

Spis treści

Przedmowa	15
Symboli i oznaczenia	17
1. Cele i zakres inżynierii wiatrowej	23
2. Kompletny układ równań aeromechaniki	38
2.1. Skład i budowa atmosfery ziemskiej oraz podstawowe właściwości powietrza atmosferycznego	38
2.2. Metody opisu ruchu powietrza	42
2.3. Ogólne równania ruchu powietrza w opisie Eulera	45
2.4. Ogólna charakterystyka sił działających w atmosferze ziemskiej	49
2.4.1. Siły wynikające z prawa grawitacji	49
2.4.2. Siły wynikające z przestrzennego rozkładu naprężeń normalnych i stycznych	51
2.5. Układ równań aeromechaniki	52
2.5.1. Równania ruchu w opisie Eulera	52
2.5.2. Równanie ciągłości	54
2.5.3. Równania konstytutywne (tworzące)	55
2.6. Równania ruchu, konstytutywne i ciągłości płynów lepkich w przypadku ruchu turbulentnego	62
2.6.1. Turbulencja w atmosferze ziemskiej	62
2.6.2. Ogólne równania ruchu głównego w opisie Eulera	64
2.6.3. Równania konstytutywne ruchu głównego	66
2.7. Równanie stanu	68
2.8. Równanie termodynamiki	70
2.9. Wybrane modele przepływu turbulentnego	73
2.9.1. Uśrednianie czasowe klasycznych równań Naviera–Stokesa – tensor naprężeń Reynoldsa	73
2.9.2. Modele RANS – modele uśrednień czasowych Reynoldsa	76
2.9.3. Metody symulacji dużych wirów – LES	82
2.9.4. Metoda wirowa i metody bezsiatkowe – DVM	83
2.10. Uwagi dotyczące warunków początkowych i brzegowych oraz możliwości efektywnego rozwiązania kompletnego układu równań aeromechaniki	85
3. Szczególne przypadki ruchów powietrza w atmosferze ziemskiej	90
3.1. Stan równowagi atmosfery	90
3.2. Wiatr geostroficzny	91
3.3. Wiatr termiczny	93
3.4. Wiatr gradientowy	95

3.5. Układ cyklonalny poruszający się ze stałą prędkością	98
3.6. Uwzględnienie wpływu sił tarcia, wynikających z lepkości turbulentnej powietrza, na poziome ruchy powietrza w warstwie tarciowej troposfery	102
4. Cyrkulacja atmosfery ziemskiej	107
4.1. Uwagi wstępne	107
4.2. Określenie i klasyfikacja ruchów cyrkulacyjnych w atmosferze	108
4.3. Ogólna (planetarna) cyrkulacja atmosfery	108
4.4. Cyrkulacja makrometeorologiczna	113
4.4.1. Uwagi wstępne	113
4.4.2. Niże wędrowne szerokości umiarkowanych	114
4.4.3. Wyże wędrowne	116
4.4.4. Cyklony tropikalne (zwrotnikowe)	116
4.5. Cyrkulacja mezometeorologiczna	121
4.5.1. Uwagi wstępne	121
4.5.2. Bryzy	121
4.5.3. Wiatry gór i dolin (bryzy górskie)	122
4.5.4. Wiatry lodowcowe	123
4.5.5. Feny (wiatry halne)	123
4.5.6. Bory	124
4.6. Cyrkulacja mikrometeorologiczna	125
4.6.1. Uwagi wstępne	125
4.6.2. Szkwały (nawałnice)	125
4.6.3. Trąby powietrzne (tornado)	127
4.6.4. Wiry małoskalowe	130
4.7. Uwagi podsumowujące	132
5. Szczegółowy przegląd i analiza wyników badań w skali naturalnej struktury silnego wiatru w warstwie tarciowej troposfery	134
5.1. Przykłady rejestracji prędkości i kierunku silnych wiatrów za pomocą anemometrów	134
5.2. Prędkości średnie wiatru a czas uśredniania	140
5.3. Prędkość charakterystyczna wiatru – makrorejonizacja wiatrowa	143
5.4. Rozkład maksymalnej rocznej średniej prędkości wiatru na wysokości 10 m nad powierzchnią ziemi	145
5.4.1. Przypadek bez uwzględnienia rozkładu kierunku wiatru (niezależnie od kierunku wiatru)	145
5.4.2. Przypadek z uwzględnieniem rozkładu kierunku wiatru (przy określonym kierunku wiatru)	148
5.4.3. Problem doboru obliczeniowej, średniej prędkości wiatru	151
5.5. Pionowy profil wiatru i kategorie chropowatości terenu	156
5.6. Ciśnienie prędkości wiatru i współczynnik ekspozycji	170
5.7. Parametry fluktuacji prędkości wiatru	170

5.8. Propozycje do normy oddziaływania wiatru na konstrukcje budowlane w zakresie struktury i parametrów charakteryzujących wiatr w warstwie przyziemnej	175
5.9. Funkcje korelacji własnej i wzajemnej fluktuacji prędkości wiatru ..	179
5.9.1. Definicje funkcji korelacji	179
5.9.2. Czasowe funkcje korelacji własnej	181
5.9.3. Przestrzenne funkcje korelacji	182
5.9.4. Skale długości korelacji fluktuacji prędkości wiatru	184
5.9.5. Przestrzenno-czasowe funkcje korelacji	186
5.10. Funkcje własnej i wzajemnej gęstości widmowej mocy fluktuacji prędkości wiatru	187
5.10.1. Definicje funkcji gęstości widmowej mocy	187
5.10.2. Funkcje własnej gęstości widmowej mocy	190
5.10.3. Funkcje wzajemnej gęstości widmowej mocy	198
5.10.4. Skale częstotliwości fluktuacji prędkości wiatru	202
5.11. Niektóre charakterystyki probabilistyczne fluktuacji kierunku wiatru	203
5.12. Uwagi podsumowujące w zakresie prezentowanych wyników badań	204
5.13. Metody symulacji numerycznej pola prędkości wiatru	206
5.13.1. Uwagi wstępne	206
5.13.2. Metoda WAWS	207
5.13.3. Metoda MR	208
5.13.4. Metoda ARMA	210
5.13.5. Program WIND do symulacji numerycznej pola prędkości wiatru	215
6. Wykorzystanie analizy wymiarowej i teorii podobieństwa zjawisk w różnych zagadnieniach inżynierii wiatrowej	218
6.1. Uwagi wstępne	218
6.2. Definicja podobieństwa, skale podobieństwa i kryteria (warunki) podobieństwa	218
6.3. Kryteria podobieństwa wynikające z analizy wymiarowej	221
6.3.1. Rozważania ogólne	221
6.3.2. Oddziaływanie aerodynamiczne na ciało zanurzone w przepływającym płynie – rozważania poglądowe	222
6.3.3. Średni opór aerodynamiczny, średnia aerodynamiczna siła boczna i średni moment aerodynamiczny budowli (konstrukcji) smukłej	225
6.3.4. Drgania aeroelastyczne mostu podwieszonego lub wiszącego ..	228
6.3.5. Wirniki siłowni wiatrowych na przykładzie wirników chiralnych	230
6.3.6. Opad śniegu przy wiejącym wietrze	238
6.4. Kryteria podobieństwa wynikające z równań różniczkowych opisujących dany problem	242
6.4.1. Podobieństwo dynamiczne przepływów	242

6.4.2.	Odpowiedź budowli wieżowej spowodowana oporem aerodynamicznym	246
6.5.	Skale podobieństwa dynamicznego przepływów w aerodynamice budowli	249
6.6.	Metody symulacji fizycznej pola prędkości w tunelach aerodynamicznych	254
6.6.1.	Uwagi wstępne	254
6.6.2.	Symulacja warstwy przyziemnej metodą bierną	255
6.6.3.	Symulacja warstwy przyziemnej metodą czynną	257
6.7.	Modele aerodynamiczne w badaniach tunelowych na przykładzie mostów podwieszonych i wiszących	259
6.8.	Wybrane tunele aerodynamiczne do badań modelowych w aerodynamice budowli i inżynierii wiatrowej	266
6.8.1.	Największy w Europie tunel klimatyczny w Nantes, Francja	266
6.8.2.	Największy na świecie tunel aerodynamiczny do badań modeli mostów w Japonii	267
6.8.3.	Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej z tunelem aerodynamicznym z warstwą przyścienną	268
7.	Wybrane zjawiska opływu ciał o różnej charakterystyce geometrycznej i ich wpływ na oddziaływania aerodynamiczne	272
7.1.	Opływ płaski smukłych ciał pryzmatycznych	272
7.1.1.	Cienki płaskownik o ostrych krawędziach ustawiony normalnie do przepływu	272
7.1.2.	Warstwa przyścienna i zjawisko oderwania warstwy przyściennej na powierzchniach zakrzywionych	275
7.1.3.	Profile opływowe (lotnicze)	278
7.1.4.	Walec kołowy	284
7.1.5.	Ciała o przekrojach nieopływowych lub półopływowych, o ostrych krawędziach, symetrycznych względem napływającego strumienia	288
7.1.6.	Ciała o przekrojach niesymetrycznych względem napływającego strumienia	292
7.1.7.	Wpływ turbulencji napływającego strumienia na opływ i oddziaływania aerodynamiczne	296
7.1.8.	Wpływ drgań ciała na opływ i oddziaływania aerodynamiczne przy strumieniu ustalonym	297
7.1.9.	Łączny wpływ turbulencji napływającego strumienia i drgań ciała na opływ i oddziaływania aerodynamiczne	298
7.1.10.	Wpływ interferencji aerodynamicznej na opływ i oddziaływania aerodynamiczne	299
7.1.11.	Przegląd i analiza ważniejszych zjawisk aerodynamicznych wynikających z interferencji aerodynamicznej dwóch walców kołowych	304

7.2. Opływ budowli odosobnionych	324
7.3. Opływ budowli usytuowanych blisko siebie	332
7.4. Opływ budowli przewiewnych	340
8. Ogólna charakterystyka wpływów wiatru na obiekty budowlane i na ludzi	343
8.1. Ujęcie systemowe wpływów wiatru na obiekty budowlane i na ludzi ..	343
8.2. Rodzaje obiektów budowlanych w aerodynamice budowli	346
8.3. Klasyfikacja oddziaływań wiatru na obiekty budowlane	348
8.4. Współczynniki aerodynamiczne	349
8.4.1. Lokalne i wypadkowe (wynikowe) współczynniki aerodynamiczne	349
8.4.2. Współczynniki aerodynamiczne lokalne lub lokalnie uśrednione przestrzennie	350
8.4.3. Wypadkowe współczynniki aerodynamiczne lokalne oraz uśrednione przestrzennie lokalnie lub globalnie	352
8.4.4. Wypadkowe dyskretne lub globalne współczynniki aerodynamiczne	353
8.4.5. Parametry, od których najczęściej zależą współczynniki aerodynamiczne	354
8.5. Mechaniczne i aerodynamiczne sposoby redukcji wpływów wiatru na obiekty budowlane	355
8.5.1. Rodzaje tłumików drgań i ich klasyfikacje	355
8.5.2. Przykłady wybranych mechanicznych i aerodynamicznych tłumików drgań	355
8.5.3. Przykłady badań modelowych dotyczących redukcji środkami aerodynamicznymi niekorzystnych wpływów aerodynamicznych na smukłe budowle wieżowe	362
8.6. Uwagi końcowe	371
9. Wybrane wyniki badań eksperymentalnych nad wpływami wiatru na różne obiekty budowlane	373
9.1. Rozkłady ciśnienia średniego wiatru na ścianach i dachach budynków niewysokich	373
9.2. Oddziaływanie wiatru na elementy osłonowe i pokrycia budowli ...	378
9.2.1. Uwagi wstępne	378
9.2.2. Średnie i szczytowe (maksymalne) ciśnienie wiatru	379
9.2.3. Współczynnik ciśnienia wiatru	382
9.2.4. Analiza prezentowanych i innych wyników badań oraz wnioski przydatne w praktyce inżynierskiej	384
9.3. Wpływ wiatru na smukłe budowle wieżowe (wysokie budynki, wieże, kominy itp.)	389
9.3.1. Charakterystyka oddziaływania wiatru na smukłą budowlę wieżową jako całość	389

9.3.2.	Wyznaczanie współczynników aerodynamicznych na przykładzie współczynnika oporu aerodynamicznego	391
9.3.3.	Funkcje korelacji i gęstości widmowej mocy fluktuacji ciśnienia wiatru	395
9.3.4.	Odpowiedź budowli wieżowych na oddziaływanie wiatru	400
9.3.5.	Omówienie wyników badań na obiektach w skali naturalnej	408
9.4.	Rozkłady ciśnienia średniego wiatru na zrealizowanych przekryciach dużych rozpiętości o nietypowych kształtach	413
9.4.1.	Uwagi wstępne	413
9.4.2.	Kryty basen pływacki w Moskwie	413
9.4.3.	Uniwersalna Sala Sportowa (USZ) w Krasnojarsku	415
9.4.4.	Kryty stadion przy Alei Pokoju w Moskwie	416
9.4.5.	Olimpijski tor kolarski w Kryłatskim	419
9.4.6.	Stadion Alpejski (Stadio delle Alpi) w Turynie	420
9.5.	Oddziaływanie średnie wiatru na konstrukcje kratownicowe	423
9.5.1.	Uwagi wstępne	423
9.5.2.	Pojedyncze kratownice i dźwigary kratownicowe	425
9.5.3.	Pary kratownic lub dźwigarów kratownicowych	427
9.5.4.	Kratownice przestrzenne – trzony kratownicowe konstrukcji masztowych, wieżowych, dźwigowych itp.	427
10.	Przegląd ważniejszych modeli oddziaływania wiatru na obiekty budowlane i ich analiza	433
10.1.	Modele oddziaływania wiatru spowodowanego turbulencją atmosferyczną (buffetingiem) przy pominięciu sprzężeń aerodynamicznych	433
10.1.1.	Model quasi-ustalony dla ciśnienia wiatru	433
10.1.2.	Model quasi-ustalony przy oddziaływaniach wiatru na smukłe obiekty budowlane	436
10.1.3.	Modele quasi-statyczne oddziaływań wiatru spowodowanych porywami wiatru	438
10.1.4.	Modele oddziaływania wiatru, w których współczynniki aerodynamiczne są uzależnione od częstotliwości porywów prędkości wiatru – koncepcja admittancji aerodynamicznej	441
10.1.5.	Modele zmodyfikowanej teorii quasi-ustalonej, w której składowe fluktuacyjne prędkości wiatru są uśrednione czasowo lub przestrzennie	443
10.2.	Podstawowe modele ujęcia obliczeniowego oddziaływania wiatru spowodowanego turbulencją atmosferyczną, spotykane najczęściej w normach i dokumentach normalizacyjnych	443
10.2.1.	Uwagi wstępne	443
10.2.2.	Bazowa i charakterystyczna prędkość wiatru, profil wiatru, współczynnik ekspozycji	444
10.2.3.	Oddziaływanie wiatru na jednostkę powierzchni budowli lub konstrukcji (ściany, dachu, powłoki itp.)	447

10.2.4. Oddziaływanie wiatru w linii wiatru na jednostkę długości (wysokości) budowli lub konstrukcji smukłej, ustawionych prostopadle do średniej prędkości wiatru	449
10.2.5. Uwagi uzupełniające i konkluzje	454
10.3. Modele wzbudzenia wirowego obiektów smukłych	456
10.3.1. Przegląd wyników badań i analiza wzbudzenia wirowego obiektów smukłych	456
10.3.2. Wybrane modele matematyczne wzbudzenia wirowego obiektów smukłych o przekrojach poprzecznych zwartych ...	480
10.3.3. Uwagi uzupełniające	489
10.4. Wybrane modele sprzężeń aerodynamicznych na przykładzie jednoprzęsłowych, smukłych obiektów poziomych, przy ustalonym napływie powietrza atmosferycznego	489
10.4.1. Uwagi wstępne	489
10.4.2. Modele Scanlana	492
10.4.3. Modele, w których występują operatory całkowe z funkcjami aerodynamicznej odpowiedzi impulsowej	493
10.4.4. Modele własne	494
10.4.5. Uwagi uzupełniające	494
10.5. Wybrane zagadnienia dotyczące flatteru na przykładzie mostów (kładek) wiszących lub podwieszonych	496
10.5.1. Wprowadzenie	496
10.5.2. Klasyczne zagadnienie flatteru giętnego, skrętnego lub giętno-skrętnego przęsła mostu (kładki) wiszącego lub podwieszonoego	500
10.5.3. Wzory uproszczone do wyznaczania prędkości krytycznej flatteru V_c^f	503
11. Modele własne autora oddziaływań wiatru na smukłe obiekty budowlane	506
11.1. Uwagi wstępne	506
11.2. Modele wzbudzenia wirowego	506
11.2.1. Obiekty smukłe o osi prostoliniowej pionowej, poziomej lub ukośnej, ustawionej poprzecznie (normalnie) do przepływu ..	506
11.2.2. Obiekty smukłe o osi prostoliniowej, ukośnej do przepływu ..	537
11.2.3. Obiekty złożone z elementów smukłych o osiach prostoliniowych i dowolnej orientacji w przestrzeni	538
11.3. Odpowiedź konstrukcji prostej lub złożonej z konstrukcji prostych w warunkach krytycznego wzbudzenia wirowego	539
11.3.1. Konstrukcja prosta – przypadek ustalonego napływu powietrza	539
11.3.2. Konstrukcja prosta – przypadek nieustalonego napływu powietrza	542
11.3.3. Konstrukcja prosta lub złożona z elementów prostych o przekrojach zwartych, traktowana jako układ dyskretny	545

11.3.4. Konstrukcja prosta lub złożona z konstrukcji prostych o przekrojach dowolnych, przy pominięciu wpływu drgań na krytyczne wzbudzenie wirowe	545
11.4. Symulacja numeryczna krytycznego wzbudzenia wirowego i odpowiedzi obiektów smukłych na to wzbudzenie	546
11.5. Modele oddziaływań wiatru na smukłe obiekty budowlane wg zmodyfikowanej teorii quasi-ustalonej	547
11.5.1. Uwagi wstępne	547
11.5.2. Modele quasi-ustalone oddziaływania wiatru w przypadku obiektu nieruchomego	550
11.5.3. Podstawowe relacje dotyczące składowych wzdłużnej i poprzecznej oddziaływania wiatru	552
11.5.4. Przypadki szczególne modeli quasi-ustalonych oddziaływania wiatru	554
11.5.5. Trudności związane z wyznaczaniem współczynników aerodynamicznych na podstawie wyników badań	556
11.5.6. Przykładowe wartości współczynnika aerodynamicznego C_{bm} w przypadku różnych przekrojów	559
11.5.7. Podstawowe relacje przy oddziaływaniu skrętnym wiatru	563
11.5.8. Modele quasi-ustalone oddziaływania wiatru w przypadku obiektu ruchomego (drgającego)	565
11.6. Analiza najprostszych przypadków szczególnych otrzymanych wzorów	569
11.6.1. Analiza drgań w linii wiatru budowli wieżowej typu wspornikowego	569
11.6.2. Analiza sprzężeń aerodynamicznych jednoprzęsłowych obiektów poziomych przy ustalonym napływie powietrza atmosferycznego	573
11.6.3. Uwagi końcowe odnośnie teorii quasi-ustalonej	577
12. Implementacja komputerowa oddziaływania wiatru na złożone obiekty smukłe według teorii quasi-ustalonej	580
12.1. Modelowanie oddziaływania wiatru na złożone obiekty smukłe według teorii quasi-ustalonej	580
12.1.1. Ogólny algorytm postępowania	580
12.1.2. Model szczegółowy i zgrubny złożonego obiektu smukłego	580
12.1.3. Układy współrzędnych	583
12.1.4. Statyczne oddziaływanie wiatru	584
12.1.5. Częstotliwości i postaci drgań wokół nieliniowo wyznaczonego położenia równowagi	589
12.1.6. Turbulentne pole prędkości wiatru	589
12.2. Obliczenia i analiza aerodynamiczna masztu wysokości 342 m	590
12.2.1. Opis konstrukcji masztu z ociągami	590
12.2.2. Częstotliwości i postaci drgań własnych wokół nieliniowo wyznaczonego położenia równowagi	591

12.2.3. Składowa dynamiczna odpowiedzi masztu na turbulentne oddziaływanie wiatru	596
12.2.4. Porównawcze obliczenia masztu zgodnie z modelem quasi-statycznym	598
12.2.5. Wnioski	601
13. Wpływy wiatru na człowieka i zagadnienia komfortu wietrznego	602
13.1. Ogólna charakterystyka wpływów wiatru na człowieka jako przechodnia lub mieszkańca	602
13.2. Metody urbanistyczne i architektoniczne redukcji niekorzystnych wpływów wiatru w poziomie przechodniów	606
13.3. Kryteria komfortu wietrznego w poziomie przechodniów na terenach miejskich	607
13.3.1. Miarodajna prędkość wiatru	607
13.3.2. Dane meteorologiczne	611
13.3.3. Przeniesienie danych meteorologicznych	612
13.3.4. Ocena komfortu	614
13.3.5. Analiza wybranych kryteriów komfortu wietrznego	615
13.3.6. Propozycje własne autora kryteriów komfortu wietrznego w warunkach Polski	618
13.4. Efekty termiczne wpływu klimatu na ludzi	618
13.5. Badania w tunelach aerodynamicznych, analizy CFD	620
13.6. Warunki sztywności przestrzennej budowli wysokich przy oddziaływaniu wiatru	621
13.6.1. Uwagi wstępne	621
13.6.2. Warunki odkształcalności poziomej	623
13.6.3. Warunki typu fizjologicznego (psychologicznego)	625
13.6.4. Ocena stopnia odczuwalności poziomych drgań przez mieszkańców budynków wysokich przy oddziaływaniu silnego wiatru w świetle dokumentu ISO 6897 (1983)	631
14. Wybrane zagadnienia energetyki wiatrowej	638
14.1. Wstęp	638
14.2. Zasoby energii wiatru w Polsce	642
14.3. Lokalizacja farm (parków) wiatrowych	652
14.4. Elektrownie wiatrowe o osi poziomej	654
14.4.1. Informacje wstępne	654
14.4.2. Teoria strumieniowa łopatego silnika wiatrowego	656
14.4.3. Modele oddziaływań wiatru na łopaty i oś wirnika wiatrowego	661
14.4.4. Podstawowe cechy i przykłady rozwiązań konstrukcyjnych elektrowni wiatrowych	663
14.4.5. Podstawowe układy pracy EW	668
14.4.6. Układy regulacji (sterowania) EW	669

14.4.7. Dynamika wirnika i wieży EW	671
14.4.8. Chiralne wirniki wiatrowe o osi poziomej wykorzystujące efekt Magnusa	673
14.5. Wirniki wiatrowe o osi pionowej	678
Literatura	683
Wykaz ważniejszych skrótów	715
Alfabetyczne zestawienie ważniejszych zagadnień omówionych w książce przydatnych w procesie projektowania konstrukcji budowlanych	718