

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

Termodynamika atmosfery

Ćwiczenia 05

Sylwester Arabas
(ćwiczenia do wykładu prof. Hanny Pawłowskiej)

Institut Geofizyki, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

10 marca 2011 r.

Zadanie 5.1 : polecenie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągawki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

Wyznaczenie wyrażeń na c_v , c_p (ciepła właściwe) w funkcji stosunku mieszania pary wodnej oraz wilgotności właściwej dla mieszaniny powietrza suchego i pary wodnej.

Zadanie 5.1 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągawki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

- $c_{p,v} = \frac{\delta q}{dT}$
- $c_{p,v} = \frac{1}{dT} \left[\frac{m}{m_d} \frac{d}{dt} \right]$
- $c_{p,v} = c_{v,v} (1 + \gamma)$
- $c_{p,v} = c_{v,d} (1 + \gamma)$
- w przybliżeniu:
 -
 -

Zadanie 5.1 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

■ $c_{p,v} = \frac{\delta q}{dT}$

■ $c_{p,v} = \frac{1}{dT} \left[\frac{m}{m_d} \frac{m_d}{m_d} \frac{1}{dT} \right]$

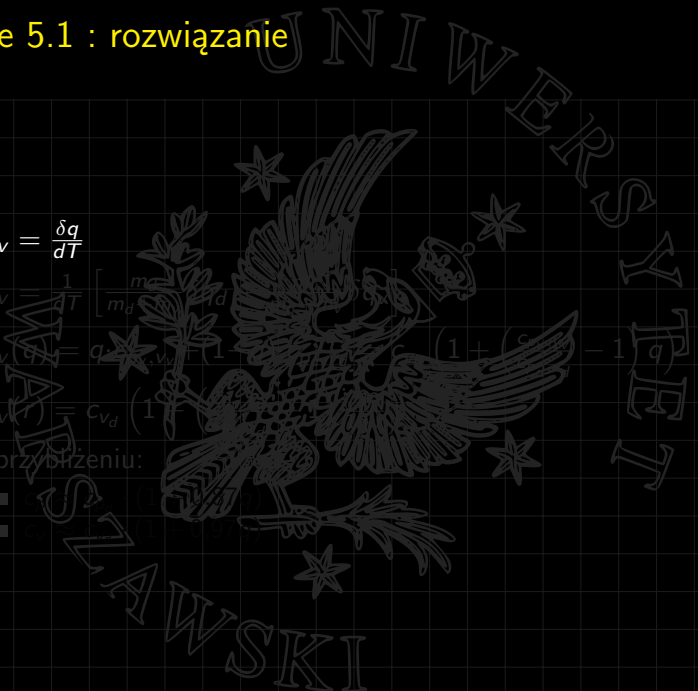
■ $c_{p,v} = c_{v,v} + \frac{1}{dT} \left[\frac{m}{m_d} \frac{m_d}{m_d} \frac{1}{dT} \right] (1 + \dots - 1)$

■ $c_{p,v} = c_{v,d} (1 + \dots - 1)$

■ w przybliżeniu:

■

■



Zadanie 5.1 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągawki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

- $c_{p,v} = \frac{\delta q}{dT}$

- $c_{p,v} = \frac{1}{dT} \left[\frac{m_d}{m_d+m_v} \delta q_d + \frac{m_v}{m_d+m_v} \delta q_v \right]$

- $c_{p,v} = c_{v,d} (1 + \frac{c}{1-c})$

- $c_{p,v} = c_{v,d} (1 + \frac{c}{1-c})$

- w przybliżeniu:

-

-

Zadanie 5.1 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

$$\blacksquare c_{p,v} = \frac{\delta q}{dT}$$

$$\blacksquare c_{p,v} = \frac{1}{dT} \left[\frac{m_d}{m_d+m_v} \delta q_d + \frac{m_v}{m_d+m_v} \delta q_v \right]$$

$$\blacksquare c_{p,v}(q) = q \cdot c_{p_v, v_v} + (1-q) \cdot c_{p_d, v_d} = c_{v_d} \left(1 + \left(\frac{c_{p_v, v_v}}{c_{p_d, v_d}} - 1 \right) q \right)$$

$$\blacksquare c_{p,v}(q) = c_{v_d} \left(1 + \gamma q \right)$$

■ w przybliżeniu:

■

■

Zadanie 5.1 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,

rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

$$\blacksquare c_{p,v} = \frac{\delta q}{dT}$$

$$\blacksquare c_{p,v} = \frac{1}{dT} \left[\frac{m_d}{m_d+m_v} \delta q_d + \frac{m_v}{m_d+m_v} \delta q_v \right]$$

$$\blacksquare c_{p,v}(q) = q \cdot c_{p_v, v_v} + (1-q) \cdot c_{p_d, v_d} = c_{v_d} \left(1 + \left(\frac{c_{p_v, v_v}}{c_{p_d, v_d}} - 1 \right) q \right)$$

$$\blacksquare c_{p,v}(r) = c_{v_d} \left(1 + \left(\frac{c_{p_v, v_v}}{c_{p_d, v_d}} - 1 \right) \frac{r}{1+r} \right)$$

■ w przybliżeniu:

■

■

Zadanie 5.1 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

$$\blacksquare c_{p,v} = \frac{\delta q}{dT}$$

$$\blacksquare c_{p,v} = \frac{1}{dT} \left[\frac{m_d}{m_d+m_v} \delta q_d + \frac{m_v}{m_d+m_v} \delta q_v \right]$$

$$\blacksquare c_{p,v}(q) = q \cdot c_{p_v, v_v} + (1-q) \cdot c_{p_d, v_d} = c_{v_d} \left(1 + \left(\frac{c_{p_v, v_v}}{c_{p_d, v_d}} - 1 \right) q \right)$$

$$\blacksquare c_{p,v}(r) = c_{v_d} \left(1 + \left(\frac{c_{p_v, v_v}}{c_{p_d, v_d}} - 1 \right) \frac{r}{1+r} \right)$$

■ w przybliżeniu:

$$\blacksquare c_{p,v} \approx c_{p_d, v_d} \cdot (1 + 0,97q)$$

$$\blacksquare c_v \approx c_{v_d} \cdot (1 + 0,97q)$$

Zadanie 5.1 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

$$\blacksquare c_{p,v} = \frac{\delta q}{dT}$$

$$\blacksquare c_{p,v} = \frac{1}{dT} \left[\frac{m_d}{m_d+m_v} \delta q_d + \frac{m_v}{m_d+m_v} \delta q_v \right]$$

$$\blacksquare c_{p,v}(q) = q \cdot c_{p_v, v_v} + (1-q) \cdot c_{p_d, v_d} = c_{v_d} \left(1 + \left(\frac{c_{p_v, v_v}}{c_{p_d, v_d}} - 1 \right) q \right)$$

$$\blacksquare c_{p,v}(r) = c_{v_d} \left(1 + \left(\frac{c_{p_v, v_v}}{c_{p_d, v_d}} - 1 \right) \frac{r}{1+r} \right)$$

\blacksquare w przybliżeniu:

$$\blacksquare c_p \approx c_{p_d} \cdot (1 + 0,87q)$$

$$\blacksquare c_v \approx c_{v_d} \cdot (1 + 0,97q)$$

Zadanie 5.1 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

$$\blacksquare c_{p,v} = \frac{\delta q}{dT}$$

$$\blacksquare c_{p,v} = \frac{1}{dT} \left[\frac{m_d}{m_d+m_v} \delta q_d + \frac{m_v}{m_d+m_v} \delta q_v \right]$$

$$\blacksquare c_{p,v}(q) = q \cdot c_{p_v,v_v} + (1-q) \cdot c_{p_d,v_d} = c_{v_d} \left(1 + \left(\frac{c_{p_v,v_v}}{c_{p_d,v_d}} - 1 \right) q \right)$$

$$\blacksquare c_{p,v}(r) = c_{v_d} \left(1 + \left(\frac{c_{p_v,v_v}}{c_{p_d,v_d}} - 1 \right) \frac{r}{1+r} \right)$$

■ w przybliżeniu:

$$\blacksquare c_p \approx c_{p_d} \cdot (1 + 0,87q)$$

$$\blacksquare c_v \approx c_{v_d} \cdot (1 + 0,97q)$$

Zadanie 5.2 : polecenie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągawki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

Wyznaczenie zależności ciepła utajonego parowania l_v od temperatury przy założeniu stałego ciepła właściwego wody i pary wodnej. Sprawdzenie zakresu zmienności l_v dla temperatur spotykanych w troposferze.

Zadanie 5.2 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściąawkki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

- $l = \Delta h$
- $\frac{\partial l_v}{\partial T} = \frac{\partial h_v}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} (h + p_w)$
- **jeden składnik, dzięki** $h = \int_{T_0}^T c_p dt$ **metody**
 $\leadsto \frac{\partial h}{\partial T} = c_p$ $\frac{\partial p_w}{\partial T} = \frac{p_w}{T} + \frac{p_w}{T_0}$
- zakładamy c_p stałe

Zadanie 5.2 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściąawkki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

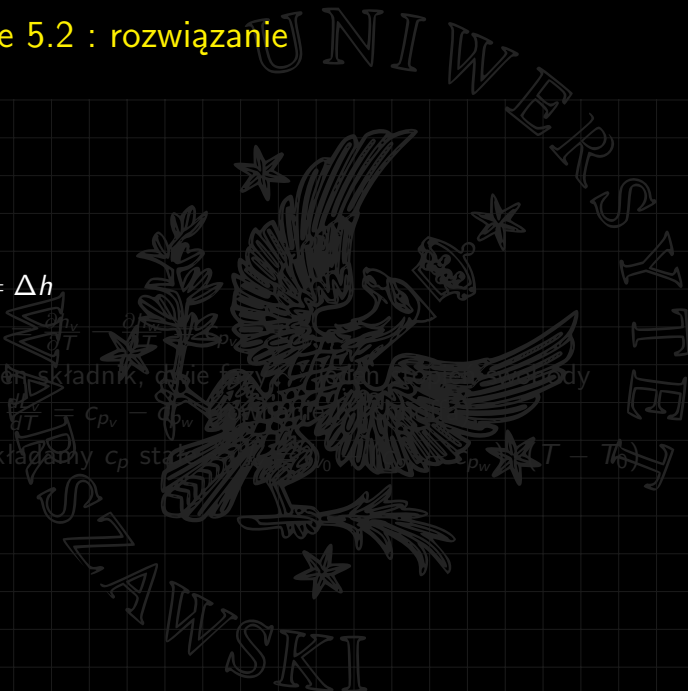
■ $l = \Delta h$

■ $\frac{\partial l_v}{\partial T} = \frac{\partial h_v}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} (h + p \cdot \alpha)$

■ jeden składnik, dzięki funkcji h i α metody

$\leadsto \frac{\partial l_v}{\partial T} = c_{p_v} - \alpha_{p_w} \cdot T - T_0$

■ zakładamy c_p stałe



Zadanie 5.2 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściąawkki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

■ $l = \Delta h$

■ $\frac{\partial l_v}{\partial T} = \frac{\partial h_v}{\partial T} - \frac{\partial h_w}{\partial T} = c_{p_v} - c_{p_w}$

■ jeden składnik, dzięki formułom z poprzedniej metody

$\leadsto \frac{\partial l_v}{\partial T} = c_{p_v} - c_{p_w}$

■ zakładamy c_p stałe

Zadanie 5.2 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

■ $l = \Delta h$

■ $\frac{\partial l_v}{\partial T} = \frac{\partial h_v}{\partial T} - \frac{\partial h_w}{\partial T} = c_{p_v} - c_{p_w}$

■ jeden składnik, dwie fazy \leadsto jeden stopień swobody

$\leadsto \frac{dL_v}{dT} = c_{p_v} - c_{p_w}$ (równanie Kirchhoffa)

■ zakładamy c_p stałe

Zadanie 5.2 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

■ $l = \Delta h$

■ $\frac{\partial l_v}{\partial T} = \frac{\partial h_v}{\partial T} - \frac{\partial h_w}{\partial T} = c_{p_v} - c_{p_w}$

■ jeden składnik, dwie fazy \leadsto jeden stopień swobody

$\leadsto \frac{dL_v}{dT} = c_{p_v} - c_{p_w}$ (równanie Kirchhoffa)

■ zakładamy c_p stałe $\leadsto l_v = l_{v0} + (c_{p_v} - c_{p_w}) \cdot (T - T_0)$

Zadanie 5.3 : polecenie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągawki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

Wyznaczenie zależności ciśnienia cząstkowego pary wodnej od temperatury dla stanu „nasycenia” - równowagi fazy ciekłej i lotnej wody, przy założeniu stałych ciepł właściwych wody i pary wodnej.

Zadanie 5.3 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie, rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągawki

przydatne definicje, zależności i stałe fizyczne

- $\frac{dp}{dT} = T \cdot \left(\frac{1}{p_v} - \frac{1}{p_w} \right) \approx \frac{dp}{dT} \cdot l_v$
- $\frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T} \cdot \frac{p}{R_v T} = \frac{p}{R_v T} \cdot \frac{l_v}{T}$
- $\frac{dp}{p} = \frac{l_v}{R_v T} \cdot \frac{dT}{T}$
- $\ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = \frac{l_v}{R_v T_0} \cdot \frac{T}{T_0}$
- $p \sim e_{sw}$ (ciśnienie nasycenia)
- warunki atmosferyczne wygodnie odnieść do punktu potrojenia
- ...
- $e_{sw} = 6,11 \cdot \exp \left(5,425 \cdot \frac{6810}{T} - 5,09 \cdot \ln T \right)$ [hPa]

Zadanie 5.3 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T \cdot \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_w} \right)} \approx \frac{dp}{dT} = \frac{l_v \rho_v}{T}$$

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściąawkki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T} \frac{p}{R_v T} = \frac{p}{T} \frac{l_v}{R_v}$$

$$\blacksquare \frac{dp}{p} = \frac{l_v}{R_v T} \frac{dT}{T} \Rightarrow \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = \frac{l_v}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

$$\blacksquare \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = \frac{l_v}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

■ $p \sim e^{e_{sw}}$ (ciśnienie nasycenia)

■ warunki atmosferyczne wygodnie odnieść do punktu $T_0, p_0, l_0, c_{pv}, c_{pw}$ do punktu potrojenia

■ ...

$$\blacksquare e_{sw} = 6,11 \cdot \exp \left(5,425 \frac{6810}{T} - 5,09 \cdot \ln T \right) \text{ [hPa]}$$

Zadanie 5.3 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie, rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągawki

przydatne definicje, zależności i stałe fizyczne

- $\frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T \cdot \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_w} \right)} \approx \frac{dp}{dT} = \frac{l_v \rho_v}{T}$
- $\frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T} \frac{p}{R_v T} = \frac{l_v + (c_{pv} - c_{pw}) \cdot (T - T_0)}{T} \frac{p}{R_v T}$
- $\ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = \frac{l_v}{R_v T_0} \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) + (c_{pv} - c_{pw}) \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right)$
- $p \sim e_{sw}$ (ciśnienie nasycenia)
- warunki atmosferyczne wygodnie odnieść $T_0, p_0, l_0, c_{pv}, c_{pw}$ do punktu potrojenia
- ...
- $e_{sw} = 6,11 \cdot \exp \left(5,5 \frac{6810}{T} - 5,09 \cdot \ln T \right) \text{ [hPa]}$

Zadanie 5.3 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściąawkki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T \cdot \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_w} \right)} \approx \frac{dp}{dT} = \frac{l_v \rho_v}{T}$$

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T} \frac{p}{R_v T} = \frac{l_{v0} + (c_{pv} - c_{pw}) \cdot (T - T_0)}{T} \frac{p}{R_v T}$$

$$\blacksquare \int_{p(T_0)}^{p(T)} \frac{dp}{p} = \frac{l_{v0} - (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_0}{R_v} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T^2} + \frac{c_{pv} - c_{pw}}{R_v} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T}$$

$$\blacksquare \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = \frac{l_{v0} - (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_0}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) + \frac{c_{pv} - c_{pw}}{R_v} \ln \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

■ $p \sim e_{sw}$ (ciśnienie nasyconego pary wodnej)

■ warunki atmosferyczne wygodnie odnieść $T_0, p_0, l_0, c_{pv}, c_{pw}$ do punktu potrojenia

■ ...

$$\blacksquare e_{sw} = 6,11 \cdot \exp \left(5,425 \frac{6810}{T} - 5,09 \cdot \ln T \right) \text{ [hPa]}$$

Zadanie 5.3 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściąawkki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T \cdot \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_w} \right)} \approx \frac{dp}{dT} = \frac{l_v \rho_v}{T}$$

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T} \frac{p}{R_v T} = \frac{l_{v0} + (c_{pv} - c_{pw}) \cdot (T - T_0)}{T} \frac{p}{R_v T}$$

$$\blacksquare \int_{p(T_0)}^p \frac{p(T)}{p} \frac{dp}{p} = \frac{l_{v0} - (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_0}{R_v} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T^2} + \frac{c_{pv} - c_{pw}}{R_v} \int_{T_0}^T \frac{T dT}{T}$$

$$\blacksquare \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = \frac{l_{v0} - (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_0}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) + \frac{c_{pv} - c_{pw}}{2 R_v} \left(\frac{T}{T_0} + 1 \right)$$

■ $p \sim e_{sw}$ (ciśnienie nasyconego pary wodnej w stanie nasycecia)

■ warunki atmosferyczne wygodnie odnieść $T_0, p_0, l_0, c_{pv}, c_{pw}$ do punktu potrojenia

■ ...

$$\blacksquare e_{sw} = 6,11 \cdot \exp \left(5,425 \frac{6810}{T} - 5,09 \cdot \ln T \right) \text{ [hPa]}$$

Zadanie 5.3 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T \cdot \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_w} \right)} \approx \frac{dp}{dT} = \frac{l_v \rho_v}{T}$$

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T} \frac{p}{R_v T} = \frac{l_{v0} + (c_{pv} - c_{pw}) \cdot (T - T_0)}{T} \frac{p}{R_v T}$$

$$\blacksquare \int_{p(T_0)}^p \frac{dp}{p} = \frac{l_{v0} - (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_0}{R_v} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T^2} + \frac{c_{pv} - c_{pw}}{R_v} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T}$$

$$\blacksquare \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = \frac{l_{v0} - (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_0}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) + \frac{c_{pv} - c_{pw}}{R_v} \ln \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

■ $p \sim e_{sw}$ (ciśnienie nasyconego pary wodnej)

■ warunki atmosferyczne wygodnie odnieść $T_0, p_0, l_0, c_{pv}, c_{pw}$ do punktu potrojenia

■ ...

$$\blacksquare e_{sw} = 6,11 \cdot \exp \left(5,425 \frac{6810}{T} - 5,09 \cdot \ln T \right) \text{ [hPa]}$$

Zadanie 5.3 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T \cdot \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_w} \right)} \approx \frac{dp}{dT} = \frac{l_v \rho_v}{T}$$

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T} \frac{p}{R_v T} = \frac{l_{v0} + (c_{pv} - c_{pw}) \cdot (T - T_0)}{T} \frac{p}{R_v T}$$

$$\blacksquare \int_{p(T_0)}^p \frac{dp}{p} = \frac{l_{v0} - (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_0}{R_v} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T^2} + \frac{c_{pv} - c_{pw}}{R_v} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T}$$

$$\blacksquare \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = \frac{l_{v0} - (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_0}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) + \frac{c_{pv} - c_{pw}}{R_v} \ln \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

■ $p \rightsquigarrow e_{sw}$ (ciśnienie cząstkowe pary wodnej w stanie nasycenia)

■ warunki atmosferyczne wygodnie odnieść $T_0, p_0, l_0, c_{pv}, c_{pw}$ do punktu potrojenia

■ ...

$$\blacksquare e_{sw} = 6,11 \cdot \exp \left(5,425 \frac{6810}{T} - 5,09 \cdot \ln T \right) \text{ [hPa]}$$

Zadanie 5.3 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

- $\frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T \cdot \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_w}\right)} \approx \frac{dp}{dT} = \frac{l_v \rho_v}{T}$
- $\frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T} \frac{p}{R_v T} = \frac{l_{v0} + (c_{pv} - c_{pw}) \cdot (T - T_0)}{T} \frac{p}{R_v T}$
- $\int_{p(T_0)}^p \frac{dp}{p} = \frac{l_{v0} - (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_0}{R_v} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T^2} + \frac{c_{pv} - c_{pw}}{R_v} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T}$
- $\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = \frac{l_{v0} - (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_0}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) + \frac{c_{pv} - c_{pw}}{R_v} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)$
- $p \rightsquigarrow e_{sw}$ (ciśnienie cząstkowe pary wodnej w stanie nasycenia)
- warunki atmosferyczne \rightsquigarrow wygodnie odnieść $T_0, p_0, l_0, c_{pv}, c_{pw}$ do punktu potrójnego wody

■ ...

■ $e_{sw} = 6,11 \cdot \exp\left(5,425 \frac{6810}{T} - 5,09 \cdot \ln T\right) \text{ [hPa]}$

Zadanie 5.3 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

- $\frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T \cdot \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_w}\right)} \approx \frac{dp}{dT} = \frac{l_v \rho_v}{T}$
- $\frac{dp}{dT} = \frac{l_v}{T} \frac{p}{R_v T} = \frac{l_{v0} + (c_{pv} - c_{pw}) \cdot (T - T_0)}{T} \frac{p}{R_v T}$
- $\int_{p(T_0)}^p \frac{dp}{p} = \frac{l_{v0} - (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_0}{R_v} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T^2} + \frac{c_{pv} - c_{pw}}{R_v} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T}$
- $\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = \frac{l_{v0} - (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_0}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) + \frac{c_{pv} - c_{pw}}{R_v} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)$
- $p \rightsquigarrow e_{sw}$ (ciśnienie cząstkowe pary wodnej w stanie nasycenia)
- warunki atmosferyczne \rightsquigarrow wygodnie odnieść $T_0, p_0, l_0, c_{pv}, c_{pw}$ do punktu potrójnego wody
- ...
- $e_{sw} = 6,11 \cdot \exp\left(53,5 - \frac{6810}{T} - 5,09 \cdot \ln T\right) [hPa]$

Zadanie 5.4 : wnioski

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie, rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje, zależności i stałe fizyczne

Stan równowagi („nasylenia”) dla układu para–woda osiągnany jest przy wyższym ciśnieniu parcjalnym pary wodnej (wyższej zawartości pary) dla wyższych temperatur. W ciepłych rejonach świata proces parowania/kondensacji przy powierzchni wody (np. oceanu) osiąga równowagę przy wyższych stężeniach pary wodnej niż w rejonach zimniejszych.

Wilgotność względną definiuje się jako $RH = \frac{e_w}{e_{s_w}}$ (lub analogicznie dla stosunków mieszania). Wilgotność względna 80% oznacza wyższą zawartość pary wodnej (np. stosunek mieszania) w tropikach niż np. w naszych szerokościach geograficznych.

Zadanie 5.4 : polecenie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

Wyznaczenie temperatury (wrzenia), w której tuż przy powierzchni wody (zanieczyśczone ciśnienie wywierane przez wodę znajdującą się powyżej) może powstać pęcherzyk pary wodnej (przy założeniu że powstanie on gdy tylko ciśnienie wewnątrz pęcherzyka przewyższy ciśnienie otoczenia).

Porównanie wartości tych temperatur dla ciśnienia standardowego oraz dwóch wybranych miejsc na świecie leżących na znacząco różniących się wysokościach.

Zadanie 5.4 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie**
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie, rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje, zależności i stałe fizyczne

- $p_{atm} = e_{s_w}(T_{wrzenia})$
- $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa})$
- $g_{nuplot} \rightarrow p(T) = 0.4 * (5 - 0.20/T - 5.09 * \log(T))$
- $g_{nuplot} \rightarrow p_{rodz} [250-400]$
- $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa})$
- $T_{wrzenia}(wysoko)$

Uwaga: założyliśmy c_p stałe, równe ciepłu właściwemu dla punktu potrójnego – lepiej byłoby wykorzystać c_p dla 100°C !

Zadanie 5.4 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie**
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie, rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje, zależności i stałe fizyczne

■ $p_{atm} = e_{s_w}(T_{wrzenia})$

■ $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa})$

■ $g_{nuplot} \rightarrow p(T) = 611 \cdot \exp\left(5 - 6210/T - 5.09 \cdot \log(T)\right)$

■ $g_{nuplot} \rightarrow p_{rodz} [250-400]$

■ $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa})$

■ $T_{wrzenia}(wysoko)$

Uwaga: założyliśmy c_p stałe, równe ciepłu właściwemu dla punktu potrójnego – lepiej byłoby wykorzystać c_p dla 100°C !

Zadanie 5.4 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

■ $p_{atm} = e_{s_w}(T_{wrzenia})$

■ $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa}) = \dots$

■ $\ln\left(\frac{p(T)}{p(T_0)}\right) = \frac{c_p}{R} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - \frac{g}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) + \ln\left(\frac{p(T_0)}{p_0}\right)$

■ $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa}) = \dots$

■ $T_{wrzenia}(p_{wysoko}) = \dots$

Uwaga: założyliśmy c_p stałe, równe ciepłu właściwemu dla punktu potrójnego – lepiej byłoby wykorzystać c_p dla 100°C !

Zadanie 5.4 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

- $p_{atm} = e_{sw}(T_{wrzenia})$

- $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa}) = \dots$

- `gnuplot> p(T)=6.11*exp(53.5 - 6810./T - 5.09 * log(T))`

- `gnuplot> plot [250:400] p(x)`

- $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa})$

- $T_{wrzenia}(p_{wysoko})$

Uwaga: założyliśmy c_p stałe, równe ciepłu właściwemu dla punktu potrójnego – lepiej byłoby wykorzystać c_p dla 100°C !

Zadanie 5.4 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

- $p_{atm} = e_{sw}(T_{wrzenia})$

- $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa}) = \dots$

- `gnuplot> p(T)=6.11*exp(53.5 - 6810./T - 5.09 * log(T))`
`gnuplot> plot [250:400] p(x)`

- $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa}) \approx 373\text{K}$

- $T_{wrzenia}(p_{wysoko}) = \dots$

Uwaga: założyliśmy c_p stałe, równe ciepłu właściwemu dla punktu potrójnego – lepiej byłoby wykorzystać c_p dla 100°C !

Zadanie 5.4 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

- $p_{atm} = e_{sw}(T_{wrzenia})$
- $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa}) = \dots$
- `gnuplot> p(T)=6.11*exp(53.5 - 6810./T - 5.09 * log(T))`
`gnuplot> plot [250:400] p(x)`
- $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa}) \approx 373\text{K}$
- $T_{wrzenia}(\text{wysoko}) < T_{wrzenia}(\text{nisko})$

Uwaga: założyliśmy c_p stałe, równe ciepłu właściwemu dla punktu potrójnego – lepiej byłoby wykorzystać c_p dla 100°C !

Zadanie 5.4 : rozwiązanie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

5.1: polecenie

5.1: rozwiązanie

5.2: polecenie

5.2: rozwiązanie

5.3: polecenie

5.3: rozwiązanie

5.3: wnioski

5.4: polecenie

5.4: rozwiązanie

5.4: wnioski

5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski

5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

- $p_{atm} = e_{s_w}(T_{wrzenia})$
- $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa}) = \dots$
- `gnuplot> p(T)=6.11*exp(53.5 - 6810./T - 5.09 * log(T))`
`gnuplot> plot [250:400] p(x)`
- $T_{wrzenia}(1013 \text{ hPa}) \approx 373\text{K}$
- $T_{wrzenia}(wysoko) < T_{wrzenia}(nisko)$

Uwaga: założyliśmy c_p stałe, równe ciepłu właściwemu dla punktu potrójnego – lepiej byłoby wykorzystać c_p dla 100°C !

Zadanie 5.4 : wnioski i uwagi

Wniosek: temperatura wrzenia maleje z wysokością

Ćwiczenia 05

Termodynamika
atmosfery

Uwagi:

- w czasie gotowania wody, zanim pojawią się pęcherzyki pary wodnej, widoczne są również pęcherzyki powietrza (rozpuszczalność gazu w cieczy maleje z temperaturą)
- bilans energii rozważany przy wyprowadzeniu równania Clausiusa-Clapeyrona nie uwzględnia energii potrzebnej na utworzenie pęcherzyka (m.in. związanej z napięciem powierzchniowym na powierzchni rozdziału dwóch faz):
 - pęcherzyki pary wodnej mogą powstać na istniejących już pęcherzykach powietrza (ang. nucleus – zaczątek) w niższej temperaturze (lub na chropowatych ściankach naczynia)
 - przy braku owych „zaczątków” pęcherzyki powstają w temperaturze wyższej, a zawarta w nich para wodna ma ciśnienie wyższe od ciśnienia otoczenia – stąd ich szybkie unoszenie się do góry

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie, rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

Zadanie 5.4 : polecenie, rozwiązanie, wnioski

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie, rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągawki

przydatne definicje, zależności i stałe fizyczne

Oszacowanie (wyznaczenie znaku i rzędu wielkości pochodnej) zmienności temperatury topnienia lodu z ciśnieniem.

$$\blacksquare \frac{dp}{dT}$$

$$= -\left(\frac{\alpha}{\rho_f} - \frac{1}{\rho_s}\right)$$

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} \approx -1.4 \times 10^{-5} \frac{\text{Pa}}{\text{K}}$$

Wniosek: temperatura topnienia lodu maleje wraz ze wzrostem ciśnienia (dużym wzrostem!)

Znaczenie: np. ruch lodowców!

Zadanie 5.4 : polecenie, rozwiązanie, wnioski

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie, rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągawki

przydatne definicje, zależności i stałe fizyczne

Oszacowanie (wyznaczenie znaku i rzędu wielkości pochodnej) zmienności temperatury topnienia lodu z ciśnieniem.

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_f}{T \cdot \left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_w} \right)}$$

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} \approx -1.4 \times 10^7 \frac{\text{Pa}}{\text{K}}$$

Wniosek: temperatura topnienia lodu maleje wraz ze wzrostem ciśnienia (dużym wzrostem!)

Znaczenie: np. ruch lodowców!

Zadanie 5.4 : polecenie, rozwiązanie, wnioski

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągawki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

Oszacowanie (wyznaczenie znaku i rzędu wielkości pochodnej) zmienności temperatury topnienia lodu z ciśnieniem.

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_f}{T \cdot \left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_w} \right)}$$

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} \approx -1.4 \times 10^7 \frac{\text{Pa}}{\text{K}}$$

Wniosek: temperatura topnienia lodu maleje wraz ze wzrostem ciśnienia (dużym wzrostem!)

Znaczenie: np. ruch lodowców!

Zadanie 5.4 : polecenie, rozwiązanie, wnioski

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

Oszacowanie (wyznaczenie znaku i rzędu wielkości pochodnej) zmienności temperatury topnienia lodu z ciśnieniem.

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} = \frac{l_f}{T \cdot \left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_w} \right)}$$

$$\blacksquare \frac{dp}{dT} \approx -1.4 \times 10^7 \frac{\text{Pa}}{\text{K}}$$

Wniosek: temperatura topnienia lodu maleje wraz ze wzrostem ciśnienia (dużym wzrostem!)

Znaczenie: np. ruch lodowców!

Zadanie 5.6D : polecenie

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie,
rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągawki

przydatne definicje,
zależności i stałe
fizyczne

Wykreślenie profili wilgotności względnej względem wody oraz lodu, wyliczonych przy pomocy wyrażeń wielomianowych z artykułu Piotra Flatau¹, dla dwóch dowolnych aktualnych sondaży aerologicznych. Naniesienie na wykres wartości RH podawanych w pliakch z danymi z sondaży aerologicznych.

¹Flatau, P.J., R.L. Walko, and W.R. Cotton, 1992: Polynomial Fits to Saturation Vapor Pressure. J. Appl. Meteor., 31, 1507–1513.

Przydatne definicje, zależności i stałe fizyczne

Ćwiczenia 05

Termodynamika atmosfery

Zadania

- 5.1: polecenie
- 5.1: rozwiązanie
- 5.2: polecenie
- 5.2: rozwiązanie
- 5.3: polecenie
- 5.3: rozwiązanie
- 5.3: wnioski
- 5.4: polecenie
- 5.4: rozwiązanie
- 5.4: wnioski
- 5.5: polecenie, rozwiązanie, wnioski
- 5.6D: polecenie

Ściągowki

przydatne definicje, zależności i stałe fizyczne

równanie Clausiusa-Clapeyrona

$$\frac{dp}{dT} = \frac{l}{T(\alpha_v - \alpha_w)}$$

(odpowiednik równania stanu dla przypadku równowagi dwóch faz)

równanie Kirchhoffa

$$\frac{dl}{dT} = c_{p_v} - c_{p_w}$$

(wynika z definicji $l = \Delta h$ i $c_p = \left. \frac{\partial H}{\partial T} \right|_p$ oraz z faktu, że dla równowagi dwóch faz mamy jeden stopień swobody - stąd różniczka zupełna)

parametry wody

w punkcie potrójnym:

$$T = 273,16 \text{ K}$$

$$p = 611,73 \text{ Pa}$$

$$c_{p_w} = 4218 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$c_{p_v} = 1850 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\rho_w = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_i = 917 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$l_f = 0,334 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \text{ (fusion: faza stała} \rightarrow \text{ciecz)}$$

$$l_v = 2,50 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$