

Andrzej Hałas  
em. prof. Politechniki Wrocławskiej

## TECHNIKA PRÓŻNI

### SPIS TREŚCI

#### CZĘŚĆ I

#### FIZYCZNE PODSTAWY TECHNIKI PRÓŻNI

#### 1. WŁASNOŚCI GAZÓW ROZRZEDZONYCH

1.1. Podstawowe pojęcia i definicje .....	1
1.1.1. Próżnia .....	1
1.1.2. Cząsteczka (molekuła) .....	2
1.1.3. Gazy i pary .....	3
1.1.4. Ciśnienie gazu .....	4
1.1.5. Koncentracja gazu .....	4
1.1.6. Temperatura gazu .....	5
1.1.7. Ilość gazu .....	5
1.1.8. Atmosfera ziemska .....	6
1.2. Gazy doskonałe .....	8
1.2.1. Gęstość strumienia cząsteczek .....	8
1.2.2. Ciśnienie wywierane przez gaz na ścianki naczynia .....	11
1.2.3. Prawa kinetycznej teorii gazów .....	13
1.2.4. Zasada ekwipartycji energii .....	15
1.2.5. Ciepło właściwe gazów .....	16
1.2.6. Przemiany gazu doskonałego .....	20
1.2.7. Propagacja fal w gazie doskonałym .....	22
1.3. Gazy rzeczywiste .....	23
1.3.1. Oddziaływania międzycząsteczkowe .....	23
1.3.2. Objętość własna gazu .....	28
1.3.3. Równanie stanu gazów rzeczywistych .....	29
1.3.4. Parametry krytyczne .....	33
1.3.5. Efekt Joula-Thomsona .....	34
1.4. Zderzenia między cząsteczkami gazu .....	37
1.4.1. Zderzenia sprężyste i niesprężyste .....	37
1.4.2. Rozkład prędkości i energii kinetycznych cząsteczek gazu. Statystyka Maxwella-Boltzmana .....	40
1.4.3. Rozkład prędkości i energii kinetycznych cząsteczek w strumieniu gazu padającym na powierzchnię ścianki naczynia .....	47
1.4.4. Rozkład kątowny cząsteczek padających na ściankę naczynia .....	48
1.4.5. Średnia droga swobodna cząsteczek. Częstotliwość zderzeń .....	50
1.4.6. Rozkład dróg swobodnych .....	57
1.5. Zjawiska transportu w gazach .....	59
1.5.1. Równanie transportu .....	59

## II

1.5.2. Transport pędu – lepkość gazu .....	62
1.5.3. Transport energii – przewodnictwo cieplne gazu .....	66
1.5.4. Dyfuzja gazu .....	71
1.5.5. Dyfuzja cieplna .....	75
1.6. Jonizacja gazu. ....	76
1.6.1. Procesy elementarne. ....	76
1.6.2. Prędkość i masa elektronu. ....	80
1.6.3. Jonizacja zderzeniowa. ....	82
1.6.4. Powielanie elektronów w polu elektrycznym. ....	86
1.6.5. Wyładowania elektryczne w gazach. ....	89

## 2. ODDZIAŁYWANIE GAZU Z CIAŁEM STAŁYM.

2.1. Adsorpcja i desorpcja gazu. ....	98
2.1.1. Adsorpcja fizyczna gazu. ....	98
2.1.2. Adsorpcja chemiczna gazu. ....	101
2.1.3. Średni czas adsorpcji. ....	103
2.1.4. Współczynnik zapełnienia powierzchni. ....	104
2.1.5. Współczynnik przyłgnięcia. ....	106
2.1.6. Adsorpcja warstwy monomolekularnej. Izotermy adsorpcji. ....	110
2.1.7. Adsorpcja wielowarstwowa. ....	114
2.1.8. Migracja zaadsorbowanych atomów i cząsteczek gazu. ....	119
2.1.9. Szybkość desorpcji. ....	121
2.1.10. Czas tworzenia się warstwy monomolekularnej. ....	122
2.2. Parowanie i kondensacja. ....	124
2.2.1. Ciśnienie pary nasyconej. ....	124
2.2.2. Szybkość parowania. ....	127
2.2.3. Parowanie roztworów i stopów. ....	128
2.2.4. Absorpcja i przenikanie gazów przez ciała stałe. ....	129

## 3. PRZEPIY W GAZU PRZEZ OTWORY I PRZEWODY

3.1. Ogólne prawa przepływu. ....	142
3.2. Przepływ lepki gazu. ....	145
3.2.1. Przepływ gazu przez przesłonę. ....	145
3.2.2. Przepływ gazu przez przewody. ....	151
3.3. Przepływ gazu w zakresie pośrednim. ....	157
3.3.1. Przepływ gazu przez przewód o przekroju kołowym. ....	157
3.3.2. Kryteria oceny przepływu gazu. ....	160
3.4. Przepływ molekularny gazu. ....	163
3.4.1. Przepływ gazu przez przesłonę. ....	163
3.4.2. Przepływ gazu przez przewody. ....	164

### III

3.4.3. Obliczanie przewodności niektórych podzespołów próżniowych. ....	170
3.4.3.1. Połączenie szeregowo przewodów. ....	170
3.4.3.2. Przewód wygięty. ....	171
3.4.3.3. Przewód o zmiennym przekroju. ....	172
3.4.3.4. Odrzutnik typu „chevron” z płaskimi przegrodami. ....	175
3.4.3.5. Odrzutnik z cylindrycznymi przegrodami. ....	177
3.4.4. Obliczanie przewodności metodą Monte Carlo. ....	179
3.4.5. Niepewność wyników obliczeń. ....	184

## 4. PROCES POMPOWANIA

4.1. Czas odpompowania zbiornika. ....	187
4.1.1. Czas odpompowania zbiornika do próżni wstępnej. ....	187
4.1.2. Czas odpompowania zbiornika do wysokiej próżni. ....	190
4.1.2.1. Wpływ nieszczelności rzeczywistej. ....	190
4.1.2.2. Wpływ nieszczelności pozornej związanej z desorpcją gazu. ....	192
4.1.2.3. Wpływ nieszczelności pozornej związanej z dyfuzją gazu. ....	195
4.1.2.4. Wpływ nieszczelności pozornych związanych z występowaniem mikroporów i przestrzeni zamkniętych. ....	199
4.1.2.5. Wpływ nieszczelności w ujęciu empirycznym. ....	201
4.1.3. Metody skrócenia czasu uzyskiwania wysokiej próżni. ....	202
4.1.3.1. Wygrzewanie pompowanego zbiornika. ....	202
4.1.3.2. Zapowietrzanie zbiornika suchym azotem. ....	205
4.2. Zabiegi warunkujące uzyskanie bardzo wysokich próżni. ....	207
4.2.1. Formowanie wewnętrznych powierzchni w aparaturze próżniowej. ....	207
4.2.2. Mycie aparatury próżniowej. ....	212

## CZĘŚĆ II METODY WYTWARZANIA I POMIARU PRÓŻNI

5. HISTORIA TECHNIKI PRÓŻNIOWEJ	219
6. WYTWARZANIE PRÓŻNI	237
6.1. Podział pomp próżniowych. ....	237
6.2. Pompy objętościowe olejowe. ....	238
6.2.1. Zasada działania pomp objętościowych. ....	238
6.2.2. Olejowe pompy rotacyjne. ....	240
6.2.3. Pompowanie par łatwo ulegających kondensacji. ....	248
6.2.4. Rozwiązania konstrukcyjne olejowych pomp objętościowych. ....	253
6.2.5. Eksploatacja olejowych pomp objętościowych. ....	257
6.3. Pompy bezolejowe – „suche”. ....	260
6.3.1. Pompy Rootsa. ....	261
6.3.1.1. Zasada działania pomp Rootsa. ....	261
6.3.1.2. Parametry i charakterystyki pomp Rootsa. ....	263
6.3.1.3. Pompy Rootsa współpracujące z pompami próżni wstępnej. ....	266

6.3.1.4. Pompy Roots'a jako pompy suche. ....	270
6.3.2. Pompy pazurowe. ....	271
6.3.3. Pompy tłokowe. ....	274
6.3.4. Pompy membranowe. ....	277
6.3.5. Pompy śrubowe. ....	279
6.3.6. Pompy spiralne. ....	283
6.3.7. Pompy z pierścieniem wodnym. ....	287
6.4. Pompy molekularne i turbomolekularne. ....	290
6.4.1. Pompy molekularne. ....	290
6.4.1.1. Zasada działania pomp molekularnych. ....	290
6.4.1.3. Budowa i parametry pomp molekularnych. ....	295
6.4.2. Pompy turbomolekularne. ....	299
6.4.2.1. Zasada działania pomp turbomolekularnych. ....	299
6.4.2.2. Budowa pomp turbomolekularnych. ....	305
6.4.2.3. Charakterystyki i parametry pomp turbomolekularnych. ....	313
6.4.3. Mechaniczne pompy hybrydowe. ....	315
6.4.3.1. Pompa molekularna zintegrowana z pompą regeneracyjną. ....	316
6.4.3.2. Pompa turbomolekularna zintegrowana z pompą molekularną. ....	318
6.5. Pompy strumieniowe. ....	321
6.5.1. Strumieniowe pompy wodne. ....	321
6.5.2. Strumieniowe pompy parowe. ....	325
6.5.3. Pompy strumieniowe zasilane sprężonym powietrzem. ....	331
6.5.4. Pompy dyfuzyjne. ....	333
6.5.4.1. Zasada działania pomp dyfuzyjnych. ....	333
6.5.4.2. Teoria pomp dyfuzyjnych. ....	335
6.5.4.3. Charakterystyki pomp dyfuzyjnych. ....	339
6.5.4.4. Właściwości olejów stosowanych w pompach dyfuzyjnych. ....	344
6.5.4.5. Budowa pomp dyfuzyjnych. ....	346
6.5.4.6. Strumień wsteczny par oleju. ....	350
6.5.4.7. Dobór pompy próżni wstępnej. ....	352
6.5.4.8. Eksploatacja pomp dyfuzyjnych. ....	354
6.6. Pompy sorpcyjne. ....	356
6.6.1. Pompy adsorpcyjne. ....	356
6.6.1.1. Sorbenty stosowane w pompach sorpcyjnych. ....	356
6.6.1.2. Pompy zeolitowe. ....	363
6.6.2. Pompy kriosorpcyjne. ....	365
6.6.2.1. Mechanizmy pompowania gazów w niskich temperaturach. ....	365
6.6.2.2. Zasada działania chłodziarek helowych. ....	368
6.6.2.3. Kondensator pompy kriosorpcyjnej. ....	378
6.6.2.4. Budowa pomp kriosorpcyjnych. ....	385
6.6.2.5. Parametry pomp kriosorpcyjnych. ....	389
6.6.3. Pompy z pochłaniaczami litymi. Pompy geterujące. ....	396
6.6.3.1. Pochłaniacze lite – NEG's. ....	396
6.6.3.2. Budowa i parametry pomp geterujących. ....	403
6.6.3.3. Niekonwencjonalne zastosowania pochłaniaczy litych. ....	406
6.6.4. Pompy sublimacyjne. ....	414
6.6.4.1. Zasada działania pomp sublimacyjnych. ....	414

6.6.4.2. Budowa i eksploatacja pomp sublimacyjnych. ....	419
6.6.5. Pompy jonowosorpcyjne. ....	422
6.6.5.1. Zasada działania pomp jonowosorpcyjnych. ....	422
6.6.5.2. Mechanizmy pompowania gazów atmosferycznych. ....	425
6.6.5.3. Pompy diodowe. ....	428
6.6.5.4. Pompy triodowe. ....	435
6.6.5.5. Parametry i eksploatacja pomp jonowosorpcyjnych. ....	438
6.6.6. Porównanie pomp wysokiej próżni. ....	446
7. POMIARY CIŚNIEŃ CAŁKOWITYCH – PRÓŻNIOMIERZE	452
7.1. Ogólna charakterystyka próżniomierzy	452
7.2. Próżniomierze mechaniczne	457
7.2.1. Próżniomierze tłokowe	457
7.2.2. Próżniomierze rurkowe Bourdon'a	463
7.2.3. Próżniomierze membranowe	466
7.2.3.1. Próżniomierze z odczytem wskazówkowym	466
7.2.3.2. Próżniomierze pojemnościowe	469
7.3. Próżniomierze hydrostatyczne i kompresyjne	475
7.3.1. Próżniomierze hydrostatyczne	475
7.3.2. Próżniomierze kompresyjne	479
7.4. Próżniomierze cieploprzewodnościowe i konwekcyjne	484
7.4.1. Zasada działania	484
7.4.2. Próżniomierze oporowe (Piraniego)	488
7.4.3. Próżniomierze termoelektryczne	495
7.4.3.1. Efekt termoelektryczny. Termopary.	495
7.4.3.2. Próżniomierze termoelektryczne w wykonaniu klasycznym	497
7.4.3.3. Próżniomierze konwekcyjne	499
7.5. Próżniomierze lepkościowy (tłumieniowy) z wirującą kulką	502
7.6. Próżniomierze jonizacyjne (jonowe) z gorącymi katodami	511
7.6.1. Zasada działania	511
7.6.2. Klasyczna głowica triodowa	514
7.6.3. Dolna granica zakresu pomiarowego	519
7.6.3.1. Zjawiska determinujące dolną granicę zakresu pomiarowego	519
7.6.3.2. Głowice charakteryzujące się małą wartością prądów zakłócających	521
7.6.3.3. Głowice o dużej czułości	536
7.6.4. Górna granica zakresu pomiarowego	541
7.6.5. Oddziaływanie głowicy jonizacyjnej z atmosferą gazów resztkowych	545
7.6.5.1. Efekt pompowania jonowego głowicy	545
7.6.5.2. Efekty desorpcji i adsorpcji gazu na kolektorze elektronów	546
7.6.5.3. Procesy krakingu na gorącej katodzie	547
7.6.5.4. Wpływ temperatury gazu na wskazania próżniomierza	550
7.6.6. Ogólna charakterystyka próżniomierzy jonizacyjnych z gorącymi katodami	551

7.7. Próżniomierze jonizacyjne z zimnymi katodami (Penninga) .....	552
7.7.1. Zasada działania .....	552
7.7.2. Głowice magnetronowe .....	554
7.7.3. Pomiary w zakresie ultra wysokiej próżni .....	557
7.7.4. Ogólna charakterystyka próźniomierzy jonizacyjnych z zimnymi katodami.....	559
7.8. Próżniomierze jonizacyjne z katodami polowymi .....	565
7.8.1. Emitery polowe .....	565
7.8.2. Głowice jonizacyjne z emiterami polowymi .....	570
7.8.3. Ogólna charakterystyka próźniomierzy jonizacyjnych z emiterami polowymi...	573
7.9 Czujniki próżni .....	575
7.9.1. Technologie stosowane przy wytwarzaniu czujników próżni .....	576
7.9.2. Czujniki membranowe .....	593
7.9.2.1. Czujniki piezorezystywne .....	594
7.9.2.2. Czujniki pojemnościowe .....	599
7.9.2.3. Czujniki rezonansowe .....	603
7.9.3. Czujniki tłumieniowe (lepkościowe) .....	608
7.9.3.1. Czujnik z drgającą belką .....	608
7.9.3.2. Czujnik z wirującym dyskiem .....	613
7.9.4. Czujniki cieploprzewodnościowe .....	615
7.9.4.1. Czujniki oporowe .....	615
7.9.4.2. Czujniki termoelektryczne .....	620
7.9.5. Czujniki jonizacyjne .....	623
7.9.6. Ogólna charakterystyka czujników próżni .....	626
7.10. Skalowanie próźniomierzy .....	627
7.10.1. Wzorce próżni .....	627
7.10.2. Metoda porównawcza .....	628
7.10.3. Metoda statycznego rozprężania gazu .....	629
7.10.4. Metoda dynamicznego rozprężania gazu .....	632
8. ANALIZATORY GAZÓW RESZTKOWYCH – SPEKTROMETRY MAS .....	645
8.1 Ogólna charakterystyka spektrometrów mas .....	645
8.2. Spektrometry z segregacją jonów w jednorodnym polu magnetycznym .....	654
8.3. Filtry mas .....	665
8.3.1. Spektrometr kwadrupolowy .....	665
8.3.2. Spektrometr monopolowy .....	674
8.3.3. Kwadrupolowe pułapki jonowe .....	676
8.4. Spektrometr z segregacją jonów w strefie swobodnego przelotu .....	688
9. WYKRYWANIE NIESZCZELNOŚCI .....	706
9.1. Podstawowe pojęcia .....	706
9.2. Metoda baniek powietrznych .....	708
9.3. Metoda powolnych zmian ciśnienia .....	709

## VII

9.4. Lokalizacja nieszczelności rzeczywistych za pomocą próżniomierzy .....	710
9.5. Metody oparte na wykorzystaniu znaczników gazowych .....	713
9.5.1. Metody próżniowe z wykorzystaniem znaczników gazowych .....	714
9.5.2. Metody ciśnieniowe z wykorzystaniem znaczników gazowych .....	719
9.6. Nieszczelności standardowe .....	723

## 10. UZUPEŁNIENIA