

Spis treści

PRZEDMOWA	9
WAŻNIEJSZE OZNACZENIA	11
Część pierwsza	11
Część druga	15
CZĘŚĆ PIERWSZA. PODSTAWY MECHANIKI PŁYNÓW NEWTONOWSKICH	19
1. PODSTAWOWE POJĘCIA I DEFINICJE	21
1.1. Pojęcie płynu	21
1.2. Założenie ciągłości płynu	22
1.3. Rodzaje pól wielkości fizycznych	23
1.4. Makroskopowe własności płynów	24
1.4.1. Gęstość i ciężar właściwy	24
1.4.2. Ściślıwość i rozszerzalność cieplna płynów	26
1.4.3. Lepkość płynu	26
1.5. Wyidealizowane modele płynu	29
1.6. Powierzchnia kontrolna i powierzchnia płynna	30
1.7. Siły działające na płyn	31
1.8. Stan naprężenia w płynie – pojęcie tensora	33
2. STATYKA PŁYNÓW	40
2.1. Twierdzenie Eulera	40
2.2. Równania różniczkowe równowagi płynu – Eulera	42
2.3. Warunki równowagi cieczy	43
2.4. Powierzchnie izobaryczne i ekwipotencjalne	45
2.5. Równowaga względna cieczy wirującej wraz z naczyniem ze stałą prędkością kątową	46
2.6. Równowaga cieczy w jednorodnym polu grawitacyjnym ziemskim	49
2.7. Prawo Pascala	50
2.8. Napór cieczy na powierzchnie płaskie	51
2.9. Napór hydrostatyczny na poziome dno naczynia	54
2.10. Napór cieczy na powierzchnie zakrzywione	55
2.11. Wypór hydrostatyczny działający na ciało swobodne zanurzone w cieczy. Prawo Archimedes'a	57
2.12. Stateczność pływania ciał całkowicie zanurzonych w cieczy	60
2.13. Stateczność równowagi ciał pływających częściowo wynurzonych z cieczy – metacentrum	62

3. KINEMATYKA PŁYNÓW	65
3.1. Metody badania ruchu płynów	65
3.2. Tor elementu płynu	69
3.3. Linia prądu	70
3.4. Objętościowe i masowe natężenie przepływu płynu	75
3.5. Równanie ciągłości	76
3.5.1. Równanie ciągłości jednowymiarowego przepływu ustalonego ..	79
3.6. Ruch elementu płynu – I twierdzenie Helmholtza	80
3.6.1. Ruch elementu płynu	80
3.6.2. Stan prędkości odkształcenia w płynie. Interpretacja fizyczna – I twierdzenie Helmholtza	82
3.7. Przestrzenny ruch potencjalny płynu	88
3.8. Płaski ruch potencjalny	91
3.9. Zastosowanie funkcji zmiennej zespolonej do opisu płaskich przepływów potencjalnych	96
3.10. Ruch wirowy	99
3.11. Strumień wektora wiru. II twierdzenie Helmholtza	100
3.12. Cyrkulacja prędkości. Twierdzenie Stokesa	103
3.13. Twierdzenie Kelvina o pochodnej cirkulacji prędkości	106
4. DYNAMIKA PŁYNU DOSKONAŁEGO	108
4.1. Równania różniczkowe ruchu płynu doskonałego – Eulera	108
4.2. Równania różniczkowe ruchu płynu doskonałego w postaci Gromeki–Lamba	110
4.3. Całki różniczkowych równań ruchu płynu doskonałego	113
4.3.1. Całka Lagrange’a–Cauchy’ego	113
4.3.2. Całka Bernoulliego	113
4.4. Równanie Bernoulliego	115
4.4.1. Interpretacja fizyczna równania Bernoulliego	116
4.4.2. Interpretacja geometryczna równania Bernoulliego	116
4.5. Przykłady zastosowań równania Bernoulliego	118
4.5.1. Pomiar prędkości lokalnej za pomocą rurki Prandtla	118
4.5.2. Pomiar natężenia przepływu za pomocą zwężki Venturiego	120
4.5.3. Lewar – zjawisko kawitacji	121
4.5.4. Wyptyw ustalony cieczy ze zbiornika przez mały otwór	122
4.5.5. Czas wyptywu nieustalonego cieczy ze zbiornika przez mały otwór	124
4.6. Zasada pędu w mechanice płynów	125
4.7. Napór hydrodynamiczny cieczy na ściankę krzywaka	127
4.8. Zasada krętu w mechanice płynów	128

5. DYNAMIKA PŁYNÓW RZECZYWISTYCH	130
5.1. Klasyczne doświadczenie Reynoldsa	130
5.2. Różniczkowe równania ruchu płynu lepkiego wyrażone w naprężeniach	132
5.3. Postulat Boltzmanna	134
5.4. Równania konstytutywne	136
5.5. Równania Naviera–Stokesa	139
5.6. Przypadki szczególne równań Naviera–Stokesa	140
6. UPROSZCZONE FORMY RÓWNAŃ NAVIERA–STOKESA	143
6.1. Równania Stokesa	143
6.2. Równania Oseena	145
6.3. Równania Prandtla – laminarna warstwa przyścienna	147
6.3.1. Pojęcie laminarnej warstwy przyściennej	147
6.3.2. Równania Prandtla	147
6.3.3. Przybliżone rozwiązanie równań Prandtla przy opływie płaskiej płyty cieczą lepką – metoda Kármána	153
6.3.4. Przybliżone wyznaczenie laminarnej warstwy przyściennej metodą związku całkowitego Kármána	156
7. RUCH TURBULENTNY	159
7.1. Zasada uśredniania w czasie	159
7.2. Równania Reynoldsa ruchu turbulentnego	161
8. TURBULENTNA WARSTWA PRZYŚCIENNA	166
8.1. Hipoteza „drogi mieszania” Prandtla	166
8.2. Struktura turbulentnej warstwy przyściennej	168
8.3. Uniwersalny rozkład prędkości Prandtla	171
9. OPORY PRZEPŁYWU CIECZY NEWTONOWSKICH W RURACH	174
9.1. Równanie Bernoulliego dla strumienia cieczy rzeczywistej	174
9.2. Laminarny przepływ cieczy lepkiej w poziomym przewodzie o stałym przekroju kołowym	180
9.2.1. Rozkład naprężeń stycznych	180
9.2.2. Rozkład prędkości	182
9.2.3. Objętościowe natężenie przepływu – prawo Hagena Poiseuille’a	183
9.3. Równanie Darcy’ego. Współczynnik oporów	184
9.4. Zależność $\lambda = \varphi(\text{Re})$ w zakresie laminarnym przepływu cieczy w rurze gładkiej	185
9.5. Zależność $\lambda = \varphi(\text{Re})$ w zakresie turbulentnym przepływu cieczy w rurze gładkiej	186
9.6. Rozkład prędkości w zakresie turbulentnym przepływu cieczy w rurze	189

9.7. Przepływ turbulentny w rurach chropowatych. Wykres Nikuradse	192
9.8. Przybliżona metoda obliczania współczynnika λ przy przepływie cieczy w przewodach niekołowych	194
9.9. Obliczanie wysokości strat miejscowych $h_{str}^{(m)}$	195
CZĘŚĆ DRUGA. PODSTAWY DYNAMIKI PRZEPŁYWÓW CIECZY NIENEWTONOWSKICH	197
10. CHARAKTERYSTYKA I PODZIAŁ PŁYNÓW NIENEWTONOWSKICH	199
10.1. Definicja płynów nienewtonowskich	199
10.2. Ogólny podział płynów nienewtonowskich	200
10.3. Charakterystyka reologiczna cieczy reostabilnych	201
10.3.1. Ciecze rozrzedzane ścinaniem i zagęszczane ścinaniem	201
10.3.2. Ciecze plastycznolepkie	206
10.4. Płyny reologicznie niestabilne	208
10.4.1. Płyny tiksotropowe	208
10.4.2. Płyny antytiksotropowe	211
10.5. Ciecze lepkosprężyste	211
10.5.1. Funkcje wiskozymetryczne cieczy lepkosprężystych	211
11. ANORMALNE EFEKTY WYWOŁANE LEPKOSPŘĘŻYSTOŚCIĄ CIECZY	216
11.1. Efekt Weissenberga	216
11.2. Pompa stożkowa	217
11.3. Pompa dośrodkowa	218
11.4. Zanik leja	219
11.5. Anormalny przepływ wtórny	220
11.6. Efekt wlotowy	221
11.7. Efekt Ueblera	222
11.8. Efekt Barusa	222
11.9. Lewar bezprzewodowy	225
11.10. Trójkąt bezprzewodowy	226
11.11. Efekt stopki kieliszka	227
11.12. Struga bezprzewodowa	227
11.13. Bezprzewodowy przepływ elongacyjny	228
11.14. Efekt lepkosprężystego wahadła obrotowego	229
11.15. Efekt Philipopoffa	229
11.16. Kokon lepkosprężysty	230
11.17. Zjawisko Tomsa	231

11.18. Redukcja oporów przepływu za pomocą substancji powierzchniowo czynnych	231
12. LAMINARNY PRZEPŁYW REOSTABILNYCH CIECZY NIENEWTONOWSKICH W RURACH	232
12.1. Równanie Rabinowitscha–Mooneya	232
12.2. Równanie Metznera i Reeda	235
12.3. Sporządzanie rzeczywistej krzywej płynięcia	238
12.4. Laminarny przepływ cieczy potęgowych Ostwalda-de Waele w rurach	238
12.4.1. Profil prędkości i objętościowy strumień przepływu	238
12.4.2. Energia kinetyczna strugi	241
12.4.3. Interpretacja współczynnika konsystencji K' i charakterystycznego wskaźnika płynięcia n'	242
12.5. Przepływ cieczy Bingham w rurze	243
12.5.1. Rozkład prędkości i objętościowe natężenie przepływu	243
12.5.2. Interpretacja K' i n' w przypadku laminarnego przepływu cieczy Bingham	247
12.6. Laminarny przepływ nieliniowej, plastycznolepkiej cieczy Herschela w rurze o przekroju kołowym	249
13. METODY OBLICZANIA OPORÓW PRZEPŁYWU REOSTABILNYCH CIECZY NIENEWTONOWSKICH W RURACH GŁADKICH	251
13.1. Straty ciśnienia w zakresie laminarnym	251
13.2. Straty ciśnienia w zakresie turbulentnym	258
13.3. Analogia hydrodynamiczna przepływu cieczy nienewtonowskich do przepływu newtonowskiego	265
13.3.1. Parametryczna krzywa płynięcia	265
13.3.2. Przepływ pseudonewtonowski	271
13.3.3. Zmodyfikowane równania oporów przepływu reostabilnych cieczy nienewtonowskich w rurach gładkich	276
13.4. Przepływ cieczy nienewtonowskich w przewodach chropowatych	281
14. ANORMALNE ZJAWISKA PRZEPŁYWOWE WYWOŁANE DODATKAMI WIELKOCZĄSTECZKOWYCH POLIMERÓW	282
14.1. Redukcja oporów przepływu za pomocą dodatków wielkocząsteczkowych polimerów	282
14.2. Laminarny przepływ cieczy Tomsa w rurze	289
14.3. Hydrodynamiczna analogia przepływu cieczy pseudoreostabilnej do przepływu cieczy newtonowskiej	299
14.4. Krzywe oporów potęgowych cieczy Tomsa w gładkich rurach o przekroju kołowym	301

14.4.1. Zakres laminarny	301
14.4.2. Ogólne równanie oporów przepływu cieczy Tomsa w zakresie turbulentnym	302
14.4.3. Efekty towarzyszące zjawisku Tomsa	310
DODATEK	317
D1. KONWENCJA ZAPISU TENSOROWEGO EINSTEINA	
I PODSTAWY TEORII POŁA	319
D2. PODSTAWY ANALIZY WYMIAROWEJ	329
D2.1. Podstawowe pojęcia i definicje	329
D2.2. Metoda wykładników Rayleigha	333
D2.2.1. Sposób pierwszy zastosowania metody wykładników Rayleigha	333
D2.2.2. Sposób drugi zastosowania metody wykładników Rayleigha	335
LITERATURA	336