

11

Gaz doskonały - proces rozprężania w gazach doskonałych



Opracował: Bartosz Ziegler

1 Wstęp teoretyczny

1.1 Model gazu doskonałego

Gaz doskonały, to abstrakcyjny model matematyczny gazów, wykorzystywany do opisu ich stanu i przemian. Model ten, powstał w oparciu o szereg upraszczających założeń, takich jak:

- Gaz zbudowany jest z cząstek o wymiarach nieporównywalnie małych do odległości między cząstkami (innymi słowy sumaryczna objętość cząstek jest znikoma w stosunku do objętości gazu)
- Cząstki tworzące gaz są w chaotycznym ruchu
- Cząstki zderzają się sprężysto ze sobą i ciałami w kontakcie z gazem (np. ścianami naczynia)
- Poza zderzeniami nie występują żadne inne oddziaływania pomiędzy cząsteczkami

Podstawowym równaniem modelu, opisującym wzajemne zależności parametrów gazu jest równanie Clapeyrona, zwane też równaniem stanu gazu doskonałego. Równania stanu, to równania definiujące zależności pomiędzy parametrami które zachowane muszą być dla dowolnego stanu (tj. zakresu parametrów termodynamicznych) modelowego gazu. Równanie stanu gazu doskonałego zapisane dla parametrów ekstensywnych to:

$$pV = n(MR)T \quad (1.1)$$

Gdzie: p – ciśnienie; V – objętość, n – molowa ilość gazu, (MR) – uniwersalna stała gazowa ($(MR) = 8,31446 \dots \frac{J}{mol \cdot K}$), T – temperatura gazu.

Równanie to ma wiele form. Uniwersalna stała gazowa jest w nim zapisana w formie iloczynu (MR) gdyż zapis ten jest kompatybilny z często przydatniejszą w naukach inżynierskich formą:

$$pV = mRT \quad (1.2)$$

Gdzie: p – ciśnienie; V – objętość, m – masa gazu, R – indywidualna stała gazowa ($R = \frac{(MR)}{M}$, gdzie M to masa molowa gazu), T – temperatura gazu.

Praktyczność drugiej formy wynika przede wszystkim z faktu wykorzystania w równaniu masy, parametru niezwykle istotnego w mechanice i łatwiej mierzalnego aniżeli liczba moli gazu. Formą również przydatną równania stanu gazu doskonałego jest postać intensywna równania (powstała po podzieleniu równania 1.2 przez masę gazu).

$$pv = RT \quad (1.3)$$

Gdzie: p – ciśnienie; v – objętość właściwa gazu, R – indywidualna stała gazowa, T – temperatura gazu.

1.2 Ważniejsze przemiany gazu doskonałego

Wśród przemian gazu doskonałego, wyróżnia się kilka charakterystycznych. Grupą takich charakterystycznych przemian są przemiany z zachowaniem stałej wartości jednego z trzech występujących w równaniu stanu parametrów termodynamicznych. Dla określonej ilości gazu, równanie stanu gazu 1.2 przekształcić można do postaci :

$$\frac{pV}{T} = mR \quad (1.4)$$

Prawa strona równania 1.4 jest stała, tak więc dla określonej ilości (masy) gazu doskonałego zapisać można:

$$\frac{pV}{T} = idem \quad (1.5)$$

Dla powyższego, przyjmując stałość dowolnego parametru uzyskuje się :

$$\text{Dla } V=idem \text{ (przemiana izochoryczna)} \quad \frac{p}{T} = idem$$

$$\text{Dla } p=idem \text{ (przemiana izobaryczna)} \quad \frac{V}{T} = idem$$

$$\text{Dla } T=idem \text{ (przemiana izotermiczna)} \quad pV = idem$$

Ostatnią charakterystyczną przemianą istotną dla tego ćwiczenia laboratoryjnego jest przemiana izentropowa (o stałej entropii). Entropia jest jedną z funkcji stanu, jej zmianę w termodynamice klasycznej definiuje się jako:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1.6)$$

Gdzie: dS – różniczka entropii, dQ – różniczka ciepła, T – temperatura

Zgodnie z drugą zasadą termodynamiki, entropia nie maleje $dS \geq 0$. Przypadkiem szczególnym i jednocześnie jedyną teoretycznie odwracalną przemianą jest przemiana izentropowa $dS=0$ (zgodnie z równaniem 1.6 przekłada się to na $dQ=0$). Dla modelu gazu doskonałego, określić można również dwie funkcje stanu o charakterze energetycznym, tj. energię wewnętrzną U oraz entalpię H . W modelu gazu doskonałego, energia wewnętrzna jest proporcjonalna do temperatury (gdyż temperatura określa średnią energię kinetyczną cząstek a innych energii nie bierze się pod uwagę w tym modelu). Współczynnikiem proporcjonalności jest tu ciepło właściwe przy stałej objętości C_v . Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki:

$$dU = dW + dQ = d(mC_vT) = mC_vdT \quad (1.7)$$

Różniczka pracy wykonanej nad układem wynosi:

$$dW = -pdV \quad (1.8)$$

Dla izentropowej przemiany mamy poza tym $dQ=0$. Stąd dla $dS=0$:

$$C_vdT = -pdV \quad (1.9)$$

Z definicji, entalpia jest energią wewnętrzną U powiększoną o pracę potrzebną dla „zaistnienia” (np. wtłoczenia gazu do) gazu w otoczeniu o równym mu ciśnieniu.

$$H = U + pV \quad (1.10)$$

Biorąc pod uwagę równanie Clapeyrona i równanie 1.7 :

$$H = mC_vT + mRT = m(C_v + R)T$$

Stała wartość w nawiasie C_v+R jest ciepłem właściwym przy stałym ciśnieniu C_p .

Różniczka entalpi wynosi więc:

$$dH = dU + pdV + Vdp = mC_pdT \quad (1.11)$$

Podstawiając 1.8 do równań 1.7 i 1.11 a także uwzględniając że dla przemiany izentropowej $dQ=0$ mamy

$$mC_pdT = Vdp$$

$$mC_vdT = -pdV$$

Dzieląc przez siebie powyższe równania uzyskujemy stałą wartość $C_p/C_v=\kappa$

$$\kappa = -\frac{V}{p} \frac{dp}{dV}$$

Stąd:

$$\kappa \frac{dV}{V} = -\frac{dp}{p} \quad (1.12)$$

Całkując obustronnie równanie 1.12 otrzymujemy:

$$\ln(V^\kappa) = -\ln(p) + C$$

Gdzie C – stała całkowania. Przenosząc logarytm naturalny ciśnienia na lewą stronę i opuszczając logarytmy otrzymujemy najbardziej powszechną postać równania przemiany izentropowej gazu doskonałego:

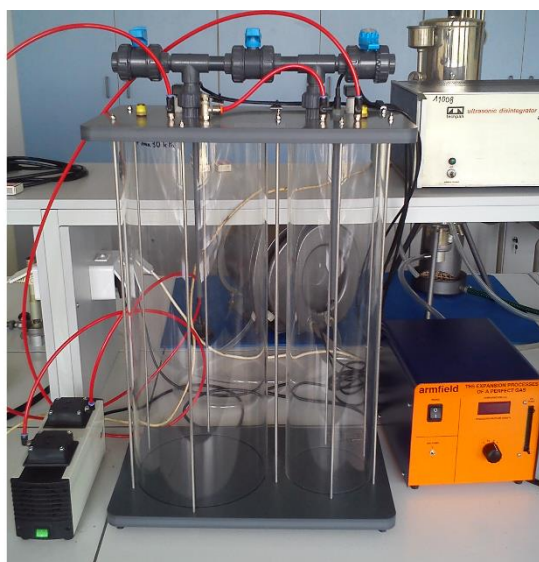
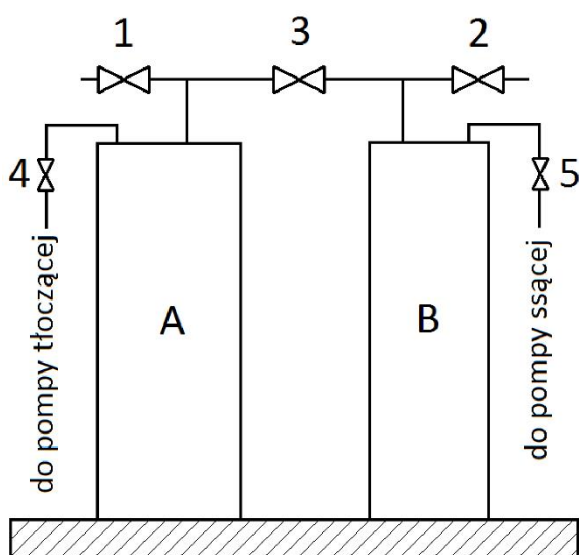
$$pV^\kappa = e^C = \text{idem} \quad (1.13)$$

Powyższe równanie pokazuje, że bezwymiarowa wielkość κ , będąca stosunkiem ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu do ciepła właściwego przy stałej objętości jest także tzw. wykładnikiem izentropy. Nie wnikając głębiej w mechanizm z którego to wynika, wartości współczynnika κ dla gazów doskonałych wynoszą odpowiednio $5/3$ dla gazów jednoatomowych, $7/5$ dla gazów dwuatomowych, oraz $8/6$ dla gazów wieloatomowych (3 i więcej). Dla przemiany izentropowej gazu doskonałego, zależności pomiędzy parametrami na początku przemiany (indeksowane 1) i końcu przemiany (indeksowane 2), uwzględniając równanie izentropy i równanie stanu spełniają równanie:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (1.14)$$

2 Ćwiczenie laboratoryjne

Ćwiczenie laboratoryjne, składa się z dwóch części. Pierwsza część ma na celu wyznaczenie wykładnika izentropy - κ dla powietrza. Celem drugiej części, jest wyznaczenie stosunku objętości dwóch zbiorników poprzez pomiar zmian parametrów termodynamicznych w ich wnętrzach. Pierwszą część ćwiczenia polega na ustaleniu w zbiorniku A lub B (patrz rys. 1) ciśnienia różnego od atmosferycznego i pozwoleniu na dojście gazu w zbiorniku do równowagi termicznej z otoczeniem. Następnie szybko otwierając i zamykając zawór 1 lub 2 (rys. 1) wyrównuje się ciśnienie z ciśnieniem otoczenia. Zachodzące po otwarciu zaworu sprężanie bądź rozprężanie gazu następuje w stosunkowo krótkim czasie (pomijalność wymiany ciepła z otoczeniem) i zakłada się że przemiana jest w przybliżeniu izentropowa. Po zamknięciu zaworu pozwala się by zbiornik ponownie doszedł do równowagi termicznej z otoczeniem.



Rys. 1 Schemat stanowiska pomiarowego

W drugiej części ćwiczenia pompuje się oba zbiorniki do różnych ciśnień, pozwala osiągnąć równowagę termiczną z otoczeniem a następnie otwiera zawór 3 i po wyrównaniu ciśnień ponownie pozwala osiągnąć równowagę termiczną z otoczeniem.

2.1 Wyznaczanie wykładnika izentropy powietrza.

W tym ćwiczeniu, po zamknięciu zaworów 1 i 3 uruchamia się pompę, która tłoczy powietrze przez otwarty zawór 4 do zbiornika A. Zmiany nadciśnienia w zbiorniku A monitoruje się ustawiając przełącznik układu pomiarowego w pozycji P (ang. pressure). Po osiągnięciu wybranej wartości ciśnienia (mniejszej aniżeli 30 kPa) należy wyłączyć pompę i zamknąć zawór 4 (aby uniknąć przecieków przez pompę). Następnie należy przełączyć układ pomiarowy w pozycję T1 i obserwować zmiany temperatury w zbiorniku A. Wskazanie temperatury wyświetlane jest pod postacią rezystancji termistora umieszczonego we wnętrzu zbiornika. Gdy wskazania T1 ustalą się, powietrze w zbiorniku osiągnęło równowagę termiczną z otoczeniem a więc jego temperatura równa jest temperaturze otoczenia. Na tym etapie należy odnotować wskazanie T1 oraz nadciśnienie p_1 (przełącznik w pozycji „P”). Ciśnienie absolutne jest sumą wskazanego nadciśnienia i ciśnienia atmosferycznego:

$$p_{1abs} = p_1 + p_{atm} \quad (2.1)$$

Kolejnym krokiem jest blisko izentropowe rozprężenie gazu. Odbywa się ono poprzez szybkie całkowite otwarcie i zamknięcie zaworu 1. W wyniku tego rozprężenia temperatura wewnątrz zbiornika spada a ciśnienie wyrównuje się z ciśnieniem otoczenia.

$$p_{2abs} = p_{atm} \quad (2.2)$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_{atm}}{p_{1abs}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_{ot} \left(\frac{p_{atm}}{p_{1abs}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (2.3)$$

Po zamknięciu zaworu 1, izochorycznie, powietrze w zbiorniku powraca do temperatury otoczenia. Proces ten monitorujemy obserwując ponownie wskazania oporności termistora wskazywanej w położeniu T1 przełącznika sterującego pomiarami. Gdy ciepło dostarczane jest z otoczenia, temperatura w zbiorniku A rośnie do temperatury otoczenia. Proporcjonalnie rośnie też ciśnienie. Gdy wskazanie temperatury ustali się w pobliżu wartości T_1 (wskazanie T1 po poprzednim ustaleniu równowagi termicznej). Dokonujemy odczytu nadciśnienia p_3 (przełącznik w pozycji „P”)

W procesie izochorycznym ciśnienie wzrosło od ciśnienia otoczenia do wartości p_{3abs} zgodnie z zależnością:

$$p_{3abs} = p_{atm} \frac{T_{ot}}{T_2} \quad (2.4)$$

Gdzie: $p_{3abs} = p_3 + p_{atm}$

Przyrównując stosunki (T_2/T_{ot}) z równań 2.3 i 2.4 otrzymujemy:

$$\left(\frac{p_{atm}}{p_{1abs}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{p_{atm}}{p_{3abs}} \quad (2.5)$$

Logarytmując obie strony równania 2.5:

$$\frac{\kappa-1}{\kappa} \ln \left(\frac{p_{atm}}{p_{1abs}} \right) = \ln \left(\frac{p_{atm}}{p_{3abs}} \right) \quad (2.6)$$

Po kilku prostych przekształceniach uzyskuje się wzór dla określania κ :

$$\kappa = \frac{\ln p_{1abs} - \ln p_{atm}}{\ln p_{1abs} - \ln p_{3abs}} = \frac{\ln \left(\frac{p_{1abs}}{p_{atm}} \right)}{\ln \left(\frac{p_{1abs}}{p_{3abs}} \right)} \quad (2.7)$$

Procedurę tę należy ponowić dla zbiornika B. Przemianę izentropową indukujemy otwierając i zamykając zawór 2 (zamiast 1, patrz rys. 1.). Z sekcją ssącą pompy zbiornik połączony jest zaworem 5. Podobnie jak w przypadku pomiaru dla nadciśnienia, po wyłączeniu pompy zawór 5 należy zamknąć by uniknąć przecieków powietrza przez pompę. Dla tego zbiornika odczytujemy pośrednio temperatury powietrza ustawiając przełącznik w pozycji T2. Zamiast nadciśnień, odczytujemy podciśnienia - v (przełącznik w pozycji V od ang. „vacuum”) tak więc ciśnienia absolutne uzyskujemy odejmując wartość podciśnienia od ciśnienia atmosferycznego :

$$p_{abs} = p_{atm} - v \quad (2.8)$$

Gdzie: v – odczyt podciśnienia (przełącznik w pozycji „V”)

Dla pomiaru wykonywanego dla podciśnień wciąż obowiązują relacje 2.2 do 2.7 tak więc wykładnik izentropy jak poprzednio obliczamy korzystając ze wzoru 2.7.

2.2 Wyznaczenie stosunku objętości zbiorników A i B

W tej części ćwiczenia. Dla wyznaczenia stosunku objętości zbiorników, nie korzystamy przede wszystkim z równania Clapeyrona i zasady zachowania masy. W pierwszej kolejności oba zbiorniki pompowane są przy otwartych zaworach 4,5 i zamkniętych 1,2,3. W zbiorniku A powstaje nadciśnienie a w zbiorniku B podciśnienie. Po zakończeniu pompowania do bezpiecznej wartości ciśnienia (w zbiorniku A mniej niż 30 kPa nadciśnienia), zamyka się zawory 4 i 5 i odczekuje obserwując wskazania oporności termistorów T1 i T2 aż temperatury w obu zbiornikach się ustabilizują. Stabilizacja temperatury następuje gdy temperatury w obu zbiornikach wyrównają się w przybliżeniu z temperaturą otoczenia.

$$T_{1A} = T_{1B} = T_{ot} \quad (2.9)$$

Po osiągnięciu równowagi termicznej, szczytuje się wartości względne ciśnień w obu zbiornikach:

$$p_{1Aabs} = p_{atm} + p_1 \quad (2.10)$$

$$p_{1Babs} = p_{atm} - v_1 \quad (2.11)$$

W tym stanie masy powietrza w zbiornikach wynoszą odpowiednio (z równania 1.2)

$$m_{1A} = V_A \frac{p_{1Aabs}}{RT_1} = V_A \frac{p_{1Aabs}}{RT_{ot}} \quad (2.12)$$

$$m_{1B} = V_B \frac{p_{1Babs}}{RT_1} = V_B \frac{p_{1Babs}}{RT_{ot}} \quad (2.13)$$

Kolejnym punktem ćwiczenia, jest połączenie obu zbiorników poprzez otwarcie zaworu 3 (rys. 1). Po połączeniu część powietrza przepływa ze zbiornika A do zbiornika B a ciśnienia w obu zbiornikach wyrównują się osiągając wartość p_{2abs} . Po ponownym ustabilizowaniu się parametrów termodynamicznych (uzyskaniu równowagi termicznej z otoczeniem), odczytuje się końcowe nadciśnienie p_2 (przełącznik w pozycji „P”). Do obliczeń wykorzystuje się wartość ciśnienia absolutnego p_{2abs} :

$$p_{2abs} = p_{atm} + p_2 \quad (2.14)$$

Z zasady zachowania masy wynika, że suma mas m_{1A} i m_{1B} równa jest masie powietrza w zbiorniku „połączonym”, przyrównując te masy, określone w sytuacjach równowagi termicznej z otoczeniem ($T_{2A}=T_{2B}=T_{ot}$):

$$\frac{V_A p_{1Aabs} + V_B p_{1Babs}}{RT_{ot}} = \frac{(V_A + V_B) p_{2abs}}{RT_{ot}} \quad (2.15)$$

Po szeregu przekształceń otrzymujemy wyrażenie pozwalające wyznaczyć stosunek objętości zbiorników:

$$\frac{V_A}{V_B} = \frac{p_{2abs} - p_{1Babs}}{p_{1Aabs} - p_{2abs}} \quad (2.16)$$

3 Przebieg pomiarów

3.1 Wyznaczanie stosunku ciepła właściwych (wykładnika izentropy) przy pomocy zbiornika A (pompowanego do nadciśnień)

- Odczytanie ciśnienia atmosferycznego p_{atm} .
- Zamknięcie zaworów 1,3 otwarcie zaworów 2,4,5 (zawory 2 i 5 otwieramy by niepotrzebnie nie obciążać pompy ssącej).
- Przełączenie przełącznika pomiarowego do pozycji „P”.
- Uruchomienie pompy.

- e) Pompowanie do osiągnięcia wybranego nadciśnienia (ze względów bezpieczeństwa zaleca się nie przekraczać wartości nadciśnienia 30 kPa).
- f) Wyłączenie pompy i zamknięcie zaworu 4 dla uniemożliwienia przecieków.
- g) Przełączenie pomiarowy do pozycji T1, obserwacja zmian temperatury wewnątrz zbiornika.
- h) Po ustabilizowaniu wskazań T1, odnotować wskazanie T_1 (wartość rezystancji), następnie przełączyć pomiarowy do pozycji „P”. Odczyt wartości nadciśnienia p_1 .
- i) Szybkie otwarcie zaworu 1 (następuje wyrównanie ciśnień), i szybkie jego zamknięcie.
- j) Przełączenie pomiarowy do pozycji T1, obserwacja zmian temperatury. Wartość wskazań T1 powinna powrócić możliwie blisko wartości T_1 . Odnotowanie wskazania w pozycji T1 jako wartości T_2 (możliwe, że uzyskanie dokładnego powrotu temperatury do wartości T_1 będzie niemożliwe zwłaszcza biorąc pod uwagę ograniczony czas na wykonanie ćwiczenia laboratoryjnego. W takim wypadku za stan dostatecznie bliski równowadze termicznej z otoczeniem uznać można moment gdy przestanie zmieniać się wskazanie nadciśnienia – pozycja „P” przełącznika).
- k) Po ustaleniu równowagi termicznej, odczytanie wartości nadciśnienia p_2 .

3.2 Wyznaczanie stosunku ciepła właściwych (wykładnika izentropy) przy pomocy zbiornika B (pompowanego do podciśnień)

- a) Odczytanie ciśnienia atmosferycznego. Ponowne odczytanie może być konieczne, gdyż możliwe że występuje szybka zmiana ciśnienia atmosferycznego (zależne od warunków atmosferycznych) a zwłaszcza przy stosowaniu niedużych nadciśnień i podciśnień (p_1 , v_1) wyniki są bardzo wrażliwe na niedokładność oznaczenia ciśnienia atmosferycznego.
- b) Zamknięcie zaworów 2,3 otwarcie zaworów 1,4,5 (zawór dwa otwieramy by niepotrzebnie nie obciążać pompy tłoczącej).
- c) Przełączenie przełącznika pomiarowego do pozycji „V”.
- d) Uruchomienie pompy.
- e) Pompowanie do osiągnięcia wybranego podciśnienia (jak poprzednio, zaleca się nie przekraczanie wartości 30 kPa).
- f) Wyłączenie pompy i zamknięcie zaworu 5 dla uniemożliwienia przecieków.
- g) Przełączenie pomiarowy do pozycji T2, obserwacja zmian temperatury wewnątrz zbiornika.
- h) Po ustabilizowaniu wskazań T2, odnotować wskazanie T_1 (wartość rezystancji), następnie przełączyć pomiarowy do pozycji „V”. Odczyt wartości podciśnienia v_1 .
- i) Szybkie otwarcie zaworu 2 (następuje wyrównanie ciśnień), i szybkie jego zamknięcie.
- j) Przełączenie pomiarowy do pozycji T2, obserwacja zmian temperatury. Wartość wskazań T2 powinna powrócić możliwie blisko wartości T_1 . Odnotowanie wskazania w pozycji T2 jako wartości T_2 (możliwe, że uzyskanie dokładnego powrotu temperatury do wartości T_1 będzie niemożliwe zwłaszcza biorąc pod uwagę ograniczony czas na wykonanie ćwiczenia laboratoryjnego. W takim wypadku za stan dostatecznie bliski równowadze termicznej z otoczeniem uznać można moment gdy przestaną zmieniać się wskazania podciśnienia – pozycja „V” przełącznika).
- k) Po ustaleniu równowagi termicznej, odczytanie wartości podciśnienia v_2 .

3.3 Określenie stosunku objętości zbiorników:

- a) Odczytanie ciśnienia atmosferycznego (może być konieczne, wyjaśnienie w punkcie 3.2 a))
- b) Zamknięcie zaworów 1,2,3 otwarcie zaworów 4,5
- c) Przełączenie przełącznika pomiarowego do pozycji „P”.
- d) Uruchomienie pompy.
- e) Pompowanie do osiągnięcia wybranego nadciśnienia (jak poprzednio, zaleca się nie przekraczanie wartości 30 kPa).
- f) Wyłączenie pompy i zamknięcie zaworów 4,5 dla uniemożliwienia przecieków.

- g) Równoległa obserwacja wskazań T_1 i T_2
- h) Po ustabilizowaniu obu wskazań, odnotować wskazania T_{1A} , T_{1B} (wartości rezystancji), następnie przełącznik pomiarowy do pozycji „P”. Odczyt wartości nadciśnienia p_1 , następnie przełącznik pomiarowy do pozycji „V”. Odczyt wartości podciśnienia v_1 .
- i) Otwarcie zaworu 3 (następuje wyrównanie ciśnień).
- j) Równoległa obserwacja wskazań T_1 i T_2 , obserwacja zmian temperatur. Wartości wskazań powinny powrócić możliwie blisko wartości T_{1A} i T_{1B} . Odnotowanie wskazania w pozycji T_1 jako wartości T_{2A} i wskazania T_2 jako wskazania T_{2B} (możliwe, że uzyskanie dokładnego powrotu temperatur do wartości T_{1A} i T_{1B} będzie niemożliwe, zwłaszcza biorąc pod uwagę ograniczony czas na wykonanie ćwiczenia laboratoryjnego. W takim wypadku za stan dostatecznie bliski równowadze termicznej z otoczeniem uznać można moment gdy przestaną zmieniać się wskazania nadciśnienia – pozycja „P” przełącznika).
- k) Po ustaleniu równowagi termicznej, odczytanie wartości podciśnienia p_2 .

3.4 Pozostałe uwagi

- a) Temperatury odczytuje się pośrednio jako rezystancje termistorów. Właściwe wartości temperatur nie są wymagane gdyż doświadczenie zaprojektowane jest tak by wzory na wartości wyznaczane (równanie 2.7 i równanie 2.16) zależne były jedynie od ciśnień absolutnych (bezwzględnych).
- b) Wskazania T_1 i T_2 odnotowuje się przede wszystkim w celu określenia w jakim stopniu spełnione są warunki projektowe pomiaru (to jest równość temperatur T_1 i T_2). Mogą wystąpić różnice powodowane różnymi czynnikami, zmianą temperatury otoczenia, niedokładnym powrotem do stanu równowagi (wyrównywanie się temperatur jest procesem zbieżnym asymptotycznie i całkowite ich wyrównanie jest w teorii nieosiągalne)
- c) Należy mieć świadomość, że przemiany przybliżające izentropowe w rzeczywistości nie odpowiadają dokładnie izentropowej przemianie gazu doskonałego ze względu na fakt, iż powietrze jest gazem rzeczywistym a nie doskonałym a podczas tych procesów wydzielają się niewielkie ilości ciepła np. wskutek tarcia lepkiego w ruchomym płynie.
- d) Pożądanym elementem sprawozdania jest analiza błędów pomiaru pośredniego dla każdego z pomiarów (np. metodą różniczki zupełnej)

Kolejne dwie strony przedstawiają przykładowy szablon sprawozdania.

| | | |
|--|-------------|-----------------------|
| POLITECHNIKA POZNAŃSKA Instytut Energetyki Ciepłej ite.put.poznan.pl | | |
| Badanie modelu gazu doskonałego. Wyznaczanie wykładnika izentropy, określanie stosunku objętości zbiorników gazu | | |
| Imię i Nazwisko: | Nr indeksu: | Rok akademicki/Grupa: |
| Data wykonania: | Ocena: | Podpis prowadzącego: |

1. Wyznaczanie wykładnika izentropy dla nadciśnienia (zbiornik A):

Ciśnienie atmosferyczne $p_{atm} =$

| Ciśnienie: | Opis: | Pomiar: | | | | | |
|------------------|--|---------|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| p_1 | Nadciśnienie dla pierwszego stanu równowagi | | | | | | |
| p_2 | Nadciśnienie dla drugiego stanu równowagi | | | | | | |
| Wyniki obliczeń: | | | | | | | |
| p_{1abs} | Ciśnienie bezwzględne dla pierwszego stanu równowagi | | | | | | |
| p_{2abs} | Ciśnienie bezwzględne dla drugiego stanu równowagi | | | | | | |
| κ | Wykładnik izentropy | | | | | | |
| $\Delta\kappa$ | Błąd wyznaczenia κ | | | | | | |

Wartość średnia κ dla pomiarów w zakresie rozprężania

$$\bar{\kappa} =$$

2. Wyznaczanie wykładnika izentropy dla podciśnienia (zbiornik B):

Ciśnienie atmosferyczne $p_{atm} =$

| Ciśnienie: | Opis: | Pomiar: | | | | | |
|------------------|--|---------|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| v_1 | podciśnienie dla pierwszego stanu równowagi | | | | | | |
| v_2 | podciśnienie dla drugiego stanu równowagi | | | | | | |
| Wyniki obliczeń: | | | | | | | |
| p_{1abs} | Ciśnienie bezwzględne dla pierwszego stanu równowagi | | | | | | |
| p_{2abs} | Ciśnienie bezwzględne dla drugiego stanu równowagi | | | | | | |
| κ | Wykładnik izentropy | | | | | | |
| $\Delta\kappa$ | Błąd wyznaczenia κ | | | | | | |

3. Określenie stosunku objętości zbiorników:

Ciśnienie atmosferyczne $p_{atm} =$

| Ciśnienie: | Opis: | Pomiar: | | | | | |
|-------------------|--|---------|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| p_1 | Nadciśnienie dla pierwszego stanu równowagi, zbiornik B | | | | | | |
| v_1 | Podciśnienie dla pierwszego stanu równowagi, zbiornik B | | | | | | |
| p_2 | Nadciśnienie dla pierwszego stanu równowagi | | | | | | |
| Wyniki obliczeń: | | | | | | | |
| p_{1Aabs} | Ciśnienie bezwzględne dla pierwszego stanu równowagi zbiornik A | | | | | | |
| p_{1Babs} | Ciśnienie bezwzględne dla pierwszego stanu równowagi, zbiornik B | | | | | | |
| p_{2abs} | Ciśnienie bezwzględne dla drugiego stanu równowagi | | | | | | |
| V_A/V_B | Stosunek objętości zbiorników | | | | | | |
| $\Delta(V_A/V_B)$ | Błąd wyznaczenia V_A/V_B | | | | | | |

Wartość średnia stosunku objętości:

$$\overline{V_A/V_B} =$$

4. Wnioski i obserwacje: