

Spis treści

Przedmowa	13
1. Przedmiot i zakres mechaniki ciał stałych i płynów	15
1.1. Formy materii przyjmowane w zagadnieniach mechaniki	15
1.2. Przykłady klasyfikacji ośrodków materialnych w mechanice	16
1.3. Zasadnicze działy mechaniki	17
1.4. Podział mechaniki z uwagi na różne zakresy tematyczne	18
1.5. Modele fizyczne ogólne rzeczywistych układów (ośrodków) materialnych	19
1.6. Modele fizyczne szczegółowe rzeczywistych układów (ośrodków) materialnych	20
1.7. Mechanika jako nauka dedukcyjna – modele matematyczne zjawisk mechanicznych	21
1.8. Rodzaje badań w mechanice	22
1.9. Problemy związane z modelowaniem fizycznym i matematycznym zjawisk mechanicznych	23
1.10. Zakres monografii	24
2. Prawa Newtona	26
3. Punkt materialny (cząstka materialna, masa skupiona, układ o jednym stopniu swobody)	29
3.1. Kinematyka	29
3.1.1. Transformacja układu współrzędnych	29
3.1.2. Wektor nieskończenie małego obrotu chwilowego i wektor prędkości kątowej	32
3.1.3. Ruch bezwzględny (w układzie inercjalnym)	34
3.1.4. Ruch względny	40
3.2. Dynamika	43
3.2.1. Równania ruchu w różnych układach współrzędnych	43
3.2.2. Zasada d'Alemberta dla punktu materialnego	45
3.2.3. Ruchy aperiodyczne związane z siłami oporu ośrodka płynnego, w którym porusza się cząstka materialna	46

3.2.4.	Ruchy drgające układów liniowych o jednym stopniu swobody	49
3.2.5.	Proste przypadki drgań samolotu wokół jego średniego toru poziomego	59
4.	Grupa cząstek materialnych, układ punktów materialnych	65
4.1.	Uwagi wstępne	65
4.2.	Więzy	68
4.3.	Równania konstytutywne więzów – modele mechaniczne lub / i fizyczne więzów	72
4.3.1.	Opis i oznaczenie wielkości występujących w równaniach konstytutywnych więzów	72
4.3.2.	Modele więzów kinematycznych	74
4.3.3.	Modele więzów kinetycznych/dynamicznych	75
4.3.4.	Modele więzów fizycznych	80
4.3.5.	Modele więzów mieszanych	81
4.3.6.	Potencjał i energia potencjalna więzów sprężystych	82
4.4.	Współrzędne uogólnione i stopnie swobody układu materialnego	83
4.5.	Podstawowe pojęcia, zasady i twierdzenia dynamiki (kinetyki) układu punktów materialnych	84
4.5.1.	Środek masy	84
4.5.2.	Ruch środka masy – uśredniony ogólny translacyjny ruch układu	85
4.5.3.	Zasada pędu	86
4.5.4.	Zasada krętu/momentu pędu – uśredniony/ogólny ruch rotacyjny układu	87
4.5.5.	Zasada energii kinetycznej	88
4.5.6.	Praca sił zewnętrznych	90
4.5.7.	Praca sił wewnętrznych	90
4.5.8.	Praca reakcji podpór	91
4.5.9.	Zasada zachowania energii mechanicznej	92
4.5.10.	Zasada d'Alemberta dla i -tego punktu materialnego	92
4.5.11.	Przemieszczenia rzeczywiste, możliwe i wirtualne. Praca wirtualna	92
4.5.12.	Zasada prac wirtualnych (d'Alemberta) dla układu n punktów materialnych	94
4.5.13.	Siły uogólnione i przemieszczenia uogólnione	95
4.5.14.	Warunki równowagi statycznej (równania statyki) i warunki równowagi dynamicznej/kinetycznej (równania dynamiki/kinetyki)	98
4.5.15.	Równania Lagrange'a II rodzaju	99
4.5.16.	Zasada Hamiltona dla więzów dynamicznych	105
4.5.17.	Siły rzeczywiste, możliwe i wirtualne	106
4.5.18.	Różne postaci zasady prac wirtualnych	107
4.5.19.	Analogia kineto-statyczna	108
4.6.	Twierdzenia o wzajemności w statyce układu punktów materialnych dla więzów statycznych liniowo-sprężystych lub/i sztywnych i więzów poza-statycznych	109
4.6.1.	Twierdzenie o wzajemności prac wirtualnych przy wirtualnym stanie sił uogólnionych i wirtualnym stanie przemieszczeń uogólnionych	109

4.6.2.	Twierdzenie o wzajemności prac wirtualnych przy rzeczywistym stanie sił uogólnionych i rzeczywistym stanie przemieszczeń uogólnionych	110
4.6.3.	Twierdzenia o wzajemności przemieszczeń	111
4.6.4.	Twierdzenie o wzajemności reakcji	112
4.6.5.	Twierdzenie o wzajemności sił wewnętrznych	114
4.6.6.	Twierdzenie o wzajemności przemieszczeń i reakcji	114
4.6.7.	Twierdzenie o wzajemności przemieszczeń i sił wewnętrznych	114
4.6.8.	Wzór do obliczania przemieszczeń w układach z więzami statycznymi liniowo-sprężystymi lub/i sztywnymi i więzami pozastatycznymi	115
5.	Bryła sztywna	117
5.1.	Kinematyka	117
5.1.1.	Uwagi wstępne	117
5.1.2.	Przypadki szczególne ruchu w układzie inercjalnym	119
5.1.3.	Ruch ogólny w układzie inercjalnym	121
5.1.4.	Ruchy względne w różnych układach ruchomych	122
5.2.	Dynamika	127
5.2.1.	Charakterystyki bezwładnościowe	127
5.2.2.	Różne przypadki równań ruchu (dynamiki)	133
5.3.	Przykłady zastosowań	138
5.3.1.	Samolot przy ustalonym ruchu wznoszącym się skrzywionym w prawo	138
5.3.2.	Drgania bloku fundamentowego na podłożu sprężystym	143
5.3.3.	Drgania płaskie bryły sztywnej poruszającej się po nierównym torze	156
6.	Stałe i płynne ciągłe ośrodki materialne	160
6.1.	Metody opisu ruchu	160
6.2.	Deformacje i odkształcenia	164
6.2.1.	Wprowadzenie	164
6.2.2.	Zależności różniczkowe między odkształceniami i przemieszczeniami w przypadku małych przemieszczeń i małych dystorsji	164
6.2.3.	Odkształcenia skończone	167
6.2.4.	Tensory prędkości odkształcenia i prędkości obrotu	169
6.3.	Siły masowe, powierzchniowe i naprężenia w opisie przestrzennym	171
6.4.	Analiza stanu naprężenia w opisie przestrzennym	174
6.5.	Prawa zachowania masy, pędu i krętu oraz wynikające z nich równania ciągłości i ruchu	179
6.5.1.	Twierdzenie Greena-Gaussa-Ostrogradzkiego	179
6.5.2.	Pochodna materialna całki objętościowej	180
6.5.3.	Równania ciągłości wynikające z zasady zachowania masy	181
6.5.4.	Równania ruchu wynikające z zasady pędu i krętu	182
6.5.5.	Siła wypadkowa działająca na masę płynu poruszającą się ruchem ustalonym, wynikająca z zasady pędu	184
6.5.6.	Linearyzacja równań ruchu	185
6.6.	Podstawy termodynamiczne termomechaniki ciągłych ośrodków materialnych	185

6.6.1. Pojęcia podstawowe i prawa termodynamiki	185
6.6.2. Równanie energii dla ciągłych ośrodków materialnych	188
7. Ciągłe ośrodki sprężyste	194
7.1. Uwagi wstępne	194
7.2. Różne postaci prawa Hooke'a	198
7.3. Kompletny układ równań liniowej elastostatyki w zapisie klasycznym i wskaźnikowym	202
7.3.1. Warunki brzegowe	202
7.3.2. Równania liniowej elastostatyki w zapisie klasycznym (nieskróconym)	203
7.3.3. Równania liniowej elastostatyki w zapisie sumacyjnym	204
7.3.4. Reakcje więzów zewnętrznych	205
7.3.5. Ograniczenia	206
7.3.6. Różne postaci równań przemieszczeniowych elastostatyki	207
7.3.7. Równania Beltramięgo–Michella	209
7.4. Kompletny układ równań liniowej elastokinytyki	211
7.5. Orientacyjne wartości statycznych i dynamicznych modułów sprężystości oraz współczynnika Poissona	212
7.6. Równania falowe w liniowej elastokinytyce i najprostsze przypadki tych fal	216
7.7. Rzeczywiste fale powierzchniowe występujące w ośrodkach gruntowych i w basenach wodnych	225
7.8. Różne postaci zasady prac wirtualnych oraz wynikające z nich inne twierdzenia i zasady	228
7.8.1. Zasada prac wirtualnych elastokinytyki przy rzeczywistym stanie uogólnionych sił i wirtualnym stanie uogólnionych przemieszczeń	228
7.8.2. Zasada Hamiltona	229
7.8.3. Twierdzenia o wzajemności w elastostatyce	230
8. Sprężystość i termodynamika	237
8.1. Równanie energii dla ciała sprężystego przy adiabatycznym, quasi – statycznym procesie termodynamicznym	237
8.1.1. Podstawowe założenia i zależności	237
8.1.2. Energia sprężysta dla ciała Hooke'a [8.5]	239
8.2. Geometrycznie liniowa teoria termosprężystości	241
8.2.1. Podstawowe założenia i zależności	241
8.2.2. Rozszerzone równanie przewodnictwa cieplnego	247
8.2.3. Równania sprzężone i niesprężone termosprężystości	249
8.2.4. Równania przemieszczeniowe klasycznej elastostatyki i elastokinytyki [8.4]	250
8.2.5. Inne sformułowanie równania energii – równanie bilansu energii cieplnej	252
9. Akustyka	255
9.1. Kompletny układ równań drgań i fal akustycznych	255
9.1.1. Założenia wyjściowe i podstawowe równania elastokinytyki	255
9.1.2. Równania przemieszczeniowe, prędkościowe i ciśnieniowe akustyki	257

9.1.3.	Potencjał akustyczny	259
9.1.4.	Przypadki szczególne fal w polu swobodnym (przestrzeni otwartej, polu bliskim źródła)	260
9.1.5.	Wartości podstawowych współczynników i wielkości akustycznych i mechanicznych ośrodków płynnych i stałych	263
9.1.6.	Warunki brzegowe i początkowe	263
9.2.	Podstawowe wielkości, zjawiska i zależności występujące w zagadnie- niach akustyki stosowanej	267
9.2.1.	Krótką charakterystyka rzeczywistych fal dźwiękowych	267
9.2.2.	Energia fal akustycznych	269
9.2.3.	Natężenie dźwięku i moc źródła dźwięku	269
9.2.4.	Proste przypadki interferencji fal płaskich	275
9.2.5.	Zasady propagacji dźwięku w najprostszych przypadkach kontaktowych ośrodka płynnego (powietrza) z ośrodkiem stałym	282
9.3.	Charakterystyki czasowe i częstotliwościowe procesów akustycznych uży- wane w akustyce stosowanej na przykładzie pola ciśnienia akustycznego	292
9.3.1.	Wprowadzenie	292
9.3.2.	Charakterystyki czasowe ciśnienia akustycznego	300
9.3.3.	Charakterystyki częstotliwościowe ciśnienia akustycznego	303
9.4.	Podstawowe charakterystyki akustyczne pomieszczeń	308
9.5.	Relacje między poziomami natężenia dźwięku i mocy źródła dźwięku dla wybranych przypadków pól akustycznych	315
9.5.1.	Źródło dźwięku (hałasu) generujące falę płaską propagującą się w sztywnym (wytłumionym) kanale	315
9.5.2.	Źródło punktowe wszechkierunkowe w przestrzeni otwartej (polu bezpośrednim)	316
9.5.3.	Źródło punktowe kierunkowe o współczynniku kierunkowości K generujące falę quasi-kulistą w kąt bryłowy Ω	317
9.5.4.	Zastępcze źródło płaskie dla hałasu przenikającego przez powierzchnię S	318
9.5.5.	Źródło wszechkierunkowe w przestrzeni zamkniętej (w polu pogłosowym)	318
9.5.6.	Inne przypadki pól akustycznych spotykane w akustyce stosowanej	322
10.	Właściwości fizyko-mechaniczne płynów	324
10.1.	Gęstość	324
10.2.	Temperatura	324
10.3.	Ciśnienie	325
10.4.	Płyny ściśliwe i nieściśliwe	326
10.5.	Ściśliwość	327
10.6.	Właściwości cieplne płynów	328
10.6.1.	Ciepło właściwe	328
10.6.2.	Stosunek ciepła właściwych κ	329
10.6.3.	Stała gazowa R	329
10.7.	Równania stanu dla gazów	330
10.7.1.	Gazy doskonałe	330
10.7.2.	Gazy rzeczywiste	334

10.8. Odkształcalność objętościowa cieczy	336
10.9. Lepkość – płyn doskonały, płyny newtonowskie, płyny nienewtonowskie	337
10.10. Właściwości dyssypatywne płynów	343
10.11. Napięcie powierzchniowe cieczy i efekty z nim związane	345
10.11.1. Powierzchnia swobodna cieczy	345
10.11.2. Kształt powierzchni swobodnej w pobliżu ściany lub płytki	347
10.11.3. Kształt swobodnej powierzchni cieczy w pobliżu ściany lub płytki	348
10.11.3. Efekt kapilarny – włoskowatość	350
10.12. Ciśnienie pary i ciśnienie wrzenia cieczy	351
10.13. Skład i budowa atmosfery ziemskiej oraz podstawowe właściwości powietrza atmosferycznego [10.3]	352
10.14. Tablice mechanicznych i fizycznych właściwości płynów	355
11. Statyka płynów	360
11.1. Wprowadzenie	360
11.2. Równowaga bezwzględna płynu	362
11.2.1. Równowaga w potencjalnym polu sił masowych	362
11.2.2. Równowaga podczas braku sił masowych	363
11.2.3. Równowaga w polu sił ciężkości	363
11.2.4. Naczynia połączone, piezometr, barometr i manometr	366
11.2.5. Parcie/napór cieczy na powierzchnie ścian	370
11.2.6. Wypór hydrostatyczny cieczy działający na ciała stałe częściowo lub całkowicie w niej zanurzone	374
11.3. Równowaga względna cieczy	378
11.3.1. Ruch postępowy/translacyjny	379
11.3.2. Ruch obrotowy (rotacyjny)	380
12. Kinetyka płynów nielepkich	382
12.1. Kompletny układ równań kinetyki płynów nielepkich i nieprzewodzących ciepła	382
12.2. Równanie Bernoulliego	385
12.2.1. Równanie ruchu w formie Gromeki–Lamba	385
12.2.2. Równanie Bernoulliego	386
12.3. Wybrane zastosowania techniczne równania Bernoulliego	388
12.3.1. Wypływ cieczy ze zbiornika	388
12.3.2. Czas opróżniania zbiornika z cieczą	390
12.3.3. Wypływ gazu doskonałego ze zbiornika przez mały otwór	390
12.3.4. Zastosowanie równania Bernoulliego do pomiarów ciśnień i prędkości przepływu	391
12.4. Przepływ względny w układzie wirującym	393
13. Wykorzystanie zasady pędu w postaci całkowitej do wyznaczania wynikowych oddziaływań kinetycznych płynów na kontaktujące się z nimi ciała stałe lub ich fragmenty	395
13.1. Strumień pędu i reakcja płynu przy jego ruchu ustalonym	395
13.2. Reakcja strumienia wypływającego ze zbiornika	398
13.3. Napęd odrzutowy	399

13.3.1. Rakieta	399
13.3.2. Silnik odrzutowy	400
13.3.3. Uwzględnienie zmiany masy układu w czasie	401
13.4. Siła oporu aero/hydrodynamicznego konstrukcji smukłej ustawionej normalnie do przepływu płynu	404
13.4.1. Podstawowe założenia i zależności	404
14. Kompletny układ równań kinetyki ustalonej strugi płynu i przykłady ich zastosowań w praktyce	410
14.1. Inne sformułowanie równania energii łączące zasady mechaniki i termodynamiki	410
14.2. Uśrednione równanie energii dla ustalonej jednowymiarowej strugi płynu	413
14.3. Przepływ cieczy przewodami zamkniętymi	415
14.3.1. Współczynnik strat tarcia λ	418
14.3.2. Współczynnik strat miejscowych ζ	422
14.4. Teoria Froude'a dla siły ciągu śmigła samolotu lub śruby napędowej statku	427
14.5. Teoria strumieniowa wirników wiatrowych śmigłowych (szybkobieżnych) o poziomej osi obrotu	432
14.6. Kinetyka/dynamika gazów przy dużych i bardzo dużych prędkościach	438
14.7. Równanie Bernoulliego jako całka równania ruchu Eulera wzdłuż ustalonej linii prądu	446
14.8. Szybki i bardzo szybki adiabatyczny przepływ gazu idealnego, doskonałego przez przewężenie/dyszę	449
15. Wybrane zagadnienia analizy wymiarowej i teorii podobieństwa zjawisk mechanicznych	453
15.1. Uwagi wstępne	453
15.2. Twierdzenie Π (lub Buckingham'a) analizy wymiarowej	454
15.3. Zjawisko mechaniczne opisane uogólnionymi zależnościami funkcyjnymi typu potęgowego	455
15.3.1. Uogólniona zależność jednomianowa	455
15.3.2. Uogólniona zależność wielomianowa z przesunięciami	462
15.4. Działanie statyczne (średnie) wiatru	463
15.4.1. Obiekt smukły jednoprzęsłowy	463
15.4.2. Obiekt smukły wspornikowy	467
15.5. Drgania aeroelastyczne mostu podwieszonego lub wiszącego	469
15.6. Podobieństwo dynamiczne przepływów	471
15.7. Odpowiedź budowli wieżowej	474
15.8. Skale podobieństwa dynamicznego przepływów w aerodynamice budowli i problemy ich spełnienia	477
16. Termomechanika stosowana w budownictwie	483
16.1. Deformacje i odkształcenia termiczne/cieplne	483
16.2. Podstawowe informacje o wymianie ciepła	485
16.3. Przewodzenie ciepła w ciałach stałych	487
16.4. Przejmowanie ciepła przez płyny (powietrze) w pobliżu powierzchni kontaktu płynu z ciałem stałym – mieszana wymiana ciepła przez konwekcję i przewodzenie	492
16.5. Wymiana ciepła przez promieniowanie	494

16.6. Złożona wymiana ciepła	506
16.6.1. Przypadek ogólny	506
16.6.2. Przypadki szczególne	507
16.7. Warunki początkowy i brzegowe w zagadnieniach przenikania ciepła przez przegrody budowlane	509
16.8. Jednoosiowe zagadnienie ustalonego przenikania ciepła przez przegrody budowlane	511
16.8.1. Przegroda wielowarstwowa płaska	511
16.8.2. Przegroda wielowarstwowa cylindryczna	513
16.9. Naprężenia i siły przekrojowe w konstrukcjach wywołane wpływami termicznymi	515
16.9.1. Podstawowe zależności kinematyczno–statyczne w zagadnieniach liniowej termosprężystości	515
16.9.2. Skutki działania pola temperatury na wybrane elementy konstrukcyjne prętowe i płytowe	517
16.9.3. Osiowo–symetryczne stany naprężeń termicznych w rurach w warunkach ustalonego przepływu ciepła	523
16.10. Wartości wielkości występujących w zagadnieniach wymiany ciepła	527
16.10.1. Wartości współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej α_0 ciał stałych	527
16.10.2. Wartości oporu cieplnego R i współczynnika przenikania ciepła U wybranych przegród o budowie niejednorodnej	528
16.10.3. Wartości współczynników charakteryzujących przewodzenie ciepła	531
16.10.4. Wartości współczynników charakteryzujących warunki brzegowe wymiany ciepła	536
16.10.5. Wzory empiryczne dla współczynnika α_k w niektórych przypadkach szczególnych mieszanej wymiany ciepła przez konwekcję i przewodzenie	543
17. Wybrane metody dyskretyzacji ciągłych ośrodków materialnych i związane z nimi modele dyskretne ciał stałych i płynów	558
17.1. Uwagi wstępne	558
17.2. Dyskretyzacja fizyczna	558
17.2.1. Równania ruchu – drgania wymuszone	558
17.3. Metoda elementów skończonych (MES)	563
17.3.1. Uwagi wstępne	563
17.3.2. Sformułowanie wariacyjne MES dla zagadnień opisywanych przez równanie quasi-harmoniczne	566
17.3.3. Sformułowanie MES bazujące na metodzie residuów ważonych	572
17.3.4. Sformułowanie równań MES dla problemu statycznego liniowej teorii sprężystości (LTS)	575
17.3.5. Sformułowanie równań MES dla problemu dynamicznego LTS	579
17.3.6. Sformułowanie MES w zagadnieniach dynamicznych belek i ram płaskich	582
17.4. Metoda objętości skończonych/kontrolnych	587
17.4.1. Ogólna koncepcja metody	587
17.4.2. Przykład sformułowania MOS dla równania różniczkowego Poissona [17.10, 17.14]	591
17.4.3. Podejście wzorowane na metodzie elementów skończonych (MES)	594