

Szymon GRZYMEK

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Metoda pośrednia wyznaczania wartości współczynnika K_V w pneumatyce

Dr inż. Szymon GRZYMEK

Od 1990 roku magister inżynier mechanik (Politechnika Gdańska). Od 1996 roku doktor nauk technicznych (Politechnika Koszalińska). Od 1997 roku pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej. Obszar działalności naukowej autora obejmuje Komputerowe Wspomaganie Projektowania ze szczególnym uwzględnieniem projektowania układów pneumatycznych, inżynierskie zastosowania metod sztucznej inteligencji oraz inżynierię mechaniczno – medyczną.

e-mail: sgrymek@pg.gda.pl**Streszczenie**

W praktyce przemysłowej do opisu właściwości przepływowych elementów nadal chętnie wykorzystywany jest współczynnik wymiarowy K_V . Wartość tego współczynnika wyznacza się metodą bezpośrednią – dość skomplikowaną i kosztowną. Zastosowanie metod pośrednich zbiornikowych wymaga przejścia z ciśnień statycznych na ciśnienia spiętrzenia. W pracy przedstawiono sposób wyznaczenia wartości współczynnika wymiarowego K_V (w rozumieniu normy PN-EN 60534) drogą analizy danych pomiarowych uzyskanych metodą zbiornikową.

Słowa kluczowe: pneumatyka, współczynnik wymiarowy K_V , właściwości przepływowe elementów pneumatycznych.

Indirect method of the K_V coefficient value determination in pneumatics**Abstract**

Nowadays, according to ISO 6358, a flow properties of a pneumatic device should be expressed by two coefficients: sonic conductance C and critical pressure ration b . But flow factor K_V is still very popular, especially in industry. Direct measurement methods are applied for a determination of the flow factor K_V value. There is a problem to apply less complicated and cheaper indirect methods because they utilise total pressures while the direct ones utilise static pressures. The paper presents how to deal with this problem, it means, how to determine the value of flow factor K_V (by the mean of PN-EN 60534 standard) using indirect tank methods. The genesis of flow factor K_V is described in the section 2. The section 3 is a short reminder what indirect tank methods are. How to determine the value of flow factor K_V on the base of measurement obtained from a tank experiment is presented in the section 4. The section 5 present how to calculate the K_V value when the C and b values are known. An experimental (numerical) verification of the proposed method is showed in the section 6. After the verification it can be stated that the proposed method is correct and suitable for flow factor K_V determination. But there are substantial problem with numerical calculation for the high value of the pressure ration ϵ . So, a selection of suitable, precise numerical methods for the simulation (integration) and optimisation during the data analysis as well as a high precision of floating number representation are necessary.

Keywords: pneumatics, flow factor K_V , flow properties of pneumatic devices.

1. Wstęp

Jednym z podstawowych zadań projektanta pneumatycznego układu napędowego jest analiza dynamiki tego układu. Umożliwia ona określenie osiągow układu i porównanie ich wartości z postawionymi wymaganiami. Do analizy dynamiki układu niezbędna jest znajomość charakterystyk przepływowych elementów składowych układu. Charakterystyka przepływowa elementu pneumatycznego określa zależność natężenia strumienia objętości bądź masy płynu ściśliwego od czynników wywołujących przepływ tego strumienia i najczęściej podawana jest w postaci formuły matematycznej – tzw. modelu przepływu. Właściwości przepływowe elementu pneumatycznego określa się podając wartości

współczynników modelu przepływu. Wartości te są miarą przewodności (oporu) tego elementu.

Obecnie do opisu właściwości przepływowych elementów pneumatycznych, zgodnie z obowiązującymi normami ISO 6358 [1] i PN-92/M-73763 [2]), powinny być wykorzystywane: przewodność dźwiękowa C i krytyczny stosunek ciśnień statycznych b . Są one współczynnikami, podanego w obu normach, modelu przepływu (1):

$$\dot{m} = \frac{p_1}{\sqrt{T_0}} \rho_{\text{ANR}} \sqrt{T_{\text{ANR}}} Y_{\text{ST}} \quad (1)$$

$$Y_{\text{ST}} = \begin{cases} C, & \text{gdy } 0 \leq \frac{p_2}{p_1} \leq b \\ C \sqrt{1 - \left(\frac{p_2 - b}{1 - b} \right)^2}, & \text{gdy } b \leq \frac{p_2}{p_1} \leq 1 \end{cases}$$

gdzie p_1 – ciśnienie statyczne na wlocie do elementu, p_2 – ciśnienie statyczne na wylocie z elementu, T_0 – temperatura płynu wpływającego do elementu a ρ_{ANR} i T_{ANR} to gęstość i temperatura w warunkach znormalizowanej atmosfery ANR [3, 4].

Jednak w praktyce przemysłowej nadal wiele firm i wielu projektantów wykorzystuje do określenia właściwości przepływowych elementów pneumatycznych współczynnik wymiarowy K_V [5, 6, 7] lub jego odpowiednik w jednostkach angielskich – C_V [8].

Wartość współczynnika wymiarowego K_V (C_V) wyznacza się metodą bezpośrednią wykorzystując stanowiska pomiarowe i metodyki badawcze opisane w normach [6, 7, 8]. Do wyznaczenia wartości współczynników innych znanych modeli przepływu używa się najczęściej metod pośrednich – głównie tzw. metod zbiornikowych [9, 10]. Metody zbiornikowe są mniej skomplikowane i tańsze od metod bezpośrednich. Oczywiście więc wydaje się chęć ich zastosowania do wyznaczania wartości współczynnika K_V [12]. Istnieje jednak poważna niedogodność – konfiguracja stanowisk badawczych opisanych w [6, 7] wskazuje, że za ciśnienie przed jak i za badanym elementem przyjmowane jest ciśnienie statyczne; w metodach zbiornikowych jest to ciśnienie spiętrzenia.

Niniejsza praca prezentuje jakie kroki należy podjąć na etapie analizy danych pomiarowych uzyskanych metodą zbiornikową, aby wyznaczyć wartość najbliższą wartości współczynnika wymiarowego K_V w rozumieniu normy PN-EN 60534 [7]. W niniejszej pracy wszystkie wielkości fizyczne dla których nie podano jednostek wyrażane są w jednostkach zgodnych z międzynarodowym układem miar SI.

2. Geneza współczynnika wymiarowego K_V

Współczynnik wymiarowy K_V został wprowadzony w 1944 roku przez firmę Masoneilan. Jego ścisła definicja i metodyka pomiaru zostały ujęte w normie VID/VDE 2173 [5] w 1962 roku. Współczynnik K_V jest rozumiany jako takie objętościowe natężenie przepływu w m^3/h cieczy o gęstości $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ i lepkości kinematycznej $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, która przepływając przez element wywołuje stratę ciśnienia równą $1 \text{ kG}/\text{cm}^2$ (w chwili obecnej przyjmuje się 10^5 Pa).

Wychodząc z równania Bernoulliego i definicji współczynnika K_V można podać formułę określającą strumień objętości płynu nieściśliwego przy dowolnych wartościach Δp spadku ciśnienia na zaworze i gęstości ρ płynu:

$$Q = K_V \sqrt{\frac{\rho_{def}}{\Delta p_{def}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

gdzie $\rho_{def} = 1000 \text{ kg/m}^3$ a $\Delta p_{def} = 100\,000 \text{ Pa}$.

W przypadku stosowania formuły (2) dla płynów ściśliwych konieczne jest:

- zdefiniowanie gęstości ρ użytej w (2),
- określenie zależności pomiędzy temperaturami T_1 (na wlocie do elementu) i T_2 (na wylocie z elementu),
- określenie warunków w jakich przepływ staje się krytyczny.

Założmy, że $\rho = \rho_2$ (gęstość płynu na wylocie z elementu), $T_1 = T_2$ i że przepływ jest krytyczny gdy $\Delta p \leq p_1/2$ (spadek ciśnienia na elemencie jest mniejszy od połowy ciśnienia na wlocie do elementu). Sprowadzając strumień objętości Q do warunków normalnych fizycznych ($T_{Nfiz} = 273,15 \text{ K}$ i $p_{Nfiz} = 101\,325 \text{ Pa}$ [15]) według

$$Q_{Nfiz} = Q \cdot \frac{\rho_2}{\rho_{Nfiz}} \quad (3)$$

oraz wyznaczając z równania stanu gazu doskonałego:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_1} \quad (4)$$

i oznaczając stosunek ciśnienia p_2 na wylocie z elementu do ciśnienia p_1 na wlocie do elementu jako ε , otrzymujemy z (2):

$$Q_{Nfiz} = \frac{K_V}{385,2} \cdot \frac{p_1}{\sqrt{T_1 \rho_{Nfiz}}} \Phi(\varepsilon) \quad (5)$$

$$\Phi(\varepsilon) = \begin{cases} 1, & \text{gd } \varepsilon \leq 0,5 \\ 2\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)}, & \text{gd } \varepsilon > 0,5 \end{cases}$$

Wzór (5) jest identyczny ze wzorem z nieobowiązującej już normy PN-83/M-74201 [6].

Założmy, że $\rho = \rho_1$ (gęstości płynu na wlocie do elementu). Sprowadzając strumień objętości Q do warunków normalnych fizycznych według:

$$Q_{Nfiz} = Q \cdot \frac{\rho_1}{\rho_{Nfiz}} \quad (6)$$

oraz wyznaczając z równania stanu gazu doskonałego:

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} \quad (7)$$

otrzymujemy z (2):

$$Q_{Nfiz} = \frac{K_V}{192,6} \cdot \frac{p_1}{\sqrt{T_1 \rho_{Nfiz}}} \cdot \sqrt{1-\varepsilon} \quad (8)$$

Wzór (7) jest identyczny ze wzorem z obowiązującej od 2001 roku normy PN-EN 60534 [7].

Porównanie wzorów (4) i (7) ukazuje niejednoznaczność sensu fizycznego współczynnika K_V przy jego zastosowaniu do opisu oporów przepływu płynów ściśliwych. Pogłębia się ona, gdy przeanalizujemy założenie, że według [7] pomiar współczynnika K_V powinien być wykonywany dla:

$$\frac{\Delta p}{p_1} \leq 0,02 \quad (9)$$

Wzory (4) i (7) można sprowadzić do warunków znormalizowanej atmosfery odniesienia ANR ($T_{ANR} = 293,15 \text{ K}$

i $p_{ANR} = 100\,000 \text{ Pa}$) [3, 4] podstawiając we wzorach (3) i (6) ρ_{ANR} w miejsce ρ_{Nfiz} . Powoduje to zmianę wartości współczynnika z 385,2 na 369,4 we wzorze (5) i z 192,6 na 184,7 we wzorze (8). Nie powoduje to zmiany sensu fizycznego współczynnika K_V w obu wzorach.

3. Metody zbiornikowe wyznaczania współczynników przepływu

Metody zbiornikowe są najpopularniejszymi metodami pośrednimi wyznaczania wartości współczynników modelu przepływu. Współczynniki te wyznacza się porównując przebiegi zmian ciśnienia (eksperymentalnego i symulowanego) w czasie dla opróżnianego bądź napełnianego zbiornika.

W przypadku symulacji procesu napełniania komory o stałej objętości V parametry zasilającego gazu (ciśnienie p_z i temperaturę T_z) uważa się za stałe. Zmiany ciśnienia p w komorze w funkcji czasu t opisuje równanie [13]:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R \cdot T_z \cdot \kappa \cdot \dot{m}_z}{V} \quad (10)$$

W procesie opróżniania komory o stałej objętości V , w której panuje ciśnienie p i temperatura T , gaz wypływa do atmosfery, gdzie panuje stałe ciśnienie p_a . Zmiany temperatury T i ciśnienia p w komorze w funkcji czasu t opisują równania:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\kappa - 1}{\kappa} \cdot \frac{T}{p} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (11a)$$

$$\frac{dp}{dt} = - \frac{R \cdot T \cdot \kappa \cdot \dot{m}_z}{V} \quad (11b)$$

W efekcie obliczeń można uzyskać średnią wartość współczynnika (lub współczynników) w przyjętym modelu przepływu. Można również uzyskać przebieg wartości wyznaczanego współczynnika w funkcji czasu.

Budowa stanowiska badawczego, warunki i przebieg pomiarów oraz metody wyznaczania współczynników dla różnych modeli przepływu są opisane w wielu publikacjach, np. [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

4. Wyznaczanie wartości K_V – podstawy teoretyczne

Zadanie postawiono następująco: znany jest przebieg zmian ciśnienia w opróżnianym (napełnianym) zbiorniku w funkcji czasu, przebieg zmian temperatury w zbiorniku i wartość ciśnienia otoczenia (dla opróżniania) lub ciśnienie zasilania i temperatura płynu zasilającego (dla napełniania) oraz właściwości płynu ściśliwego i cechy konstrukcyjne stanowiska pomiarowego. Wykorzystując ogólną metodykę analizy danych przyjętą przy wyznaczaniu wartości współczynników przepływu metodami zbiornikowymi [10, 14] należy określić wartość najbliższą wartości współczynnika wymiarowego K_V w rozumieniu normy PN-EN 60534 [7].

Algorytm postępowania mający na celu rozwiązanie powyższego zadania powinien być następujący:

KROK 1

Przyjęty model przepływu ma postać [15, 16]:

$$\dot{m} = f \frac{p_0}{\sqrt{T_0}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{R}} \cdot M_1 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{\kappa + 1}{2 - 2\kappa}} \quad (12)$$

gdzie κ i R to wykładnik adiabaty i indywidualna stała gazowa płynu, a f , T_0 , p_0 i M_1 to pole powierzchni przekroju, temperatura, ciśnienie spiętrzenia i liczba Macha na wlocie do badanego oporu pneumatycznego. Jako identyfikowany współczynnik przepływu przyjęta jest liczba Macha M_1 . Efektem prowadzonych obliczeń (np. zgodnie z [14]) jest przebieg wartości M_1 w funkcji czasu t . Znajomość przebiegu zmian ciśnienia w zbiorniku oraz ciśnienia otoczenia (lub zasilania) umożliwia przekształcenie przebiegu M_1 w funkcji czasu t na przebieg w funkcji stosunku ciśnień spiętrzenia ε_{SP} .

KROK 2

Związek między stosunkiem ciśnień spiętrzenia ε_{SP} na równoważnym mu stosunkiem ciśnień statycznych ε_{ST} ma postać [15, 16]:

$$\varepsilon_{ST} = \varepsilon_{SP} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (13)$$

Umożliwia on uzyskanie przebiegu M_1 w funkcji stosunku ciśnień statycznych ε_{ST} .

KROK 3

Dla znanego Q_{Nfiz} masowe natężenie przepływu oblicza się z zależności:

$$\dot{m} = Q_{Nfiz} \cdot \rho_{Nfiz} \quad (14)$$

Dla znanej M_1 i znanego ciśnienia statycznego na wlocie do elementu p_1 masowe natężenie przepływu oblicza się z zależności:

$$\dot{m} = f \frac{p_1}{\sqrt{T_1}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{R}} \cdot M_1 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2} \quad (15)$$

Porównując (14) z (15) przy wykorzystaniu (8) uzyskuje się:

$$K_V = f \cdot \sqrt{\frac{\kappa \Delta p_{def}}{\rho_{def}}} \cdot \frac{M_1 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}}{\sqrt{1 - \varepsilon_{ST}}} \quad (16)$$

Zależność (16) daje możliwość przekształcenia przebiegu M_1 w funkcji stosunku ciśnień statycznych ε_{ST} na odpowiadający mu przebieg K_V (w funkcji ε_{ST}).

KROK 4

Norma PN-EN 60534[7] określa warunek pomiaru współczynnika K_V w postaci (9). Po przekształceniu daje to $\varepsilon_{ST} \geq 0,98$. Norma ANSI/(NFPA) T3.21.3 [8] określa ten warunek (dla wyznaczanego współczynnika C_V) jako $0,98 \leq \varepsilon_{ST} \leq 0,99$. Firma SMC [17] przyjmuje (dla wyznaczanego współczynnika C_V) $\varepsilon_{ST} = 0,98$.

Przyjęto, że względu na jednoznaczność rozwiązania zadania, za właściwą wartość współczynnika K_V dla $\varepsilon_{ST} = 0,98$.

Z przebiegu K_V w funkcji stosunku ciśnień statycznych ε_{ST} wybrano cztery punkty o wartości ε_{ST} najbliższej 0,98 (dwa o wartości ε_{ST} mniejszej od 0,98 i dwa o większej). Punkty te zdecydowano się aproksymować wielomianem 3 stopnia. Korzystając z zależności aproksymacyjnej wyznaczono wartość współczynnika wymiarowego K_V [m^3/s] dla stosunku ciśnień statycznych $\varepsilon_{ST} = 0,98$.

KONIEC

Przedstawiony powyżej algorytm postępowania umożliwia wyznaczenie szukanej wartości współczynnika wymiarowego K_V .

5. Obliczenie wartości K_V dla znanych wartości C i b

Dla znanych wartości przewodności dźwiękowej C i krytycznego stosunku ciśnień b możliwe jest obliczenie równoważnej im wartości współczynnika wymiarowego K_V .

Masowe natężenie przepływu w funkcji Q_{ANR} ma postać:

$$\dot{m} = Q_{ANR} \rho_{ANR} \quad (17)$$

Porównując (17) z (1) przy wykorzystaniu (8) sprowadzonego do warunków znormalizowanej atmosfery ANR uzyskujemy zależność będącą funkcją przejścia z C i b na K_V .

$$K_V = f \sqrt{\frac{\Delta p_{def} \cdot p_{ANR} \cdot \rho_{ANR}}{\rho_{def}}} \cdot \frac{C \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon^* - b}{1 - b} \right)^2}}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \quad (18)$$

$$\varepsilon^* = \begin{cases} b, & \text{gdy } \varepsilon \leq b \\ \varepsilon, & \text{gdy } \varepsilon > b \end{cases}$$

6. Wyznaczanie wartości K_V – weryfikacja eksperymentalna

Weryfikacji poprawności przedstawionej metody wyznaczania współczynnika wymiarowego K_V dokonano wykorzystując eksperymenty symulacyjne.

Do wygenerowania „danych pomiarowych” (przebiegów ciśnienia) wykorzystano program TANK [14], który służy do symulacji procesów napełniania i opróżniania zbiornika. Przyjęto, że medium roboczym jest powietrze o wilgotności względnej 65%. Symulację przeprowadzono dla 4 elementów (oporów) pneumatycznych o określonych wartościach: przewodności dźwiękowej C i krytycznego stosunku ciśnień b ($C = 15 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot \text{m}^4/\text{kg}$, $b = 0,1$; $C = 15 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot \text{m}^4/\text{kg}$, $b = 0,6$; $C = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot \text{m}^4/\text{kg}$, $b = 0,1$; $C = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot \text{m}^4/\text{kg}$, $b = 0,1$). Dla każdego elementu pneumatycznego przeprowadzono symulację procesu napełniania zbiornika jak i opróżniania zbiornika przyjmując dwie różne wartości ciśnienia zasilania (w przypadku napełniania) lub dwie różne wartości ciśnienia początkowego w zbiorniku (w przypadku opróżniania). W sumie przeprowadzono 16 eksperymentów numerycznych.

Dla każdego z uzyskanych przebiegów ciśnienia wyznaczono (zgodnie z algorytmem podanym w punkcie 4) najpierw wartość liczby Macha M_1 a następnie wartość współczynnika wymiarowego K_V . Dodatkowo wyznaczono wartość jaką miałyby ten współczynnik, gdyby założonym warunkiem jego pomiaru była wartość stosunku ciśnień statycznych $\varepsilon_{ST} = 0,20$.

Dla celów porównawczych, dla każdego elementu pneumatycznego (każdej pary wartości C i b) oraz dwu wartości stosunku ciśnień statycznych ($\varepsilon_{ST} = 0,98$ i $\varepsilon_{ST} = 0,20$) wyliczono, korzystając z funkcji przejścia (18), odpowiadające im wartości współczynnika K_V .

Również dla celów porównawczych dla każdego przebiegu ciśnienia określono, jaką wartość miałyby współczynnik wymiarowy K_V wyznaczony zgodnie z propozycją z [12]. W tych obliczeniach ciśnienia spiętrzenia oraz ciśnienia statyczne są utożsamiane (tzn. do modelu przepływu określonego z wykorzystaniem ciśnień statycznych podstawiane są wartości ciśnień spiętrzenia) i wyznaczana jest jedna średnia wartość współczynnika (identycznie jak przy wyznaczaniu współczynnika przepływu μ modelu Saint Venanta i Wantzela [10, 11, 14]).

Wyniki powyżej opisanych obliczeń weryfikacyjnych zestawiono w tabeli 1.

W kolejnych kolumnach podano:

- p , bar – wartość ciśnienia zasilania (dla napełniania) lub wartości początkową w zbiorniku (dla opróżniania),

- TYP – typ eksperymentu: N – napełnianie, O – opróżnianie,
- $MaxRE$, % – maksymalny względny błąd przebiegów ciśnień dla wyznaczonego przebiegu liczby Macha M_1 ,
- K_V , m^3/h – wartość wyznaczonego współczynnika wymiarowego dla $\varepsilon_{ST} = 0,98$
- K_{VC} , m^3/h – wartość wyliczonego z (18) współczynnika wymiarowego dla $\varepsilon_{ST} = 0,98$
- K_V^* , m^3/h – wartość wyznaczonego współczynnika wymiarowego dla $\varepsilon_{ST} = 0,20$
- K_{VC}^* , m^3/h – wartość wyliczonego z (18) współczynnika wymiarowego dla $\varepsilon_{ST} = 0,20$
- $K_V^{[12]}$, m^3/h – wartość współczynnika wymiarowego wyznaczonego według [12].

Tab. 1. Zestawienie wyników obliczeń weryfikacyjnych
Tab. 1. List of calculation results for verification

P , bar	TYP	$MaxRE$, %	K_V , m^3/h	K_{VC} , m^3/h	K_V^* , m^3/h	K_{VC}^* , m^3/h	$K_V^{[12]}$, m^3/h
$C = 15 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot \text{m}^4/\text{kg} \quad b = 0,1$							
7	N	$3,65 \cdot 10^{-7}$	2,729	2,759	2,068	2,068	1,899
7	O	$0,76 \cdot 10^{-7}$	2,737	2,759	2,068	2,068	1,745
12	N	$4,30 \cdot 10^{-7}$	2,729	2,759	2,068	2,068	1,870
12	O	$0,88 \cdot 10^{-7}$	2,738	2,759	2,068	2,068	1,673
$C = 15 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot \text{m}^4/\text{kg} \quad b = 0,6$							
7	N	$3,93 \cdot 10^{-7}$	4,044	4,109	2,081	2,081	2,093
7	O	$0,94 \cdot 10^{-7}$	4,061	4,109	2,081	2,081	1,798
12	N	$6,63 \cdot 10^{-7}$	4,044	4,109	2,081	2,081	2,028
12	O	$0,71 \cdot 10^{-7}$	4,065	4,109	2,081	2,081	1,692
$C = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot \text{m}^4/\text{kg} \quad b = 0,1$							
7	N	$7,18 \cdot 10^{-7}$	0,916	0,919	0,689	0,689	0,756
7	O	$1,10 \cdot 10^{-7}$	0,917	0,919	0,689	0,689	0,695
12	N	$5,29 \cdot 10^{-7}$	0,916	0,919	0,689	0,689	0,743
12	O	$1,17 \cdot 10^{-7}$	0,917	0,919	0,689	0,689	0,665
$C = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot \text{m}^4/\text{kg} \quad b = 0,6$							
7	N	$1,71 \cdot 10^{-7}$	1,363	1,369	0,693	0,693	0,847
7	O	$0,93 \cdot 10^{-7}$	1,364	1,369	0,693	0,693	0,716
12	N	$1,73 \cdot 10^{-7}$	1,362	1,369	0,693	0,693	0,821
12	O	$0,91 \cdot 10^{-7}$	1,365	1,369	0,693	0,693	0,673

Analiza wyników eksperymentów weryfikacyjnych zestawionych w tabeli 1 pozwala na ocenę poprawności merytorycznej proponowanego w punkcie [4] algorytmu jak i problemów z jego implementacją komputerową.

Zgodność wartości współczynników K_V^* i K_{VC}^* (odpowiednio wyznaczonego lub obliczonego dla $\varepsilon_{ST} = 0,20$) we wszystkich przeprowadzonych badaniach dowodzi poprawności merytorycznej proponowanego algorytmu oraz poprawności jego komputerowej implementacji. Ukazuje również brak wpływu wartości ciśnienia zasilania lub wartości początkowej ciśnienia w zbiorniku oraz typu eksperymentu na uzyskane wyniki.

W procesie wyznaczania przebiegu liczby Macha M_1 uzyskano bardzo wysoką zgodność przebiegów ciśnienia – zawsze nieznacznie lepszą dla procesu opróżniania. Ekstremalnie niska wartość błędu względnego dowodzi poprawności doboru algorytmu optymalizacji i jego parametrów.

Porównując wyznaczoną wartość współczynnika K_V z jego wartością referencyjną K_{VC} stwierdzamy niedoszacowanie wyznaczonego współczynnika dochodzące do 1,6%. Przyczyn takiego stanu należy upatrywać w problemach numerycznych – głównie błędach zaokrąglenia. Może to wskazywać na zbyt małą dokładność wyznaczenia wartości M_1 (mimo wysokiej zgodności przebiegów ciśnienia) dla wysokich wartości stosunku ciśnień ε_{ST} . W sposób pośredni pozwala też wnioskować o wysokiej czułości metody na

błędy wartości przebiegu ciśnienia i pola powierzchni przekroju wlotowego f wyznaczonych w warunkach laboratoryjnych.

Porównując wartości K_V wyznaczone dla $\varepsilon_{ST} = 0,98$ i $\varepsilon_{ST} = 0,20$ widzimy, że wartości dla $\varepsilon_{ST} = 0,98$ są zawsze wyższe – dla elementu o małym oporze nawet prawie dwukrotnie. Podawanie tej wartości współczynnika wymiarowego w katalogach może wywołać u projektanta wrażenie, że element pneumatyczny ma lepsze właściwości przepływowe niż są one w rzeczywistości.

7. Wnioski

W pracy przedstawiono sposób wyznaczania wartości współczynnika wymiarowego K_V (w rozumieniu normy PN-EN 60534) metodą pośrednią zbiornikową.

Przeprowadzone badania weryfikacyjne dowodzą poprawności merytorycznej proponowanego algorytmu. Algorytm wydaje się być niezczuły na (niezdefiniowane w normie) warunki eksperymentu. Jest natomiast czuły na błędy numeryczne – głównie błędy zaokrąglenia oraz potencjalnie na błędy wartości przebiegu ciśnienia i pola powierzchni przekroju wlotowego f wyznaczonych w warunkach laboratoryjnych.

Wydaje się, że podawane w katalogach wartości współczynnika wymiarowego K_V przeszacowują rzeczywiste właściwości przepływowe elementów pneumatycznych.

8. Literatura

- [1] ISO 6358, 1989: Pneumatic fluid power – Components using compressible fluids – Determination of flow – rate characteristics.
- [2] PN-92/M-73763: Napędy i sterowanie pneumatyczne. Elementy pneumatyczne. Wyznaczanie parametrów przepływowych.
- [3] ISO 8778, 1990: Pneumatic fluid power – Standard reference atmosphere.
- [4] PN-92/M-73703: Napędy i sterowanie pneumatyczne. Elementy pneumatyczne. Znormalizowana atmosfera odniesienia.
- [5] VID/VDE 2173 Richtlinien: Strömungstechnische Kenngrößen von Stellventilen und deren Bestimmung.
- [6] PN-83/M-74201, 1983. Armatura przemysłowa. Zawory regulujące. Wymagania i badania.
- [7] PN-EN 60534, 2001: Przemysłowe zawory regulacyjne. Część 2-1. Wydajność przepływu. Równania dla przepływów w warunkach instalacji. Część 2-3. Wydajność przepływu. Procedury badań.
- [8] ANSI(NFPA) T3.21.3, 1990: Pneumatic fluid Power – Flow rating test procedure and reporting method – for fixed orifice components.
- [9] Gerc E. W.: Napędy pneumatyczne. Teoria i obliczanie. WNT, Warszawa 1973.
- [10] Kamiński Z.: Ocena modeli matematycznych charakterystyk przepływowych oporów pneumatycznych. Hydraulika i Pneumatyka, 5/2003.
- [11] Grymek Sz., Kiczkiwiak T.: Komputerowo wspomaganie obliczenia współczynnika przepływu gazu. ZN WM Pol. Koszalińskiej, Nr: 37, Koszalin 2005
- [12] Kamiński Z.: Metody określania właściwości przepływowych elementów pneumatycznych. Hydraulika i Pneumatyka 5/2007.
- [13] Kiczkiwiak T.: Algorytmy i modele w projektowaniu pneumatycznych układów napędowych. Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2005.
- [14] Kiczkiwiak T., Grymek Sz.: Program do wspomagania obliczeń parametrów opisujących właściwości przepływowe elementów pneumatycznych. PAK 4/2008.
- [15] Iwaszko J.: Opory przepływu powietrza przez elementy pneumatyczne. Prace naukowe, Mechanika Z.177, Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej 1999.
- [16] Grymek Sz., Kiczkiwiak T.: Conversion of the sonic conductance C and the critical pressure ratio b into the airflow coefficient μ . Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 19, No 9/2005.
- [17] Oneyama N.: Sorting out the truth about pneumatic standards. MACHINE DESIGN Oct 11, 2001. www.machinedesign.com