

SPIS TREŚCI

Od autora	9
Spis oznaczeń	15
1. Pole skalarne	23
1.1. Pojęcie pola	23
1.2. Iloczyn skalarny	24
1.3. Izopowierzchnie i izolinie	26
1.4. Pochodne cząstkowe	27
1.5. Pochodna lokalna	29
1.6. Gradient pola skalarnego	30
1.7. Różniczka zupełna	36
2. Termodynamika i statyka atmosfery	39
2.1. Budowa atmosfery	39
2.1.1. Układ, stan układu i procesy termodynamiczne	40
2.1.2. Równanie stanu	43
2.2. Pierwsza zasada termodynamiki	48
2.2.1. Entalpia	50
2.2.2. Ciepło właściwe	51
2.2.3. Przemiana adiabatyczna i temperatura potencjalna	52
2.3. Druga zasada termodynamiki	54
2.3.1. Cykl Carnota	54
2.3.2. Postulat Clausiusa	57
2.3.3. Postulat Kelvina	57
2.3.4. Twierdzenie Carnota	58
2.3.5. Temperatura termodynamiczna	60
2.3.6. Nierówność Clausiusa	61
2.3.7. Entropia	63
2.3.8. Ścisłość i rozszerzalność cieplna	68
2.3.9. Równania Maxwella	69
2.3.10. Równowaga fazowa: równanie Clausiusa–Clapeyrona	70
2.3.11. Ciepło utajone. Równanie Kirchhoffa	74
2.4. Statyka atmosfery	75
2.4.1. Atmosfera jednorodna	76
2.4.2. Atmosfera izotermiczna	77
2.4.3. Atmosfera stałogradientowa	77

2.5. Równowaga pionowa	79
2.5.1. Gradient sucho–adiabatyyczny	79
2.5.2. Gradient wilgotno–adiabatyyczny	82
2.5.3. Diagramy aerologiczne	87
2.6. Niezmienniki procesów zachodzących z udziałem kondensacji	91
3. Pole wektorowe i kinematyka	94
3.1. Przestrzeń liniowa (wektorowa)	96
3.2. Iloczyn wektorowy	99
3.3. Linie prądu i trajektorie	100
3.4. Opis ruchu w układach Eulera i Lagrange’a	101
3.5. Pochodna substancjalna	102
3.6. Ruch linii materialnej	103
3.7. Kinematyka pola wiatru	104
3.7.1. Dywergencja	104
3.7.2. Wirowość	107
3.7.3. Krażenie	108
3.7.4. Tensory	110
3.7.5. Niezmienniki tensorów drugiego rzędu	113
3.7.6. Notacja sumacyjna Einsteina	117
3.7.7. Tensor symetryczny i antysymetryczny	121
3.7.8. Odkształcenie	122
3.7.9. Deformacja w przepływie płaskim	128
3.8. Opis ruchu we współrzędnych naturalnych	130
3.9. Przykłady obliczeń	131
3.9.1. Operatory różniczkowe we współrzędnych sferycznych	132
3.9.2. Nieregularnie rozmieszczone dane	134
3.10. Potencjał skalarny pola wektorowego	135
3.11. Potencjał wektorowy	136
3.12. Linie i rurki wirowe	138
3.13. Przepływ płaski	139
3.14. Wzory Greena	141
3.15. Twierdzenie o jednoznaczności	142
3.16. Wyznaczanie pola z jego źródeł i wirów	144
4. Prawa zachowania masy, pędu i energii	149
4.1. Objętościowe i masowe natężenie przepływu	149
4.2. Równanie ciągłości	151
4.3. Równanie transportu wielkości zachowawczych	152
4.4. Równanie ruchu	154
4.4.1. Siły objętościowe	156
4.4.2. Siły powierzchniowe	163
4.4.3. Równanie Naviera–Stokesa	169
4.4.4. Funkcja Exnera	177
4.5. Równanie zachowania energii	178
4.5.1. Bilans energii mechanicznej	178
4.5.2. Bilans energii wewnętrznej	186

4.5.3. Bilans energii całkowitej	188
4.5.4. Równanie Bernoulliego	188
5. Układy współrzędnych	195
5.1. Zestawienie równań zachowania	195
5.2. Zapis równań ruchu we współrzędnych sferycznych	196
5.3. Płaszczyzny β i f	201
5.4. Transformacje współrzędnej pionowej	202
5.4.1. Współrzędne izobaryczne	204
5.4.2. Współrzędne izentropowe	208
6. Ruch zrównoważony	211
6.1. Analiza skalowa. Przybliżenie geostroficzne i hydrostatyczne	211
6.2. Wiatr geostroficzny	213
6.3. Wiatr cyklostroficzny	213
6.4. Ruch inercyjny	214
6.5. Liczba Rossby'ego	216
6.6. Wiatr gradientowy	217
6.7. Wiatr w atmosferze tarciowej	220
6.7.1. Model Ekmana	221
6.8. Odchylenie ageostroficzne w atmosferze swobodnej	224
6.9. Wiatr termiczny	224
6.10. Twierdzenie Taylora–Proudmana	226
7. Wirowość	229
7.1. Równanie wirowości	229
7.2. Wirowość potencjalna	236
7.3. Twierdzenie Kelvina o cyrkulacji	242
7.4. Twierdzenie Bjerknesa	243
7.5. Model barotropowy	245
8. Ruchy falowe	247
8.1. Kinematyka ruchu falowego	248
8.2. Fale dźwiękowe	254
8.2.1. Bezpośrednia eliminacja algebraiczna	256
8.2.2. Metoda mnożników Lagrange'a	259
8.2.3. Związki dyspersyjne poprzez wyznacznik układu	259
8.3. Fale grawitacyjne	260
8.3.1. Oscylacje grawitacyjne	260
8.3.2. Fale grawitacyjne	262
8.3.3. Opór falowy	270
8.3.4. Podsumowanie	273
9. Analiza skalowa	274
9.1. Skale zjawisk atmosferycznych	276
9.2. Skale i wartości charakterystyczne	276
9.3. Równanie ruchu: liczby podobieństwa	278
9.4. Stan odniesienia	279
9.5. Linearyzacja i analiza równań zachowania	283

9.5.1. Równanie stanu	283
9.5.2. Równanie ruchu	284
9.5.3. Równanie zachowania energii	287
9.5.4. Równanie ciągłości	288
9.6. Przybliżenie hydrostatyczne	288
9.7. Efekty ściśliwości i wyporu	292
9.7.1. Skalowanie	292
9.7.2. Przybliżenie nieelastyczne	295
9.7.3. Przybliżenie Boussinesqa	303
9.7.4. Przepływy nieściśliwe	308
9.8. Podsumowanie	313
10. Analiza wymiarowa	314
10.1 Niezależność wymiarowa	316
10.2 Twierdzenie II Buckinghama	317
10.3 Podobieństwo	320
10.4 Podsumowanie	321
11. Model płytkiej wody	322
11.1. Konstrukcja modelu	322
11.2. Bilans energii mechanicznej	324
11.3. Wielkości niezmiennicze	328
11.3.1. Wysokość względna	328
11.3.2. Wirowość potencjalna Rossby'ego	329
11.4. Mody własne	330
11.4.1. Powierzchniowe fale grawitacyjne	331
11.4.2. Oscylacje inercyjne	332
11.4.3. Fale inercyjno-grawitacyjne	332
11.5. Rozwiązania zagadnień brzegowych	333
11.6. Adaptacja geostroficzna	337
11.6.1. Promień deformacji Rossby'ego	337
11.6.2. Przemiany energii w procesie adaptacji	343
11.6.3. Adaptacja rozkładu masy i pola prędkości	346
11.7. Przepływy strefowy w płaszczyźnie β	347
12. Teoria quasi-geostroficzna	349
12.1. Quasi-geostroficzny model płytkiej wody	351
12.2. Wirowość quasi-geostroficzna	355
12.3. Fale Rossby'ego	358
12.4. Atmosfera o zmiennej gęstości	361
12.4.1. Oscylacje pionowe – porównanie z modelem płytkiej wody	362
12.4.2. Zarys przybliżenia	362
12.4.3. Przybliżenie quasi-geostroficzne	368
12.4.4. Quasi-geostroficzna wirowość potencjalna	370
12.5. Podsumowanie	373
13. Niestabilności w przepływach geofizycznych	375
13.1. Niestabilność barotropowa	376

13.1.1. Niestabilność Kelvina–Helmholtza	376
13.1.2. Warunek konieczny niestabilności Rayleigha	378
13.1.3. Niestabilność w strefie ścinania	383
13.2. Niestabilność baroklinowa	389
13.3. Stabilność przepływów ze ścinaniem	394
13.3.1. Podsumowanie	398
14. Cyrkulacja atmosferyczna	400
14.1. Ogólna cirkulacja atmosfery	400
14.2. Cyklony umiarkowanych szerokości geograficznych	403
14.3. Wiatry lokalne	409
14.3.1. Cyrkulacje bryzowe	410
14.3.2. Wiatry lokalne nad nachylonym podłożem	413
14.3.3. Przepływy w terenie urzeźbionym	415
15. Warstwa graniczna	419
15.1. Uśrednianie i filtracja	423
15.2. Równania uśrednione	428
15.3. Strumienie turbulencyjne	429
15.4. Kinetyczna energia turbulencji	431
15.4.1. Bilans energii kinetycznej przepływu średniego	432
15.4.2. Bilans energii kinetycznej turbulencji	433
15.5. Przestrzenne skale turbulencji	437
15.6. Hipoteza Boussinesqa	445
15.7. Warstwa przyziemna	447
15.7.1. Związki przy równowadze obojętnej	448
15.7.2. Szorstkość aerodynamiczna	449
15.7.3. Skala długości Obuchowa	450
15.7.4. Teoria podobieństwa warstwy przyziemnej Monina i Obuchowa	451
15.8. Potencjalna energia turbulencji	465
15.9. Domykanie równań Reynoldsa	467
15.9.1. Modele pierwszego rzędu	468
15.9.2. Modele z wyższym rzędem zamykania	468
15.10. Efekty wypornościowe pary wodnej	485
15.11. GWA nad niejednorodnym podłożem	486
15.12. Dobowy cykl GWA	486
15.13. Konwekcyjna warstwa graniczna	488
15.14. Stabilna warstwa graniczna	493
16. Zakończenie	507
A. Rachunek wektorowy	510
A.1. Tożsamości rachunku wektorowego	510
A.2. Tożsamości wektorowe w kartezjańskim układzie współrzędnych	511
B. Tożsamości trygonometryczne	512
C. Liczby zespolone	513

D. Szeregi Fouriera	514
E. Równania różniczkowe zwyczajne	519
F. Numeryczny model GWA	522
F.1. Równania transportu	522
F.2. Siatka modelu	522
F.3. Transformacja współrzędnej pionowej	523
F.4. Metoda numeryczna	523
Bibliografia	527
Indeks	542