

Spis treści

Spis ważniejszych oznaczeń	7
1. Wstęp	13
2. Równania podstawowe	30
2.1. Równania Naviera-Stokesa dla płynu ściśliwego	30
2.1.1. Zależność między lepkością dynamiczną i temperaturą	33
2.1.2. Zależność między gęstością i temperaturą	34
2.2. Równania Naviera-Stokesa zapisane w wirującym układzie współrzędnych	35
2.3. Teoria warstwy przyściennej	37
2.3.1. Równania warstwy przyściennej	37
2.3.2. Transformacja Faulknera-Skan	41
2.3.3. Pole temperatury	46
2.3.4. Wielkości charakteryzujące hydrodynamiczną warstwę przyścienną	49
2.3.5. Przepływ płaski Couette'a	54
3. Podstawy liniowej teorii niestabilności	57
3.1. Liniowa lokalna teoria niestabilności płynu nieściśliwego	57
3.1.1. Równania liniowej teorii niestabilności, mody normalne	57
3.1.2. Równanie Orra-Sommerfelda	62
3.1.3. Równania liniowej teorii niestabilności w krzywoliniowym układzie współrzędnych	64
3.1.4. Teoria czasowa i teoria przestrzenna	65
3.1.5. Równanie Rayleigha	68
3.1.6. Krzywe neutralne	69
3.1.7. Związek pomiędzy teoriami czasową i przestrzenną	70
3.1.8. Twierdzenie Squire'a	72
3.1.9. Widmo liczb falowych i funkcje własne	73
3.1.9.1. Przepływ Poiseuille'a	73
3.1.9.2. Przepływ płaski Couette'a	76
3.1.9.3. Przepływ Blasiusa	76
3.1.9.4. Przepływ Himenza	78
3.1.9.5. Konwekcja Rayleigha-Bénarda	86
3.1.10. Wzmocnienie całkowite N	91
3.2. Liniowa lokalna teoria niestabilności przepływu płynu ściśliwego	94
3.2.1. Równania liniowej teorii niestabilności przepływu płynu ściśliwego	94
3.2.2. Niestabilność wywołana występowaniem uogólnionego punktu przegięcia	97
3.2.3. Teoria niestabilności przepływu płynu ściśliwego i lepkiego	100
3.2.4. Wpływ chłodzenia i podgrzewania opływanej powierzchni na stabilność przepływu	103
3.3. Niestabilność absolutna	105
3.4. Koncepcja niestabilności globalnej	111
3.5. Sparabolizowane równania niestabilności (<i>parabolized stability eqations</i> – PSE) ...	113

4. Metody DNS (<i>direct numerical simulation</i>), RANS (<i>Reynolds averaged Navier-Stokes equations</i>) i LES (<i>large eddy simulation</i>)	119
4.1. Podstawowe wielkości charakteryzujące turbulencję przepływu	120
4.1.1. Prawo Kołmogorowa – $5/3$	121
4.1.2. Prawo ścianki	124
4.1.3. Termiczne prawo ścianki	128
4.2. Metoda bezpośrednia symulacji przepływu (<i>direct numerical simulation</i> – DNS)	130
4.3. Równania Reynoldsa (<i>Reynolds averaged Navier-Stokes equations</i> – RANS)	132
4.3.1. Metody uśredniania	132
4.3.2. Uśrednione równanie ciągłości	136
4.3.3. Uśrednione równanie Naviera-Stokesa	137
4.3.4. Uśrednione równanie energii	139
4.3.5. Intensywność turbulencji i zależności korelacyjne	140
4.3.5.1. Mikroskala czasowa	142
4.3.5.2. Mikroskala Taylora	144
4.3.6. Komentarz do równań Reynoldsa	146
4.3.6.1. Model Boussinesqa	147
4.3.6.2. Modele jednorównaniowe, przepływy płynu nieściśliwego	148
4.3.6.3. Modele dwurównaniowe, przepływy płynu nieściśliwego	151
4.3.6.4. Ograniczenia modelu Boussinesqa	152
4.3.6.5. Turbulentna liczba Prandtla i analogia Reynoldsa	153
4.4. Metoda symulacji dużych wirów (<i>large eddy simulation</i> – LES)	156
4.4.1. Dynamiczny model Smagorinskiego	160
4.4.2. Ujęcie Meneveau	163
4.4.3. Metoda odsunięta symulacji dużych wirów (<i>detached eddy simulation</i> – DES)	167
5. Przepływ wokół pojedynczego wirującego dysku	168
5.1. Teoretyczny model przepływu Bödewadta-Ekmána-Kármána (BEK)	168
5.1.1. Równania opisujące ruch płynu nieściśliwego wokół pojedynczego wirującego dysku	168
5.1.2. Przepływ Bödewadta	172
5.1.3. Przepływ Kármána	174
5.1.4. Przepływ Ekmána	176
5.2. Niestabilność przepływów BEK	178
5.2.1. Równania liniowej teorii niestabilności	178
5.2.2. Wybrane rozwiązania liniowej teorii niestabilności przepływów BEK, niestabilność konwekcyjna	180
5.2.3. Absolutnie niestabilne obszary przepływów BEK	182
5.3. Badania eksperymentalne Lingwood	184
5.4. Rozwiązanie pełnych liniowych równań Naviera-Stokesa dla przepływu wokół wirującego dysku	186
5.5. Badanie turbulentnego przepływu płynu nieściśliwego wokół wirującego dysku	188
5.6. Wymiana ciepła pomiędzy pojedynczym wirującym dyskiem i otaczającym dyskiem płynem	190

6. Przepływ pomiędzy dwoma wirującymi dyskami o nieskończonych promieniach	194
6.1. Przepływ podstawowy	194
6.2. Analiza przepływu między wirującymi dyskami	198
6.2.1. Konfiguracja wirnik–stojan ($\gamma = -1$)	198
6.2.2. Konfiguracja wirnik–wirnik ($\gamma = 0$)	201
6.2.3. Konfiguracja wirnik–wirnik ($\gamma = -2$)	202
6.3. Niestabilność przepływu pomiędzy dwoma wirującymi dyskami	203
6.3.1. Równania liniowej teorii niestabilności	203
6.3.2. Niestabilność konwekcyjna, konfiguracja wirnik–stojan	205
6.3.2.1. Przepływy płynu nieściśliwego	205
6.3.2.2. Przepływ nieizotermiczny	208
6.3.3. Niestabilność absolutna	209
7. Przepływ pomiędzy dwoma wirującymi dyskami i dwoma cylindrami	212
7.1. Model geometryczny	213
7.2. Metody bezpośrednie w badaniu przepływu pomiędzy wirującymi pierścieniami i wirującymi dyskami	216
7.2.1. Przepływy płynu nieściśliwego	216
7.2.1.1. Równania i warunki brzegowe	216
7.2.1.2. Metoda projekcji	219
7.2.1.3. Dyskretyzacja przestrzenna	223
7.2.2. Przepływy nieizotermiczne	225
7.3. Przepływy w konfiguracji wirnik–stojan	228
7.3.1. Przepływy w konfiguracji wirnik–stojan: $L > 55$	228
7.3.2. Przepływy w konfiguracji wirnik–stojan: $2 < L < 55$	230
7.3.3. Przepływ w konfiguracji wirnik–stojan: $L \approx 0(1)$	235
7.4. Przepływy w konfiguracji wirnik–wirnik	236
7.5. Przepływy turbulentne między wirnikiem a stojanem	241
7.6. Przepływy między wirnikiem a stojanem z wymianą ciepła	245
7.6.1. Rozkład lokalnych liczb Nusselta wzdłuż wirnika	245
7.6.2. Rozkład lokalnych liczb Nusselta wzdłuż stojana	249
7.7. Wpływ wirowania na termiczną konwekcję Rayleigha-Bénarda	250
8. Konfiguracja wirnik–wirnik z nałożonym przepływem zewnętrznym	252
8.1. Model geometryczny	252
8.2. Przepływy typu <i>out-flow</i> i <i>in-flow</i> między dwoma dyskami wirującymi z tą samą prędkością w tym samym kierunku	253
8.2.1. Badania teoretyczne	253
8.2.2. Przepływ typu <i>out-flow</i> między dwoma wirującymi dyskami o skończonych promieniach	256
8.2.3. Przepływ typu <i>in-flow</i> między dwoma wirującymi dyskami o skończonych promieniach	259

8.3. Przepływ promieniowy typu <i>out-flow</i> między dwoma wirującymi dyskami z wymianą ciepła	261
8.4. Konfiguracja wirnik–stojan z nałożonym przepływem zewnętrznym	263
9. Podsumowanie	264
Dodatek 1. Schemat Eulera-Maclaurina	269
Dodatek 2. Niestabilność płynu nielepkiego, przepływ nieściśliwy	271
Dodatek 3. Współczynniki równania liniowej teorii niestabilności przepływu płynu lepkiego i ściśliwego	273
Dodatek 4. Technika wyznaczania obszarów niestabilnych absolutnie	275
Dodatek 5. Wyprowadzenie równania na ciśnienie	277
Dodatek 6. Parametry charakterystyczne struktur niestabilnościowych występujących w przepływie między stojanem i wirnikiem	278
Bibliografia	279