

# Chłodnictwo i Kriogenika - Ćwiczenia

## Lista 4

dr hab. inż. Bartosz Zajączkowski  
bartosz.zajaczkowski@pwr.edu.pl

Politechnika Wrocławska  
Wydział Mechaniczno-Energetyczny  
Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych

1 października 2018

### 1 Zadania

**Uwaga:** Przy rozwiązywaniu poniższych zadań należy skorzystać z wykresów  $\log p - h$  dla czynników chłodniczych **R717** oraz **R134a**.

**Zad.1** Z wykresu  $\log p - h$ , odczytaj objętość właściwą czynnika **R134a**, przechowywanego pod ciśnieniem  $p = 6$  bar przy stopniu suchości odpowiednio  $x = 0.2$ ,  $x = 0.4$ ,  $x = 0.6$ ,  $x = 0.8$ . W podobny sposób dokonaj odczytu przy następujących parametrach:

- a)  $p = 8$  bar,  $x = 0.5$
- b)  $p = 4$  bar,  $x = 0.3$
- c)  $T = 50$  °C,  $x = 0.6$
- d)  $T = -20$  °C,  $x = 0.35$
- e)  $T = 0$  °C,  $x = 0.9$
- f)  $p = 0.8$  bar,  $x = 0.7$

**Zad.2** Z wykresu  $\log p - h$ , odczytaj temperaturę w jakiej znajduje się amoniak **R717**, którego stopień suchości oraz objętość właściwa wynoszą odpowiednio:

- a)  $x = 0.1$ ,  $v = 0.008$
- b)  $x = 0.3$ ,  $v = 0.070$
- c)  $x = 0.5$ ,  $v = 0.04$
- d)  $x = 0.7$ ,  $v = 0.2$

e)  $x = 0.4, v = 0.15$

f)  $x = 0.2, v = 0.04$

**Zad.3** Butla o pojemności  $v = 20 \text{ dm}^3$  zawiera  $m = 0.25 \text{ kg}$  amoniaku **R717**. Określić temperaturę w której cała ciecz w butli zamieni się w parę.

**Zad.4** Butla o pojemności  $v = 5 \text{ dm}^3$  zawiera  $m = 0.25 \text{ kg}$  **R134a**. Określić temperaturę w której cała ciecz w butli zamieni się w parę.

**Zad.5** W przewodzie o średnicy wewnętrznej  $d = 70 \text{ mm}$  płynie amoniak **R717** o temperaturze  $T = -40^\circ\text{C}$  z prędkością  $v = 4 \text{ m/s}$ . Strumień masowy wynosi  $\dot{m} = 115 \text{ kg/h}$ . Oblicz stopień suchości płynącego przewodem czynnika.

a) na podstawie wykresu  $\log p - h$ ,

b) metodą obliczeniową.

W metodzie obliczeniowej należy przyjąć parametry stanów nasycenia w temperaturze  $T = -40^\circ\text{C}$  odpowiednio  $v' = 1.449 \text{ dm}^3/\text{kg}$ ,  $v'' = 1.5899 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

**Zad.6** Butlę o objętości  $v = 9 \text{ l}$  napełniono czynnikiem chłodniczym **R134a** w ilości  $m = 0.6 \text{ kg}$ . Napełnianie przeprowadzono w temperaturze  $T_1 = 10^\circ\text{C}$ . Następnie butlę przeniesiono ją do pomieszczenia o temperaturze  $T_2 = 40^\circ\text{C}$ . Określić parametry czynnika w butli po jej przeniesieniu:

a) z wykorzystaniem wykresu  $\log p - h$ ,

b) metodą obliczeniową.

W przypadku korzystania z wykresu należy dodatkowo odczytać wartości ciśnień w obu przypadkach. Posługując się metodą obliczeniową należy przyjąć parametry stanów nasycenia w temperaturze  $T = 10^\circ\text{C}$  odpowiednio:  $v' = 0.722d \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $v'' = 0.0482 \text{ m}^3/\text{kg}$ , a w w temperaturze  $T = 40^\circ\text{C}$  odpowiednio:  $v' = 0.871d \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $v'' = 0.0199 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

**Zad.7** Stopień suchości czynnika **R134a** znajdującego się w zamkniętej butli wynosi  $x = 0.2$ , a temperatura  $T_1 = -40^\circ\text{C}$ . Jakie ciepło jednostkowe należy doprowadzić do butli, aby temperatura czynnika wzrosła do  $T_2 = -10^\circ\text{C}$ .

**Zad.8** W sprężarce o sprężu  $\pi = 4.5$  został izentropowo sprężony amoniak **R717**. Z wykresu  $\log p - h$  odczytaj temperaturę końca sprężania, przyjmując, że czynnik ma na wlocie parametry jak na linii nasycenia oraz temperaturę  $T$  odpowiednio:  $-30^\circ\text{C}$ ,  $-10^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ .

**Zad.9** Butlę o objętości  $v = 20 \text{ dm}^3$  wypełniono amoniakiem **R717** ( $m = 2 \text{ kg}$ ). Przechowuje się ją w temperaturze  $T = 20^\circ\text{C}$ . Wiedząc, że w tej temperaturze objętość właściwa amoniaku na linii nasycenia wynosi odpowiednio:  $v' = 0.00168 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $v'' = 0.141 \text{ m}^3/\text{kg}$ , oblicz stopień suchości gazu w butli. Ile musiało by się znajdować w butli czynnika, aby w tych samych warunkach przechowywania, stopień suchości wynosił  $x = 0.8$ .

**Zad.10** W parowaczu całkowicie odparowano  $m = 2\text{ kg}$  **R134a**, w temperaturze  $T = -20^\circ\text{C}$ . Oblicz całkowite ciepło odparowania, jeżeli stopień suchości czynnika na wlocie do parowacza wynosił  $x = 0.2$ . Wykonaj takie samo obliczenia dla amoniaku **R717** i porównaj ze sobą uzyskane wyniki.

## 2 Rozwiązania

**Zad.1** Objętość właściwa czynnika R134a w ciśnieniu  $p = 6\text{ bar}$  zależności od stopnia suchości wynosi odpowiednio:  $v_{x=0.2} = 0.0105\text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $v_{x=0.4} = 0.0164\text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $v_{x=0.6} = 0.0223\text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $v_{x=0.8} = 0.0281\text{ m}^3/\text{kg}$ . Dla pozostałych podpunktów z zadaniu, objętość właściwa wynosi odpowiednio:

- a)  $v = 0.0148\text{ m}^3/\text{kg}$
- b)  $v = 0.0189\text{ m}^3/\text{kg}$
- c)  $v = 0.0525\text{ m}^3/\text{kg}$
- d)  $v = 0.0627\text{ m}^3/\text{kg}$
- e)  $v = 0.0627\text{ m}^3/\text{kg}$

**Zad.2** Temperatura czynnika R717 dla kolejnych podpunktów zadania:

- a)  $T \approx -25.7^\circ\text{C}$
- b)  $T \approx 6.3^\circ\text{C}$
- c)  $T \approx 41.8^\circ\text{C}$
- d)  $T \approx -10.7^\circ\text{C}$
- e)  $T \approx -7.2^\circ\text{C}$

**Zad.3** Rozwiązanie pierwszego zadania wymaga znajomości objętości właściwej czynnika w butli. Ponieważ znana jest pojemność butli oraz ilość znajdującego się w środku czynnika, możliwe jest obliczenie objętości właściwej z prostej zależności:

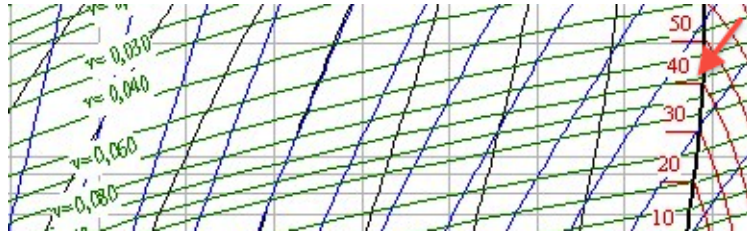
$$v = \frac{V}{m} \quad (1)$$

Należy pamiętać o przeliczeniu  $\text{dm}^3$  na  $\text{m}^3/\text{kg}$ , przy czym  $1\text{ dm}^3 = 0.001\text{ m}^3$ . Dla rozpatrywanego przypadku objętość właściwa wynosi:

$$v = \frac{20\text{ dm}^3 \cdot 0.001}{0.25\text{ kg}} = 0.08\text{ m}^3/\text{kg}$$

Z wykresu  $\log p - h$  dla czynnika **R717**, dla objętości właściwej  $0.08\text{ m}^3/\text{kg}$  odczytuje się temperaturę na linii nasycenia.

Poszukiwana wartość to  $T \approx 41.5^\circ\text{C}$ . Dla  $T = 41^\circ\text{C}$  objętość właściwa wynosi  $v'' = 0.08119\text{ m}^3/\text{kg}$ , natomiast dla  $T = 42^\circ\text{C}$  wynosi  $v'' = 0.07900\text{ m}^3/\text{kg}$ .

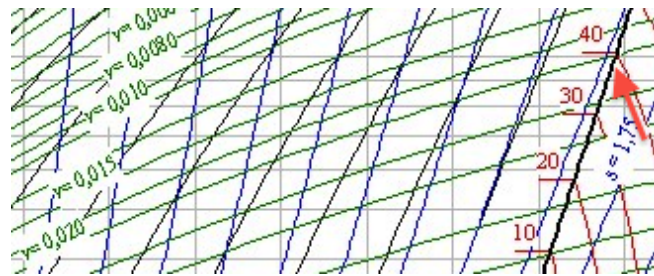


Rysunek 1: Temperatura na linii nasycenia pary R717 dla objętości właściwej  $0.08 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

**Zad.4** Zadanie to rozwiązuje się w taki sam sposób jak poprzednie, zmieniają się jedynie wartości oraz czynnik. Z wzoru (1) oblicza się:

$$v = \frac{5 \cdot 0.001 \text{ m}^3}{0.25 \text{ kg}} = 0.02 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Z wykresu  $\log p - h$  dla czynnika **R134a**, dla objętości właściwej  $0.02 \text{ m}^3/\text{kg}$  odczytuje się temperaturę na linii nasycenia.



Rysunek 2: Temperatura na linii nasycenia pary R134a dla objętości właściwej  $0.02 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

Poszukiwana wartość to  $T \approx 39.5^\circ\text{C}$ . Dla  $T = 39^\circ\text{C}$  objętość właściwa wynosi  $v'' = 0.01986 \text{ m}^3/\text{kg}$ , natomiast dla  $T = 40^\circ\text{C}$  wynosi  $v'' = 0.02043 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

**Zad.5** Przyjmując założenie, że przepływ jest ustalony, możemy obliczyć objętość właściwą płynącego czynnika przekształcając równanie ciągłości - iloczyn strumienia masy  $\dot{m}$  i objętości właściwej  $v$  równy jest powierzchni przekroju przepływu  $A$  pomnożonej przez jego prędkość  $w$ .

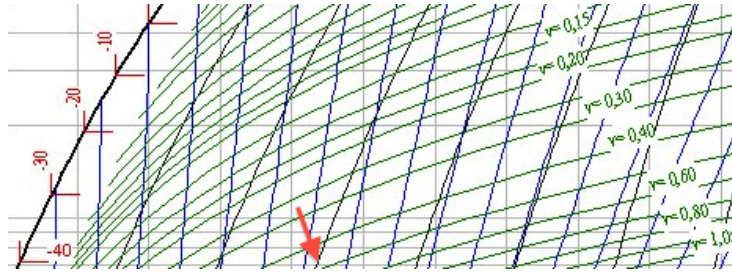
$$\dot{m} \cdot v = A \cdot w \quad (2)$$

Co przy  $A = \pi \cdot d^2/4$  prowadzi do:

$$v = \frac{A \cdot w}{\dot{m}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot w}{4 \cdot \dot{m}} \quad (3)$$

Po podstawieniu wartości z zadania, z uwzględnieniem, że  $115 \text{ kg/h} = 0.032 \text{ kg/s}$  uzyskuje się:

$$v = \frac{3.14 \cdot 0.070^2 \text{ m} \cdot 4 \text{ m/s}}{4 \cdot 0.032 \text{ kg/s}} = 0.482 \text{ m}^3/\text{kg}$$



Rysunek 3: Stopień suchości czynnika R717 o objętości właściwej  $0.048 \text{ m}^3/\text{kg}$  w temperaturze  $T = -40 \text{ °C}$ .

Z wykresu  $\log p - h$  dla R717 i temperatury  $T = -40 \text{ °C}$  można odczytać poszukiwaną wartość:

Odczytana wartość to w przybliżeniu  $x = 0.31$ .

Rozwiązanie zadania metodą obliczeniową wymaga zastosowania reguły dźwigni, która wiąże ze sobą objętość właściwą  $v$  i stopień suchości  $x$ :

$$v = v' + x \cdot (v'' - v') \quad (4)$$

Po przekształceniu:

$$x = \frac{(v - v')}{(v'' - v')} \quad (5)$$

$$x = \frac{0.48 \text{ m}^3/\text{kg} - 1.499 \cdot 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}}{1.5899 \text{ m}^3/\text{kg} - 1.499 \cdot 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0.30$$

**Zad.6** Z tym zadaniem rozwiązanie przebiega podobnie jak w poprzednim. Na wstępie należy obliczyć objętość właściwą czynnika w stanie początkowym wykorzystując równanie (1).

$$v = \frac{9 \cdot 0.001 \text{ m}^3}{0.6 \text{ m}} = 0.015 \text{ m}^3/\text{kg}$$

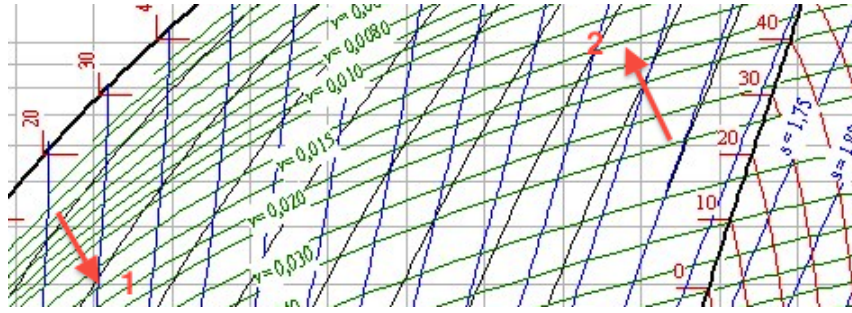
Na wykresie  $\log p - h$  należy odnaleźć stan początkowy **1** (wykorzystując informacje o temperaturze i objętości właściwej), a następnie przemieszczając się po linii stałej objętości (mamy do czynienia z przemianą izochoryczną) dojść do temperatury końcowej - stanu **2** i odczytać poszukiwane wartości.

W tym wypadku stopień suchości wynosi w przybliżeniu  $x = 0.75$ . Ciśnienie w temperaturze początkowej wynosi  $p_1 = 2.95 \text{ bar}$ , natomiast w temperaturze końcowej ok.  $p_2 = 10.18 \text{ bar}$ .

Posługując się metodą obliczeniową, należy skorzystać z równania (4), aby obliczyć stopień suchości w stanie początkowym. Podstawiając dane z zadania obliczamy:

$$v_1 = \frac{0.015 \text{ m}^3/\text{kg} - 0.722 \cdot 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}}{0.482 \text{ m}^3/\text{kg} - 0.722 \cdot 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0.30$$

Ponieważ przemiana jest izochoryczna, możemy posługując się równaniem (5) obliczyć stopień suchości w stanie końcowym:



Rysunek 4: Parametry czynnika R134a w temperaturze  $T = 0^\circ\text{C}$  i  $T = 40^\circ\text{C}$  oraz objętości właściwej  $v = 0.015\text{ m}^3/\text{kg}$ .

$$x = \frac{0.015\text{ m}^3/\text{kg} - 0.871 \cdot 0.001\text{ m}^3/\text{kg}}{0.0199\text{ m}^3/\text{kg} - 0.871 \cdot 0.001\text{ m}^3/\text{kg}} = 0.742$$

**Zad.7** Podobnie jak w zadaniu 6, tak i tu przemiana jest izochoryczna. Dla temperatury  $-40^\circ\text{C}$  objętość właściwa na linii nasycenia **R134a** wynosi  $v' = 0.705\text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $v'' = 0.369\text{ m}^3/\text{kg}$ . Po podstawieniu danych do równania (4) oblicza się:

$$v = 0.705 \cdot 0.001\text{ m}^3/\text{kg} + 0.2 \cdot (0.369\text{ m}^3/\text{kg} - 0.705 \cdot 0.001\text{ m}^3/\text{kg}) = 0.0743\text{ m}^3/\text{kg}$$

Wartości entalpii i ciśnień odczytujemy z wykresu  $\log p - h$  lub tabeli:

W stanie 1 dla temperatury  $T_1 = -40^\circ\text{C}$ :

- $p_1 = 0.52\text{ bar}$
- $h'_1 = 149.97\text{ kJ/kg}$
- $h''_1 = 372.93\text{ kJ/kg}$

W stanie 2 dla temperatury  $T_2 = 0^\circ\text{C}$ :

- $p_2 = 2\text{ bar}$
- $h'_2 = 188\text{ kJ/kg}$
- $h''_2 = 390\text{ kJ/kg}$

Stopień suchości w stanie 2:  $x = 0.7$ .

Wartość entalpii w punkcie 1 i w punkcie 2 oblicza się z zależności:

$$h = h' + x \cdot (h'' - h') \tag{6}$$

Podstawiając dane:

$$h_1 = 149.97\text{ kJ/kg} + 0.2 \cdot (372.93\text{ kJ/kg} - 149.97\text{ kJ/kg}) = 184.56\text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 188\text{ kJ/kg} + 0.7 \cdot (390\text{ kJ/kg} - 188\text{ kJ/kg}) = 329\text{ kJ/kg}$$

Jednostkowa ilość ciepła którą należy dostarczyć odpowiada różnicy entalpii w stanie pierwszym i w stanie drugim, czyli:

$$q = h_2 - h_1 = 329 - 184.56 = 144.44\text{ kJ/kg}$$