3 WŁAŚCIWOŚCI GAZÓW

3.1. PODSTAWY TEORETYCZNE

Gazem doskonałym nazwano taki gaz, w którym nie istnieją siły przyciągania międzycząsteczkowego, a objętość cząsteczki równa jest zeru. Inaczej gaz doskonały jest zbiorem punktów materialnych (cząsteczek).
Tak określony czynnik spełnia ściśle prawa gazów doskonałych, mając przy tym stałą wartość ciepła właściwego.

W rzeczywistości gazy doskonałe nie istnieją, jednak w wielu przypadkach można traktować gazy rzeczywiste jak doskonałe popełniając przy tym nieduży błąd.

Ciepło właściwe gazów rzeczywistych zmienia się znacznie wraz ze zmianą temperatury. Fakt ten uwzględniano w gazie półdoskonałym; zachowuje się on jak gaz doskonały, z tym że jego ciepło właściwe zależne jest od temperatury.

3.1.1. Prawa gazów doskonałych

Podstawowe zależności pomiędzy parametrami czynnika termodynamicznego określają prawa Boyle'a-Mariotta i Gay-Lussaca.

P r a w o B o y l e' a - M a r i o t t e' a mówi, że iloczyn ciśnień i objętości właściwej gazu przy stałej temperaturze jest wielkością stałą.
Zależność tę można opisać następująco:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{const} \qquad (3.1a)$$

lub

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \qquad (3.1b)$$

P r a w o   G a y - L u s s a c a dotyczy przemiany izobarycznej: objętość gazu ogrzewanego lub ochładzanego przy stałym ciśnieniu zmienia się wprost proporcjonalnie do zmiany temperatury bezwzględnej:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \tag{3.2}$$

R ó w n a n i e   s t a n u   g a z u

Opierając się na zależnościach (3.1) i (3.2) można wyprowadzić równanie stanu gazu doskonałego (równanie Clapeyrona) mające postać:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = mR = const \tag{3.3a}$$

lub ogólnie dla 1 kg masy gazu

$$p\,v = R\,T \tag{3.3b}$$

a dla m kg gazu

$$p\,V = m\,R\,T. \tag{3.3c}$$

W zależnościach tych: v - objętość właściwa gazu, m^3/kg; V - objętość gazu, m^3; m - masa gazu, kg; R - stała gazowa, $J/(kg\cdot{}^oK)$.

Stałą gazową wyznacza się z zależności:

$$R = \frac{B}{M_B}, \tag{3.4}$$

gdzie: B - uniwersalna stała gazowa $[J/(kmol\cdot{}^oK)]$,
M_B - równoważnik kilomola $[kg/kmol]$.

Równanie (2.3b) można przedstawić w innej postaci:

$$p\,v_m = T\,B \tag{3.5a}$$

lub

$$p\,V = n\,T\,B, \tag{3.5b}$$

przy czym: v_m - objętość molowa gazu $[m^3/kmol]$,
n - ilość kmol gazu.

P r a w o   A w o g a d r a

Prawo to głosi, że przy jednakowej temperaturze i ciśnieniu różne gazy doskonałe mają tę samą ilość cząsteczek w równych objętościach.
Z prawa tego wynika:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \qquad (3.6)$$

oraz

$$\mu \cdot v = v_m = \text{const}, \qquad (3.7)$$

gdzie: v_m – objętość molowa $[m^3/\text{kmol}]$.
Objętość molowa gazu doskonałego o ciśnieniu $p = 1{,}0132 \cdot 10^5 N/m^2$ (760 Tr) i temperaturze $T = 273^\circ K$ wynosi:

$$v_m = 22{,}4\ m^3/\text{kmol}.$$

3.1.2. Ciepło właściwe

Oznaczając przez dq ilość doprowadzonego ciepła, a przez dT uzyskany przyrost temperatury można napisać

$$dq = c\ dT,$$

$$c = \frac{dq}{dT}.$$

Wielkość c nazywa się ciepłem właściwym, oznacza ona ilość ciepła w J potrzebną do ogrzania jednostki masy o 1 deg.
W zależności od warunków w jakich następuje ogrzewanie lub ochładzanie gazu rozróżnia się ciepło właściwe:
- przy stałym ciśnieniu c_v $[J/(kg \cdot deg)]$,
- przy stałej objętości c_p $[J/(kg \cdot deg)]$.

Zależność pomiędzy c_v i c_p wyraża równanie Mayera:

$$c_p - c_v = R \qquad (3.8a)$$

lub

$$M_B\ c_p - M_B\ c_v = M_B\ R, \qquad (3.8b)$$

zatem

$$M_B\ c_p - M_B\ c_v = B. \qquad (3.8c)$$

Iloczyn $M_B c_p$ i $M_B c_v$ nazywa się molowym ciepłem właściwym i wyraża się w $J/(kmol \cdot {}^oK)$.
W tabeli 7 podano molowe ciepła właściwe różnych rodzajów gazów doskonałych.
Uniwersalna stała gazowa $B = 8314,7\ J/(kmol \cdot {}^oK) \approx$
$\approx 8315\ J/(kmol \cdot {}^oK)$.
W obliczeniach technicznych przemian gazów rzeczywistych traktuje się je przeważnie jako gazy półdoskonałe, dla których średnie ciepło właściwe wyznacza się ze wzoru:

$$c\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c\Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c\Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \qquad (3.9)$$

gdzie: t_1, t_2 – temperatura początkowa i końcowa przemiany $[^oC]$,

$c\Big|_0^{t_1}$ – średnie ciepło właściwe gazu od temp. 0^oC do temp. $t_1\ [^oC]$,

$c\Big|_0^{t_2}$ – średnie ciepło właściwe gazu od temp. 0^oC do temp. $t_2\ [^oC]$.

Wartości średniego i rzeczywistego ciepła właściwego dla różnych gazów podano w tabl. 8.

3.2. ZADANIA

X 3.2.1. Gaz o objętości $V = 28\ m^3$, temperaturze $T_1 = 293^oK$ (20^oC) i ciśnieniu $p_1 = 150\ kN/m^2$ ochłodzono do temperatury $T_2 = 273^oK$ (0^oC) i rozprężono do ciśnienia $p_2 = 1 \cdot 10^5\ N/m^2$. Obliczyć jaką objętość w nowych warunkach zajmować będzie gaz.

Rozwiązanie

Zgodnie z równaniem (3.3a)

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

skąd

$$V_2 = \frac{T_2}{T_1} \frac{p_1}{p_2} V_1 = \frac{273}{293} \cdot \frac{1,5 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^5} \cdot 28 = 39,1\ m^3.$$

× 3.2.2. Obliczyć masę i objętość właściwą tlenu znajdującego się w zbiorniku o pojemności $V = 3\ m^3$. W zbiorniku panuje nadciśnienie $p_n = 1{,}0\ MN/m^2$ i temperatura $T = 300^oK$ (27^oC). Ciśnienie barometryczne równe jest $b = 9{,}9 \cdot 10^4\ N/m^2$.

Rozwiązanie

Masę tlenu oblicza się z równania stanu gazu (3.3c) oraz zależności (3.4)

$$m = \frac{p\ V}{R\ T},$$

$$R = \frac{B}{M_B} = \frac{8315}{M_B}.$$

Równoważnik kilomola tlenu $M_B = \mu = 32$ (wg tabl. 3).
Ciśnienie bezwzględne w zbiorniku:

$$p = b + p_n = (0{,}99 + 10) \cdot 10^5 = 10{,}99 \cdot 10^5\ N/m^2.$$

Wstawiając otrzymano

$$m = \frac{10{,}99 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 32}{8315 \cdot 300} = 42{,}3\ kg.$$

Objętość właściwa tlenu:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{3}{42{,}3} = 0{,}071\ m^3/kg.$$

× 3.2.3. Do komory paleniskowej kotła dostarcza się $\dot{m} = 18\ kg/s$ powietrza. Nadciśnienie tłoczonego powietrza $p_n = 6\ kN/m^2$, a temperatura $T = 285^oK$ (12^oC). Obliczyć przekrój poprzeczny kanału doprowadzającego powietrze przy średniej prędkości $w = 10\ m/s$. Przeciętne ciśnienie barometryczne $b = 98\ kN/m^2$. Stała gazowa powietrza $R = 287\ J/(kg \cdot {}^oK)$.

Rozwiązanie

Ciśnienie bezwzględne w kanale.

$$p = b + p_n = 98 \cdot 10^3 + 6 \cdot 10^3 = 1{,}04 \cdot 10^5\ N/m^2.$$

Objętość właściwą oblicza się z równania (3.3b)

$$v = \frac{R\ T}{p} = \frac{287 \cdot 285}{1{,}04 \cdot 10^5} = 0{,}786\ m^3/kg.$$

Objętościowe natężenie przepływu powietrza

$$\dot{V} = \dot{m}\, v = 18 \cdot 0,786 = 14,15 \ m^3/s.$$

Przekrój poprzeczny kanału

$$S = \frac{\dot{V}}{w} = \frac{14,15}{10} = 1,415 \ m^2.$$

X 3.2.4. W zbiorniku o pojemności $V = 10 \ m^3$ znajduje się dwuatomowy gaz doskonały. Zbiornik wyposażony jest w zawór bezpieczeństwa, którego otwór o przekroju $S = 15 \ cm^2$ zamknięty jest grzybkiem dociskanym sprężyną o napięciu wstępnym $K = 1$ kN.

Gaz w zbiorniku został podgrzany od temperatury $T_1 = 320^{o}K$ ($47^{o}C$) i nadciśnienia $p_n = 0,6 \ MN/m^2$ do temperatury $T_2 = 650^{o}K$ ($377^{o}C$) a następnie ochłodzony do temperatury początkowej T_1. Ciśnienie barometryczne $b = 0,97 \cdot 10^5 \ N/m^2$.

Obliczyć:

- ilość kmol. gazu, która opuściła zbiornik,
- ciśnienie końcowe w zbiorniku,
- ilość ciepła, którą należało odprowadzić w trakcie ochładzania zbiornika.

Rozwiązanie

Bezwzględne ciśnienie początkowe w zbiorniku

$$p_1 = (6 + 0,97) \cdot 10^5 = 6,97 \cdot 10^5 \ N/m^2.$$

Równanie równowagi sił działających na grzybek zaworu

$$p_2 \, S = b \, S + K.$$

Zatem ciśnienie równowagi, przy którym otworzy się lub zamknie zawór bezpieczeństwa

$$p_2 = b + \frac{K}{S} = 0,97 \cdot 10^5 + \frac{1000 \cdot 10^4}{15} = 7,64 \cdot 10^5 \ N/m^2,$$

ponieważ

$$S = 15 \ cm^2 = 15 \cdot 10^{-4} \ m^2,$$

$$K = 1 \ kN = 1000 \ N.$$

Dla stanu początkowego zgodnie z zależnością (3.5b) można napisać:

$$p_1 V = n_1 B T_1$$

a po zamknięciu zaworu

$$p_2 V = n_2 B T_2,$$

stąd ilość gazu, która opuściła zbiornik

$$\Delta n = n_1 - n_2 = \frac{V}{B}\left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2}\right) = \frac{10}{8315}\left(\frac{6,97}{320} - \frac{7,64}{650}\right)\cdot 10^5$$

$$\Delta n = 1,204 \text{ kmol}.$$

Ciśnienie końcowe p_3 przy $T_3 = T_1 = 320^0K$ obliczono z równania (3.3a) pamiętając, że $V = const$

$$p_3 = p_2 \frac{T_3}{T_2} = 7,64\cdot 10^5 \cdot \frac{320}{650} = 3,76\cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Ilość odprowadzonego ciepła w trakcie chłodzenia gazu:

$$Q = n_2 M_B c_v (T_3 - T_2)$$

$$n_2 = \frac{p_2 V}{B T_2}$$

$$n_2 = \frac{7,64\cdot 10^5 \cdot 10}{8315\cdot 650} = 1,413 \text{ kmol},$$

z tabl. 7 dla gazu dwuatomowego

$$M_B c_v = 20,93 \text{ kJ/(kmol}\cdot\text{deg)},$$

ostatecznie

$$Q = 1,413\cdot 20,93\ (320 - 650) = 9760 \text{ kJ}.$$

X 3.2.5. Początkowe parametry azotu wynoszą: temperatura $T_1 = 473^0K$, objętość właściwa $v_1 = 1,9\ m^3/kg$. Gaz podgrzano przy stałym ciśnieniu do chwili, w której jego objętość wzrosła dwukrotnie.
Obliczyć końcową temperaturę gazu.

Odp. $T_2 = 946^0K$.

3.2.6. Obliczyć objętość właściwą tlenu o ciśnieniu $p = 2{,}3\ MN/m^2$ i temperaturze $T = 553^\circ K$ ($280^\circ C$).

Odp. $v = 0{,}0625\ m^3/kg$.

3.2.7. Butla stalowa o wewnętrznych wymiarach: długość $l = 1\ m$ i średnica $d = 0{,}2\ m$ wypełniona jest dwutlenkiem węgla o ciśnieniu $p = 14\ MN/m^2$ i temperaturze $T = 290^\circ K$ ($17^\circ C$).
Obliczyć masę gazu znajdującego się w butli.

Odp. $m = 8{,}05\ kg$.

3.2.8. Gaz o ciśnieniu $p = 5{,}89 \cdot 10^5\ N/m^2$ i temperaturze $T = 473^\circ K$ ($200^\circ C$) wypełnia zbiornik o objętości $V = 3{,}25\ m^3$. Masa gazu wynosi $m = 9{,}5\ kg$.
Obliczyć ilość kmol oraz objętość gazu w normalnych warunkach barycznych ($T = 273^\circ K$, $p = 1 \cdot 10^5\ N/m^2$).

Odp. $n = 0{,}487$ kmol; $V_n = 11{,}05\ nm^3$.

3.2.9. Butla wypełniona tlenem o ciśnieniu $p_1 = 13{,}26\ MN/m^2$ ma łączną masę $m_1 = 35{,}1\ kg$. Po upuszczeniu części tlenu masa butli z tlenem wynosiła $m_2 = 32{,}2\ kg$. Ciśnienie w butli zmniejszyło się przy tym do $p_2 = 7{,}65\ MN/m^2$. Jeszcze raz otworzono zawór butli upuszczając $m = 0{,}85\ kg$ tlenu. Temperatura gazu nie uległa zmianie i wynosiła $T = 288^\circ K$ ($15^\circ C$).
Obliczyć ciśnienie końcowe panujące w butli.

Odp. $p_3 = 6{,}01\ MN/m^2$.

3.2.10. Manometr podłączony do butli wypełnionej tlenem wskazuje ciśnienie $p_{n1} = 15\ MN/m^2$. Temperatura gazu w butli $T_1 = 293^\circ K$ ($20^\circ C$), ciśnienie barometryczne $b = 0{,}99 \cdot 10^5\ N/m^2$. Gaz znajdujący się w butli zajmowałby objętość $V = 6{,}2\ m^3$ przy ciśnieniu $p = 1{,}0132 \cdot 10^5\ N/m^2$ i $T = 273^\circ K$ ($0^\circ C$).
Obliczyć:

- objętość butli,
- o ile wzrośnie ciśnienie w butli, jeżeli rozgrzeje się na słońcu do temperatury $T_2 = 330^\circ K$ ($57^\circ C$),
- ile tlenu upuszczono z butli, jeżeli przy temperaturze gazu $T_3 = T_1$, ciśnienie wskazywane na manometrze zmalało do $p_{n3} = 8{,}0\ MN/m^2$.

Odp. $V = 4{,}46 \cdot 10^{-2}\ m^3$; $\Delta p = 1{,}9\ MN/m^2$; $\Delta m = 4{,}1\ kg$.

3.2.11. Wydajność sprężarki powietrza wynosi $\dot{m} = 0{,}0824$ kg/s przy ciśnieniu barometrycznym $b = 0{,}97 \cdot 10^5$ N/m^2 i temperaturze powietrza zewnętrznego $T = 293^\circ K$ ($20^\circ C$). Po jakim czasie sprężarka napełni zbiornik o pojemności $V = 25$ m^3 powietrzem, którego nadciśnienie $p_n = 1{,}0$ MN/m^2. Początkowe ciśnienie w zbiorniku $p = 1{,}5 \cdot 10^5$ N/m^2. Temperatura gazu w zbiorniku w czasie ładowania nie ulega zmianie i równa jest temperaturze powietrza zewnętrznego. Stała gazowa powietrza $R = 287$ J/(kg$\cdot ^\circ K$).

Odp. $\tau = 3630$ s.

X 3.2.12. Obliczyć średnie ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu i stałej objętości w zakresie temperatur od $T_1 = 373^\circ K$ ($100^\circ C$) do $T_2 = 1073^\circ K$ ($800^\circ C$). Wynik podać w kJ/(kmol$\cdot$deg).

Rozwiązanie

Z tabl. 8 odczytano dla $t_1 = 100^\circ C$ i $t_2 = 800^\circ C$

$$M_B\, c_p\Big|_0^{100} = 29{,}153 \text{ kJ/(kmol}\cdot\text{deg)},$$

$$M_B\, c_p\Big|_0^{800} = 31{,}028 \text{ kJ/(kmol}\cdot\text{deg)}.$$

Zgodnie z wzorem (3.9)

$$M_B\, c_p\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{M_B\, c_p\Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - M_B\, c_p\Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1},$$

$$M_B\, c_p\Big|_{100}^{800} = \frac{31{,}028 \cdot 800 - 29{,}153 \cdot 100}{800 - 100} = 31{,}296 \text{ kJ/(kmol}\cdot\text{deg)}.$$

Równanie Mayera (3.8c) ma postać:

$$M_B\, c_p - M_B\, c_v = B,$$

więc

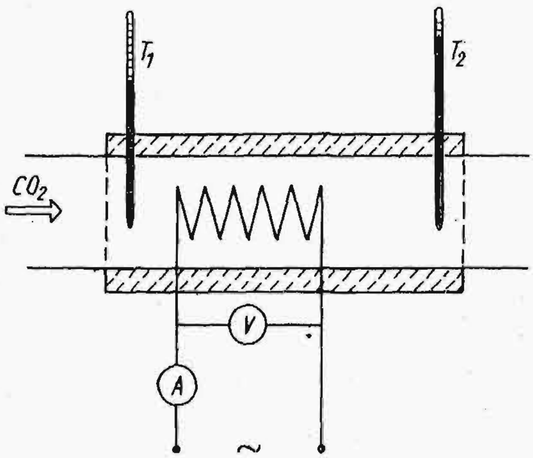
$$M_B\, c_v\Big|_{100}^{800} = M_B\, c_p\Big|_{100}^{800} - B,$$

$$M_B\, c_v\Big|_{100}^{800} = 31{,}296 - 8{,}315 = 23{,}181 \text{ kJ/(kmol}\cdot\text{deg)}.$$

3.2.13. Powietrze o temperaturze $T = 373^oK$ (100^oC) otrzymano mieszając dwa strumienie o temperaturach: $T_1 = 273^oK$ (0^oC), $T_2 = 1173^oK$ (900^oC). Obliczyć masy zimnego i gorącego powietrza, które należy zmieszać w celu uzyskania 1 kg powietrza o podanej temperaturze. Ciśnienia obu strumieni są jednakowe. Powietrze traktować jak gaz półdoskonały.

Odp. $m_1 = 1 - m_2 = 0,903$ kg.

3.2.14. Natężenie przepływu dwutlenku węgla zmierzono za pomocą urządzenia pokazanego na rys.3.1. Temperatura przepływającego gazu przed i za elektryczną grzałką mierzona była termometrami. Obliczyć masowe natężenie przepływu gazu $\dot{m}$ jeżeli moc włączonego grzejnika wynosiła $N = 1,85$ kW, temperatura przed grzejnikiem $T_1 = 301^oK$(28^oC), za grzejnikiem $T_2 = 388,6^oK$ ($115,6^oC$). Ponadto obliczyć prędkość gazu za przepływomierzem, jeżeli średnica kanału $d = 50$ mm, a ciśnienie $p = 1,8 \cdot 10^5$ N/m^2. Dwutlenek węgla traktować jak gaz półdoskonały.



Rys.3.1

Odp. $\dot{m} = 0,024$ kg/s; $w = 4,98$ m/s.

X 3.2.15. W zbiorniku o pojemności $V = 3$ m^3 znajduje się dwutlenek węgla o parametrach początkowych: ciśnieniu $p_1 = 3 \cdot 10^5$ N/m^2 i temperaturze $T_1 = 450^oK$ (177^oC). Do zbiornika wtłoczono $m = 25$ kg tego samego gazu o temperaturze $T = 320^oK$ (47^oC). Obliczyć:

- końcowe ciśnienie i temperaturę gazu w zbiorniku doskonale izolowanym,

- ilość ciepła jaką gaz w trakcie ładowania stracił na rzecz otoczenia (brak izolacji), jeżeli końcowa temperatura gazu wynosi $T_2' = 340^oK$ (67^oC).

Obliczenia przeprowadzić traktując czynnik jako gaz doskonały, oraz jako gaz półdoskonały.

Rozwiązanie

G a z   d o s k o n a ł y

Ilość ciepła dostarczona z gazem doładowanym

$$Q_1 = \Delta m\, c_p\, T.$$

Przyrost energii cieplnej gazu w zbiorniku

$$\Delta Q = (m_1 + \Delta m) c_v\, T_2 - m_1\, c_v\, T_1,$$

przy czym: m_1 - masa początkowa gazu w zbiorniku [kg],
T_2 - temperatura końcowa gazu [^oK].

Ilość ciepła straconego na rzecz otoczenia $Q_s = 0$.

Więc

$$Q_1 = \Delta Q$$

$$\Delta m\, c_p\, T = (m_1 + \Delta m) c_v\, T_2 - m_1\, c_v\, T_1, \qquad (a)$$

skąd

$$T_2 = \frac{\Delta m\, c_p\, T + m_1\, c_v\, T_1}{(m_1 + \Delta m) c_v}. \qquad (b)$$

Korzystając z równania stanu gazu (3.3b) i tabl. 3:

$$m_1 = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{3\cdot 10^5\cdot 3\cdot 44}{8315\cdot 450} = 10,57 \text{ kg}$$

dla CO_2 $M_B = 44$ kg/kmol.

Z tabl.7 dla gazu dwuatomowego odczytano

$$c_p = \frac{29,3}{M_B} = \frac{29,3}{44} = 0,666 \text{ kJ/(kg·deg)},$$

$$c_v = \frac{20,93}{M_B} = \frac{20,93}{44} = 0,476 \text{ kJ/(kg·deg)}.$$

Wstawiając wyznaczone wartości do wzoru (b):

$$T_2 = \frac{320\cdot 25\cdot 0,666 + 0,476\cdot 450}{(25 + 10,57)\cdot 0,476} = 434^oK.$$

Ciśnienie końcowe gazu:

$$p_2 = \frac{(m_1 + \Delta m)R\, T_2}{V} = \frac{(25 + 10,57)8315 \cdot 434}{3 \cdot 44} = 9,72 \cdot 10^5 \ N/m^2,$$

$$p_2 = 0,972 \ MN/m^2.$$

Ilość straconego ciepła

Z bilansu cieplnego zbiornika otrzymuje się równanie:

$$Q_s = -\left[\Delta m\, c_p\, T + m_1\, c_v\, T_1 - (m_1 + \Delta m) c_v\, T_2'\right]$$

$$Q_s = -\left[25 \cdot 0,666 \cdot 320 + 10,57 \cdot 0,524 \cdot 450 - \right.$$
$$\left. - (10,57 + 25)0524 \cdot 340\right]$$

$$Q_s = -\ 634 \ kJ.$$

G a z   p ó ł d o s k o n a ł y

Równanie bilansu cieplnego (a) uwzględniając średnie ciepło właściwe oraz wyrażając temperaturę w ^oC można przedstawić w postaci:

$$c_v\Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - \frac{\Delta m}{m_1 + \Delta m} \cdot c_p\Big|_0^{t} \cdot t - \frac{m_1}{m_1 + \Delta m}\, c_v\Big|_0^{t_1} \cdot t_1 = 0. \qquad (c)$$

w równaniu tym:

t_2 - wielkość szukana,

$t\ = 47^oC, \quad t_1 = 177^oC.$

Z tabl. 8 dla CO_2 interpolując odczytano:

$$M_B\, c_v\Big|_0^{177} = 31,297 \ kJ/(kmol \cdot deg),$$

$$M_B\, c_p\Big|_0^{47} = 36,917 \ kJ/(kmol \cdot deg),$$

skąd

$$c_v\Big|_0^{177} = \frac{31,297}{44} = 0,715 \ kJ/(kg \cdot deg),$$

$$c_p\Big|_0^{47} = \frac{36,917}{44} = 0,839 \ kJ/(kg \cdot deg).$$

Wstawiając wyznaczone wartości do równania (c) otrzymano:

$$c_v\Big|_0^{t_2}\cdot t_2 - \frac{25}{25 + 10,57}\cdot 0,839\cdot 47 - \frac{10,57}{25 + 10,57}\cdot 0,715\cdot 177 = 0$$

a po uproszczeniu

$$c_v\Big|_0^{t_2}\cdot t_2 - 65,3 = 0. \qquad (d)$$

Równanie (d) można rozwiązać metodą kolejnych przybliżeń lub w sposób graficzny:

$$f(t_2) = c_v\Big|_0^{t_2}\cdot t_2 - 65,3 = 0.$$

Zakładając $t_2 = 150^oC$ i odczytując z tabl. 8

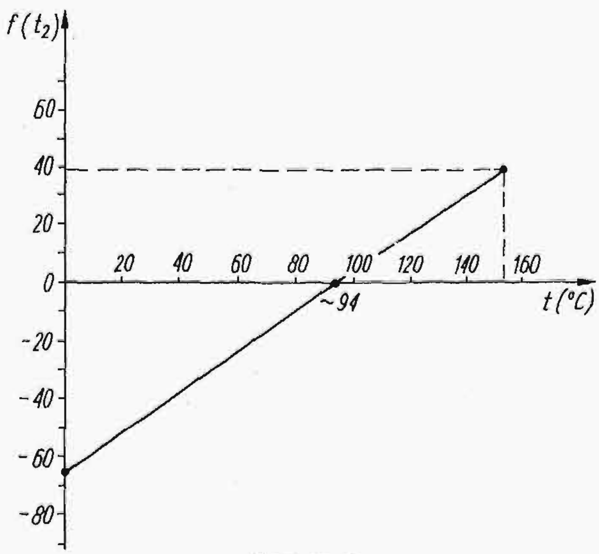
$$M_B\, c_v\Big|_0^{150} = 30,775 \text{ kJ/(kmol·deg)}.$$

Zatem

$$c_v\Big|_0^{150} = \frac{30,775}{44} = 0,699 \text{ kJ/(kmol·deg)}.$$

Obliczając $f(t_2)$ dla $t_2 = 150^oC$ i $t_2 = 0^oC$ otrzymano:

$$f(150) = 0,699\cdot 150 - 65,3 = 39,5$$
$$f(0) = - 65,3.$$



Rys.3.2

Nanosząc otrzymane wartości na wykres (rys.3.2) odczytano $t_2 \approx 94^oC$, więc $T_2 \approx 273 + 94 \approx 367^oK$.
Ciśnienie końcowe:

$$p_2 = \frac{(25 + 10,57)8315 \cdot 367}{3 \cdot 44} = 8,18 \cdot 10^5 \ N/m^2,$$

$$p_2 = 0,818 \ MN/m^2 .$$

Ilość straconego ciepła

$$Q_s = -\left[\Delta m \ c_p\Big|_0^t \cdot t + m_1 \ c_v\Big|_0^{t_1} \cdot t_1 - (m_1 + \Delta m) c_v\Big|_0^{t'_2} \cdot t'_2\right].$$

Z tabl. 8 odczytano:

$$M_B \ c_v\Big|_0^{67} = 29,035 \ kJ/(kmol \cdot deg),$$

$$c_v\Big|_0^{67} = \frac{29,035}{44} = 0,660 \ kJ/(kg \cdot deg).$$

Podstawiając otrzymano:

$$Q_s = -\left[25 \cdot 0,839 \cdot 47 + 10,57 \cdot 0,715 \cdot 177 - (25 + 10,57) \cdot 0,660 \cdot 67\right]$$

$$Q_s = - 750 \ kJ.$$