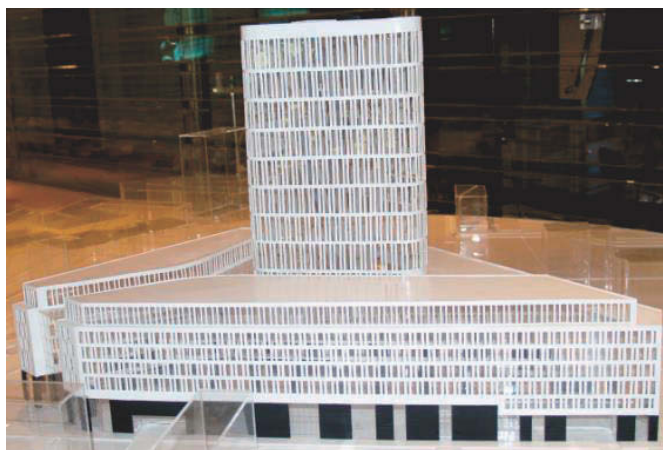
1. Flaga A., Laboratorium Inżynierii Wiatrowej z tunelem aerodynamicznym, Politechnika Krakowska, Kraków 1999.
2. Flaga A., Nowe trendy w inżynierii wiatrowej i aerodynamice budowli, Politechnika Lubelska, Lublin 2004.
3. Flaga A., Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania, Arkady, Warszawa 2008.
4. Windstrom, A publication of the Munich Reinsurance Company, 1990.
5. Flaga A. i in., Eksperymentalne wspomaganie projektowania przy wpływach środowiskowych na budowle i ludzi, Polskie Stowarzyszenie Inżynierii Wiatrowej, Kraków 2011.
6. System Aerodynbud i jego zastosowania w aerodynamice budowli i inżynierii wiatrowej, edytorzy: Flaga A., Lipecki T., Politechnika Lubelska, Lublin, Polskie Stowarzyszenie Inżynierii Wiatrowej, Kraków 2011.
7. Flaga A., Mosty dla pieszych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2011.
8. Flaga A., Błazik-Borowa E., Podgórski J., Aerodynamika smukłych budowli i konstrukcji przeto-cięgnowych, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004.

**Abstract. THE ROLE OF MODEL TESTS IN WIND TUNNELS IN PREVENTING OF DISASTERS AND DAMAGES OF BUILDINGS AND STRUCTURES CAUSED BY WIND.** *The paper presents a general characteristics of contemporary issues of wind engineering and a role of model tests in wind tunnels to prevent disasters and damages of buildings and structures caused by wind. Moreover, selected model tests carried out in wind tunnel of the Wind Engineering Laboratory at the Cracow University of Technology have been presented.*

**Keywords:** Wind engineering, model tests, wind tunnel.



Rys. 9. Badania i obliczenia aerodynamiczne kładki dla pieszych nad Drogową Trasą Średnicową w Katowicach, Kraków 2002, 2003.



Rys. 10. Badania modelowe i analizy studialne oddziaływania wiatru na budynek wysoki przy ul. Puławskiej w Warszawie, Kraków 2008.



Rys. 11. Badania modelowe w tunelu aerodynamicznym i analizy studialne oddziaływań wiatru dla projektowanego budynku wysokościowego u zbiegu al. Jana Pawła II i ul. Grzybowskiej w Warszawie, Kraków 2013.