

## Tomasz KICZKOWIAK<sup>1</sup>, Szymon GRZYMEK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, ZAKŁAD NAPĘDÓW I STEROWAŃ, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

<sup>2</sup>POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

# Krytyczny stosunek ciśnień $b$ w rozumieniu norm ISO 6358 i ISO 6953

Dr hab. inż. Tomasz KICZKOWIAK

Absolwent Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie (1978); stopień doktora nauk technicznych w zakresie mechaniki uzyskał w Politechnice Warszawskiej (1991), a doktora habilitowanego w zakresie budowy i eksploatacji maszyn w Politechnice Koszalińskiej (2006). Kieruje Zakładem Napędów i Sterowań w Instytucie Mechatroniki, Nanotechnologii i Techniki Próżniowej PK. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami modelowania, symulacji, optymalizacji i badaniami dynamiki napędów pneumatycznych.



e-mail: tomasz.kiczkiowiak@tu.koszalin.pl

Dr inż. Szymon GRZYMEK

Od 1990 roku magister inżynier mechanik (Politechnika Gdańska). Od 1996 roku doktor nauk technicznych (Politechnika Koszalińska). Od 1997 roku pracuje w Zakładzie Inżynierii Medycznej Katedry Konstrukcji Maszyn i Pojazdów Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej. Obszar działalności naukowej 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

Jednym z parametrów służących do opisu właściwości przepływowych elementu pneumatycznego jest krytyczny stosunek ciśnień  $b$ , zdefiniowany i wykorzystywany w ISO 6358 oraz ISO 6953. Jednak w myśl metod jego wyznaczania opisanych w ISO 6358 i ISO/DIS 6358 definicja ta wydaje się być inna. W pracy omówiono warunki jakie musi spełniać element pneumatyczny, aby wartość  $b$  wyznaczona tymi metodami była zbliżona do wartości definicyjnej. Pojawiające się różnice wartości ukazują podane przykłady.

**Słowa kluczowe:** pneumatyka, krytyczny stosunek ciśnień, masowe natężenie przepływu powietrza.

## Critical pressure ratio $b$ as defined in ISO 6358 and ISO 6953 standards

### Abstract

Two international standards, ISO 6358 [8] and ISO 6953 [12], utilise, inter alia, the critical pressure ratio  $b$  (equations 2 and 3). Both standards define it as a ratio of the downstream static pressure to the upstream static pressure at which the mass flow rate of the gas through the component is at its maximum. But the methods for its determination, presented in ISO 6358 [8] and ISO/DIS 6358 [14], seem not to confirm the definition. There are four examples of  $b$  determination, according to ISO 6358 [8] and ISO/DIS 6358 [14], presented in this paper (3 computer simulations and one real pneumatic circuit). Analysing them, it can be observed that the real value of  $b$  (from definition) is equal to the determined one only if the flow characteristic of the analysed pneumatic component is identical with the expansion function (2) from [8] or (3) from [12]. Because of significant differences between the definition and determined values, one of two things should be done: the definition of the critical pressure ratio  $b$  in ISO 6358 [8] and ISO 6953 [12] should be changed or new methods for  $b$  determination should be developed.

**Keywords:** pneumatics, critical pressure ratio, mass air – flow rate.

## 1. Wprowadzenie

W 1971 roku Sanville [1, 2] zaproponował zastosowanie aproksymacji eliptycznej Bendemanna do opisu zależności bezwymiarowego strumienia masy powietrza przepływającego przez zawór od stosunku ciśnień spiętrzenia. Propozycja ta stała się podstawą zalecenia CETOP RP 50 P [3], w którym jednak ciśnienia spiętrzenia zastąpiono ciśnieniami statycznymi. W efekcie dalszych prac, dokumenty [4 – 7], w 1989 roku opublikowano międzynarodową normę ISO 6358 [8]. Jej polskim odpowiednikiem jest norma PN-92/M-73763 [9]. Według tejże normy oporność elementu pneumatycznego opisują dwa parametry: przewodność dźwiękowa  $C$  oraz krytyczny stosunek ciśnień  $b$ , a strumień masy płynu ściśliwego (gazu) wyznacza się zgodnie z formułą:

$$\dot{m} = C \cdot \frac{p_1}{\sqrt{T_0}} \cdot \rho_N \cdot \sqrt{T_N} \cdot Y(\eta), \quad (1)$$

gdzie:  $\rho_N$ ,  $T_N$  – gęstość i temperatura w warunkach znormalizowanej atmosfery ANR [10, 11],  $\eta = p_2/p_1$ ,  $p_1$  i  $p_2$  – ciśnienia statyczne przed i za elementem a  $Y(\eta)$  to funkcja ekspansji wyrażona zależnością:

$$Y(\eta) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } 0 \leq \eta \leq b \\ \sqrt{1 - \left(\frac{\eta - b}{1 - b}\right)^2} & \text{gdy } b < \eta \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

W 2000 roku wydano normę ISO 6953 [12] w której pojawiły się dwa nowe parametry: indeks ekspansji  $m$  i czopujący stosunek ciśnień  $a$  oraz zmodyfikowana funkcja ekspansji o postaci:

$$Y(\eta) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } 0 \leq \eta \leq b \\ \left[1 - \left(\frac{\eta - b}{a - b}\right)^2\right]^m & \text{gdy } b < \eta \leq a \end{cases} \quad (3)$$

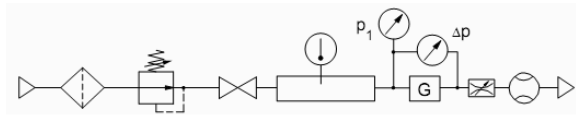
Ten poszerzony model został uwzględniony w trakcie prac nad aktualizacją normy ISO 6358 [8], których rezultaty opublikowano dotychczas w dokumencie roboczym ISO/WD 6358 [13] oraz szkicach normy międzynarodowej ISO/DIS 6358 w 2008 roku [14] i 2009 roku [15].

W wymienionych dokumentach [3 – 9, 12 – 14] krytyczny stosunek ciśnień  $b$  został zdefiniowany jako taki stosunek ciśnienia statycznego  $p_2$  za elementem do ciśnienia statycznego  $p_1$  przed elementem, przy którym osiągnięte zostaje maksimum strumienia masy gazu przepływającego przez element pneumatyczny. Innymi słowy jest to punkt na granicy przepływu krytycznego i podkrytycznego. Analiza metod wyznaczania wartości  $b$  podanych w normie ISO 6358 [8] i, między innymi, w ISO/DIS 6358 [14], wskazuje jednak, że podczas badań określana jest wartość nie definicyjnego krytycznego stosunku ciśnień, lecz pewna wartość umowna wynikająca z aproksymacji charakterystyki przepływowej badanego elementu funkcją (2) bądź (3).

W pracy omówiono warunki jakie musi spełniać element pneumatyczny, aby wartość krytycznego stosunku ciśnień  $b$  wyznaczona metodami opisanymi w [8] i [14] była zbliżona do wartości definicyjnej. Wnioski wyciągnięto na podstawie licznych eksperymentów symulacyjnych i pomiarowych – cztery z nich przedstawiono w pracy. Przykłady te ukazują również jakich różnic wartości można się spodziewać.

## 2. Wyznaczanie wartości $b$ według [8] i [14]

Na rysunku 1 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego dla elementów przepływowych zgodnego z ISO 6358 [8].



Rys. 1. Układ stanowiska pomiarowego wg ISO 6358  
Fig. 1. Layout of the measurement stand according to ISO 6358

Zgodnie z ISO 6358 [8] oraz ISO/DIS 6358 [14], w celu wyznaczenia wartości krytycznego stosunku ciśnień  $b$  (przy założonym  $a = 1$ ) należy:

- dla przepływu ustalonego w warunkach krytycznych dokonać pomiaru wartości: strumienia masy  $m$ , temperatury  $T_0$  oraz ciśnienia  $p_1$  i  $p_2$  (bądź  $\Delta p$ );
- przyjmując  $Y(\eta) = 1$  wyznaczyć wartość  $C$  z (1);
- wykorzystując zawór dławiący do zmiany wartości ciśnienia  $p_2$  dokonać pomiarów wartości:  $T_0$ ,  $p_1$  i  $p_2$  dla strumieni masy równych kolejno około 80%, 60%, 40% i 20% (wg [8]) bądź 90%, 80%, 60% i 40% (wg [14]) krytycznego strumienia masy;
- wyznaczyć wartość  $b$ , zgodnie z [8], jako średnią arytmetyczną z wartości wyznaczonych dla 4 punktów pomiarowych z wykorzystaniem wzorów (1) i (2) bądź, zgodnie z [14], minimalizując funkcję celu o postaci (w tym przypadku wyznaczany jest jednocześnie współczynnik ekspansji  $m$ ):

$$e = \sum_{i=1}^4 \left\{ \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_k} - \left[ 1 - \left( \frac{\eta_i - b}{1 - b} \right)^2 \right]^m \right\}^2. \quad (4)$$

## 3. Wyznaczanie wartości $b$ - przykład 1

Objektem badań jest hipotetyczny element pneumatyczny o charakterystyce przepływowej idealnie zgodnej z formułą przedstawioną w ISO 6358 [8], którego oporność opisują: przewodność dźwiękowa  $C = 10^{-7} \text{ s} \cdot \text{m}^4/\text{kg}$  i krytyczny stosunek ciśnień  $b = 0,350$ . W trakcie eksperymentu wartości ciśnienia statycznego i temperatury spiętrzenia gazu przed elementem nie zmieniały się i wynosiły:  $p_1 = 7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  i  $T_0 = 293,15 \text{ K}$ .

Jako efekt pomiarów (eksperyment numeryczny) wykonanych zgodnie z metodyką podaną w normach [8] i [14], po przetworzeniu uzyskanych danych, otrzymano 5 punktów funkcji ekspansji w zakresie przepływu podkrytycznego – tab. 1.

Tab. 1. Pomierzone punkty funkcji ekspansji  
Tab. 1. The measured expansion function points

Lp.	$\eta$	$Y(\eta)$
1	0,63286	0,90035
2	0,74000	0,80000
3	0,87000	0,60000
4	0,94571	0,40007
5	0,98714	0,19791

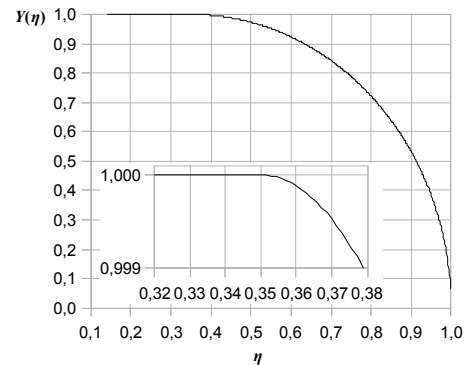
Zgodnie z metodyką podaną w ISO 6358 [8] (punkty pomiarowe 2 – 5) wyznaczono wartość  $b = 0,350$ . Tę samą wartość uzyskano przyjmując do obliczeń punkty 1 – 4.

Zgodnie z metodyką podaną w ISO/DIS 6358 [14] (punkty pomiarowe 1 – 4) wyznaczono wartości:  $b = 0,350$  oraz  $m = 0,500$ . Te same wartości uzyskano przyjmując do obliczeń punkty 2 – 5.

Następnie wykonano symulację procesu izotermicznego opróżniania zbiornika przez badany element pneumatyczny z pomiarem

ciśnien  $p_1$  i  $p_2$ . Uzyskane dane przetworzono tworząc wykres (rys. 2) funkcji ekspansji  $Y(\eta)$ .

Wykorzystując stworzony wykres (rys. 2), a dokładniej jego powiększony fragment, wybrano punkt prawdopodobnego przejścia przepływu podkrytycznego w krytyczny i odczytano przybliżoną wartość stosunku ciśnień  $b \approx 0,345$ .



Rys. 2. Funkcja ekspansji  $Y(\eta)$  analizowanego elementu pneumatycznego  
Fig. 2. Expansion function  $Y(\eta)$  of the analysed pneumatic circuit

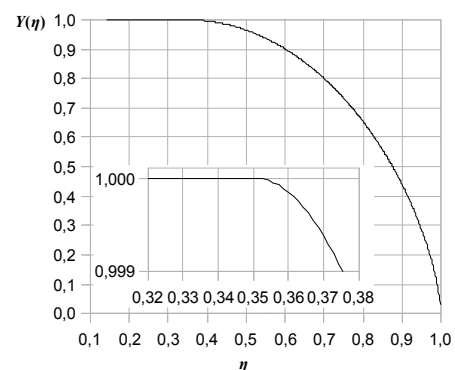
## 4. Wyznaczanie wartości $b$ - przykład 2

Objektem badań jest hipotetyczny element pneumatyczny o charakterystyce przepływowej idealnie zgodnej z formułą przedstawioną w ISO 6953 [12], którego oporność opisują: przewodność dźwiękowa  $C = 10^{-7} \text{ s} \cdot \text{m}^4/\text{kg}$ , krytyczny stosunek ciśnień  $b = 0,350$ , indeks ekspansji  $m = 0,650$  i czopujący stosunek ciśnień  $a = 1,000$ . W trakcie eksperymentu wartości ciśnienia statycznego i temperatury spiętrzenia gazu przed elementem nie zmieniały się i wynosiły:  $p_1 = 7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  oraz  $T_0 = 293,15 \text{ K}$ .

Jako efekt pomiarów (eksperyment numeryczny) wykonanych zgodnie z metodyką podaną w normach [8] i [14], po przetworzeniu uzyskanych danych, otrzymano 5 punktów funkcji ekspansji w zakresie przepływu podkrytycznego – tab. 2.

Tab. 2. Pomierzone punkty funkcji ekspansji  
Tab. 2. The measured points of expansion function

Lp.	$\eta$	$Y(\eta)$
1	0,60143	0,90001
2	0,70000	0,80046
3	0,83000	0,59911
4	0,91571	0,39819
5	0,97143	0,20294



Rys. 3. Funkcja ekspansji  $Y(\eta)$  analizowanego elementu pneumatycznego  
Fig. 3. Expansion function  $Y(\eta)$  of the analysed pneumatic circuit

Zgodnie z metodyką podaną w ISO 6358 [8] (punkty pomiarowe 2 – 5) wyznaczono wartość  $b = 0,281$ . Przyjmując do obliczeń punkty 1 – 4 uzyskuje się wartość  $b = 0,259$ .

Zgodnie z metodyką podaną w ISO/DIS 6358 [14] (punkty pomiarowe 1 – 4) wyznaczono wartości:  $b = 0,350$  oraz  $m = 0,650$ . Te same wartości uzyskano przyjmując do obliczeń punkty 2 – 5.

Następnie wykonano procedurę jak w przykładzie 1 wyznaczając przebieg funkcji ekspansji  $Y(\eta)$  (rys. 3) i odczytując przybliżoną wartość stosunku ciśnień  $b \approx 0,342$ .

### 5. Wyznaczanie wartości $b$ - przykład 3

Objektem badań jest hipotetyczny element pneumatyczny o charakterystyce przepływowej idealnie zgodnej z formułą przedstawioną w EN 60534 [16] i PN-EN 60534 [17], którego oporność opisują: współczynnik wymiarowy  $K_V = 2,3 \text{ m}^3/\text{h}$  oraz współczynnik  $x_T = 0,65$ . Przyjęta wartość  $x_T$  odpowiada wartości  $b = 0,35$ . (wynika to z porównania definicji  $x_T$  [16] oraz  $b$  [8]). W trakcie eksperymentu wartości ciśnienia statycznego i temperatury spiętrzenia gazu przed elementem nie zmieniały się i wynosiły:  $p_1 = 7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  oraz  $T_0 = 293,15 \text{ K}$ .

Jako efekt pomiarów (eksperyment numeryczny) wykonanych zgodnie z metodyką podaną w normach [8] i [14], po przetworzeniu uzyskanych danych, otrzymano 5 punktów funkcji ekspansji w zakresie przepływu podkrytycznego – tab. 3.

Tab. 3. Pomierzone punkty funkcji ekspansji

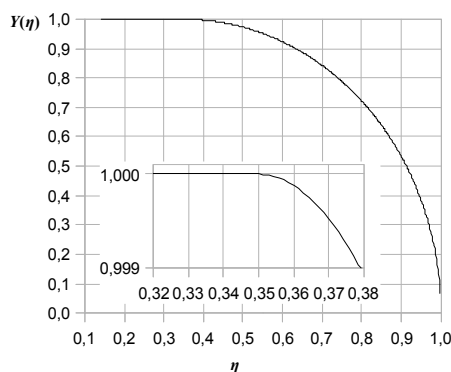
Tab. 3. The measured expansion function points

Lp.	$\eta$	$Y(\eta)$
1	0,65429	0,90000
2	0,76000	0,79929
3	0,88143	0,60170
4	0,95143	0,39983
5	0,98857	0,19773

Zgodnie z metodyką podaną w ISO 6358 [8] (punkty pomiarowe 2 – 5) wyznaczono wartość  $b = 0,412$ . Przyjmując do obliczeń punkty 1 – 4 uzyskuje się wartość  $b = 0,404$ .

Zgodnie z metodyką podaną w ISO/DIS 6358 [14] (punkty pomiarowe 1 – 4) wyznaczono wartości:  $b = 0,384$  oraz  $m = 0,484$ . Przyjmując do obliczeń punkty 2 – 5 uzyskuje się wartości  $b = 0,381$  oraz  $m = 0,472$ .

Następnie wykonano procedurę jak w przykładach 1 i 2 odczytując przybliżoną wartość stosunku ciśnień  $b \approx 0,343$  (rys. 4).



Rys. 4. Funkcja ekspansji  $Y(\eta)$  analizowanego elementu pneumatycznego  
Fig. 4. Expansion function  $Y(\eta)$  of the analysed pneumatic circuit

### 6. Wyznaczanie wartości $b$ - przykład 4

Objektem badań jest rzeczywisty pneumatyczny zawór rozdzielający o nieznannej oporności wraz z podłączonymi do niego dwo-

ma jednometrowymi odcinkami poliuretanowych przewodów pneumatycznych o średnicy wewnętrznej 5,9 mm.

Eksperyment polegał na napełnieniu zbiornika o objętości 3,9 litra powietrzem przepływającym przez obiekt badań ze źródła o ciśnieniu  $p_0 = 12,298 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  oraz średniej temperaturze  $T_0 = 293,15 \text{ K}$ . W trakcie eksperymentu mierzono (z częstotliwością  $f = 1 \text{ kHz}$ ) i zapisywano ciśnienie w napełnianym zbiorniku  $p_Z$ .

Po przetworzeniu uzyskanych danych przy wykorzystaniu programu FCC [18] i metod podanych w [19] i [20] uzyskano dwa przebiegi: wartości liczby Macha  $M$  oraz wartości funkcji ekspansji  $Y$  (rys. 5) w funkcji stosunku ciśnień spiętrzenia  $\varepsilon$  (stosunek chwilowej wartości ciśnienia w zbiorniku  $p_Z$  do wartości ciśnienia zasilania  $p_0$ ). Na podstawie uzyskanych przebiegów, wyznaczono 5 punktów funkcji ekspansji w zakresie przepływu podkrytycznego oraz odpowiadające im wartości stosunku ciśnień  $\eta$  (tab. 4). Posłużono się zależnościami:

$$\varepsilon = \eta \cdot (1 + 0,2 \cdot M^2)^{-3,5} \quad (5)$$

$$M = \sqrt{2,5 \cdot \sqrt{1 + 0,8 \cdot v^2 \cdot (M_{max}^2 + 0,2 \cdot M_{max}^4)} - 1} \quad (6)$$

gdzie  $M_{max}$  to maksymalna wartość liczby Macha a  $v$  to stosunek chwilowego strumienia masy gazu do strumienia krytycznego

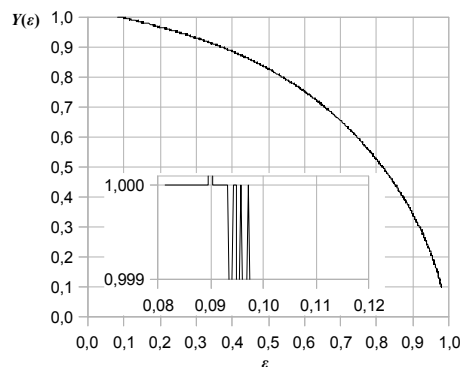
Tab. 4. Pomierzone punkty funkcji ekspansji

Tab. 4. The measured expansion function points

Lp.	$\eta$	$Y(\eta)$
1	0,37570	0,90187
2	0,54501	0,79845
3	0,75074	0,59980
4	0,87488	0,40130
5	0,95468	0,20028

Zgodnie z metodyką podaną w ISO 6358 [8] (punkty pomiarowe 2 – 5) wyznaczono wartość  $b = -0,543$ . Dla punktów 1 – 4 uzyskano  $b = -0,251$ .

Zgodnie z metodyką podaną w ISO/DIS 6358 [14] (punkty pomiarowe 1 – 4) wyznaczono wartości:  $b = -0,020$  oraz  $m = 0,615$ . Dla punktów 2 – 5 uzyskano wartości:  $b = -0,041$  oraz  $m = 0,557$ .

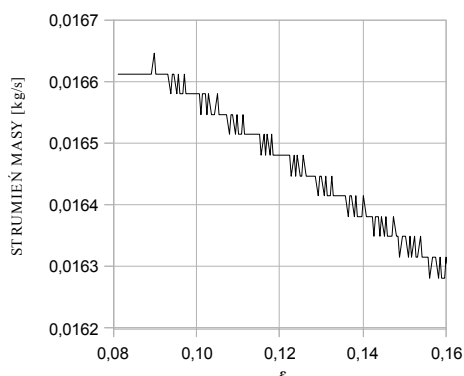


Rys. 5. Funkcja ekspansji  $Y(\varepsilon)$  analizowanego elementu pneumatycznego  
Fig. 5. Expansion function  $Y(\varepsilon)$  of the analysed pneumatic circuit

Ponieważ wszystkie wyznaczone wartości są ujemne, w praktyce w każdym przypadku przyjęto by, że wyznaczono  $b = 0,000$ .

Jako alternatywę, odczytano z wykresu (rys. 5) przybliżoną wartość stosunku ciśnień spiętrzenia  $\varepsilon_K \approx 0,093$  (rys. 4). Korzystając z zależności (5) przeliczono ją na przybliżoną wartość stosunku ciśnień statycznych  $b \approx 0,095$ .

Odczytanie wartości  $\varepsilon_K$  może budzić pewne wątpliwości ze względu na krótki odcinek stabilizacji przepływu oraz silną fluktuację wartości przy dojściu do punktu krytycznego. Rozwiązanie pierwszego problemu wymagałoby zastosowania wyższego ciśnienia zasilania. Drugi problem mógł ulec spotęgowaniu na skutek złożonych obliczeń numerycznych dla danych pomiarowych. Aby zmniejszyć związane z tym wątpliwości wykreślono zależność strumienia masy w funkcji stosunku ciśnień spiętrzenia  $\varepsilon$  (rys. 6).



Rys. 6. Masowe natężenie przepływu w funkcji stosunku ciśnień  $\varepsilon$   
Fig. 6. Mass flow rate as a function of pressure ratio  $\varepsilon$

Analiza tego wykresu wydaje się potwierdzać poprawność przyjęcia wartości  $\varepsilon_K \approx 0,093$ .

## 7. Wnioski

Normy ISO 6358 [8] i ISO 6953 [12] definiują krytyczny stosunek ciśnień  $b$  w sposób identyczny – jako taki stosunek ciśnień statycznych, przy którym przepływ gazu zmienia się z podkrytycznego w krytyczny. Jednak metodyki wyznaczania jego wartości podane w ISO 6358 i w ISO/DIS 6358 [14] (dla modelu ISO 6953) nie potwierdzają tej definicji.

W myśl ISO 6358 jest to średnia arytmetyczna wartości uzyskanych z wzoru (2) dla czterech określonych punktów charakterystyki przepływowej odpowiadających (około) 80%, 60%, 40% i 20% krytycznego strumienia masy. Określenie „około” jest o tyle istotne, że oddalenie się od tych punktów może skutkować zmianą, często dość znaczną, wartości wyznaczonego  $b$  – przykłady 2, 3 i 4.

W myśl ISO/DIS 6358 jest inaczej –  $b$  jest taką wartością stosunku ciśnień, która (wspólnie z indeksem ekspansji  $m$ ) najlepiej aproksymuje funkcję ekspansji (3) w czterech punktach odpowiadających (około) 90%, 80%, 60%, i 40% krytycznego strumienia masy. Odejście od tych punktów również skutkuje zmianą wyznaczonej wartości  $b$ , lecz znacznie mniejszą niż w przypadku ISO 6358 – przykłady 3 i 4.

W obu przypadkach wyznaczone wartości  $b$  odpowiadają wartościom referencyjnym (zgodnymi z definicją) wtedy i tylko wtedy, gdy charakterystyka przepływowa badanego elementu pneumatycznego jest idealnie zgodna ze wzorem (2) bądź (3) – przykłady 1 i 2. W każdym innym przypadku takiej zgodności nie ma, a wyznaczone wartości mogą dość znacznie odbiegać od referencyjnych – przykłady 2, 3 i 4.

Formalnie, model według ISO 6953 [12] opisany równaniami (1) i (3), po przyjęciu  $m = 1$  i  $a = 1$ , staje się modelem opisanym wzorami (1) oraz (2) i zgodnym z ISO 6358 [8]. W praktyce może jednak, ze względu na różniące się metody wyznaczania wartości  $b$  zgodnie z [8] i [14], dojść do następującej sytuacji: dla rzeczywistego elementu pneumatycznego, którego charakterystyka przepływowa nie jest idealnie zgodna z funkcją ekspansji (3) a czopujący stosunek ciśnień  $a_1 = 1$ , wyznaczono, zgodnie z [14],

wartości:  $m_1 = 0,5$  oraz  $b_1$ ; dla tego samego elementu wyznaczono wartość  $b_2$  zgodnie z [8] (domyślnie  $a_2 = 1$  i  $m_2 = 0,5$ ); pomimo identycznych wartości czopującego stosunku ciśnień ( $a_1 = a_2$ ) oraz identycznych wartości indeksu ekspansji ( $m_1 = m_2$ ) uzyskano różne wartości krytycznego stosunku ciśnień ( $b_1 \neq b_2$ ).

Pomierzona wartość zdefiniowanej wielkości fizycznej powinna zależeć jedynie od dokładności pomiaru. Wykonane eksperymenty wskazują, że w przypadku krytycznego stosunku ciśnień  $b$  zdefiniowanego w normach ISO 6358 [8] i ISO 6953 [12] tak nie jest. Istnieją tylko dwa możliwe wyjścia z opisanej sytuacji: zmiana definicji krytycznego stosunku ciśnień  $b$  podawana w normach bądź poszukiwanie alternatywnej metody wyznaczania jego wartości.

## 8. Literatura

- [1] Sanville F. E.: A new method of specifying the flow capacity of pneumatic fluid power valves. Hydr. Pneum. Power 17, 1971.
- [2] Sanville F. E.: A new method of specifying the flow capacity of pneumatic fluid power valves. Proc 2nd Fluid Power Symposium, Guildford, 1971.
- [3] CETOP RP 50 P. Durchfluss – Kennwert von Druckluft – Geräten, 1973.
- [4] ISO/TC – 131/SC – 8 (United Kingdom 6) 43. United Kingdom proposal on flow capacity measurement of pneumatic components.
- [5] ISO/TC – 131/SC – 8 (France 2) 47. A new method of determining the flow capacity of compressible fluid devices.
- [6] ISO/DIS 6358: 1983. Pneumatic fluid power. Method of tests. Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids.
- [7] ISO/DIS 6358.2: 1987. Pneumatic fluid power. Components using compressible fluids. Determination of flow-rate characteristics.
- [8] ISO 6358: 1989. Pneumatic fluid power. Components using compressible fluids. Determination of flow – rate characteristics.
- [9] PN-92/M-73763. Napędy i sterowanie pneumatyczne. Elementy pneumatyczne. Wyznaczanie parametrów przepływowych.
- [10] ISO 8778: 1990. Pneumatic fluid power. Standard reference atmosphere.
- [11] PN-92/M-73703. Napędy i sterowanie pneumatyczne. Elementy pneumatyczne. Znormalizowana atmosfera odniesienia.
- [12] ISO 6953: 2000. Pneumatic fluid power. Compressed air pressure regulators and filter-regulators.
- [13] ISO/WD 6358: 2005. Pneumatic fluid power. Components using compressible fluids. Determination of flow-rate characteristics (ISO/TC 131/SC 5).
- [14] ISO/DIS 6358: 2008. Pneumatic fluid power. Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids.
- [15] ISO/DIS 6358: 2009. Pneumatic fluid power. Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids.
- [16] EN 60534: 1998: Industrial – process control valves.
- [17] PN-EN 60534: 2001: Przemysłowe zawory regulacyjne.
- [18] Kiczowski T., Grymek Sz.: Program do wspomaganie obliczeń parametrów opisujących właściwości przepływowe elementów pneumatycznych. Pomiary Automatyka Kontrola. Vol. 54, nr 4, 2008.
- [19] Shapiro A. H.: The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow. New York: The Ronald Press Company, 1953.
- [20] Grymek Sz.: Metoda pośrednia wyznaczania wartości współczynnika KV w pneumatyce. Pomiary Automatyka Kontrola. Vol. 56, nr 6, 2010.