



Spis treści

Przedmowa	9
Podziękowania	10
Wykaz używanych skrótów	11
Rozdział 1	
Wprowadzenie	13
1.1. Ogólna charakterystyka scenariuszy zwiększenia roli wodoru w gospodarce	13
1.2. Produkcja i wykorzystanie wodoru. Główne zadania i możliwości rozwoju	17
1.3. Zakres opracowania	23
Bibliografia do rozdziału pierwszego	28
Rozdział 2	
Podstawy termodynamiczne	29
2.1. Funkcje stanu	29
2.2. Prawo zachowania energii. Pierwsza zasada termodynamiki	30
2.3. Druga zasada termodynamiki. Generacja entropii	35
2.4. Połączenie pierwszej i drugiej zasady termodynamiki	38
2.5. Praca maksymalna	39
2.6. Metoda entropowa analizy technologii energetycznych	41

2.7. Potencjał chemiczny	48
2.8. Układy z reakcjami chemicznymi	52
2.9. Warunki równowagi	53
2.10. Uogólnione równanie fundamentalne	54
2.11. Reakcja standardowa	55
2.12. Reakcja tworzenia	57
2.13. Bilansowanie procesów spalania	58
2.14. Reakcje jonowe	63
Bibliografia do rozdziału drugiego	65
 Rozdział 3	
Wodór. Podstawowe właściwości	67
3.1. Izotopy i molekuly wodoru	67
3.2. Równanie stanu	69
3.3. Temperatura adiabatycznego spalania	73
3.4. Efekt Joule’a-Thomsona (J-T)	74
Bibliografia do rozdziału trzeciego	74
 Rozdział 4	
Wytwarzanie wodoru z paliw węglowodorowych	75
4.1. Technologie produkcji wodoru z paliw gazowych i ciekłych	76
4.1.1. Reforming parowy gazu ziemnego	78
4.1.2. Reforming parowy alkanów C ₂ -C ₄ [4.1]	84
4.1.3. Reforming parowy ciekłych węglowodorów [4.1]	85
4.1.4. Częściowe utlenianie węglowodorów	89
4.1.5. Reforming autotermiczny metanu	90
4.1.6. Piroliza metanu	90
4.2. Technologie produkcji wodoru z węgla	91
4.2.1. Zgazowanie węgla	92
4.2.2. Piroliza węgla	115
4.2.3. Opcje technologiczne instalacji wytwarzania wodoru na drodze zgazowania i pirolizy węgla	125
4.2.4. Obciążenie emisją CO ₂ procesów produkcji wodoru z węgla	125
4.2.5. Koszty produkcji wodoru z węgla	132
4.3.1. Technologie zgazowania biomasy	137
4.3.2. Produkcja wodoru	141
4.3.3. Koszty produkcji wodoru z biomasy	155
Bibliografia do rozdziału czwartego	157

Rozdział 5	
Metody rozkładu wody na wodór i tlen	163
5.1. Wprowadzenie	163
5.2. Istota działania podstawowego modułu elektrolizera	165
5.3. Napięcie standardowe procesu	169
5.4. Ogólna charakterystyka napięcia w rzeczywistym module elektrolizera	176
5.4.1. Nadnapięcie aktywacyjne. Równanie Butlera-Volmera	177
5.4.2. Straty koncentracji	179
5.4.3. Straty omowe	180
5.5. Bilans substancji w elektrolizerze (polimerowym)	182
5.6. Bilans energii	193
5.7. Sprawność procesu elektrolizy	198
5.8. Elektrolizery alkaliczne	199
5.9. Elektrolizery fosforowe (z elektrolitem H_3PO_4)	203
5.10. Elektrolizery tlenkowe	204
5.10.1. Modele dyfuzji	204
5.10.2. Charakterystyka napięciowo-prądowa	211
5.10.3. Bilans energii i entropii	216
5.11. Koelektroliza	224
5.11.1. Charakterystyka napięciowo-prądowa	224
5.11.2. Bilans energii	230
5.11.3. Sprawność koelektrolizy	233
5.12. Generatory wodoru	233
Bibliografia do rozdziału piątego	241
Rozdział 6	
Wybrane zagadnienia transportu i magazynowania wodoru	245
6.1. Transport rurociągowy	245
6.2. Magazynowanie	247
6.3. Termodynamiczne aspekty ładowania i wyładowania magazynów (zasobników) wodoru	255
6.4. Bezpieczeństwo	263
Bibliografia do rozdziału szóstego	264
Rozdział 7	
Energetyczne wykorzystanie wodoru	267
7.1. Ogólna charakterystyka struktur technologicznych	267
7.2. Ogniwa paliwowe i ich charakterystyki	272

7.2.1. Ogólna charakterystyka ogniw paliwowych	272
7.2.2. Istota działania ogniwa paliwowego	274
7.2.3. Bilans energii dla ogniwa	276
7.2.4. Siła elektromotoryczna ogniwa	278
7.2.5. Ogólna charakterystyka strat potencjału w rzeczywistym ogniwie	283
7.2.6. Ogólna charakterystyka technologiczna stosowanych ogniw (instalacji) paliwowych	292
7.3. Instalacje energetyczne z ogniwami paliwowymi	309
7.3.1. Skojarzona produkcja elektryczności i ciepła	310
7.3.2. Integracja ogniwa paliwowego z turbiną gazową	318
7.4. Charakterystyki modułów pracujących w instalacjach wytwarzania i wykorzystania wodoru zintegrowanych z OZE	325
7.4.1. Analityczny opis promieniowania słonecznego	325
7.4.2. Charakterystyki ogniw fotowoltaicznych	336
7.4.3. Turbiny wiatrowe	350
7.4.4. Model baterii	353
7.4.5. Model zbiornika wodoru	355
7.4.6. Model sprężarki	356
7.5. Integracja układów elektrolitycznego wytwarzania wodoru z układami energii napędowej różnej postaci	357
7.5.1. Bezpośrednie połączenie paneli ogniw fotowoltaicznych i elektrolizerów	357
7.5.2. Układy zawierające wiele modułów	359
7.6. Spalanie wodoru w turbinach gazowych	360
7.6.1. Wprowadzenie	360
7.6.2. Analiza prostej wodorowej instalacji turbiny gazowej	361
7.6.3. Obiegi złożone	364
Bibliografia do rozdziału siódmego	365
Rozdział 8	
Wybrane zagadnienia transportu	373