
Spis treści

I. Słowo od Wydawcy	19
II. Zarys historii gazownictwa – <i>Stanisław Szafran</i>	23
III. Wprowadzenie – <i>Stanisław Nagy</i>	35
Skróty i akronimy	39
Rozdział 1. Gaz ziemny w gospodarce XXI wieku – <i>Stanisław Nagy</i>	47
Literatura	52
Rozdział 2. Podstawowe jednostki i definicje stosowane w gazownictwie. Klasyfikacje paliw gazowych – <i>Stanisław Nagy, Witold Warowny</i>	53
2.1. Definicje podstawowe	53
2.1.1. Równowaga termodynamiczna	53
2.1.2. Wielkości mierzalne i konceptualne	53
2.1.3. Płyn i jego charakterystyka	53
2.1.4. Substancja	54
2.1.5. Parametry intensywne i ekstensywne	55
2.1.6. Funkcje procesu	57
2.1.7. Praca	57
2.1.8. Ciepło	57
2.1.9. Funkcje stanu	57
2.1.10. Energia wewnętrzna	57
2.1.11. Entalpia	58
2.1.12. Entalpia swobodna Gibbsa	58
2.1.13. Energia swobodna Helmholtza	58
2.1.14. Entropia	58
2.1.15. Wielkości kaloryczne	59
2.1.16. Granice wybuchowości	60
2.1.17. Gaz doskonały	60

2.1.18. Gaz półdoskonały	60
2.1.19. Gaz rzeczywisty	60
2.1.20. Warunki odniesienia	61
2.1.21. Lepkość	61
2.1.22. Charakterystyczne ciśnienia pracy gazociągów	61
2.2. Symbole i skróty jednostek	62
2.2.1. Międzynarodowy układ jednostek miar (SI)	62
2.2.2. Inne jednostki	63
2.2.3. Inne skróty i symbole	64
2.2.4. Warunki pomiaru objętości gazu	65
2.2.5. Przeliczanie innych jednostek	65
2.2.6. Przeliczanie różnych jednostek energii	66
2.2.7. Przeliczanie jednostek energii, ciśnienia i mocy na jednostki układu SI	66
2.3. Klasyfikacje paliw gazowych	68
2.4. Klasyfikacje gazu ziemnego	73
2.4.1. Główne składniki gazu ziemnego	73
2.4.2. Układy wielofazowe gazu ziemnego	73
2.4.3. Zanieczyszczenia gazu	74
2.4.4. Gaz zaazotowany	74
2.4.5. Gaz kwaśny i gaz ziemny zasiarczony	74
2.4.6. Klasyfikacja gazu ziemnego wg normy [1]	75
Literatura	78

Rozdział 3. Termodynamiczne podstawy gazownictwa – Stanisław Nagy, Witold Warowny **79**

3.1. Podstawy termodynamiki gazu ziemnego	79
3.1.1. Wstęp	79
3.2. Pierwsza i Druga Zasada Termodynamiki	80
3.3. Termiczne równanie stanu gazu pVT	83
3.4. Równanie stanu i przemiany charakterystyczne dla gazu doskonałego	84
3.4.1. Przemiana izotermiczna	86
3.4.2. Przemiana izobaryczna	87
3.4.3. Przemiana izochoryczna	87
3.4.4. Przemiana izentropowa	90
3.4.5. Przemiana politropowa	91
3.5. Równanie stanu gazu rzeczywistego	94
3.5.1. Równanie van der Waalsa (vdW)	96
3.5.2. Wirialne równanie stanu pVT	98
3.5.3. Równanie wirialne SGERG-88	100
3.5.4. Równanie stanu Beattie-Bridgmana (B-B)	103
3.5.5. Równanie stanu Redlicha Kwonga i równanie Soave Redlicha-Kwonga	104
3.5.6. Równanie stanu Penga-Robinsona	106
3.6. Własności układów wieloskładnikowych	108
3.7. Parametry związane z krzywą równowagi fazowej	110
3.7.1. Parametry krytyczne	110
3.7.2. Prężność pary nasyconej składników węglowodorowych	111
3.7.3. Czynniki acentryczny Pitzera	112
3.8. Współczynnik ściśliwości mieszaniny gazowej	113
3.8.1. Współczynnik ściśliwości gazu i względny współczynnik ściśliwości	113
3.8.2. Współczynnik sumacyjny gazu ziemnego	113

3.8.3. Współczynnik nadściśliwości (ang. <i>supercompressibility factor</i>)	114
3.9. Współczynnik fugatywności (lotności)	114
3.10. Zasada stanów odpowiadających sobie	116
3.10.1. Równanie stanu Lee-Keslera	117
3.10.2. Parametry zredukowane i pseudozredukowane	119
3.10.3. Równanie stanu Dranchuka Abou-Kassem	121
3.10.4. Klasyczny wykres Standinga, Katza	121
3.11. Gęstość gazu ziemnego i gęstość względna	121
3.11.1. Gęstość gazu	121
3.11.2. Gęstość względna gazu ziemnego	124
3.11.3. Współczynnik objętościowy gazu B_g	124
3.12. Współczynnik izentropy	125
3.12.1. Współczynnik izentropy dla gazu doskonałego	125
3.12.2. Współczynnik izentropy dla gazu ziemnego	126
3.13. Współczynnik izotermiczny ściśliwości	127
3.14. Współczynnik lepkości gazu	128
3.14.1. Współczynnik lepkości dynamicznej gazu ziemnego	128
3.14.2. Współczynnik lepkości kinematycznej	129
3.15. Równania Maxwella i inne zależności termodynamiczne	130
3.16. Równanie podstawowe i równanie Gibbsa-Duhema	131
3.17. Potencjał chemiczny i tego składnika	132
3.18. Funkcje rezydualne	133
3.19. Entropia gazu ziemnego	135
3.20. Entalpia gazu ziemnego	137
3.21. Energia wewnętrzna gazu ziemnego	139
3.22. Pojemność cieplna (ciepło właściwe) gazu ziemnego	139
3.23. Zjawisko dławienia izentalpowego	142
3.23.1. Różniczkowy współczynnik Joule'a-Thomsona	142
3.23.2. Całkowy efekt Joule'a-Thomsona	144
3.23.3. Krzywa inwersji zjawiska Joule'a-Thomsona	147
3.23.4. Korelacje empiryczne krzywej inwersji zjawiska Joule'a-Thomsona	148
3.24. Równowaga ciecza-para	150
3.24.1. Podstawy teoretyczne wyznaczania równowag fazowych	150
3.24.2. Stała równowagi fazowej	151
3.24.3. Równania bilansowe dla składników faz i udziałów obu faz	152
3.24.4. Wyznaczenie stałej równowagi układów rzeczywistych	155
3.24.5. Korelacje empiryczne wyznaczania równowag fazowych	155
3.24.6. Korelacje wyznaczania równowag fazowych w oparciu o równanie stanu	156
3.24.7. Algorytm wyznaczania równowagi fazowej ciecza-para dla ustalonych warunków ciśnienia i temperatury (<i>flash calculation</i>)	157
3.24.8. Metody obliczania składów równowagowych	158
3.25. Klasyfikacje termodynamiczne złóż węglowodorów	159
3.26. Para wodna w gazie	163
3.26.1. Wilgotność gazu	163
3.26.2. Ciśnienie gazu wilgotnego	164
3.26.3. Temperatura rosy pary wodnej	164
3.26.4. Wilgotność bezwzględna gazu	164
3.26.5. Wilgotność względna gazu	164
3.26.6. Stopień wilgoci	165
3.26.7. Molowy stopień wilgoci	165

3.26.8. Stała gazowa gazu wilgotnego	165
3.26.9. Gęstość gazu wilgotnego	165
3.26.10. Temperatura rosy pary wodnej w gazie ziemnym	166
3.26.11. Ciśnienie i gęstość pary wodnej nasyconej (prężność pary wodnej)	168
3.26.12. Zawartość wody w gazie ziemnym w funkcji temperatury i ciśnienia	169
3.27. Krzywa rosy węglowodorów (fazy węglowodorowej)	171
3.27.1. Ciśnienie pary nasyconej czystych składników węglowodorów (prężność)	171
3.27.2. Temperatura rosy węglowodorów (gazu kondensatowego i gazu gazolinowego) ..	171
3.27.3. Ciśnienie rosy fazy węglowodorowej układów gazowo-kondensatowych	173
3.28. Hydraty gazu ziemnego	174
3.28.1. Typy struktur hydratowych	175
3.28.2. Warunki do powstania hydratów	178
3.28.3. Wyznaczanie równowag hydratowych	179
3.29. Termochemia	183
3.29.1. Ciepło tworzenia	183
3.29.2. Prawo Hessa	185
3.29.3. Wartość opałowa i ciepło spalania	186
3.30. Liczba Wobbe'go	186
3.31. Spalanie gazu	187
3.31.1. Minimalne zapotrzebowanie tlenu i utleniacza	188
3.31.2. Zapotrzebowanie powietrza	189
3.31.3. Prędkość spalania	189
3.31.4. Temperatura spalania	190
3.31.5. Produkty spalania	190
3.32. Granice palności i granice wybuchowości	190
3.33. Temperatura zapłonu i samozapłonu	193
3.34. Termodynamika gazu ziemnego jako surowca	195
Literatura	198

Rozdział 4. Podstawy geologii naftowej i zasady poszukiwania złóż węglowodorów – Stanisław Szafran, Maria M. Szafran

4.1. Pojęcia podstawowe	201
4.2. Zarys geologii i geochemii naftowej	205
4.2.1. Geneza węglowodorów	206
4.2.2. Podstawowe warunki występowania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego w strefie basenu naftowego	207
4.2.3. Skąły macierzyste	210
4.2.3.1. Substancja organiczna w osadach	211
4.2.3.2. Ocena skał macierzystych	214
4.2.4. Warunki generowania węglowodorów	215
4.2.5. Produkty generowania węglowodorów	219
4.2.6. Skąły zbiornikowe	221
4.2.6.1. Typy petrograficzne skał osadowych	223
4.2.6.2. Porowatość	226
4.2.6.3. Przepuszczalność	232
4.2.7. Zbiorniki naturalne	235
4.2.8. Skąły uszczelniające	236
4.2.9. Migracja	237
4.2.9.1. Migracja pierwotna	238
4.2.9.2. Migracja wtórna	239

4.2.10. Pułapki	240
4.2.11. Złoża ropy naftowej i gazu ziemnego	243
4.2.12. Konwencjonalne i niekonwencjonalne złoża węglowodorów	250
4.2.12.1. Konwencjonalne złoża węglowodorów	250
4.2.12.2. Niekonwencjonalne złoża węglowodorów	252
4.2.12.3. Złoża gazu ziemnego w łupkach (ang. <i>shale gas</i>)	253
4.2.12.4. Złoża gazu ziemnego w skałach o niskiej przepuszczalności (ang. <i>tight gas</i>)	253
4.2.12.5. Złoża gazu ziemnego w pokładach węgla (ang. <i>coal-bed methane</i> – CBM lub <i>coal-bed natural gas</i> – CBNG)	254
4.2.12.6. Złoża gazu ziemnego w hydratách	255
4.2.13. Płyny złożowe	255
4.2.13.1. Węglowodory	257
4.2.13.2. Związki heteroorganiczne (NSO)	258
4.2.13.3. Biomarkery	258
4.2.13.4. Związki nieorganiczne	259
4.2.13.5. Skład izotopowy pierwiastków budujących ropę naftową i gaz ziemny	260
4.2.14. Charakterystyka gazu ziemnego	262
4.2.14.1. Gazy węglowodorowe	262
4.2.14.2. Niewęglowodorowe składniki gazu ziemnego	263
4.2.14.3. Hydraty gazowe	264
4.2.14.4. Kondensaty gazowe	264
4.2.15. Charakterystyka ropy naftowej	264
4.2.16. Bitumy naturalne	268
4.2.17. Wody złożowe	268
4.2.18. Parametry złożowe: temperatura i ciśnienie	272
4.2.18.1. Temperatura złoża	272
4.2.18.2. Ciśnienie w złożu ropy naftowej i gazu ziemnego	274
4.2.19. Systemy energetyczne złóż ropy naftowej i gazu ziemnego	276
4.2.19.1. Energia złożowa	277
4.2.19.2. System energetyczny złoża związany z rozpuszczonym gazem	277
4.2.19.3. System energetyczny złoża związany z energią gazu zawartego w czapie gazowej	278
4.2.19.4. System wodnonaporowy	278
4.2.19.5. System drenażu grawitacyjnego	278
4.2.19.6. Gospodarowanie energią złożową w czasie eksploatacji	279
4.2.19.7. Mechanizmy złożowe występujące w złożach gazowych	279
4.3. Poszukiwanie złóż ropy naftowej i gazu ziemnego	280
4.3.1. Metody poszukiwania złóż węglowodorów	281
4.3.1.1. Metody geologiczne	283
4.3.1.2. Metody geochemiczne	284
4.3.1.3. Metody geofizyczne	284
4.3.1.4. Metody sejsmiki refleksyjnej	285
4.3.1.5. Metody geofizyki wiertniczej	286
4.3.1.6. Metody wiertnicze	287
4.3.1.7. Klasyfikacja odwiertów naftowych	290
4.3.1.8. Metody analityczne	293
4.3.1.9. Rozpoznanie i opróbowanie złóż ropy naftowej i gazu ziemnego	295
4.3.2. Dokumentowanie prac geologicznych	296

4.3.2.1. Dokumentacja geologiczna złoża kopaliny	296
4.3.2.2. Klasyfikacja zasobów	297
4.3.2.3. Międzynarodowa ramowa klasyfikacja zasobów (UNFC)	299
4.3.2.4. Klasyfikacja zasobów złóż kopalin stałych CRIRSCO	300
4.3.2.5. Klasyfikacja zasobów złóż węglowodorów PRMS	302
4.3.2.6. Polska klasyfikacja zasobów złóż węglowodorów	307
4.3.2.7. Szacowanie zasobów złóż ropy naftowej i gazu ziemnego	311
4.3.3. Zasoby ropy naftowej i gazu ziemnego w Polsce	320
Literatura	325

Rozdział 5. Eksploatacja złóż gazu i przygotowanie gazu do transportu

– Stanisław Nagy, Czesław Rybicki, Czesława E. Ropa, Maria M. Szafran, Stanisław Szafran, Jacek Blicharski, Rafał Smulski **328**

5.1. Wprowadzenie – Stanisław Nagy	328
5.2. Podstawy eksploatacji złóż gazu ziemnego – Czesław Rybicki, Jacek Blicharski, Stanisław Nagy, Rafał Smulski	330
5.2.1. Model filtracji płynu w ośrodku porowatym	330
5.2.1.1. Równanie przepływu płynu w ośrodku porowatym	338
5.2.1.2. Rozwiązania równania przepływu płynu w ośrodku porowatym	339
5.2.2. Stany hydrodynamiczne złoża	340
5.2.2.1. Stan nieustalony	341
5.2.2.2. Stan semiustalony	343
5.2.2.3. Stan ustalony	348
5.2.3. Hydrodynamiczna niedoskonałość odwiertu	350
5.2.4. Równanie dopływu gazu rzeczywistego do odwiertu	354
5.2.5. Dopływ gazu do odwiertu poziomego (horyzontalnego)	356
5.2.6. Przepływy wielofazowe gaz-ciecz	360
5.2.6.1. Równania opisujące przepływ wielofazowy gaz-ropa/kondensat-woda	360
5.2.6.2. Modele opisujące przepływ wielofazowy gaz-ropa-woda	363
5.2.6.2.1. Równania ciągłości dla przepływu wielofazowego	363
5.2.6.2.2. Równania Darcyego dla przepływu wielofazowego	363
5.2.6.2.3. Ciśnienie kapilarne w przepływie wielofazowym	364
5.2.6.2.4. Nasycenia faz w ośrodku porowatym	364
5.2.6.2.5. Równania różniczkowe przepływu wielofazowego	364
5.2.6.2.6. Warunki brzegowe początkowe dla układów wielofazowych	365
5.2.6.3. Model przepływu układów gazowo-kondensatowych oraz lekkiej ropy naftowej	366
5.2.6.4. Istotne elementy termodynamiki w modelowaniu układów gazowo-kondensatowych	367
5.2.6.4.1. Własności pVT układów gazowo-kondensatowych	368
5.2.6.4.2. „Tunning” równania stanu pVT	368
5.2.6.5. Symulatory do modelowania przepływu gazu kondensatowego w złożu	368
5.2.7. Implementacje numeryczne matematycznych modeli przepływu płynu w ośrodku porowatym. Model jednofazowy	370
5.2.8. Przepływ dwufazowy gaz-woda w konwencjonalnych złożach gazu ziemnego	375
5.2.8.1. Wydajność krytyczna dopływu. Tworzenie się stożków wodnych	375
5.2.8.2. Wybrane analityczno-eksperymentalne modele opisujące tworzenie stożka wodnego przy przepływie gaz – woda	375
5.2.8.2.1. Model Dupuita	375
5.2.8.2.2. Model Scholsa	376

5.2.8.3.	Porównanie wybranych analityczno-eksperymentalnych modeli tworzenia stożków wodnych z modelem numerycznym	378
5.2.8.4.	Wpływ przepływu turbulentnego gazu w strefie przyodwiertowej na wydajność krytyczną	380
5.2.8.4.1.	Model przepływu turbulentnego wokół odwiertu	380
5.2.8.4.2.	Modyfikacja równań opisujących wydajności krytyczne	380
5.2.8.5.	Zmiana wykładnika wodnego w czasie eksploatacji złoża gazu	382
5.2.9.	Metody obliczania ilości wody dopływającej do strefy złoża	384
5.2.9.1.	Metoda van Everdingena i Hursta	384
5.2.9.1.1.	Przypadek okalającej złoża gazu warstwy wodonośnej (aquifer radialny)	384
5.2.9.1.2.	Przypadek podścielającej złoża gazu warstwy wodonośnej (aquifer podścielający)	388
5.2.9.1.3.	Przypadek warstwy wodonośnej napierającej z jednego kierunku (aquifer liniowy)	388
5.2.9.2.	Metoda Fetkovitcha	389
5.2.10.	Przepływ gazu w odwiercie	393
5.2.11.	Sposoby sterowania pracą odwiertów gazowych	398
5.2.12.	Wydobycie potencjalne i dozwolone	399
5.2.12.1.	Sterowanie wydajnością odwiertu	401
5.2.12.2.	Sterowanie ciśnieniem głowicowym dynamicznym	402
5.2.12.3.	System sprężarkowy eksploatacji złoża	402
5.2.12.4.	Metodyka obliczeń przebiegu eksploatacji	402
5.3.	Podstawy technologii wydobywania gazu ze złóż niekonwencjonalnych	403
– Stanisław Nagy		403
5.3.1.	Mechanizm transportu gazu w złożach niekonwencjonalnych w warstwach łupkowych	403
5.3.1.1.	Przepływ w szczelinach sztucznych i naturalnych	406
5.3.1.2.	Przepływ w makro i mezoporach	406
5.3.1.3.	Przepływ wg równania Darcyego	407
5.3.1.3.1.	Przepływ w mikroporach i ultra-mikroporach (nanoporach)	407
5.3.1.3.2.	Przepływ gazu z poślizgiem w ośrodku porowatym – liczba Knudsen	409
5.3.1.3.3.	Efekt Klinkenberga	410
5.3.1.3.4.	Dyfuzja molekularna	411
5.3.1.3.5.	Proces dyfuzji w warunkach złożowych	413
5.3.1.3.6.	Dyfuzja Knudsen	414
5.3.1.3.7.	Dyfuzja powierzchniowa	415
5.3.1.4.	Desorpcja/adsorpcja w skałach łupkowych	415
5.3.2.	Technologie wiercenia poziomych odwiertów	417
5.3.3.	Wielostopniowe szczelinowanie hydrauliczne	418
5.3.4.	Rozpoznanie geologiczne, ocena potencjału i schemat decyzyjny procesu technologii wydobywania	425
5.3.5.	Potencjalne zagrożenia dla środowiska towarzyszące technologii wydobywania gazu ziemnego ze złóż łupkowych	426
5.4.	Określenie zasobów gazu ziemnego w złożu w oparciu o metody inżynierii złożowej	430
– Stanisław Nagy, Czesław Rybicki		430
5.4.1.	Metoda objętościowa	431
5.4.2.	Metoda bilansu masowego	433
5.4.2.1.	Warunki stosowania metody	433

5.4.2.2. Sposoby obliczania średniego ciśnienia złożowego	438
5.4.2.3. Metody oszacowania dopływu wody do złoża na podstawie równania bilansu masowego	440
5.4.3. Określanie zasobów gazu w strefie drenażu otworu przy użyciu krzywych spadku wydajności	440
5.4.3.1. Klasyczne krzywe spadku wydajności wg Arpsa	440
5.4.3.1.1. Wykładniczy spadek wydajności wydobytego gazu (model eksponencyjny)	442
5.4.3.1.2. Harmoniczny spadek wydajności wydobytego gazu	444
5.4.3.1.3. Hiperboliczny spadek wydajności wydobytego gazu	445
5.4.3.1.4. Praktyczny algorytm dopasowania parametrów hiperbolicznego spadku wydobycia	447
5.4.3.2. Określenie zasobów gazu ziemnego w złożach niekonwencjonalnych	449
5.4.3.2.1. Model hiperboliczny	454
5.4.3.2.2. Model Maleya	455
5.4.3.2.3. Model potęgowo-wykładniczy	456
5.4.3.2.4. Krzywa Boulisa	456
5.4.3.2.5. Model rozciągniętej funkcji wykładniczej	457
5.4.3.2.6. Model Duonga	457
5.4.3.2.7. Metoda krzywych spadku w oparciu o przepływ liniowy	458
5.4.3.2.8. Rekomendacje	460
5.4.4. Modelowanie procesu eksploatacji złóż gazu ziemnego	461
5.4.4.1. Klasyczne modele numeryczne przepływów w złożach gazu ziemnego	461
5.4.4.2. Modelowanie eksploatacji złóż niekonwencjonalnych	464
5.5. Zagospodarowanie złóż gazu ziemnego – <i>Maria M. Szafran, Stanisław Szafran</i>	467
5.5.1. Plan zagospodarowania złoża	468
5.5.2. Projektowanie eksploatacji złoża gazu ziemnego	471
5.5.3. Odwiert gazowy	472
5.5.4. Wyposażenie wgłębne gazowego odwiertu eksploatacyjnego	475
5.5.5. Udostępnianie złóż gazu ziemnego	484
5.5.6. Napowierzchniowe wyposażenie gazowego odwiertu eksploatacyjnego	486
5.5.6.1. Wieżby rurowe	486
5.5.6.2. Głowice eksploatacyjne odwiertów gazowych	488
5.5.7. Napowierzchniowy ośrodek zbioru gazu	490
5.5.7.1. Separatory	492
5.5.7.2. Odcinek pomiarowy	497
5.5.8. Kopalnie gazu ziemnego	497
5.5.8.1. Koncepcja i projekt bazowy budowy kopalni gazu ziemnego	499
5.5.8.2. Siatka odwiertów i systemy zbioru gazu	500
5.6. Elementy testowania odwiertów – <i>Stanisław Nagy, Czesław Rybicki</i>	504
5.6.1. Cele testowania odwiertów gazowych	504
5.6.2. Testy odwiertowe	506
5.6.2.1. Klasyczny test wielocyklowy	506
5.6.2.2. Klasyczny test izochronalny	509
5.6.2.3. Zmodyfikowany test izochronalny	511
5.6.3. Testy złożowe	512
5.6.3.1. Modele interpretacyjne testów hydrodynamicznych	513
5.6.3.1.1. Model złoża jednorodnego	514
5.6.3.1.2. Model złoża o podwójnej porowatości	514
5.6.3.1.3. Model złoża o podwójnej przepuszczalności	515

5.6.3.2. Charakterystyka dopływu gazu do odwiertu	515
5.6.3.2.1. Charakterystyka radialnego dopływu gazu do odwiertu	516
5.6.3.2.2. Charakterystyka liniowego dopływu gazu do odwiertu	516
5.6.3.2.3. Charakterystyka podwójnie liniowego dopływu gazu do odwiertu	517
5.6.4. Test odbudowy ciśnienia	517
5.6.4.1. Podstawowa interpretacja wyników testu odbudowy ciśnienia	518
5.6.4.2. Zaawansowana metodyka interpretacji testu odbudowy ciśnienia	522
5.6.4.2.1. Krzywe diagnostyczne dla odwiertów pionowych i poziomych	523
5.6.4.2.2. Krzywe diagnostyczne dla odwiertów poziomych	524
5.6.4.2.3. Pojemność magazynowa odwiertu	524
5.6.4.2.4. Stopień zeszcelinowania strefy przyodwiertowej	526
5.6.4.2.5. Złoże jednorodne	528
5.6.4.2.6. Złoże o podwójnej porowatości	529
5.6.4.2.7. Detekcja granicy złoży	530
5.6.4.2.8. Złoże z uskokiem nieprzepuszczalnym	531
5.6.5. Oprogramowanie wspierające proces interpretacji testów złożowych	531
5.7. Procesy oczyszczania i rozdzielania gazu ziemnego – <i>Czesława Ewa Ropa</i>	532
5.7.1. Jakość gazu dostarczanego odbiorcom	533
5.7.2. Separacja gazu	535
5.7.3. Usuwanie rtęci z gazu ziemnego	539
5.7.4. Odsiarczanie gazu ziemnego	541
5.7.4.1. Charakterystyka odsiarczania gazu metodami absorpcji chemicznej	543
5.7.4.1.1. Proces aminowy	543
5.7.4.1.2. Proces Econamine (DGA)	545
5.7.4.2. Usuwanie składników kwaśnych metodą absorpcji fizycznej	546
5.7.4.2.1. Proces Fluor-Solvent	546
5.7.4.2.2. Proces Rectisol	547
5.7.4.2.3. Proces Sulfinol	548
5.7.4.3. Odsiarczanie gazu ziemnego w procesie absorpcyjno-utleniającym	549
5.7.4.3.1. Proces Stredford	549
5.7.4.3.2. Proces chelatowy LO – CAT	550
5.7.4.4. Podsumowanie technologii	552
5.7.4.5. Proces Superclaus-99	554
5.7.4.6. Proces Superclaus-99,5	554
5.7.5. Osuszanie gazu ziemnego	555
5.7.5.1. Absorpcyjne osuszanie gazu w instalacjach kolumnowych	558
5.7.5.2. Osuszanie gazu metodą adsorpcyjną	560
5.7.5.3. Osuszanie gazu metodą chłodzenia	561
5.7.6. Odgazolinowanie gazu ziemnego	562
5.7.6.1. Niskotemperaturowa metoda odgazolinowania gazu	564
5.7.6.2. Odgazolinowanie gazu metodami adsorpcyjnymi	566
5.7.7. Odazotowanie gazu ziemnego metodą niskotemperaturowej rektyfikacji	567
5.7.8. Charakterystyka sorbentów stałych stosowanych w procesach oczyszczania gazu ziemnego	570
Literatura	572

Rozdział 6. Badanie paliw gazowych – Rafał Smulski, Czesława E. Ropa, Mariusz Łaciak, Andrzej Barczyński	585
6.1. Badanie właściwości i składu paliw gazowych – <i>Rafał Smulski</i>	585
6.1.1. Wprowadzenie	585
6.1.2. Oznaczanie zawartości składników palnych, niepalnych i związków toksycznych	587
6.1.3. Oznaczanie właściwości paliw gazowych	588
6.2. Badanie stopnia nawonienia gazu ziemnego – <i>Czesława E. Ropa</i>	589
6.2.1. Charakterystyka odorantów	590
6.2.2. Systemy nawaniania i urządzenia dozujące	592
6.2.3. Dawka odorantu	598
6.2.4. Kontrola stopnia nawonienia gazu ziemnego	599
6.3. Zamiennosc gazów – <i>Andrzej Barczyński, Mariusz Łaciak</i>	602
6.3.1. Wprowadzenie	602
6.3.2. Sposoby określania wymiennosci gazów	606
6.3.3. Zamiennosc gazów w piecach przemysłowych	610
Literatura	611
Rozdział 7. Transport i magazynowanie gazu ziemnego – Czesław Rybicki, Jacek Blicharski, Władysław Duliński, Jarosław Ślizowski, Jan Marszałek	613
7.1. Wstęp	613
7.2. Podstawy teoretyczne przepływu płynów w rurociągach	613
7.2.1. Rodzaje przepływów rurociągach	613
7.2.1.1. Przepływ laminarny	615
7.2.1.2. Obszar przepływu przejściowego	619
7.2.1.3. Przepływy turbulentne	619
7.2.2. Opory przepływu w rurociągach dla płynów z założenia nieściśliwych	621
7.2.3. Współczynnik liniowego oporu przepływu	624
7.2.3.1. Strefy przepływu	626
7.2.3.2. Chropowatość rurociągów	630
7.2.4. Współczynnik oporu miejscowego ξ	632
7.2.4.1. Opory spawów	634
7.2.4.2. Opory węzłów	634
7.2.4.3. Opory w gwałtownych rozszerzeniach rurociągów	634
7.2.4.4. Opory w gwałtownych przewężeniach rurociągów	636
7.2.4.5. Opory na łagodnym rozszerzeniu przekroju rurociągu	637
7.2.4.6. Opory na łagodnym zwężeniu przekroju rurociągu	638
7.2.4.7. Opory przepływów na łukach (kolankach)	638
7.2.4.8. Opory przepływów w trójkach	640
7.2.4.9. Opory przepływów w urządzeniach dławiących	641
7.2.5. Przepływ gazu w rurociągach niskiego ciśnienia	642
7.2.6. Przepływ płynów ściśliwych w rurociągach średniego i wysokiego ciśnienia	645
7.3. Przegląd równań do obliczania przepływów gazu w rurociągach rzeczywistych	648
7.3.1. Równania stosowane do obliczania przepływu gazu w rurociągach	649
7.3.1.1. Równanie Panhandle'a 1	649
7.3.1.2. Równanie Panhandle'a 2	650
7.3.1.3. Równanie Renouarda	651
7.3.1.4. Równanie Waldena 1	651
7.3.1.5. Równanie Waldena 2	652

7.3.1.6.	Równanie Instytutu Technologii Gazu (USA)	652
7.3.1.7.	Równanie WNIIGAZ 1	653
7.3.1.8.	Równanie WNIIGAZ 2	653
7.3.1.9.	Równanie Weymoutha	653
7.3.1.10.	Równanie Chodanowicza	654
7.3.1.11.	Równanie Odelskiego	654
7.3.1.12.	Równanie Krajowej Dyspozycji Gazem	655
7.3.2.	Wyznaczenie krzywej zmian ciśnienia wzdłuż gazociągu dalekosiężnego	655
7.3.2.1.	Średnie ciśnienie gazociągu	658
7.4.	Magazynowanie gazu ziemnego	659
7.5.	Rodzaje magazynów gazu	662
7.5.1.	Gazociąg wysokoprężny jako magazyn gazu	663
7.5.2.	Magazynowanie gazu w zbiornikach naziemnych	665
7.5.3.	Magazynowanie gazu w szcerpanych złożach gazu ziemnego	667
7.5.3.1.	Wybór struktury na podziemny magazyn gazu ziemnego	667
7.5.3.2.	Charakterystyka pracy podziemnego magazynu gazu w szcerpanym złożu gazu ziemnego	669
7.5.3.3.	Elementy projektowania PMG z użyciem równań bilansu masowego	674
7.5.4.	Magazynowanie gazu ziemnego w kawernach solnych	678
7.5.4.1.	Warunki geologiczne dla budowy kawernowych magazynów gazu	678
7.5.4.2.	Rodzaje złóż soli	679
7.5.4.3.	Właściwości soli kamiennej	679
7.5.4.4.	Wielkość złoża soli, jego miąższość i głębokość zalegania	680
7.5.4.5.	Zasady projektowania komór magazynowych	682
7.5.4.6.	Projektowanie otworu magazynowego	682
7.5.4.7.	Uzbrojenie eksploatacyjne odwiertu magazynowego	688
7.5.4.8.	Testy szczelności gotowej komory magazynowej	689
7.5.4.9.	Eksploatacja komór magazynowych	691
7.5.4.10.	Okresowe badania stanu komory i odwiertu	691
7.5.4.11.	Konwergencja i sposoby zapobiegania jej skutkom	693
7.5.4.12.	Kawernowe magazyny gazu ziemnego w kraju	694
7.5.4.13.	Nowe kierunki w budowie komór solnych dla magazynowania gazu	695
7.5.4.14.	Potencjalne zdolności magazynowania w wydajach solnych w Polsce	697
7.5.4.15.	Potencjalne zdolności magazynowania w pokładach soli	708
7.5.5.	Magazynowanie w warstwach wodonośnych	710
7.5.5.1.	Uwarunkowania geologiczno-złożowe struktur zawodnionych	711
7.5.5.2.	Szacowanie położenia konturu gaz-woda	715
7.5.5.3.	Rozpoznanie geologiczne potencjalnych warstw wodonośnych	716
7.5.5.4.	Elementy rozpoznania hydrodynamicznego warstw wodonośnych na potrzeby magazynowania gazu	720
7.5.5.5.	Lokalizacja i własności potencjalnych struktur wodonośnych przeznaczonych na magazyny gazu	721
7.5.5.6.	Systemy monitorowania magazynów w warstwach wodonośnych	724
7.5.5.7.	Monitoring górnych warstw wodonośnych	726
7.5.6.	Magazynowanie gazu w wyeksploatowanych kopalniach i kawernach skalnych	730
7.5.6.1.	Stopień szczelności wyrobisk górniczych	731
7.5.6.2.	Proces konwersji kopalni węgla na podziemny magazyn gazu	733
7.5.6.3.	Polskie doświadczenia w magazynowaniu gazu ziemnego w wyeksploatowanych kopalniach węgla	736

7.6. Magazyny gazu ziemnego w Polsce	737
7.6.1. PMG Brzeźnica	739
7.6.2. PMG Swarzów	739
7.6.3. PMG Husów	740
7.6.4. PMG Strachocina	740
7.6.5. PMG Wierzchowice	741
7.6.6. PMG Daszewo	741
7.6.7. PMG Bonikowo	742
7.6.8. KPMG Mogilno	742
7.6.9. KPMG Kosakowo	743
Literatura	743

Rozdział 8. Technologia skroplonego gazu ziemnego (LNG)

– Mariusz Łaciak, Stanisław Trzop, Marcin Szczepanek, Józef Szmigielski 747

8.1. Przepisy, akty prawne i normy, mające zastosowanie przy budowie i eksploatacji terminala LNG	747
8.2. Własności fizykochemiczne gazów skroplonych	748
8.2.1. Wprowadzenie	748
8.2.2. Własności fizykochemiczne LNG	748
8.2.3. Podstawowe parametry LNG	749
8.3. Przetwarzanie i skraplanie gazu ziemnego	750
8.3.1. Podstawy termodynamiczne instalacji skraplania gazów	750
8.3.1.1. Obieg Carnota	750
8.3.1.2. Obieg Stirlinga	752
8.3.1.4. Obieg Claudea	752
8.3.2. Przygotowanie gazu ziemnego do przeróbki kriogenicznej	753
8.3.3. Metody skraplania gazu ziemnego	754
8.3.3.1. Klasyczny cykl kaskadowy	754
8.3.3.2. Cykl kaskadowy z mieszanym czynnikiem chłodzącym	755
8.3.3.3. Cykl rozprężania z zastosowaniem turboekspandera	756
8.3.3.4. Inne metody skraplania gazu ziemnego	757
8.3.4. Kryteria wyboru technologii LNG	765
8.4. Zbiorniki magazynowe LNG	766
8.4.1. Konstrukcja zbiorników magazynowych dla LNG	766
8.4.2. Spawanie zbiorników magazynowych LNG	770
8.4.3. Kontrola jakości wykonania zbiorników magazynowych LNG	771
8.4.4. Oddanie zbiornika do eksploatacji	773
8.4.5. Załącznik – Poradnik LNG – zbiorniki skroplonego gazu ziemnego	774
8.5. Transport LNG drogą morską	785
8.5.1. Budowa gazowców LNG	786
8.5.1.1. Budowa okrętowych zbiorników ładunkowych	788
8.5.2. Statki ze zbiornikami membranowymi	790
8.5.3. Systemy zbiorników membranowych No 96	790
8.5.4. Statki ze zbiornikami typu MOSS	792
8.5.5. Systemy zbiorników membranowych MARK III	793
8.5.6. Pryzmatyczne zbiorniki IHI – SPB	793
8.5.7. Pływające magazyny LNG wyposażone w instalację do regazyfikacji – FSRU	795
8.5.8. Statki LNG z regazyfikacją (LNGRV)	796
8.5.9. Napędy stosowane na zbiornikowcach LNG	797

8.5.9.1.	Siłownie zasilane gazem	798
8.5.9.2.	Napędy turboparowe	800
8.5.9.3.	Napędy turbospalinowe	800
8.5.9.4.	Napędy z tłokowymi silnikami spalinowymi	802
8.5.9.5.	Napędy elektryczne	803
8.5.9.6.	Napęd kombinowany	803
8.5.9.7.	Ochrona środowiska	804
8.5.10.	Operacje przeprowadzane na gazowcach	804
8.5.11.	Systemy skraplania BOG zainstalowane na statkach	809
8.5.11.1.	System firmy Cryostar EcoRel –S	809
8.5.11.2.	Systemy firmy Hamworthy: MARK I	811
8.5.11.3.	Systemy firmy Hamworthy MARK III	812
8.6.	Transort lądowy LNG	814
8.6.1.	Wprowadzenie	814
8.6.2.	Wymagania techniczne zbiorników na skroplony gaz ziemny	816
8.6.3.	Satelitarne systemy regazyfikacji	818
8.7.	Budowa terminali LNG	818
8.7.1.	Plan zagospodarowania terminala importowego	818
8.7.1.1.	Wprowadzenie	818
8.7.1.2.	Zagospodarowanie terenu terminala LNG	819
8.7.1.3.	Wstępny bilans zapotrzebowania na media energetyczne i gospodarkę socjalno-bytową	825
8.7.1.4.	Ochrona środowiska i informacja o bezpieczeństwie	826
8.7.1.5.	Rodzaje i przewidywana ilość wprowadzanych do środowiska substancji lub energii przy zastosowaniu rozwiązań chroniących środowisko	827
8.7.1.6.	Możliwe transgraniczne oddziaływanie na środowisko	828
8.8.	Eksploatacja terminali rozładunkowych LNG	828
8.8.1.	Wprowadzenie	828
8.8.2.	Technologia przeładunku	830
8.8.2.1.	Technika wyładunku	830
8.8.3.	Regazyfikacja LNG	831
8.8.4.	Procesy eksploatacyjne na terminalu LNG	833
8.8.4.1.	Oczyszczanie instalacji LNG – azotem	833
8.8.4.2.	Proces schładzania rurociągów i zbiorników	834
8.8.4.3.	Wprowadzenie LNG do rurociągów procesowych i zbiornika	835
8.8.4.4.	Stabilizacja gazu ziemnego po regazyfikacji	835
8.8.4.5.	Gospodarka oparami LNG	836
8.8.4.6.	Zasady bezpieczeństwa przy eksploatacji rurociągów	837
8.9.	Zarządzanie bezpieczną eksploatacją terminali LNG	838
8.9.1.	Wprowadzenie	838
8.9.2.	Poziomy zabezpieczeń w procesach LNG	838
8.9.3.	Własności i potencjalne zagrożenia ze strony LNG	840
8.9.3.1.	Własności LNG	840
8.9.3.2.	Rodzaje zagrożeń związanych bezpośrednio z LNG	841
8.9.3.3.	Rozwarstwienie skroplonego gazu ziemnego w zbiorniku	846
8.9.3.4.	Gwałtowne odparowywanie LNG	848
8.9.4.	Uderzenie hydrauliczne	854
8.9.5.	Oddziaływanie LNG na środowisko	855

8.10. AKPiA – aparatura kontrolna, pomiarowa i automatyka	856
8.10.1. Telemechaniczne systemy zabezpieczania terminali LNG – współpraca systemów telemechanicznych z aparaturą kontrolno-pomiarową i automatyką systemów	856
8.10.1.1. Wstęp	856
8.10.1.2. Architektura systemu PCS	857
8.10.1.3. Właściwości systemu PCS	858
8.10.1.4. Standardy stosowane przy programowaniu systemów automatyki ...	859
8.10.1.5. Szablon systemu PCS i biblioteka programistyczna systemu	859
8.10.1.6. Programowanie aplikacji – matryca systemu PCS	861
8.10.1.7. Zasada funkcjonowania podsystemów w systemie PCS/FDS (ang. FDS – <i>Functional Design Specification</i>)	861
8.10.1.8. Podsystemy SIS i F&G/ZSZBP	861
8.10.2. Kryteria projektowe dla systemu automatyki i inne wymagania	862
8.10.2.1. Programowanie systemu PCS	862
8.10.2.2. System sterowania procesem PCS – cel stosowania systemu	863
8.10.3. Zakres działania systemu PCS	864
8.10.4. Strategia sterowania instalacją terminala LNG przy wykorzystaniu systemu PCS	865
8.10.5. Architektura systemu sterowania terminalem LNG	865
8.10.5.1. Rozproszony system sterowania DCS	866
8.10.6. System bezpieczeństwa SIS	866
8.10.7. System detekcji wycieku gazu i pożaru (F&G) oraz zintegrowany system zarządzania bezpieczeństwem pożarowym (ZSZBP)	868
8.10.8. Systemy analizujące	869
8.10.9. Systemy pomiarowo-rozliczeniowe AKPiA (ang. <i>Custody Transfer Metering System</i>)	869
8.10.10. Oprzyrządowanie zbiornika (ang. <i>Tank Gauging System</i>)	869
8.10.11. System monitoringu drgań (ang. <i>Vibration Monitoring System</i>)	870
8.10.12. System AKPiA dla części morskiej (ang. <i>Marine Instrumentation System</i>)	870
8.10.13. System sterowania sprężarkami gazu (kompresorami)	870
8.10.14. System sterowania urządzeniami modułowymi	871
8.10.15. Funkcjonalność systemu sterowania	871
8.10.16. Zasilanie terminali LNG	872
8.10.17. Systemy energetyczne nadzoru, sterowania i monitorowania terminala LNG ...	874
8.10.17.1. Automatyka stacyjna	875
8.10.17.2. Bramka komunikacyjna (ang. <i>Gateway</i>)	875
8.10.18. Zdalne sterowanie	879
Literatura	879
Wykaz aktów prawnych	881
Wykaz dyrektyw i aktów prawnych wdrażających postanowienia tych dyrektyw	884
Wykaz Norm	886
Skorowidz	916