



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	26
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 3	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	96
4.2.1. Zgazowanie węgla	97
4.2.2. Piroliza węgla	120
4.2.3. Opcje technologiczne instalacji wytwarzania wodoru na drodze zgazowania i pirolizy węgla	130
4.2.4. Obciążenie emisją CO ₂ procesów produkcji wodoru z węgla	130
4.2.5. Koszty produkcji wodoru z węgla	137
4.3. Zgazowanie biomasy	144
4.3.1. Technologie zgazowania biomasy	144
4.3.2. Produkcja wodoru	146
4.3.3. Koszty produkcji wodoru z biomasy	159
Bibliografia do rozdziału czwartego	163

Rozdział 5	
Metody rozkładu wody na wodór i tlen	169
5.1. Wprowadzenie	169
5.2. Istota działania podstawowego modułu elektrolizera	171
5.3. Napięcie standardowe procesu	175
5.4. Ogólna charakterystyka napięcia w rzeczywistym module elektrolizera	182
5.4.1. Nadnapięcie aktywacyjne. Równanie Butlera-Volmera	183
5.4.2. Straty koncentracji	185
5.4.3. Straty omowe	186
5.5. Bilansowanie substancji i energii w elektrolizerach.	
Ogólne założenia	188
5.5.1. Bilans substancji w elektrolizerze (polimerowym)	190
5.6. Bilans energii	201
5.7. Sprawność procesu elektrolizy	205
5.8. Elektrolizery alkaliczne	207
5.9. Elektrolizery fosforowe (z elektrolitem H_3PO_4)	211
5.10. Elektrolizery tlenkowe	212
5.10.1. Modele dyfuzji	212
5.10.2. Charakterystyka napięciowo-prądowa	219
5.10.3. Bilans energii i entropii	224
5.11. Koelektroliza	231
5.11.1. Charakterystyka napięciowo-prądowa	231
5.11.2. Bilans energii	238
5.11.3. Sprawność koelektrolizy	240
5.12. Generatory wodoru	241
Bibliografia do rozdziału piątego	248
Rozdział 6	
Wybrane zagadnienia transportu i magazynowania wodoru	251
6.1. Transport rurociągowy	251
6.2. Magazynowanie	253
6.3. Termodynamiczne aspekty ładowania i wyładowania magazynów (zasobników) wodoru	261
6.4. Bezpieczeństwo	269
Bibliografia do rozdziału szóstego	270
Rozdział 7	
Energetyczne wykorzystanie wodoru	273
7.1. Ogólna charakterystyka struktur technologicznych	273

7.2.	Ogniwa paliwowe i ich charakterystyki	280
7.2.1.	Ogólna charakterystyka ogniw paliwowych	280
7.2.2.	Istota działania ogniwa paliwowego	281
7.2.3.	Bilans energii dla ogniwa	283
7.2.4.	Siła elektromotoryczna ogniwa	285
7.2.5.	Ogólna charakterystyka strat potencjału w rzeczywistym ogniwie	290
7.2.6.	Ogólna charakterystyka technologiczna stosowanych ogniw (instalacji) paliwowych	305
7.3.	Instalacje energetyczne z ogniwami paliwowymi	322
7.3.1.	Skojarzona produkcja elektryczności i ciepła	323
7.3.2.	Integracja ogniwa paliwowego z turbiną gazową	332
7.4.	Charakterystyki modułów pracujących w instalacjach wytwarzania i wykorzystania wodoru zintegrowanych z OZE	338
7.4.1.	Analityczny opis promieniowania słonecznego	338
7.4.2.	Charakterystyki ogniw fotowoltaicznych	349
7.4.3.	Turbiny wiatrowe	363
7.4.4.	Model baterii	366
7.4.5.	Model zbiornika wodoru	368
7.4.6.	Model sprężarki	369
7.5.	Integracja układów elektrolitycznego wytwarzania wodoru z układami energii napędowej różnej postaci	370
7.5.1.	Bezpośrednie połączenie paneli ogniw fotowoltaicznych i elektrolizerów	370
7.5.2.	Układy zawierające wiele modułów	372
7.6.	Spalanie wodoru w turbinach gazowych	373
7.6.1.	Wprowadzenie	373
7.6.2.	Analiza prostej wodorowej instalacji turbiny gazowej	374
7.6.3.	Obiegi złożone	377
	Bibliografia do rozdziału siódmego	378
Rozdział 8		
	Wybrane zagadnienia transportu	385
	Bibliografia do rozdziału ósmego	390