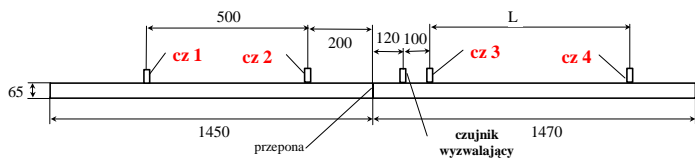


Ćwiczenie

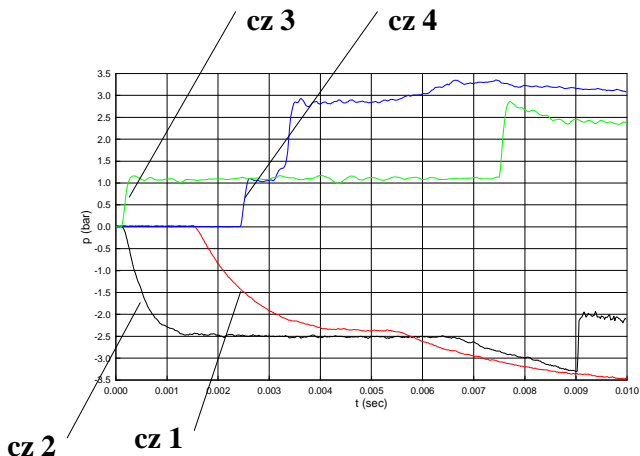
Fale ciśnieniowe w gazach – sprawozdanie

Schemat rury uderzeniowej



1. Przykładowe wyniki pomiarów ciśnienia

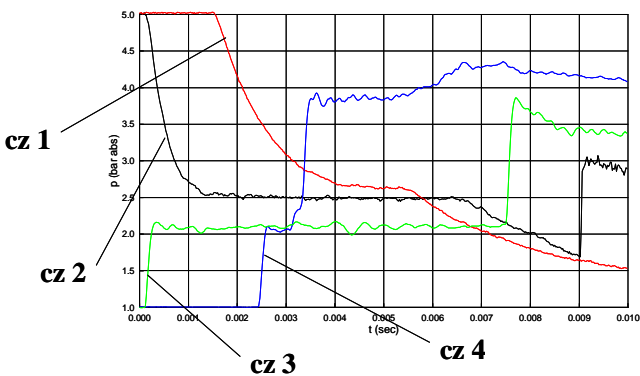
($p_{cz wys} = 4$ bar nadciśnienia, cz-czujnik ciśn.)



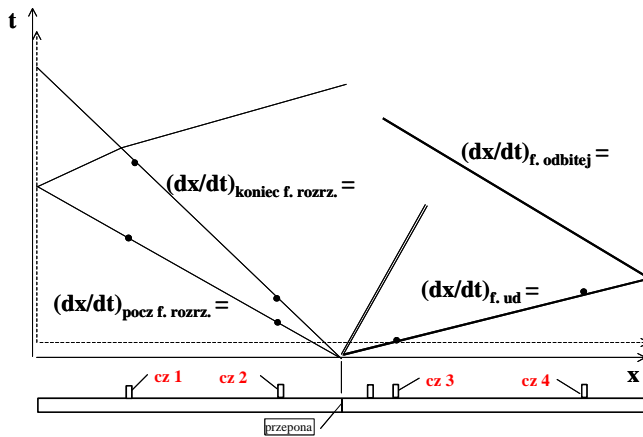
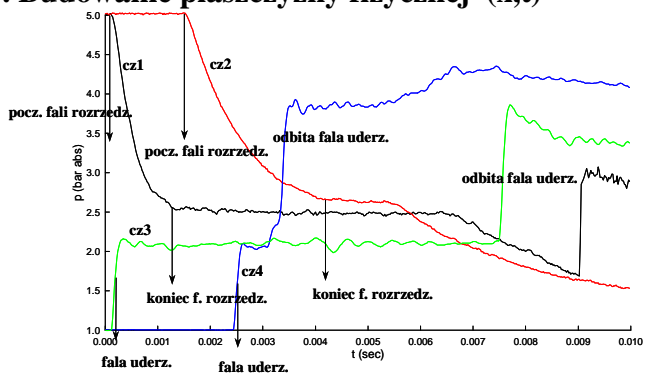
2. Skorygowane wyniki pomiarów ciśnienia

$$p_{cz wys ca\kappa} = p + 4 + p_a = p + 5 \text{ (bar ca\kappa)}$$

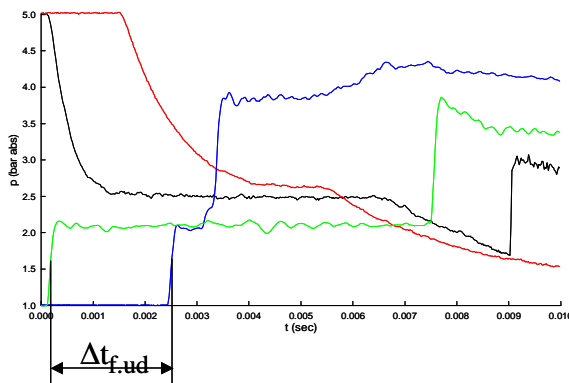
$$p_{cz niskoc ca\kappa} = p + p_a = p + 1 \text{ (bar ca\kappa)}$$



3. Budowanie płaszczyzny fizycznej (x,t)



4. Liczba Macha fali uderzeniowej wynikająca z prędkości fali



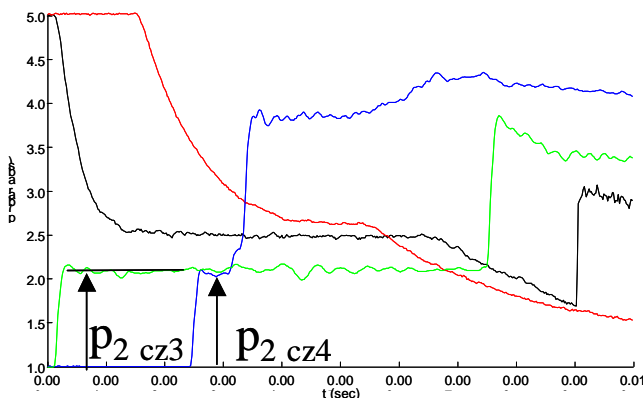
$$W_{f. ud} = W_1 = DL_{3-4} / Dt_{f. ud}$$

$$M_s = M_{f. ud} = W_{f. ud} / a_{przed fala}$$

$$a_{przed fala} = a_a = (kRT_a)^{1/2}$$

5. Liczba Macha fali uderzeniowej wynikająca ze zmierzonego przyrostu ciśnienia p_2/p_1

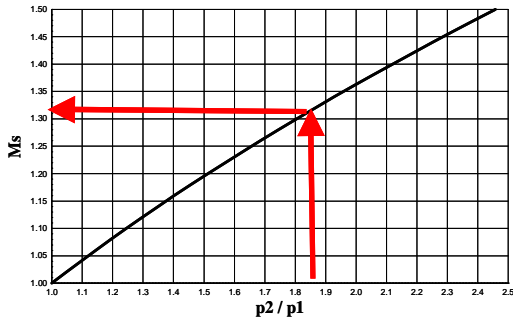
(oznaczenia numerowe poszczególnych stanów odpowiadają rys. 15 w instrukcji do ćwiczenia)



$$p_{2 sr} = (p_{2 cz3} + p_{2 cz4}) / 2$$

$$p_1 = 1 \text{ bar}$$

$$p_2/p_1 = \dots \rightarrow (\text{wykres}) \rightarrow M_s = \dots$$

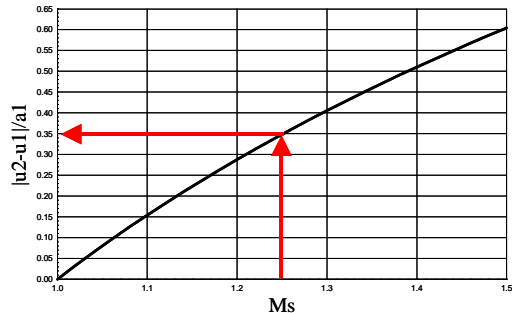


Tę wartość M_{s1} porównujemy z uzyskaną z prędkości (pkt.4).
Do dalszych obliczeń możemy przyjąć wartość średnią.

6. Parametry gazu za falą uderzeniową (u_2 , a_2 , T_2 , ρ_2)

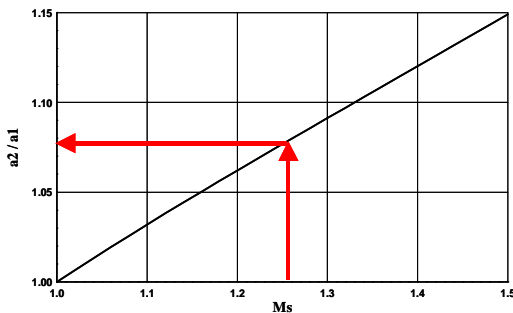
Dla znanego M_s odczytujemy z wykresów i obliczamy

$M_s \rightarrow$ wykres $\rightarrow |u_2 - u_1| / a_1 = \dots$



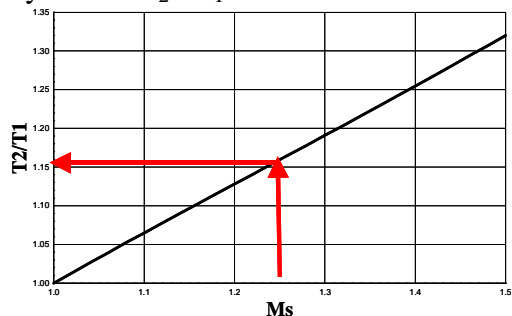
$a_1 = a_a$, $u_1 = 0 \rightarrow u_2 = \dots$

$M_s \rightarrow$ wykres $\rightarrow a_2 / a_1 = \dots$



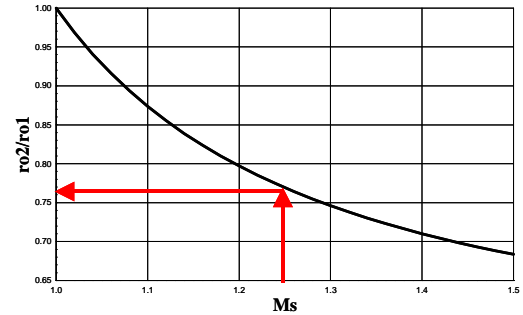
$a_1 = a_a \rightarrow a_2 = \dots$

$M_s \rightarrow$ wykres $\rightarrow T_2 / T_1 = \dots$



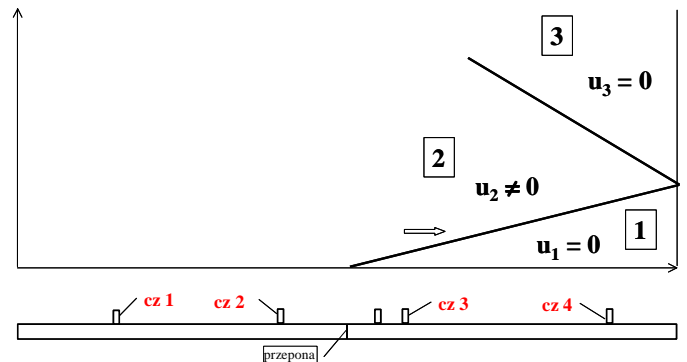
$T_1 = T_a$, $\rightarrow T_2 = \dots$

$M_s \rightarrow$ wykres $\rightarrow \rho_2 / \rho_1 = \dots$



$\rho_1 = p_1 / T_a$, $\rightarrow \rho_2 = \dots$

7. Odbicie fali uderzeniowej od zamkniętego zakończenia przewodu – schemat

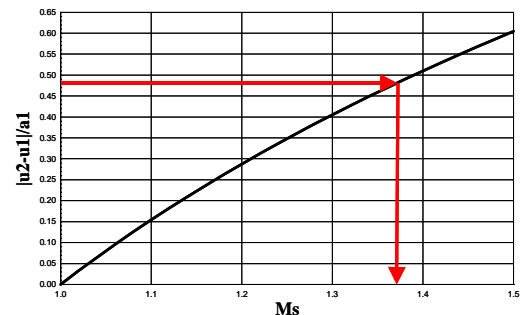


8. Liczba Macha odbitej fali uderzeniowej M_{s2}

Wykorzystujemy fakt, że po odbiciu fali uderzeniowej od zamkniętego zakończenia przewodu prędkość gazu $u_3 = 0$

obliczamy $|u_3 - u_2| / a_2 = \dots$

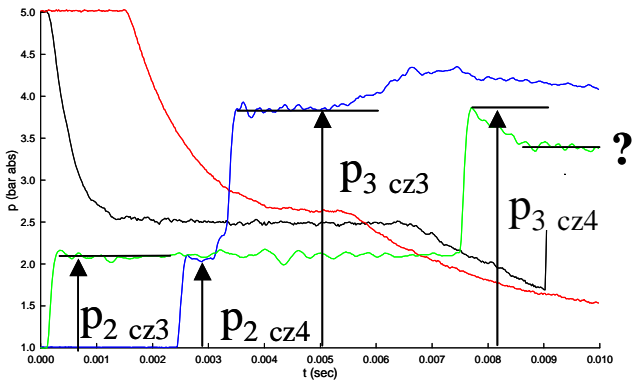
i odczytujemy dla fali odbitej $M_{s \text{ odb}} = M_{s2} = \dots$



W tym miejscu należy odpowiedzieć na pytanie, czy fala odbita jest:

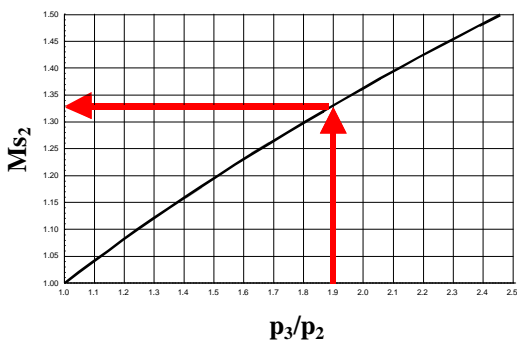
1. Silniejsza od fali padającej (jeśli $M_{s2} > M_{s1}$)
2. Słabsza od fali padającej (jeśli $M_{s2} < M_{s1}$)

9. Obliczamy wartość M_{s2} na podstawie zarejestrowanych przebiegów ciśnień



$$p_3 \text{ sr} = (p_3 \text{ cz3} + p_3 \text{ cz4}) / 2$$

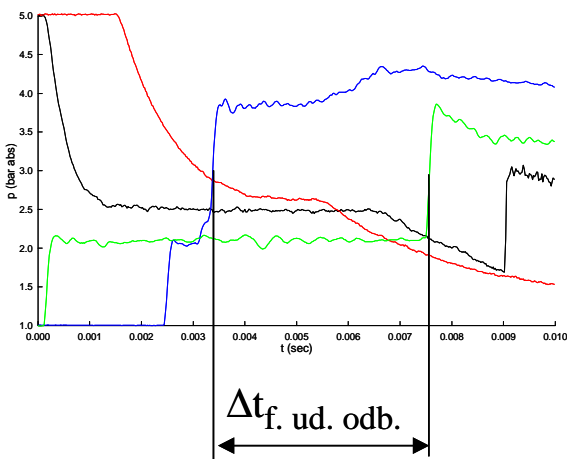
$$p_3/p_2 = p_3 \text{ sr} / p_2 \text{ sr} = \dots$$



$p_3/p_2 = \dots \rightarrow$ (wykres) $\rightarrow M_{s2} = \dots$

Tę wartość porównujemy z obliczoną w punkcie 9.

10. Obliczamy wartość M_{s2} na podstawie zarejestrowanych czasów przebiegów fali



W_f . Ud odbitej – prędkość względna fali

$$W_f \text{ Ud odbitej} = W_2 = DL_{3-4} / Dt_{f. ud. odbitej} + u_2$$

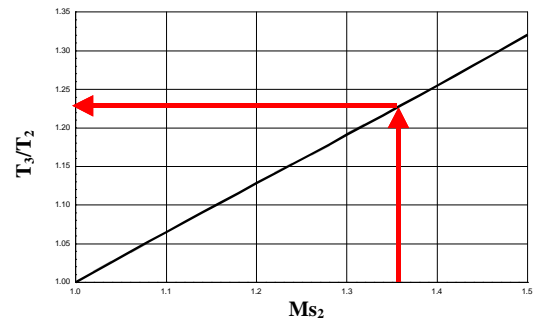
$$M_{s2} = M_{f. ud. odb.} = W_f \text{ Ud odbitej} / a_{\text{przed falą odbitą}} = \dots$$

$$a_{\text{przed falą odbitą}} = a_2$$

Tę wartość M_{s2} porównujemy z obliczoną w punkcie 9 i 10.

11. Parametry gazu za odbitą falą uderzeniową (T_3, r_{o3})

Dla znanego M_{s2} odczytujemy z wykresów i obliczamy



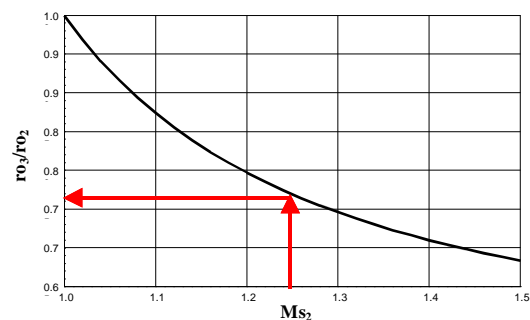
$M_{s2} \rightarrow$ wykres $\rightarrow T_3 / T_2 = \dots$

$T_3 = \dots$

Tę wartość porównujemy z temperaturą T_1

Obliczamy też $a_3 = (kRT_3)^{1/2} = \dots$

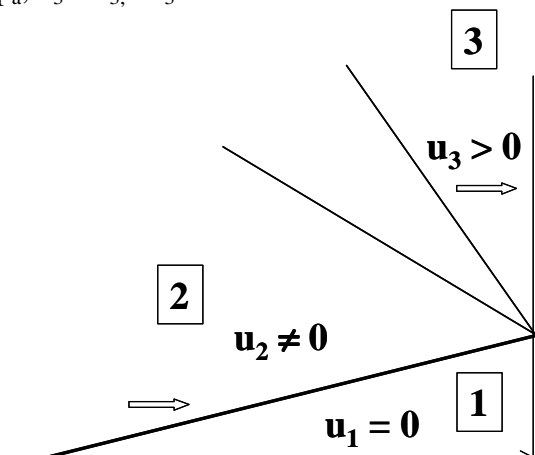
$M_{s2} \rightarrow$ wykres $\rightarrow r_{o3} / r_{o2} \rightarrow r_{o3} = \dots$



12. Odbicie fali uderzeniowej od otwartego zakończenia przewodu – są 2 przypadki

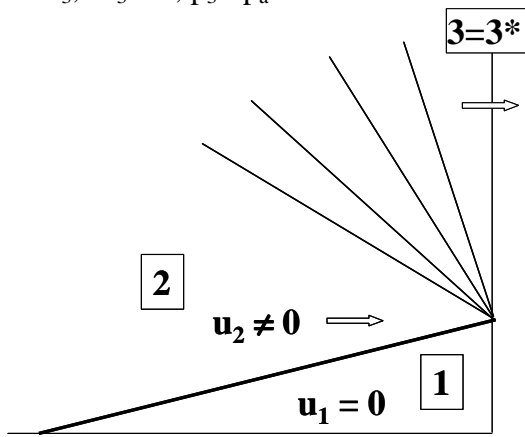
przypadek a)

$$p_3 = p_a, u_3 < a_3, M_3 < 1$$



przypadek b)

$$u_3 = u_* = a_3, M_3 = 1, p_3 = p_a$$



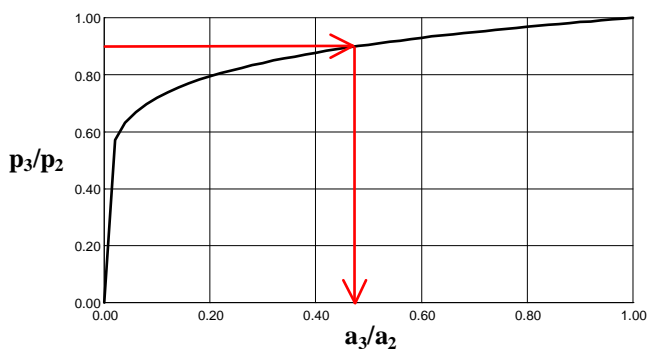
Przypadek a)

Zakładamy, że po odbiciu fali uderzeniowej od otwartego zakończenia przewodu ciśnienie w rurze osiąga wartość $p_3 = p_a$

Znając p_2 oraz a_2 i zakładając $p_3 = 1$ bar obliczamy a_3 (po przekształceniu zależności izentropowej albo z wykresu)

$$\frac{p_3}{p_2} = \left(\frac{a_3}{a_2} \right)^{\frac{2k}{k-1}}$$

$$a_3 = a_2 \cdot \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{2k}}$$



Ponieważ zaburzenia po odbiciu poruszają się „pod prąd” i są opisane równaniem

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{Ch-} = u - a$$

Zatem zależność pomiędzy parametrami gazu w stanach 2 i 3 opisana jest związkiem

$$u_2 + \frac{2}{k-1} a_2 = u_3 + \frac{2}{k-1} a_3$$

z którego wynika, że

$$u_3 = u_2 + 5(a_2 - a_3) \quad (\text{dla } k=1.4)$$

Sprawdzenie poprawności założenia:

Jeśli $u_3 < a_3$ to założenie jest poprawne i **KONIEC**.

Jeśli $u_3 > a_3$ to oznacza, że $M_3 > 1$. Ponieważ gaz na wylocie może się rozprężyć maksymalnie do $M = 1$ tzn. założenie było błędne i mamy do czynienia z przypadkiem b).

Obliczenia dla przypadku b)

Teraz zakładamy, że $u_3 = u_* = a_3$

Zależność

$$u_2 + \frac{2}{k-1} a_2 = u_3 + \frac{2}{k-1} a_3$$

przekształca się do postaci

$$u_2 + \frac{2}{k-1} a_2 = u_3 + \frac{2}{k-1} u_3 = u_3 \frac{k+1}{k-1}$$

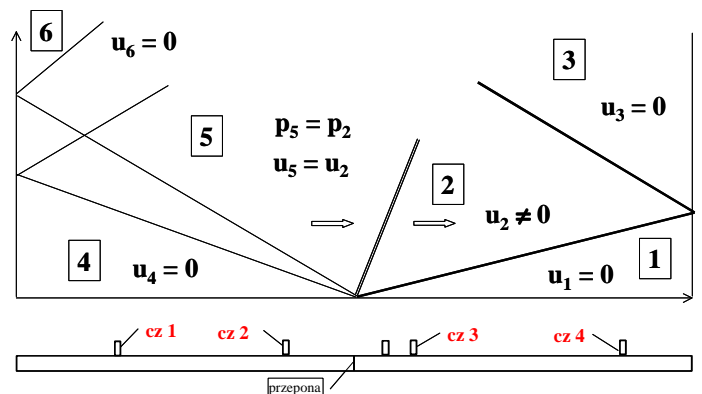
Skąd ostatecznie

$$u_3 = u_* = \frac{k-1}{k+1} u_2 + \frac{2}{k+1} a_2$$

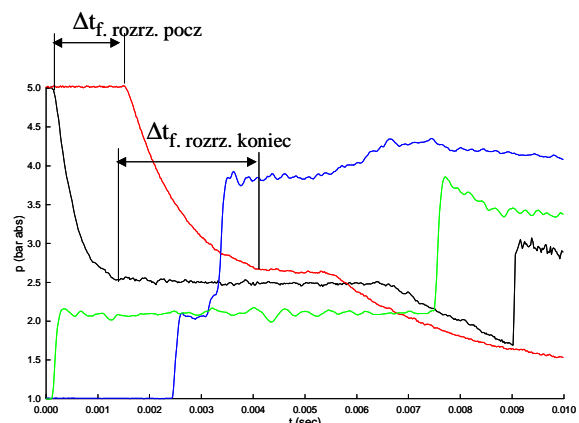
Obliczamy teraz ciśnienie p_3 po odbiciu fali (jest to ciśnienie na wylocie rury)

$$p_3 = p_* = p_2 \cdot \left(\frac{a_3}{a_2} \right)^{\frac{2k}{k-1}}$$

13. Odbicie fali rozrzedzeniowej od zamkniętego zakończenia przewodu - schemat



14. Prędkość fali rozrzedzeniowej



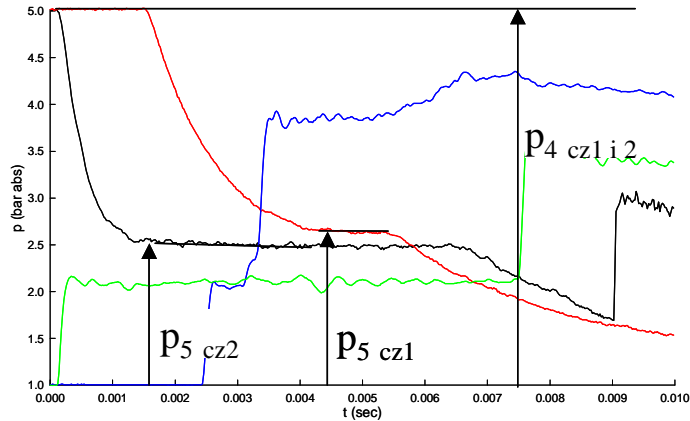
$$W_{f. \text{ rozrz. pocz}} = DL_{1-2} / Dt_{f. \text{ rozrz. pocz.}} = \dots$$

$$M_{f. \text{ rozrz. pocz}} = W_{f. \text{ rozrz. pocz}} / a_4 = \dots$$

$$a_4 = (kRT_4)^{1/2} = \dots$$

W tym miejscu należy podać wnioski dotyczące prędkości rozchodzenia się fali rozrzedzeniowej.

15. Obliczenie parametrów gazu po przejściu fali rozrzedzeniowej (a_5 , T_5 , ro_5) - związku izentropowe



$$p_{5 \text{ śr}} = (p_{5 \text{ cz1}} + p_{5 \text{ cz2}}) / 2$$

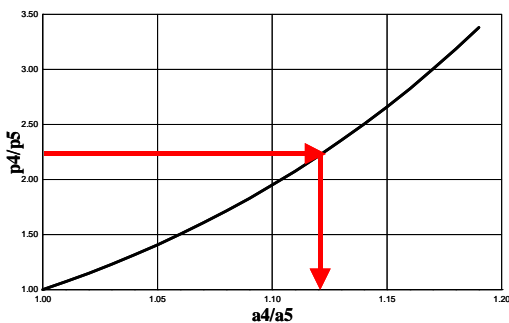
Ze wzoru

$$\frac{p_5}{p_4} = \left(\frac{a_5}{a_4} \right)^{\frac{2k}{k-1}} \quad \text{obliczamy dla } k = 1.4$$

$$a_5 = \dots$$

Albo odczytujemy z wykresu

$p_4 / p_{5 \text{ śr}} \rightarrow$ wykres $\rightarrow a_5/a_4$



Mając

$$a_4 = (kRT_4)^{1/2}$$

przyjmujemy $T_4 = T_a$, $R = 287 \text{ m}^2/(\text{s}^2\text{K})$

i obliczamy $\rightarrow a_5$

Z kolei wyznaczamy prędkość u_5

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{Ch-} = u - a$$

$$u_4 + \frac{2}{k-1} a_4 = u_5 + \frac{2}{k-1} a_5 = const$$

$$u_5 = 5(a_4 - a_5)$$

Tę wartość porównujemy z u_2 !

Mając a_5 obliczamy

$$T_5 = (a_5)^2 / (kR)$$

Tę wartość porównujemy z T_2 !

16. Wnioski końcowe

- dotyczące sposobu pomiaru szybkozmiennych ciśnień
- otrzymanych wyników