

POLITECHNIKA GDAŃSKA

SZYMON GRYMEK

MODELE  
STRUMIENIA POWIETRZA  
W PNEUMATYCE



GDAŃSK 2012

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

*Janusz T. Cieśliński*

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

*Michał Szydłowski*

REDAKTOR SERII

*Marek Szkodo*

RECENZENCI

*Zenon Jędrzykiewicz*

*Kazimierz Peszyński*

PROJEKT OKŁADKI

*Jolanta Cieślawska*

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem  
[www.pg.gda.pl/wydawnictwo/oferta](http://www.pg.gda.pl/wydawnictwo/oferta)

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2012

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978-83-7348-447-4

---

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 9,9, ark. druku 11,0, 129/717

---

Druk i oprawa: *EXPOL* P. Rybiński, J. Dąbek, Sp. Jawna  
ul. Brzeska 4, 87-800 Włocławek, tel. 54 232 37 23

# SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	7
1. WPROWADZENIE.....	9
2. STAN ZAGADNIENIA.....	16
2.1. Ciśnienie statyczne a ciśnienie spiętrzenia.....	17
2.2. Modele strumienia płynu w pneumatyce.....	18
2.2.1. Model St. Venanta-Wantzela.....	18
2.2.2. Model dla przepływu przez kryzy.....	20
2.2.3. Model Miatłuka i Awtuszki.....	20
2.2.4. Modele Woelkego.....	21
2.2.5. Modele dla przepływu przez przewody.....	21
2.2.6. Przepływ nominalny.....	23
2.2.7. Współczynnik wymiarowy.....	23
2.2.7.1. Współczynnik wymiarowy według PN-83/M-74201.....	24
2.2.7.2. Współczynnik wymiarowy według EN 60534.....	25
2.2.8. Przewodność dźwiękowa i krytyczny stosunek ciśnień.....	26
2.2.8.1. Model z ISO 6358.....	27
2.2.8.2. Model z ISO 6953.....	29
2.3. Funkcje przeliczające.....	30
2.3.1. Przepływ nominalny.....	30
2.3.2. Współczynnik wymiarowy.....	31
2.3.3. Współczynnik przepływu St. Venanta-Wantzela.....	32
2.3.4. Powierzchnia efektywna.....	33
2.4. Wyznaczanie wartości współczynników przepływu.....	34
2.4.1. Metody pośrednie zbiornikowe.....	34
2.4.2. Metody bezpośrednie.....	36
2.4.2.1. Idea pomiaru według PN-EN 60534.....	37
2.4.2.2. Idea pomiaru według ISO 6358.....	37
2.4.2.3. Idea pomiaru według ISO/WD 6358.....	38
2.4.2.4. Idea pomiaru według ISO/DIS 6358.....	38
2.4.3. Metody alternatywne.....	39
2.4.3.1. Metoda prostego opróżniania.....	39
2.4.3.2. Metoda napełniania komory podciśnieniowej.....	40
2.4.3.3. Metoda izotermicznego opróżniania.....	40
2.4.3.4. Metoda napełniania.....	41
2.4.3.5. Metoda opróżniania.....	43
2.5. Obliczanie oporności układu elementów pneumatycznych.....	43
2.5.1. Model St. Venanta-Wantzela i modele pokrewne.....	43
2.5.2. Współczynnik wymiarowy.....	44
2.5.3. Przewodność dźwiękowa i krytyczny stosunek ciśnień.....	44
2.6. Oporność przewodów pneumatycznych.....	45
2.7. Podsumowanie.....	47
3. CEL I ZAKRES PRACY.....	49

4. STRUMIEŃ MASY WEDŁUG ISO 6953 A LICZBA MACHA.....	51
4.1. Izentropowy strumień masy w funkcji liczby Macha.....	52
4.2. „Rzeczywisty” strumień masy w funkcji liczby Macha.....	53
4.3. Związek pomiędzy liczbą Macha a parametrami z ISO 6953.....	54
4.4. Stosunek strumienia masy do krytycznego strumienia masy.....	56
5. PRZEPIY W PRZEZ PRZEWÓD A PARAMETRY Z ISO 6953.....	57
5.1. Adiabaticzny przepływ przez przewód.....	58
5.2. Adiabaticzność przepływu przez przewody.....	65
5.3. Izotermiczny przepływ przez przewód.....	67
5.4. Szacowanie wartości współczynnika strat liniowych.....	72
5.5. Porównanie wyników proponowanych algorytmów z wynikami dostępnymi w literaturze.....	74
5.6. Podsumowanie.....	83
6. UTOŻSAMIANIE CIŚNIEŃ STATYCZNYCH I CIŚNIEŃ SPIĘTRZENIA.....	86
6.1. Analiza danych literaturowych.....	86
6.2. Wartości parametrów z ISO 6953 dla elementów pneumatycznych.....	89
6.3. Błąd względny strumienia masy.....	90
6.3. Wpływ utożsamiania ciśnień na czas opróżniania akumulatora pneumatycznego.....	98
6.5. Wpływ utożsamiania ciśnień na osiągi silownika pneumatycznego.....	100
6.6. Podsumowanie.....	104
7. FUNKCJE PRZELICZAJĄCE MODELU Z ISO 6953.....	106
7.1. Przepływ nominalny.....	106
7.2. Współczynnik wymiarowy.....	111
7.2.1. Model według PN-83/M-74201.....	111
7.2.2. Model według EN 60534.....	114
7.3. Modele z jednym współczynnikiem przepływu.....	118
7.4. Model Miatluka i Awtuszki.....	123
7.5. Model Woelkego.....	124
7.6. Przejście w dziedzinę ciśnień spiętrzenia.....	127
8. PROCEDURY PRZETWARZANIA DANYCH DLA METOD ZBIORNIKOWYCH.....	131
8.1. Wymagania stawiane stanowisku pomiarowemu.....	131
8.2. Procedury przetwarzania danych pomiarowych.....	133
8.2.1. Wyznaczanie wartości $C$ i $b$ w rozumieniu ISO 6358.....	133
8.2.2. Wyznaczanie wartości $C$ , $b$ , $m$ i $a$ w rozumieniu ISO 6953 i ISO/WD 6358.....	134
8.2.3. Wyznaczanie wartości $K_V$ i $x_T$ w rozumieniu PN-EN 60534.....	135
8.3. Przykłady obliczeniowe.....	136
8.3.1. Przykład A – element wypływowy.....	136
8.3.2. Przykład B – element przepływowy.....	138
8.3.3. Przykład C – rura wylotowa pomiaru ciśnienia o długości $6 \cdot d$ .....	139
8.3.4. Komentarz do obliczeń.....	139
8.4. Przyczyny i skutki pominięcia końcowej rury wylotowej.....	141
9. OPÓR PRZEPIY W PRZEZ POŁĄCZONE ELEMENTY PNEUMATYCZNE.....	143
9.1. Elementy pneumatyczne połączone równolegle.....	143
9.1.1. Procedura określania wypadkowych właściwości przepływowych.....	143
9.1.2. Przykłady obliczeniowe.....	144
9.1.3. Ocena dokładności wzoru (2.105) stosowanego wraz ze wzorem (2.104).....	146

---

9.2. Elementy połączone szeregowo.....	148
9.2.1. Procedura określania wypadkowych właściwości przepływowych.....	148
9.2.2. Przykłady obliczeniowe.....	152
9.2.3. Ocena dokładności wzoru (2.109) stosowanego wraz ze wzorem (2.107).....	154
9.3. Zmiana długości przewodu a jego oporność.....	156
9.3.1. Szacowanie wartości $\lambda$ na podstawie znajomości wartości $C$ .....	156
9.3.2. Zwielokrotnienie długości przewodu.....	157
9.3.3. Przykład obliczeniowy.....	158
10. PODSUMOWANIE.....	160
BIBLIOGRAFIA.....	169
Streszczenie w języku polskim.....	176
Streszczenie w języku angielskim.....	176