

Obsah

1.	Použitá označení.....	6
2.	Úvodem	7
3.	Úvod do studia turbulence.....	8
3.1.	Turbulence v kontextu moderní vědy.....	9
3.2.	Proudící tekutina jako dynamický systém.....	10
3.2.1.	Fraktální struktura	11
3.2.2.	Deterministický chaos	12
3.2.3.	Proces samoorganizace – koherentní struktury	16
3.3.	Definice turbulence	18
3.4.	Příklady turbulentních proudů.....	20
3.4.1.	Turbulence generovaná mříží.....	20
3.4.2.	Volné smykové vrstvy.....	21
3.4.3.	Mezní vrstvy.....	21
3.4.4.	Úplavy	21
3.4.5.	Sdílení tepla.....	22
3.4.6.	Chemická turbulence.....	22
3.4.7.	Hoření.....	23
4.	Základní rovnice dynamiky tekutin.....	24
4.1.	Základní předpoklady.....	24
4.2.	Eulerův a Lagrangeův popis.....	25
4.3.	Zákony zachování	26
4.3.1.	Rovnice kontinuity	27
4.3.2.	Zachování hybnosti	27
4.3.3.	Navierovy-Stokesovy rovnice	29
4.3.3.1.	Vlastnosti N-S rovnic	30
4.3.3.2.	Symetrie N-S rovnic	30
4.3.3.3.	Rovnice pro tlak.....	32
4.3.3.4.	Formulace pro pole vířivosti.....	32
5.	Rovnice turbulentního proudění.....	34
5.1.	Reynoldsovy rovnice.....	34
5.1.1.	Reynoldsova napětí	35
5.1.2.	Možnosti řešení Reynoldsových rovnic	37
5.2.	Energetická bilance	38
5.2.1.	Energie středního proudu	39
5.2.2.	Celková energie.....	40
5.2.3.	Energie turbulence.....	41
5.2.4.	Rychlost disipace energie.....	42
5.2.5.	Střední vířivost	43
5.3.	Hlavní problém turbulence.....	45
5.4.	Bernoulliho rovnice.....	46
5.5.	Transport pasivního skaláru	47
6.	Vznik turbulence	48
6.1.	Stabilita proudění	48
6.2.	Reynoldsov experiment.....	49
6.3.	Teorie hydrodynamické stability.....	50
6.3.1.	Energetické metody.....	52
6.3.2.	Metody založené na lineární teorii poruch	52
6.3.2.1.	Stabilita nevazkého proudění.....	54

6.3.3.	Stabilita vazkého proudění	56
6.4.	Druhy hydrodynamické nestability	57
6.4.1.	Stabilita volné smykové vrstvy	58
6.4.2.	Stabilita mezní vrstvy	59
6.4.3.	Stabilita Poiseuilleova proudění	59
6.4.4.	Stabilita Couettova proudění	60
6.4.5.	Úplavy za tělesy	60
6.4.6.	Stabilita paprsku	61
6.4.7.	Termická nestabilita	61
6.4.8.	Nestability způsobené odstředivými silami	62
6.5.	Problém hydrodynamické stability	63
6.6.	Přechod do turbulence	64
6.6.1.	Přirozený přechod do turbulence	65
6.6.2.	Zkrácený přechod do turbulence	67
7.	Vyvinutá turbulence	70
7.1.	Statistický popis turbulence	71
7.1.1.	Spektrální charakteristiky	71
7.1.1.1.	Spektrum rychlosti	71
7.1.1.2.	Jednorozměrné spektrum	72
7.1.1.3.	Energetické a disipační spektrum	73
7.1.2.	Taylorova hypotéza	73
7.1.3.	Strukturní funkce	74
7.2.	Měřítka turbulence	75
7.2.1.	Kaskáda měřítek	75
7.2.2.	Definice měřítek turbulence	75
7.2.3.	Fraktální struktura měřítek	77
7.3.	Kolmogorovova teorie	78
7.3.1.	Spektra izotropní turbulence	80
7.3.2.	Energetická kaskáda a inverzní energetická kaskáda	82
7.3.3.	Vnitřní intermitence	84
7.3.4.	Formulace pro strukturní funkce	84
7.3.5.	Turbulentní difúze	85
7.4.	Dynamické systémy	86
8.	Příklady turbulentních proudů	88
8.1.	Turbulence při průtoku skrz mříž	88
8.2.	Smykové proudy	89
9.	Modelování turbulence	93
9.1.	Přímá numerická simulace (DNS)	94
9.2.	Metoda simulace velkých vírů (LES)	95
9.3.	Metody modelování Reynoldsových rovnic (RANS)	95
9.3.1.	Modely založené na turbulentní vazkosti	95
9.3.1.1.	Algebraické modely	96
9.3.1.2.	Modely obsahující transportní rovnice	96
9.3.2.	Modelování Reynoldsových napětí	97
10.	Fenomenologie turbulence	98
10.1.	Kinematika	98
10.2.	Víry	100
10.2.1.	Matematické modely vírů	100
10.2.2.	Biotův-Savartův zákon	103
10.2.3.	Interakce vírů	104

10.2.4.	Mechanismus generování vířivosti	105
10.2.5.	Další síly působící na vírové struktury	107
10.3.	Mechanismy samoudržování turbulentního proudění	108
10.3.1.	Koherentní struktury ve stěnových prouděch	108
10.3.2.	Vlášenkové víry	108
10.3.3.	Podélné pruhy nízké rychlosti a „bursting phenomenon“	110
10.4.	Dynamika koherentních struktur	111
10.4.1.	Vznik koherentních struktur	111
10.4.2.	Regenerace koherentních struktur	112
11.	Literatura	114
11.1.	Literatura doporučená pro další studium	114
11.2.	Použitá literatura	114
11.3.	Zdroje obrazových materiálů	115
12.	Dodatky	116
12.1.	Vektorový počet	116
12.2.	Veličiny zaváděné v teorii turbulence	117
12.3.	Symetrie turbulentního proudění	117
12.4.	Statistické nástroje	118
12.4.1.	Středování	118
12.4.2.	Charakteristiky náhodného procesu	119
12.4.3.	Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti	119
12.4.4.	Některé typy náhodných rozdělení	119
12.4.5.	Statistické momenty	120
12.4.6.	Korelační funkce	121
12.4.7.	Spektra	121
12.4.8.	Waveletová transformace	124
12.4.9.	Vlastní ortogonální dekompozice	126
12.5.	Zákony podobnosti	128
12.6.	Stručná historie výzkumu turbulence	129