

# SPIS TREŚCI

Spis ważniejszych oznaczeń .....	11
Wstęp .....	17
<b>1. Wiadomości ogólne o metrologii przepływów .....</b>	<b>21</b>
1.1. Wielkości fizyczne występujące w metrologii przepływów, nazewnictwo.....	21
1.2. Podstawowe równania .....	22
1.3. Charakterystyczne właściwości przepływomierzy odróżniające je od innych przyrządów.....	24
1.3.1. Charakterystyczne wartości strumienia .....	24
1.3.2. Dokładność pomiaru.....	25
1.4. Najważniejsze wielkości wpływające na charakterystykę przepływomierzy.....	26
1.4.1. Wpływ gęstości.....	27
1.4.2. Wpływ lepkości .....	29
1.4.3. Wpływ ciśnienia i temperatury.....	30
1.4.4. Wpływ kształtek i armatury.....	31
1.5. Straty ciśnienia .....	35
1.6. Przepływomierz jako element instalacji technologicznej.....	37
<b>2. Przepływomierze zwężkowe.....</b>	<b>40</b>
2.1. Teoretyczne podstawy pomiaru .....	41
2.2. Normalizacja zwęzek.....	51
2.2.1. Znormalizowana kryza pomiarowa .....	52
2.2.2. Inne zwężki znormalizowane .....	55
2.2.3. Porównanie znormalizowanych zwęzek pod względem metrologicznym i eksploatacyjnym.....	56
2.2.4. Obliczenia zwęzek znormalizowanych.....	59
2.2.5. Pomiary w warunkach wykraczających poza warunki stosowania znormalizowanych zwęzek.....	60
2.2.5.1. Nieostra krawędź kryzy .....	60
2.2.5.2. Nadmierna chropowatość rurociągu.....	61
2.2.5.3. Kryzy w rurociągach poniżej 50 mm .....	63
2.3. Specjalne zwężki pomiarowe.....	64
2.4. Dysze o przepływie krytycznym.....	65
2.5. Inne przepływomierze wykorzystujące generowanie różnicy ciśnień.....	68
2.5.1. Przepływomierze z krzywizną .....	68
2.5.2. Przepływomierze kapilarne .....	70
2.5.3. Przepływomierze dynamometryczne.....	71

<b>3. Rotametry</b> .....	73
3.1. Charakterystyka ogólna .....	73
3.2. Zasada działania rotametrów .....	73
3.3. Wpływ parametrów płynu na wskazania rotametrów .....	77
3.4. Budowa rotametrów i rotametrycznych przetworników przepływu.....	79
3.5. Inne rozwiązania przepływomierzy z grawitacyjną siłą zwrotną .....	81
3.5.1. Przepływomierze pływakowe .....	81
3.5.2. Przepływomierze klapowe .....	82
<b>4. Przepływomierze turbinowe</b> .....	84
4.1. Charakterystyka ogólna .....	84
4.2. Teoretyczne podstawy działania przepływomierzy turbinowych.....	85
4.3. Analiza charakterystyki przepływomierzy turbinowych .....	88
4.4. Problemy łożyskowania turbin i wirników .....	91
4.5. Niekonwencjonalne rozwiązania przepływomierzy turbinowych.....	93
4.6. Przetwarzanie sygnału przepływomierzy turbinowych .....	93
4.7. Korekcja wpływu ciśnienia i temperatury dla gazomierzy turbinowych .....	95
<b>5. Przepływomierze komorowe</b> .....	97
5.1. Charakterystyka ogólna .....	97
5.2. Zasada pomiaru.....	97
5.3. Błędy przepływomierzy komorowych.....	100
5.4. Przetwarzanie sygnału przepływomierzy komorowych .....	102
<b>6. Przepływomierze oscylacyjne</b> .....	103
6.1. Przepływomierze wirowe .....	103
6.1.1. Wprowadzenie teoretyczne.....	103
6.1.2. Generatory wirów .....	106
6.1.3. Detekcja wirów .....	106
6.1.4. Istotne ograniczenia stosowania przepływomierzy wirowych .....	109
6.2. Przepływomierze z wirem precesyjnym .....	110
6.3. Przepływomierze wykorzystujące efekt Coandy .....	111
6.4. Mechaniczne przepływomierze oscylacyjne .....	112
6.4.1. Charakterystyka ogólna .....	112
6.4.2. Zasada działania, teoretyczne podstawy pomiaru .....	112
6.4.3. Optymalizacja konstrukcji przepływomierzy z oscylatorem mechanicznym .....	114
6.4.4. Korekcja wpływu gęstości na wskazania przepływomierzy z oscylatorem mechanicznym .....	114
<b>7. Przepływomierze ultradźwiękowe</b> .....	116
7.1. Charakterystyka ogólna .....	116
7.2. Zasada działania, podstawy teoretyczne pomiaru .....	117
7.3. Budowa przepływomierzy ultradźwiękowych.....	118
7.4. Korekcja wpływu ciśnienia i temperatury dla gazomierzy ultradźwiękowych .....	120
7.5. Domowe gazomierze ultradźwiękowe.....	121
<b>8. Przepływomierze elektromagnetyczne</b> .....	122
8.1. Charakterystyka ogólna .....	122
8.2. Zasada pomiaru.....	122
8.3. Istotne szczegóły budowy przepływomierzy elektromagnetycznych.....	123

---

<b>9. Przepływomierze Coriolisa</b> .....	126
9.1. Charakterystyka ogólna.....	126
9.2. Podstawy teoretyczne działania przepływomierzy Coriolisa.....	127
9.3. Pomiar innych parametrów za pomocą przepływomierzy Coriolisa .....	132
9.4. Niepewności pomiaru .....	133
9.5. Wpływ parametrów konstrukcyjnych przepływomierza na jego właściwości .....	133
9.6. Instalacja przepływomierzy Coriolisa.....	134
<b>10. Przepływomierze termiczne</b> .....	136
10.1. Właściwości przepływomierzy termicznych .....	136
10.2. Przepływomierz całkowitego strumienia .....	137
10.3. Bocznikowe przepływomierze termiczne .....	138
10.4. Przepływomierze termiczne do mikroprzepływów.....	138
10.5. Przepływomierze termiczne do dużych strumieni masy i średnic rurociągów .....	139
10.6. Przeliczenie charakterystyk na gazy inne, niż stosowane podczas wzorcowania.....	141
<b>11. Pomiary prędkości przepływu</b> .....	143
11.1. Znaczenie i zastosowania pomiarów prędkości przepływu .....	143
11.2. Anemometry spiętrzające.....	143
11.3. Termoanemometry .....	145
11.4. Anemometry laserowe .....	148
11.5. Pomiary prędkości metodą obrazowania cząstek (PIV) .....	150
11.6. Anemometr czasowy .....	150
11.7. Anemometry wykorzystujące zasady pomiarowe stosowane w strumieniomierzach ..	151
11.7.1. Zastosowanie zasady działania przepływomierzy turbinowych.....	151
11.7.2. Zastosowanie zasady działania przepływomierzy wirowych .....	152
11.7.3. Zastosowanie zasady działania przepływomierzy ultradźwiękowych .....	152
11.7.4. Zastosowanie zasady działania przepływomierzy termicznych .....	153
11.8. Przepływomierze próbkujące.....	153
11.8.1. Zastosowania przepływomierzy próbkujących.....	153
11.8.2. Równania opisujące rozkład prędkości w rurociągu .....	154
11.8.3. Przepływomierze piętzące jako przepływomierze próbkujące .....	156
11.8.4. Inne zasady pomiaru stosowane w przepływomierzach próbkujących .....	158
<b>12. Pomiary parametrów przepływu mieszanin wielofazowych</b> .....	160
12.1. Wstęp. Podstawowe parametry przepływów wielofazowych.....	160
12.2. Struktury przepływów wielofazowych i ich identyfikacja.....	161
12.2.1. Struktury przepływów wielofazowych.....	161
12.2.2. Identyfikacja struktury przepływu wielofazowego.....	162
12.2.2.1. Mapy struktur przepływów wielofazowych .....	162
12.2.2.2. Tomografia procesowa.....	164
12.2.2.3. Inne metody identyfikacji .....	165
12.3. Wybrane metody pomiarów przepływów wielofazowych.....	167
12.3.1. Pomiar mieszaniny pył-gaz.....	167
12.3.2. Pomiar mieszaniny ciecz-gaz.....	168
12.3.2.1. Separator jako podstawowe urządzenie do rozliczeń .....	169
12.3.2.2. Pomiar przepływu mieszaniny ropy, wody i gazu.....	170
12.3.2.3. Pomiar mieszaniny ropy i gazu.....	173
12.3.2.4. Pomiar gazu mokrego .....	174
12.3.2.5. Pomiar zapowietrzonej ciekłej siarki – studium przypadku .....	174

<b>13. Pomiary niustalonego strumienia płynu .....</b>	<b>177</b>
13.1. Zagadnienia ogólne .....	177
13.2. Przyczyny pulsacji przepływu i metody ich identyfikacji .....	178
13.3. Metody identyfikacji pulsacji przepływu .....	180
13.4. Wpływ pulsacji na przepływomierze zwężkowe .....	181
13.4.1. Błąd związany z pierwiastkowaniem sygnału .....	182
13.4.2. Wpływ pochodnej lokalnej prędkości .....	183
13.4.3. Zmiana współczynnika przepływu .....	184
13.4.4. Przepływomierze zwężkowe z szybkim przetwornikiem ciśnienia różnicowego .....	184
13.4.5. Przepływomierze zwężkowe z zastosowaniem przetworników ciśnienia różnicowego o dużej stałej czasowej .....	186
13.4.6. Układy tłumiące dla gazu .....	187
13.4.7. Dwukomorowy tłumik pulsacji przepływu gazu z rurą dławiącą .....	189
13.4.8. Tłumiki pulsacji dla cieczy .....	190
13.5. Wpływ pulsacji na przepływomierze turbinowe .....	191
13.5.1. Próg między przepływem ustalonym a pulsującym .....	192
13.5.2. Ogólna zależność między błędem pomiaru a parametrami pulsacji .....	193
13.5.3. Określenie parametru odpowiedzi dynamicznej $b$ przepływomierza turbinowego .....	194
13.5.4. Obliczeniowe wyznaczenie parametru odpowiedzi dynamicznej .....	195
13.5.5. Moment bezwładności turbiny .....	196
13.5.6. Oszacowanie współczynników korekcyjnych i niepewności pomiaru spowodowanych pulsacjami .....	196
13.5.7. Przepływ przerywany .....	198
13.6. Wpływ pulsacji na przepływomierze oscylacyjne .....	199
13.6.1. Przepływomierze wirowe .....	199
13.6.2. Przepływomierze z oscylatorem mechanicznym .....	201
13.7. Wpływ stanów niustalonych na rotametry .....	203
<b>14. Pomiary przepływów w kanałach otwartych i przewodach niecałkowicie wypełnionych .....</b>	<b>204</b>
14.1. Wstęp .....	204
14.2. Przelewy .....	204
14.3. Koryta pomiarowe .....	206
14.4. Pomiary parametrów przepływu w ciekach wodnych .....	207
14.5. Elektromagnetyczne pomiary w przewodach niewypełnionych całkowicie i kanałach otwartych .....	208
14.6. Metody korelacyjne .....	209
14.7. Metody znacznikowe .....	210
<b>15. Wzorcowanie przepływomierzy .....</b>	<b>211</b>
15.1. Wstęp .....	211
15.2. Legalizacja a wzorcowanie .....	212
15.3. Wzorcowanie przepływomierzy do cieczy .....	215
15.3.1. Wzorcowanie wodą .....	215
15.3.2. Wzorcowanie cieczami innymi niż woda .....	218
15.4. Wzorcowanie przepływomierzy do gazu .....	220
15.4.1. Stanowiska dzwonowe .....	220
15.4.2. Stanowiska niskociśnieniowe z gazomierzami pośredniczącymi .....	223
15.4.3. Stanowiska wysokociśnieniowe .....	224

---

15.5.	Zapewnienie spójności pomiarowej podczas wzorcowania przepływomierzy.....	227
15.5.1.	Zapewnienie spójności pomiarowej dla cieczy .....	228
15.5.2.	Zapewnienie spójności pomiarowej dla gazu przy niskim ciśnieniu.....	228
15.5.3.	Zapewnienie spójności pomiarowej dla gazu przy wysokim ciśnieniu.....	230
15.5.3.1.	Wzorce pierwotne.....	230
15.5.3.2.	Przeniesienie wyników wzorcowań na wzorce robocze.....	233
15.6.	Zastosowanie podwójnego chronometrażu podczas wzorcowania przepływomierzy z wyjściem impulsowym.....	239
15.7.	Wzorcowanie anemometrów.....	242
<b>16.</b>	<b>Stacje pomiarowe.....</b>	<b>245</b>
16.1.	Przelicznik jako element stacji pomiarowej.....	245
16.2.	Stacje pomiarowe gazu .....	247
16.3.	Stacje pomiarowe paliw ciekłych .....	249
16.4.	Stacje pomiarowe ropy naftowej.....	250
16.5.	Pomiary wielkości wpływających.....	250
16.6.	Przeliczniki.....	251
<b>17.</b>	<b>Analiza niepewności w metrologii przepływów .....</b>	<b>253</b>
17.1.	Uwagi ogólne .....	253
17.2.	Obliczenie niepewności standardowych .....	254
17.3.	Obliczenie współczynników wrażliwości .....	256
17.4.	Obliczanie niepewności złożonej i rozszerzonej .....	257
17.5.	Przykłady szacowania niepewności w metrologii przepływów.....	259
17.5.1.	Oszacowanie niepewności wartości poprawnej objętości podczas wzorcowania gazomierza .....	259
17.5.2.	Oszacowanie niepewności pomiaru strumienia masy za pomocą zwężki.....	261
17.5.3.	Oszacowanie niepewności pomiaru strumienia masy za pomocą dyszy krytycznej.....	262
17.5.4.	Oszacowanie niepewności pomiaru objętości gazu w warunkach normalnych.....	262
<b>18.</b>	<b>Zastosowania numerycznej mechaniki płynów w metrologii przepływów .....</b>	<b>263</b>
	Bibliografia .....	267
	Załącznik. Podstawowe właściwości najczęściej stosowanych przepływomierzy .....	277
	Skorowidz rzeczowy .....	279
	Streszczenie.....	282
	Summary .....	283