

# SPIS TREŚCI

Od autora .....	9
Spis oznaczeń .....	15
<b>1. Pole skalarne .....</b>	<b>23</b>
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
<b>2. Termodynamika i statyka atmosfery .....</b>	<b>39</b>
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–adiabaticzny .....	79
2.5.2. Gradient wilgotno–adiabaticzny .....	82
2.5.3. Diagramy aerologiczne .....	87
2.6. Niezmienniki procesów zachodzących z udziałem kondensacji .....	91
<b>3. Pole wektorowe i kinematyka .....</b>	<b>94</b>
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. Krążenie .....	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
<b>4. Prawa zachowania masy, pędu i energii .....</b>	<b>149</b>
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
<b>5. Układy współrzędnych .....</b>	<b>195</b>
5.1. Zestawienie równań zachowania .....	195
5.2. Zapis równań ruchu we współrzędnych sferycznych .....	196
5.3. Płaszczyzny $\beta$ i $f$ .....	201
5.4. Transformacje współrzędnej pionowej .....	202
5.4.1. Współrzędne izobaryczne .....	204
5.4.2. Współrzędne izentropowe .....	208
<b>6. Ruch zrównoważony .....</b>	<b>211</b>
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
<b>7. Wirowość .....</b>	<b>229</b>
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
<b>8. Ruchy falowe .....</b>	<b>247</b>
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
<b>9. Analiza skalowa .....</b>	<b>274</b>
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
<b>10. Analiza wymiarowa .....</b>	<b>314</b>
10.1. Niezależność wymiarowa .....	316
10.2. Twierdzenie II Buckinghama .....	317
10.3. Podobieństwo .....	320
10.4. Podsumowanie .....	321
<b>11. Model płytkiej wody .....</b>	<b>322</b>
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. Przepływ strefowy w płaszczyźnie $\beta$ .....	347
<b>12. Teoria quasi-geostroficzna .....</b>	<b>349</b>
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
<b>13. Niestabilności w przepływach geofizycznych .....</b>	<b>375</b>
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
<b>14. Cyrkulacja atmosferyczna .....</b>	<b>400</b>
14.1. Ogólna cyrkulacja 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
<b>15. Warstwa graniczna .....</b>	<b>419</b>
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
<b>16. Zakończenie .....</b>	<b>507</b>
<b>A. Rachunek wektorowy .....</b>	<b>510</b>
A.1. Tożsamości rachunku wektorowego .....	510
A.2. Tożsamości wektorowe w kartezjańskim układzie współrzędnych .....	511
<b>B. Tożsamości trygonometryczne .....</b>	<b>512</b>
<b>C. Liczby zespolone .....</b>	<b>513</b>

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