

JANUSZ CIEŚLIŃSKI, DARIUSZ GRUDZIŃSKI
WIESŁAW JASIŃSKI, WIESŁAW PUDLIK

TERMODYNAMIKA

ZADANIA I PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

pod redakcją
WIESŁAWA PUDLIKA

Gdańsk 2008

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Zbigniew Cywiński

RECENZENT
Władysław Nowak

Wydanie I - 2000
Wydanie II, cyfrowe - 2008

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

© Copyright by
Politechnika Gdańska
Gdańsk 2008

ISBN 978-83-904107-9-1

KIEROWNIK ODDZIAŁU SYSTEMÓW KOMPUTEROWYCH I INFORMACJI NAUKOWEJ
BIBLIOTEKI GŁÓWNEJ POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Lech Zięborak

SPIS TREŚCI

Przedmowa	4
1. Ciśnienie	5
2. Proste przekształcenia energii	9
3. Ciepło)	11
4. Praca	15
5. Pierwsza zasada termodynamiki	18
6. Stany i funkcje stanu gazów doskonałych i półdoskonałych	22
7. Roztwory gazowe	26
8. Charakterystyczne przemiany gazów doskonałych	33
9. Obiegi termodynamiczne gazów	46
10. Egzergia	58
11. Stany i funkcje stanu par nasyconych i przegrzanych	61
12. Charakterystyczne przemiany par nasyconych i przegrzanych	69
13. Termodynamiczne obiegi parowe	82
14. Efekt Joule’a–Thomsona, skraplanie powietrza	90
15. Stany i przemiany gazów wilgotnych	94
16. Stechiometria i termodynamika spalania)	114
17. Termodynamika przepływów	123
18. Przenoszenie ciepła	132
Tablice termodynamiczne	144
1. Właściwości wybranych gazów	145
2. Średnie ciepła właściwe przy stałym ciśnieniu	145
3. Średnie ciepła molowe przy stałym ciśnieniu	146
4. Wyciąg z tablic pary nasyconej H ₂ O uszeregowany wg temperatur	148
5. Wyciąg z tablic pary nasyconej H ₂ O uszeregowany wg ciśnień	151
6. Para przegrzana H ₂ O	153
7. Para nasycona amoniaku NH ₃	168
8. Para nasycona H ₂ O w równowadze z lodem lub wodą	169
Wykresy termodynamiczne	
Wykres h - s dla pary wodnej	170
Wykres P - h dla amoniaku	171
Wykres T - s dla powietrza	172
Wykres h - X dla powietrza wilgotnego	173

PRZEDMOWA

Słyszałem – zapomniałem

Widziałem – pamiętam

Zrobiłem – rozumiem

Stara mądrość chińska

Stosownie do zacytowanej, jako motto, starochińskiej mądrości, przerobienie odpowiedniej liczby zadań przez studiującego pozwala mu nie tylko ogarnąć myślowo obszar praktycznych zastosowań Termodynamiki, ale również lepiej zrozumieć ten przedmiot.

W niniejszym zbiorze pomieszczono zarówno przykłady, jak i zadania. Przykłady zawierają pełny tok rozwiązań i są reprezentatywne dla pewnych typów zadań. Pomaga to rozwiązywać pozostałe zadania, w których podano jedynie ostateczne wyniki obliczeń.

We wszystkich obliczeniach stosuje się jako jednostkę ciśnienia kilopaskale ($\text{kPa} \equiv \text{kN/m}^2$), co znakomicie ułatwia te obliczenia, np. w przypadku pracy – dając od razu kilodżule (kJ) albo mocy – otrzymywanej w kilowatach (kW). Dalszymi przykładami są obliczenia wykonywane za pomocą termicznego równania stanu z ciśnieniem w kPa i stałą gazową R_i w kilo-niutonometrach ($\text{kNm} = \text{kJ}$) oraz związki tej stałej z ciepłami właściwymi c_p i c_v . Dzięki konsekwentnemu stosowaniu jednostek będących tysiącrotnościami jednostek podstawowych, kg, kN, kNm, kPa, kJ i kW, ujawnia się w pełni prostota wzorów wielkościowych. Oczywiście metr, sekunda i kelwin pozostają w postaci podstawowej.

Aby dobrze opanować przedmiot, trzeba rozwiązać dużą liczbę zadań. Jeżeli nie można rozwiązać wszystkich, a w kilku rozdziałach - zwłaszcza początkowych, jest to w zupełności możliwe - a nawet konieczne, wówczas można opuścić te zadania, przy czytaniu których już widzi się oczami wyobraźni sposób rozwiązania.

Treść oparto na wieloletnim doświadczeniu autorów. Większa część rozdziałów służyła już za pomoc dydaktyczną w latach 1997–99, w oparciu o powielany rękopis. Zebrane w tym czasie uwagi przyczyniły się do ulepszenia ostatecznej wersji, która teraz ukazuje się drukiem.

Autorami poszczególnych rozdziałów są:

1÷5, 10, 13, 14, 16÷18	– Wiesław Pudlik
6,7	– Dariusz Grudziński
8	– Dariusz Grudziński, Wiesław Pudlik
9	– Janusz Cieśliński, Wiesław Pudlik
11, 12	– Wiesław Jasiński, Wiesław Pudlik
15	– Wiesław Jasiński

Niniejszy zbiór zadań zaopatrzony jest w tablice i wykresy niezbędne przy rozwiązywaniu zadań. Przygotowanie tych bardzo potrzebnych pomocy nie było łatwe, a za ich udany kształt ostateczny wyrażam podziękowanie pani Beacie Kaczmarek (tablice) oraz panom Jerzemu Szparadze i Przemysławowi Dominiczakowi (wykresy).

Osobne podziękowania składam pani Beacie Kaczmarek za staranne przepisanie rękopisu na komputerze, połączone z cierpliwym i znużającym korygowaniem i cyzelowaniem tych trudnych w pisaniu tekstów.

Gdańsk, w lipcu 1999 r.

Wiesław Pudlik

PRZEDMOWA DO II WYDANIA

Drugie wydanie ukazuje się jako cyfrowe w ramach Wirtualnej Biblioteki Cyfrowej Politechniki Gdańskiej. Jest powtórzeniem zachowanego na nośniku magnetycznym oryginału manuskryptu z dodaniem niezbędnych, chociaż nielicznych, uzupełnień, korekt i zmian redakcyjnych.

Gdańsk, w styczniu 2008

Wiesław Pudlik

1. CIŚNIENIE

Zadanie 1.1

Manometr podłączony do przewodu parowego pokazuje ciśnienie 2,63 MPa, ciśnienie atmosferyczne wynosi w tym czasie 980 hPa. Jakie jest ciśnienie absolutne pary?

Wynik: $P_p = 2728 \text{ kPa} \cong 2,73 \text{ MPa}$.

Zadanie 1.2

W tym samym czasie zmierzono w innym przewodzie parowym, za pomocą manometru U-rurkowego, nadciśnienie $\Delta z = 180 \text{ mm}$ słupa wody ($\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$). Ile wynosi ciśnienie absolutne P'_p w tym przewodzie?

Rozwiązanie

$$\begin{aligned} p_{\text{man}} &= \Delta z (\rho g) = 0,180 [\text{m}] \cdot 1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = \\ &= 1765,8 \left[\frac{\text{kgm}}{\text{s}^2} \frac{1}{\text{m}^2} \equiv \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \equiv 1,77 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \equiv \text{kPa} \right] \\ P_{\text{atm}} &= 980 \text{ hPa} = 98\,000 \text{ Pa} = 98,0 \text{ kPa} \\ P'_p &= p_{\text{man}} + P_{\text{atm}} = 1,77 + 98,0 = 99,77 \cong 99,8 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Zadanie 1.3

Przy ciśnieniu atmosferycznym 1010 hPa zaobserwowano na manometrze U-rurkowym, podłączonym do przewodu parowego, wysokość słupa wody ($\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$) wynoszącą 2,70 m oraz wysokość słupa rtęci ($\rho_{\text{Hg}} = 13560 \text{ kg/m}^3$) wynoszącą 1,62 m. Jakie jest ciśnienie absolutne pary w przewodzie?

Wynik: $P_p = 290 \text{ kPa}$.

Zadanie 1.4

W skraplaczu pary wodnej zmierzono podciśnienie 870 hPa przy ciśnieniu atmosferycznym wynoszącym 985 hPa. Odpowiedzieć na pytania: ile wynosi ciśnienie absolutne w skraplaczu? ile wynosi tzw. próżnia w procentach?

Wyniki: $P_a = 11,5 \text{ kPa}$, próżnia: 88,3%.

Zadanie 1.5

W skraplaczu maszyny parowej ma panować 85% próżni. Ciśnienie atmosferyczne wynosi 1005 hPa. Poszukać odpowiedzi na pytania: jakie podciśnienie p_m powinien wskazywać wakuometr? ile wynosi ciśnienie absolutne w tych warunkach?

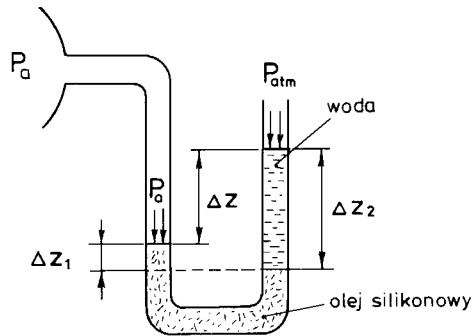
Wyniki: $p_m = 85,4 \text{ kPa}$, $P_a = 15,1 \text{ kPa}$.

Zadanie 1.6

Na niskociśnieniowym przewodzie gazowym zainstalowano manometr U-rurkowy z olejem silikonowym ($\rho_s = 1203 \text{ kg/m}^3$) jako cieczą manometryczną. Dla powiększenia wskazania wlewo, na olej w otwartym ramieniu manometru, wodę ($\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$).

- a) Ile wynosi ciśnienie absolutne P_a i ciśnienie manometryczne (nadciśnienie) p_m gazu dla zmierzonych wysokości $\Delta z_1 = 122 \text{ mm}$ i $\Delta z_2 = 305 \text{ mm}$ (patrz rys. 1.1) dla ciśnienia atmosferycznego 985 hPa ?
- b) Jaka byłaby różnica poziomów oleju Δz , gdyby wody w otwartym ramieniu nie było?

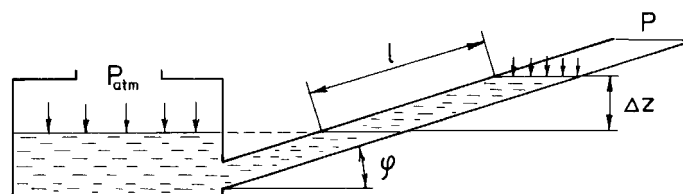
Wyniki: a) $P_a = 100,05 \text{ kPa}$, $p_m = 1546 \text{ Pa}$, b) $\Delta z = 131 \text{ mm}$.



Rys. 1.1

Zadanie 1.7

Podciśnienie w czopuchu kotła parowego zmierzono mikromanometrem z rurką pochyloną pod kątem $\varphi = 25^\circ$ względem poziomu (patrz rys. 1.2), napełnionym metanolem, który w danej temperaturze ma gęstość $\rho_{\text{met}} = 792 \text{ kg/m}^3$. Na podziałce przylegającej do rurki odczytano długość słupka cieczy $l = 60 \text{ mm}$, przy ciśnieniu atmosferycznym $P_{\text{atm}} = 762 \text{ mm}$ słupka rtęci. Obliczyć: a) podciśnienie i ciśnienie absolutne panujące w czopuchu, b) odczyt na podziałce, gdyby przyrząd napełniony był wodą, a ciśnienie w czopuchu byłoby takie same ($\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$).



Rys. 1.2

Rozwiązanie

- a) Wysokość słupka metanolu wynosi

$$\Delta z_{\text{met}} = l \cdot \sin \varphi = 60 \cdot \sin 25^\circ = 25,36 \text{ mm}$$

Odpowiada to podciśnieniu:

$$\begin{aligned} p_m &= \Delta z_{\text{met}} \rho_{\text{met}} g = (25,36 \cdot 10^{-3}) \cdot 792 \cdot 9,81 = \\ &= 197,0 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \equiv \text{Pa} \right] = 0,197 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Ciśnienie absolutne spalin w czopuchu:

$$P = P_{\text{atm}} - p_m = \frac{762}{750} \cdot 100 - 0,197 = 101,5 \text{ kPa}$$

b) Wysokość słupka wody wynosiłaby:

$$\Delta z_w = \frac{p_m}{\rho_w g} = \frac{197}{998 \cdot 9,81} = 20,1 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 20,1 \text{ mm}$$

a odczytana na podziałce długość:

$$l = \frac{20,1}{\sin 25^\circ} = 47,6 \text{ mm}$$

Zadanie 1.8

Nadciśnienie gazu w rurociągu wynosi $p_m = 28 \text{ kPa}$. Dla zmierzenia tego ciśnienia użyto U-rurki o maksymalnym wychyleniu słupka cieczy $\Delta z_{\text{max}} = 2400 \text{ mm}$. W celu uzyskania największej dokładności pomiaru, należy wybrać jedną z następujących cieczy manometrycznych: rtęć ($\rho_{\text{Hg}} = 13546 \text{ kg/m}^3$), wodę ($\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$), glicerynę $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$ ($\rho_{\text{gl}} = 1260 \text{ kg/m}^3$) lub nitrobenzen: $\text{C}_6\text{H}_5(\text{NO})_2$ ($\rho_{\text{nb}} = 1203 \text{ kg/m}^3$). Jakie będą wychylenia Δz w poszczególnych przypadkach?

Wyniki: $\Delta z_{\text{Hg}} = 210,7 \text{ mm}$, $\Delta z_w = 2860,0 \text{ mm}$, $\Delta z_{\text{gl}} = 2265,3 \text{ mm}$, $\Delta z_{\text{nb}} = 2372,6 \text{ mm}$.

Woda daje, co prawda, największe wychylenie, ale ono przekraczałoby Δz_{max} , dlatego użyć należy nitrobenzenu.

Zadanie 1.9

Dawniej wyrażano ciśnienie w atmosferach technicznych (at) lub fizycznych (atm). Jakie są współczynniki przeliczeniowe tych jednostek na paskale (Pa) i kilopaskale (kPa)?

Rozwiązanie

$$1 \text{ at} = 1 \frac{\text{kG}}{\text{cm}^2} = \frac{9,80665 [\text{N}]}{0,01^2 [\text{m}^2]} = 98\,066,5 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \equiv \text{Pa} \right] = 98,067 \text{ kPa}$$

natomiast

$$1 \text{ atm} = 760 [\text{mm Hg} \equiv \text{Tr}] = \frac{760}{750} = 1,013 \text{ bar} = 101,3 \text{ kPa}$$

gdych: $1 \text{ bar} = 750 [\text{mm Hg} \equiv \text{Tr}]$

Zadanie 1.10

Z wnętrza składającej się z 2 połówek wydrążonej kuli o średnicy wewnętrznej 500 mm wypompowano powietrze w 90 procentach. Jaka musi być minimalna siła F rozdziałająca połówki kuli przy ciśnieniu atmosferycznym 750 mm słupka rtęci, jeżeli pominąć można siły tarcia i bezwładności?

Wynik: $F = 17,67 \text{ kN}$.

Zadanie 1.11

Manometr mierzący ciśnienie zapasowego propanu w butli pokazuje 320 kPa przy ciśnieniu atmosferycznym 765 mm Hg. Butla umieszczona jest w koszu balonu. Jakie będzie wskazanie manometru wtedy, gdy balon uniesie się na wysokość, na której ciśnienie wynosi 0,72 bara?

Wynik: $p'_m = 350 \text{ kPa}$.

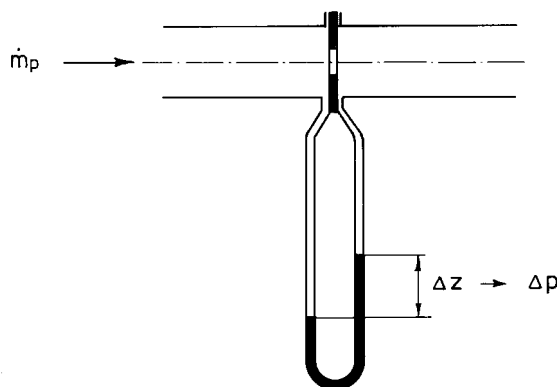
Zadanie 1.12

Do pomiaru strumienia masy sprężonego powietrza płynącego rurociągiem o średnicy wewnętrznej 160 mm użyto zwężki ISA, do której podłączony jest manometr różnicowy napełniony rtęcią ($\rho_{\text{Hg}} = 13\,570 \text{ kg/m}^3$) jako cieczą manometryczną. Strumień masy oblicza się^{*)} ze wzoru:

$$\dot{m} = C \cdot \sqrt{\rho \Delta p}$$

w którym Δp [$\text{N/m}^2 \equiv \text{Pa}$] jest przytarczowym spadkiem ciśnienia na zwężce. Jaki strumień masy powietrza płynął rurociągiem wtedy, gdy zmierzona różnica poziomów rtęci wynosiła $\Delta z = 118 \text{ mm}$? Stała użytej do pomiaru zwężki wynosi $C = 8,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, a gęstość powietrza w rurociągu w chwili pomiaru $\rho_p = 7,13 \text{ kg/m}^3$. Jaka była prędkość przepływu powietrza w_p ?

Wyniki: $\Delta p = 15708 \text{ Pa}$, $\dot{m}_p = 2,95 \text{ kg/s}$, $w_p = 20,6 \text{ m/s}$.



Rys. 1.3

Zadanie 1.13

Zwężką ISA o stałej $C = 0,021 \text{ m}^2$ zmierzono strumień masy przegrzanej pary wodnej, mającej w warunkach pomiaru objętość właściwą $v = 0,2327 \text{ m}^3/\text{kg}$. Przewody łączące rurociąg parowy z manometrem różnicowym (jak na rys. 1.3) wypełnione są wodą ($\rho_w = 996 \text{ kg/m}^3$) powstałą ze skroplenia pary. Jaki jest strumień masy pary dla zmierzonej różnicy poziomów rtęci ($\rho_{\text{Hg}} = 13\,520 \text{ kg/m}^3$) wynoszącej $\Delta z = 125 \text{ mm}$. Z jaką prędkością przepływa para rurociągiem, który ma średnicę wewnętrzną 250 mm?

Wyniki: $\Delta p = 15358 \text{ Pa}$, $\dot{m} = 5,395 \text{ kg/s}$, $w = 25,6 \text{ m/s}$.

^{*)} Szczegóły w skrypcie: Termodynamika. Laboratorium I miernictwa cieplnego. Cz. I. (red. W. Pudlik). Gdańsk: Wydawnictwo PG 1993.

2. PROSTE PRZEKSZTAŁCENIA ENERGII

Zadanie 2.1

Jaka jest moc silnika parowego, który zużywa 3,5 t/h pary, a każdy 1 kg pary wykonuje pracę techniczną w ilości 1420 kJ?

Rozwiązanie

$$N = \frac{L_t}{\tau} = \frac{m l_t}{\tau} = \dot{m} l_t = \frac{3500}{3600} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] 1420 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] = 1380,2 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \equiv \text{kW} \right]$$

Zadanie 2.2

Energia potencjalna spadającej w wodospadzie o wysokości 50 m wody zamienia się w całości w energię cieplną tej wody. O ile kelwinów podniesie się temperatura tej wody, jeżeli nie nastąpi żadna strata ciepła na rzecz otoczenia? O ile kelwinów ogrzałaby się rtęć spadająca z tej samej wysokości ($c_{Hg} = 0,1465 \text{ kJ/kg K}$)?

Wyniki: $\Delta t_w = 0,12 \text{ K}$, $\Delta t_{Hg} = 3,35 \text{ K}$

Zadanie 2.3

Jaka masa ołowiu m_{Pb} o temperaturze 15°C może zostać podgrzana do temperatury topnienia 327°C przez uderzenie młota o masie 250 kg spadającego z wysokości 2 m, jeżeli cała energia spadającego młota przekształci się w energię cieplną ołowiu (Pb)? Ciepło właściwe ołowiu $c_{Pb} = 0,1298 \text{ kJ/kg K}$.

Wynik: $m_{Pb} = 0,121 \text{ kg}$.

Zadanie 2.4

Podczas badań silników przetwarza się („niszczy”) wytworzoną przez silnik energię mechaniczną poprzez tarcie w sprzęgniętym z silnikiem hamulcu w energię termiczną. Aby hamulec się nie zatarł, trzeba go chłodzić wodą i na bieżąco odprowadzać wytworzone ciepło tarcia. Ile wody musi przepływać godzinowo przez hamulec, jeżeli – przy mocy silnika 44,1 kW na sprzęgle – 95% ciepła tarcia przejmuje woda, a reszta odpływa bezpośrednio do otoczenia? Dopuszczalny wzrost temperatury wody wynosi 40 K.

Wynik: $\dot{m}_w = 900,5 \text{ kg/h}$.

Zadanie 2.5

Jaki jest najkrótszy czas, po którym 2 kg wody o temperaturze 10°C zostanie podgrzane grzałką elektryczną o mocy 500 W do temperatury 100°C ? ($c_w = 4,187 \text{ kJ/kg K}$).

Rozwiązanie

Moc elektryczna w całości zamienia się w strumień cieplny:

$$N_{el} = \dot{Q} = \frac{Q}{\tau}$$

Ciepło, bez strat (bo „najkrótszy czas”), przejmowane jest przez wodę:

$$Q = m c_w (t_2 - t_1) = 2 \cdot 4187 \cdot (100 - 10) = 753660 \text{ J}$$

Czas wytworzenia tego ciepła przez grzałkę równy jest poszukiwanemu czasowi podgrzania wody do 100°C:

$$\tau = \frac{Q}{N_{el}} = \frac{753\,660}{500} = 1507,3 \text{ s} = 25 \text{ min}$$

Zadanie 2.6

Jaką moc rozwija silnik spalinowy, który zużywa w ciągu godziny 80 kg paliwa o jednostkowej energii chemicznej (wartości opałowej) 41 000 kJ/kg i ma sprawność ogólną (efektywną) $\eta_o = 40\%$?

Wynik: $N = 364,4 \text{ kW}$.

Zadanie 2.7

Samochód o masie 900 kg jadący z prędkością 60 km/h zostaje zahamowany. Obliczyć ilość ciepła tarcia wydzieloną kosztem pracy tarcia na elementach hamujących, biorąc pod uwagę wyłącznie energię ruchu postępowego pojazdu.

Wynik: $Q_f = 125 \text{ kJ}$.

Zadanie 2.8

Bijak młota mechanicznego o masie 175 kg spada z wysokości 2,5 m na matrycę stalową o masie 40 kg z częstością 80 uderzeń na minutę. Początkowa temperatura matrycy wynosi 20°C, ciepło właściwe stali $c = 0,45 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$. Obliczyć czas τ , po którym matryca osiągnie temperaturę 250°C, jeżeli 25% energii spadającego bijaka pochłaniane jest przez matrycę jako ciepło, reszta zaś rozprasza się w otoczeniu.

Wynik: $\tau = 48,2 \text{ min}$.

3. CIEPŁO

Zadanie 3.1

W zbiorniku znajduje się 70 m^3 oleju opałowego o temperaturze -2°C i gęstości 1002 kg/m^3 . Średnie ciepło właściwe wynosi

$$c|_{0^\circ}^t = 1,734 + 0,25 \cdot 10^{-2} t \quad [\text{kJ/kg K}]$$

Olej podgrzano do 48°C . Ile ciepła należało zużyć do tego celu, jeżeli 10% doprowadzanego ciepła odpłynęło jako strata do otoczenia?

Wynik: $Q = 7205 \text{ kJ}$.

Zadanie 3.2

W zbiorniku metalowym (rys. 3.1) znajduje się metan (CH_4) w ilości $0,4 \text{ kmol}$ i w temperaturze 20°C . Średnie ciepło molowe metanu dane jest następującym wzorem:

$$\tilde{c}|_{200^\circ}^t = 32 + 2,1 \cdot 10^{-2} t \quad [\text{kJ/kmol K}]$$

Pojemność cieplna ($m \cdot c$) zbiornika wynosi $2,8 \text{ kJ/K}$. Gaz ogrzewany jest grzejnikiem elektrycznym o mocy 3 kW . Po jakim czasie osiągnie metan temperaturę 300°C , jeżeli izolacja cieplna zbiornika ogranicza skutecznie straty cieplne i czyni je pomijalnymi?

Rozwiązanie

Wydzielane kosztem energii elektrycznej ciepło przejmowane jest przez gaz i ścianki zbiornika:

$$Q = N_{el} \tau = Q_g + Q_{sc}$$

czyli

$$Q = n \tilde{c}_v|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) + (mc)(t_2 - t_1)$$

albo

$$Q = \left[n \tilde{c}_v|_{t_1}^{t_2} + (mc) \right] (t_2 - t_1)$$

Średnie ciepło molowe w zadanych granicach temperatur:

$$\tilde{c}_v|_{t_1}^{t_2} = \frac{\tilde{c}_v|_{200^\circ}^{t_2} (t_2 - 200) - \tilde{c}_v|_{200^\circ}^{t_1} (t_1 - 200)}{t_2 - t_1}$$

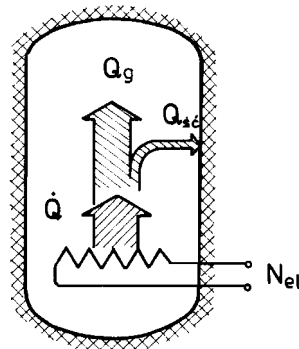
oblicza się za pomocą średnich ciepł molowych uzyskanych z podanego wyżej wzoru:

$$\tilde{c}_v|_{200}^{t_2} = \tilde{c}_v|_{200^\circ}^{300^\circ} = 32 + 2,1 \cdot 10^{-2} \cdot 300 = 38,30 \text{ kJ/kmol K}$$

$$\tilde{c}_v|_{200}^{t_1} = \tilde{c}_v|_{200^\circ}^{20^\circ} = 32 + 2,1 \cdot 10^{-2} \cdot 20 = 32,42 \text{ kJ/kmol K}$$

a więc

$$\tilde{c}_v|_{t_1}^{t_2} = \tilde{c}_v|_{20^\circ}^{300^\circ} = \frac{38,30 (300 - 200) - 32,42 (20 - 200)}{300 - 20} = 34,52 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$$



Rys. 3.1

Ilość pochłoniętego ciepła

$$Q = [0,4 \cdot 34,52 + 2,8] (300 - 20) = 4650,2 \text{ kJ}$$

a czas jego wytworzenia przez grzejnik elektryczny:

$$\tau = \frac{Q}{N_{el}} = \frac{4650,2}{3} = 1550,07 \text{ s} = 25'50''$$

Zadanie 3.3

500 g stali ($c_{st} = 0,473 \text{ kJ/kg K}$) o temperaturze 800°C wrzucono do kąpieli wodnej o masie 10 kg ($c_w = 4,19 \text{ kJ/kg K}$) i temperaturze 15°C . Jaka temperatura wspólna t_m ustali się w końcu, jeżeli nie wystąpią straty ciepła do otoczenia?

Wynik: $t_m = 19,4^\circ\text{C}$.

Zadanie 3.4

15 kg wody o temperaturze 60°C zmieszano z 25 kg wody o temperaturze 10°C . Jaka jest temperatura wody po zmieszaniu t_m . Wskazówka: można przyjąć niezmiennosc ciepła właściwego wody w tym zakresie temperatur.

Wynik: $t_m = 28,75^\circ\text{C}$.

Zadanie 3.5

Termowentylator zasilany jest mocą elektryczną 1,2 kW. Jaki strumień masy powietrza można w ciągu godziny ogrzać od 14°C do 35°C przy stałym ciśnieniu tego powietrza?

Średnie ciepło właściwe powietrza w podanym zakresie temperatur wynosi

$$c_p \Big|_{14^\circ}^{35^\circ} = 1,005 \text{ kJ/kg K}$$

Wynik: $\dot{m} = 204,7 \text{ kg/h}$.

Zadanie 3.6

W kalorymetrze przepływowym mierzy się średnie ciepło właściwe powietrza, przy stałym ciśnieniu, w zakresie temperatur $t_1 = 25^\circ\text{C}$ i $t_2 = 325^\circ\text{C}$; przy tym strumień przepływającego powietrza wynosi $\dot{m} = 161 \text{ g/h}$, a doprowadzona moc elektryczna $N_{el} = 13,9 \text{ W}$. Założenia: kalorymetr przyjmuje się za adiabatycznie oddzielony od otoczenia, a zmiana energii kinetycznej powietrza w nim jest znikomo mała.

Wynik: $c_p \Big|_{t_1}^{t_2} = 1,030 \text{ kJ/kg K}$.

Zadanie 3.7

Blok aluminiowy o masie 25 kg nagrzewany jest od 300 K do 600 K. Rzeczywiste ciepło właściwe aluminium wynosi

$$c = 0,745 + 0,5 \cdot 10^{-3} T \quad [\text{kJ/kg K}]$$

Obliczyć ilość pochłoniętego ciepła oraz średnie ciepło właściwe aluminium w podanym zakresie temperatur.

Rozwiązanie

Pochłonięte ciepło oblicza się jako:

$$Q_{1-2} = m q_{1-2} = m \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT = m \int_{T_1}^{T_2} (0,745 + 0,5 \cdot 10^{-3} T) dT$$

a po scałkowaniu

$$Q_{1-2} = m \left[0,745(T_2 - T_1) + \frac{1}{2} 0,5 \cdot 10^{-3} (T_2^2 - T_1^2) \right]$$

lub

$$Q_{1-2} = m [0,745 + 0,25 \cdot 10^{-3} (T_2 + T_1)] (T_2 - T_1)$$

Wyraz w nawiasie kwadratowym jest średnim ciepłem właściwym, jako że istnieje formalna identyczność powyższego wzoru ze wzorem:

$$Q_{1-2} = m c \Big|_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$$

Podstawiając dane, otrzymuje się:

$$c_{300}^{600} = 0,745 + 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot (600 + 300) = 0,970 \text{ kJ/kg K}$$

oraz

$$Q_{1-2} = 25 \cdot 0,970 \cdot (600 - 300) = 7275 \text{ kJ}$$

Uwaga! Średnie ciepło właściwe jest tutaj równe rzeczywistemu ciepłu właściwemu obliczonemu dla temperatury średniej: 450°C , gdyż zależność $c = f(T)$ jest liniowa.

Zadanie 3.8

Ile trzeba doprowadzić ciepła do 20 kg stali o temperaturze 8°C , by ta stal osiągnęła 300°C ? Rzeczywiste ciepło właściwe stali dane jest wzorem:

$$c = 0,461 + 4,6 \cdot 10^{-4} t \text{ [kJ/kg K]}$$

Wynik: 3106 kJ.

Zadanie 3.9

Do pomiaru strumienia masy powietrza użyto grzejnika elektrycznego wbudowanego w rurociąg, którym to powietrze przepływa, oraz 2 termometrów mierzących temperaturę powietrza przed (t_1) i za grzejnikiem (t_2). Jaki jest strumień masy $\dot{m}$ [kg/h], jeżeli zmierzona moc elektryczna pobrana przez grzejnik wynosi $N_{el} = 0,4 \text{ kW}$, a wspomniane termometry pokazują temperatury: $t_1 = 62,2^\circ\text{C}$ i $t_2 = 65,0^\circ\text{C}$?

Uwaga! Z powodu małej zmiany temperatury powietrza można zamiast średniego użyć do obliczeń rzeczywistego ciepła właściwego w temperaturze średniej między t_1 i t_2 , czyli dla T [K]:

$$c_p = 0,970 + 0,0679 \frac{T}{1000} + 0,1658 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 - 0,0679 \left(\frac{T}{2000} \right)^3 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

Wynik: $\dot{m} = 510 \text{ kg/h}$.

Zadanie 3.10

W krajach anglosaskich używa się jeszcze często skal Fahrenheita i Rankine'a z jednostkami: °F i °R. Przeliczanie na stopnie Celsjusza i kelwiny odbywa się według wzorów:

$$t = \frac{5}{9} (t_{\text{°F}} - 32) \text{ [°C]}$$

$$T = \frac{5}{9} T_R \text{ [K]}$$

Wyrazić temperaturę $t = 140^{\circ}\text{C}$ w K, °F; i °R!

Wyniki: 413,15 K; 284°F; 743,7°R.

Zadanie 3.11

Brytyjska jednostka cieplna BTU (British Thermal Unit) jest tą ilością ciepła, jaka jest potrzebna do ogrzania 1 funta ($1\text{ lb} = 0,4536\text{ kg}$) wody o 1°F . Jakiej ilości (a) dżuli [J] i (b) kilowatogodzin [kWh] jest to równoważne?

Rozwiązanie

a) Ciepło potrzebne do podgrzania $0,4536\text{ kg}$ wody o 1°F wynosi:

$$Q = mc_w \Delta t_{\text{°C}} = 0,456 \cdot 4187 \cdot \frac{5}{9} = 1055\text{ J}$$

czyli

$$1\text{ BTU} = 1055\text{ J} = 1,055\text{ kJ}$$

gdyż przyrost temperatury wynoszący 1°F odpowiada w stopniach Celsjusza wartości:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{°C}} = t_2 - t_1 &= \frac{5}{9} (t_{2\text{°C}} - 32) - \frac{5}{9} (t_{1\text{°F}} - 32) = \\ &= \frac{5}{9} (t_{2\text{°F}} - t_{1\text{°F}}) = \frac{5}{9} \cdot 1 = \frac{5}{9} [^{\circ}\text{C}] \equiv \frac{5}{9} [\text{K}] \end{aligned}$$

b) Skoro 1 kilowatogodzina jest równoważna następującej ilości dżuli:

$$1\text{ kWh} = 3600 [\text{kWs} \equiv \text{kJ}] = 3,6 \cdot 10^6\text{ J}$$

to

$$1\text{ J} = \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \text{ kWh}$$

natomiast

$$1\text{ BTU} = 1055\text{ J} = 1055 \cdot \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} = 0,293 \cdot 10^{-3} \text{ kWh} = 0,293\text{ Wh}$$

4. PRACA

Zadanie 4.1

Cylindryczny zbiornik gazu ma średnicę 5,00 m, a jego górna dennica, zamykająca gaz szczelnie, może się przesuwać w pionie. Manometr pokazuje 16,28 hPa nadciśnienia gazu, podczas gdy ciśnienie atmosferyczne wynosi 1040 hPa. Jaka jest masa przesuwanej dennicy, jeżeli tarcie o cylindryczne ścianki jest pomijalnie małe? Jaką pracę wykona gaz na przesuwanej dennicy, jeżeli – wskutek pochłonięcia przez gaz promieniowania słonecznego – dennica przesunięta zostanie z wysokości 4,83 m na wysokość 5,13 m?

Wyniki: $m = 3259 \text{ kg}$, $L = 9,59 \text{ kJ}$.

Zadanie 4.2

Pompa podaje 0,3 l/s zimnej wody o gęstości 1000 kg/m^3 . Ciśnienie absolutne w króćcu ssawnym wynosi $P_1 = 50 \text{ kPa}$, w króćcu tłocznym $P_2 = 1,2 \text{ MPa}$. Jaka jest jednostkowa praca techniczna wykonana na nieściśliwej wodzie? Jaka jest moc mechaniczna dostarczana przez organ tłoczący pompy (tłok lub wirnik) do sprężanej wody? Przedstawić jednostkową pracę techniczną na wykresie $P-v$!

Wyniki: $l_{1-2} = -1150 \text{ kJ/kg} = -1,15 \text{ kJ/kg}$, $N_i = 0,345 \text{ kW}$.

Zadanie 4.3

W cylindrze znajduje się $0,25 \text{ m}^3$ powietrza o ciśnieniu absolutnym 100 kPa i o masie $0,30 \text{ kg}$. Powietrze zostaje sprężone do 600 kPa , a sprężanie przebiega tak, że ciśnienie i objętość zmieniają się według równania:

$$PV^{1,5} = \text{const}$$

Jakie są jednostkowe prace: absolutna i techniczna tego procesu?

Rozwiązanie

Równanie przemiany powietrza zachodzącej podczas sprężania można przedstawić jako:

$$PV^{1,5} = \text{const} = P_1 V_1^{1,5} = 100 \cdot 0,25^{1,5} = 12,5 \left[\text{kPa} \cdot (\text{m}^3)^{1,5} \right]$$

albo w postaci rozwikłanej względem ciśnienia:

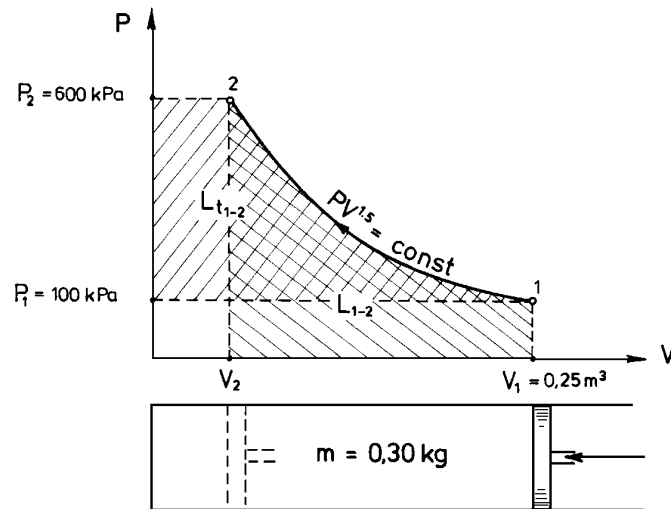
$$P = \frac{12,5}{V^{1,5}}$$

w której: P [kPa] i V [m^3].

Obliczenie całkowitej pracy absolutnej

$$L_{1-2} = \int_1^2 P dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{12,5}{V^{1,5}} dV$$

wymaga znajomości obu granic całkowania: $V_1 = 0,25 \text{ m}^3$ i nieznaną na razie objętość V_2 .



Rys. 4.1

Tę ostatnią wylicza się z przekształconego równania przemiany:

$$V_2 = \left(\frac{12,5}{P_2} \right)^{\frac{1}{1,5}} = \left(\frac{12,5}{600} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,0757 \text{ m}^3$$

A zatem:

$$L_{1-2} = \int_{0,25}^{0,0757} \frac{12,5}{V^{\frac{3}{2}}} dV = 12,5 \int_{0,25}^{0,0757} V^{-\frac{3}{2}} dV = 12,5 \left[\frac{V^{-\frac{1}{2}}}{-\frac{1}{2}} \right]_{0,25}^{0,0757} = 12,5 [-3,2691] = -40,86 \text{ kJ}$$

Praca ta jest ujemna, gdyż jest doprowadzana do systemu, jakim jest w tym przypadku powietrze zawarte w cylindrze, a jednostką jest kJ $\equiv$ kNm, gdyż w obliczeniach użyto kPa $\equiv$ kN/m² i m³. Poszukiwana **jednostkowa** praca absolutna wynosi:

$$l_{1-2} = \frac{L_{1-2}}{m} = \frac{-40,86}{0,30} = -136,2 \text{ kJ/kg}$$

Praca techniczna

$$\begin{aligned} L_{t1-2} &= - \int_1^2 V dP = - \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{12,5}{P} \right)^{\frac{1}{1,5}} dP = -12,5^{\frac{2}{3}} \int_{100}^{600} \frac{dP}{P^{\frac{2}{3}}} = -12,5^{\frac{2}{3}} \left[\frac{P^{\frac{1}{3}}}{\frac{1}{3}} \right]_{100}^{600} = \\ &= -12,5^{\frac{2}{3}} \cdot 11,378 = -61,283 \text{ kJ} \end{aligned}$$

a **jednostkowa** praca techniczna:

$$l_{t1-2} = \frac{L_{t1-2}}{m} = \frac{-61,283}{0,30} = -204,3 \text{ kJ/kg}$$

Porównanie tej pracy z jednostkową pracą techniczną sprężania wody, z zad.4.2, wynoszącą tam zaledwie $-1,15 \text{ kJ/kg}$, mimo 4-krotnie wyższego stopnia sprężania ($12 : 0,5 = 24$ – tam, wobec $600 : 100 = 6$ – tutaj) pokazuje, jak bardzo energochłonne jest sprężanie powietrza i jak wiele, przy odwrotnym przebiegu procesu czyli podczas rozprężania powietrza, można pracy otrzymać.

Zadanie 4.4

Idealny tłokowy silnik pneumatyczny napełniony jest masą $0,038 \text{ kg}$ powietrza o objętości 10 l przy ciśnieniu manometrycznym 294 kPa . Podczas ekspansji, do objętości 25 l , ciśnienie zmienia się według zależności:

$$P = P_1 \left(\frac{V_1}{V} \right)^{1,4}$$

Ciśnienie atmosferyczne wynosi 997 hPa . Jaka jest jednostkowa praca techniczna oddana przez powietrze podczas jednego cyklu roboczego? Jaka jest moc tego silnika, gdy wykonuje on 3 cykle robocze w ciągu sekundy?

Wyniki: $l_{t-2} = 111,4 \text{ kJ/kg}$, $N = 12,7 \text{ kW}$.

Zadanie 4.5

W idealnym silniku gaz odbywa przemianę o równaniu:

$$PV^{1,2} = \text{const}$$

Obliczyć pracę: absolutną i techniczną, jeżeli na początku przemiany ciśnienie absolutne wynosi 1 MPa , a objętość 200 l , zaś na końcu ciśnienie osiąga 100 kPa .

Wyniki: $L_{1-2} = 319 \text{ kJ}$, $L_{t-2} = 382,8 \text{ kJ}$

Zadanie 4.6

W idealnym silniku przepływowym o mocy 300 kW gaz odbywa przemianę o równaniu:

$$Pv = \text{const.}$$

Gaz ma na dolocie ciśnienie absolutne $1,5 \text{ MPa}$ i gęstość 10 kg/m^3 , a na wylocie ciśnienie 100 kPa . Jaki strumień masy gazu przepływa przez silnik?

Wyniki: $l_{t-2} = 406,2 \text{ kJ/kg}$, $\dot{m} = 0,734 \text{ kg/s}$.

5. PIERWSZA ZASADA TERMODYNAMIKI

Zadanie 5.1

W adiabatycznym cylindrze, napełnionym gazem i zamkniętym z góry swobodnie przesuującym się bez tarcia, szczelnym tłokiem o powierzchni $A = 0,01 \text{ m}^2$, porusza się wiatraczek z prędkością kątową 50 1/s napędzany momentem obrotowym $0,5 \text{ Nm}$ przez 2 min . Po wyłączeniu silnika, i odczekaniu na osiągnięcie stanu równowagi, stwierdzono podniesienie się tłoka o 25 cm . Obliczyć zmianę energii wewnętrznej gazu, jeżeli cały proces przebiegał przy niezmiennym ciśnieniu atmosferycznym 100 kPa !

Wynik: $\Delta U_{1,2} = 2,75 \text{ kJ}$.

Zadanie 5.2

Na gaz w cylindrze działa tłok niezmieniającą się siłą $7,5 \text{ kN}$. Opornik elektryczny umieszczony w gazie zasilono przez 40 sekund prądem stałym o napięciu 120 V i natężeniu 2 A . Na końcu procesu stwierdzono podniesienie się tłoka o 320 mm . Jaką pracę wykonał gaz i o ile zmieniła się jego energia termiczna, jeżeli podczas procesu przez ścianki cylindra odpłynęło do otoczenia 500 J ciepła?

Wyniki: $L_{1,2} = 2,4 \text{ kJ}$, $\Delta U_{1,2} = +6,7 \text{ kJ}$.

Zadanie 5.3

Silnik gazowy, doskonale zaizolowany cieplnie, zasilany jest helem o jednostkowej entalpii 1560 kJ/kg . Hel dopływa do silnika z prędkością 25 m/s w ilości $0,85 \text{ kg/s}$, a opuszcza system z prędkością 30 m/s i ma wtedy entalpię jednostkową 625 kJ/kg . Zmianę energii potencjalnej, między wlotem i wylotem helu, można pominąć. Silnik działa w stanie ustalonym w czasie. Obliczyć mechaniczną moc wewnętrzną silnika.

Wynik: $N_i \equiv L_i = 795 \text{ kW}$.

Zadanie 5.4

Jeżeli silnik z poprzedniego zadania pozbawiono by izolacji cieplnej, a miałby on tę samą moc mechaniczną, ale entalpia jednostkowa odpływającego helu wyniosłaby 580 kJ/kg , to – przy pozostałych danych niezmiennych – jaki efekt cieplny byłby z tym związany?

Wynik: $\dot{Q} = -37,9 \text{ kW}$ (strata ciepła do otoczenia).

Zadanie 5.5

Do wytwornicy pary dopływa z prędkością $1,2 \text{ m/s}$ strumień 16 kg/s wody o entalpii jednostkowej 210 kJ/kg , a wypływa z prędkością 62 m/s para przegrzana o entalpii jednostkowej 3520 kJ/kg . Przewód parowy przebiega na wysokości 35 m ponad przewodem wody zasilającej (w miejscach przecięć przez umowną granicę systemu). Jaki strumień ciepła jest doprowadzany do zamienianej w parę przegrzaną wody, jeżeli proces jest ustalony w czasie? Jaki błąd względny popełnia się przez pominięcie w tym obliczeniu zmian energii kinetycznej i potencjalnej?

Wyniki: $\dot{Q} = 52\,996 \text{ kW} \approx 53 \text{ MW}$, $\frac{\delta \dot{Q}}{\dot{Q}} = 0,0007 = 0,07 \%$.

Zadanie 5.6

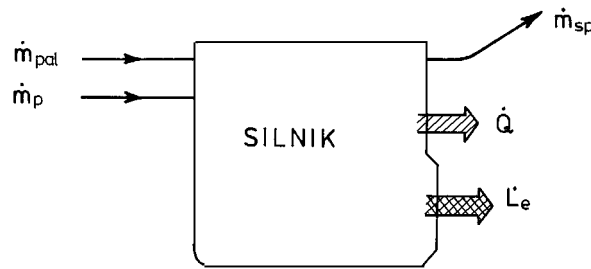
Przez kanał wentylacyjno-grzewczy przepływa stacjonarnie powietrze o strumieniu 2,5 kg/s. W kanale zabudowane jest koło łopatkowe z wystającym na zewnątrz, połączonym z maszyną elektryczną, wałkiem. Na wlocie do kanału, na wysokości niwelacyjnej 18 m, powietrze przepływa z prędkością 30 m/s i ma entalpię jednostkową 105 kJ/kg; na wylocie z kanału wysokość wynosi 8 m, prędkość 16 m/s, a entalpia 108 kJ/kg. Ścianki kanału są ogrzewane tak, że powietrze przejmuje stacjonarnie 4 kW ciepła.

Jaka jest moc mechaniczna na łopatkach wirującego koła i w którą stronę ona płynie, tzn. czy maszyna elektryczna jest silnikiem czy generatorem (prądnicą)?

Wynik: $\dot{L}_i = -294 \text{ kW} < 0$ (jest więc silnikiem).

Zadanie 5.7

Silnik spalinowy zużywa w ruchu ustalonym 10 kg/h oleju napędowego o jednostkowej energii chemicznej 42 800 kJ/kg. Olej dopływa do silnika z entalpią jednostkową 36 kJ/kg. Powietrze do spalania ma entalpię 20 kJ/kg i dopływa w ilości 360 kg/h. Opuszczające silnik spaliny mają entalpię jednostkową 375 kJ/kg. Zmierzona hamulcem moc użyteczna (efektywna) wynosi 47 kW. Obliczyć ilość ciepła odprowadzaną z silnika (przez wodę chłodzącą bezpośrednio do otoczenia)! Jaki procent energii chemicznej paliwa stanowi to ciepło, a jaki oddana na sprzęgle moc użyteczna? Zmiany energii kinetycznej i potencjalnej płynów można uznać za pomijalne.



Rys. 5.1

Rozwiązanie

W stanie ustalonym w czasie energia systemu nie ulega zmianie, tak że bilans energii redukuje się do równości energii doprowadzanych i odprowadzanych – mierzonych na obrysie silnika, jako granicy systemu:

$$\dot{E}_d = |\dot{E}_w|$$

czyli

$$\dot{m}_{pal}(h_{pal} + e_{ch}) + \dot{m}_p h_p = |\dot{Q}| + \dot{L}_e + \dot{m}_{sp} h_{sp}$$

przy czym, jak zawsze w systemach otwartych, energie termiczne przepływających substancji zawarte są w entalpiach: $h = u + Pv$. Tak więc odprowadzany strumień cieplny:

$$|\dot{Q}| = \dot{m}_{pal}(h_{pal} + e_{ch}) + \dot{m}_p h_p - (\dot{m}_{pal} + \dot{m}_p) h_{sp} - \dot{L}_e$$

po przedstawieniu danych liczbowych wynosi:

$$|\dot{Q}| = \frac{10}{3600} (36 + 42800) + \frac{360}{3600} \cdot 20 - \frac{10 + 360}{3600} \cdot 375 - 47 = 35,44 \text{ kW}$$

Wielkość ta odniesiona do energii chemicznej paliwa wynosi:

$$\frac{|\dot{Q}|}{\dot{E}_{\text{ch}}} = \frac{35,44}{\frac{10}{3600} \cdot 42800} = 0,298 = 29,8\%$$

Natomiast względna moc użyteczna wynosi:

$$\frac{\dot{L}_e}{\dot{E}_{\text{ch}}} = \frac{47}{\frac{10}{3600} \cdot 42800} = 0,395 = 39,5\%$$

Ten ostatni stosunek nazywany jest sprawnością ogólną silnika.

Zadanie 5.8

Kocioł w systemie centralnego ogrzewania domu pobiera stacjonarnie gaz ziemny w ilości $2,1 \text{ um}^3/\text{h}$. Gaz ma jednostkową energię chemiczną (wartość opałową) $34\,300 \text{ kJ/um}^3$ i dopływa do kotła z entalpią jednostkową 33 kJ/um^3 . Strumień powietrza: $21,4 \text{ um}^3/\text{h}$ dopływa z entalpią jednostkową 15 kJ/um^3 , a strumień spalin: $23,5 \text{ um}^3/\text{h}$ opuszcza kocioł z entalpią 190 kJ/um^3 . Jaka ilość ciepła zostaje oddana wodzie krążącej w systemie grzewczym domu, jeżeli 5% tego ciepła opuszcza zewnętrzne ścianki kotła jako strata cieplna $\dot{Q}_{\text{ot}}$?

Wynik: $|\dot{Q}_w| = 18 \text{ kW}$.

Zadanie 5.9

Sprężarka zasysa, w warunkach ustalonych w czasie, strumień powietrza wynoszący 180 kg/h . Powietrze dopływa do maszyny z prędkością 14 m/s i entalpią jednostkową 16 kJ/kg , a opuszcza ją z prędkością 7 m/s i entalpią 103 kJ/kg . Dostarczana powietrzu przez tłok sprężarki mechaniczna moc wewnętrzna wynosi 25 kW . Jaki strumień ciepła odbiera od ścianek cylindra woda chłodząca?

Wynik: $\dot{Q} = -18,46 \text{ kW}$.

Zadanie 5.10

Do krótkiej, cieplnie od otoczenia odizolowanej (adiabatycznej) dyszy dopływa gaz z prędkością 12 m/s i entalpią jednostkową 135 kJ/kg . Z jaką prędkością wypływa ten gaz z dyszy, jeżeli entalpia wypływającego gazu wynosi 25 kJ/kg ? Jaka jest jednostkowa energia kinetyczna wypływającego gazu?

Wyniki: $w_2 = 469 \text{ m/s}$, $e_{\text{kin}} = 110 \text{ kJ/kg}$.

Zadanie 5.11

Turbina parowa oddaje do przekładni zębatej moc $15\,000 \text{ kW}$. Zakładając adiabatywność korpusu przekładni, obliczyć stratę mocy spowodowaną przez przekładnię, jeżeli pompa olejowa przetłacza przez urządzenia 10 kg/s oleju, którego jednostkowa entalpia wzrasta z 55 kJ/kg do 102 kJ/kg . Zmiany energii kinetycznej i potencjalnej oleju są pomijalnie małe.

Wynik: $\Delta N = 470 \text{ kW}$.

Zadanie 5.12

Do turbiny gazowej dopływa gorący gaz o entalpii jednostkowej 1300 kJ/kg w ilości 7200 kg/h. Gaz opuszcza maszynę z entalpią 570 kJ/kg. Obliczyć mechaniczną moc wewnętrzną maszyny, jeżeli wskutek dobrej izolacji cieplnej można ją uważać za adiabatyczną, a zmiany energii kinetycznej i potencjalnej gazu między wlotem i wylotem są pomijalnie małe. Jaka jest moc efektywna na sprzęgle turbiny, jeżeli sprawność mechaniczna (tarcie w łożyskach i potrzeby własne) wynosi 98%?

Wyniki: $N_i \equiv \dot{L}_i = 1550 \text{ kW}$, $N_e = 1519 \text{ kW}$.

6. STAN I FUNKCJE STANU GAZÓW DOSKONAŁYCH I PÓLDOSKONAŁYCH

Zadanie 6.1

W butli znajduje się tlen traktowany jak gaz doskonały pod ciśnieniem bezwzględnym $P = 12,5 \text{ MPa}$ i w temperaturze $T = 295 \text{ K}$. Objętość butli $V = 0,05 \text{ m}^3$. Obliczyć masę i gęstość gazu.

Wyniki: $m = 8,15 \text{ kg}$, $\rho = 163 \text{ kg/m}^3$.

Zadanie 6.2

Jaka jest masa molowa pewnego gazu doskonałego, którego masa $m = 17,65 \text{ kg}$ zajmuje objętość 1 m^3 przy ciśnieniu $P = 1 \text{ MPa}$ i temperaturze $T = 300 \text{ K}$? Jaki to może być gaz?

Wynik: $M = 44 \text{ kg/kmol}$, jest to dwutlenek węgla.

Zadanie 6.3

Rurociągiem o średnicy $d = 0,1 \text{ m}$ płynie gaz doskonały o masie molowej $M = 18 \text{ kg/kmol}$ ze średnią prędkością $w = 2,5 \text{ m/s}$. Zmierzono ciśnienie statyczne bezwzględne $P = 620 \text{ kPa}$ i temperaturę $T = 335 \text{ K}$. Obliczyć masowy i objętościowy strumień gazu.

Wyniki: $\dot{m} = 0,07867 \text{ kg/s}$, $\dot{V} = 0,0196 \text{ m}^3/\text{s}$.

Zadanie 6.4

Ilość azotu wyrażono w dwóch miarach:

- 1) jako objętość w warunkach umownych $V_u = 10 \text{ m}^3$,
- 2) jako ilość kilomoli $n = 0,44 \text{ kmol}$.

Wykazać, że istotnie jest to ta sama ilość substancji, i obliczyć masę gazu w [kg] pamiętając warunki umowne: $P_u = 100 \text{ kPa}$, $T_u = 273,15 \text{ K}$.

Rozwiązanie:

Z termicznego równania stanu gazu $PV = n\tilde{R}T$ mamy: $n = \frac{P_u V_u}{\tilde{R} T_u}$

Wstawiając do równania znane wartości liczbowe otrzymujemy:

$$n = \frac{100 \cdot 10}{8,3143 \cdot 273,15} = 0,44 \text{ kmol}$$

Masę azotu obliczamy, mnożąc liczbę kilomoli przez masę jednego kilomola czyli masę molową:

$$m = n M_{N_2} = 0,44 \cdot 28 = 12,32 \text{ kg}$$

Zadanie 6.5

W zbiorniku o objętości $V = 0,5 \text{ m}^3$ znajduje się tlen pod ciśnieniem $12,6 \text{ MPa}$. Ile butli o objętości $0,02 \text{ m}^3$ można napełnić z tego zbiornika, ładując bez użycia sprężarki każdą do ciśnienia $4,5 \text{ MPa}$. Przyjąć, że w wyniku bardzo powolnego procesu napełniania temperatura gazu nie zmienia się i że tlen jest gazem doskonałym.

Uwaga! Po napełnieniu ostatniej butli w zbiorniku pozostanie pewna ilość gazu określona przez końcowe ciśnienie.

Wynik: 45 butli.

Zadanie 6.6

Gazomierz, którego wskazania są proporcjonalne do objętości przepływającego gazu i obowiązują dla parametrów umownych $P_u = 100$ kPa i $T_u = 273,15$ K wskazał objętość powietrza $V = 10$ m³, jaka przezeń przepłynęła w czasie 0,5 godziny. Obliczyć średni, masowy strumień gazu w kg/s, jeżeli:

- ciśnienie i temperatura gazu dokładnie odpowiadają wartościom umownym,
 - ciśnienie wynosi $P = 150$ kPa, a temperatura $T = 315$ K.
- Przyjąć, że powietrze jest gazem doskonałym o masie molowej $M = 28,96$ kg/kmol.

Wyniki: $\dot{m}_u = 0,0071$ kg/s, $\dot{m} = 0,0092$ kg/s.

Zadanie 6.7

Ze zbiornika pobrano $m = 0,25$ kg gazu, co spowodowało spadek ciśnienia z $P_1 = 15,5$ MPa do $P_2 = 14,6$ MPa. Zakładając, że jest to gaz doskonały oraz że temperatura gazu w zbiorniku nie zmieniła się, obliczyć masę m gazu, jaka pozostała w zbiorniku.

Wynik: $m = 4,056$ kg.

Zadanie 6.8

W butli o objętości $V = 0,06$ m³ znajduje się dwutlenek węgla ($M_{CO_2} = 44$ kg/kmol) pod ciśnieniem manometrycznym $p_{m1} = 3,5$ MPa i o temperaturze $T_1 = 293$ K. Butla ma zawór bezpieczeństwa, który otwiera się przy ciśnieniu $p_{m2} = 4$ MPa. Ile kg gazu ujdzie z butli, jeżeli podgrzeje się ten gaz do temperatury $T_2 = 550$ K? Przyjąć ciśnienie otoczenia $P_{ot} = 100$ kPa oraz że jest to gaz doskonały. Pominąć straty ciepła do otoczenia przez ściany zbiornika.

Rozwiązanie

Na początku w butli znajduje się masa gazu:

$$m_1 = \frac{P_1 V}{R_i T_1} = \frac{(p_{m1} + P_{ot})V}{R_i T_1} = \frac{(3500 + 100) \cdot 0,06}{0,189 \cdot 293} = 3,901 \text{ kg}$$

gdzie indywidualna stała gazowa $R_i = \frac{\tilde{R}}{M} = \frac{8,3143}{44} \cong 0,189 \text{ kNm/kgK}$

W wyniku podgrzewania gazu wzrasta jego ciśnienie i po osiągnięciu $P_2 = p_{m2} + P_o$ gaz będzie wypływał przez zawór bezpieczeństwa. Zawór zamknie się, gdy w butli pozo-

$$m_2 = \frac{P_2 V}{R_i T_2} = \frac{(4000 + 100) \cdot 0,006}{0,189 \cdot 550} = 2,367 \text{ kg}$$

Zatem z butli ubyło: $m = m_1 - m_2 = 3,901 - 2,367 = 1,534$ kg gazu.

Zadanie 6.9

Objętość niedostępna dla pomiarów, otwartego rurociągu V_R określono, zamykając jeden z jego końców i przyłączając do drugiego butlę o objętości $V_B = 0,1$ m³ zawierającą sprężone powietrze o ciśnieniu $P_B = 4,5$ MPa i temperaturze $t_B = 20^\circ\text{C}$. Jaka jest objętość rurociągu, jeżeli przed otwarciem zaworu butli panowało w nim ciśnienie $P_R = 100$ kPa i temperatura $t_R = 15^\circ\text{C}$, a po otwarciu ustaliły się nowe warunki: $P = 135$ kPa i $T = 15^\circ\text{C}$.

Wynik: $V_R = 12,25$ m³.

Zadanie 6.10

W celu zmierzenia podawanego przez sprężarkę strumienia azotu ładowano zbiornik o objętości $V = 0,5 \text{ m}^3$, który przed pomiarem zawierał ten sam gaz o ciśnieniu $P_1 = 100 \text{ kPa}$ i temperaturze $T_1 = 293 \text{ K}$. Po 20 minutach ładowania zmierzono w zbiorniku $P_2 = 230 \text{ kPa}$ i $T_2 = 315 \text{ K}$. Obliczyć średni, masowy strumień dopływającego gazu.

Wynik: $\dot{m} = 0,546 \text{ g/s}$.

Zadanie 6.11

Dwa zbiorniki, połączone krótkim rurociągiem wyposażonym w zawór, zawierają ten sam gaz doskonały ($\kappa = 1,4$). Przed otwarciem zaworu w pierwszym zbiorniku o objętości $V_1 = 1,5 \text{ m}^3$ zmierzono ciśnienie $P_1 = 280 \text{ kPa}$ i temperaturę $T_1 = 350 \text{ K}$. Po otwarciu zaworu i ustaleniu się parametrów zmierzono: $P = 375 \text{ kPa}$ i $T = 295 \text{ K}$. Zaniedbując straty ciepła do otoczenia, obliczyć ciśnienie i temperaturę gazu w drugim zbiorniku o objętości $V_2 = 3 \text{ m}^3$, przed otwarciem zaworu.

Wyniki: $T_2 = 280,4 \text{ K}$, $P_2 = 422,5 \text{ kPa}$.

Zadanie 6.12

Powietrze kierowane do paleniska kotłowego podgrzewane jest wcześniej w podgrzewaczu od $t_1 = 10^\circ\text{C}$ do $t_2 = 140^\circ\text{C}$. W jakim stopniu wzrasta objętość tego powietrza, jeżeli ciśnienie, jak zawsze w wymiennikach ciepła, może być uważane za niezmiennie?

Wynik: $\frac{v_2}{v_1} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = 1,46$.

Zadanie 6.13

Obliczyć entalpię i energię termiczną 8 kg powietrza, jako gazu doskonałego scharakteryzowanego przez $c_p = 1,0 \text{ kJ/kgK}$ i $\kappa = 1,4$, mającego temperaturę 350°C . Jako założenie przyjąć, że w stanie odniesienia przy $t_0 = 0^\circ\text{C}$ entalpia wynosi $h_0 = 0$.

Rozwiązanie

Entalpia jednostkowa:

$$h = c_p(T - T_0) + h_0 = c_p(t - t_0) + h_0$$

Po podstawieniu danych i uwzględnieniu, że $h_0 = 0$ dla $t_0 = 0^\circ\text{C}$:

$$h = c_p(t - 0) + 0 = 1,0 \cdot 350 = 350 \text{ kJ/kg}$$

Entalpia całkowita:

$$H = m h = 8 \cdot 350 = 2800 \text{ kJ}$$

Jednostkowa energia termiczna:

$$u = c_v(T - T_0) + u_0 = c_v(t - t_0) + u_0$$

Z definicji entalpii $h = u + Pv$ mamy:

$$u = h - Pv$$

a dla gazów doskonałych i półdoskonałych:

$$u = h - R_i T$$

W stanie odniesienia ($t_0 = 0^\circ\text{C}$) mamy:

$$u_0 = h_0 - R_i T_0 = 0 - 0,2857 \cdot 273,15 = -78,9 \text{ kJ/kg}$$

Potrzebną stałą gazową R_i obliczyliśmy z zależności

$$c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_i,$$

otrzymując:

$$R_i = \frac{\kappa - 1}{\kappa} c_p = \frac{1,4 - 1}{1,4} \cdot 1,0 = 0,2857 \text{ kJ/kgK}$$

Do obliczenia energii termicznej potrzebne jest ciepło właściwe przy stałej objętości:

$$c_v = \frac{c_p}{\kappa} = \frac{1,0}{1,4} = 0,714 \text{ kJ/kg}$$

Zatem jednostkowa energia termiczna:

$$u = c_v(t - t_0) + u_0 = 0,714 \cdot (350 - 0) - 78,0 = 171,9 \text{ kJ/kg}$$

a całkowita energia termiczna 8 kg powietrza:

$$U = m u = 8 \cdot 171,9 = 1375,2 \text{ kJ}$$

Zadanie 6.14

Obliczyć entalpię i energię termiczną powietrza z zadania 6.13, zakładając tym razem, że w stanie odniesienia $t_0 = 0$ energia termiczna wynosi $u_0 = 0$.

Wyniki: $h = 428 \text{ kJ/kg}$, $u = 249,9 \text{ kJ/kg}$, $H = 3424 \text{ kJ}$, $U = 1999,2 \text{ kJ}$.

Zadanie 6.15

Obliczyć entalpię i energię termiczną powietrza z zadania 6.13, traktując to powietrze jak gaz półdoskonały.

Wyniki: $h = 358,4 \text{ kJ/kg}$, $u = 177,20 \text{ kJ/kg}$, $H = 2867,2 \text{ kJ}$, $U = 1417,72 \text{ kJ}$.

Zadanie 6.16

Obliczyć energię termiczną 8 kg powietrza z zadania 6.13 przy założeniu, że w stanie odniesienia przy $T_0 = 0 \text{ K}$ jest $u_0 = 0$, a następnie obliczyć przyrost tej energii względem stanu w którym $T = 273,15 \text{ K}$ (0°C), i porównać ten przyrost z wynikiem z zadania 6.14.

Wyniki: $u = 444,9 \text{ kJ/kg}$, $\Delta u = 249,9 \text{ kJ/kg}$, $U = 3559,4 \text{ kJ}$, $\Delta U = 1999,2 \text{ kJ}$.

Zadanie 6.17

Obliczyć entalpię 8 kg powietrza z zadania 6.13 przy założeniu, że w stanie odniesienia przy $T_0 = 0 \text{ K}$ jest $h_0 = 0$, a następnie obliczyć nadwyżkę tej entalpii względem stanu, w którym $T = 273,15 \text{ K}$ (0°C), i porównać ten przyrost z wynikiem z zadania 6.13.

Wyniki: $h = 623,15 \text{ kJ/kg}$, $\Delta h = 350 \text{ kJ/kg}$, $H = 4985,2 \text{ kJ}$, $\Delta H = 2800 \text{ kJ}$.

7. ROZTWORY GAZOWE

Zadanie 7.1

Pewien roztwór gazowy ma następujący skład:

tlen O_2 ($M_1 = 32$ kg/kmol, $\kappa_1 = 1,40$) o udziale objętościowym $r_1 = 0,35$,

azot N_2 ($M_2 = 28$ kg/kmol, $\kappa_2 = 1,40$) o udziale objętościowym $r_2 = 0,25$,

metan CH_4 ($M_3 = 16$ kg/kmol, $\kappa_3 = 1,33$) o udziale objętościowym $r_3 = 0,40$.

Obliczyć: masę molową roztworu, stałą gazową roztworu i udziały masowe składników oraz masowe i molowe ciepła właściwe przy stałej objętości i stałym ciśnieniu, a także stosunek ciepła właściwych κ dla roztworu.

Rozwiązanie

Dla roztworów gazów doskonałych udziały molowe są równe udziałom objętościowym składników, czyli

$$z_i = r_i$$

Masę molową oblicza się następująco:

$$M = z_1 M_1 + z_2 M_2 + z_3 M_3 = 0,35 \cdot 32 + 0,25 \cdot 28 + 0,40 \cdot 16 = 24,6 \text{ kg/kmol}$$

Stała gazowa roztworu wynosi:

$$R = \frac{\tilde{R}}{M} = \frac{8,3143}{24,6} = 0,338 \text{ kNm/kgK}$$

Wyznaczamy udziały masowe:

$$g_1 = r_1 \frac{M_1}{M} = 0,35 \cdot \frac{32}{24,6} = 0,455$$

$$g_2 = r_2 \frac{M_2}{M} = 0,25 \cdot \frac{28}{24,6} = 0,285$$

$$g_3 = r_3 \frac{M_3}{M} = 0,40 \cdot \frac{16}{24,6} = 0,260$$

Sprawdzamy dokładność obliczeń na podstawie zależności $\Sigma g_i = 1$:

$$g_1 + g_2 + g_3 = 0,455 + 0,285 + 0,260 = 1,0$$

Ciepło właściwe przy stałej objętości dla roztworu oblicza się z zależności:

$$c_v = \Sigma g_i c_{vi}$$

natomiast ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu:

$$c_p = c_v + R$$

Wyznaczamy poszczególne c_{vi} składników, posługując się wzorem:

$$c_{vi} = \frac{R_i}{\kappa_i - 1} = \frac{\tilde{R}}{(\kappa_i - 1) M_i}$$

$$c_{v1} = \frac{8,3143}{(1,4-1) \cdot 32} = 0,650 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_{v2} = \frac{8,3143}{(1,4-1) \cdot 28} = 0,742 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_{v3} = \frac{8,3143}{(1,33-1) \cdot 16} = 1,575 \text{ kJ/kgK}$$

otrzymujemy dla roztworu:

$$c_v = g_1 c_{v1} + g_2 c_{v2} + g_3 c_{v3} = \\ = 0,455 \cdot 0,650 + 0,285 \cdot 0,742 + 0,260 \cdot 1,575 = 0,917 \text{ kJ/kgK}$$

oraz

$$c_p = c_v + R = 0,917 + 0,338 = 1,255 \text{ kJ/kgK}$$

Molowe ciepła właściwe wynoszą:

$$\tilde{c}_v = M c_v = 24,6 \cdot 0,917 = 22,56 \text{ kJ/kmolK}$$

$$\tilde{c}_p = M c_p = 24,6 \cdot 1,255 = 30,87 \text{ kJ/kmolK}$$

Stosunek ciepł właściwych dla roztworu:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1,255}{0,917} = \frac{\tilde{c}_p}{\tilde{c}_v} = \frac{30,87}{22,56} = 1,369$$

Zadanie 7.2

Obliczyć ciepło właściwe c_p i gęstość w stanie normalnym (100 kPa, 0°C) suchych spalin o składzie objętościowym: 10% CO_2 ($M_1 = 44 \text{ kg/kmol}$), 11% O_2 ($M_2 = 32 \text{ kg/kmol}$),

79% N_2 ($M_3 = 28 \text{ kg/kmol}$).

Wartości c_p dla gazów dwuatomowych wyznaczyć za pomocą $\kappa = 1,4$ a dla CO_2 : $\kappa = 1,31$.

Wyniki: $c_p = 0,9885 \text{ kJ/kgK}$, $\rho_n = 1,32 \text{ kg/m}^3$.

Zadanie 7.3

Spaliny z paleniska kotłowego (opalanego węglem) mają następujący skład objętościowy: 11,2% CO_2 ($M_1 = 44 \text{ kg/kmol}$), 3,0% H_2O ($M_2 = 18 \text{ kg/kmol}$), 0,8% SO_2 ($M_3 = 64 \text{ kg/kmol}$), 7,0% O_2 ($M_4 = 32 \text{ kg/kmol}$) i 78,0% N_2 ($M_5 = 28 \text{ kg/kmol}$).

Należy obliczyć: zastępczą masę molową spalin, ich zastępczą stałą gazową, gęstość w warunkach umownych (100 kPa, 0°C) oraz średnie ciepła właściwe c_p i c_v w zakresie od 0 do 800°C i ich stosunek κ , posługując się wartościami c_{pi} z załączonej tablicy 2.

Wyniki: $M = 30,06 \text{ kg/kmol}$, $c_v \Big|_0^{800} = 1,220 \text{ kJ/kgK}$,

$$R = 0,277 \text{ kNm/kgK}, \quad c_p \Big|_0^{800} = 1,496 \text{ kJ/kgK},$$

$$\rho_u = 1,324 \text{ kg/m}^3, \quad \kappa \Big|_0^{800} = 1,226 \text{ kJ/kgK}.$$

Zadanie 7.4

Roztwór gazowy składa się w równych udziałach objętościowych z tlenu ($M_1 = 32 \text{ kg/kmol}$, $\kappa = 1,4$) i argonu ($M_2 = 40 \text{ kg/kmol}$, $\kappa = 1,667$).

Obliczyć dla tego roztworu: masę molową, stałą gazową, ciepła właściwe c_p i c_v oraz stosunek ciepł właściwych κ .

Wyniki: $M = 36 \text{ kg/kmol}$, $c_p = 0,692 \text{ kJ/kgK}$, $R = 0,231 \text{ kNm/kgK}$, $c_v = 0,461 \text{ kJ/kgK}$, $\kappa = 1,50$.

Zadanie 7.5

Mieszalnik izobaryczny z wbudowanym grzejnikiem przygotowuje mieszaninę oddechową dla nurków pracujących pod wodą. Do mieszalnika dopływają: tlen o temperaturze $T_1 = 300 \text{ K}$, strumieniem $\dot{V}_1 = 0,023 \text{ m}^3/\text{s}$ i azot o temperaturze $T_2 = 250 \text{ K}$, strumieniem

$\dot{V}_2 = 0,052 \text{ m}^3/\text{s}$. Temperatura mieszaniny wynosi $T = 300 \text{ K}$, a ciśnienie $P = 270 \text{ kPa}$. Obliczyć moc grzejnika oraz głębokość, na której pracują nurkowie, przyjmując ciężar właściwy wody $10\,000 \text{ N/m}^3$ i ciśnienie otoczenia $P_{\text{ot}} = 100 \text{ kPa}$.

Wskazówka: ciśnienie absolutne mieszaniny oddechowej musi zrównoważyć ciśnienie absolutne panujące na głębokości, na której pracują nurkowie.

Wyniki: $\dot{Q} = 2,732 \text{ kW}$, $L = 17,5 \text{ m}$.

Zadanie 7.6

Roztwór tlenu i azotu ma w warunkach umownych ($P_u = 100 \text{ kPa}$, $T_u = 273,15 \text{ K}$) gęstość $\rho_u = 1,303 \text{ kg/m}^3$. Obliczyć udziały masowe obu składników roztworu.

Wyniki: $g_1 = 0,43$, $g_2 = 0,57$.

Zadanie 7.7

W skład roztworu wchodzi dwa gazy doskonałe: tlen O_2 ($M_1 = 32 \text{ kg/kmol}$, $\kappa_1 = 1,4$) o udziale masowym $g_1 = 0,35$ i argon Ar ($M_2 = 39,9 \text{ kg/kmol}$, $\kappa_2 = 1,667$) o udziale masowym $g_2 = 0,65$.

Obliczyć: stałą gazową roztworu R , masę molową roztworu M , udziały molowe składników z_i oraz ciepła właściwe c_p i c_v .

Wyniki: $R = 0,226 \text{ kNm/kgK}$, $c_p = 0,656 \text{ kJ/kgK}$, $M = 36,73 \text{ kg/kmol}$, $c_v = 0,430 \text{ kJ/kgK}$, $z_1 = 0,402$, $z_2 = 0,598$.

Zadanie 7.8

W zbiorniku znajduje się roztwór dwóch gazów CO_2 i N_2 pod ciśnieniem $P = 140 \text{ kPa}$ i o temperaturze $T = 310 \text{ K}$. Znane jest ciśnienie cząstkowe dwutlenku węgla $P_1 = 35 \text{ kPa}$.

Obliczyć: udziały molowe z_i i masowe g_i składników roztworu, masę molową M , stałą gazową R roztworu oraz gęstość roztworu ρ .

Wyniki: $z_1 = 0,25$, $z_2 = 0,75$, $g_1 = 0,344$, $g_2 = 0,656$, $M = 32 \text{ kg/kmol}$, $R = 0,260 \text{ kJ/kgK}$, $\rho = 1,74 \text{ kg/m}^3$.

Zadanie 7.9

Jeżeli wiadomo, że stała gazowa roztworu azotu z wodorem wynosi $R = 0,922 \text{ kNm/kgK}$, to jakie są udziały masowe g_i i molowe z_i tych składników w roztworze? Dane są masy molowe składników tego roztworu: azotu: $M_1 = 28 \text{ kg/kmol}$, wodoru: $M_2 = 2 \text{ kg/kmol}$.

Wyniki: $g_1 = 0,162$, $g_2 = 0,838$, $z_1 = 0,730$, $z_2 = 0,270$.

Zadanie 7.10

Roztwór azotu i helu ma w temperaturze $T = 291 \text{ K}$ i przy ciśnieniu $P = 120 \text{ kPa}$ gęstość $\rho = 0,525 \text{ kg/m}^3$. Jakie są udziały masowe i molowe składników roztworu? Dane są masy molowe: azotu: $M_1 = 28 \text{ kg/kmol}$ i helu: $M_2 = 4 \text{ kg/kmol}$.

Wyniki: $g_1 = 0,274$, $g_2 = 0,726$, $z_1 = 0,725$, $z_2 = 0,275$.

Zadanie 7.11

W zbiorniku o objętości $V = 0,5 \text{ m}^3$ znajduje się roztwór trzech gazów o temperaturze początkowej $T_1 = 273 \text{ K}$ i ciśnieniu $P_1 = 150 \text{ kPa}$. Składniki roztworu są następujące:

metan CH_4 ($M_1 = 16 \text{ kg/kmol}$, $\kappa_1 = 1,333$) o udziale molowym $z_1 = 0,35$,

argon Ar ($M_2 = 40 \text{ kg/kmol}$, $\kappa_2 = 1,667$) o udziale molowym $z_2 = 0,20$,

tlenek węgla CO ($M_3 = 28 \text{ kg/kmol}$, $\kappa_3 = 1,400$) o udziale molowym $z_3 = 0,45$.

Obliczyć: stałą gazową i masę roztworu oraz temperaturę i ciśnienie tego roztworu po doprowadzeniu ciepła w ilości $Q = 25 \text{ kJ}$.

Rozwiązanie

Najpierw obliczamy masę molową roztworu:

$$M = z_1 M_1 + z_2 M_2 + z_3 M_3 = 0,35 \cdot 16 + 0,20 \cdot 40 + 0,45 \cdot 28 = 26,2 \text{ kg/kmol}$$

Następnie stałą gazową roztworu:

$$R = \frac{\tilde{R}}{M} = \frac{8,3143}{26,2} = 0,317 \text{ kNm/kgK}$$

Masę gazu w zbiorniku obliczamy z równania stanu gazu:

$$m = \frac{PV}{RT_1} = \frac{150 \cdot 0,5}{0,317 \cdot 273} = 0,867 \text{ kg}$$

Ciepło doprowadzane jest do roztworu w warunkach stałej objętości. Aby obliczyć ciepło właściwe przy stałej objętości wg wzoru:

$$c_v = \sum g_i \cdot c_{vi}$$

trzeba najpierw wyznaczyć udziały masowe g_i i ciepła właściwe c_{vi} .

Udziały masowe:

$$g_1 = z_1 \frac{M_1}{M} = 0,35 \cdot \frac{16}{26,2} = 0,214$$

$$g_2 = z_2 \frac{M_2}{M} = 0,20 \cdot \frac{40}{26,2} = 0,305$$

$$g_3 = z_3 \frac{M_3}{M} = 0,45 \cdot \frac{28}{26,2} = 0,481$$

Ciepła właściwe:

$$c_{v1} = \frac{R_1}{\kappa_1 - 1} = \frac{\tilde{R}}{(\kappa_1 - 1) M_1} = \frac{8,3143}{(1,333 - 1) \cdot 16} = 1,5605 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_{v2} = \frac{R_2}{\kappa_2 - 1} = \frac{\tilde{R}}{(\kappa_2 - 1) M_2} = \frac{8,3143}{(0,667 - 1) \cdot 40} = 0,3116 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_{v3} = \frac{R_3}{\kappa_3 - 1} = \frac{\tilde{R}}{(\kappa_3 - 1) M_3} = \frac{8,3143}{(1,40 - 1) \cdot 28} = 0,742 \text{ kJ/kgK}$$

Następnie obliczamy ciepło właściwe roztworu:

$$\begin{aligned} c_v &= \sum g_i c_{vi} = g_1 c_{v1} + g_2 c_{v2} + g_3 c_{v3} = \\ &= 0,214 \cdot 1,560 + 0,305 \cdot 0,312 + 0,481 \cdot 0,742 = 0,786 \text{ kJ/kgK} \end{aligned}$$

Teraz możemy obliczyć temperaturę i ciśnienie roztworu po doprowadzeniu ciepła:

$$T_2 = T_1 + \frac{Q}{mc_v} = 273 + \frac{25}{0,866 \cdot 0,786} = 309,7 \text{ K}$$

$$P_2 = \frac{mRT_2}{V} = \frac{0,867 \cdot 0,317 \cdot 309,7}{0,5} = 170 \text{ kPa}$$

Zadanie 7.12

Dwa zbiorniki połączone są krótkim rurociągiem z zaworem. Przy zamkniętym zaworze zbiorniki zawierają: pierwszy zbiornik o objętości $V_1 = 2 \text{ m}^3$ – powietrze ($M_1 = 29 \text{ kg/kmol}$, $\kappa_1 = 1,4$) o parametrach $P_1 = 1 \text{ MPa}$, $T_1 = 323 \text{ K}$, drugi zbiornik o objętości $V_2 =$

3m^3 – metan CH_4 ($M_2 = 16 \text{ kg/kmol}$, $\kappa_2 = 1,33$) o parametrach $P_2 = 500 \text{ kPa}$, $T_2 = 298 \text{ K}$. Po pewnym czasie od otwarcia zaworu gazy wymieszały się, tworząc roztwór.

Zakładając brak wymiany ciepła z otoczeniem, obliczyć: udziały molowe z_i i masowe składników roztworu g_i , masę molową M , stałą gazową R roztworu oraz temperaturę T i ciśnienie P roztworu.

Rozwiązanie

Aby obliczyć udziały molowe składników roztworu, musimy najpierw obliczyć molowe ilości tych gazów przed otwarciem zaworu:

$$n_1 = \frac{P_1 V_1}{\tilde{R} T_1} = \frac{1000 \cdot 2}{8,3143 \cdot 323} = 0,745 \text{ kmol}$$

$$n_2 = \frac{P_2 V_2}{\tilde{R} T_2} = \frac{500 \cdot 3}{8,3143 \cdot 298} = 0,605 \text{ kmol}$$

Wobec tego udziały molowe są następujące:

$$z_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2} = \frac{0,745}{0,745 + 0,605} = 0,552$$

$$z_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2} = \frac{0,605}{0,745 + 0,605} = 0,448$$

Do obliczenia udziałów masowych niezbędne jest wyznaczenie mas obu gazów w zbiornikach:

$$m_1 = n_1 M_1 = 0,745 \cdot 29 = 21,6 \text{ kg}$$

$$m_2 = n_2 M_2 = 0,605 \cdot 16 = 9,69 \text{ kg}$$

$$m = m_1 + m_2 = 21,6 + 9,69 = 31,29 \text{ kg}$$

Teraz możemy obliczyć udziały masowe:

$$g_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} = \frac{21,6}{21,6 + 9,69} = 0,69$$

$$g_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} = \frac{9,69}{21,6 + 9,69} = 0,31$$

Sprawdzamy poprawność obliczenia udziałów masowych:

$$g_1 + g_2 = 0,69 + 0,31 = 1,00$$

Masa molowa roztworu:

$$M = \sum z_i M_i = 0,552 \cdot 29 + 0,448 \cdot 16 = 23,17 \text{ kg/kmol}$$

Stała gazowa roztworu:

$$R = \frac{\tilde{R}}{M} = \frac{8,3143}{23,17} = 0,3588 \text{ kNm/kgK}$$

W celu obliczenia temperatury roztworu należy zbilansować cieplnie układ. Jeżeli nie ma wymiany ciepła z otoczeniem, to suma energii wewnętrznych gazów w zbiornikach przed otwarciem zaworu jest równa energii wewnętrznej powstałego roztworu:

$$U_1 + U_2 = U$$

Do obliczenia energii potrzebne są ciepła właściwe przy stałej objętości:

$$c_{v1} = \frac{R_1}{\kappa_1 - 1} = \frac{0,2867}{1,4 - 1} = 0,717 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_{v2} = \frac{R_2}{\kappa_2 - 1} = \frac{0,5196}{1,33 - 1} = 1,575 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_v = g_1 c_{v1} + g_2 c_{v2} = 0,69 \cdot 0,717 + 0,31 \cdot 1,575 = 0,983 \text{ kJ/kgK}$$

Zatem:

$$U_1 = m_1 c_{v1} T_1 = 21,6 \cdot 0,717 \cdot 323 = 5002 \text{ kJ}$$

$$U_2 = m_2 c_{v2} T_2 = 9,69 \cdot 1,575 \cdot 298 = 4548 \text{ kJ}$$

$$U = 5002 + 4548 = 9550 \text{ kJ}$$

Temperatura roztworu wynosi:

$$T = \frac{U}{mc_v} = \frac{9550}{31,29 \cdot 0,983} = 310,5 \text{ K}$$

Ciśnienie roztworu gazowego obliczamy z termicznego równania stanu:

$$P = \frac{mRT}{V_1 + V_2} = \frac{31,29 \cdot 0,3589 \cdot 310,5}{3 + 2} = 697,4 \text{ kPa}$$

Zadanie 7.13

W izolowanym cieplnie zbiorniku znajduje się pewna ilość gazu wyrażona objętością umowną $V_u = 5 \text{ um}^3$ ($P_u = 100 \text{ kPa}$, $t_u = 0^\circ\text{C}$), a stanowiącego roztwór dwóch gazów doskonałych:

azotu N_2 ($M_1 = 28 \text{ kg/kmol}$, $\kappa_1 = 1,400$): $g_1 = 0,4$,

metanu CH_4 ($M_2 = 16 \text{ kg/kmol}$, $\kappa_2 = 1,333$): $g_2 = 0,6$,

o parametrach początkowych $P' = 350 \text{ kPa}$ i $T' = 300 \text{ K}$. Do zbiornika doprowadzono rurociągiem $m_d = 4 \text{ kg}$ metanu o temperaturze $T_d = 350 \text{ K}$. Obliczyć temperaturę i ciśnienie roztworu w zbiorniku po doprowadzeniu gazu.

Rozwiązanie

Ilość roztworu gazowego, jaki początkowo znajdował się w zbiorniku określona została objętością w warunkach umownych ($P_u = 100 \text{ kPa}$, $T_u = 273 \text{ K}$). Tak więc masa gazu w zbiorniku:

$$m' = \frac{P_u V_u}{R_p T_u} = \frac{100 \cdot 5}{0,4305 \cdot 273,15} = 4,249 \text{ kg}$$

oraz

$$m_1 = g_1 m = 0,4 \cdot 4,249 = 1,700 \text{ kg}$$

$$m_2 = g_2 m = 0,6 \cdot 4,249 = 2,549 \text{ kg}$$

Przy czym stałą gazową obliczyliśmy ze wzoru:

$$R_p = g_1 R_1 + g_2 R_2 = 0,4 \cdot 0,297 + 0,6 \cdot 0,520 = 0,4308 \text{ kNm/kgK}$$

korzystając z indywidualnych stałych gazowych:

$$R_1 = \frac{\tilde{R}}{M_1} = \frac{8,3143}{28} = 0,2969 \cong 0,297 \text{ kNm/kgK}$$

$$R_2 = \frac{\tilde{R}}{M_2} = \frac{8,3143}{16} = 0,5196 \cong 0,520 \text{ kNm/kgK}$$

Temperaturę końcową T'' obliczamy z bilansu energetycznego systemu otwartego:

$$E_d = \Delta E_u + E_w$$

Energię doprowadzoną E_d stanowi energia termiczna gazu doprowadzonego:

$$m_d u_d = m_d c_{vd} T_d$$

oraz praca wprowadzenia gazu do systemu:

$$PV_d = m_d RT_d$$

Zatem:

$$E_d = m_d(c_{vd} + R)T_d = m_d c_p T_d$$

Energia wyprowadzona E_w jest równa zero, ponieważ zbiornik jest izolowany cieplnie, a substancji się nie wyprowadza:

$$E_w = 0$$

Przyrost energii układu ΔE_u jest równy różnicy energii wewnętrznej U'' roztworu po doprowadzeniu metanu i energii wewnętrznej U' przed doprowadzeniem:

$$\Delta E_u = U'' - U' = (m' + m_d)c_v''T'' - m'c_v'T'$$

Podstawiając powyższe zależności do równania bilansu energii, otrzymujemy:

$$m_d c_{pd} T_d = (m' + m_d)c_v''T'' - m'c_v'T'$$

Następnie wyznaczamy poszukiwaną temperaturę końcową roztworu:

$$T'' = \frac{m_d c_{pd} T_d + m'c_v'T'}{(m' + m_d)c_v''}$$

Występujące w tym równaniu ciepła właściwe obliczamy następująco:

$$c_{pd} = \frac{R_d \kappa_d}{\kappa_d - 1} = \frac{0,520 \cdot 1,333}{1,333 - 1} = 2,082 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_v' = \sum g_i c_{vi} = g_1 c_{v1} + g_2 c_{v2} = 0,4 \cdot 0,742 + 0,6 \cdot 1,562 = 1,234 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_v'' = \sum g_i'' c_{vi} = g_1'' c_{v1} + g_2'' c_{v2} = 0,206 \cdot 0,742 + 0,794 \cdot 1,562 = 1,393 \text{ kJ/kgK}$$

przy czym:

$$g_1'' = \frac{m_1}{m' + m_d} = \frac{1,700}{4,249 + 4} = 0,206$$

$$g_2'' = \frac{m_2 + m_d}{m' + m_d} = \frac{2,549 + 4}{4,249 + 4} = 0,794$$

oraz:

$$c_{v1} = \frac{R_1}{\kappa_1 - 1} = \frac{0,297}{1,4 - 1} = 0,742 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_{v2} = \frac{R_2}{\kappa_2 - 1} = \frac{0,520}{1,333 - 1} = 1,562 \text{ kJ/kgK}$$

Wobec powyższego:

$$T'' = \frac{m_d c_{pd} T_d + m'c_v'T'}{(m' + m_d)c_v''} = \frac{4 \cdot 2,082 \cdot 350 + 4,249 \cdot 1,234 \cdot 300}{(4,249 + 4) \cdot 1,393} = 390,5 \text{ K}$$

Ciśnienie końcowe obliczamy z termicznego równania stanu:

$$p'' = \frac{(m_1 + m_d) RT''}{V} = \frac{(4,252 + 4) \cdot 0,474 \cdot 390,5}{1,569} = 973,5 \text{ kPa}$$

przy użyciu stałej gazowej roztworu końcowego:

$$R = g_1'' R_1 + g_2'' R_2 = 0,206 \cdot 0,297 + 0,794 \cdot 0,520 = 0,474 \text{ kJ/kgK}$$

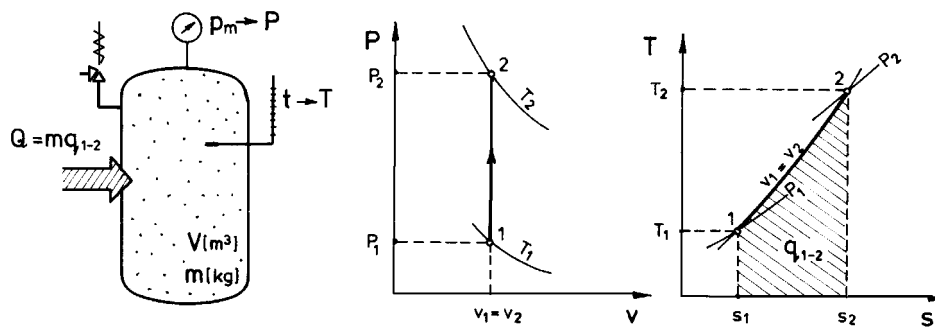
i objętości zbiornika równej objętości gazu zawartego w nim na początku:

$$V = V_u \frac{p_u T'}{p' T_u} = 5 \cdot \frac{100 \cdot 300}{350 \cdot 273,15} = 1,569 \text{ m}^3$$

8. CHARAKTERYSTYCZNE PRZEMIANY GAZÓW DOSKONAŁYCH

Zadanie 8.1

Zbiornik (rys. 8.1) o objętości $V = 8 \text{ m}^3$ zawiera tlen ($M = 32 \text{ kg/kmol}$, $\kappa = 1,4$) o temperaturze $T_1 = 300 \text{ K}$ i ciśnieniu $P_1 = 300 \text{ kPa}$. Zbiornik ma zawór bezpieczeństwa, który zaczyna się otwierać przy ciśnieniu $P_2 = 900 \text{ kPa}$. Narysować przemianę w układzie $P-v$ i $T-s$ ^{*)}. Obliczyć: masę tlenu w zbiorniku, temperaturę przy której otworzy się zawór bezpieczeństwa oraz ilość ciepła, jaką trzeba doprowadzić do gazu, aby zawór się otworzył.



Rys. 8.1

Rozwiązanie

Masę gazu w zbiorniku obliczamy z równania stanu gazu:

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{300 \cdot 8}{0,2598 \cdot 300} = 30,79 \text{ kg}$$

w którym stała gazowa tlenu: $R = \frac{\tilde{R}}{M} = \frac{8,3143}{32} = 0,2598 \text{ kNm/kgK}$

W trakcie doprowadzania ciepła do gazu w zbiorniku ma miejsce przemiana izochoryczna (stała objętość zbiornika i niezmienna ilość gazu), dla której, dzieląc stronami równania stanu gazu przed i po doprowadzeniu ciepła

$$\frac{P_1 V = mRT_1}{P_2 V = mRT_2}$$

otrzymujemy:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

a stąd szukaną temperaturę T_2 :

$$T_2 = T_1 \frac{P_2}{P_1} = 300 \frac{900}{300} = 900 \text{ K}$$

^{*)} Wykres przemiany w układzie współrzędnych $T-s$ sporządza się uzupełniając (należy zważyć miejsce w rozwiązaniu) po poznaniu konstrukcji tego układu.

Ilość ciepła, potrzebną do podniesienia temperatury gazu w zbiorniku od T_1 do T_2 , obliczamy następująco:

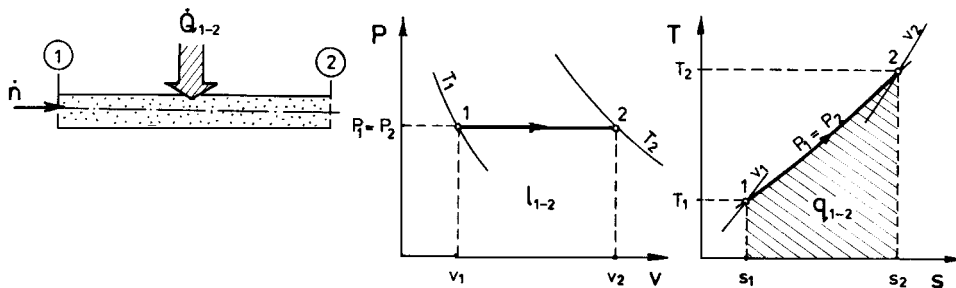
$$Q = mc_v(T_2 - T_1) = 30,79 \cdot 0,65 \cdot (900 - 300) = 12008 \text{ kJ}$$

gdzie:

$$c_v = \frac{R}{\kappa - 1} = \frac{0,2598}{1,4 - 1} = 0,6495 \approx 0,65 \text{ kJ/kgK}$$

Zadanie 8.2

Powietrze (traktowane jak dwuatomowy gaz doskonały: $\kappa = 1,4$) przepływa przez podgrzewacz izobaryczny (rys. 8.2), w którym podnosi swoją temperaturę od $T_1 = 273 \text{ K}$ do $T_2 = 623 \text{ K}$. Ciśnienie gazu $P = 110 \text{ kPa}$. Objętościowy strumień powietrza w warunkach umownych $\dot{V}_u = 3840 \text{ m}^3/\text{h}$. Narysować przemianę w układzie $P-v$ (i $T-s$). Obliczyć: molowy strumień gazu, objętościowe strumienie przed i za podgrzewaczem $\dot{V}_1$ i $\dot{V}_2$, oraz strumień ciepły przekazywany w podgrzewaczu $\dot{Q}_{1-2}$.



Rys. 8.2

Rozwiązanie

Molowy strumień gazu przepływającego przez podgrzewacz obliczamy, wstawiając do równania stanu gazu parametry umowne ($P_u = 100 \text{ kPa}$, $T_u = 273,15 \text{ K}$):

$$\dot{n} = \frac{P_u \dot{V}_u}{\tilde{R} T_u} = \frac{100 \cdot \frac{3840}{3600}}{8,3143 \cdot 273,15} = 0,0470 \text{ kmol/s}$$

Objętościowe strumienie powietrza przed i za podgrzewaczem obliczamy z równania stanu gazu, wstawiając odpowiednie ciśnienia i temperatury:

$$\dot{V}_1 = \frac{\dot{n} \tilde{R} T_1}{P_1} = \frac{0,047 \cdot 8,3143 \cdot 273}{110} = 0,97 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{V}_2 = \frac{\dot{n} \tilde{R} T_2}{P_2} = \frac{0,047 \cdot 8,3143 \cdot 623}{110} = 2,21 \text{ m}^3/\text{s}$$

Przekazywany strumień ciepły równy jest przyrostowi strumienia entalpii jakiego gaz doznaje podczas przepływu przez podgrzewacz:

$$\dot{Q}_{1-2} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 = \dot{n} (h_2 - h_1) = \dot{n} q_{1-2}$$

$$\dot{Q}_{1-2} = \dot{n} \tilde{c}_p (T_2 - T_1) = 0,047 \cdot 29,1 \cdot (623 - 273) = 478,7 \text{ kW}$$

gdzie:

$$\tilde{c}_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \tilde{R} = \frac{1,4}{1,4 - 1} \cdot 8,3143 = 29,1 \text{ kJ/kgK}$$

Zadanie 8.3

Cylinder zamknięty tłokiem zawiera gaz doskonały, którego ilość $V_u = 5 \text{ m}^3$ określono dla warunków umownych: 0°C i 100 kPa . Ma on temperaturę początkową $T_1 = 298 \text{ K}$ i ciśnienie $P_1 = 100 \text{ kPa}$. Gaz sprężono izotermicznie do ciśnienia $P_2 = 3 \text{ MPa}$. Obliczyć: objętość gazu w cylindrze przed i po sprężeniu: V_1 i V_2 , pracę sprężania gazu L_{1-2} oraz ciepło przemiany Q_{1-2} . Przedstawić przemianę w układzie współrzędnych $P-v$ (i $T-s$) i narysować urządzenie realizujące proces.

Wyniki: $V_1 = 5,455 \text{ m}^3$, $V_2 = 0,182 \text{ m}^3$, $L_{1-2} = -1857 \text{ kJ}$, $Q_{1-2} = L_{1-2} = -1857 \text{ kJ}$.

Zadanie 8.4

Dwutlenek węgla CO_2 o masie molowej $M = 44 \text{ kg/kmol}$ znajdujący się w butli pod ciśnieniem $P_1 = 25 \text{ MPa}$ i o temperaturze $t_1 = 20^\circ\text{C}$ podgrzano do $t_2 = 60^\circ\text{C}$. Obliczyć ciśnienie P_2 gazu w butli oraz ilość doprowadzonego ciepła q_{1-2} w $[\text{kJ/kmol}]$ i $[\text{kJ/kg}]$. Narysować przemianę w układzie współrzędnych $P-v$ (i $T-s$).

Wyniki: $P_2 = 28,4 \text{ kPa}$, $q_{1-2} = 998,7 \text{ kJ/kmol}$, $q_{1-2} = 22,7 \text{ kJ/kg}$.

Zadanie 8.5

W zbiorniku o objętości $1,5 \text{ m}^3$ znajduje się powietrze ($M = 29 \text{ kJ/kmol}$, $\kappa = 1,4$) o temperaturze początkowej $t_1 = 15^\circ\text{C}$ i ciśnieniu $P_1 = 250 \text{ kPa}$. Zbiornik ma wbudowany grzejnik o mocy 1 kW . Narysować przemianę w układzie współrzędnych $P-v$ (i $T-s$), a następnie pomijając straty ciepła do otoczenia, obliczyć: masę gazu w zbiorniku, temperaturę t_2 i ciśnienie P_2 po 180 s od włączenia grzejnika oraz ilość ciepła Q pochłoniętego przez gaz w zbiorniku.

Wyniki: $m = 4,542 \text{ kg}$, $t_2 = 125,6^\circ\text{C}$, $Q_{1-2} = 360 \text{ kJ}$.

Zadanie 8.6

Tłok siłownika pneumatycznego o średnicy $0,25 \text{ m}$ obciążony jest stałą siłą osiową $F = 400 \text{ N}$. Temperatura początkowa powietrza, zawartego w ilości $0,02 \text{ kg}$ w cylindrze siłownika, wynosi 300 K . Jak długo musi działać grzejnik o mocy 50 W wbudowany w cylinder aby tłok przesunął się o $0,5 \text{ m}$? Pominąć stratę ciepła do otoczenia i tarcie między tłokiem a cylindrem. Przedstawić przemianę w układzie współrzędnych $P-v$ (i $T-s$).

Wynik: $\tau = 13,3 \text{ s}$.

Zadanie 8.7

W celu określenia strumienia masy azotu przepływającego kanałem pomiarowym o średnicy $d = 100 \text{ mm}$ zainstalowano grzejnik o mocy 500 W . Temperatura gazu wzrasta w kanale od 280 K do 285 K . Przyjmując przepływ izobaryczny, obliczyć: strumień masowy azotu w $[\text{kg/s}]$ i stosunek prędkości w_2/w_1 .

Wyniki: $\dot{m} = 0,096 \text{ kg/s}$, $w_2/w_1 = T_2/T_1 = 1,0179$.

Zadanie 8.8

Do turbiny dopływa azot N_2 strumieniem $\dot{m} = 0,1 \text{ kg/s}$ o temperaturze $T_1 = 520 \text{ K}$ i rozpręża się w maszynie izentropowo. Stosunek ciśnień $P_1/P_2 = 10$. Przedstawić przemianę w układzie współrzędnych $P-v$ (i $T-s$) oraz obliczyć: temperaturę T_2 za turbiną i moc izentropową N_s .

Wyniki: $T_2 = 269,3 \text{ K}$, $N_s = 26,1 \text{ kW}$.

Zadanie 8.9

W cylindrze sprężono izotermicznie 5 um^3 dwutlenku węgla CO_2 o parametrach początkowych $P_1 = 100 \text{ kPa}$ i $T_1 = 298 \text{ K}$, uzyskując ciśnienie końcowe $P_2 = 3 \text{ MPa}$. Przedstawić przemianę w układzie współrzędnych $P-v$ (i $T-s$) oraz obliczyć: objętości: początkową V_1 i końcową V_2 gazu w cylindrze, pracę techniczną sprężania gazu L_{1-2} i ciepło wyprowadzone Q_{1-2} .

Wyniki: $V_1 = 5,458 \text{ m}^3$, $V_2 = 0,182 \text{ m}^3$, $L_{1-2} = -1857 \text{ kJ}$, $Q_{1-2} = L_t = -1857 \text{ kJ}$.

Zadanie 8.10

Azot ($\kappa = 1,4$, $M = 28 \text{ kg/kmol}$) o temperaturze $T_1 = 300 \text{ K}$ i ciśnieniu $P_1 = 1 \text{ MPa}$ przepływa przez izobaryczny podgrzewacz, a następnie rozpręża się izentropowo w turbinie do ciśnienia $P_3 = 200 \text{ kPa}$ i temperatury $T_3 = 350 \text{ K}$. Strumień gazu $\dot{m} = 2,5 \text{ kg/s}$. Przedstawić przemianę w układzie współrzędnych $P-v$ (i $T-s$) oraz obliczyć: temperaturę T_2 przed turbiną, moc teoretyczną (izentropową) turbiny N_s i strumień ciepła doprowadzanego w podgrzewaczu $\dot{Q}$.

Wyniki: $T_2 = 554,3 \text{ K}$, $N_s = 530,8 \text{ kW}$, $\dot{Q} = 660,7 \text{ kW}$.

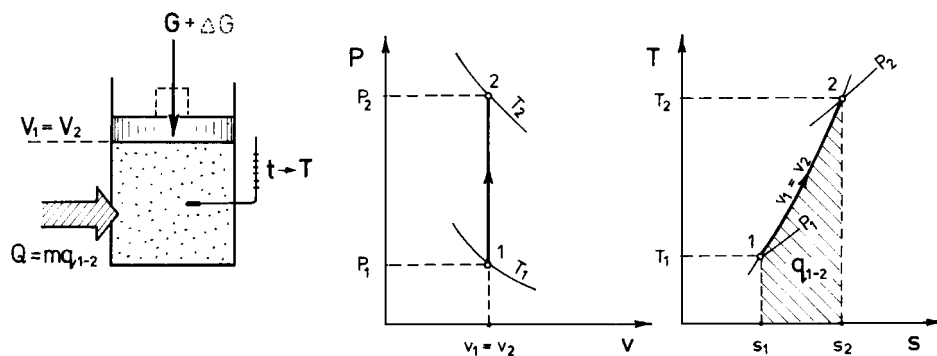
Zadanie 8.11

W pionowym cylindrze (rys. 8.3) o średnicy $D = 0,2 \text{ m}$ znajduje się $V_1 = 0,2 \text{ m}^3$ gazu doskonałego, dwuatomowego ($\kappa = 1,4$) o temperaturze $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Ciężar tłoka zamykającego cylinder wynosi $G = 500 \text{ N}$. Do gazu doprowadzono ciepło $Q_{1-2} = 25 \text{ kJ}$. O ile powinien wzrosnąć ciężar tłoka, aby jego położenie w cylindrze nie zmieniło się?

Rozwiązanie

Położenie tłoka ma nie ulegać zmianie, czyli objętość cylindra ma nie ulegać zmianie, zatem jest to przemiana izochoryczna, dla której:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$



Rys. 8.3

W przemianie tej ciepło pochłonięte przez gaz powoduje wzrost temperatury i ciśnienia gazu:

$$Q_{1-2} = m q_{1-2} = m c_v (T_2 - T_1) = n \cdot \tilde{c}_v \cdot (T_2 - T_1)$$

przy czym dla gazu doskonałego:

$$\tilde{c}_v = \frac{\tilde{R}}{\kappa - 1}$$

zatem:

$$T_2 = T_1 + \frac{Q_{1-2}}{n\tilde{c}_v} = T_1 + \frac{Q_{1-2}(k-1)}{n\tilde{R}} = 293,15 + \frac{25 \cdot (1,4-1)}{0,0013 \cdot 8,3143} = 1218,3 \text{ K}$$

potrzebną tutaj ilość kilomoli gazu obliczono z termicznego równania stanu:

$$n = \frac{P_1 V_1}{\tilde{R} T_1} = \frac{15,9 \cdot 0,2}{8,3143 \cdot 293,15} = 0,0013 \text{ kmol}$$

dla ciśnienia początkowego

$$P_1 = \frac{G}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{500}{\frac{\pi \cdot 0,2^2}{4}} = 15915,5 \text{ Pa} \cong 15,9 \text{ kPa}$$

Następnie obliczamy ciśnienie P_2 po doprowadzeniu ciepła:

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 15,9 \cdot \frac{1218,3}{293,15} = 66,08 \cong 66,1 \text{ kPa}$$

Wymagany przyrost ciężaru tłoka wynosi:

$$\Delta G = (P_2 - P_1) \frac{\pi D^2}{4} = (66,1 - 15,9) \cdot \frac{\pi \cdot 0,2^2}{4} = 1,58 \text{ kN}$$

Zadanie 8.12

Do cylindra silnika z zapłonem samoczynnym, w którym znajduje się sprężone powietrze o temperaturze 520°C , wtryskuje się olej napędowy tak, że spala się on pod stałym ciśnieniem, a objętość gazu w cylindrze wzrasta w tym czasie 2,5-krotnie. Traktując proces jako przemianę izobaryczną gazu półdoskonałego, narysować tę przemianę na wykresach $P - v$ (i $T - s$) i obliczyć: temperaturę na końcu spalania, ilość ciepła doprowadzoną na każdy kilogram powietrza oraz jednostkową pracę absolutną wykonaną podczas tego procesu (z I zasady termodynamiki).

Wyniki: $T_2 = 1983 \text{ K}$, $q_{1-2} = 1419 \text{ kJ/kg}$, $l_{1-2} = 353 \text{ kJ/kg}$.

Zadanie 8.13

Sprężarka zasysa $V_u = 600 \text{ m}^3/\text{h}$ powietrza liczonych w stanie umownym ($P_u = 100 \text{ kPa}$, $t_u = 0^\circ\text{C}$) i spręża je do 1200 kPa . Ciśnienie powietrza na końcu suwu ssania wynosi 96 kPa , a temperatura 18°C . Jaką moc mechaniczną należy doprowadzić i jaki strumień ciepła odprowadzić, aby sprężanie przebiegało izotermicznie? Narysować proces na wykresie $P-v$ (i $T-s$) zaznaczając ciśnienia, temperatury, pracę techniczną (i ciepło przemiany).

Wyniki: $N = 44,9 \text{ kW}$, $\dot{Q} = 44,9 \text{ kW}$.

Zadanie 8.14

W cylindrze o objętości $0,3 \text{ m}^3$ znajduje się powietrze o ciśnieniu 650 kPa i w temperaturze 25°C . Jakie będą ciśnienie i objętość po izotermicznym doprowadzeniu 325 kJ ciepła? Narysować przemianę w układzie współrzędnych $P-v$ (i $T-s$).

Wyniki: $L_{1-2} = 325 \text{ kJ}$, $P_2 = 122,8 \text{ kPa}$, $V_2 = 1,59 \text{ m}^3$.

Zadanie 8.15

Dwa zbiorniki tlenu połączone są krótkim przewodem, w którym umieszczony jest zawór. Przy zamkniętym zaworze w zbiorniku I znajduje się 40 kg tlenu o ciśnieniu 600

kPa i temperaturze 60°C. W zbiorniku II, o pojemności 5 m³, znajduje się tlen pod ciśnieniem 180 kPa mający objętość właściwą 0,45 m³/kg. Właściwości tlenu określone są przez $M = 32 \text{ kg/kmol}$ i $\kappa = 1,40$. Obliczyć: objętość właściwą gazu w zbiorniku I, temperaturę gazu w zbiorniku II, ciśnienie, temperaturę i objętość właściwą po otwarciu zaworu i wyrównaniu parametrów w obydwu zbiornikach, jeżeli ciepło właściwe c_v można uznać za stałe, a straty ciepła do otoczenia są pomijalne.

Wyniki: $v_1 = 0,144 \text{ m}^3/\text{kg}$, $t_{II} = 38,6^\circ\text{C}$, $P_2 = 404,5 \text{ kPa}$, $t_2 = 55,35^\circ\text{C}$, $v_2 = 0,211 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Zadanie 8.16

Wewnątrz kadłuba generatora elektrycznego o mocy 350 MW przepływa, chłodząc uzwojenia elektryczne, wodór pod stałym ciśnieniem 350 kPa, nagrzewając się od 20°C do 40°C. Traktując wodór jak gaz półdoskonały wyznaczyć ilość tego gazu w kg/s i um³ (0°C, 100 kPa) potrzebną do odprowadzenia ciepła strat równego 1,5% mocy generatora.

Wyniki: $c_p|_{20^\circ}^{40^\circ} = 14,274 \text{ kJ/kgK}$, $\dot{m} = 9,195 \text{ kg/s}$, $\dot{V}_u = 104,4 \text{ um}^3/\text{s}$.

Zadanie 8.17

Azot ($\kappa = 1,4$; $c_v = 0,742 \text{ kJ/kgK}$) o ciśnieniu 500 kPa i temperaturze 25°C rozpręża się jednorazowo do 100 kPa w różnych przemianach: (a) izochorycznej, (b) izotermicznej, (c) izentropowej ($\kappa = 1,4$), (d) politropowej o wykładniku $v = 1,25$, (e) politropowej o wykładniku $v = 1,55$. Jakie są temperatury azotu po tych przemianach, a jakie jednostkowe prace techniczne i ciepła w tych przemianach?

Narysować wszystkie przemiany na jednym wykresie P–v (i jednym wykresie T–s) oraz zaznaczyć obliczone prace (i ciepła).

Wyniki:

a) $t_2 = -213,5^\circ\text{C}$,	$l_{1-2} = 354 \text{ kJ/kg}$	$q_{1-2} = 177 \text{ kJ/kg}$
b) $t_2 = t_1 = 25^\circ\text{C}$,	$l_{1-2} = q_{1-2} = 142 \text{ kJ/kg}$	
c) $t_2 = -85^\circ\text{C}$,	$l_{1-2} = 114 \text{ kJ/kg}$	$q_{1-2} = 0$
d) $t_2 = -57^\circ\text{C}$,	$l_{1-2} = 122 \text{ kJ/kg}$	$q_{1-2} = 36,5 \text{ kJ/kg}$
e) $t_2 = -105^\circ\text{C}$,	$l_{1-2} = 108,5 \text{ kJ/kg}$	$q_{1-2} = -26,25 \text{ kJ/kg}$

Zadanie 8.18

W turbodoładowarce silnika spalinowego na wspólnym wale umieszczone są: sprężarka i turbina napędowa tej sprężarki. Moce turbiny i sprężarki można uznać za równe sobie. W sprężarce spręża się 1,2 m³/s powietrza o ciśnieniu 95 kPa i temperaturze 15°C izotermicznie do 180 kPa, w turbinie ekspandują izentropowo spaliny ($\kappa = 1,36$) dopływające w ilości 0,85 m³/s pod ciśnieniem 250 kPa i z temperaturą 450°C. Wykreślić przemiany na oddzielnych wykresach P–v (i T–s) z zaznaczeniem prac technicznych (i ciepła). Obliczyć: moc sprężarki, ciśnienie spalin na końcu ekspansji i temperaturę spalin po ekspansji.

Wyniki: $N_{\text{spr}} = 73 \text{ kW}$, $P_2 = 174 \text{ kPa}$, $t_2 = 384^\circ\text{C}$.

Zadanie 8.19

Powietrze o ciśnieniu 800 kPa i temperaturze 200°C rozpręża się politropowo do 100 kPa i 25°C. Jakie są objętości właściwe na początku i końcu przemiany, ile wynoszą: wykładnik politropy, jednostkowa praca techniczna i jednostkowe ciepło przemiany, jeżeli właściwości powietrza określone są jednoznacznie przez: $R = 287 \text{ Nm/kgK}$ i $\kappa = 1,40$? Narysować przemianę w układzie współrzędnych P–v (i T–s).

Wyniki: $v_1 = 0,170 \text{ m}^3/\text{kg}$, $v_2 = 0,856 \text{ m}^3/\text{kg}$, $v = 1,286$, $l_{1-2} = 226 \text{ kJ/kg}$, $q_{1-2} = 50 \text{ kJ/kg}$.

Zadanie 8.20

Strumień $25 \text{ m}^3/\text{min}$ powietrza o ciśnieniu 100 kPa i temperaturze 20°C jest sprężany do 500 kPa . Temperatura końcowa nie może jednak przekroczyć 100°C . Jaki musi być wykładnik politropy? Ile ciepła trzeba odprowadzić podczas przemiany? Ile wynosi teoretyczna moc napędowa? Właściwości powietrza są określone przez $R = 287 \text{ Nm/kgK}$ i $\kappa = 1,40$. Narysować przemianę na wykresie $P-v$ i $(T-s)$ z zaznaczeniem pola pracy technicznej (i ciepła).

Wyniki: $v = 1,176$, $\dot{Q} = -36,15 \text{ kW}$, $N = 75,9 \text{ kW}$.

Zadanie 8.21

Powietrze sprężone w cylindrze silnika spalinowego z zapłonem samoczynnym musi przekroczyć temperaturę samozapłonu oleju napędowego, gdyż w przeciwnym razie nie nastąpi spalanie. W jakim stosunku musi pozostawać objętość powietrza sprężonego V_2 do całkowitej objętości cylindra $V_1 = 20 \text{ l}$, aby powietrze osiągnęło w końcu suwu sprężania temperaturę $t_2 = 650^\circ\text{C}$, jeżeli temperatura powietrza na początku sprężania wynosi $t_1 = 100^\circ\text{C}$? Ile ciepła oddaje powietrze do wody chłodzącej? Jakie jest ciśnienie końcowe P_2 , gdy $P_1 = 93,2 \text{ kPa}$? Ile pracy absolutnej wymaga sprężanie powietrza? Powietrze należy uważać za gaz półdoskonały. Rozpatrzyć przypadki: a) adiabatyczny (izentropowy) z średnim wykładnikiem κ i b) politropowy z wykładnikiem $v = 1,3$. Wykreślić przemiany na wykresie $P-v$ (i $T-s$), zaznaczając pole pracy (i ciepła).

Wyniki: a) $\kappa|_{100}^{650} = 1,369$, b) $v = 1,3$,
 $V_{2ad}/V_1 = 0,086$, $V_2/V_1 = 0,049$,
 $Q_{1-2ad} = 0$, $Q_{1-2} = -1,71 \text{ kJ}$,
 $P_{2ad} = 2685 \text{ kPa}$, $P_2 = 4722 \text{ kPa}$,
 $L_{1-2ad} = 7,44 \text{ kJ}$, $L_{1-2} = -9,16 \text{ kJ}$.

Zadanie 8.22

Sprężarka ma sprężać 600 kg/h powietrza od 100 kPa i 15°C do 500 kPa . Do dyspozycji stoją: (a) sprężarka izotermiczna, (b) sprężarka adiabatyczna (izentropowa) oraz c) sprężarka politropowa z $v = 1,33$. Powietrze można uważać za gaz doskonały z $R = 287 \text{ Nm/kgK}$ i $\kappa = 1,40$. Przedstawić wszystkie przemiany na jednym wykresie $P-v$ (i $T-s$) z zaznaczeniem pracy technicznej (i ciepła). Należy wyznaczyć: temperaturę powietrza po sprężeniu, doprowadzoną moc napędową, oddawany strumień ciepła oraz izotermiczną sprawność sprężania politropowego.

Wyniki: a) $t_2 = 20^\circ\text{C}$, $N \equiv |L_{t_{1-2}}| = 22,2 \text{ kW}$, $Q = -22,2 \text{ kW}$,
b) $t_2 = 183^\circ\text{C}$, $N \equiv |L_{t_{1-2}}| = 28,2 \text{ kW}$, $Q_{1-2} = 0$,
c) $t_2 = 156^\circ\text{C}$, $N \equiv |L_{t_{1-2}}| = 27,3 \text{ kW}$, $Q_{1-2} = -3,45 \text{ kW}$,
 $\eta_{izot.} = \frac{N_{izot.}}{N_{politr.}} = 0,81$.

Zadanie 8.23

$3000 \text{ m}^3/\text{h}$ powietrza o ciśnieniu 1000 kPa i temperaturze 20°C ogrzewane jest izobarycznie (rys. 8.4) do 150°C , a następnie doprowadzane do silnika pneumatycznego. Jaką moc rozwija ten silnik, jeżeli ekspansja w nim przebiega do 110 kPa politropowo przy $v = 1,35$? Ile ciepła doprowadza się do powietrza w podgrzewaczu, a ile przez ścianki cylindra podczas ekspansji? Właściwości powietrza określone są przez $R = 287 \text{ Nm/kgK}$ i $\kappa = 1,40$. Naszkicować schemat urządzeń i narysować przemiany w układzie $P-v$ (i $T-s$).

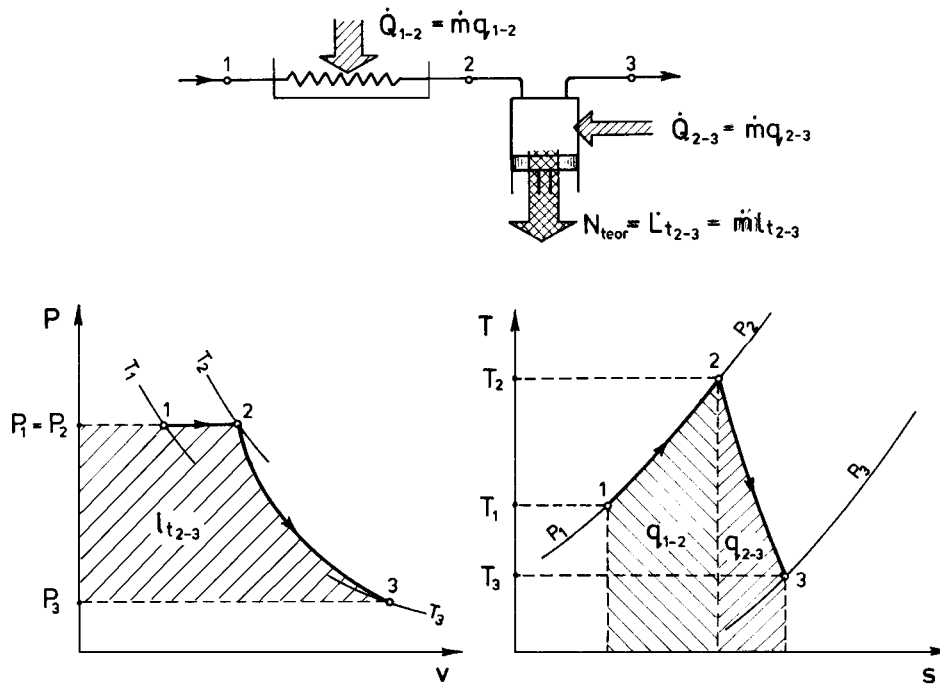
Rozwiązanie

Strumień masy powietrza:

$$\dot{m} = \frac{P\dot{V}}{RT} = \frac{1000 \cdot \frac{3000}{3600}}{0,287 \cdot 293,15} = 9,905 \text{ kg/s}$$

Ciepło właściwe przemiany izobarycznej:

$$c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R = \frac{1,4}{1,4 - 1} \cdot 287 = 1004,5 \text{ J/kgK} = 1,0045 \text{ kJ/kgK}$$



Rys. 8.4

Strumień ciepła w podgrzewaczu:

$$\dot{Q}_{1-2} = \dot{m}c_p(t_2 - t_1) = 9,905 \cdot 1,0045 \cdot (150 - 20) = 1293 \text{ kW}$$

Temperatura powietrza po ekspansji w silniku:

$$T_3 = T_2 \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 423,15 \left(\frac{110}{1000} \right)^{\frac{1,35-1}{1,35}} = 238,76 \text{ K} = -34,4^\circ \text{C}$$

Jednostkowa praca techniczna ekspansji:

$$\begin{aligned} l_{t_{2-3}} &= \frac{\gamma}{\gamma-1} R \cdot T_2 \left(1 - \frac{T_3}{T_2} \right) = \\ &= \frac{1,35}{1,35-1} \cdot 0,287 \cdot 423,15 \left(1 - \frac{238,76}{423,15} \right) = 204,1 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Moc silnika pneumatycznego:

$$N \equiv \dot{L}_{t_{2-3}} = \dot{m}l_{t_{2-3}} = 9,905 \cdot 204,1 = 2022 \text{ kW}$$

Jednostkowe ciepło doprowadzane w cylindrze:

$$q_{2-3} = c_v \frac{\nu - \kappa}{\nu - 1} (T_3 - T_2) = 0,7175 \frac{1,35 - 1,40}{1,35 - 1} (238,8 - 423,15) = 18,9 \text{ kJ/kg}$$

przy czym:

$$c_v = \frac{R}{\kappa - 1} = \frac{287}{1,4 - 1} = 717,5 \text{ J/kgK} = 0,7175 \text{ kJ/kgK}$$

Strumień ciepła doprowadzanego do cylindra:

$$\dot{Q}_{2-3} = \dot{m} q_{2-3} = 9,905 \cdot 18,9 = 187,2 \text{ kW}$$

Zadanie 8.24

3200 m³/h metanu (CH₄) o ciśnieniu 110 kPa i temperaturze 100°C sprężane jest izentropowo, aż do osiągnięcia temperatury 400°C, po czym oziębiane jest izobarycznie do 0°C. Metan ma właściwości gazu półdoskonałego. Naskicować schemat przepływowy urządzeń i przedstawić przemiany na wykresie P–v (i T–s) z zaznaczeniem pola pracy technicznej (i ciepła) oraz obliczyć: dokładną wartość ciśnienia po sprężaniu, teoretyczną moc napędową i oddawany w chłodnicy strumień ciepła.

Wyniki: $\kappa|_{100^\circ}^{400^\circ} = 1,209$, $P_2 = 3325 \text{ kPa}$, $\dot{m} = 0,5056 \text{ kg/s}$, $N = 454 \text{ kW}$, $\dot{Q}_{2-3} = -571 \text{ kW}$.

Zadanie 8.25

7000 m³/h helu o ciśnieniu 1200 kPa i temperaturze 150°C ochładza się izobarycznie do 15°C i doprowadza następnie do rozprężarki, gdzie rozpręża się politropowo przy $\nu = 1,5$ do 105 kPa. Naskicować schemat przepływowy urządzeń i narysować przemiany w układzie P–v (i T–s) z zaznaczeniem pracy technicznej (i ciepła). Właściwości helu określone są przez $M = 4 \text{ kg/kmol}$ i $\kappa = 1,40$. Obliczyć: strumień masy gazu, temperaturę po rozprężaniu, moc mechaniczną rozprężarki oraz strumienie ciepła w chłodnicy i rozprężarce.

Wyniki: $\dot{m} = 2,653 \text{ kg/s}$, $T_3 = 128 \text{ K}$, $N = 2651 \text{ kW}$, $\dot{Q}_{1-2} = -1856 \text{ kW}$, $\dot{Q}_{2-3} = 448,5 \text{ kW}$.

Zadanie 8.26

2500 m³/h tlenu o ciśnieniu 110 kPa i temperaturze 100°C sprężane jest politropowo przy $\nu = 1,25$ aż do osiągnięcia 300°C, po czym gaz jest schładzany izobarycznie do 0°C. Tlen traktować jak gaz półdoskonały. Naskicować schemat przepływowy urządzeń i przedstawić przemiany i przekazywaną energię jednostkową na wykresie P–v (i T–s) z zaznaczeniem pola pracy technicznej (i ciepła). Obliczyć: ciśnienie po sprężeniu tlenu, jednostkową pracę techniczną, teoretyczną moc napędową oraz strumienie ciepła doprowadzonego w cylindrze i w chłodnicy.

Wyniki: $P_2 = 940 \text{ kPa}$, $c_v|_{100^\circ}^{300^\circ} = 0,705 \text{ kJ/kgK}$, $l_{t-2} = -258 \text{ kJ/kg}$, $\kappa|_{100^\circ}^{300^\circ} = 1,369$,

$$N = 205 \text{ kW}, \quad \dot{Q}_{1-2} = 53 \text{ kW}, \quad \dot{Q}_{2-3} = 225 \text{ kW}.$$

Zadanie 8.27

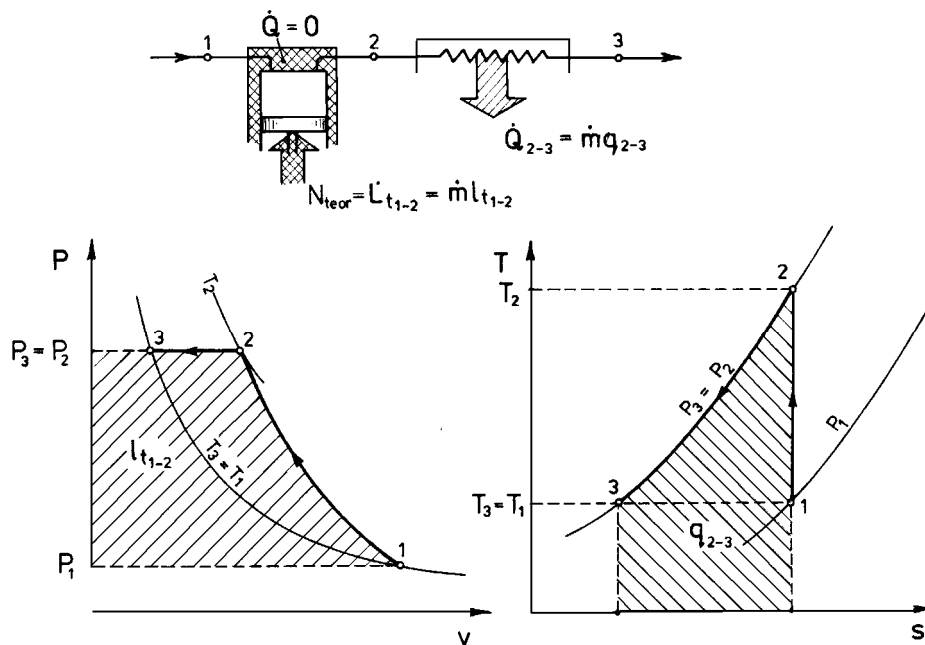
Do silnika pneumatycznego doprowadza się 4200 m³/h powietrza o ciśnieniu 600 kPa i temperaturze 15°C. Rozprężanie jest politropowe przy $\nu = 1,35$ i przebiega do ciśnienia 110 kPa. Rozprężone powietrze używane jest do celów chłodniczych przez izobaryczne pobieranie ciepła do osiągnięcia temperatury 5°C. Właściwości powietrza dane są przez $\kappa = 1,40$ i $R = 287 \text{ Nm/kgK}$. Narysować schemat przepływowy urządzenia oraz przedstawić przemiany i przekazywaną energię jednostkową na wykresie P–v (i T–s), a następnie obli-

czyć: strumień masy powietrza, temperaturę po ekspansji, jednostkową pracę techniczną i moc teoretyczną silnika pneumatycznego, strumień ciepła doprowadzany do ekspandującego powietrza oraz efekt chłodniczy izobarycznego pobierania ciepła przez rozprężone powietrze.

Wyniki: $\dot{m} = 8,46 \text{ kg/s}$, $t_2 = -87,5^\circ\text{C}$, $l_{t1-2} = 113,5 \text{ kJ/kg}$, $N = \dot{L}_{t1-2} = 960 \text{ kW}$,
 $\dot{Q}_{1-2} = 89 \text{ kW}$, $\dot{Q}_{2-3} = 786 \text{ kW}$.

Zadanie 8.28

2000 m³/h mieszaniny składającej się objętościowo w 65% z wodoru H₂ i w 35% z argonu Ar sprężane jest adiabatycznie (izentropowo) od 100 kPa i 10°C do 600 kPa, a następnie chłodzone izobarycznie do temperatury początkowej. Właściwości gazów określone są przez: $M = 2 \text{ kg/kmol}$ i $\kappa = 1,4$ dla wodoru oraz $M = 40 \text{ kg/kmol}$ i $\kappa = 1,67$ dla argonu. Narysować schemat przepływowy urządzenia i przedstawić proces na wykresie P-v (i T-s) z zaznaczeniem pola pracy technicznej (i ciepła wyprowadzonego). Obliczyć: wykładnik izentropy, temperaturę po sprężeniu, jednostkową pracę techniczną sprężania, teoretyczną moc napędową i strumień ciepła doprowadzonego w chłodnicy.



Rys. 8.5

Rozwiązanie

Zastępcza masa molowa mieszaniny:

$$M = \sum M_i r_i = M_{H_2} r_{H_2} + M_{Ar} r_{Ar} = 2 \cdot 0,65 + 40 \cdot 0,35 = 15,3 \text{ kg/kmol}$$

Zastępcza stała gazowa:

$$R = \frac{\tilde{R}}{M} = \frac{8,3143}{15,3} = 0,5434 \frac{\text{kJ}}{\text{kmolK}}$$

Udziały masowe:

$$g_{H_2} = r_{H_2} \frac{M_{H_2}}{M} = 0,65 \frac{2}{15,3} = 0,085$$

$$g_{Ar} = r_{Ar} \frac{M_{Ar}}{M} = 0,35 \frac{40}{15,3} = 0,915$$

Ciepła właściwe składników przy stałym ciśnieniu:

$$c_{p_{H_2}} = \frac{\kappa R_{H_2}}{\kappa - 1} = \frac{\kappa \tilde{R}}{(\kappa - 1)M_{H_2}} = \frac{1,4 \cdot 8,3143}{(1,4 - 1) \cdot 2} = 14,550 \text{ J/kgK}$$

$$c_{p_{Ar}} = \frac{\kappa R_{Ar}}{\kappa - 1} = \frac{\kappa \tilde{R}}{(\kappa - 1)M_{Ar}} = \frac{1,67 \cdot 8,3143}{(1,67 - 1) \cdot 40} = 0,518 \text{ J/kgK}$$

Zastępcze ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu:

$$c_p = \sum g_i c_{p_i} = 0,085 \cdot 14,55 + 0,915 \cdot 0,518 = 1,711 \text{ kJ/kgK}$$

Zastępcze ciepło właściwe przy stałej objętości:

$$c_v = c_p - R = 1,711 - 0,543 = 1,168 \text{ kJ/kgK}$$

Stosunek ciepł właściwych, czyli wykładnik izentropy:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1,711}{1,168} = 1,465$$

Temperatura po sprężeniu:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} = 283,15 \left(\frac{600}{100} \right)^{\frac{1,465 - 1}{1,465}} = 500,0 \text{ K}$$

Jednostkowa praca techniczna sprężania:

$$\begin{aligned} l_{t_{1-2}} &= \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right] = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \\ &= \frac{1,465}{1,465 - 1} \cdot 543,4 \cdot 283,15 \cdot \left(1 - \frac{500}{283,15} \right) = -371,2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Strumień masy sprężonego gazu:

$$\dot{m} = \frac{P_1 \dot{V}_1}{R T_1} = \frac{100 \cdot \frac{2000}{3600}}{0,5434 \cdot 283,15} = 0,3611 \text{ kg/s}$$

Teoretyczna moc sprężania:

$$N = |\dot{L}_{t_{1-2}}| = \dot{m} |l_{t_{1-2}}| = 0,3611 \cdot 371,2 = 134,0 \text{ kW}$$

Strumień ciepła oddanego w chłodnicy:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_3 - T_2) = 0,3611 \cdot 1,711 \cdot (283,15 - 500) = -134,0 \text{ kW}.$$

Zadanie 8.29

W dużym zbiorniku znajduje się mieszanina gazów doskonałych o składzie objętościowym: 25% tlenku węgla CO i 75% helu He, w temperaturze 10°C i pod ciśnieniem 200 kPa. Mieszaninę podgrzewa się do 400°C, a następnie wypuszcza przez zawór niewielki strumień 150 m³/h tego gazu (jego parametry pozostają stałe) i kieruje do rozprężarki, w której ekspanduje adiabatycznie (izentropowo) do 120°C. Właściwości gazów określone są przez: M = 28 kg/kmol i $\kappa = 1,4$ dla tlenku węgla oraz M = 4 kg/kmol i $\kappa = 1,67$ dla helu. Narysować schemat przepływowy urządzenia i przedstawić przemiany na wykresie P-v (i T-s) z zaznaczeniem pola pracy technicznej (i ciepła doprowadzonego).

Obliczyć: jednostkowe ciepło doprowadzone, ciśnienie po podgrzaniu mieszaniny w zbiorniku, jednostkową pracę techniczną wykonaną przez gaz w rozprężarce oraz teoretyczną moc rozprężarki.

Wyniki: $q_{1-2} = 565,5 \text{ kJ/kg}$, $P_2 = 109 \text{ kPa}$, $l_{t_{2-3}} = 639 \text{ kJ/kg}$, $\dot{m} = 0,0354 \text{ kg/s}$,
 $\kappa = 1,573$, $N = 22,6 \text{ kW}$.

Zadanie 8.30

5000 m³/h spalin o ciśnieniu 100 kPa i temperaturze 500°C dopływa do kotła utylizacyjnego oziębiając się w nim do 200°C przy stałym ciśnieniu. Jaki strumień ciepła oddają spaliny w kotle? Spaliny są mieszaniną gazów półdoskonałych o następującym składzie objętościowym: 79% azotu N₂, 8% pary wodnej H₂O i 13% dwutlenku węgla CO₂.

Wyniki: $c_p|_{200^\circ}^{500^\circ} = 1,128 \text{ kJ/kgK}$, $\dot{Q} = -214 \text{ kW}$.

Zadanie 8.31

12000 m³/h mieszaniny złożonej objętościowo w 60% z wodoru N₂ i w 40% metanu CH₄ dopływa pod ciśnieniem 500 kPa i o temperaturze 15°C do wymiennika ciepła, w którym podgrzewa się izobarycznie do 200°C. Następnie gaz rozpręża się izentropowo w silniku do osiągnięcia 100°C. Wodór i metan są gazami półdoskonałymi o masach molowych odpowiednio: 2 i 16 kg/kmol. Narysować schemat przepływowy urządzenia i przedstawić przemiany w układzie P–v (i T–s) z zaznaczeniem pracy technicznej (i ciepła doprowadzonego). Obliczyć: strumień masy mieszaniny, przejęte ciepło jednostkowe i strumień ciepła, wykładnik izentropy, końcowe ciśnienie ekspansji, jednostkową pracę techniczną ekspansji oraz teoretyczną moc silnika.

Wyniki: $\dot{m} = 5,287 \text{ kg/s}$, $q_{1-2} = 805 \text{ kJ/kg}$, $\dot{Q}_{1-2} = 4226 \text{ kW}$, $\kappa|_{100}^{200} = 1,3215$,
 $P_3 = 189 \text{ kPa}$, $l_{t_{2-3}} = 450 \text{ kJ/kg}$, $N = 2373 \text{ kW}$.

Zadanie 8.32

6000 m³/h mieszaniny składającej się objętościowo z 35% z dwutlenku węgla CO₂ (M = 44 kg/kmol, $\kappa = 1,31$) i 35% wodoru H₂ (M = 2 kg/kmol, $\kappa = 1,4$) o ciśnieniu 750 kPa i temperaturze 10°C dopływa do podgrzewacza, w którym izobarycznie podnosi swoją temperaturę do 400°C. Następnie mieszanina rozpręża się politropowo przy $\nu = 1,25$ do 100 kPa. Narysować schemat przepływowy urządzenia i przedstawić przemiany w układzie P–v (i T–s) z zaznaczeniem pracy technicznej (i ciepła doprowadzonych). Obliczyć: strumień ciepła doprowadzanego do mieszaniny w podgrzewaczu, temperaturę po ekspansji, stosunek ciepła właściwych κ , strumień ciepła doprowadzany w czasie ekspansji i teoretyczną moc silnika.

Wyniki: $\dot{Q}_{1-2} = 8625 \text{ kW}$, $t_3 = 176,7^\circ\text{C}$, $\kappa = 1,363$, $\dot{Q}_{2-3} = 1638 \text{ kW}$, $N = 6572 \text{ kW}$.

Zadanie 8.33

Mieszanina złożona objętościowo z 75% wodoru H₂ i 25% azotu N₂ w ilości 14 000 m³/h przy 100 kPa i 100°C sprężana jest w izentropowo do osiągnięcia 400°C. Następnie gaz oziębiany jest izobarycznie do 0°C. Składniki mieszaniny należy uważać za gazy półdoskonałe. Narysować schemat przepływowy urządzenia i przedstawić przemiany w układzie P–v (i T–s), z zaznaczeniem pola pracy technicznej (i ciepła). Obliczyć: strumień masowy mieszaniny, średni wykładnik izentropy, ciśnienie po sprężaniu, teoretyczną moc napędową sprężarki i strumień ciepła chłodzenia.

Wyniki: $\dot{m} = 1,174 \text{ kg/s}$, $\kappa|_{100^\circ}^{400^\circ} = 1,3948$, $P_2 = 884 \text{ kPa}$, $N = 1215 \text{ kW}$, $\dot{Q}_{2-3} = 1613 \text{ kW}$.

Zadanie 8.34

Mieszanina o składzie objętościowym: 70% helu ($M = 4 \text{ kg/kmol}$, $\kappa = 1,67$) i 30% tlenu ($M = 32 \text{ kg/kmol}$, $\kappa = 1,4$) dopływa strumieniem $960 \text{ m}^3/\text{h}$ przy 15°C i 200 kPa do silnika, w którym rozpręża się politropowo ($\nu = 1,45$) do 100 kPa . Rozprężony, chłodny gaz ma być użyty do celów chłodniczych. Jaki strumień ciepła może ten gaz przyjąć, nagrzewając się do 0°C ? Narysować schemat przepływowy urządzenia i przedstawić przemiany w układzie $P-v$ (i $T-s$) z zaznaczeniem pracy technicznej (i ciepła) oraz obliczyć: temperaturę po rozprężaniu, jednostkową pracę techniczną i teoretyczną moc silnika, stosunek ciepła właściwych κ i ciepło właściwe przemiany politropowej oraz strumień ciepła przemiany politropowej i jego kierunek.

Wyniki: $T_2 = 113,7 \text{ K}$, $\dot{Q}_{2-3} = 825$, $l_{t-2} = 377 \text{ kJ/kg}$, $N = 1040 \text{ kW}$, $\kappa = 1,203$,

$$c = -5,286 \text{ kJ/kgK}, \quad \dot{Q}_{1-2} = +138 \text{ kW (doprowadzone)}.$$

Zadanie 8.35

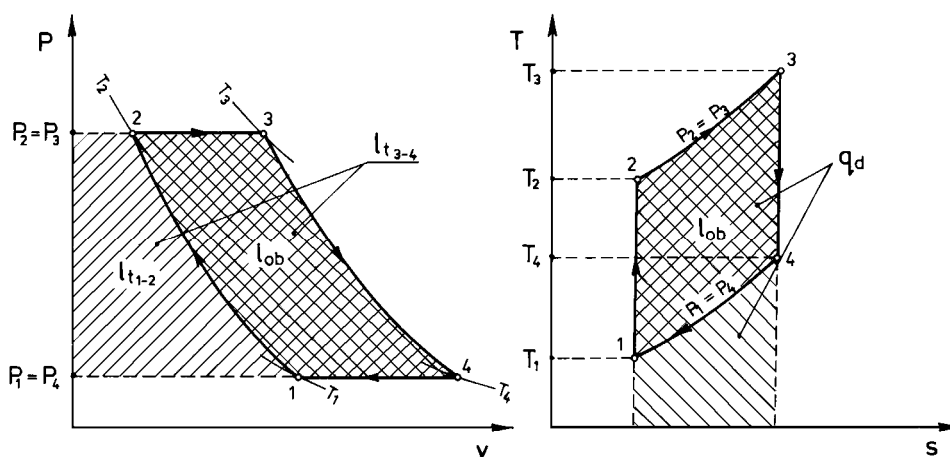
Mieszanina gazów poldoskonałych złożona objętościowo z 40% dwutlenku węgla CO_2 i z 60% metanu CH_4 dopływa strumieniem $6000 \text{ m}^3/\text{h}$ przy 100°C i 150 kPa do sprężarki, w której w wyniku izentropowego sprężania osiąga temperaturę 300°C . W tym stanie ładowana jest do stalowych butli. Butle zostają zamknięte, a gaz po pewnym czasie osiąga temperaturę początkową. Narysować schemat przepływowy urządzenia i przedstawić przemiany w układzie $P-v$ (i $T-s$), z zaznaczeniem pola pracy technicznej (i ciepła odprowadzonego), a następnie obliczyć: strumień masy gazu, wykładnik adiabaty κ , ciśnienie po sprężaniu, teoretyczną moc sprężarki oraz jednostkowe ciepło oddane przez gaz w butlach.

Wyniki: $\dot{m} = 7889,8 \text{ kg/h}$, $\kappa|_{100^\circ}^{300^\circ} = 1,230$, $P_2 = 149 \text{ kPa}$, $N = 716,9 \text{ kW}$, $q_{2-3} = -265,6 \text{ kJ/kg}$.

9. OBIEGI TERMODYNAMICZNE GAZÓW

Zadanie 9.1

W prawobieźnym obiegu Braytona–Joule'a sprężane jest powietrze od 100 do 1200 kPa, po czym następuje izobaryczne nagrzewanie tego powietrza do 1020 K. Po izentropowej ekspansji do ciśnienia początkowego gaz jest izobarycznie ochładzany do początkowej temperatury 305 K. Narysować obieg w układach: $P-v$ i $T-s$ *) z zaznaczeniem pól: ciepła doprowadzonego, prac sprężarki i rozprężarki oraz pracy obiegu; obliczyć brakujące parametry punktów węzłowych, a następnie wyznaczyć: jednostkowe ciepła doprowadzone i wyprowadzone, jednostkową pracę obiegu oraz sprawność i sprawność maksymalną. Ponadto wyznaczyć teoretyczną moc mechaniczną wytwarzaną przez instalację działającą według tego obiegu, jeżeli zasila się ją ciepłem w ilości 100 MW. Właściwości powietrza określone są w zupełności przez: $c_v = 0,717 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ i $\kappa = 1,40$.



Rys. 5.1

Rozwiązanie

Wykreślamy szkicowo przebieg przemian obiegu na wykresach: $P-v$ i $T-s$ (rys. 5.1). Następnie sporządzamy tabelkę na parametry w punktach węzłowych i wpisujemy w niej wielkości dane (liczby wytłuszczone) – potem wnoszone do niej będą wielkości obliczone (tu: zwykle czcionki).

Stan (punkt)	1	2	3	4
P [kPa]	100	1200	1200	100
T [K]	305	620,35	1020	501,49

Temperaturę po izentropowym sprężeniu powietrza od stanu 1 do stanu 2 obliczamy ze znanej zależności:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 305 \cdot \left(\frac{1200}{100} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 620,35 \text{ K}$$

Wynik wpisujemy do tabeli, uzyskując komplet 2 parametrów określających stan 2. Stan 3 jest znany, bo znane są: $P_3 = P_2 = 1200 \text{ kPa}$ i $T_3 = 1020 \text{ K}$.

*) Prezentację na wykresie $T-s$ wykonuje się uzupełniając, po poznaniu konstrukcji tego wykresu.

W stanie 4 mamy ciśnienie: $P_4 = P_1 = 100 \text{ kPa}$, wobec czego możemy obliczyć temperaturę w tym stanie, posługując się jeszcze raz wzorem dla przemiany izentropowej – tym razem między stanami 3–4:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1020 \cdot \left(\frac{100}{1200} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 501,49 \text{ K}$$

Mamy wypełnioną tabelkę, znamy więc wszystkie cztery stany węzłowe. Możemy tym samym stany te odwzorować dokładnie na wykresach oraz obliczyć funkcje stanu i objętości właściwe w tych stanach, jeżeli zajdzie taka potrzeba.

Przechodzimy do obliczeń energetycznych, w których liczyć będziemy wielkości jednostkowe.

Ciepło doprowadzone:

$$q_d = q_{2-3} = c_p (T_3 - T_2) = 1,004 (1020 - 620) = 401,6 \text{ kJ/kg}$$

przy czym dla danego $c_v = 0,717 \text{ kJ/kgK}$ jest:

$$c_p = \kappa c_v = 1,40 \cdot 0,717 = 1,004 \text{ kJ/kg}$$

Ciepło wyprowadzone:

$$q_w = q_{4-1} = c_p (T_1 - T_4) = 1,004 \cdot (305 - 501,5) = -197,3 \text{ kJ/kg}$$

Praca obiegu:

$$l_{ob} = q_d - |q_w| = 401,6 - 197,3 = 204,3 \text{ kJ/kg}$$

Sprawność obiegu:

$$\eta = \frac{l_{ob}}{q_d} = \frac{204,3}{401,6} = 0,5087 \cong 50,9 \%$$

Sprawność maksymalną wyznaczamy przy założeniu, że temperatura źródła ciepła:

$$T_{zr} = T_{max} = T_3 = 1020 \text{ K},$$

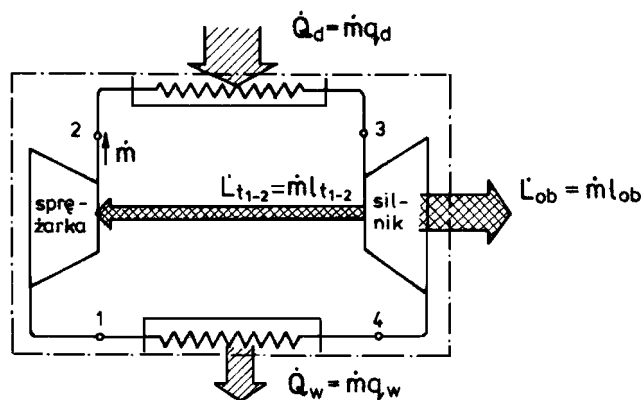
a temperatura odbiornika ciepła, jakim jest otoczenie:

$$T_{ot} = T_{min} = T_1 = 305 \text{ K}.$$

A zatem:

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{305}{1020} = 0,701 = 70,1\%$$

Obieg realizowany jest przez zespół urządzeń pokazany schematycznie na rys. 5.2.



Rys. 5.2

Zasilanie tego systemu strumieniem ciepła wynoszącym:

$$\dot{Q}_d = 100 \text{ kW} = \dot{m} \cdot q_d$$

powoduje, że krążący w obiegu strumień masy gazu roboczego (powietrza) wynosić musi:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_d}{q_d} = \frac{100 \text{ kJ/s}}{401,6 \text{ kJ/kg}} = 0,249 \text{ kg/s}$$

Oddawana na zewnątrz moc mechaniczna:

$$N_{\text{teor}} \equiv L_{\text{ob}} = \dot{m} l_{\text{ob}} = 0,249 \cdot 204,3 = 50,87 \text{ kW}$$

Ten sam wynik dałoby obliczenie z użyciem sprawności:

$$L_{\text{ob}} = \eta \dot{Q}_d = 0,5087 \cdot 100 = 50,87 \text{ kW}$$

Zadanie 9.2

Dwa obiegi porównawcze silników spalinowych: Otto i Diesla mają się odbywać w następujących warunkach: maksymalna objętość gazu w cylindrze $V_1 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, maksymalne ciśnienie $P_{\text{max}} = 5,0 \text{ MPa}$, maksymalna temperatura $T_{\text{max}} = 2000 \text{ K}$, minimalna temperatura $T_{\text{min}} = 300 \text{ K}$, minimalne ciśnienie $P_1 = 100 \text{ kPa}$.

Należy naszkicować przemiany obiegu w układach współrzędnych $P-v$ i $T-s$, z zaznaczeniem pól: ciepła doprowadzonego i pracy obiegu, a następnie obliczyć: a) brakujące parametry w punktach węzłowych, b) prace obiegu, c) teoretyczne moce obu silników, jako maszyn 4-cylindrowych, wykonujących 40 cykli w sekundzie w przypadku obiegu Otto i 30 cykli w sekundzie w obiegu Diesla, d) sprawności termiczne obu obiegu oraz e) sprawności maksymalne

Uwaga! Przyjmuje się, że gazem roboczym jest powietrze o stałych właściwościach określonych przez $\kappa = 1,40$ i $c_v = 0,717 \text{ kJ/kgK}$.

Wyniki:

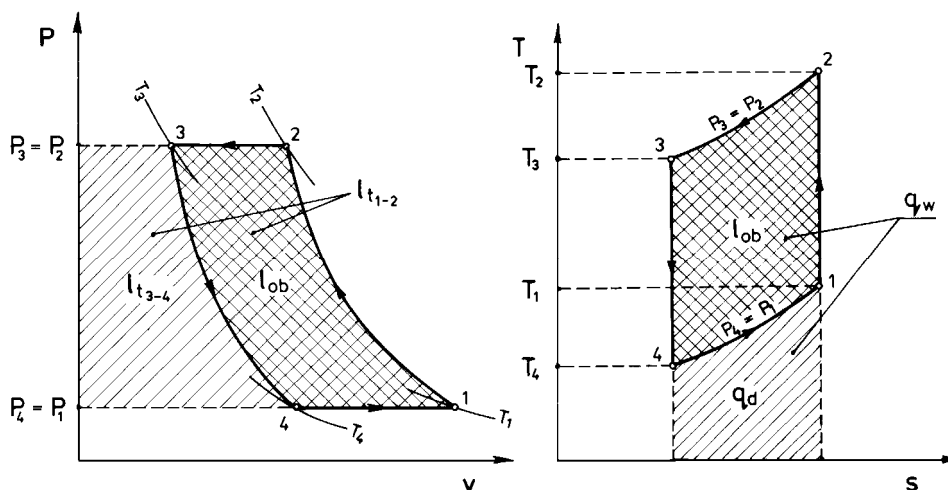
	$m = 0,581 \cdot 10^{-3} \text{ kg},$		
Obieg Otto:	$P_2 = 16,78 \text{ MPa},$	$T_2 = 671,5 \text{ K},$	$V_2 = 0,0667 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3,$
	$P_3 = 5,0 \text{ MPa},$	$T_3 = 2000 \text{ K},$	$V_3 = V_2,$
	$P_4 = 298 \text{ kPa},$	$T_4 = 893,5 \text{ K},$	$V_4 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3,$
	$Q_d = Q_{2-3} = 0,553 \text{ kJ},$		
	$Q_w = Q_{4-1} = -0,247 \text{ kJ},$		
	$L_{\text{ob}} = 0,306 \text{ kJ},$		
	$N_{\text{teor}} = 49 \text{ kW},$		
	$\eta = 0,553 = 55,3\%,$		
	$\eta_{\text{max}} = 0,85 = 85\%,$		
Obieg Diesla:	$P_2 = 5,0 \text{ MPa},$	$T_2 = 917 \text{ K},$	$V_2 = 0,0306 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3,$
	$P_3 = P_2,$	$T_3 = 2000 \text{ K},$	$V_3 = 0,0666 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3,$
	$P_4 = 298 \text{ kPa},$	$T_4 = 893 \text{ K},$	$V_4 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3,$
	$Q_d = Q_{2-3} = 0,632 \text{ kJ},$		
	$Q_w = Q_{4-1} = -0,247 \text{ kJ},$		
	$L_{\text{ob}} = 0,385 \text{ kJ},$		
	$N_{\text{teor}} = 46,2 \text{ kW},$		
	$\eta = 0,609 = 60,9\%,$		
	$\eta_{\text{max}} = 0,85 = 85\%.$		

Zadanie 9.3

W lewobieżnym, chłodniczym obiegu Joule'a znany jest stan gazu roboczego na początku izentropowego sprężania: $P_1 = 100 \text{ kPa}$ i $t_1 = -15^\circ\text{C}$. Po sprężeniu gaz osiąga tempe-

raturę $t_2 = 15^\circ\text{C}$. Odprowadzone do otoczenia ciepło jednostkowe wynosi $q_w = -250 \text{ kJ/kg}$. Właściwości gazu roboczego określone są przez: $R = 2079 \text{ Nm/kgK}$ i $\kappa = 1,67$.

Naszkicować przemiany obiegu w układach: $P-v$ i $T-s$, z zaznaczeniem pól ciepła doprowadzonego, prac: sprężarki i rozprężarki oraz pracy obiegu, a następnie obliczyć brakujące ciśnienia i temperatury w stanach węzłowych oraz jednostkową pracę, sprawność i sprawność maksymalną obiegu, a także teoretycznie niezbędną moc napędową urządzenia działającego według tego obiegu przy wydajności chłodniczej 50 kW .



Rys. 9.3

Rozwiązanie

Wykreślamy przemiany obiegu w układach: $P-v$ i $T-s$, a następnie sporządzamy tabelkę dla parametrów w stanach węzłowych i wpisujemy do niej wielkości podane w tekście zadania (liczby wytłuszczone).

Stan	1	2	3	4
P [kPa]	100	343	343	100
t [°C]	-15	150	101,8	-44,5
T [K]	258,15	423,15	374,9	228,64

Ciśnienie po sprężeniu izentropowym P_2 obliczamy, przekształcając znaną zależność

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

do postaci rozwiniętej względem P_2 :

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 100 \cdot \left(\frac{423}{258,15} \right)^{\frac{1,67}{1,67-1}} = 343 \text{ kPa}$$

To samo ciśnienie ma gaz w stanie 3:

$$P_3 = P_2 = 343 \text{ kPa}$$

Temperatura w stanie 3 determinuje ilość wyprowadzonego ciepła:

$$q_w = q_{2-3} = c_p (T_3 - T_2) = -250 \text{ kJ/kg}$$

obliczamy stąd wartość tej temperatury:

$$T_3 = \frac{q_w}{c_p} + T_2 = \frac{-250}{5,182} + 423,15 = 374,9 \text{ K}$$

przy czym:

$$c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R = \frac{1,67}{1,67 - 1} \cdot 2079 = 5182 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} = 5,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

Temperaturę w ostatnim stanie 4 wyznaczamy z przejścia izentropowego 3–4, po którym gaz osiąga ciśnienie początkowe: $P_4 = P_1 = 100 \text{ kPa}$:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{P_4}{P} \right)^{\frac{1,67-1}{1,67}} = 374,9 \cdot \left(\frac{100}{343} \right)^{\frac{1,67-1}{1,67}} = 228,64 \text{ K}$$

Ciepło doprowadzone (w niskich temperaturach):

$$q_d = q_{4-1} = c_p (T_1 - T_4) = 5,182 \cdot (258,15 - 228,64) = 152,9 \text{ kJ/kg}$$

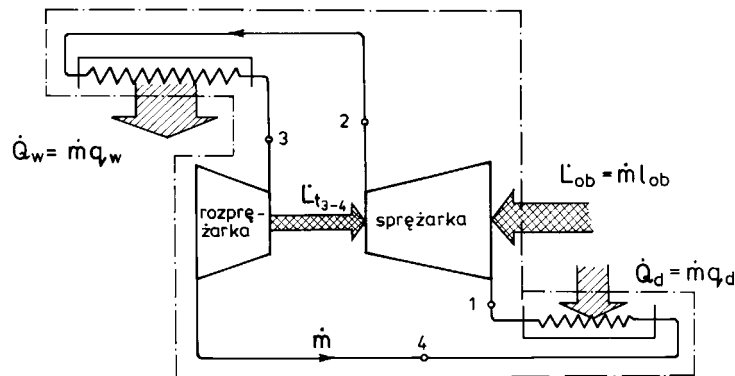
Praca obiegu:

$$l_{ob} = q_d - |q_w| = 152,9 - 250 = -97,1 \text{ kJ/kg}$$

jest ujemna, bo musi być doprowadzona.

Sprawność obiegu, czyli współczynnik wydajności chłodniczej:

$$\varepsilon = \frac{q_d}{|l_{ob}|} = \frac{152,9}{97,1} = 1,57$$



Rys. 9.4

Sprawność maksymalną obliczamy przy założeniu, że źródło ciepła ma temperaturę równą temperaturze gazu na końcu doprowadzania do niego ciepła: $T_{zt} = T_1 = 258,15 \text{ K}$, a temperatura odbiornika ciepła (otoczenia) jest równa temperaturze gazu na końcu wyprowadzania ciepła: $T_{ot} = T_3 = 374,9 \text{ K}$:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_1}{T_3 - T_1} = \frac{258,15}{374,9 - 258,15} = 2,21$$

Aby zapewnić wydajność chłodniczą

$$\dot{Q}_d = 50 \text{ kW} = \dot{m} q_d = \dot{m} q_{4-1}$$

musi w instalacji realizującej obieg krążyć strumień masy gazu:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_d}{q_d} = \frac{50 \text{ kJ/s}}{152,9 \text{ kJ/kg}} = 0,327 \text{ kg/s}$$

Teoretyczna moc mechaniczna, potrzebna do napędu urządzenia:

$$N_{\text{teor}} = |L_{\text{ob}}| = \dot{m} |l_{\text{ob}}| = 0,327 \cdot 97,1 = 31,75 \text{ kW}$$

Zadanie 9.4

Obliczyć jednostkową pracę obiegu Seiligera–Sabathé, jego sprawność i sprawność maksymalną, jeżeli dane są następujące parametry: na początku sprężania $P_1 = 95 \text{ kPa}$, $t_1 = 15^\circ\text{C}$, na końcu sprężania $P_2 = 2400 \text{ kPa}$, po izochorycznym doprowadzeniu ciepła $P_3 = 5300 \text{ kPa}$, $t_3 = 1330^\circ\text{C}$, a po izobarycznym doprowadzeniu ciepła $t_4 = 1651^\circ\text{C}$. Gazem roboczym jest powietrze o właściwościach określonych przez: $R = 287 \text{ Nm/kgK}$ i $\kappa = 1,40$. Wykreślić przemiany obiegu w układach P – v i T – s , z zakreskowaniem powierzchni równoważnych pracy obiegu i ciepłu doprowadzonemu, i obliczyć brakujące parametry w stanach węzłowych.

Wyniki: $t_2 = 451,8^\circ\text{C}$, $P_4 = 5300 \text{ kPa}$, $P_5 = 270 \text{ kPa}$, $t_5 = 549^\circ\text{C}$, $q_d = 952,5 \text{ kJ/kg}$,
 $q_w = 83,1 \text{ kJ/kg}$, $l_{\text{ob}} = 569,4 \text{ kJ/kg}$, $\eta = 0,598 = 59,8\%$, $\eta_{\text{max}} = 0,85 = 85\%$.

Zadanie 9.5

Źródło ciepła o temperaturze 400°C pozostaje w doskonałym kontakcie cieplnym z substancją odbywającą obieg Carnota. Również odbiornik ciepła, jakim jest otoczenie, jest w doskonałym kontakcie cieplnym z substancją roboczą tego obiegu. Temperatura otoczenia osiąga latem 30°C . Substancją roboczą obiegu jest powietrze ($R = 287 \text{ Nm/kgK}$, $\kappa = 1,4$), którego ciśnienie po izotermicznej ekspansji i po izotermicznej kompresji jest jednakowe i wynosi 800 kPa . Przedstawić obieg na wykresach P – v i T – s , a następnie obliczyć: zmianę entropii w przemianach izotermicznych, ciśnienia: najwyższe i najniższe procesu, jednostkową pracę obiegu, teoretyczną moc urządzenia realizującego obieg, jeżeli substancji roboczej jest 5 kg , a urządzenie wykonuje 25 cykli roboczych w minucie oraz sprawność obiegu i tę samą sprawność dla temperatury otoczenia -20°C (zimą).

Wyniki: $\Delta s = 0,7977 \text{ kJ/kg}$, $P_1 = 12\,887 \text{ kPa}$, $P_3 = 49 \text{ kPa}$, $l_{\text{ob}} = 295,2 \text{ kJ/kg}$,
 $N_{\text{teor}} = 615 \text{ kW}$, $\eta = 0,55 = 55,0\%$, $\eta_{-20^\circ} = 0,624 = 62,4\%$,

Zadanie 9.6

Prawobieżny obieg składa się z następujących przemian:

- 1 – 2 izotermiczne sprężanie,
- 2 – 3 izobaryczne podgrzewanie,
- 3 – 1 izentropowe rozprężanie.

Dane są następujące parametry: $T_1 = 300 \text{ K}$, $V_1 = 2 \text{ m}^3$ i $V_2 = 0,7 \text{ m}^3$ oraz masa $m = 5 \text{ kg}$ gazu roboczego o właściwościach określonych przez $M = 28 \text{ kg/kmol}$ i $\kappa = 1,40$.

Przedstawić obieg na wykresach: P – V i T – s i zaznaczyć kreskowaniem: prace techniczne obu maszyn oraz jednostkowe ciepła: doprowadzone i wyprowadzone, a następnie obliczyć: ciśnienia i temperatury w stanach węzłowych, prace techniczne: sprężarki $L_{t \text{ spr.}}$, rozprężarki $L_{t \text{ rozpr.}}$, jednostkowe ciepła: doprowadzone q_d i wyprowadzone q_w oraz sprawność obiegu i jego sprawność maksymalną.

Wyniki: $P_1 = 223 \text{ kPa}$, $P_2 = P_3 = 636 \text{ kPa}$, $T_3 = 405 \text{ K}$, $L_{t \text{ spr.}} = -468 \text{ kJ}$, $L_{t \text{ rozpr.}} = 545 \text{ kJ}$,
 $q_d = 109 \text{ kJ/kg}$, $q_w = -93,5 \text{ kJ/kg}$, $\eta = 0,142 = 14,2\%$, $\eta_{\text{max}} = 0,259 = 25,9\%$.

Zadanie 9.7

Prawobieżny obieg składa się z następujących przemian:

- 1 – 2 izentropowe sprężanie,
- 2 – 3 izobaryczne grzanie,
- 3 – 4 politropowe rozprężanie.

Gazem roboczym jest azot N_2 ($M = 28 \text{ kg/kmol}$, $\kappa = 1,40$). Dane są następujące parametry: $P_1 = 88,3 \text{ kPa}$, $t_1 = 27^\circ\text{C}$, $T_2 = 900 \text{ K}$, $T_3 = 1900 \text{ K}$. Narysować przemiany obiegu na wykresach: $P-v$ i $T-s$, zaznaczając kreskowaniem: pracę obiegu oraz ciepła: doprowadzone i wyprowadzone, a następnie obliczyć: brakujące parametry w punktach węzłowych obiegu, wykładnik politropy v , jednostkową pracę obiegu, sprawność obiegu i sprawność maksymalną.

Wyniki: $P_2 = P_3 = 4129 \text{ kPa}$, $v = 1,92$, $l_{ob} = 368 \text{ kJ/kg}$, $\eta = 0,354 = 35,4\%$,
 $\eta_{max} = 0,842 = 84,2\%$.

Zadanie 9.8

Silnik cieplny funkcjonuje według obiegu (teoretycznego) złożonego z:

- 1 – 2 izentropy sprężania,
- 2 – 3 izobary pobierania ciepła,
- 3 – 1 izochory powrotu do stanu wyjściowego.

Gaz roboczy ($\kappa = 1,38$) krąży w obiegu z natężeniem: $\dot{n} = 0,6 \text{ kmol/s}$.

Dane są ponadto: ciśnienie najniższe $P_{min} = 100 \text{ kPa}$, temperatury: najniższa $T_{min} = 300 \text{ K}$ i najwyższa $T_{max} = 1800 \text{ K}$.

Narysować obieg na wykresach $P-v$ i $T-s$ z zaznaczeniem pól: pracy obiegu oraz ciepła doprowadzonego i wyprowadzonego, a następnie obliczyć: ciśnienie P_3 i temperaturę T_2 , strumień ciepła: doprowadzonego $\dot{Q}_d$ i wyprowadzonego $\dot{Q}_w$, strumień pracy obiegu, czyli teoretyczną moc mechaniczną obiegu $\dot{L}_{ob} \equiv N_{ob}$, sprawność obiegu η_{ob} i sprawność maksymalną η_{max} .

Wyniki: $P_3 = 600 \text{ kPa}$, $T_2 = 491 \text{ K}$, $\dot{Q}_d = 23,7 \text{ kW}$, $\dot{Q}_w = -19,7 \text{ kW}$, $N_{ob} = 4,0 \text{ kW}$,
 $\eta = 0,169 = 16,9\%$, $\eta_{max} = 0,833 = 83,3\%$.

Zadanie 9.9

Idealny silnik cieplny pracuje według obiegu składającego się z:

- 1 – 2 politropowego sprężania ($v = 1,35$),
- 2 – 3 izobarycznego pobierania ciepła,
- 3 – 1 izochorycznego powrotu do stanu wyjściowego.

Substancją roboczą jest azot ($M = 28 \text{ kg/kmol}$, $\kappa = 1,40$), a dane są parametry: $P_{min} = 100 \text{ kPa}$, $T_{min} = 300 \text{ K}$, $P_{max} = 600 \text{ kPa}$, $T_{max} = 1800 \text{ K}$. Przedstawić obieg na wykresach $P-v$ i $T-s$, z zaznaczeniem pól: pracy obiegu oraz ciepła: doprowadzonego i wyprowadzonego, a następnie obliczyć: brakujące parametry w punktach węzłowych, jednostkowe ciepła: doprowadzone i wyprowadzone, jednostkową pracę obiegu, sprawność obiegu i jego sprawność maksymalną oraz teoretyczną moc sprężarki dla $\dot{n} = 0,6 \text{ kmol/s}$.

Wyniki: $T_2 = 477,4 \text{ K}$, $q_d = 1374,6 \text{ kJ/kg}$, $q_w = -1132,3 \text{ kJ/kg}$, $l_{ob} = 242,3 \text{ kJ/kg}$,
 $\eta = 0,176 = 17,6\%$, $\eta_{max} = 0,833 = 83,3\%$, $N_{spr} = |\dot{L}_{1-2}| = 34,13,5 \text{ kW}$.

Zadanie 9.10

Azot ($M = 28 \text{ kg/kmol}$ $\kappa = 1,40$) pracuje w prawobieźnym obiegu, w którego skład wchodzi:

- 1 – 2 izentropa,
- 2 – 3 izochora,
- 3 – 4 izentropa,
- 4 – 1 izobara.

Znane są parametry: $T_1 = 300 \text{ K}$, $P_1 = 100 \text{ kPa}$, $P_2 = 700 \text{ kPa}$, $P_3 = 2200 \text{ kPa}$. Teoretyczna moc obiegu wynosi $N = 100 \text{ kW}$. Narysować obieg w układach $P-v$ i $T-s$, a następnie obliczyć: brakujące temperatury i objętości właściwe, strumień ciepła doprowadzonego i wyprowadzonego oraz sprawność obiegu i jego sprawność maksymalną.

Wyniki: $T_2 = 523 \text{ K}$, $T_3 = 1643 \text{ K}$, $T_4 = 679 \text{ K}$, $v_1 = 0,891 \text{ m}^3/\text{kg}$, $v_2 = v_3 = 0,222 \text{ m}^3/\text{kg}$, $v_4 = 2,016 \text{ m}^3/\text{kg}$, $q_d = 831,4 \text{ kJ/kg}$, $q_w = -393,9 \text{ kJ/kg}$, $l_{ob} = 437,5 \text{ kJ/kg}$, $\dot{m} = 0,228 \text{ kg/s}$, $\dot{Q}_d = 189,5 \text{ kW}$, $\dot{Q}_w = -89,8 \text{ kW}$, $\eta = 0,526 = 52,6\%$ kW , $\eta_{max} = 0,817 = 81,7\%$.

Zadanie 9.11

W prawobieźnym obiegu czynnikiem roboczym jest gaz, którego właściwości określone są przez $\kappa = 1,33$ i $\tilde{c}_v = 24,9 \text{ kJ/kmolK}$. Obieg składa się z następujących przemian:

- 1 – 2 izentropa,
- 2 – 3 izoterma,
- 3 – 4 izentropa,
- 4 – 1 izobara.

Dane są: $T_1 = 300 \text{ K}$, $P_2 = 600 \text{ kPa}$, $P_3 = 400 \text{ kPa}$, $P_4 = 100 \text{ kPa}$ oraz strumień ciepła doprowadzonego $\dot{Q}_d = 120 \text{ kW}$. Przedstawić obieg na wykresach $P-v$ i $T-s$, a następnie obliczyć: temperatury w punktach węzłowych, strumień ciepła wyprowadzonego, teoretyczną moc maszyny, sprawność obiegu i jego sprawność maksymalną.

Wyniki: $T_2 = T_3 = 468 \text{ K}$, $T_4 = 332 \text{ K}$, $\dot{Q}_w = -80,5 \text{ kW}$, $\dot{n} = 0,076 \text{ kmol/s}$, $N_{teor} = 39,5 \text{ kW}$, $\eta = 0,329 = 32,9\%$, $\eta_{max} = 0,359 = 35,9\%$.

Zadanie 9.12

Gaz o właściwościach określonych przez $M = 30 \text{ kg/kmol}$ i $\kappa = 1,33$ odbywa obieg silnikowy składający się z poniższych przemian:

- 1 – 2 izentropa,
- 2 – 3 izobara,
- 3 – 4 izoterma,
- 4 – 1 izobara.

Dane są następujące wielkości: $T_1 = 300 \text{ K}$, $P_2/P_1 = 10$ i $v_3/v_2 = 5$. Przedstawić obieg na wykresach $P-v$ i $T-s$, z zaznaczeniem ciepła doprowadzonego i pracy obiegu i obliczyć: temperatury w stanach węzłowych, jednostkowe ciepła: doprowadzone i wyprowadzone, jednostkową pracę obiegu, sprawność obiegu i jego sprawność maksymalną oraz strumień masy krążącego gazu dla mocy obiegu: $N = 2 \text{ MW}$.

Wyniki: $T_2 = 533 \text{ K}$, $T_3 = T_4 = 2666 \text{ K}$, $q_d = 4068 \text{ kJ/kg}$, $q_w = 2625 \text{ kJ/kg}$, $l_{ob} = 1443 \text{ kJ/kg}$, $\eta = 0,355 = 35,5\%$, $\eta_{max} = 0,887 = 88,7\%$, $\dot{m} = 1,386 \text{ kg/s}$.

Zadanie 9.13

Obieg prawobieżny składa się z następujących przemian:

- 1 – 2 izentropa,
- 2 – 3 izoterma,
- 3 – 4 politropa o wykładniku $\nu = 1,28$,
- 4 – 1 izobara.

Czynnikiem roboczym jest gaz o właściwościach określonych przez $M = 24,65$ kg/kmol, $\kappa = 1,41$ w ilości $m = 4$ kg. Dane są parametry: $P_1 = 100$ kPa, $T_1 = 280$ K, $P_2 = 720$ kPa, $T_4 = 400$ K. Narysować obieg na wykresach P–V i T–S, zaznaczając pola: równoważne ciepłu doprowadzonemu oraz pracom technicznym: sprężania i rozprężania.

Obliczyć: ciśnienia i temperatury w stanach węzłowych, ciepła: doprowadzone i wyprowadzone, pracę obiegu, sprawność i sprawność maksymalną oraz prace techniczne: sprężania i izotermicznego rozprężania.

Wyniki: $T_2 = 497$ K, $P_3 = 270$ kPa, $T_3 = T_2 = 497$ K, $Q_d = 806$ kJ, $Q_w = -557$ kJ, $L_{ob} = 249$ kJ, $\eta = 0,309 = 30,9\%$, $\eta_{max} = 0,437 = 43,7\%$, $L_{t\ spr} = -598$ kJ, $L_{tiz} = 658$ kJ.

Zadanie 9.14

Obieg silnikowy, w którym czynnikiem roboczym jest azot ($M = 28$ kg/kmol, $\kappa = 1,4$) składa się z:

- 1 – 2 izotermy,
- 2 – 3 izobary,
- 3 – 4 politropy o wykładniku $\nu = 1,3$,
- 4 – 1 izochory.

Dane są parametry: $P_1 = 100$ kPa, $t_1 = 27^\circ\text{C}$, $v_1/v_2 = 8$ i $P_4 = 300$ kPa. Narysować obieg na wykresach P–v i T–s, zaznaczając q_d i l_{ob} , a następnie obliczyć: pozostałe ciśnienia i temperatury w punktach węzłowych, jednostkowe ciepła: doprowadzone i wyprowadzone, jednostkową pracę obiegu, strumienie ciepła: doprowadzonego i wyprowadzonego oraz teoretyczną moc mechaniczną maszyny dla ilości gazu roboczego $\dot{V}_u = 0,227$ m³/s ($P_u = 100$ kPa, $t_u = 0^\circ\text{C}$), a także sprawność obiegu i sprawność maksymalną oraz moc sprężania i moc politropowego rozprężania.

Wyniki: $T_2 = T_1$, $P_2 = 800$ kPa, $T_4 = 900$ K, $T_3 = 1128,5$ K, $q_d = 918$ kJ/kg, $q_w = -631$ kJ/kg, $l_{ob} = 287$ kJ/kg, $\dot{Q}_d = 257$ kW, $\dot{Q}_w = -177$ kW, $N = 80$ kW, $\eta = 0,313 = 31,3\%$, $\eta_{max} = 0,734 = 73,4\%$, $N_{spr} = -52$ kW, $N_{rozpr} = 82$ kW.

Zadanie 9.15

Gaz trójatomowy ($\kappa = 1,33$) pracuje w obiegu silnikowym składającym się z następujących przemian:

- 1 – 2 politropy o wykładniku $\nu = 1,42$,
- 2 – 3 izobary,
- 3 – 4 politropy o wykładniku $\nu = 1,1$,
- 4 – 1 izobary.

Dane są parametry: $T_1 = 300$ K, $P_1 = 100$ kPa, $V_1 = 0,1$ m³, $P_2 = 1600$ kPa i $V_3 = 0,015$ m³. Narysować obieg na wykresach: P–V i T–S, z zaznaczeniem ciepła doprowadzonego i pracy obiegu, oraz obliczyć: liczbę kilomoli gazu n i objętość V_2 , pozostałe temperatury i ciśnienia w punktach węzłowych, ciepła: doprowadzone i wyprowadzone, pracę obiegu oraz sprawność obiegu i jego sprawność maksymalną.

Wyniki: $n = 4 \cdot 10^{-3}$ kmol, $V_2 = 0,0142$ m³, $T_2 = 682$ K, $T_3 = 720$ K, $T_4 = 596$ K, $P_4 = 198$ kPa, $Q_d = 42,2$ kJ, $Q_w = -29,6$ kJ, $L_{ob} = 12,6$ kJ, $\eta = 0,299 = 29,9\%$, $\eta_{max} = 0,583 = 58,3\%$.

Zadanie 9.16

W obiegu lewobieżnym Joule'a krąży gaz o właściwościach określonych przez $M = 30 \text{ kg/kmol}$ i $\kappa = 1,5$. Obieg składa się z 2 izobar i 2 izentrop. Dane są: temperatura na początku izentropowego sprężania $t_1 = 27^\circ\text{C}$ oraz $v_1/v_2 = 8$, $v_3/v_2 = 1/2$ i $v_3/v_4 = 1/3$. Narysować obieg na wykresach $P-v$ i $T-s$, z zaznaczeniem pól równoważnych ciepłu doprowadzonemu i pracy obiegu. Obliczyć: temperatury w punktach węzłowych, jednostkowe ciepła: doprowadzone i wyprowadzone, jednostkową pracę obiegu, sprawność obiegu chłodniczego i jego sprawność maksymalną oraz sprawność grzejnej pompy ciepła i jej sprawność maksymalną.

Wyniki: $T_2 = 849 \text{ K}$, $T_3 = 424,5 \text{ K}$, $T_4 = 245 \text{ K}$, $q_d = 45,8 \text{ kJ/kg}$, $q_w = -352,9 \text{ kJ/kg}$,
 $l_{ob} = -307,1 \text{ kJ/kg}$, $\varepsilon_{chl} = 0,149$, $\varepsilon_{chl \max} = 2,414$, $\varepsilon_g = 1,149$, $\varepsilon_{g \max} = 3,414$.

Zadanie 9.17

Gaz trójatomowy ($\kappa = 1,33$) w ilości $V_u = 0,03 \text{ um}^3$ ($P_u = 100 \text{ kPa}$, $t_u = 0^\circ\text{C}$) krąży w obiegu lewobieżnym, składającym się z następujących przemian:

- 1 – 2 izentropowe sprężanie,
- 2 – 3 izobara,
- 3 – 4 izentropa,
- 4 – 1 izoterma.

Dane są parametry: $T_1 = 400 \text{ K}$, $V_1 = 0,024 \text{ m}^3$, $P_2 = 2200 \text{ kPa}$ i $V_3 = 0,003 \text{ m}^3$. Narysować obieg w układach $P-V$ i $T-S$ i zaznaczyć pola ciepła: doprowadzonego i wyprowadzonego oraz prac technicznych: sprężania i rozprężania. Obliczyć: pozostałe ciśnienia i temperatury w punktach węzłowych, ciepła: doprowadzone i wyprowadzone, pracę obiegu, prace techniczne sprężania i rozprężania, sprawność chłodniczej pompy ciepła i jej sprawność maksymalną oraz sprawność grzejnej pompy ciepła i jej sprawność maksymalną.

Wyniki: $P_1 = 183 \text{ kPa}$, $T_2 = 741 \text{ K}$, $T_3 = 601 \text{ K}$, $P_4 = 426 \text{ kPa}$, $Q_d = 3,71 \text{ kJ}$,
 $Q_w = -6,19 \text{ kJ}$, $L_{ob} = -2,48 \text{ kJ}$, $L_{t \text{ spr}} = -15,09 \text{ kJ}$, $L_{t \text{ rozpr}} = 12,61 \text{ kJ}$, $\varepsilon_{chl} = 1,50$,
 $\varepsilon_{chl \max} = 1,99$, $\varepsilon_g = 2,50$, $\varepsilon_{g \max} = 2,99$.

Zadanie 9.18

W obiegu lewobieżnym Joule'a krąży gaz o właściwościach określonych przez $R = 2079 \text{ Nm/kgK}$ i $\kappa = 1,67$. Obieg składa się z:

- 1 – 2 izentropy sprężania,
- 2 – 3 izobary,
- 3 – 4 izentropy,
- 4 – 1 izobary.

Dane są parametry: $P_1 = 100 \text{ kPa}$, $t_1 = -5^\circ\text{C}$ i $t_2 = 200^\circ\text{C}$. Z obiegu wyprowadza się 225 kJ/kg ciepła. Naszkicować schemat przepływowy i wykreślić przemiany w układach: $P-v$ i $T-s$, z zaznaczeniem pól: pracy obiegu i ciepła doprowadzonego i wyprowadzonego oraz obliczyć pozostałe ciśnienia i temperatury w punktach węzłowych, ciepło doprowadzone, pracę obiegu, sprawność obiegu chłodniczego i jego sprawność maksymalną.

Wyniki: $P_2 = P_3 = 412 \text{ kPa}$, $P_4 = P_1 = 100 \text{ kPa}$, $t_3 = 156,6^\circ\text{C}$, $t_4 = -29,65^\circ\text{C}$,
 $q_d = 127,7 \text{ kJ/kg}$, $l_{ob} = 97,3 \text{ kJ/kg}$, $\varepsilon = 1,31$, $\varepsilon_{\max} = 1,66$.

Zadanie 9.19

W obiegu prawobieźnym odbywają się następujące przemiany powietrza:

- 1 – 2 izentropowe sprężanie od 95 kPa i 15°C do 1500 kPa,
- 2 – 3 izochoryczne ogrzewanie do 1300°C,
- 3 – 4 izentropowa ekspansja do ciśnienia początkowego,
- 4 – 1 izobaryczne ochłodzenie do temperatury początkowej.

Właściwości powietrza określone są przez $R = 287 \text{ Nm/kgK}$ i $c_p = 1,0045 \text{ kJ/kgK}$. Narysować obieg w układach $P-v$ i $T-s$, z zaznaczeniem pól: pracy obiegu i ciepła doprowadzonego. Obliczyć pozostałe ciśnienia i temperatury w stanach węzłowych, ciepła: doprowadzone i wyprowadzone, pracę obiegu oraz sprawność obiegu i sprawność maksymalną.

Wyniki: $t_2 = 360,7^\circ\text{C}$, $P_3 = 3723 \text{ kPa}$, $P_4 = P_1$, $t_4 = 278,4^\circ\text{C}$, $q_d = 674 \text{ kJ/kg}$,
 $q_w = -265 \text{ kJ/kg}$, $l_{ob} = 409 \text{ kJ/kg}$, $\eta = 0,607 = 60,7\%$, $\eta_{max} = 0,817 = 81,7\%$.

Zadanie 9.20

W prawobieźnym obiegu odbywa azot ($M = 28 \text{ kg/kmol}$, $\kappa = 1,40$) następujące przemiany:

- 1 – 2 izentropowe sprężanie od 110 kPa i 300 K do 3500 kPa,
- 2 – 3 izobaryczne doprowadzenie 250 kJ/kg ciepła,
- 3 – 4 izochoryczne ogrzanie gazu do 2000 K,
- 4 – 5 izentropowa ekspansja,
- 5 – 1 izobaryczny powrót do stanu początkowego.

Narysować obieg w układach $P-v$ i $T-s$ i zaznaczyć pola pracy obiegu oraz ciepła: doprowadzonego i wyprowadzonego. Obliczyć: brakujące ciśnienia i temperatury w stanach węzłowych, ciepła: doprowadzone i wyprowadzone, pracę obiegu oraz sprawność obiegu i jego sprawność maksymalną.

Wyniki: $T_2 = 806,2 \text{ K}$, $T_3 = 1046,8 \text{ K}$, $v_3 = v_4 = 0,0888 \text{ m}^3/\text{kg}$, $P_4 = 6\,687,8 \text{ kPa}$,
 $T_5 = 618,5 \text{ K}$, $q_d = 957,7 \text{ kJ/kg}$, $q_w = -331,1 \text{ kJ/kg}$, $l_{ob} = 626,6 \text{ kJ/kg}$,
 $\eta = 0,654 = 65,4\%$, $\eta_{max} = 0,85 = 85\%$.

Zadanie 9.21

Hel ($M = 4 \text{ kg/kmol}$, $\kappa = 1,67$) przechodzi w obiegu prawobieźnym przez następujące przemiany:

- 1 – 2 izentropowa kompresja od 95 kPa i 300 K do 2000 kPa,
- 2 – 3 izobaryczne ogrzanie do 2300 K,
- 3 – 4 izentropowa ekspansja,
- 4 – 5 izochoryczne ochłodzenie do 405 K,
- 5 – 1 izobaryczny powrót do stanu początkowego.

Narysować obieg w układach $P-v$ i $T-s$, z zaznaczeniem pól: pracy obiegu i ciepła: doprowadzonego i wyprowadzonego. Należy obliczyć: ciśnienia i temperatury w stanach węzłowych, ciepła: doprowadzone i wyprowadzone, pracę obiegu, sprawność obiegu i jego sprawność maksymalną.

Wyniki: $T_2 = 1018,7 \text{ K}$, $P_3 = 4516 \text{ kPa}$, $P_4 = 130 \text{ kPa}$, $T_4 = 554 \text{ K}$, $q_d = 3975 \text{ kJ/kg}$,
 $q_w = -1006 \text{ kJ/kg}$, $l_{ob} = 2968 \text{ kJ/kg}$, $\eta = 0,747 = 74,7\%$, $\eta_{max} = 0,870 = 87,0\%$.

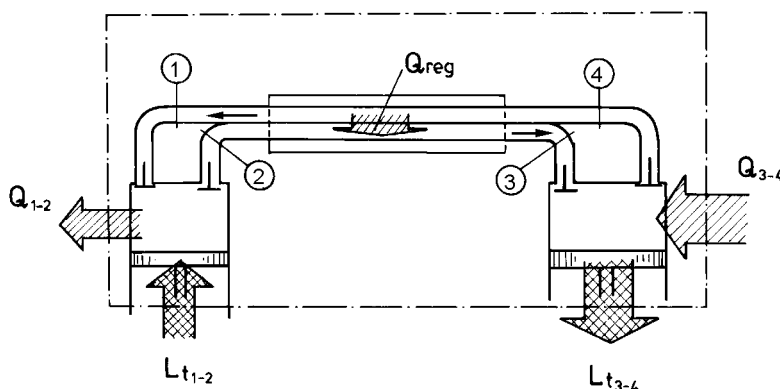
Zadanie 9.22

W systemie zamkniętym, składającym się z dwu cylindrów połączonych wymiennikiem ciepła, cyrkuluje hel ($M = 4 \text{ kg/kmol}$, $\kappa = 1,67$ w ilości 55 kg/h . Odbywa on następujące przemiany:

- 1 – 2 izoterma,
- 2 – 3 izobara,
- 3 – 4 izoterma,
- 4 – 1 izobara.

Dane są parametry: $P_1 = 400 \text{ kPa}$, $t_1 = 15^\circ\text{C}$, $P_2 = P_3 = 3500 \text{ kPa}$ i $t_4 = 700^\circ\text{C}$. Ciepło izobarycznego, regeneracyjnego ogrzewania gazu sprężonego Q_{2-3} dostarczane jest przez oziębiający się izobarycznie gaz rozprężony (Q_{4-1}) przy zerowym spadku temperatury, a więc odwracalnie. Narysować ten obieg Ericsona na wykresach $P-v$ i $T-s$, z zaznaczeniem pól ciepła: doprowadzonego, wyprowadzonego i regeneracyjnego, oraz pola prac technicznych: sprężania i rozprężania.

Wyznaczyć: najwyższą i najniższą temperaturę, jednostkowe prace techniczne: sprężania i rozprężania, jednostkowe ciepła: doprowadzone, wyprowadzone i regeneracyjne, jednostkową pracę obiegu i oddawaną do otoczenia teoretyczną moc mechaniczną oraz sprawność obiegu i sprawność maksymalną.



Rys. 9.5

Wyniki: $T_{\max} = 973,15 \text{ K}$, $T_{\min} = 288,15 \text{ K}$, $l_{t \text{ spr}} = l_{t \text{ 1-2}} = -1299 \text{ kJ/kg}$,
 $l_{t \text{ rozpr}} = l_{t \text{ 3-4}} = 4387,5 \text{ kJ/kg}$, $q_d = q_{3-4} = l_{3-4} = 4387,5 \text{ kJ/kg}$,
 $q_w = q_{1-2} = l_{1-2} = -1299 \text{ kJ/kg}$, $l_{\text{ob}} = 3088,5 \text{ kJ/kg}$, $\eta = 0,704 = 70,4\%$,
 $\eta_{\max} = 0,704 = 70,4\%$.

10. EGZERGIA

Zadanie 10.1

Obliczyć egzergię jednostkową sprężonego powietrza ($c_p = 1,004 \text{ kJ/kgK}$) o ciśnieniu absolutnym $1,0 \text{ MPa}$ i temperaturze 50°C , jeżeli powietrze atmosferyczne ma 15°C i 100 kPa .

Wynik: $b = 192,4 \text{ kJ/kg}$.

Zadanie 10.2

Jaka strata egzergii sprężonego powietrza z poprzedniego zadania wystąpi, gdy powietrze to, przepływając przez zawór, zostanie zdławione do 500 kPa bez zauważalnej zmiany temperatury?

Wyniki: $b = 135,1 \text{ kJ/kg}$, $\Delta b = 57,3 \text{ kJ/kg}$, $\Delta b/b_1 = 29,8\%$.

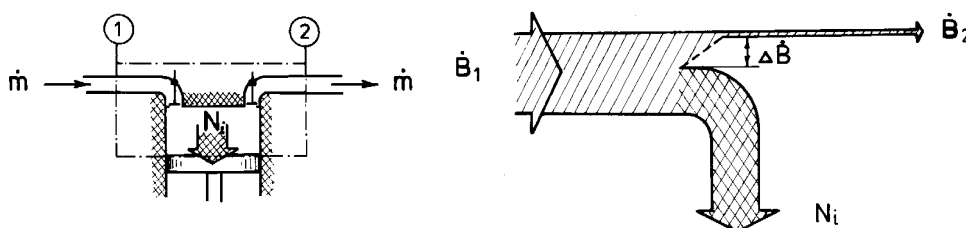
Zadanie 10.3

Spaliny o temperaturze 1250°C oddają 2000 kJ ciepła wodzie o temperaturze 120°C . Z kolei ta podgrzana woda po przeniesieniu jej do grzejnika oddaje tę samą ilość 2000 kJ ciepła do pomieszczenia ogrzewanego. Jakie są egzergie ciepła oddanego przez spaliny i oddanego przez wodę? Jaka strata egzergii wystąpiła w tym procesie?

Wyniki: $B_{Q_1} = 1628,2 \text{ kJ}$, $B_{Q_2} = 559,6 \text{ kJ}$, $\Delta B = 1068,6 \text{ kJ}$.

Zadanie 10.4

W silniku pneumatycznym powietrze o ciśnieniu 350 kPa i temperaturze 95°C rozpręża się adiabatycznie (nieodwracalnie) do 100 kPa i 30°C . Strumień objętości powietrza przepływający przez silnik wynosi $110 \text{ um}^3/\text{h}$ (100 kPa i 0°C). Obliczyć stratę egzergii w silniku i sprawność egzergetyczną maszyny, jeżeli ciśnienie powietrza w otoczeniu wynosi 100 kPa a jego temperatura 10°C . Powietrze traktować jak gaz półdoskonały.



Rys. 10.1

Rozwiązanie

Strumień objętości powietrza przeliczamy na bardziej uniwersalny strumień masy, korzystając z termicznego równania stanu gazów doskonałych i półdoskonałych:

$$\dot{m} = \frac{P\dot{V}}{RT} = \frac{100 \cdot 110}{0,287 \cdot 273,15} = 142,18 \text{ kg/h} = 0,0395 \text{ kg/s}$$

Moc wewnętrzna N_i jest tą częścią egzergii dopływającego powietrza, która została przekształcona w rzeczywistą moc mechaniczną

Wynosi ona:

$$N_i \equiv \dot{L}_i = \dot{m} (h_1 - h_2) = \dot{m} c_p|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = 0,0395 \cdot 1,0076 \cdot (95 - 30) = 2,587 \text{ kW}$$

Do jej obliczenia niezbędne było średnie ciepło właściwe w podanych granicach temperatur obliczone (za pomocą wartości na $c_p|_{0^\circ}^t$) ze wzoru:

$$c_p|_{t_1}^{t_2} = c_p|_{30^\circ}^{95^\circ} = \frac{c_p|_{0^\circ}^{t_2} \cdot t_2 - c_p|_{0^\circ}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} = \frac{1,00 \cdot 95 - 1,0056 \cdot 30}{95 - 30} = 1,0076 \text{ kJ/kgK}$$

Egzergię dopływającego powietrza obliczamy ze wzoru:

$$\begin{aligned} \dot{B}_1 &= \dot{m} b_1 = \dot{m} [h_1 - h_{ot} + T_{ot} (s_{ot} - s_1)] = \\ &= \dot{m} \left[c_p|_{t_{ot}}^{t_1} (t_1 - t_{ot}) + T_{ot} \left(c_p|_{t_{ot}}^{t_1} \ln \frac{T_{ot}}{T_1} - R \ln \frac{P_{ot}}{P_1} \right) \right] = \\ &= 0,0395 \left[1,007 (95 - 10) + 283,15 \left(1,007 \ln \frac{283,15}{368,15} - 0,287 \ln \frac{100}{100} \right) \right] = 4,446 \text{ kW} \end{aligned}$$

Z powietrzem opuszczającym silnik odpływa strumień egzergii wynoszący:

$$\begin{aligned} \dot{B}_2 &= \dot{m} b_2 = \dot{m} \left[c_p|_{t_{ot}}^{t_2} (t_2 - t_{ot}) + T_{ot} \left(c_p|_{t_{ot}}^{t_2} \ln \frac{T_{ot}}{T_2} - R \ln \frac{P_{ot}}{P_2} \right) \right] = \\ &= 0,0395 \left[1,0056 (30 - 10) + 283,15 \left(1,0056 \ln \frac{283,15}{303,15} - 0,287 \ln \frac{100}{100} \right) \right] \\ &= 0,027 \text{ kW} \end{aligned}$$

Bilans egzergii:

$$\dot{L}_i + \Delta \dot{B} = \dot{B}_1 - \dot{B}_2 \quad (= \dot{L}_{\max})$$

pozwała wyznaczyć stratę egzergii w silniku:

$$\Delta \dot{B} = (\dot{B}_1 - \dot{B}_2) - \dot{L}_i = (4,446 - 0,027) - 2,587 = 4,419 - 2,587 = 1,832 \text{ kW}$$

Sprawność egzergetyczna silnika wynosi:

$$\eta_B = \frac{\dot{L}_i}{\dot{B}_1} = \frac{2,587}{4,446} = 0,582 = 58,2\%$$

Zadanie 10.5

Dławieniu o 20 kPa podlega powietrze (gaz doskonały) o nadciśnieniu 100 kPa i temperaturze 30°C. Obliczyć **stratę** egzergii jednostkowej, jeżeli parametry otoczenia wynoszą: $P_{ot} = 100 \text{ kPa}$, $t_{ot} = 20^\circ\text{C}$.

Wynik: $b_1 - b_2 = 8,86 \text{ kJ/kg}$.

Zadanie 10.6

Azot (gaz doskonały) jest podgrzewany izobarycznie przy 600 kPa w wymienniku ciepła od 100°C do 250°C. Parametry otoczenia: 100 kPa i 15°C. Jaka jest **zmiana** egzergii jednostkowej w tym procesie?

Wynik: $\Delta b = b_2 - b_1 = +55 \text{ kJ/kg}$.

Zadanie 10.7

Powietrze ($\kappa = 1,4$) rozpręża się od 600 kPa do 100 kPa. Temperatura początkowa wynosi 182° C. Parametry otoczenia: 100 kPa i 20°C. Obliczyć **zmiany** egzergii jednostkowej dla ekspansji: a) izentropowej ($\kappa = 1,4$) i b) izotermicznej.

Wyniki: a) $\Delta b = b_2 - b_1 = -184,3$ kJ/kg, b) $\Delta b = b_2 - b_1 = -150,8$ kJ/kg.

Zadanie 10.8

Obliczyć sprawności egzergetyczne (stopnie odwracalności) teoretycznych obiegów Otto i Diesela z zadania 9.2, jeżeli temperatura otoczenia wynosi 300 K.

Wyniki: $\eta_{\max} = 0,85 = 85\%$, $\eta_{B\text{ Otto}} = 0,651 = 65,1\%$, $\eta_{B\text{ Diesel}} = 0,716 = 71,6\%$.

Zadanie 10.9

Obliczyć sprawność egzergetyczną, czyli stopień odwracalności, chłodniczego obiegu Joule'a z zad. 9.3, przyjmując za temperaturę źródła ciepła końcową temperaturę pobierania ciepła T_1 , a za temperaturę otoczenia końcową temperaturę oddawania ciepła T_3 .

Wyniki: $\varepsilon_{\max} = 2,218$, $\varepsilon_B = 0,709 = 70,9\%$.

Zadanie 10.10

Lewobieżny, chłodniczy obieg Joule'a funkcjonuje między temperaturą komory chłodniczej (-10°C), którą przyjmuje się równą temperaturze początkowej izentropowego sprężania, a temperaturą otoczenia $+20^\circ\text{C}$, którą przyjmuje się za równą temperaturze gazu roboczego na końcu izobarycznego oddawania ciepła. Ciśnienia w wymiennikach ciepła wynoszą: 100 i 600 kPa. Gazem roboczym jest powietrze o stałych właściwościach, określonych przez $\kappa = 1,40$ i $c_p = 1,0$ kJ/kgK. Obliczyć sprawności: termiczną i egzergetyczną procesu.

Wyniki: $\varepsilon = 1,496$, $\varepsilon_{\max} = 8,77$, $\varepsilon_B = 0,17 = 17\%$.

Zadanie 10.11

Do współprądowego wymiennika ciepła wpływa powietrze o ciśnieniu 100 kPa, temperaturze 800 K i strumieniu masy 1 kg/s; wypływa ono z wymiennika mając temperaturę 600 K. Ciepło oddawane przez powietrze przejmuje woda ($c_w = 4,19$ kJ/kgK) wchodząca do wymiennika z temperaturą 300 K i ciśnieniem 100 kPa. Woda podgrzewa się w wymienniku o 20 K.

Powietrze należy traktować jak gaz doskonały o stałych właściwościach określonych przez $c_p = 1,0$ kJ/kgK i $R = 0,287$ kNm/kgK. Wymiennik ciepła jest otoczony doskonałą izolacją (adiabatyczny), a tarcie płynów w nim pomijalnie małe.

Należy obliczyć: strumień ciepła przekazywany przez powietrze wodzie, zmianę egzergii wody, egzergię dopływającego powietrza, zmianę egzergii powietrza oraz stratę egzergii w wyniku przekazywania ciepła.

Wyniki: $\dot{Q} = 200$ kW, $\dot{m}_w = 2,39$ kg/s, $\dot{B}''_w - \dot{B}'_w = 6,4$ kW, $\dot{B}'_p = 205,8$ kW,

$$\dot{B}''_p - \dot{B}'_p = -113,7 \text{ kW}, \quad \Delta \dot{B} = \Sigma \dot{B}_d - \Sigma \dot{B}_w = 107,9 \text{ kW}.$$

11. STANY I FUNKCJE STANU PAR NASYCONYCH I PRZEGRZANYCH

Zadanie 11.1

Woda w stanie nasycenia (H_2O w postaci ciekłej) znajduje się w zbiorniku pod ciśnieniem absolutnym 500 kPa i w temperaturze 110°C. Objętość zbiornika wynosi 3 m³. Określić: objętość właściwą wody v [m³/kg], masę wody w zbiorniku m [kg], entalpię właściwą wody h [kJ/kg], entalpię całkowitą H [kJ], energię wewnętrzną (termiczną) właściwą u [kJ/kg], energię wewnętrzną całkowitą U [kJ], entropię właściwą s [kJ/kg·K], entropię całkowitą S [kJ/K] oraz temperaturę nasycenia (wrzenia) pod ciśnieniem, jakie panuje w zbiorniku t_s [°C].

Rozwiązanie

Objętość właściwą wody przyjmuje się z dokładnością wystarczającą dla zagadnień spotykanych w technice

$$v = \frac{1}{\rho} \cong \frac{1}{1000} = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Jeżeli potrzebna jest większa dokładność, należy skorzystać z tablic parowych (w załączniku). W tablicy pary nasyconej 5 znajdujemy dla $P = 500$ kPa temperaturę nasycenia $t_s = 151,85^\circ\text{C} > t = 110^\circ\text{C}$. Dla naszego przypadku: $P = 500$ kPa i $t = 110^\circ\text{C}$, a więc wody nienasyconej, musimy sięgnąć do tablic obejmujących stany poza obszarem nasycenia (tablica 6) i znajdujemy: $v = 0,0010517 \text{ m}^3/\text{kg}$. Masa wody w zbiorniku:

$$m = \frac{V}{v} = \frac{3}{0,0010517} = 2852,52 \text{ kg}$$

Entalpię właściwą wody można określić jako:

$$h = c_p \Big|_o^t \cdot t$$

używając przybliżenia:

$$c_p \Big|_o^t = c_w \cong 4,187 \text{ kJ/kgK}$$

Dla danych zadania otrzymuje się wartość:

$$h = 4,187 \cdot 110 = 460,6 \text{ kJ/kg}$$

Dokładniejsza wartość odczytana z tablicy 6 dla $P = 500$ kPa i $t = 110^\circ\text{C}$, wynosi:

$$h = 461,6 \text{ kJ/kg}$$

Jak widać, wynik obliczenia uproszczonego różni się niewiele od dokładnego. Na ogół uważa się, że do temperatury 100°C i dla ciśnień stosowanych powszechnie w technice cieplnej uproszczone obliczenia są dopuszczalne.

Entalpia całkowita wody:

$$H = m h = 2852,52 \cdot 461,6 = 1,31672 \cdot 10^6 \text{ kJ} = 1,3167 \text{ GJ}$$

Energia wewnętrzna właściwa wody może być określona z równania definicyjnego entalpii (funkcji Gibbsa):

$$u = h - Pv = 461,6 - 500 \cdot 0,0010517 = 461,07 \text{ kJ/kg}$$

Energię termiczną całkowitą określamy więc jako:

$$U = m u = 2852,52 \cdot 461,07 = 1315211,4 \text{ kJ} = 1315,2 \text{ MJ}$$

Entropię właściwą wody znajdujemy w tablicy 6 dla 500 kPa i 110°C:

$$s = 1,4182 \text{ kJ/kgK}$$

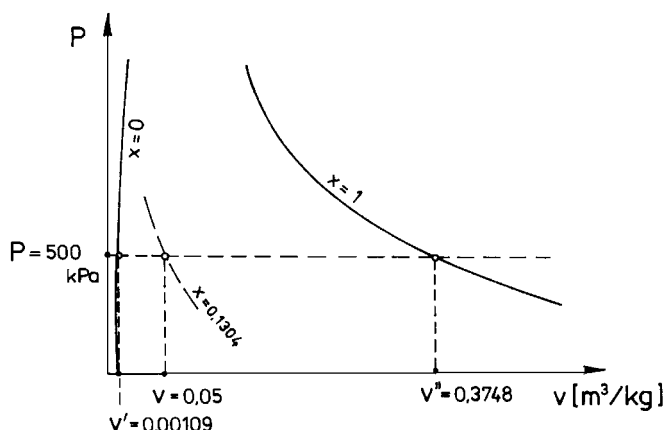
Całkowita entropia:

$$S = m s = 2852,52 \cdot 1,4182 = 4045,44 \text{ kJ/K}$$

Temperaturę wrzenia odczytaliśmy uprzednio z tablicy pary nasyconej 5, otrzymując dla ciśnienia 500 kPa: $t_s = 151,85^\circ\text{C}$. Oznacza to, że woda pod ciśnieniem 500 kPa wrze w tej temperaturze.

Zadanie 11.2

Para wodna w ilości $m = 100 \text{ kg}$ zajmuje objętość $V = 5 \text{ m}^3$. Manometr wykazuje nadciśnienie $p_m = 400 \text{ kPa}$, podczas gdy ciśnienie barometryczne wynosi 750 mm Hg. Określić: czy para jest mokra, a jeżeli tak, to jaki ma stopień suchości x , temperaturę pary t [$^\circ\text{C}$], energię termiczną (wewnętrzną) pary U [kJ], entalpię pary H [kJ] i entropię pary S [kJ/K].



Rys. 11.1

Rozwiązanie

Na podstawie danych zadania możemy określić objętość właściwą:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Drugim parametrem wyznaczającym stan pary jest ciśnienie absolutne:

$$P = p_m + P_{\text{bar}} = 400 + 100 = 500 \text{ kPa}$$

Dla tego ciśnienia odczytujemy z tablicy pary wodnej nasyconej 5 objętości właściwe w stanach charakterystycznych:

cieczy wrzącej: $v' = 0,00109 \text{ m}^3/\text{kg}$,

pary suchej nasyconej: $v'' = 0,3748 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Jak widać, $v = 0,05 \text{ m}^3/\text{kg}$ mieści się pomiędzy tymi wartościami – mamy więc do czynienia z parą mokrą. Określamy zatem stopień suchości tej pary ze wzoru:

$$v = v' + x (v'' - v')$$

otrzymując

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{0,05 - 0,00109}{0,3748 - 0,00109} = 0,1309$$

Ponieważ para jest mokra, jej temperatura jest określona przez ciśnienie: dla 500 kPa odczytujemy z tablicy 5: $t_s = 151,85^\circ\text{C}$. Energię termiczną obliczamy z zależności:

$$U = m u$$

gdzie:

$$u = u' + x(u'' - u')$$

Niestety, wielkości u' ani u'' – tablice nie podają. Musimy obliczyć je na podstawie przekształconej funkcji Gibbsa:

$$u = h - Pv$$

W tym celu odczytujemy z tablicy 5

$$h' = 640,1 \text{ kJ/kg} \quad \text{ i } \quad h'' = 2748,5 \text{ kJ/kg}$$

a następnie obliczamy (pamiętając, by jednostki obydwu składników były identyczne: $\text{kJ/kg} \equiv \text{kJNm/kg}$), korzystając jeszcze z uprzednio odczytanych wartości v' i v'' :

$$u' = h' - Pv' = 640,1 - 500 \cdot 0,00109 = 639,56 \text{ kJ/kg}$$

$$u'' = h'' - Pv'' = 2748,5 - 500 \cdot 0,3748 = 256,5 \text{ kJ/kg}$$

a następnie

$$u = u' + x(u'' - u') = 639,56 + 0,1309(2561,1 - 639,56) = 891,1 \text{ kJ/kg}$$

Tę samą wartość jednostkowej energii wewnętrznej uzyskalibyśmy, obliczając najpierw wartość entalpii właściwej pary mokrej (jako całości):

$$h = h' + x(h'' - h') = 640,1 + 0,1309(2748,5 - 640,1) = 916,1 \text{ kJ/kg}$$

a następnie korzystając z przekształconego równania definicyjnego na entalpię właściwą:

$$u = h - Pv = 916,1 - 500 \cdot 0,05 = 891,1 \text{ kJ/kg}$$

Mając u , możemy określić energię termiczną pary mokrej:

$$U = mu = 100 \cdot 891,1 = 89110 \text{ kJ} = 89,1 \text{ MJ}$$

Entalpię (całkowitą) pary mokrej obliczamy jako:

$$H = mh = 100 \cdot 916,1 = 91610 \text{ kJ} = 91,61 \text{ MJ}$$

Użyto tu wielkości h obliczonej wyżej.

Entropię (całkowitą) pary mokrej S [kJ] określamy jako:

$$S = ms$$

za pomocą entropii właściwej (jednostkowej):

$$s = s' + x(s'' - s')$$

Z tablicy 5 pary wodnej nasyconej dla ciśnienia 500 kPa odczytujemy entalpie właściwe cieczy i pary suchej:

$$s = 1,8604 \text{ kJ/kgK} \quad \text{ i } \quad s'' = 6,8215 \text{ kJ/kgK}$$

Tak więc:

$$s = 1,8604 + 0,1309(6,8215 - 1,8604) = 2,5098 \text{ kJ/kgK}$$

i ostatecznie:

$$S' = ms' = 100 \cdot 2,5098 = 250,98 \text{ kJ/K}$$

Zadanie 11.3

W zbiorniku o pojemności $V = 5 \text{ m}^3$ (jak w poprzednim zadaniu), przy ciśnieniu bezwzględny 500 kPa, znajduje się 10 kg pary wodnej. Określić: czy para jest mokra czy sucha (ew. stopień suchości), temperaturę pary t [$^\circ\text{C}$], energię termiczną pary U [kJ], entalpię pary H [kJ] i entropię pary S [kJ/K].

Rozwiązanie

Na podstawie danych zadania możemy określić drugi (oprócz ciśnienia) parametr stanu, mianowicie objętość właściwą:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{5}{10} = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objętości właściwe: cieczy wrzącej $v' = 0,00109 \text{ m}^3/\text{kg}$ i pary suchej nasyconej $v'' = 0,3748 \text{ m}^3/\text{kg}$ są dla ciśnienia 500 kPa takie same, jak w poprzednim zadaniu.

Stwierdzamy, że

$$v = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg} > v'' = 0,3748 \text{ m}^3/\text{kg}$$

a więc para w zbiorniku jest parą przegrzaną. Temperaturę tej pary wyznaczamy z tablicy 6, pary wodnej przegrzanej. Dla ciśnienia 500 kPa w kolumnie objętości właściwych szukamy najpierw wartości $v = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$. Naprzeciwko tej wartości (dokładnie dla $v = 0,5034$) w kolumnie temperatury mamy $t = 280^\circ\text{C}$. Chcąc znaleźć wartość dokładną, należy przeprowadzić interpolację. Odczytujemy: dla 270°C : $v = 0,4938 \text{ m}^3/\text{kg}$,
dla 280°C : $v = 0,5034 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Dla $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ jest $\Delta v = 0,0096 \text{ m}^3/\text{kg}$. Objętość w tablicy przewyższa daną w zadaniu $v = 0,5000 \text{ m}^3/\text{kg}$ o wartość $\Delta v' = 0,0034 \text{ m}^3/\text{kg}$. Odpowiada to różnicy temperatur:

$$\Delta t' = \frac{\Delta v'}{\Delta v} \Delta t = \frac{0,0034}{0,0096} \cdot 10 = 3,54^\circ\text{C}$$

O tyle więc temperatura pary jest niższa od 280°C :

$$t = 280 - 3,54 = 276,46^\circ\text{C}$$

Energię termiczną pary obliczamy z zależności:

$$U = mu$$

w której:

$$u = h - Pv$$

a wartość h musimy odczytać z tablicy 6, pary wodnej przegrzanej dla ciśnienia 500 kPa i temperatury $t = 276,46^\circ\text{C}$. Z tablicy mamy: dla 270°C : $h = 3002,2 \text{ kJ/kg}$,
dla 280°C : $h = 3022,9 \text{ kJ/kg}$.

Tak więc dla $276,46^\circ\text{C}$ jest:

$$h = 3002,2 + (3022,9 - 3002,2) \cdot \frac{6,46}{10} = 3015,57 \text{ kJ/kg}$$

Z kolei obliczamy energię wewnętrzną właściwą pamiętając, że $v = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$:

$$u = h - Pv = 3015,57 - 500 \cdot 0,5 = 2765,57 \text{ kJ/kg}$$

i całkowitą

$$U = mu = 10 \cdot 2765,57 = 27655,7 \text{ kJ} = 27,66 \text{ MJ}$$

Entalpię całkowitą pary, obliczamy ze wzoru:

$$H = mh = 10 \cdot 3015,57 = 30155,7 \text{ kJ} = 30,02 \text{ MJ}$$

Entropię pary obliczamy z zależności:

$$S = ms$$

dla której s należy znaleźć w tablicy 6 dla $P = 500 \text{ kPa}$ i $t = 276,46^\circ\text{C}$ stosując odpowiednią interpolację. Z tablicy mamy: dla 270°C : $s = 7,3495 \text{ kJ/kgK}$,
dla 280°C : $s = 7,3872 \text{ kJ/kgK}$,

tak więc dla $276,46^\circ\text{C}$ jest:

$$s = 7,3495 + (7,3872 - 7,3495) \cdot \frac{6,46}{10} = 7,3739 \text{ kJ/kgK}$$

a entropia całkowita

$$S = ms = 10 \cdot 7,3739 = 73,739 \text{ kJ/K}$$

Zadanie 11.4

Odczytać z wykresu $h-s$, a potem z tablic pary wodnej, wartości: entalpii h entropii s i objętości właściwej v dla dwu par przegrzanych o parametrach $P_1 = 5,0 \text{ MPa}$ i $t_1 = 600^\circ\text{C}$ oraz $P_2 = 500 \text{ kPa}$ i $t_2 = 300^\circ\text{C}$. Przyjmując następnie wartości tablicowe za dokładne, określić względne odchyłki (w procentach) wartości wziętych z wykresu.

Rozwiązanie

Na załączonym wykresie $h-s$ znajdujemy punkt na przecięciu izobary $P_1 = 5 \text{ MPa}$ i izotermy $t_1 = 600^\circ\text{C}$ i odczytujemy na osiach:

$$h_1 = 3667 \text{ kJ/kg} \quad i \quad s_1 = 7,26 \text{ kJ/kgK}$$

a w drodze interpolacji między obejmującymi ten punkt z obu stron izochorami:

$$v_1 \cong 0,0795 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Z załączonego wyciągu tablic pary przegrzanej (tab. 6) mamy dla tychże parametrów:

$$h_1 = 3665,3 \text{ kJ/kg}, \quad s_1 = 7,2586 \text{ kJ/kgK} \quad i \quad v_1 = 0,07864 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Jak widać, wielkości odczytane z wykresu nie różnią się zbytnio od dokładniejszych wartości tablicowych. Procentowe odchylenia wynoszą:

$$\frac{\delta h}{h_1} = 0,05\%, \quad \frac{\delta s}{s_1} = 0,4\%, \quad \frac{\delta v}{v_1} = 1,1\%$$

Postępując podobnie z drugim przypadkiem otrzymuje się odchyłki względne:

$$\frac{\delta h}{h_2} = 0,09\%, \quad \frac{\delta s}{s_2} = 0,09\%, \quad \frac{\delta v}{v_2} = 1,1\%$$

Wyniki powyższe dowodzą zadowalającej dokładności wykresu $h-s$ w odniesieniu do entalpii h , i entropii s , ale gorszej dla objętości właściwej v .

Zadanie 11.5

Izolowany cieplnie, początkowo pusty zbiornik o pojemności 100 l napełniono parą tak, iż manometr na zbiorniku wskazał ciśnienie 889 kPa przy wskazaniu barometru 101 kPa. Zbiornik znajdował się na wadze, która wykazała przyrost masy o 0,6 kg. Określić stan pary w zbiorniku.

Wynik: $x = 0,857$, $t = 179,9^\circ\text{C}$.

Zadanie 11.6

Jaka jest masa 5 m^3 pary suchej nasyconej o ciśnieniu 1,5 MPa?

Wynik: $m = 37,965 \text{ kg}$.

Zadanie 11.7

Entalpia właściwa pary wynosi 2820 kJ/kg przy ciśnieniu 2,5 MPa. Jaki to jest rodzaj pary?

Wynik: para przegrzana.

Zadanie 11.8

Dla amoniaku (NH_3) wyznaczyć entalpię i objętość właściwą pary suchej nasyconej w temperaturze -30°C , posługując się tablicą i wykresem P–h. Przyjmując następnie wartości tablicowe za dokładne, określić odchyłki względne (w procentach) danych pochodzących z wykresu.

Rozwiązanie

Z tablicy 7 właściwości termodynamicznych pary nasyconej amoniaku, zawartej w załączniku, odczytujemy dla $t = -30^\circ\text{C}$:

$$h'' = 1722,2 \text{ kJ/kg}, \quad s'' = 7,0618 \text{ kJ/kgK}, \quad v'' = 0,963 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Następnie sięgamy po wykres P–h dla NH_3 i sprawdzamy, dla jakich wartości entalpii h'_o i entropii s'_o w stanie odniesienia t.j. dla $t_o = 0^\circ\text{C}$ wykres został skonstruowany. Załączony do niniejszego skryptu wykres ma $h'_o = 500 \text{ kJ/kg}$ i $s'_o = 2 \text{ kJ/kgK}$. Porównujemy to z tablicą i stwierdzamy, że entalpie w obu źródłach odniesione są do identycznej wartości $h'_o = 500 \text{ kJ/kg}$. Możemy więc odczytać z wykresu entalpię

$$h'' = 1721,7 \text{ kJ/kg}$$

przyrównać bezpośrednio do odczytanej uprzednio z tablicy. Rozbieżność jest, jak widać, nieznaczna i jej wartość względna wynosi:

$$\frac{\delta h''}{h''} = \frac{1722,2 - 1721,7}{1722,2} \cdot 100 = 0,06\%$$

Również w przypadku entropii stwierdzamy, że tablica zawiera wartości s' i s'' oparte na założeniu $s'_o = 2,00 \text{ kJ/kgK}$, czyli tym samym, dla którego obowiązuje wykres: $s'_o = 2 \text{ kJ/kgK}$. Zatem otrzymaną z wykresu (na drodze interpolacji) wartość

$$s'' = 7,059 \text{ kJ/kgK}$$

można bezpośrednio porównać z wartością tablicową, a rozbieżność względna wynosi:

$$\frac{\delta s}{s''} = \frac{7,0618 - 7,059}{7,0618} \cdot 100 = 0,04\%$$

Objętość właściwa odczytana z wykresu: $v'' = 0,98 \text{ m}^3/\text{kg}$ różni się od wartości tablicowej o:

$$\frac{\delta v''}{v''} = \frac{0,98 - 0,963}{0,963} \cdot 100 = 1,8\%$$

Uwaga! Odmienne niż przy parze wodnej, założenia h'_o i s'_o dla **plynów chłodniczych** bywają różne, poza $h'_o = 500 \text{ kJ/kg}$ spotyka się $h'_o = 418,68 \text{ kJ/kg} = 100 \text{ kcal/kg}$, a poza $s'_o = 2,0 \text{ kJ/kgK}$, również: $s'_o = 1,00 \text{ kJ/kgK}$ i $s'_o = 4,1868 \text{ kJ/kgK} = 1,0 \text{ kcal/kgK}$. Dlatego przed odczytaniem entalpii lub entropii należy sprawdzić dla jakich wartości h'_o lub s'_o tablica czy wykres zostały sporządzone. Ma to znaczenie w obliczeniach, w których używa się entalpii lub entropii z obydwu źródeł, np. entalpię pary przegrzanej h_p z wykresu, a entalpię pary suchej nasyconej h'' z tablic. Jeżeli wartości h'_o są różne w obu źródłach, to obliczona np. różnica $h_p - h''$ będzie obarczona znacznym błędem. Okoliczność ta nie ma jednak znaczenia wtedy, gdy oblicza się różnice entalpii (lub entropii) wziętych wyłącznie z jednego tylko źródła: tylko z tablicy albo tylko z wykresu.

Zadanie 11.9

Obliczyć zmianę entalpii wywołaną zmianą stanu pary mokrej amoniaku od $P_1 = 100 \text{ kPa}$ i $x_1 = 0,95$ do stanu pary przegrzanej: $P_2 = 400 \text{ kPa}$ i $t_2 = 70^\circ\text{C}$.

Wyniki: $h_1 = 1648 \text{ kJ/kg}$, $h_2 = 1935 \text{ kJ/kg}$, $\Delta h_{1,2} = 287 \text{ kJ/kg}$.

Zadanie 11.10

Pamiętając, że w wyniku dławienia ciśnienie płynu spada, ale entalpia po dławieniu osiąga tę samą wartość, jaką miała przed dławieniem, wyznaczyć stopień suchości pary mokrej amoniaku powstałej ze zdławienia cieczy nasyconej NH_3 o temperaturze 20°C do ciśnienia odpowiadającego temperaturze nasycenia -20°C . Zadanie wykonać na 2 sposoby: z użyciem wykresu P - h i z użyciem tablicy parowej.

Wyniki: $x_{\text{wykr}} = 0,136$, $x_{\text{tabl}} = 0,1393$.

Zadanie 11.11

8 m^3 pary mokrej amoniaku (NH_3) ma w temperaturze -40°C stopień suchości 35%. Jakiej są masa i entalpia tej pary? W obliczeniach posłużyć się danymi tablicowymi.

Wyniki: $v = 0,543 \text{ m}^3/\text{kg}$, $m = 14,73 \text{ kg}$, $H = 11851,5 \text{ kJ}$.

Zadanie 11.12

W jakim czasie można doprowadzić do wrzenia $1,5 \text{ l}$ wody o temperaturze 7°C na górze o wysokości 3800 m , na której panuje ciśnienie atmosferyczne 650 hPa , za pomocą grzałki elektrycznej o mocy 700 W ? Ile czasu trwać będzie następnie odparowanie 1 l tej wody? Do obliczeń przyjąć średnie ciepło właściwe wody $c_w = 4.24 \text{ kJ/kgK}$.

Wyniki: $\tau_1 = 12'15''$, $\tau_2 = 54'29''$.

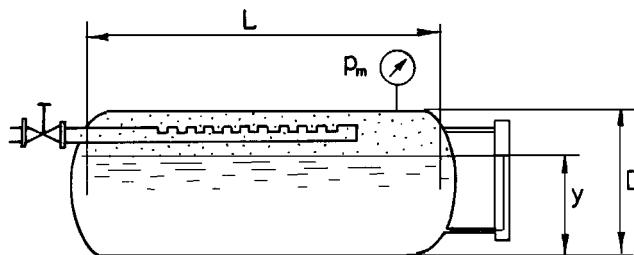
Zadanie 11.13

60 m^3 pary mokrej (wodnej) o stopniu suchości $x = 0,65$ ma ciśnienie 5 MPa . Określić: objętość właściwą pary, masę pary, masę wody w tej parze, entalpię właściwą pary.

Wyniki: $v = 0,02608 \text{ m}^3/\text{kg}$, $m = 2300,6 \text{ kg}$, $m' = 805,2 \text{ kg}$, $h = 2220,5 \text{ kJ/kg}$.

Zadanie 11.14

Kocioł wytwarzający parę nasyconą ma kształt walczaka, którego wodomierz pokazuje poziom wody na wysokości $y = 1,2 \text{ m}$. Średnica walczaka D wynosi 2 m a długość efektywna $L = 5 \text{ m}$. Manometr pokazuje ciśnienie $1,90 \text{ MPa}$ przy ciśnieniu barometrycznym 1000 hPa . Na chwilę przed zamknięciem poboru pary zmierzono stopień suchości wypływającej pary, kalorymetrem dławiącym, uzyskując $x = 0,95$. Zakładając, że na krótko po zamknięciu zaworu unoszone przez parę krople wody pozostają jeszcze w zawieszeniu, wyznaczyć: temperaturę panującą w walczaku, objętość właściwą pary z kropelkami, masę pary suchej nasyconej m'' , masę wody w kropelkach m_k , masę wody wskazanej przez wodomierz m_w , całkowitą masę wody w walczaku m' .



Rys. 11.2

Wyniki: $t_s = 212,37^\circ\text{C}$, $v = 0,0946 \text{ m}^3/\text{kg}$, $m'' = 58,923 \text{ kg}$, $m_k = 3,101 \text{ kg}$,
 $V_{\text{pary mokr.}} = 5,8675 \text{ m}^3$, $m_w = 8363,505 \text{ kg}$, $m' = 8366,606 \text{ kg}$.

Zadanie 11.15

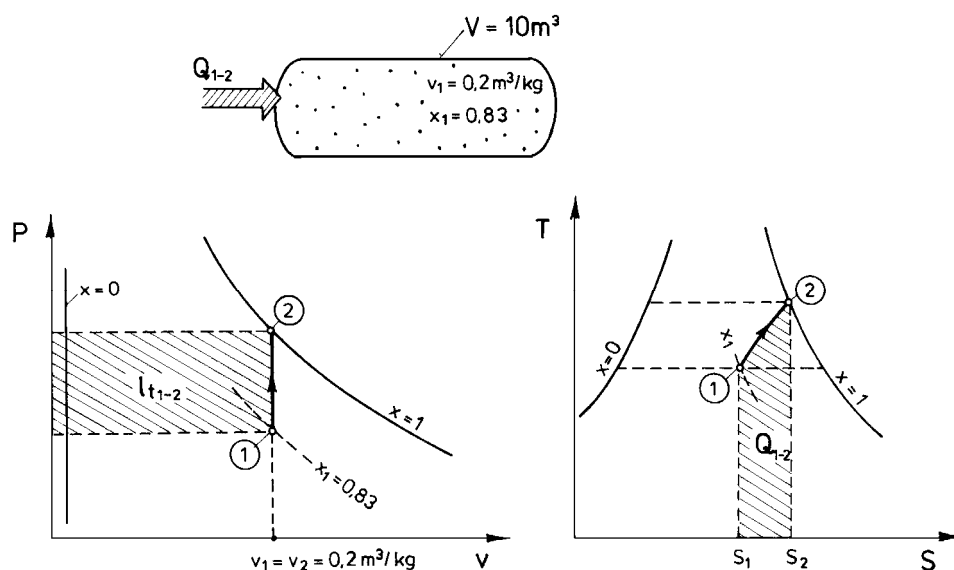
Wyznaczyć zmianę entalpii właściwej pary przegrzanej o ciśnieniu 10 MPa i temperaturze 500°C , wywołaną zmianą stanu tej pary do ciśnienia 100 kPa i stopnia suchości pary mokrej 0,95. Zadanie rozwiązać stosując tablice parowe, a potem wykres h – s .

Wyniki: tablicowe: $h_1 = 3374,1 \text{ kJ/kg}$, $h_2 = 2562,6 \text{ kJ/kg}$, $\Delta h_{1,2} = h_2 - h_1 = -811,5 \text{ kJ/kg}$;
 wykresowe: $h_1 = 3377 \text{ kJ/kg}$, $h_2 = 2565 \text{ kJ/kg}$, $\Delta h_{1,2} = h_2 - h_1 = -812 \text{ kJ/kg}$.

12. CHARAKTERYSTYCZNE PRZEMIANY PAR NASYCONYCH I PRZEGRZANYCH

Zadanie 12.1

Para wodna mokra o parametrach: $x_1 = 0,83$ i $v_1 = 0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$, znajdująca się w zbiorniku o pojemności $V = 10 \text{ m}^3$, została podgrzana izochorycznie tak, że osiągnęła stan pary nasyconej suchej: $x_2 = 1$. Posługując się danymi z tablicy pary wodnej wyznaczyć: pozostałe parametry i funkcje stanu początkowego: P_1 , t_1 , h_1 , u_1 , s_1 , parametry i funkcje stanu końcowego P_2 , t_2 , v_2 , h_2 , u_2 , s_2 , pracę techniczną przemiany L_{t1-2} oraz ciepło pochłonięte przez parę wodną w tym procesie Q_{1-2} .



Rys. 12.1

Rozwiązanie

Przy użyciu tablicy pary nasyconej określimy brakujące parametry stanu 1 na podstawie znajomości ciśnienia P_1 lub temperatury t_1 . Ciśnienie (lub temperaturę) ustalimy, badając przy jakim ciśnieniu zestaw v' i v'' w tablicach spełnia równanie:

$$v_1 = v'_1 + x_1 (v''_1 - v'_1)$$

Równanie to rozwiązujemy względem v''_1 , a następnie zakładamy w pierwszym przybliżeniu $v'_1 = 0,001$, otrzymując:

$$v''_1 = \frac{v_1 - v'_1(1 - x_1)}{x_1} = \frac{0,2 - 0,001(1 - 0,83)}{0,83} = 0,24076 \text{ m}^3/\text{kg}$$

W tablicy 5 znajdujemy w kolumnie v'' pozycję $v'' = 0,24029$, ponadto w kolumnie v' odczytujemy $v' = 0,001115$ i przeprowadzamy obliczenie sprawdzające:

$$v_1 = 0,001115 + 0,83 (0,24029 - 0,001115) = 0,19963 \approx 0,200 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Dokładność ta dla celów technicznych jest wystarczająca, wobec czego odczytujemy poszukiwane wartości: ciśnienia $P_1 = 800 \text{ kPa}$, i temperatury $t_1 = 170,42^\circ\text{C}$.

W tym samym wierszu tablicy 5 odczytujemy:

$$h'_1 = 720,90 \text{ kJ/kg} \quad i \quad h''_1 = 2768,41 \text{ K/kg}$$

$$\text{oraz} \quad s'_1 = 2,0457 \text{ kJ/kgK} \quad i \quad s''_1 = 6,6618 \text{ kJ/kgK}.$$

Entalpię właściwą w stanie 1 obliczamy z zależności:

$$h_1 = h'_1 + x_1 (h''_1 - h'_1) = 720,9 + 0,83 (2768,4 - 720,9) = 2420,3 \text{ kJ/kg}$$

a energię wewnętrzną właściwą ze wzoru:

$$u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 2420,3 - 800 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 2260,3 \text{ kJ/kg}.$$

Entropia właściwa wynosi

$$s_1 = s'_1 + x_1 (s''_1 - s'_1) = 2,0457 + 0,83 (6,6618 - 2,0457) = 5,88 \text{ kJ/kgK}$$

Stan 2 określamy na podstawie równania przemiany:

$$v = v_1 = v_2 = \text{const}$$

Wobec $x_2 = 1$ mamy: $v_2 = v''_2 = 0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$, zatem poszukujemy w kolumnie v'' tablicy 4 pary nasyconej wartości 0,2 i zauważamy, że jesteśmy zmuszeni do interpolacji. Znajdujemy na tej drodze temperaturę $t_2 = 178,6^\circ\text{C}$ i ciśnienie $P_2 = 970 \text{ kPa}$, a następnie entalpię właściwą $h_2 = h''_2 = 2775,9 \text{ kJ/kg}$ i entropię właściwą $s_2 = s''_2 = 6,5950 \text{ kJ/kgK}$. Obliczamy jeszcze energię wewnętrzną właściwą

$$u_2 = h_2 - P_2 v_2 = 2775,9 - 970 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 2581,9 \text{ kJ/kg}$$

Jednostkową pracę techniczną tej przemiany określa wzór:

$$l_{t_{1-2}} = v_1 (P_1 - P_2) = 0,2 (800 - 970) = -34 \text{ [kJ/kg]}$$

Całkowitą pracę wyznaczamy, znając masę pary biorącej udział w przemianie:

$$L_{t_{1-2}} = m \cdot l_{t_{1-2}}$$

Masę wyznaczamy, znając pojemność zbiornika i objętość właściwą pary

$$m = \frac{V}{v_1} = \frac{10}{0,2} = 50 \text{ kg}$$

Praca techniczna przemiany wynosi więc:

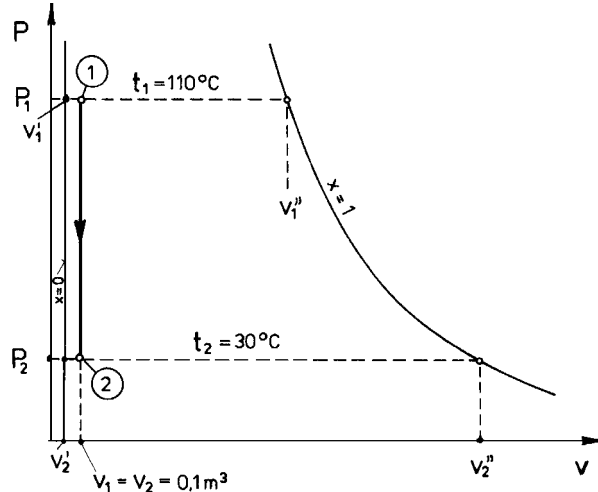
$$L_{t_{1-2}} = m \cdot l_{t_{1-2}} = 50 \cdot (-34) = -1700 \text{ kJ} = -1,7 \text{ MJ}$$

Ciepło pochłonięte przez parę podczas przemiany izochorycznej wyraża zależność:

$$Q_{1-2} = U_2 - U_1 = m (u_2 - u_1) = 50 (2581,9 - 2260,3) = 16080 \text{ kJ} = 16,08 \text{ MJ}.$$

Zadanie 12.2

W szczelnym naczyniu o pojemności $V = 5 \text{ l}$ znajduje się para wodna w ilości $m = 0,05 \text{ kg}$ o temperaturze 110°C . Obliczyć ilość ciepła, jaką należy odprowadzić, by temperatura spadła do 30°C .



Rys. 12.2

Rozwiązanie

Przemiana jest izochoryczna. Ilość ciepła określa więc zależność:

$$Q_{1-2} = U_2 - U_1 = m(u_2 - u_1)$$

Do znalezienia wartości u_1 i u_2 posłużymy się równaniami:

$$u_1 = h_1 - P_1 v_1$$

$$u_2 = h_2 - P_2 v_2$$

Z potrzebnych wielkości znajdujemy najpierw objętość właściwą:

$$v_1 = v_2 = \frac{V}{m} = \frac{0,005}{0,05} = 0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Znając dwa parametry: t i v , określające stan pary, możemy określić pozostałe poszukiwane wielkości. Od tego, czy para w naczyniu jest przegrzana czy mokra, zależą szczegóły poszukiwania. Należy więc ocenić, w jakim obszarze znajdują się interesujące nas stany.

Określamy wpierw stopień suchości pary w stanie początkowym:

$$x_1 = \frac{v_1 - v_1'}{v_1'' - v_1'} = \frac{0,1 - 0,00105}{1,211 - 0,00105} = 0,0818$$

przy czym $v_1' = 0,00105 \text{ m}^3/\text{kg}$ i $v_1'' = 1,211 \text{ m}^3/\text{kg}$ odczytaliśmy w tablicy 4 dla temperatury 110°C . Stwierdzamy, że $0 < x_1 < 1$, tzn., że w stanie **1** mamy parę mokrą. Wobec tego odczytujemy z tablic w wierszu: $t_1 = 110^\circ\text{C}$ wartość ciśnienia nasycenia: $P_1 = 143,26 \text{ kPa}$ oraz $h_1' = 461,32 \text{ kJ/kg}$ i $h_1'' = 2691,8 \text{ kJ/kg}$.

Obliczamy entalpię właściwą pary mokrej:

$$h_1 = h_1' + x_1 (h_1'' - h_1') = 461,32 + 0,0818 \cdot (2691,8 - 461,32) = 643,77 \text{ kJ/kg}$$

Analogicznie określamy stopień suchości w stanie 2, korzystając z danych tablicowych dla $t_2 = 30^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{v_2 - v'_2}{v''_2 - v'_2} = \frac{0,1 - 0,0010043}{32,93 - 0,001004} = 0,003006$$

Jest to również para mokra. Odczytujemy więc z tablicy pozostałe wielkości:

$$P_2 = 4,242 \text{ kPa}, \quad h'_2 = 125,66 \text{ kJ/kg} \quad \text{ i } \quad h''_2 = 2556 \text{ kJ/kg}$$

i obliczamy:

$$h_2 = 125,66 + 0,003006 \cdot (2556 - 125,66) = 132,97 \text{ kJ/kg}$$

oraz

$$u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 643,77 - 143,27 \cdot 0,1 = 629,44 \text{ kJ/kg}$$

i

$$u_2 = h_2 - P_2 v_2 = 132,97 - 4,241 \cdot 0,1 = 132,55 \text{ kJ/kg}$$

Ciepło doprowadzone wynosi:

$$Q_{1-2} = m (u_2 - u_1) = 0,05 \cdot (132,55 - 629,44) = -24,84 \text{ kJ}$$

Ciepło to jako ujemne jest odprowadzane od pary w naczyniu.

Zadanie 12.3

Kocioł parowy o objętości przestrzeni wodno-parowej wynoszącej 10 m^3 jest napełniony w połowie wodą wrzącą, a w połowie parą suchą nasyconą pod ciśnieniem $1,5 \text{ MPa}$. Wskutek awarii układu regulacyjnego doprowadzane jest z paleniska ciepło, mimo że zamknięto zawór odcinający odpływ pary. Do chwili otwarcia się zaworu bezpieczeństwa ciśnienie w kotle wzrosło do $2,0 \text{ MPa}$. Naszkicować przemianę w układach: $P-v$ i $T-s$, a następnie wyznaczyć, przy użyciu tablic pary wodnej: ilość pary powstałej po zamknięciu zaworu parowego, ilość doprowadzonego w tym czasie ciepła.

Wyniki: $x_1 = 0,0087$, $\Delta m'' = 11,4 \text{ kg}$, $x_2 = 0,0113$, $Q_{1-2} = U_2 - U_1 = 93,7 \text{ MJ}$.

Zadanie 12.4

Walczak kotła parowego zawiera 10 t wody i 15 kg pary suchej nasyconej w stanie równowagi termicznej znajdując się pod ciśnieniem $1,0 \text{ MPa}$. Należy obliczyć: entalpię całkowitą wody i pary, objętość zajmowaną przez parę mokrą, masę wody i masę pary po obniżeniu się ciśnienia (wskutek postoju nocnego) do 200 kPa oraz temperaturę w kotle po obniżeniu ciśnienia. Naszkicować przemianę w układzie $P-v$.

Wyniki: $H = 7667,6 \text{ MJ}$, $V = 14,19 \text{ m}^3$, $m' = 10\,011 \text{ kg}$, $m'' = 4,0 \text{ kg}$, $t_s = 120,2^\circ\text{C}$.

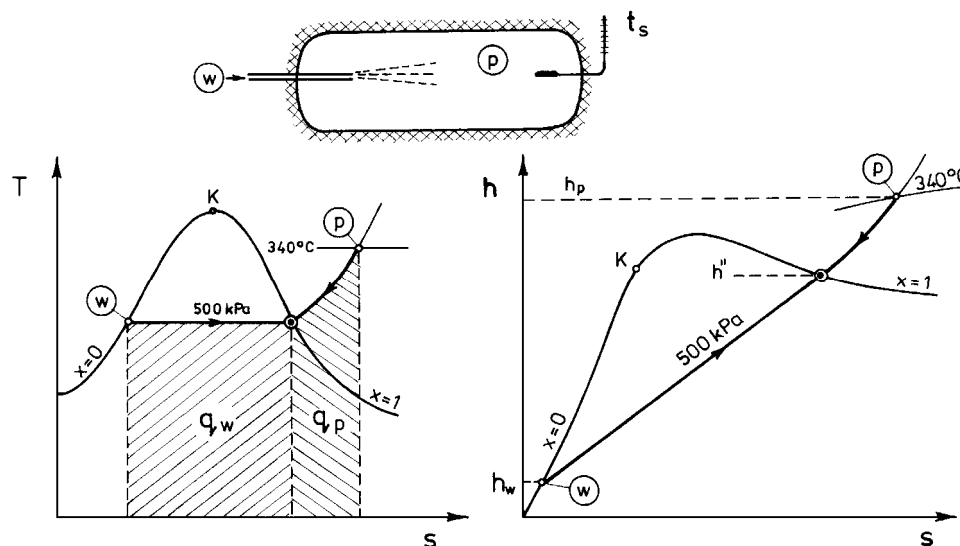
Zadanie 12.5

Para sucha nasycona o objętości 1 m^3 , ciśnieniu 900 kPa i stopniu suchości $0,95$ oddała bez zmiany ciśnienia 6000 kJ ciepła. Jaki jest stopień suchości pary po tej przemianie? Naszkicować przemianę w układach: $T-s$ i $h-s$.

Wynik: $x_2 = 0,347$.

Zadanie 12.6

Para przegrzana o ciśnieniu 500 kPa i temperaturze 340°C ma być sprowadzona do stanu pary suchej nasyconej o tym samym ciśnieniu. Ile wody w stanie nasycenia należy wtrysnąć na każdy kilogram pary przegrzanej, aby ten cel osiągnąć?



Rys. 12.3

Rozwiązanie

Proces jest izobaryczny, a ciepło oddane przez parę Q_p jest równe ciepłu pobranemu przez wodę Q_w :

$$Q_p = Q_w$$

przy czym:

$$Q_p = m_p (h_p - h'')$$

$$Q_w = m_w (h'' - h_w)$$

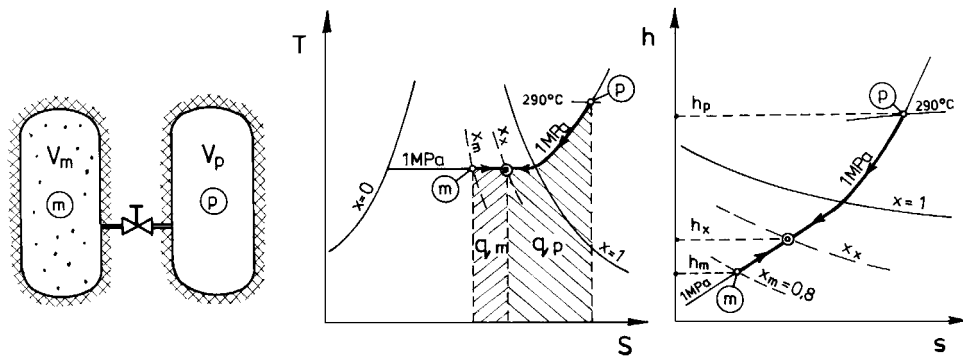
Zatem

$$\frac{m_w}{m_p} = \frac{h_p - h''}{h'' - h_w} = \frac{3146,9 - 2748,5}{2748,5 - 640,13} = 0,189 \frac{\text{kg wody}}{\text{kg pary}}$$

Dane liczbowe zaczerpnięto z tablicy 6, pary przegrzanej. Na każdy kilogram pary przegrzanej potrzeba więc 0,189 kg wody w stanie nasycenia.

Zadanie 12.7

1 m³ pary przegrzanej o ciśnieniu 1,0 MPa i temperaturze 290°C został zmieszany izobarycznie z 1 m³ pary mokrej o ciśnieniu 1,0 MPa i stopniu suchości 0,8. Posługując się dla wyznaczenia objętości właściwej pary przegrzanej wzorem R. Molliera, określić jaki rodzaj pary powstał i jaką wartość ma drugi parametr stanu.



Rys. 12.4

Rozwiązanie

Ciepło oddane przez parę przegrzaną:

$$|Q_p| = m_p (h_p - h_x)$$

jest oczywiście równe ciepłu pobranemu przez parę mokrą:

$$Q_m = m_m (h_x - h_m)$$

czyli

$$m_p (h_p - h_x) = m_m (h_x - h_m)$$

Stąd

$$h_x = \frac{m_p h_p + m_m h_m}{m_p + m_m}$$

Dla określenia mas: pary przegrzanej m_p i pary mokrej m_m potrzebne są objętości właściwe:

- pary przegrzanej ($T = 273,15 + 290 = 563,15\text{ K}$):

$$\begin{aligned} v_p &= 0,4611 \frac{T}{P} - \frac{1,45}{\left(\frac{T}{100}\right)^{3,1}} - \frac{0,603 \cdot P^2}{\left(\frac{T}{100}\right)^{13,5}} = \\ &= 0,4611 \frac{563,15}{1000} - \frac{1,45}{(5,6315)^{3,1}} - \frac{0,603 \cdot 1000^2}{(5,6315)^{13,5}} = 0,2528 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

- pary mokrej:

$$v_m = v' + x (v'' - v') = 0,001127 + 0,8 (0,1943 - 0,00113) = 0,1557 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Wobec

$$v = \frac{V}{m}$$

poszczególne masy wynoszą:

$$m_p = \frac{V_p}{v_p} = \frac{1}{0,2528} = 3,956 \text{ kg}$$

$$m_m = \frac{V_m}{v_m} = \frac{1}{0,1557} = 6,4226 \text{ kg}$$

Entalpie właściwe uzyskane z tablic parowych są następujące:

$$h_p = 3029,9 \text{ kJ/kg}$$

$$h_m = h' + x (h'' - h') = 762,6 + 0,8 (2777 - 762,6) = 2374,1 \text{ kJ/kg}$$

Zatem entalpia właściwa powstałej mieszaniny:

$$h_x = \frac{3,956 \cdot 3029,9 + 6,4226 \cdot 2374,1}{3,956 + 6,4226} = 2624,1 \text{ kJ/kg}$$

Entalpia ta jest mniejsza od entalpii właściwej pary suchej nasyconej $h'' = 2777 \text{ kJ/kg}$ – mamy więc do czynienia z **parą mokrą**. Stopień suchości tej pary x oblicza się ze wzoru na entalpię właściwą:

$$h_x = h' + x_x (h'' - h')$$

uzyskując po przekształceniu:

$$x_x = \frac{h_x - h'}{h'' - h'} = \frac{2624,1 - 762,6}{2777 - 762,6} = 0,924.$$

Zadanie 12.8

500 kg wody ($c_w = 4,187 \text{ kJ/kgK}$) o temperaturze 10°C ma zostać podgrzanych do 60°C za pomocą pary suchej nasyconej o ciśnieniu 200 kPa przepływającej przez węzownicę zanurzoną w tej wodzie. Skropliny opuszczają węzownicę z temperaturą 60°C . Ile kilogramów pary trzeba użyć w tym procesie? Naszkicować przemiany obydwu płynów w układzie T–s.

Wynik: $m_p = 42,6 \text{ kg}$.

Zadanie 12.9

Przy danych poprzedniego zadania obliczyć ile pary m_p trzeba zużyć, aby wytworzyć 500 kg wody podgrzanej do 60°C przez bezpośrednie zmieszanie pary z zimną wodą ($c_w = 4,187 \text{ kJ/kgK}$); wyznaczyć też masę tej zimnej wody m_w .

Wyniki: $m_p = 39,3 \text{ kg}$, $m_w = 460,7 \text{ kg}$.

Zadanie 12.10

W skraplaczu przeponowym skrapla się 1000 kg/h pary o ciśnieniu 10 kPa i stopniu suchości 0,95. Przepływająca wewnątrz rur woda chłodząca ogrzewa się od 15°C do 35°C . Skropliny opuszczają skraplacz z temperaturą 45°C . Jaki jest strumień wody chłodzącej ($c_w = 4,19 \text{ kJ/kgK}$)? Naszkicować przemianę pary w układzie T–s.

Wynik: $\dot{m}_w = 7,552 \text{ kg/s}$.

Zadanie 12.11

W skraplaczu mieszkankowym skrapla się 1000 kg/h pary, o ciśnieniu 10 kPa i stopniu suchości 0,95, wskutek zmieszania z wodą o temperaturze 15°C . Odpływająca mieszanka wody chłodzącej i skroplin ma temperaturę 40°C . Jaki jest strumień masy wody chłodzącej ($c_w = 4,19 \text{ kJ/kgK}$)? Naszkicować przemiany pary i wody w układzie T–s.

Wynik: $\dot{m}_w = 6,092 \text{ kg/s}$.

Zadanie 12.12

Kocioł parowy zasilany jest wodą o temperaturze 60°C przy ciśnieniu $P_1 = 5,0 \text{ MPa}$, w ilości 20 t/h . Woda odparowuje izobarycznie osiągając stopień suchości bliski jedności, a następnie kierowana jest do przegrzewacza, w którym osiąga temperaturę 450°C . Dla określenia stopnia suchości pary przed przegrzewaczem, zainstalowano kalorymetr dławiący i dokonano pomiaru parametrów pary po zdławieniu, otrzymując $P_{\text{kal}} = 120 \text{ kPa}$, $t_{\text{kal}} = 150^{\circ}\text{C}$. Obliczyć: stopień suchości pary przed przegrzewaczem x_2 , strumień ciepła pobierany przez wodę w parowniku $\dot{Q}_{1-2} [\text{kW}]$, strumień ciepła pobierany przez parę w przegrzewaczu $\dot{Q}_{2-3}$. Przedstawić przebieg przemian na wykresach: $T-s$ i $h-s$.

Wyniki: $x_2 = 0,989$, $\dot{Q}_{1-2} = 13998 \text{ kW}$, $\dot{Q}_{2-3} = 3010 \text{ kW}$.

Zadanie 12.13

Para wodna w ilości 10 kg , o ciśnieniu $P_1 = 400 \text{ kPa}$ i stopniu suchości $x_1 = 0,9$, podczas izotermicznej przemiany 1-2 wykonała pracę $L_{1-2} = 100 \text{ kNm}$. Obliczyć: parametry stanu końcowego pary wodnej: P_2 i x_2 oraz ciepło pobrane przez parę podczas tej przemiany Q_{1-2} . Przedstawić przemianę na wykresach: $P-v$ i $T-s$.

Wyniki: $P_2 = 400 \text{ kPa}$, $x_2 = 0,9542$, $Q_{1-2} = 1157 \text{ kJ}$.

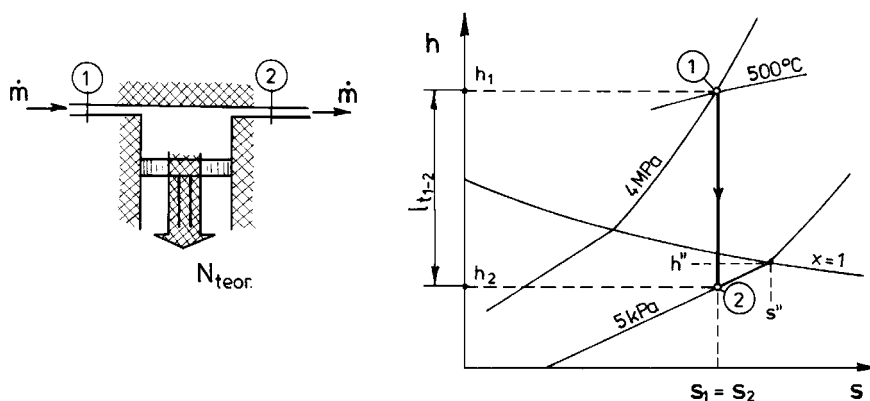
Zadanie 12.14

Para wodna w ilości 10 kg o parametrach: $t_1 = 200^{\circ}\text{C}$ i $x_1 = 0,75$ została rozprężona izotermicznie pobierając przy tym $Q_{1-2} = 13000 \text{ kJ}$ ciepła. Obliczyć: parametry i funkcje stanu końcowego: P_2 , t_2 , h_2 , v_2 , s_2 oraz wykonaną pracę absolutną L_{1-2} . Przedstawić przemianę w układach: $P-v$ i $T-s$.

Wyniki: $P_2 = 50 \text{ kPa}$, $t_2 = 200^{\circ}\text{C}$, $h_2 = 2877,5 \text{ kJ/kg}$, $v_2 = 4,356 \text{ m}^3/\text{kg}$, $s_2 = 8,15 \text{ kJ/kgK}$, $L_{1-2} = 7,99 \text{ MJ}$.

Zadanie 12.15

W maszynie przepływowej rozpręża się izentropowo 10 t/h pary wodnej od parametrów: $P_1 = 4,0 \text{ MPa}$ i $t_1 = 500^{\circ}\text{C}$ do ciśnienia $P_2 = 5 \text{ kPa}$. Obliczyć: stopień suchości pary wylotowej x_2 i teoretyczną moc maszyny N_{teor} .



Rys. 12.5

Rozwiązanie

Przemiana w maszynie jest izentropowa, więc

$$s_1 = s_2 = s'_2 + x_2 (s''_2 - s'_2),$$

stąd mamy

$$x_2 = \frac{s_1 - s'_2}{s''_2 - s'_2} = \frac{7,0909 - 0,4763}{8,3952 - 0,4763} = 0,8353$$

Użyto tu danych tablicowych:

$$\begin{array}{lll} \text{dla } P_2 = 5 \text{ kPa:} & s'_2 = 0,4763 \text{ kJ/kgK,} & h'_2 = 137,77 \text{ kJ/kg,} \\ & s''_2 = 8,3952 \text{ kJ/kgK,} & h''_2 = 2561,2 \text{ kJ/kg.} \\ \text{dla } P_1 = 4,0 \text{ MPa i } t_1 = 500^\circ\text{C:} & & h_1 = 3445,2 \text{ kJ/kg,} \\ & & s_1 = 7,0909 \text{ kJ/kgK.} \end{array}$$

Teoretyczna moc maszyny wyraża się wzorem:

$$N_{\text{teor}} = \dot{L}_{t_{1-2}} = \dot{m} l_{t_{1-2}} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

w którym strumień masy pary:

$$\dot{m} = 10 \text{ t/h} = 10000/3600 = 2,778 \text{ kg/s}$$

Entalpia właściwa pary na końcu ekspansji wynosi:

$$h_2 = h'_2 + x_2(h''_2 - h'_2) = 137,77 + 0,8353(2561,2 - 137,8) = 2162,04 \text{ kJ/kg}$$

Zatem

$$N_{\text{teor}} = \dot{L}_{t_{1-2}} = 2,778 \cdot (3445,2 - 2162,04) = 3564,6 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \equiv \text{kW} \right] = 3,56 \text{ MW}.$$

Zadanie 12.16

Sucha nasycona para wodna rozpręża się izentropowo od 1,5 MPa do 100 kPa. Jaki jest stopień suchości pary na końcu i jaką pracę techniczną para wykonuje? Przedstawić przemianę na wykresach: T-s i h-s.

Wyniki: $x_2 = 0,848$, $l_{t_{1-2}} = 457,9 \text{ kJ/kg}$.

Zadanie 12.17

Jaka jest moc teoretyczna silnika parowego, w którym 7 t/h pary mokrej o ciśnieniu 1,0 MPa i stopniu suchości 98% rozpręża się izentropowo do 10 kPa? Jaki jest stopień suchości pary rozprężonej? Naszkicować przemianę w układach: T-s i h-s.

Wyniki: $x_2 = 0,779$, $N_{\text{teor}} = \dot{L}_{t_{1-2}} = 1324 \text{ kW}$.

Zadanie 12.18

Określić za pomocą tablic parowych średnią wartość wykładnika κ dla **empirycznego** równania izentropy pary suchej nasyconej: $Pv^\kappa = \text{const}$ jeżeli ekspansja od ciśnienia 1,5 MPa i stopnia suchości 1,0 przebiega do ciśnienia: a) 600 kPa, b) 100 kPa. Naszkicować przemiany w układach: P-v i T-s.

Wyniki: a) $\kappa = 1,136$, b) $\kappa = 1,133$.

Zadanie 12.19

Para wodna rozpręża się izotermicznie od stanu 1 do stanu 2, a następnie adiabatycznie odwracalnie (izentropowo) do stanu 3. Dane: $P_1 = 3,0 \text{ MPa}$ i $t_1 = 350^\circ\text{C}$ oraz $P_2 = 1,0 \text{ MPa}$, $P_3 = 0,05 \text{ MPa}$. Obliczyć: jednostkowe ciepło pobrane podczas przemiany izotermicznej q_{1-2} , jednostkową pracę techniczną wykonaną podczas przemiany izentropowej $l_{t_{2-3}}$, parametry i funkcje stanu końcowego: t_3 , v_3 , x_3 , h_3 , u_3 , s_3 . Naszkicować przemiany w układach: T-s i h-s, a rozwiązanie przeprowadzić za pomocą wykresu (h-s) lub tablic.

Wyniki: $q_{1-2} = 347,5 \text{ kJ/kg}$, $l_{t_{2-3}} = 616 \text{ kJ/kg}$, $t_3 = 81,35^\circ\text{C}$, $v_3 = 3,09 \text{ m}^3/\text{kg}$, $x_3 = 0,955$,
 $h_3 = 2542 \text{ kJ/kg}$, $u_3 = 2387 \text{ kJ/kg}$, $s_3 = 7,30 \text{ kJ/kg}$.

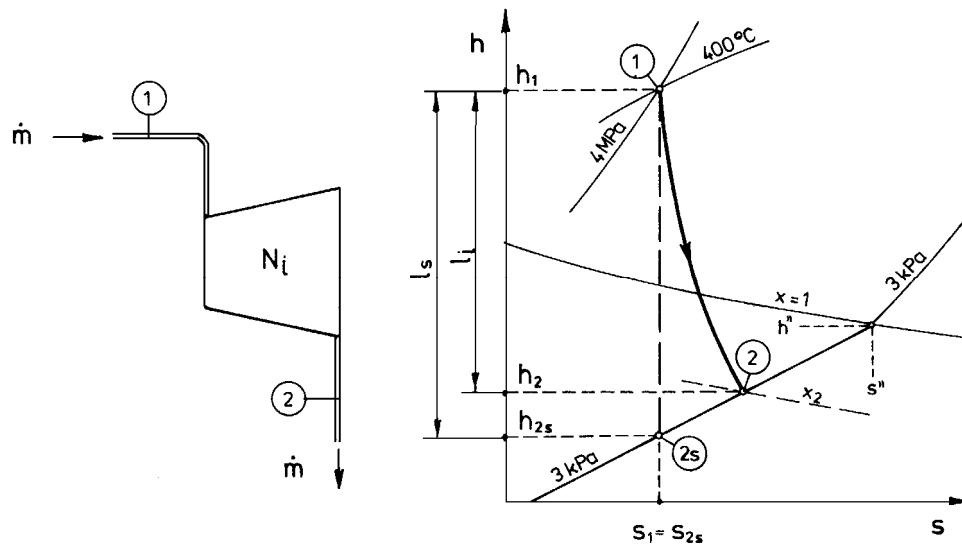
Zadanie 12.20

Do doskonale zaizolowanego naczynia, w którym znajdowało się 50 kg wody o temperaturze 20°C , wprowadzono moką parę wodną o ciśnieniu 1,0 MPa. Przyrost masy wody wyniósł 5 kg, zaś temperatura wody w naczyniu ustaliła się na poziomie 40°C . Obliczyć stopień suchości pary doprowadzonej.

Wynik: $x = 0,119$.

Zadanie 12.21

Obliczyć stopień suchości pary wylotowej z turbiny, jeżeli wiadomo, że para rozpręża się w turbinie adiabatycznie nieodwracalnie ze sprawnością $\eta_i = 0,85$ od 4,0 MPa i 400°C do 3 kPa. Wyznaczyć moc wewnętrzną maszyny dla strumienia masy 360 kg/h.



Rys. 12.6

Rozwiązanie

Z tablic przegrzanej pary wodnej dla $P_1 = 4,0 \text{ MPa}$ i $t_1 = 400^\circ\text{C}$ mamy:

$$h_1 = 3214,5 \text{ kJ/kg} \text{ i } s_1 = 6,7714 \text{ kJ/kgK}$$

a dla ciśnienia 3 kPa pary nasyconej:

$$\begin{aligned} h' &= 101,0 \text{ kJ/kg} & h'' &= 2545,2 \text{ kJ/kg} & r &= 2444,2 \text{ kJ/kg} \\ s' &= 0,3543 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} & s'' &= 8,5776 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} & t_s &= 24,1^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Dla ekspansji izentropowej byłoby:

$$s_1 = s_{2s} = s'_2 + x_{2s} (s''_2 - s'_2)$$

a stąd:

$$x_{2s} = \frac{s_1 - s'_2}{s''_2 - s'_2} = \frac{6,7714 - 0,3543}{8,5776 - 0,3543} = 0,780$$

Entalpia właściwa w hipotetycznym stanie 2s:

$$h_{2s} = h'_2 + x_2 r_2 = 101,0 + 0,78 \cdot 2444,2 = 2\,007,5 \text{ kJ/kg}$$

Ze wzoru na sprawność wewnętrzną:

$$\eta_i = \frac{l_i}{l_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} = 0,85$$

mamy entalpię właściwą w rzeczywistym stanie pary wylotowej:

$$h_2 = h_1 - \eta_i (h_1 - h_{2s}) = 3214,5 - 0,85 (3214,5 - 2007,5) = 2188,6 \text{ kJ/kg}$$

Stopień suchości tej pary wynosi:

$$x_2 = \frac{h_2 - h'_1}{r} = \frac{2188,6 - 101,0}{2444,2} = 0,854$$

Moc wewnętrzna turbiny:

$$N_i \equiv \dot{L}_i = \dot{m} l_i = \dot{m} (h_1 - h_2) = \frac{360}{3600} (3214,5 - 2188,6) = 102,6 \text{ kW}$$

Zadanie 12.22

Silnik parowy zasilany jest masą 1,52 t/h pary przegrzanej o ciśnieniu 5,0 MPa i temperaturze 500°C. Rozprężanie adiabatyczne nieodwracalne prowadzi do ciśnienia 5 kPa. Określić stopień suchości pary wylotowej x_2 , sprawność wewnętrzną η_i i moc wewnętrzną silnika N_i , jeżeli do skraplania pary odlotowej (bez przechładzania skroplin) potrzeba 83240 kg/h wody chłodzącej ($c_w = 4.19 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$), która podgrzewa się w skraplaczu o 9,5 K. Naszkicować przemiany pary w układach: T-s i h-s.

Wyniki: $x_2 = 0,90$, $\eta_i = 0,88$, $x_{2s} = 0,821$, $N_i = 471,2 \text{ kW}$.

Zadanie 12.23

Do turbiny parowej dopływa para o parametrach: $P_1 = 1,0 \text{ MPa}$ i $t_1 = 250^\circ\text{C}$. W turbinie para rozpręża się izentropowo do ciśnienia $P_2 = 25 \text{ kPa}$. Para wylotowa skrapla się w skraplaczu mieszkankowym, do którego wtryskuje się wodę o temperaturze $t'_w = 10^\circ\text{C}$. Woda odpływająca ze skraplacza ma temperaturę $t''_w = 55^\circ\text{C}$. Przedstawić przemiany na wykresach: T-s i h-s, a następnie obliczyć zapotrzebowanie wody chłodzącej skraplacz $\dot{m}_w [\text{kg/h}]$, jeżeli turbina rozwija moc teoretyczną $N_s = 0,5 \text{ MW}$.

Wynik: $\dot{m}_w = 31550 \text{ kg/h}$.

Zadanie 12.24

Turbina parowa zasilana jest z kotła parowego parą wodną o ciśnieniu $P_1 = 3,0 \text{ MPa}$. Turbina pracuje ze sprawnością wewnętrzną $\eta_i = 0,8$, ciśnienie wylotowe wynosi $P_2 = 5 \text{ kPa}$. Przemiana w turbinie jest adiabatą nieodwracalną. Gdyby przemiana zachodziła odwracalnie, to stopień suchości pary wylotowej wynosiłby $x_{2s} = 0,9$. Obliczyć moc wewnętrzną turbiny N_i , jeżeli wiadomo, iż para produkowana jest w kotle izobarycznie przy ciśnieniu $P_1 = 3,0 \text{ MPa}$. Temperatura wody zasilającej kocioł $t_w = 60^\circ\text{C}$. Para pobiera w

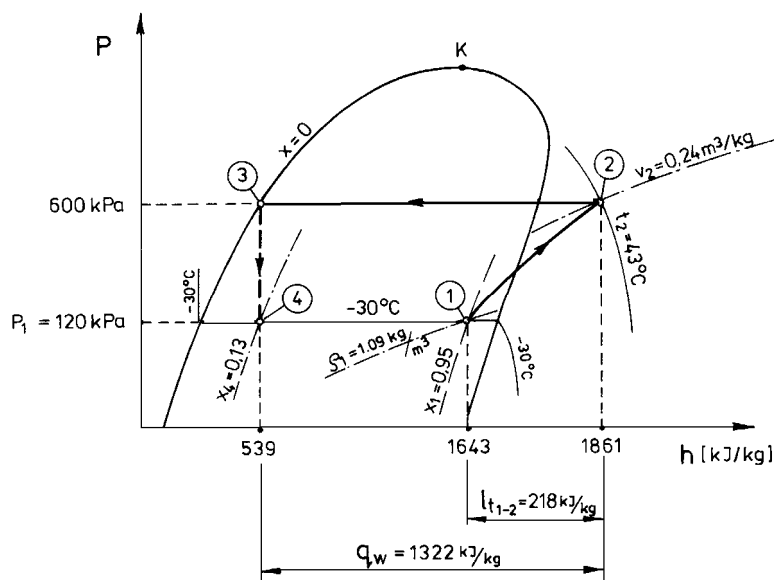
kotle strumień ciepła $\dot{Q}_d = 109,2 \text{ GJ/h}$. Zadanie rozwiązać za pomocą wykresu $h-s$. Naszkicować przemiany w układach: $T-s$ i $h-s$.

Wynik: $N_i = 100 \text{ kW}$.

Zadanie 12.25

Płyn chłodniczy – amoniak – sprężany jest izentropowo od stanu określonego parametrami: $t_1 = -30^\circ\text{C}$ i $x_1 = 0,95$ do ciśnienia $P_2 = 600 \text{ kPa}$. Następnie płyn oddaje ciepło aż do całkowitego skroplenia, kiedy to $x_3 = 0$. Z kolei ciekły amoniak podlega dławieniu, co sprowadza go do stanu pary mokrej i temperatury $t_4 = t_1$. Posługując się wykresem $P-h$ dla amoniaku określić: gęstość ρ_1 i ciśnienie P_1 , temperaturę t_2 i objętość właściwą v_2 po sprężeniu, stopień suchości po zdławieniu x_4 , jednostkową pracę sprężania izentropowego l_{t1-2} , jednostkowe ciepło odprowadzone od 1 kg płynu q_w . Przedstawić szkicowo przemiany i wyznaczone parametry oraz odcinki pracy i ciepła na wykresie $P-h$.

Wyniki: na poniższym rys. 12.7.



Rys. 12.7

Zadanie 12.26

Przegrzana para wodna o ciśnieniu $2,0 \text{ MPa}$ i temperaturze 300°C rozpręża się izentropowo do 100 kPa . Jaką pracę techniczną wykonuje każdy 1 kg pary? Jaka będzie ta praca, gdy para zostanie przed ekspansją zdławiona do 500 kPa ? Zadanie wykonać przy użyciu wykresu $h-s$, przedstawiając przedtem przemiany szkicowo w układach: $T-s$ i $h-s$.

Wyniki: $l_{t1-2} = 570 \text{ kJ/kg}$, $l_{t3-4} = 337 \text{ kJ/kg}$.

Zadanie 12.27

Ciekły amoniak (NH_3) w stanie nasycenia o ciśnieniu 1 MPa zostaje zdławiony do 190 kPa. Jaką temperaturę ma powstała para mokra i jaki jest jej stopień suchości? Naskicować proces w układach: T-s i P-h. Zadanie rozwiązać przy użyciu tablicy pary NH_3 i porównać wyniki z tymi, jakie uzyskuje się z wykresu P-h.

Wyniki: $x_2 = 0,1575$, $t_2 = -20^\circ\text{C}$.

Zadanie 12.28

Wodę w stanie wrzenia o ciśnieniu 120 kPa dławią się do 50 kPa. Ile pary powstaje wskutek dławienia?

Wynik: $x_2 = 0,043 \text{ kg/kg}$.

Zadanie 12.29

Strumień pary mokrej $\dot{m} = 2 \text{ kg/s}$ o temperaturze $t_1 = 200^\circ\text{C}$ i stopniu suchości $x_1 = 0,85$ jest podgrzewany izobarycznie do temperatury 320°C , a następnie rozprężany w turbinie izentropowo do ciśnienia 10 kPa. Narysować przemiany na wykresach T-s i h-s, a następnie obliczyć: strumień dostarczonego ciepła i teoretyczną moc maszyny.

Wyniki: $\dot{Q}_{1-2} = 1167,1 \text{ kW}$, $N_{\text{teor}} = 1732,6 \text{ kW}$.

Zadanie 12.30

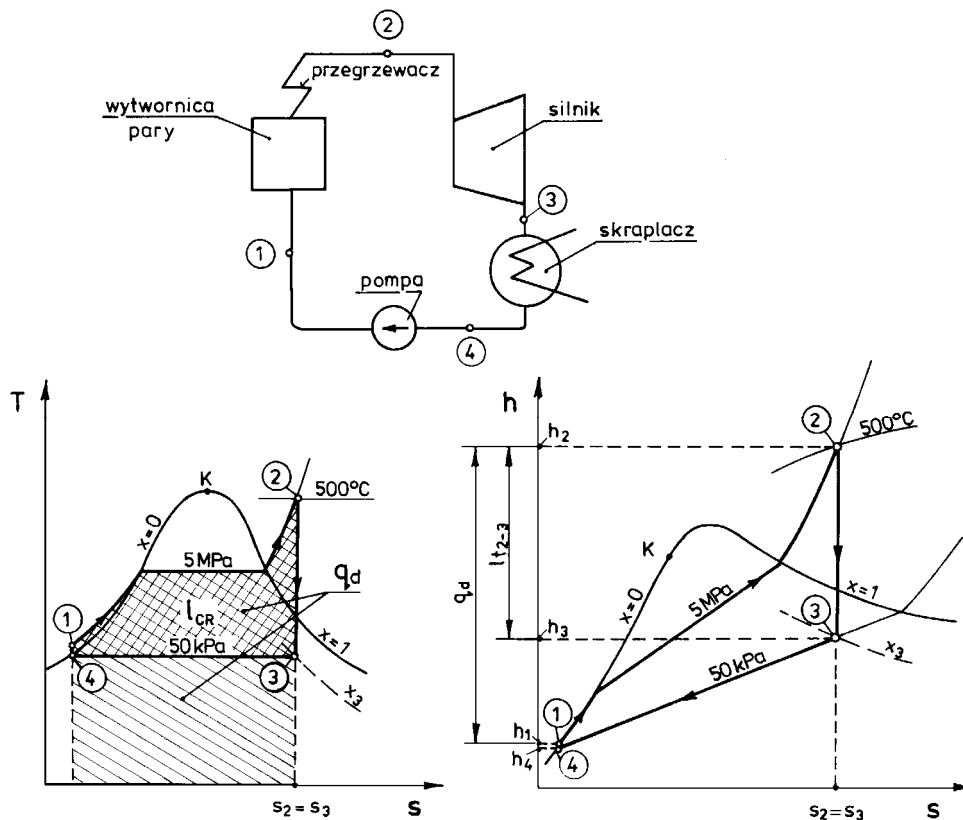
6 m^3 pary mokrej o ciśnieniu $P_1 = 300 \text{ kPa}$ i stopniu suchości $x_1 = 0,83$ ogrzano przy stałej objętości tak, że temperatura pary osiągnęła wartość $t_2 = 450^\circ\text{C}$. Obliczyć pozostałe parametry i funkcje stanu początkowego i końcowego oraz ilość doprowadzonego ciepła Q_{1-2} . Przedstawić przemianę na wykresach: P-v i T-s.

Wyniki: $v_1 = v_2 = 0,50305 \text{ m}^3/\text{kg}$, $P_2 = 650 \text{ kPa}$, $h_1 = 2357,6 \text{ kJ/kg}$, $h_2 = 3375 \text{ kJ/kg}$,
 $s_1 = 6,088 \text{ kJ/kgK}$, $s_2 = 7,80 \text{ kJ/kgK}$, $Q_{1-2} = 2867 \text{ kJ}$.

13. TERMODYNAMICZNE OBIEGI PAROWE

Zadanie 13.1

Obliczyć sprawność obiegu Clausiusa - Rankine'a, w którym para zasilająca silnik ma ciśnienie 5,0 MPa i temperaturę 500°C, a w skraplaczu panuje ciśnienie 50 kPa. Obliczyć ponadto sprawność maksymalną w granicach temperatur obiegu. Naszkicować schemat urządzeń obiegu oraz przemiany obiegu na wykresach T-s i h-s.



Rys. 13.1

Rozwiązanie

Sprawność obiegu oblicza się ze wzoru:

$$\eta_{CR} = \frac{l_{CR}}{q_d} = \frac{l_{t_{2-3}} - l_{t_{4-1}}}{q_d}$$

Do obliczenia pracy technicznej **silnika** posługujemy się tablicą pary przegrzanej 6, z której dla $P_2 = 5,0$ MPa i $t_2 = 500^\circ\text{C}$ odczytujemy entalpię właściwą $h_2 = 3433,8$ kJ/kg i entropię właściwą $s_2 = 6,9768$ kJ/kgK. Z kolei z tablicy pary nasyconej 5 odczytujemy dla $P_3 = 50$ kPa entropie właściwe: $s'_3 = 1,0912$ kJ/kgK i $s''_3 = 7,5951$ kJ/kgK, a następnie obliczamy:

$$s_3 = s'_3 + x_3 (s''_3 - s'_3) = 1,0912 + x_3 (7,5951 - 1,0912) = s_2 = 6,9768 \text{ kJ/kgK}$$

stąd

$$x_3 = \frac{s_3 - s'_3}{s''_3 - s'_3} = \frac{6,9768 - 1,0912}{7,5951 - 1,0912} = 0,9049$$

Dla w ten sposób określonego stanu pary mokrej za silnikiem (turbina), wyznaczamy korzystając z danych tablicowych entalpię właściwą:

$$h_3 = h'_3 + x_3 r = 340,57 + 0,9049 \cdot 2305,4 = 2426,7 \text{ kJ/kg}$$

Tak więc jednostkowa praca techniczna silnika:

$$l_{t_{2-3}} = h_2 - h_3 = 3433,8 - 2426,7 = 1007,1 \text{ kJ/kg}$$

Pracę tę można też wyznaczyć przy wykorzystaniu entalpii odczytanych z **wykresu** $h-s$: $h_2 = 3434 \text{ kJ/kg}$ i $h_3 = 2429,7 \text{ kJ/kg}$:

$$l_{t_{2-3}} = h_2 - h_3 = 3434 - 2429,7 = 1004,3 \text{ kJ/kg}$$

Wynik ten jest mniej dokładny od poprzedniego, ale błąd względny wynosi tylko 0,28%. Gdyby jednak entalpię h_3 obliczyć stosując odczytany z wykresu stopień suchości $x_3 = 0,905$ zastosowany do danych tablicowych pary nasyconej (bardziej dostępnych od tablic pary przegrzanej), to wyniki byłyby następujące:

$$h_3 = h'_3 + x_3 r = 340,57 + 0,905 \cdot 2305,4 = 2427 \text{ kJ/kg}$$

$$l_{t_{2-3}} = h_2 - h_3 = 3434 - 2427 = 1007,0 \text{ kJ/kg}$$

Wielkość pracy jest prawie identyczna z uzyskaną przy użyciu tablicy pary przegrzanej.

Jednostkowa praca techniczna **pompy** liczona jest jako praca izochorycznego sprężania wody:

$$l_{t_{4-1}} = v'_4 (P_1 - P_4) = 0,00103 (4000 - 50) = 4,07 \text{ kJ/kg}$$

przy czym $v'_4 = 0,00103 \text{ m}^3/\text{kg}$ odczytano w tablicy pary nasyconej dla $P_4 = 50 \text{ kPa}$. Entalpia wody sprężonej wynika ze wzoru na adiabatyczną pracę sprężania tej wody:

$$|l_{t_{4-1}}| = h_1 - h'_4$$

$$\text{czyli} \quad h_1 = h'_4 + |l_{t_{4-1}}| = 340,57 + 4,07 = 344,64 \text{ kJ/kg}$$

Znając tę entalpię, można obliczyć jednostkowe **ciepło doprowadzone** do obiegu:

$$q_d = h_2 - h_1 = 3433,8 - 344,6 = 3089,2 \text{ kJ/kg}$$

Tak więc **sprawność** obiegu

$$\eta_{CR} = \frac{l_{t_{2-3}} - l_{t_{4-1}}}{q_d} = \frac{1007,1 - 4,1}{3089,2} = 0,3247 \cong 32,5\%$$

Sprawność maksymalna (obiegu odwracalnego):

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{273,15 + 81,35}{273,15 + 500} = 0,5415 \cong 54,15\%$$

przy czym $t_s = 81,35^\circ\text{C}$ dla ciśnienia 50 kPa.

Zadanie 13.2

Na wylocie z turbiny przeciwprężnej para ma ciśnienie 120 kPa i stopień suchości 0,96. Należy określić dla obiegu Clausiusa–Rankine’a: ciśnienie wlotowe do turbiny, jeżeli temperatura pary, ze względu na użyte materiały konstrukcyjne, ma nie przekraczać 450°C , a ponadto jednostkową pracę izentropowej ekspansji, sprawność obiegu i sprawność maksymalną. Naszkicować obieg na wykresach: $T-s$ i $h-s$.

Wyniki: $P_1 = 3,1 \text{ MPa}$, $l_{CR} = 749 \text{ kJ/kg}$, $\eta_{CR} = 0,2572 = 25,7\%$, $\eta_{max} = 0,4773 = 47,7\%$.

Zadanie 13.3

W obiegu Clausiusa–Rankine’a para wytworzona w kotle ma $6,0 \text{ MPa}$ i 500°C . Ciśnienie w skraplaczu wynosi 10 kPa . Obliczyć jednostkową pracę obiegu oraz sprawność i sprawność maksymalną. Naszkicować schemat urządzeń oraz przemiany obiegu na wykresach $P-v$, $T-s$ i $h-s$.

Wyniki: $l_{CR} = 1238 \text{ kJ/kg}$, $\eta_{CR} = 0,384 = 38,4\%$, $\eta_{max} = 0,587 = 58,7\%$.

Zadanie 13.4

Pracujący w obiegu Clausiusa–Rankine’a silnik parowy o mocy teoretycznej 50 kW zasilany jest parą suchą nasyconą o ciśnieniu $1,6 \text{ MPa}$. Temperatura pary w skraplaczu wynosi 50°C . Naszkicować schemat urządzeń realizujących obieg oraz przemiany obiegu na wykresach $P-v$, $T-s$ i $h-s$, a następnie obliczyć: jednostkową pracę techniczną ekspansji, zużycie pary przez silnik w kg/s , jednostkowe zużycie pary w kg/kWh , strumień ciepła: doprowadzonego w wytwornicy pary i wyprowadzonego w skraplaczu, strumień wody chłodzącej skraplacz, jeżeli przyrost temperatury wody w skraplaczu wynosi 20 K , a ciepło właściwe wody $4,2 \text{ kJ/kgK}$ oraz sprawność obiegu i jego sprawność maksymalną.

Wyniki: $l_{t_{2-3}} = 736 \text{ kJ/kg}$, $\dot{m} = 0,0679 \text{ kg/s}$, $\dot{m}/N = 4,89 \text{ kg/kWh}$, $\dot{Q}_d = 175,3 \text{ kW}$,

$\dot{Q}_w = -125,4 \text{ kW}$, $\dot{m}_w = 1,493 \text{ kg/s} = 5375 \text{ kg/h}$, $\eta_{CR} = 0,285\%$, $\eta_{max} = 0,319\%$.

Zadanie 13.5

Przez opuszczenie skraplacza w poprzednim zadaniu można zmniejszyć koszty budowy urządzenia. Do jakiej wartości pogorszy się sprawność obiegu, jeżeli ciśnienie otoczenia, do którego wydmuchiwana jest para, wynosi 100 kPa , a woda zasilająca kocioł ma 20°C ?

Wynik: $\eta_{CR} = 0,172 = 17,2\%$.

Zadanie 13.6

Rozpatrywany w zadaniu 13.4 obieg można usprawnić przez zastosowanie przegrzewacza pary. Jaka będzie sprawność obiegu z przegrzaniem pary do 300°C ? Wyznaczyć ponadto: jednostkową pracę techniczną ekspansji, zużycie pary przez silnik w kg/s , jednostkowe zużycie pary w kg/kWh , strumień ciepła: doprowadzonego w przegrzewaczu i wyprowadzonego w skraplaczu oraz sprawność obiegu i jego sprawność maksymalną.

Wyniki: $l_{t_{2-3}} = 829,3 \text{ kJ/kg}$, $\dot{m} = 0,0603 \text{ kg/s}$, $\dot{m}/N = 4,34 \text{ kg/kWh}$, $\dot{Q}_{d,prz} = 14,65 \text{ kW}$,

$\dot{Q}_w = -120,4 \text{ kW}$, $\eta_{CR} = 0,293 = 29,3\%$, $\eta_{max} = 0,436 = 43,6\%$.

Zadanie 13.7

W obiegu Clausiusa–Rankine’a para przegrzana dopływająca do turbiny ma $10,0 \text{ MPa}$ i 550°C . Rozpręża się ona izentropowo do 8 kPa . Woda zasilająca wytwornicę pary ma entalpię właściwą 175 kJ/kg . Naszkicować schemat urządzeń oraz przebieg zachodzących przemian na wykresach $T-s$ i $h-s$, a następnie obliczyć: (a) stopień suchości pary opuszczającej turbinę, jednostkową pracę techniczną maszyny, sprawność obiegu i jego sprawność maksymalną, (b) po zmianie schematu obiegu na taki, w którym po osiągnięciu ciśnienia 1 MPa przerywa się ekspansję i przegrzewa parę powtórnie do 550°C , obliczyć te same wielkości co w punkcie (a).

Wyniki: a) $x_3 = 0,807$, $l_{t_{2-3}} = 1387 \text{ kJ/kg}$, $\eta_{CR} = 0,415 = 41,5\%$, $\eta_{max} = 0,618 = 61,6\%$,

b) $x_5 = 0,957$, $l_{t_{2-3}} + l_{t_{4-5}} = 1756,5 \text{ kJ/kg}$, $\eta'_{CR} = 0,432 = 43,2\%$,

Zadanie 13.8

W obiegu Clausiusa–Rankine’a para wypływająca z wytwornicy ma ciśnienie 8 MPa i temperaturę 500°C. Jaka musi być temperatura końcowa wtórnego przegrzewu przy ciśnieniu 600 kPa, aby para opuszczająca turbinę po izentropowej ekspansji do 10 kPa miała stopień suchości nie niższy niż 95%? Naszkicować proces ekspansji w układach T–s i h–s.

Wynik: $t_{\min} = 421,6^\circ\text{C}$.

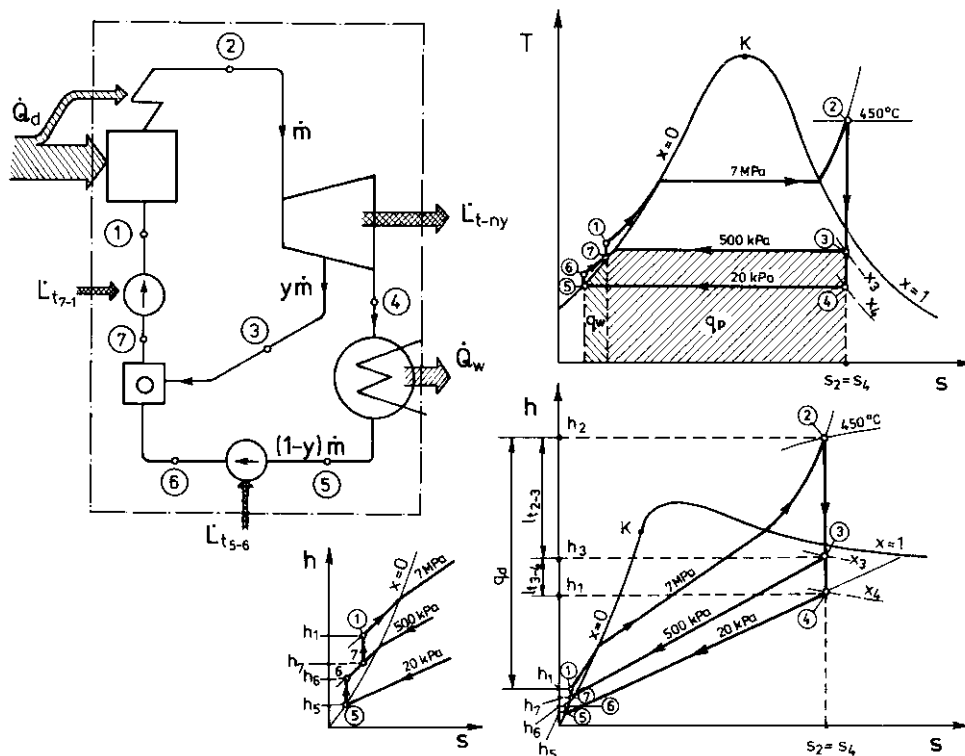
Zadanie 13.9

W obiegu Clausiusa–Rankine’a zmniejszono ciśnienie pary przed silnikiem z 10 MPa do 5 MPa, przy czym ciśnienie w skraplaczu, wynoszące 5 kPa nie uległo zmianie, podobnie jak temperatura pary dolotowej wynosząca w obydwu przypadkach 500°C. Naszkicować przemiany obu przypadków (np. odmiennymi barwami) na tych samych wykresach T–s i h–s, a następnie wyznaczyć: stopnie suchości pary po izentropowych ekspansjach i sprawności obydwu obiegów.

Wyniki: $x_3 = 0,774$, $x'_3 = 0,82$, $\eta_{\text{CR}} = 0,419 = 41,9\%$, $\eta'_{\text{CR}} = 0,395 = 39,5\%$.

Zadanie 13.10

W obiegu Clausiusa–Rankine’a para dopływająca do turbiny ma ciśnienie 7 MPa i temperaturę 450°C, a przeciwciepność za turbiną wynosi 20 kPa. Przy 500 kPa pobiera się z turbiny 10% całkowitego strumienia pary i kieruje do mieszkankowego podgrzewacza wody zasilającej – woda ta została uprzednio wstępnie sprężona do takiego ciśnienia, jakie ma para, tj. do 500 kPa. Ponieważ ilość pary jest dana, więc podgrzanie wody może nie osiągnąć temperatury nasycenia. Przedstawić schemat urządzeń, a przemiany obiegu naszkicować na wykresach T–s i h–s oraz wyznaczyć temperaturę podgrzanej wody zasilającej sprawność obiegu i jego sprawność maksymalną.



Rys. 13.2

Rozwiązanie

W podgrzewaczu mieszkankowym para zaczepowa skrapla się i przechładza do wspólnego z podgrzaną wodą zasilającą stanu 7. Ciepło oddane przez parę jest równe ciepłu przejętemu przez wodę, co prowadzi do następującego bilansu cieplnego:

$$|\dot{Q}_p| = \dot{Q}_w$$

a że proces przebiega przy stałym ciśnieniu, więc:

$$0,1 \dot{m} (h_3 - h_7) = 0,9 \dot{m} (h_7 - h_6)$$

Stąd niewiadomą entalpię po zmieszaniu:

$$h_7 = 0,1 h_3 + 0,9 h_6$$

można wyznaczyć, znając h_3 i h_6 .

Do określenia h_3 wyznaczamy najpierw dla parametrów pary przed turbiną z tablicy pary przegrzanej (lub na wykresie $h-s$) entalpię $h_2 = 3288,0$ kJ/kg i entropię $s_2 = 6,6350$ kJ/kgK, a następnie z warunku $s_2 = s_3$ obliczamy, za pomocą danych z tablicy pary nasyconej 5 stopień suchości pary zaczepowej:

$$x_3 = \frac{s_3 - s'_3}{s''_3 - s'_3} = \frac{6,6350 - 1,8604}{6,8215 - 1,8604} = 0,962$$

Gdyby para zaczepowa nie była mokra, jak założono wyżej, to byłoby: $s_2 = s_3 (= 6,6350) > s''_3 (= 6,8215$ kJ/kgK), co tutaj jednakże nie zachodzi.

Czerpiąc z tablicy 5 dalsze dane dla 500 kPa, obliczamy entalpię:

$$h_3 = h'_3 + x_3 \cdot r_3 = 640,1 + 0,962 \cdot 2108,4 = 2668,4 \text{ kJ/kg}$$

Do wyznaczenia entalpii wody dopływającej do podgrzewacza h_6 potrzebna jest, poza entalpią właściwą skroplin $h'_5 = 251,5$ kJ/kg, jeszcze praca sprężania tych skroplin od 20 kPa do 500 kPa w pompie I stopnia (skroplinowej):

$$|l_{t_{5-6}}| = v'_5 (P_6 - P_5) = 0,0010172 (500 - 20) = 0,49 \text{ kJ/kg}$$

Tak więc

$$h_6 = h'_5 + |l_{t_{5-6}}| = 251,5 + 0,49 = 251,99 \approx 252,0 \text{ kJ/kg}$$

Teraz można już obliczyć entalpię właściwą wody zasilającej za podgrzewaczem:

$$h_7 = 0,1 h_3 + 0,9 h_6 = 0,1 \cdot 2668,4 + 0,9 \cdot 252,0 = 493,6 \text{ kJ/kg}$$

W tablicy 6 pary przegrzanej pod ciśnieniem 500 kPa znajdujemy tę entalpię wśród entalpii cieczy pod tym ciśnieniem (nad kreską) i w drodze interpolacji znajdujemy poszukiwaną temperaturę

$$t_7 = 117,5^\circ\text{C}$$

Do wyznaczenia sprawności całego obiegu, trzeba najpierw wyznaczyć entalpię właściwą pary na wylocie z turbiny h_4 . W tym celu obliczamy stopień suchości tej pary (z warunku: $s_2 = s_3 = s_4$), przy użyciu danych z tablicy pary nasyconej dla 20 kPa:

$$x_4 = \frac{s_4 - s'_4}{s''_4 - s'_4} = \frac{6,6350 - 0,8321}{7,909 - 0,8321} = 0,820$$

a następnie

$$h_4 = h'_4 + x_4 \cdot r_4 = 251,5 + 0,82 \cdot 2358,2 = 2185,1 \text{ kJ/kg}$$

Jednostkowe prace techniczne izentropowych ekspansji wynoszą:

$$l_{t_{2-3}} = h_2 - h_3 = 3288,0 - 2668,4 = 619,6 \text{ kJ/kg}$$

$$l_{t_{3-4}} = h_3 - h_4 = 2668,4 - 2185,1 = 483,3 \text{ kJ/kg}$$

$$L_{t-ny} = \dot{m} l_{t_{2-3}} + 0,9 \dot{m} l_{t_{3-4}}$$

Jednostkowa praca obydwu stopni turbiny:

$$l_{t-ny} = \frac{L_{t-ny}}{\dot{m}} = l_{t_{2-3}} + 0,9 \cdot l_{t_{3-4}} = 619,6 + 0,9 \cdot 483,3 = 1054,6 \text{ kJ/kg}$$

Praca pompy zasilającej II stopnia:

$$|l_{t_{7-1}}| = v_7 (P_1 - P_7) = 0,001058 (7\,000 - 500) = 6,88 \text{ kJ/kg}$$

Objętość właściwą wody v_7 zaczerpnięto z tablicy 6 pary przegrzanej dla 500 kPa i 117,5°C. Łączna praca sprężania wody w pompach:

$$l_{p-p} = 0,9 \cdot l_{t_{5-6}} + l_{t_{7-1}} = 0,9 \cdot 0,49 + 6,88 = 7,32 \text{ kJ/kg}$$

Praca obiegu netto

$$l_{CR} = l_{t-ny} - l_{p-p} = 1054,6 - 7,3 = 1047,3 \text{ kJ/kg}$$

Ciepło doprowadzone do obiegu

$$q_d = h_2 - h_1 = h_2 - (h_7 + |l_{t_{7-1}}|) = 3288,0 - (493,6 + 6,88) = 2787,5 \text{ kJ/kg}$$

Sprawność obiegu:

$$\eta_{CR} = \frac{l_{CR}}{q_d} = \frac{1054,6}{2787,5} = 0,3781 = 37,8\%$$

Sprawność maksymalna obiegu:

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{273,15 + 60,9}{273,15 + 450} = 0,5392 = 53,9\%$$

Zadanie 13.11

Obliczyć masowy strumień pary w przedupustowej części turbiny zasilanej parą o ciśnieniu 1,8 MPa i temperaturze 450°C, jeżeli ciśnienie pary upustowej wynosi 150 kPa, a jej strumień masy 1,5 kg/s. W skraplaczu panuje ciśnienie 5 kPa, zaś teoretyczna moc wynosi 108 kW.

Wynik: $\dot{m} = 0,7658 \text{ kg/s}$.

Zadanie 13.12

Dla poprawienia sprawności obiegu Clausiusa - Rankine'a na parę przegrzaną o ciśnieniu 10 MPa i temperaturze 600°C oraz o ciśnieniu w skraplaczu 10 kPa zastosowano dwa zaczepty pary z turbiny o ciśnieniach 1 MPa i 200 kPa dla regeneracyjnego podgrzewania wody zasilającej. Strumienie masy pary (α , β) mają każdorazowo być tak wielkie, by w każdym z podgrzewaczy mieszkankowych woda osiągała temperaturę nasycenia odpowiednią dla ciśnienia zaczepty. Obliczyć sprawność obiegu podstawowego, a następnie względne ilości pary zaczepty α i β oraz sprawność obiegu z regeneracyjnym 2-stopniowym podgrzewaniem wody zasilającej. Wzrost entalpii w pompach należy w tym zadaniu pominąć i do obliczeń wprowadzać tylko entalpie cieczy nasyconej dla odpowiednich ciśnień.

Wyniki: $\eta_{CR} = 0,419 = 41,9\%$, $\alpha = 0,106$, $\beta = 0,115$, $\eta'_{CR} = 0,457 = 45,7\%$.

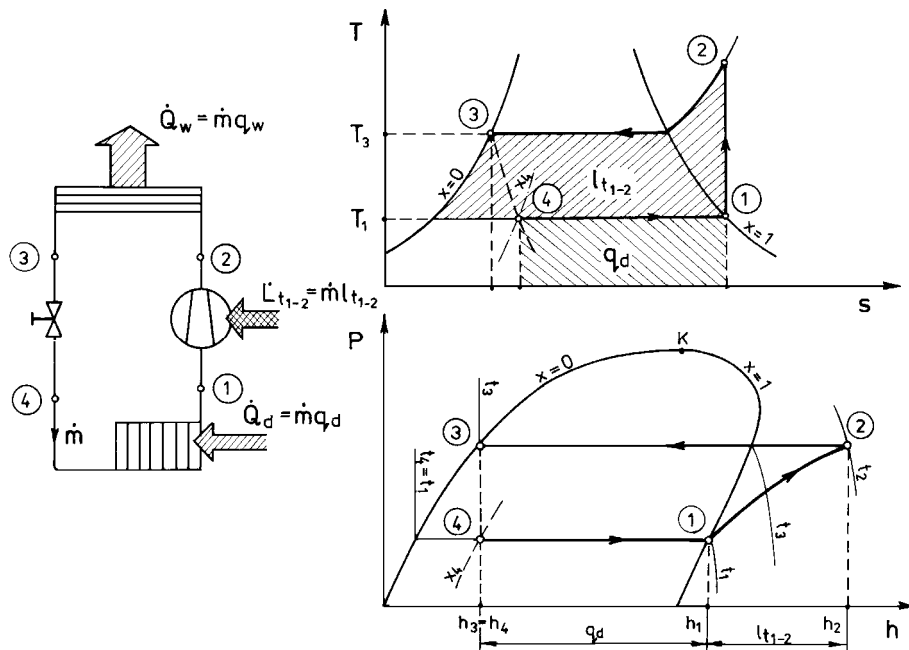
Zadanie 13.13

W obiegu Lindego, działającego jako chłodziarka, temperatura parowania amoniaku (NH_3) wynosi -10°C , a temperatura skraplania $+20^\circ\text{C}$. Jaka jest sprawność obiegu i jego sprawność maksymalna w przypadku, gdy skropliny amoniaku nie są przechładzane? Jaki jest stopień suchości powstałej po dławieniu zimnej pary amoniaku?

Rozwiązanie

Do obliczenia **ciepła doprowadzonego** w parowniku odczytuje się z tablicy 7 pary nasyconej amoniaku entalpię właściwą pary suchej nasyconej $h_1 = h''_{-10^\circ} = 1750,5 \text{ kJ/kg}$ i entalpię właściwą cieczy nasyconej $h_3 = h'_{+20^\circ} = 593,7 \text{ kJ/kg}$ równą entalpii właściwej powstałej po dławieniu zimnej pary amoniaku h_4 . Tak więc

$$q_d = h_1 - h_4 = 1750,5 - 593,7 = 1156,8 \text{ kJ/kg}$$



Rys. 13.3

Do określenia **technicznej pracy sprężania** odczytuje się entalpie właściwe przed h_1 i po sprężaniu h_2 z wykresu P-h:

$$l_{t_{1-2}} = h_1 - h_2 = 1750,5 - 1901 = -150,5 \text{ kJ/kg}$$

Tak więc **sprawność** obiegu chłodniczego:

$$\varepsilon_{ch} = \frac{q_d}{|l_{t_{1-2}}|} = \frac{1156,8}{150,5} = 7,69$$

Sprawność maksymalna obiegu odwracalnego:

$$\varepsilon_{max} = \frac{T_1}{T_3 - T_1} = \frac{273,15 - 10}{(273,15 + 20) - (273,15 - 10)} = 8,77$$

Stopień suchości powstałej po dławieniu zimnej pary wyznacza się z warunku równości entalpii właściwych

$$h_3 = h_4 = h'_4 + x_4 r$$

czyli

$$x_4 = \frac{h_3 - h'_4}{r} = \frac{593,7 - 451,1}{1299,4} = 0,1097$$

Zadanie 13.14

Na ile można zwiększyć sprawność obiegu z poprzedniego zadania przez dochładzanie powstałych przy $+20^\circ\text{C}$ skroplin do temperatury $+12^\circ\text{C}$? Jaki będzie w tym przypadku stopień suchości zimnej pary amoniaku?

Wyniki: $\varepsilon'_{\text{ch}} = 7,94$, $x'_4 = 0,081$.

Zadanie 13.15

Obliczyć pojemność skokową cylindra idealnej sprężarki dwustronnego działania, która w warunkach poprzedniego zadania (13.14) ma zapewnić wydajność chłodniczą obiegu, wynoszącą 120 kW, przy częstości obrotów 115 obr./min. Jaka będzie teoretyczna moc napędowa sprężarki?

Wyniki: $\dot{m} = 0,1004 \text{ kg/s}$, $V_{\text{sk}} = 0,01095 \text{ m}^3 \cong 111$, $N_{\text{teor}} = 15,1 \text{ kW}$.

Zadanie 13.16

Na ile można by poprawić sprawność obiegu chłodniczego z zadania 13.13 przez zastosowanie izentropowej rozprężarki zamiast zaworu dławiącego? Naszkicować schemat urządzeń obiegu i przebieg przemian na wykresach T-s i P-h.

Wyniki: $x_{4s} = 0,101$, $\varepsilon_{\text{ch}} = 8,40$.

Zadanie 13.17

Pompa ciepła działająca według obiegu Lindego, z amoniakiem NH_3 jako płynem roboczym, może służyć do chłodzenia pomieszczeń latem, a ogrzewania ich zimą. Aby to osiągnąć, wystarczy by radiatory w pomieszczeniu pełniły rolę parownika ciekłego amoniaku latem, a po odpowiednim przełączeniu zimą stawały się skraplaczami pary amoniaku. Wyznaczyć teoretyczną moc napędową sprężarki oraz sprawność i sprawność maksymalną, działającego jako grzejna pompa ciepła, takiego obiegu o wydajności cieplnej 15 kW przy temperaturze skraplania NH_3 w radiatorze 50°C i temperaturze parownika pobierającego ciepło z otoczenia w temperaturze 0°C . Przedstawić schemat urządzeń oraz przemiany obiegu na wykresach T-s i P-h.

Wyniki: $l_{t_{1-2}} = -229,6 \text{ kJ/kg}$, $q_w = -1251,8 \text{ kJ/kg}$, $\dot{m} = 0,012 \text{ kg/s}$, $N_{\text{teor}} = 2,75 \text{ kW}$,
 $\varepsilon_g = 5,45$, $\varepsilon_{\text{max}} = 6,46$.

Zadanie 13.18

Urządzenie klimatyzacyjne z zadania 13.17 działa latem jako chłodnicza pompa ciepła. Obliczyć sprawność i sprawność maksymalną w tym przypadku, jeżeli radiator, w którym wrze NH_3 , ma temperaturę 10°C , a ciepło oddawane jest do atmosfery przy temperaturze wynoszącej 40°C w skraplaczu. Jaka jest wydajność chłodnicza $\dot{Q}_d$ i teoretyczna moc napędowa sprężarki, jeżeli częstość obrotów, a tym samym zasysany przez sprężarkę tłokową strumień objętości pary $\dot{V}''_1$, pozostają niezmiennione?

Wyniki: $l_{t_{1-2}} = -133,6 \text{ kJ/kg}$, $q_d = 1082 \text{ kJ/kg}$, $\dot{m} = 0,0169 \text{ kg/s}$, $\dot{Q}_d = 18,3 \text{ kW}$,
 $N_{\text{teor}} = 2,26 \text{ kW}$, $\varepsilon = 8,10$, $\varepsilon_{\text{max}} = 9,44$.

14. EFEKT JOULE'A-THOMSONA, SKRAPLANIE POWIETRZA

Zadanie 14.1

Wyznaczyć, za pomocą wykresu T - s dla powietrza, całkowity efekt Joule'a-Thomsona w przypadku dławienia powietrza od 15 MPa i 25°C do 100 kPa oraz podać temperaturę powietrza za zaworem dławiącym.

Wyniki: $\Delta T_{JT} = 29$ K, $t_2 = -4^\circ\text{C}$.

Zadanie 14.2

Jaki będzie całkowity efekt Joule'a-Thomsona w przypadku, gdy powietrze sprężone, z poprzedniego zadania, zostanie oziębione wstępnie chłodziarką amoniakalną do -30°C ?

Wyniki: $\Delta T_{JT} = 45$ K, $t_2 = -75^\circ\text{C}$.

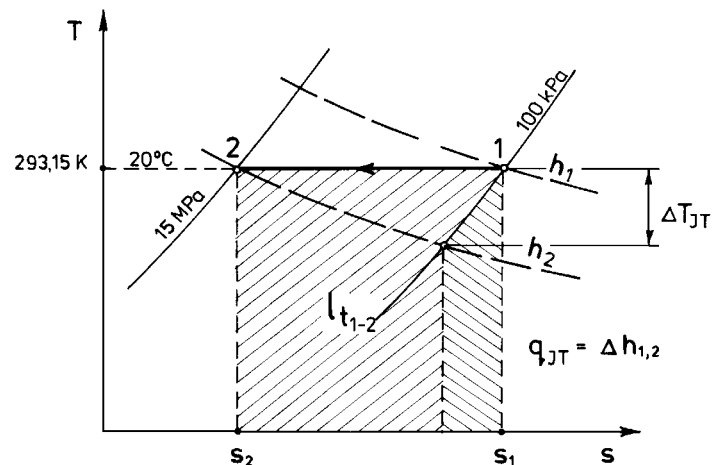
Zadanie 14.3

Jakie musi być początkowe ciśnienie powietrza z zad. 14.1, aby po jego zdławieniu do 100 kPa uzyskany całkowity efekt Joule'a-Thomsona był największy? Ile wynosi ta maksymalna wartość?

Wyniki: $P_1 = 40$ MPa, $\Delta T_{JT} = 53$ K.

Zadanie 14.4

Jakie są wartości ciepła i pracy technicznej, podczas izotermicznego przy $t = 20^\circ\text{C}$, sprężania 1 kg powietrza od 100 kPa do 15 MPa przy założeniu, że powietrze jest: (a) gazem doskonałym o właściwościach określonych przez $R = 287$ Nm/kg·K i $c_p = 1,005$ kJ/kgK, (b) gazem rzeczywistym o właściwościach określonych przez wykres T - s ?



Rys. 14.1

Rozwiązanie

a) Dla gazu doskonałego jest: $h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) = 0$ i z I zasady termodynamiki mamy:

$$q_{1-2} = l_{t1-2} = RT \ln \frac{P_1}{P_2} = 0,287 \cdot 293,15 \ln \frac{100}{15\,000} = -421,6 \text{ kJ/kg}$$

b) Dla gazu rzeczywistego korzystamy z danych odczytanych na wykresie T–s:

$$q_{1-2} = T (s_2 - s_1) = 293,15 (67,6 - 112) = -13016 \text{ kJ/kmol} = -449,4 \text{ kJ/kg}.$$

Pracę techniczną obliczamy z równania I zasady termodynamiki:

$$q_{1-2} = h_2 - h_1 + l_{t_{1-2}}$$

z którego mamy:

$$l_{t_{1-2}} = q_{1-2} - (h_2 - h_1) = q_{1-2} + (h_1 - h_2),$$

a po podstawieniu już obliczonego q_{1-2} i obydwu entalpii z wykresu T–s:

$$l_{t_{1-2}} = -449,4 + \frac{12\,195 - 11\,335}{28,96} = -449,4 + 29,7 = -419,7 \text{ kJ/kg}$$

Praca techniczna jest, jak widać, praktycznie biorąc taka sama w obu przypadkach – rozbieżność wyników nie przekracza 0,5%. Natomiast ciepła przemiany różnią się o wartość ciepła kompensacji efektu Joule’a–Thomsona:

$$q_{JT} = h_1 - h_2 = 29,7 \text{ kJ/kg}.$$

Właśnie odprowadzenie tego ciepła przed późniejszym dławieniem jest przyczyną powstania efektu chłodniczego po zdławieniu powietrza. Całkowity efekt Joule’a–Thomsona wynosi w tym przypadku:

$$\Delta T_{JT} = 29 \text{ K}$$

Zadanie 14.5

Obliczyć ciepło i pracę techniczną izotermicznego, przy 300 K, sprężania 1 kg powietrza od 100 kPa do 20 MPa, traktując powietrze jak: (a) gaz doskonały ($R = 287 \text{ Nm/kgK}$, $c_p = 1,005 \text{ kJ/kgK}$) oraz (b) gaz rzeczywisty (wykres T–s). Wyznaczyć ponadto całkowity efekt dławienia. Naszkicować wykres T–s i zaznaczyć na nim pola obliczonych wielkości cieplnych.

Wyniki: a) $q_{1-2} = l_{t_{1-2}} = -456 \text{ kJ/kg}$, ($\Delta T_{JT} = 0$);

b) $q_{1-2} = -487 \text{ kJ/kg}$, $l_{t_{1-2}} = -450 \text{ kJ/kg}$, $\Delta T_{JT} = 37 \text{ K}$.

Zadanie 14.6

Jaka jest minimalna praca skroplenia 1 kg powietrza z otoczenia o ciśnieniu 100 kPa i temperaturze 20°C?

Wynik: $l_{t_{\min}} = -712,6 \text{ kJ/kg}$.

Zadanie 14.7

Sprężone powietrze z zadaniu 14.1 zamiast do zaworu dławiącego zostaje skierowane do rozprężarki adiabatycznej. Z jaką temperaturą opuści ono maszynę: (a) idealną – izentropową i (b) rzeczywistą o sprawności wewnętrznej $\eta_i = 0,7$? Naszkicować przemiany w układzie T–s.

Wyniki: a) $T_{2s} = 81,5 \text{ K}$ (para mokra), b) $T_2 = 128 \text{ K}$.

Zadanie 14.8

Określić temperaturę, z jaką powietrze o początkowych parametrach: 2,5 MPa i 15°C opuszcza rozprężarkę adiabatyczną o sprawności wewnętrznej $\eta_i = 0,75$, jeżeli ciśnienie po rozprężeniu wynosi 0,5 MPa. Jaka byłaby ta temperatura w przypadku rozprężania izentropowego? Naszkicować przemiany na wykresie T–s.

Wyniki: $T_2 = 207 \text{ K}$, $T_{2s} = 181 \text{ K}$.

Zadanie 14.9

Urządzenie do skraplania powietrza, wykorzystujące chłodzący efekt Joule’a–Thomsona, zasilane jest powietrzem sprężonym do 20 MPa, mającym temperaturę 300 K. Jaka jest wydajność masowa skroplonego powietrza w przypadku teoretycznym, gdy nie ma strat ciepłych („strat zimna”), a nieskroplona część powietrza opuszcza aparat podgrzana do tej samej temperatury, jaką ma powietrze sprężone na wejściu? Jaka będzie wydajność aparatu rzeczywistego, do którego napływa przez izolację 5,5 kJ ciepła na każdy 1 kg powietrza sprężonego, a rozprężone do 100 kPa powietrze opuszcza przeciwną wymiennik ciepła z temperaturą o 5 K niższą od temperatury powietrza sprężonego? Naszkicować przemiany na wykresie T–s.

Wyniki: $y_{\text{teor}} = 0,085 = 8,5\%$, $y = 0,0587 = 5,9\%$.

Zadanie 14.10

Skraplarkę z poprzedniego zadania zaopatrzone w rozprężarkę adiabatyczną o sprawności wewnętrznej $\eta_i = 0,6$ i puszczono do niej 62% całkowitego strumienia powietrza sprężonego do 20 MPa. Obliczyć masową wydajność skraplania, gdy względne ciepło wnikające do aparatu wynosi $q_{\text{ot}} = 6,5 \text{ kJ/kg}$. Jaka jest temperatura powietrza opuszczającego rozprężarkę przy ciśnieniu 100 kPa?

Rozwiązanie

Bilans energetyczny urządzenia skraplającego (bez sprężarki), jako termodynamicznego systemu otwartego (rys. 14.2) przedstawia się następująco (zmiany energii potencjalnej i kinetycznej są pomijalnie małe):

$$\dot{m} \cdot h_2 + \dot{m} q_{\text{ot}} = \dot{m} l_i + y \dot{m} h'_4 + (1 - y) \dot{m} h_6$$

Stąd wydajność:

$$y = \frac{l_i + (h_6 - h_2) - q_{\text{ot}}}{h_6 - h'_4}$$

Jednostkową pracę wewnętrzną, adiabatycznej rozprężarki (silnika) oblicza się ze wzoru:

$$l_i = 0,62 \cdot \eta_i \Delta h_s = 0,62 \cdot \eta_i (h_2 - h_{2s})$$

otrzymując po podstawieniu entalpii odczytanych na wykresie T–s:

$$l_i = 0,62 \cdot 0,6 \cdot (11340 - 5220) = 2276,6 \text{ kJ/kmol}$$

Odczytujemy następne entalpie z wykresu T–s: $h_6 = 12\,227 \text{ kJ/kmol}$ i $h'_4 = 0$ i podstawiamy wraz z l_i do wzoru na y :

$$y = \frac{2276,6 + (12\,227 - 11\,340) - 6,5 \cdot 28,96}{12\,400 - 0} = 0,240 = 24,0\%$$

Do określenia temperatury powietrza wypływającego z rozprężarki korzystamy z zależności:

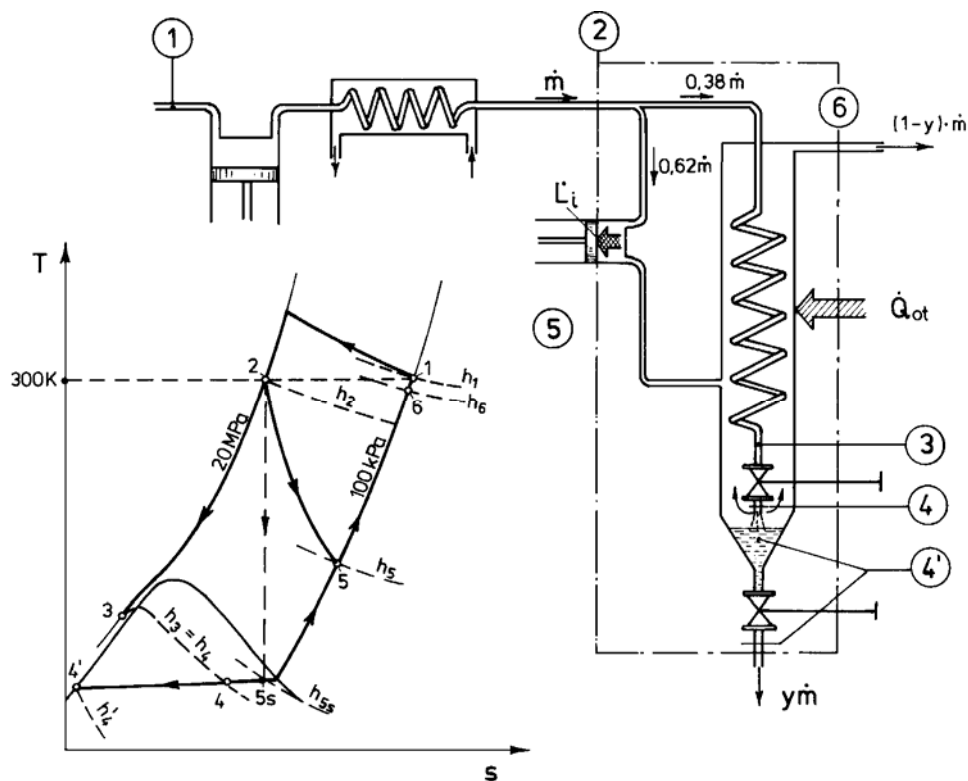
$$\eta_i = \frac{l_i}{l_s} = \frac{h_2 - h_5}{h_2 - h_{5s}} = 0,6$$

z której wyznaczamy poszukiwaną entalpię h_5 , a następnie podstawiamy, odczytaną na wykresie T-s, entalpię $h_{5s} = 5\,220$ kJ/kmol, otrzymując:

$$h_5 = h_2 - \eta_i \cdot (h_2 - h_{5s}) = 11\,340 - 0,6 (11\,340 - 5\,220) = 7\,668 \text{ kJ/kmol}$$

Izentalpa o tej wartości przecina izobarę $P_5 = 100$ kPa w punkcie 5, w którym temperatura wynosi:

$$T_5 = 140 \text{ K}$$



Rys. 14.2

Zadanie 14.11

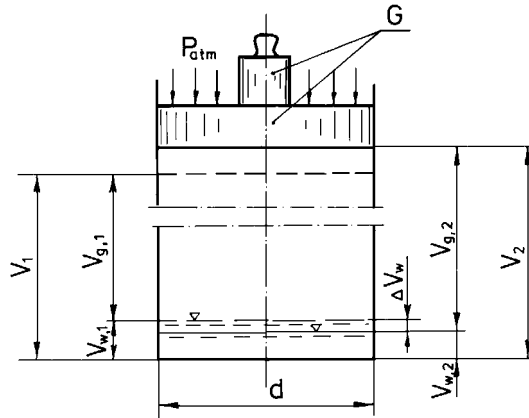
Ile wynosi praca skraplania powietrza w skraplarkach z obu poprzednich zadań (14.9 i 14.10), jeżeli powietrze do nich podawane jest przez sprężarkę o izotermicznej sprawności $\eta_{iz} = 0,61$? Obliczyć dla porównania minimalną pracę skraplania powietrza o parametrach: $P_{ot} = 100$ kPa i $T_{ot} = 300$ K.

Wyniki: $l_{t(9)} = 12\,676$ kJ/kg = 3,52 kWh/kg, $l_{t(10)} = 3\,116$ kJ/kg = 0,87 kWh/kg,
 $l_{t_{min}} = 740$ kJ/kg = 0,205 kWh/kg.

15. STANY I PRZEMIANY GAZÓW WILGOTNYCH

Zadanie 15.1

W naczyniu o kształcie pionowego cylindra zamkniętego ruchomym tłokiem znajdowała się woda w ilości $m_w = 1$ kg, przykryta folią nieprzepuszczającą pary wodnej. Między folią a tłokiem znajdowało się suche powietrze w ilości $m_g = 0,1$ kg. Temperatura całości wynosiła $t = 20^\circ\text{C}$. Cylinder ma średnicę wewnętrzną $d = 200$ mm, a ciężar tłoka i obciążnika (rys. 15.1) wynosi $G = 1$ kN. Ciśnienie barometryczne wynosi 100 kPa. W pewnej chwili folię usunięto i woda zaczęła parować. Parowanie trwało aż do osiągnięcia stanu równowagi, w którym powietrze zostało nasycone parą. Zakładając, że temperatura całości nie uległa zmianie, oraz że nie wszystka woda odparowała, określić: ciśnienia składnikowe pary i powietrza suchego pod tłokiem w końcowym stanie równowagi, to ile wody odparowało i przeszło jako para do przestrzeni pod tłokiem po zdjęciu folii oraz o ile opadł poziom zwierciadła cieczy i o ile podniósł się tłok.



Rys. 15.1

Rozwiązanie

Ustalimy najpierw jaką objętość zajmowała woda, a jaką powietrze suche przed zdjęciem folii. Potrzebna jest informacja o ciśnieniu, jakie panowało pod tłokiem. Ciśnienie to pochodzi od nacisku tłoka z obciążnikiem o łącznej masie $G = 1$ kN i ciśnieniu jakie wywiera powietrze atmosferyczne:

$$P = \frac{G}{A} + P_{\text{atm}}$$

przy czym powierzchnia tłoka:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,2)^2}{4} = 0,0314 \text{ m}^2$$

Zatem ciśnienie pod tłokiem wynosi:

$$P = \frac{1,0}{0,0314} + 100 = 131,85 \text{ kPa}$$

i pozostaje stałe podczas całego procesu, gdyż tłok jest ruchomy.

Objętości właściwej wody pod tym ciśnieniem i w temperaturze 20°C poszukujemy w tablicy 6 pary przegrzanej w wierszach nad poziomą kreską, gdzie podane są wielkości dla wody. Mamy kolumny dla ciśnień 100 kPa i 500 kPa, a w nich odpowiednio $v =$

$0,0010017 \text{ m}^3/\text{kg}$ i $v = 0,0010015 \text{ m}^3/\text{kg}$ – z interpolacji dla $131,85 \text{ kPa}$ otrzymuje się $v = 0,0010017 \text{ m}^3/\text{kg}$ (tyle samo jest dla 20°C z tablicy pary nasyconej). Z wystarczającą dokładnością możemy zatem określić objętość właściwą wody jako:

$$v_w = 0,0010 \text{ m}^3/\text{kg}$$

a objętość wody w cylindrze na początku:

$$V_{w,1} = m_w \cdot v_w = 1,0,0010 = 0,001 \text{ m}^3$$

Objętość, jaką zajmowało powietrze suche przed zdjęciem folii, określamy z równania stanu gazów:

$$V_{g,1} = \frac{m_g R_g T}{P} = \frac{0,1 \cdot 0,287 \cdot 293,15}{131,85} = 0,0638 \text{ m}^3$$

Aby tę objętość pomieścić, cylinder o średnicy 200 mm musi mieć długość wewnętrzną 2030 mm .

Rozpatrzmy teraz stan końcowy, jaki się ustalił w następstwie parowania wody do powietrza po zdjęciu folii: jest to stan nasycenia powietrza parą, proces parowania się zatrzymał, mamy powietrze wilgotne w stanie równowagi. Ta mieszanina powietrza suchego i pary wodnej ma temperaturę 20°C i zajmuje wspólną objętość $V_{g,2} = V_{p,2}$, a ciśnienie składnikowe powietrza suchego i pary wodnej dają w sumie ciśnienie całej mieszaniny:

$$P_g + P_p = P = 131,85 \text{ kPa}$$

Ciśnienie składnikowe pary P_p jest ciśnieniem nasycenia P_s dla temperatury 20°C : $P_p = P_s = 2,337 \text{ kPa}$ odczytanym z tablicy 4 pary nasyconej. Powyższe pozwala obliczyć ciśnienie składnikowe powietrza suchego:

$$P_g = P - P_p = 131,85 - 2,337 = 129,49 \text{ kPa}$$

a to z kolei umożliwia wyznaczenie, z równania stanu, objętości tego powietrza:

$$V_{g,2} = \frac{m_g R_g T}{P_g} = \frac{0,1 \cdot 0,287 \cdot 293,15}{129,49} = 0,0650 \text{ m}^3$$

W tej samej objętości znajduje się para wodna nasycona, a ilość jej możemy określić z równania stanu dla pary:

$$m_p = \frac{P_p V_{p,2}}{R_p T} = \frac{2,337 \cdot 0,0650}{0,4615 \cdot 293,15} = 0,00112 \text{ kg}$$

Jest to jednocześnie odpowiedź na pytanie, jaka masa wody odparowała: $m_p = \Delta m_w = 1,12 \text{ g}$. Mając tę informację, można wyznaczyć ubytek objętości wody:

$$\Delta V_w = \Delta m_w v_w = 0,00112 \cdot 0,001 = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

ten ubytek spowodował obniżenie się zwierciadła cieczy o:

$$\Delta y_w = \frac{\Delta V}{A} = \frac{1,12 \cdot 10^{-6}}{0,0314} = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

co jest wielkością niezauważalną gołym okiem.

Objętość wody w stanie końcowym jest więc (prawie) taka sama jak w stanie początkowym:

$$V_{w,2} = V_{w,1} - \Delta V = 0,001 - 0,00000112 = 0,00099998 \cong 0,001 \text{ m}^3$$

Objętość pod tłokiem w stanie początkowym wynosiła:

$$V_2 = V_{g,2} + V_{w,2} = 0,0650 + 0,001 = 0,0660 \text{ m}^3$$

Zmiana objętości wynosi:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 0,0660 - 0,0648 = 0,0012 \text{ m}^3$$

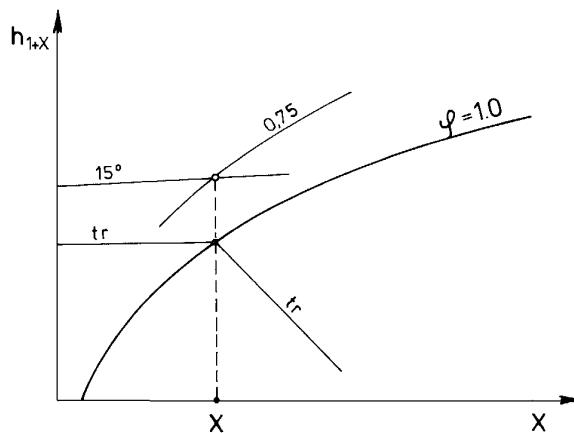
Zmiana położenia tłoka wyniesie wobec tego

$$\Delta y_t = \frac{\Delta V}{A} = \frac{0,0012}{0,0314} = 0,0382 \text{ m} = 38,2 \text{ mm}$$

W stosunku do całej wysokości płynów pod tłokiem 2030 mm jest to niecałe 2%.

Zadanie 15.2

Powietrze wilgotne o ciśnieniu 100 kPa i temperaturze 15°C ma wilgotność względną $\varphi = 0,75$. Obliczyć: ciśnienia składnikowe: pary wodnej P_p i powietrza suchego P_g , zawilżenie powietrza (zawartość wilgoci) X , temperaturę rosy t_r , tj. temperaturę pojawienia się kropelek wody podczas oziębiania powietrza przy $X = \text{const}$, wilgotność bezwzględną ρ_p , objętość jednostkową v_{1+x} , zastępczą stałą gazową powietrza wilgotnego R , gęstość powietrza wilgotnego ρ oraz objętość właściwą powietrza wilgotnego v .



Rys. 15.2

Rozwiązanie

Ciśnienie składnikowe pary wodnej możemy obliczyć ze znanej wilgotności względnej φ :

$$P_p = \varphi P_s = 0,75 \cdot 1,7041 = 1,278 \text{ kPa}$$

przy tym $P_s = 1,7041 \text{ kPa}$ jest ciśnieniem nasycenia pary wodnej, odczytanym (z załączonej tablicy 4 pary nasyconej) dla temperatury 15°C. Ciśnienie składnikowe powietrza suchego P_g jest uzupełnieniem ciśnienia pary do ciśnienia całej mieszaniny $P = 100 \text{ kPa}$.

Zatem:

$$P_g = P - P_p = 100 - 1,278 = 98,722 \text{ kPa}$$

Zawilżenie powietrza obliczamy ze wzoru:

$$X = 0,621 \frac{\varphi P_s}{P - \varphi P_s} = 0,622 \frac{0,75 \cdot 1,7039}{100 - 0,75 \cdot 1,7039} = 0,00805 \text{ kg/kg} = 8,05 \text{ g/kg}$$

Temperatura rosy jest temperaturą odpowiadającą ciśnieniu nasycenia pary przy powyższej zawartości wilgoci ale dla $\varphi = 1$, czyli dla:

$$P_p = 1,278 \text{ kPa} = P_s(t_r)$$

Mamy bowiem przy tej samej zawartości wilgoci $X = 8,05 \text{ g/kg}$ p.s. zarówno w rozpatrywanym stanie jak i po ochłodzeniu do t_r , równość:

$$X = \frac{0,622 P_p}{P - P_p} = \frac{0,622 P_s(t_r)}{P - P_s(t_r)} = X_s$$

po rozwiązaniu której otrzymuje się powyższy wzór na P_p .

Z tablicy pary nasyconej 5 znajdujemy dla powyższego ciśnienia: $t_r = 10,6^\circ\text{C}$. Wilgotność bezwzględna może być obliczona z równania stanu dla pary pod jej ciśnieniem składnikowym, jest to bowiem gęstość pary wodnej w tych warunkach:

$$\rho_p = \frac{P_p}{R_p T} = \frac{1,278}{0,4615 \cdot 288,15} = 0,00961 \text{ kg/m}^3$$

R_p jest tu indywidualną stałą gazową pary wodnej, wynoszącą $0,4615 \text{ kNm/kgK}$.

Do obliczenia objętości gazu wilgotnego przypadającą na każdy 1 kg gazu suchego korzystamy ze wzoru:

$$v_{1+x} = \frac{0,4615 \cdot T}{P} (0,622 + X) = \frac{0,4615 \cdot 288,15}{100} (0,622 + 0,00805) = 0,838 \text{ m}^3 / \text{kg p.s.}$$

Zastępczą stałą gazową powietrza wilgotnego określamy z zależności:

$$R = 0,4615 \frac{0,622+X}{1+X} = 0,4615 \frac{0,622+0,00805}{1+0,00805} = 0,288 \text{ kNm/kgK}$$

Gęstość powietrza wilgotnego obliczamy używając równania stanu dla powietrza wilgotnego jako całości:

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{100}{0,288 \cdot 288,15} = 1,205 \text{ kg/m}^3$$

Objętość właściwa gazu wilgotnego jest odwrotnością gęstości, a więc:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,205} = 0,830 \text{ m}^3/\text{kg}$$

i jest odniesiona do 1 kg powietrza wilgotnego (mieszaniny).

Zadanie 15.3

Znany jest stan powietrza wilgotnego przez podaną temperaturę $t = 40^\circ\text{C}$, ciśnienie $P = 101 \text{ kPa}$ i zawartość wilgoci $X = 55 \text{ g/kg p.s.}$ Określić: entalpię powietrza wilgotnego h_{1+x} , energię cieplną (energię wewnętrzną) powietrza wilgotnego u_{1+x} .

Rozwiązanie

Na podstawie danych zadania nie potrafimy bez dodatkowych przeliczeń stwierdzić, czy powietrze jest nienasycone, nasycone czy przesycone. Należy określić zawartość wilgoci, jaka maksymalnie może wystąpić w postaci pary, w warunkach zadania:

$$X_{\max} = 0,622 \frac{P_s}{P - P_s} = 0,622 \cdot \frac{7,375}{101 - 7,375} = 0,0490 \text{ kg/kg} = 49,0 \text{ g/kg p.s.}$$

gdzie: $P_s = 7,375 \text{ kPa}$ odczytane z tablicy 4 dla 40°C .

Widzimy teraz, iż dane $X = 55 > 49 = X_{\max}$, co oznacza, że powietrze jest przesycone. Entalpię określa w tym przypadku wzór (słuszny dla $t > 0^\circ\text{C}$):

$$h_{1+x} = 1,005 t + X_{\max} (2501 + 1,86 t) + (X - X_{\max}) h_w$$

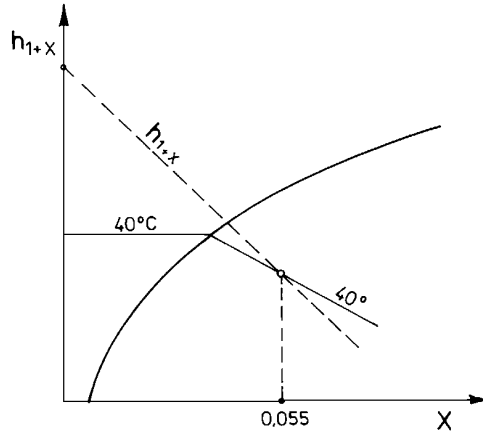
gdzie: h_w – entalpia wody obliczana jako:

$$h_w = c_w t = 4,19 t \text{ [kJ/kg]}$$

Podstawiając dane do wzoru na entalpię powietrza przesyconego, otrzymujemy:

$$h_{1+x} = 1,005 \cdot 40 + 0,049 (2501 + 1,86 \cdot 40) + (0,055 - 0,049) \cdot 4,19 \cdot 40 = 167,39 \text{ kJ/kg p.s.}$$

Wynik powyższy można uzyskać szybciej, chociaż o mniejszej dokładności, bezpośrednio z wykresu $h-X$, jak pokazano na rys. 15.3.



Rys. 15.3

Energię cieplną obliczamy jako sumę energii cieplnej powietrza nasyconego i energii cieplnej wody występującej w postaci kroplek (mgły):

$$u_{1+x} = u_{1+x_{\max}} + u_{\text{kropli}}$$

Energię powietrza nasyconego określamy z równania definicyjnego entalpii tego powietrza:

$$u_{1+x_{\max}} = h_{1+x_{\max}} - P v_{1+x_{\max}}$$

Przy czym entalpia:

$$\begin{aligned} h_{1+x_{\max}} &= c_{p_p} \cdot t + X_{\max} (2501 + 1,86 \cdot t) = 1,005 \cdot 40 + 0,049(2501 + 1,86 \cdot 40) = \\ &= 166,38 \text{ kJ/kg p.s.} \end{aligned}$$

a objętość właściwa:

$$v_{1+x_{\max}} = \frac{R_p T}{T} (0,622 + X_{\max}) = \frac{0,4615 \cdot 313,15}{101} (0,622 + 0,049) = 0,960 \text{ m}^3/\text{kg p.s.}$$

Tak więc:

$$u_{1+x_{\max}} = 166,38 - 101 \cdot 0,960 = 69,42 \text{ kJ/kg p.s.}$$

natomiast energia cieplna kropli mgły:

$$u_{\text{kropli}} = (X - X_{\max}) u_w = (X - X_{\max}) c_w t_w = (0,055 - 0,049) \cdot 4,19 \cdot 40 = 1,006 \text{ kJ/kg p.s.}$$

przy czym energia jednostkowa wody u_w jest równa entalpii h_w , bo ciepła właściwe wody $c_p = c_v = c_w$ są sobie równe.

Ostatecznie więc:

$$u_{1+x} = u_{1+x_{\max}} + u_{\text{kropli}} = 69,41 + 1,01 = 70,42 \text{ kJ/kg p.s.}$$

Zadanie 15.4

Powietrze atmosferyczne pod ciśnieniem barometrycznym 750 mm Hg i temp. 30°C ma wilgotność względną $\phi = 0,9$. Określić zawartość wilgoci (zawilgocenie).

Wynik: $X = 0,0247 \text{ kg/kg p.s.}$

Zadanie 15.5

Higrometr włosowy pokazuje, przy temperaturze pomieszczenia 22°C , wilgotność względną $\phi = 40\%$ przy wskazaniu barometru 102 kPa . Ile wynoszą: zawilgocenie i temperatura rosy tego powietrza?

Wyniki: $X = 0,0065 \text{ kg/kg p.s.}$, $t_r = 7,8^\circ\text{C}$.

Zadanie 15.6

Stan powietrza wilgotnego określają: temperatura 18°C i wilgotność względną $\phi = 0,6$ przy ciśnieniu 98 kPa . Określić: zawartość wilgoci X , zastępczą stałą gazową R_i , objętość właściwą v i jednostkową v_{1+x} oraz entalpię jednostkową h_{1+x} .

Wyniki: $X = 7,95 \text{ g/kg p.s.}$, $R_i = 0,2884 \text{ kN/kgK}$, $v = 0,8568 \text{ m}^3/\text{kg}$,
 $v_{1+x} = 0,864 \text{ m}^3/\text{kg p.s.}$, $h_{1+x} = 38,24 \text{ kJ/kg p.s.}$

Zadanie 15.7

Stan powietrza wilgotnego określony jest przez temperaturę 20°C i temperaturę rosy zmierzoną higrometrem lusterkowym $t_r = 8^\circ\text{C}$ przy ciśnieniu 99 kPa . Obliczyć: zawartość wilgoci X , wilgotność względną ϕ i entalpię jednostkową h_{1+x} .

Wyniki: $X = 0,00681 \text{ kg/kg p.s.}$, $\phi = 0,459 = 45,9\%$, $h_{1+x} = 37,38 \text{ kJ/kg p.s.}$

Zadanie 15.8

Powietrze wilgotne o temperaturze 60°C i ciśnieniu 100 kPa zawiera wilgoć w postaci pary o ciśnieniu składnikowym $P_p = 14 \text{ kPa}$. Określić wilgotności: względną i bezwzględną tego powietrza.

Wyniki: $\phi = 0,703$, $\rho_p = 0,091 \text{ kg/m}^3$.

Zadanie 15.9

Znany jest stan termiczny powietrza wilgotnego przez podaną temperaturę $t = 40^\circ\text{C}$, ciśnienie $P = 101 \text{ kPa}$ i wilgotność względną $\phi = 0,65$. Określić: entalpię jednostkową powietrza wilgotnego h_{1+x} i jednostkową energię cieplną powietrza wilgotnego u_{1+x} .

Wyniki: $h_{1+x} = 120,0 \text{ kJ/kg p.s.}$ ($v_{1+x} = 0,934 \text{ m}^3/\text{kg p.s.}$), $u_{1+x} = 25,69 \text{ kJ/kg p.s.}$

Zadanie 15.10

Dany jest stan termiczny powietrza wilgotnego przez temperaturę $t = 30^\circ\text{C}$, ciśnienie $P = 101 \text{ kPa}$ oraz zawartość wilgoci $X = 32 \text{ g/kg p.s.}$ Określić: maksymalną zawartość wilgoci $X_{\max}$, entalpię jednostkową powietrza wilgotnego h_{1+x} i jednostkową energię cieplną (wewnętrzną) powietrza wilgotnego u_{1+x} .

Wyniki: $X_{\max} = 27,3 \text{ g/kg p.s.}$, $h_{1+x} = 100,54 \text{ kJ/kg p.s.}$, $u_{1+x} = 9,74 \text{ kJ/kg p.s.}$

Zadanie 15.11

Powietrze wilgotne o ciśnieniu 110 kPa i temperaturze 30°C ma wilgotność względną 60% . Obliczyć: ciśnienie składnikowe pary wodnej P_p , ciśnienie składnikowe powietrza suchego P_g , zawartość wilgoci X , temperaturę rosy t_r (punkt rosy), wilgotność bezwzględną ρ_p , objętość gazu wilgotnego przypadającą na 1 kg powietrza suchego v_{1+x} , zastępczą stałą gazową powietrza wilgotnego R , gęstość powietrza wilgotnego ρ oraz objętość właściwą powietrza wilgotnego v .

Wyniki: $P_p = 2,545 \text{ kPa}$, $P_g = 107,455 \text{ kPa}$, $X = 0,0147 \text{ kg/kg p.s.}$, $t_r = 21,4^\circ\text{C}$,
 $\rho_p = 0,01819 \text{ kg/m}^3$, $v_{1+X} = 0,8098 \text{ m}^3/\text{kg p.s.}$, $R = 0,2896 \text{ kN/kgK}$,
 $\rho = 1,253 \text{ kg/m}^3$, $v = 0,7981 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Zadanie 15.12

Kanałem wentylacyjnym płynie powietrze wilgotne. Z pomiaru uzyskano wielkość strumienia masy wynoszącą $\dot{m} = 0,2 \text{ kg/s}$ przy ciśnieniu 100 kPa i temperaturze 25°C . Określić strumień entalpii $\dot{H}$ [kW], jeżeli pomiar wilgotności względnej dał wynik $\varphi = 0,7$.

Rozwiązanie

Strumień entalpii obliczamy wzorem:

$$\dot{H} = \dot{m}_g h_{1+X}$$

Występujący w tym równaniu strumień masy gazu suchego $\dot{m}_g$ określimy z zależności

$$X = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_g}$$

oraz z faktu iż:

$$\dot{m} = \dot{m}_p + \dot{m}_g$$

Łącząc obydwie równania, otrzymujemy po prostych przekształceniach wzór:

$$\dot{m}_g = \frac{\dot{m}}{1+X} = \frac{0,2}{1+0,0141} = 0,1972 \text{ kg/s}$$

Potrzebną tu zawartość wilgoci znaleźliśmy z zależności:

$$X = 0,622 \frac{\varphi P_s}{P - \varphi P_s} = 0,622 \cdot \frac{0,7 \cdot 3,166}{100 - 0,7 \cdot 3,166} = 0,0141 \text{ kg/kg p.s.}$$

w której $P_s = 3,166 \text{ kPa}$ z tablicy 4 dla temperatury 25°C .

Określimy teraz entalpię jednostkową gazu wilgotnego

$$h_{1+X} = 1,005 t + X (2501 + 1,86 t) = 1,005 \cdot 25 + 0,014 (2501 + 1,86 \cdot 25) = 61,045 \text{ kJ/kg p.s.}$$

Strumień entalpii gazu wilgotnego wynosi więc:

$$\dot{H} = \dot{m}_g h_{1+X} = 0,1972 \cdot 61,045 = 12,038 \text{ kW}$$

Zadanie 15.13

Pomiar wilgotności względnej powietrza atmosferycznego psychrometrem Augusta dał wynik: temperatura termometru suchego $t_1 = 20^\circ\text{C}$, temperatura termometru mokrego $t_m = 14^\circ\text{C}$. Ciśnienie barometryczne wynosiło wtedy 100 kPa . Określić posługując się wykresem $h-X$: wilgotność względną φ_1 powietrza atmosferycznego, zawilżenie X_1 , ciśnienie składnikowe pary wodnej w powietrzu P_p oraz temperaturę rosy (punkt rosy) t_r .

Rozwiązanie

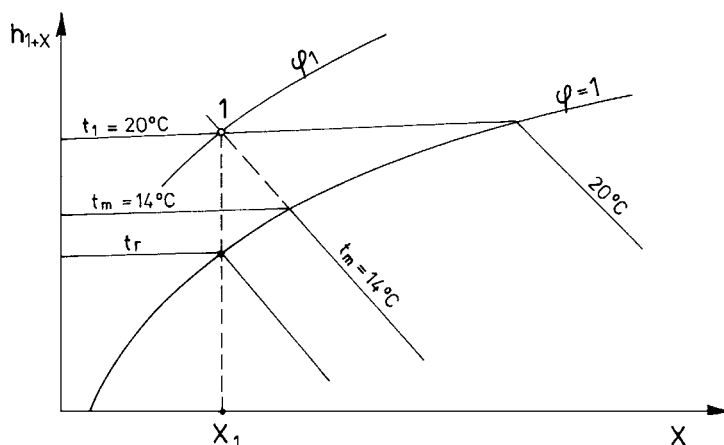
Korzystamy z wykresu $h-X$ dla powietrza atmosferycznego pod ciśnieniem 100 kPa ; dla innych ciśnień wykresy są sporządzane i używane jedynie wyjątkowo. Odnajdujemy izotermę $t_1 = 20^\circ\text{C}$, na której z pewnością leży punkt odpowiadający stanowi powietrza, z jakim mamy do czynienia – chociaż nie wiemy, w którym miejscu. Dla otrzymania tego punktu należy przedłużyć izotermę obszaru mgły o temperaturze termometru mokrego $t_m = 14^\circ\text{C}$, jest to bowiem graniczna temperatura chłodzenia rozpatrywanego powietrza. Prze-

dłużenie to jest jednocześnie prostą nawilżania powietrza atmosferycznego wilgocią o temperaturze 14°C. Stan powietrza nawilżanego musi leżeć na tej prostej oraz na izoterme wskazanej przez termometr suchy. Zaznaczamy więc punkt 1 ich przecięcia na wykresie. Jest to punkt określający stan powietrza atmosferycznego. Znajdujemy dla tego punktu z wykresu (rys. 15.4): wilgotność względną $\phi_1 = 0,52$. Następnie, prowadząc z punktu 1 linię pionową do osi X, odczytujemy na niej $X_1 \cong 0,0075 \text{ kg/kg p.s.} = 7,5 \text{ g/kg p.s.}$

Na wykresie h-X naniesiona jest dodatkowo, jako ukośna prosta, zależność ciśnienia cząstkowego pary w funkcji X, zgodnie z zależnością:

$$X = 0,622 \frac{P_p}{P - P_p}$$

przekształconą do postaci $P_p = f(X)$.



Rys. 15.4

W miejscu przecięcia się linii $X_1 = 0,075 \text{ kg/kg p.s.}$ z tą ukośną prostą odczytujemy $P_{p1} \cong 1,2 \text{ kPa}$. Chcąc wyznaczyć punkt rosy rozpatrywanego powietrza wilgotnego, śledzimy oziębianie tego powietrza przy stałej zawartości wilgoci $X_1 = \text{const}$, aż do osiągnięcia temperatury, przy której pojawią się kropelki wody (mgła). Szukamy więc na wykresie, wychodząc z punktu 1, na linii $X_1 = \text{const}$ punktu przecięcia z linią punktów rosy: $\phi = 1$. Przechodząca przez ten punkt izoterma $t_r \cong 10^\circ\text{C}$ wyznacza poszukiwaną temperaturę rosy. Uzyskane powyżej wyniki mają oczywiście dokładność ograniczoną przez dokładność odczytów na wykresie. W razie potrzeby dokładniejszych rezultatów należy posłużyć się obliczeniami.

Zadanie 15.14

Stan powietrza wilgotnego charakteryzuje się parametrami: $t = 50^\circ\text{C}$, $\phi = 10\%$. Posługując się wykresem h-X, wyznaczyć: teoretyczną temperaturę termometru mokrego i temperaturę rosy.

Wyniki: $t_m \cong 23,5^\circ\text{C}$, $t_r \cong 10^\circ\text{C}$.

Zadanie 15.15

W celu zmierzenia wilgotności względnej powietrza atmosferycznego posłużono się psychrometrem Augusta, odczytując: temperaturę termometru suchego $t = 30^\circ\text{C}$ i temperaturę termometru mokrego $t_m = 20^\circ\text{C}$. Ciśnienie atmosferyczne wynosiło 100 kPa. Określić posługując się wykresem h-X: wilgotność względną powietrza atmosferycznego ϕ , zawartość wilgoci X, ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu P_p i temperaturę rosy t_r .

Wyniki: $\phi = 0,4$, $X \cong 0,0105 \text{ kg/kg p.s.}$, $P_p \cong 1,7 \text{ kPa}$, $t_r \cong 15^\circ\text{C}$.

Zadanie 15.16

Znany jest stan termiczny dwutlenku węgla CO_2 zawilżonego parą wodną: temperatura $t = 20^\circ\text{C}$, ciśnienie $P = 120 \text{ kPa}$ i zawartość wilgoci $X = 8 \text{ g/kg g.s.}$. Określić: wilgotność względną φ , ciśnienia składnikowe: pary wodnej P_p i gazu suchego $P_g \equiv P_{\text{CO}_2}$, wilgotność bezwzględną ρ_p , objętość właściwą odniesioną do 1 kg gazu suchego, zastępczą stałą gazową gazu wilgotnego R , gęstość gazu wilgotnego ρ , entalpię jednostkową gazu wilgotnego h_{1+X} oraz jednostkową energię cieplną gazu wilgotnego u_{1+X} .

Rozwiązanie

Należy ocenić najpierw czy gaz jest nienasycony wilgocią czy nasycony lub przesycony. W tym celu określamy $X_{\max}$ ze wzoru:

$$X_{\max} = \frac{P_s}{P - P_s} \frac{M_g}{M_p}$$

gdzie: $M_p = 18,015 \text{ kg/kmol}$ – masa molowa pary wodnej (z tab. 1),

$M_g = 44,01 \text{ kg/kmol}$ – masa molowa dwutlenku węgla (z tab. 1),

$P_s = 2,337 \text{ kPa}$ – ciśnienie nasycenia pary dla 20°C (z tab. 4).

Podstawiając do wzoru dane liczbowe, otrzymujemy:

$$X_{\max} = \frac{2,337}{120 - 2,337} \cdot \frac{18,015}{44,01} = 0,0081 \text{ kg/kg g.s.} = 8,1 \text{ g/kg g.s.}$$

Ponieważ gaz zawiera nieco mniej, bo $8,0 \text{ g/kg g.s.}$ wilgoci, jest on nienasycony parą. Do wyznaczenia wilgotności względnej tego gazu przekształcamy wzór:

$$X = \frac{\varphi P_s}{P - \varphi P_s} \frac{M_p}{M_g}$$

do postaci:

$$\varphi = \frac{XP}{P_s \left(\frac{M_p}{M_g} + X \right)} = \frac{0,008 \cdot 120}{2,337 \left(\frac{18,015}{44,01} + 0,008 \right)} = 0,984$$

Ciśnienie składnikowe pary wodnej wynosi:

$$P_p = \varphi P_s = 0,984 \cdot 2,337 = 2,300 \text{ kPa}$$

a ciśnienie składnikowe gazu suchego:

$$P_g \equiv P_{\text{CO}_2} = P - P_p = 120 - 2,3 = 117,7 \text{ kPa}$$

Wilgotność bezwzględną określamy jako gęstość pary pod jej ciśnienie składnikowym:

$$\rho_p = \frac{P_p}{R_p T} = \frac{2,300}{0,4615 \cdot 293,15} = 0,017 \text{ kg/m}^3$$

Objętość gazu wilgotnego na każdy 1 kg gazu suchego v_{1+X} określamy wzorem:

$$v_{1+X} = (1 + X) \frac{RT}{P} = (1 + 0,008) \frac{0,191 \cdot 293,15}{120} = 0,470 \text{ m}^3/\text{kg g.s.}$$

w którym zastępcza stała gazowa gazu wilgotnego:

$$R = \frac{X + \frac{M_p}{M_g}}{1 + X} R_p = \frac{0,008 + \frac{18}{44}}{1 + 0,008} \cdot 0,4615 = 0,191 \text{ kNm/kgK}$$

Gęstość gazu wilgotnego ρ wyznaczamy z równania stanu:

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{120}{0,191 \cdot 293,15} = 2,143 \text{ kg/m}^3$$

Entalpię jednostkową gazu określamy z zależności:

$$h_{1+x} = c_p \Big|_0^t + X (2501 + 1,86 \cdot t) \quad [\text{kJ/kg g.s.}]$$

w której $c_p \Big|_0^t$ jest średnim ciepłem właściwym przy stałym ciśnieniu gazu suchego, jakim jest dwutlenek węgla CO_2 . Z załączonej tablicy 2 odczytujemy (odpowiednio interpolując) wartość: 0,825 kJ/kg.

Tak więc entalpia jednostkowa gazu wilgotnego:

$$h_{1+x} = 0,825 \cdot 20 + 0,008 (2501 + 1,86 \cdot 20) = 36,81 \text{ kJ/kg g.s.}$$

Jednostkową energię cieplną obliczamy ze wzoru:

$$u_{1+x} = h_{1+x} - P v_{1+x} = 36,81 - 120 \cdot 0,471 = -19,71 \text{ kJ/kg g.s.}$$

Znak „minus” wynika z umownego założenia: $h_0 = 0$ dla 0°C – szczegóły w podręczniku „Termodynamika”^{*)}.

Zadanie 15.17

Dwutlenek węgla CO_2 zawilżony parą wodną ma ciśnienie 110 kPa i temperaturę 20°C . Wilgotność względna wynosi $\varphi = 80\%$. Obliczyć: ciśnienie składnikowe pary wodnej P_p , ciśnienie składnikowe dwutlenku węgla P_g , zawartość wilgoci X , udziały objętościowe (molowe) składników r_i (z_i), wilgotność bezwzględną ρ_p , zastępczą stałą gazową gazu wilgotnego R , gęstość gazu wilgotnego ρ oraz temperaturę rosy t_r .

Rozwiązanie

Dla temperatury 20°C ciśnienie nasycenia pary wodnej (wg tablicy 4) wynosi $P_s = 2,337 \text{ kPa}$. Ciśnienie składnikowe pary wynosi więc:

$$P_p = \varphi P_s = 0,80 \cdot 2,337 = 1,870 \text{ kPa}$$

a ciśnienie składnikowe gazu suchego (dwutlenku węgla):

$$P_g = P - P_p = 110 - 1,870 = 108,13 \text{ kPa}$$

Zawartość wilgoci określimy ze wzoru:

$$X = \frac{\varphi P_s}{P - \varphi P_s} \frac{M_p}{M_g} = \frac{0,8 \cdot 2,337}{110 - 0,8 \cdot 2,337} \cdot 0,4093 = 0,00708 \text{ kg/kg g.s.}$$

w którym

$$\frac{M_p}{M_g} = \frac{18,015}{44,010} = 0,4093$$

Udziały objętościowe (molowe) określimy jako stosunki odpowiednich ciśnień składnikowych do ciśnienia całkowitego, mianowicie:

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = z_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{P_p}{P} = \frac{1,870}{110} = 0,017 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{ g.w.}} \text{ lub } \frac{\text{kmol}}{\text{kmol g.w.}}$$

$$r_{\text{CO}_2} = z_{\text{CO}_2} = \frac{P_g}{P} = \frac{108,13}{110} = 0,983 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{ g.w.}} \text{ lub } \frac{\text{kmol}}{\text{kmol g.w.}}$$

^{*)} W. Pudlik: „Termodynamika” - 2007, Biblioteka Cyfrowa Politechniki Gdańskiej, www.wbss.pg.gdapl/recource/X7Wh7FPT

Wilgotność bezwzględną gazu wilgotnego określamy z zależności definiującej wilgotność względną – po prostym przekształceniu otrzymujemy:

$$\rho_p = \varphi \rho_{p \max} = \varphi \rho_s$$

gdzie ρ_s – gęstość pary wodnej nasyconej suchej; z tablicy pary nasyconej mamy:

$$\rho_s = \frac{1}{v''} = \frac{1}{57,83} = 0,01729 \text{ kg/m}^3$$

Obliczamy więc:

$$\rho_p = 0,80 \cdot 0,01729 = 0,0138 \text{ kg/m}^3$$

Zastępczą stałą gazową gazu wilgotnego obliczamy ze wzoru:

$$R = \frac{X + \frac{M_p}{M}}{1 + X} R_p = 0,4615 \cdot \frac{0,00708 + 0,4093}{1 + 0,00708} = 0,19081 \text{ kNm/kgK}$$

Gęstość gazu wilgotnego określamy z termicznego równania stanu:

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{110}{0,19081 \cdot 293,15} = 1,966 \text{ kg/m}^3$$

Temperatura rosy jest temperaturą nasycenia odpowiadającą ciśnieniu pary P_p znajdującej się w rozpatrywanej mieszaninie:

$$P_s(t_r) = P_p = 1,870 \text{ kPa}$$

dla tego ciśnienia mamy z tablicy 5 pary nasyconej (po interpolacji):

$$t_r = 16,45^\circ\text{C}$$

Zadanie 15.18

Znany jest stan termiczny azotu N_2 zawilżonego parą wodną: temperatura 20°C , ciśnienie 120 kPa i zawartość wilgoci $X = 8 \text{ g/kg p.s.}$ Obliczyć: wilgotność względną φ , ciśnienia składnikowe: pary wodnej P_p i gazu suchego P_g , wilgotność bezwzględną ρ_p , objętość v_{1+X} , zastępczą stałą gazową gazu wilgotnego R , gęstość gazu wilgotnego ρ , entalpię gazu wilgotnego h_{1+X} , energię cieplną (wewnętrzną) gazu wilgotnego u_{1+X} oraz temperaturę rosy t_r .

Wyniki: $\varphi = 0,631$, $P_p = 1,475 \text{ kPa}$, $P_g = 118,52 \text{ kPa}$, $\rho_p = 0,0109 \text{ kg/m}^3$,
 $v_{1+X} = 0,7339 \text{ m}^3/\text{kg g.s.}$, $R = 0,298 \text{ kNm/kgK}$, $\rho = 1,374 \text{ kg/m}^3$,
 $h_{1+X} = -41,09 \text{ kJ/kg g.s.}$, $u_{1+X} = -46,98 \text{ kJ/kg g.s.}$, $t_r = 12,8^\circ\text{C}$.

Zadanie 15.19

Sprężarka powietrza, pracująca adiabatycznie i odwracalnie (izentropowo), zasysa powietrze atmosferyczne o ciśnieniu $P_1 = 100 \text{ kPa}$ i temperaturze $t_1 = 20^\circ\text{C}$ przy wilgotności względnej $\varphi_1 = 0,60$, sprężając je do ciśnienia 1 MPa. Obliczyć: temperaturę po sprężeniu t_2 , wilgotność względną po sprężeniu φ_2 .

Rozwiązanie

Zakładamy, iż w zakresie występujących ciśnień i temperatur powietrze wilgotne uznajemy za gaz doskonały o wykładniku adiabaty $\kappa = 1,4$ (wpływ bardzo małego udziału pary wodnej mającej $\kappa = 1,33$ można pominąć).

Do obliczenia temperatury t_2 stosujemy równanie izentropy:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 293,15 \cdot \left(\frac{1000}{100} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 565,98 \text{ K}$$

a więc

$$t_{2s} = 292,83^{\circ}\text{C},$$

dla tej temperatury ciśnienie nasycenia wynosi $P_{s,2} = 7769,5$ kPa, podczas gdy dla 20°C było $P_{s,1} = 2,337$ kPa (tablica 4 pary nasyconej).

Wilgotność względną φ_1 wyraża zależność:

$$\varphi_1 = \frac{X_1 P_1}{P_{s,1}(0,622 + X_1)}$$

zaś wilgotność φ_2 , analogicznie:

$$\varphi_2 = \frac{X_2 P_2}{P_{s,2}(0,622 + X_2)}$$

Dzieląc stronami te zależności otrzymujemy:

$$\frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{X_2 P_2}{P_{s,2}} \frac{P_{s,1}(0,622 + X_1)}{X_1 P_1}$$

a że podczas sprężania adiabatycznego masy pary i gazu suchego nie zmieniają się i $X_1 = X_2$, otrzymujemy:

$$\frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{P_{s,1}}{P_{s,2}} \frac{P_2}{P_1}$$

a stąd

$$\varphi_2 = \varphi_1 \frac{P_{s,1}}{P_{s,2}} \frac{P_2}{P_1} = 0,60 \cdot \frac{2,337 \cdot 1000}{7769,5 \cdot 100} = 0,0018 \cong 0,2\%$$

Jak widać, wilgotność względna po sprężeniu znacznie spadła, chociaż zawartość wilgoci (X) nie uległa zmianie. Powodem tego jest znaczny wzrost temperatury powietrza wilgotnego.

Zadanie 15.20

Powietrze atmosferyczne o ciśnieniu 97 kPa, temperaturze 14°C i wilgotności względnej 67% sprężono do 650 kPa, a następnie oziębiono izobarycznie do 18°C . Obliczyć jaki jest spadek zawartości wilgoci ΔX w tym procesie.

Rozwiązanie

Zawartość wilgoci w powietrzu przed sprężeniem:

$$X_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 P_{s,1}}{P_1 - \varphi_1 P_{s,1}} = 0,622 \cdot \frac{0,67 \cdot 1,5974}{97 - 0,67 \cdot 1,5974} = 0,00694 \text{ kg/kg p.s.}$$

przy czym $P_{s,1} = 1,5974$ kPa z tablicy 4 dla $t_1 = 14^{\circ}\text{C}$.

Powietrze sprężone i oziębione jest nasycone parą ($\varphi_2 = 1$), gdyż nadmiar wilgoci uległ wykropleniu; zawartość pary w powietrzu sprężonym jest bowiem mniejsza z powodu silnego wzrostu mianownika:

$$X_2 = 0,622 \frac{1 P_{s,2}}{P_2 - 1 \cdot P_{s,2}} = 0,622 \frac{2,063}{650 - 2,063} = 0,00198 \text{ kg/kg p.s.}$$

Ubytek zawilgocenia:

$$\Delta X = X_2 - X_1 = 0,00198 - 0,00694 = -0,00496 \text{ kg/kg p.s.}$$

wydzielił się w chłodnicy w postaci wody.

Zadanie 15.21

Sprężarka zasysa $10 \text{ m}^3/\text{min}$ powietrza o ciśnieniu 99 kPa, temperaturze 20°C , wilgotności względnej 60% i podaje przez chłodnicę do zbiornika, w którym utrzymuje się stałe

ciśnienie 800 kPa i stałą temperaturę 30°C. Z badać, ile wody wydziela się w ciągu minuty w chłodnicy.

Wyniki: $\dot{m}_g = 11,60 \text{ kg/min}$, $\dot{m}_w = 0,065 \text{ kg/min}$.

Zadanie 15.22

Stan powietrza wilgotnego przed sprężeniem określony jest przez 15°C, 105 kPa i 8 g/kg p.s. zawartości wilgoci. Po adiabatycznym sprężeniu powietrze jest oziębiane izobarycznie. Wyznaczyć temperaturę, przy której rozpocznie się wydzielanie wody z tego powietrza.

Wynik: $t_r \equiv t_s = 40,2^\circ\text{C}$.

Zadanie 15.23

Spaliny przepływające pod ciśnieniem 98 kPa przez kanały kotła zawierają, oprócz azotu N_2 , tlenu O_2 i dwutlenku węgla CO_2 , 13% objętościowych pary wodnej H_2O . Spaliny oziębiają się wskutek oddawania ciepła do powierzchni ogrzewalnej kotła. Przy jakiej temperaturze zacznie się z nich wydzielać woda?

Wynik: $t_r \equiv t_s = 50,6^\circ\text{C}$.

Zadanie 15.24

Do jakiej temperatury można oziębic zawiniętą w mokrą tkaninę butelkę z napojem, jeżeli wystawi się ją na działanie przepływającego powietrza atmosferycznego o następujących parametrach: $t_1 = 25^\circ\text{C}$, $\phi_1 = 40\%$ albo $t_2 = 20^\circ\text{C}$, $\phi_2 = 50\%$ lub $t_3 = 15^\circ\text{C}$, $\phi_3 = 50\%$.

Wyniki: $t_{gr,1} = 16^\circ\text{C}$, $t_{gr,2} = 14^\circ\text{C}$, $t_{gr,3} = 10^\circ\text{C}$.

Zadanie 15.25

Do jakiej temperatury można nagrzać wodę w otwartym zbiorniku, mającą początkową temperaturę otoczenia, przepuszczając nad nią powietrze o temperaturze 50°C i temperaturę rosy 25°C? Czy podczas tego procesu następuje wykraplanie wody z powietrza czy parowanie powierzchniowe wody ze zbiornika?

Wyniki: $t_w \rightarrow 31,7^\circ\text{C}$, do osiągnięcia przez powierzchnię wody temperatury 25°C ma miejsce wykraplanie wody, przy dalszym ogrzewaniu wody następuje parowanie.

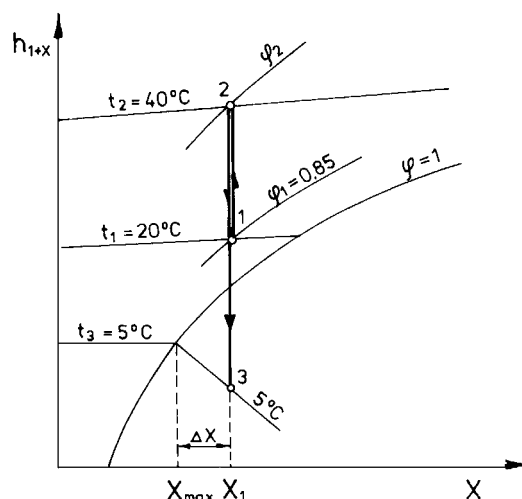
Zadanie 15.26

Wilgotne powietrze o ciśnieniu $P_1 = 100 \text{ kPa}$, temperaturze $t_1 = 20^\circ\text{C}$, wilgotności względnej $\phi_1 = 0,85$ podlega przemianom izobarycznym: podgrzania do temperatury $t_2 = 40^\circ\text{C}$, a następnie quasi–statycznego schładzania do temperatury $t_3 = 5^\circ\text{C}$. Przedstawić przemiany na wykresie $h-X$ oraz obliczyć: wilgotność względną ϕ_2 , wilgotność względną ϕ_3 .

Rozwiązanie

Podgrzewanie i następujące po nim ochładzanie objętościowe powietrza odbywa się przy stałym zawilgoceniu:

$$X_1 = X_2 = X_3$$



Rys. 15.5

Zawilgocenie w stanie początkowym można obliczyć z danych zadania, jeżeli z tablicy 4 pary nasyconej zaczerpnie się dla $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ciśnienie nasycenia $P_{s,1} = 2,337 \text{ kPa}$:

$$X_1 = \frac{0,622 \varphi_1 P_{s,1}}{P - \varphi_1 P_{s,1}} = \frac{0,622 \cdot 0,85 \cdot 2,337}{100 - 0,85 \cdot 2,337} = 0,0126 \text{ kg/kg p.s.} = 12,6 \text{ g/kg p.s.}$$

Stosując ten sam wzór ogólny do stanu 2, wyznaczamy z niego niewiadomą wilgotność względną φ_2 :

$$\varphi_2 = \frac{X_2 P}{(0,622 + X_2) P_{s,2}} = \frac{0,0126 \cdot 100}{(0,622 + 0,0126) \cdot 7,375} = 0,269 = 26,9\%$$

przy czym z tablicy 4 wyznaczyliśmy $P_{s,2} = 7,375 \text{ kPa}$ dla 40°C .

Tak samo obliczamy wilgotność względną φ_3 , przy czym odszukujemy w tablicy 4 $P_{s,3} = 0,8719 \text{ kPa}$ dla 5°C :

$$\varphi_3 = \frac{X_3 P}{(0,622 + X_3) P_{s,3}} = \frac{0,0126 \cdot 100}{(0,622 + 0,0126) \cdot 0,8719} = 2,277 > 1$$

Wynik pozbawiony jest sensu fizycznego: możliwe są tylko wartości $\varphi \leq 1$. Świadczy on o tym, że w stanie 3 powietrze jest przesycone (jak na rys. 15.5). W temperaturze $t_3 = 5^\circ\text{C}$ maksymalna (dla $\varphi_3 = 1$) zawartość pary wynosi:

$$X_{\max} = \frac{0,622 \cdot 1 \cdot P_{s,3}}{P - 1 \cdot P_{s,3}} = \frac{0,622 \cdot 0,8719}{100 - 0,8719} = 0,0055 \text{ kg/kg p.s.} = 5,5 \text{ g/kg p.s.}$$

Pozostała ilość wilgoci wykropliła się:

$$\Delta X = X_1 - X_{\max} = 12,6 - 5,5 = 7,1 \text{ g/kg p.s.}$$

i tworzy w powietrzu nasyconym parą, zawieszając kropelki mgły.

Zadanie 15.27

Do pomieszczenia należy doprowadzić powietrze o temperaturze 23°C i wilgotności względnej 60%, podczas gdy do dyspozycji stoi powietrze atmosferyczne o temperaturze 10°C i wilgotności względnej 30% oraz ciepła woda o temperaturze 35°C . Posługując się wykresem $h-X$, określić: do jakiej temperatury należy podgrzać izobarycznie powietrze atmosferyczne i jaką względną ilość wody ΔX należy wtrysnąć do podgrzanego powietrza, by w wyniku otrzymać żądane parametry.

Rozwiązanie

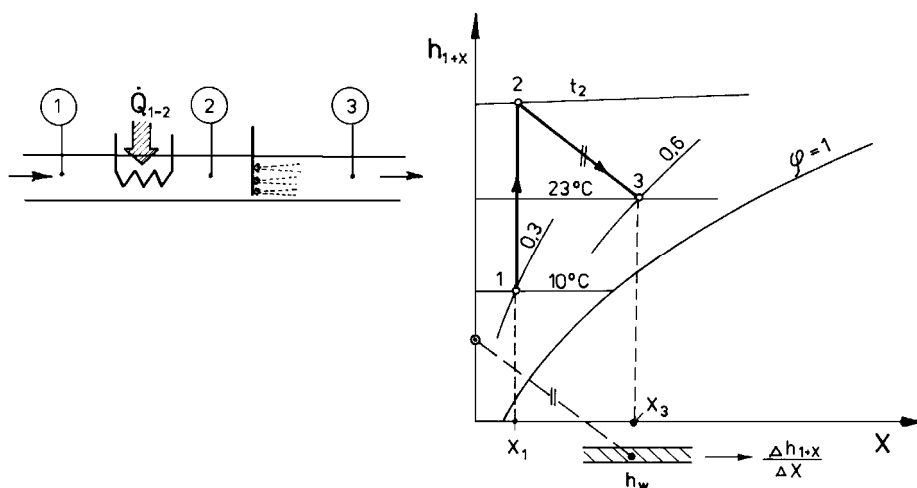
Korzystamy z wykresu h - X wg podanego niżej toku postępowania (rys. 15.6):

- odnajdujemy na wykresie punkt 1 na przecięciu linii: $t_1 = 10^\circ\text{C}$ i $\phi_1 = 0,3$;
- prowadzimy z punktu 1 w górę prostą pionową, jako linię przemiany ogrzewania – na niej leżą punkty odpowiadające stanom po podgrzaniu (gdyż zawartość wilgoci nie zmienia się);
- znajdujemy na wykresie punkt 3 odpowiadający żadanemu stanowi powietrza doprowadzanego do pomieszczenia o parametrach: $t_3 = 23^\circ\text{C}$ i $\phi_3 = 0,6$ osiągniętych po wtrysnięciu wody;
- odnajdujemy na wykresie kierunek prostej nawilżania posługując się biegunem na osi rzędnych (h_{1+x}) i skalą entalpii wody na obrzeżu ($h_w = 4,19 \cdot 35 = 147 \text{ kJ/kg}$);
- przez punkt 3 prowadzimy prostą o kierunku prostej nawilżania aż do przecięcia z linią $X_1 = \text{const}$. Punkt przecięcia oznaczamy przez 2. Odpowiada on stanowi powietrza wilgotnego po podgrzaniu, a przed wtrysnięciem wody. Przez ten punkt przechodzi izoterma: $t_2 \cong 42^\circ\text{C}$.
- odczytujemy wartości: $X_1 \cong 2,3 \text{ g/kg p.s.}$ i $X_3 \cong 10,6 \text{ g/kg p.s.}$

Różnica tych zawilgoceń:

$$\Delta X = X_3 - X_1 = 10,6 - 2,3 \cong 8,3 \text{ g/kg p.s.}$$

jest ilością wody o temperaturze 35°C , jaką trzeba wtrysnąć, na każdy 1 kg powietrza suchego, do powietrza podgrzanego do $t_2 \cong 42^\circ\text{C}$, aby ustaliły się żądane parametry $t_3 = 20^\circ\text{C}$ i $\phi_3 = 0,3$ powietrza doprowadzanego do pomieszczenia.



Rys. 15.6

Zadanie 15.28

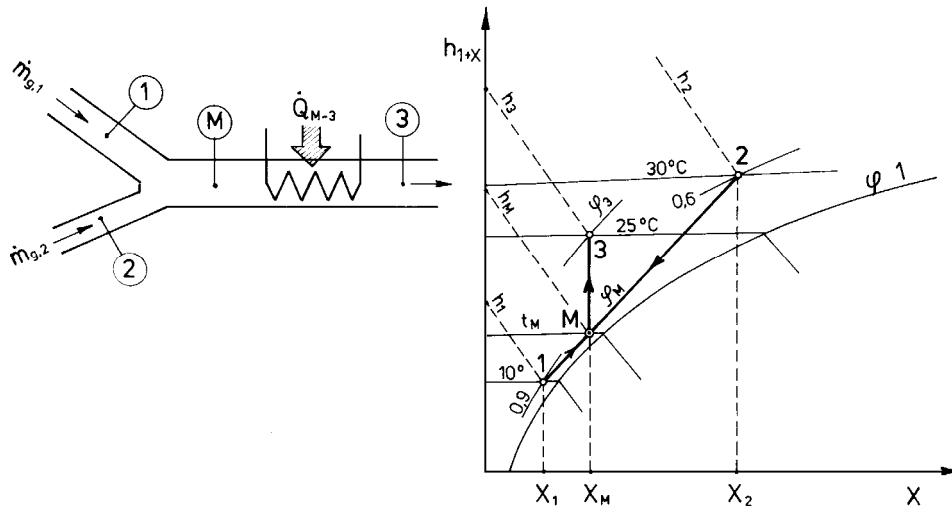
Do hali przemysłowej należy doprowadzać powietrze o temperaturze 20°C i wilgotności względnej 70%. Mamy do dyspozycji powietrze atmosferyczne o temperaturze -10°C i wilgotności względnej 60% oraz parę wodną o entalpii 3 000 kJ/kg. Posługując się wykresem h - X określić: do jakiej temperatury t_1 należy podgrzać izobarycznie powietrze atmosferyczne, jaką względną ilość pary ΔX należy wtrysnąć do podgrzanego powietrza, aby otrzymać w wyniku żądane parametry powietrza doprowadzanego do hali.

Wyniki: $t_2 \cong 15,5^\circ\text{C}$, $\Delta X \cong 8,8 \text{ g/kg p.s.}$

Zadanie 15.29

Dwa strumienie powietrza wilgotnego mieszają się ze sobą adiabaticznie i izobarycznie. Pierwszy ma strumień masy powietrza suchego $\dot{m}_{g1} = 1$ kg/s, ciśnienie $P_1 = 100$ kPa, temperaturę $t_1 = 10^\circ\text{C}$ i wilgotność względną $\varphi_1 = 0,9$, drugi ma odpowiednio: $\dot{m}_{g2} = 0,75$ kg/s, $P_2 = 100$ kPa, $t_2 = 30^\circ\text{C}$ i $\varphi_2 = 0,6$. Określić: temperaturę powietrza zmieszanego t_M , wilgotność względną powietrza zmieszanego φ_M , moc cieplną grzejnika $\dot{Q}$ potrzebną do podgrzania izobarycznego tego strumienia do 25°C i wilgotność względną po podgrzaniu φ_3 .

Rys. 15.7



Rozwiązanie

Wartość temperatury po zmieszaniu strumieni możemy ustalić na podstawie bilansu energetycznego, który pozwala określić entalpię powietrza po zmieszaniu:

$$h_M = \frac{\dot{m}_{g1}h_1 + \dot{m}_{g2}h_2}{\dot{m}_{g1} + \dot{m}_{g2}}$$

a następnie – ze wzoru na entalpię powietrza wilgotnego – temperaturę powietrza zmieszanego:

$$t_M = \frac{h_M - 2501 X_M}{1,005 + 1,86 X_M}$$

Potrzebne tu zawilgocenie powietrza zmieszanego X_M obliczymy ze wzoru:

$$X_M = \frac{\dot{m}_{g1}X_1 + \dot{m}_{g2}X_2}{\dot{m}_{g1} + \dot{m}_{g2}}$$

Do wykonania obliczeń liczbowych potrzebna jest znajomość entalpii obydwu strumieni: h_1 i h_2 oraz ich zawartości wilgoci: X_1 i X_2 .

Zawartość wilgoci pierwszego strumienia:

$$X_1 = 0,622 \cdot \frac{\varphi P_{s,1}}{P - \varphi P_{s,1}} = 0,622 \cdot \frac{0,9 \cdot 1,227}{100 - 0,9 \cdot 1,227} = 0,006945 \text{ kg/kg p.s.}$$

przy czym $P_{s1} = 1,227$ kPa dla $t_1 = 10^\circ\text{C}$.

Zawartość wilgoci drugiego strumienia:

$$X_2 = 0,622 \cdot \frac{\varphi P_{s,2}}{P - \varphi P_{s,2}} = 0,622 \cdot \frac{0,6 \cdot 4,242}{100 - 0,6 \cdot 4,241} = 0,01624 \text{ kg/kg p.s.}$$

gdzie: $P_{s,2} = 4,242 \text{ kPa}$ dla $t_2 = 30^\circ\text{C}$.

Entalpie obydwu strumieni:

$$h_1 = 1,005 t_2 + X_2 (2501 + 1,86 t_1) = 1,005 \cdot 10 + 0,006945 \cdot (2501 + 1,86 \cdot 10) = 27,55 \text{ kJ/kg p.s.}$$

$$h_2 = 1,005 t_2 + X_2 (2501 + 1,86 t_2) = 1,005 \cdot 30 + 0,01624 \cdot (2501 + 1,86 \cdot 30) = 71,67 \text{ kJ/kg p.s.}$$

Mając powyższe dane, wstawiamy je do przytoczonych powyżej zależności i otrzymujemy:

$$h_M = \frac{1,0 \cdot 27,55 + 0,75 \cdot 71,67}{1,0 + 0,75} = 46,46 \text{ kJ/kg p.s.}$$

i dalej

$$X_M = \frac{1,0 \cdot 0,006945 + 0,75 \cdot 0,01624}{1,0 + 0,75} = 0,01093 \text{ kg/kg p.s.}$$

oraz

$$t_M = \frac{46,46 - 0,01093 \cdot 2501}{1,005 + 1,86 \cdot 0,01093} = 18,65^\circ\text{C}$$

Wilgotność względną po zmieszaniu obliczamy z przekształconego wzoru na zawilgocenie powietrza zmieszanego:

$$\varphi_M = \frac{X_M P}{P_{s,M} (0,622 + X_M)} = \frac{0,01093 \cdot 100}{2,149 (0,622 + 0,01093)} = 0,804$$

gdzie: $P_{s,M} = 2,149 \text{ kPa}$ z tablic dla $t_M = 18,65^\circ\text{C}$.

Moc cieplną grzejnika – dla izobarycznego podgrzewania powietrza zmieszanego do 25°C – określamy ze wzoru:

$$\dot{Q} = \dot{m}_M (h_{M,3} - h_M)$$

gdzie: $\dot{m}_M = \dot{m}_{g1} + \dot{m}_{g2} = 1,0 + 0,75 = 1,75 \text{ kg/s}$

$$h_{M,3} = 1,005 t_3 + X_3 (2501 + 1,86 t_3) = 1,005 \cdot 25 + 0,01093 (2501 + 1,86 \cdot 25) = 52,97 \text{ kJ/kg p.s.}$$

Przy tym $X_{M,3} = X_3$, gdyż zawartość wilgoci przy podgrzewaniu izobarycznym nie ulega zmianie.

Moc cieplną grzejnika obliczamy, wstawiając dane:

$$\dot{Q} = 1,75 \cdot (52,97 - 46,46) = 11,4 \text{ kW}$$

a wilgotność względną po podgrzaniu określamy wg wzoru:

$$\varphi_3 = \frac{X_3 P}{P_{s,3} (0,622 + X_3)} = \frac{0,01093 \cdot 100}{3,166 \cdot (0,622 + 0,01093)} = 0,545$$

tutaj: $P_{s,3} = 3,166 \text{ kPa}$ z tablic dla $t_3 = 25^\circ\text{C}$.

Zadanie 15.30

W kanale wentylacyjnym miesza się jedną część (masową) powietrza zewnętrznego o temperaturze -5°C i wilgotności względnej 80% z 4 częściami ciepłego powietrza powrotnego mającego $+25^\circ\text{C}$ i $\varphi = 40\%$ przy ciśnieniu 100 kPa. Jaka będzie temperatura powietrza zmieszanego t_M i jaka temperatura rosy tego powietrza t_r ?

Wyniki: $t_M = 19^\circ\text{C}$, $t_r = 8^\circ\text{C}$.

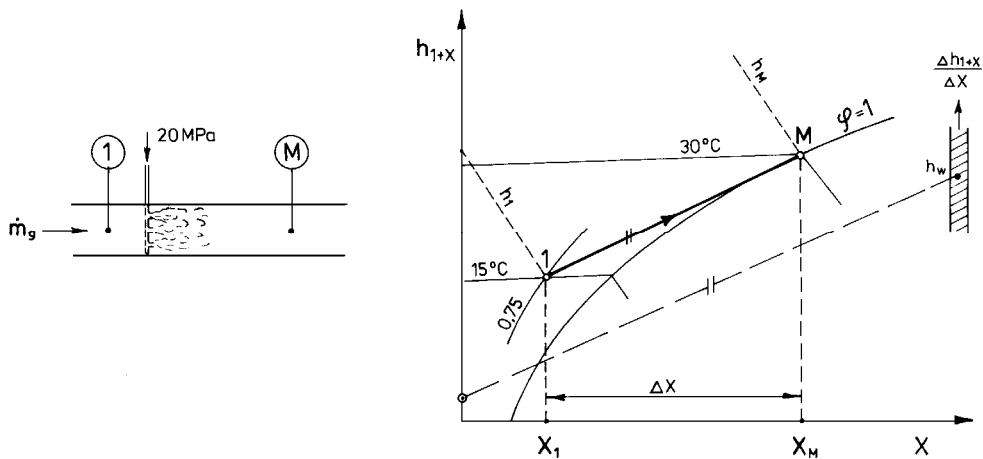
Zadanie 15.31

Do wentylacji budynku doprowadza się z zewnątrz świeże powietrze o temperaturze -10°C i wilgotności względnej 80%, a następnie podgrzewa je i nawilża tak, by miało temperaturę 22°C i wilgotność względną 60%, po czym rozprowadza do pomieszczeń w budynku. Proces przebiega przy ciśnieniu 100 kPa. Naszkicować przemiany na wykresie h - X i obliczyć: względną ilość wody doprowadzonej $\Delta X_{1,3}$ i jednostkową ilość doprowadzanego ciepła q_{1-2} .

Wyniki: $\Delta X_{1,3} = 8,7 \text{ g/kg p.s.}$, $q_{1-2} = h_3 - h_1 = 54,4 \text{ kJ/kg p.s.}$

Zadanie 15.32

Do pomieszczenia ma dopływać powietrze wilgotne w stanie nasycenia o temperaturze $t_M = 30^{\circ}\text{C}$. W tym celu pobiera się powietrze atmosferyczne o ciśnieniu $P_1 = 100 \text{ kPa}$, temperaturze $t_1 = 15^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi_1 = 0,75$, w ilości wyrażonej przez $\dot{m}_{g,1} = 1 \text{ kg/s}$ i wtryskuje się do niego parę przegrzaną o pierwotnym ciśnieniu 20 MPa. Obliczyć: zapotrzebowanie pary $\dot{m}_p$ [kg/s] i temperaturę t_2 pary wtryskiwanej.



Rys. 15.8

Rozwiązanie

Mamy do czynienia z procesem nawilżania powietrza wilgotnego parą. Z założeń wynika, iż wilgotność względna po zmieszaniu powietrza z parą ma wynosić $\varphi_M = 1$. Obliczamy zawartość wilgoci w tym stanie:

$$X_M = 0,622 \frac{\varphi_M P_{s,M}}{P - \varphi_M P_{s,M}} = 0,622 \frac{1 \cdot 4,242}{100 - 1 \cdot 4,242} = 0,02755 \text{ kg/kg p.s.}$$

przy czym $P_s = 4,242 \text{ kPa}$ dla 30°C z tablicy 6 pary nasyconej.

Zawartość wilgoci w powietrzu atmosferycznym wynosi:

$$X_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 P_{s,1}}{P - \varphi_1 P_{s,1}} = 0,622 \frac{0,75 \cdot 1,7041}{100 - 0,75 \cdot 1,7041} = 0,00805 \text{ kg/kg p.s.}$$

przy $P_s = 1,7041$ dla 15°C .

Powinno się więc dostarczyć wilgoć w ilości:

$$\Delta X = X_M - X_1 = 0,02755 - 0,00805 = 0,0195 \text{ kg/kg p.s.}$$

Strumień masy, doprowadzanej do powietrza atmosferycznego wilgoci, wynosi więc:

$$\dot{m}_p = \dot{m}_{g,1} \Delta X = 1 \cdot 0,0195 = 0,0195 \text{ kg/s} = 70,2 \text{ kg/h}$$

Temperaturę t_2 , jaką powinna mieć para przy ciśnieniu 20 MPa, aby zapewnić temperaturę po zmieszaniu $t_{01} = 30^\circ\text{C}$, określimy, obliczając najpierw potrzebną entalpię pary (wilgoci) h_w z bilansu energetycznego. Para przechodząca do powietrza przez dysze podlega w ostatecznym efekcie zdławieniu od 20 MPa do ciśnienia tego powietrza: 100 kPa, – a jak wiadomo – entalpie pary przed i po dławieniem są takie same.

Z bilansu energetycznego procesu nawilżania mamy zapis:

$$h_M = h_1 + (\Delta X) h_w \quad [\text{kJ/kg p.s.}]$$

a zatem entalpia pary:

$$h_w = \frac{h_M - h_1}{\Delta X}$$

Entalpia powietrza nawilżonego wynosi:

$$\begin{aligned} h_M &= 1,005 t_1 + X_M (2501 + 1,86 t_M) = \\ &= 1,005 \cdot 30 + 0,02755 (2501 + 1,86 \cdot 30) = 100,59 \text{ kJ/kg p.s.} \end{aligned}$$

podczas gdy entalpia powietrza nawilżanego (atmosferycznego):

$$\begin{aligned} h_1 &= 1,005 t_1 + X_1 (2501 + 1,86 \cdot 15) = \\ &= 1,005 \cdot 15 + 0,00805 (2501 + 1,86 \cdot 15) = 35,43 \text{ kJ/kg p.s.} \end{aligned}$$

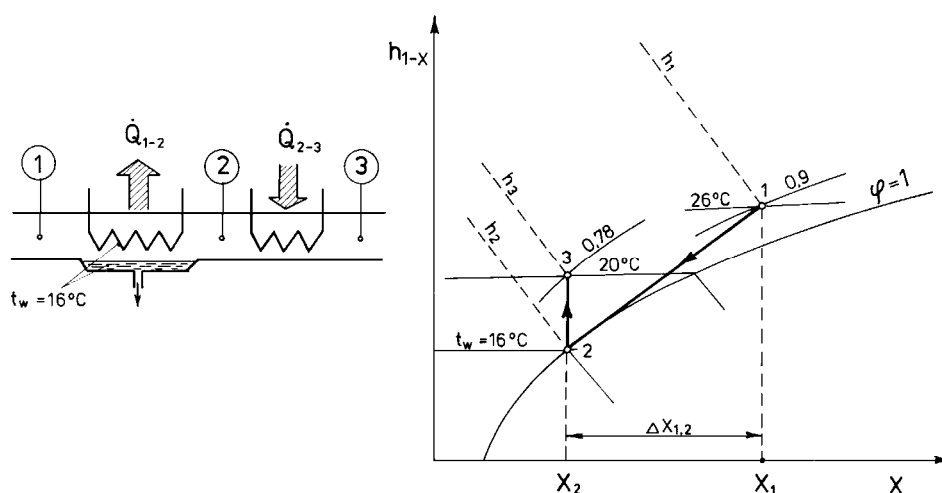
Tak więc potrzebna entalpia pary wynosi:

$$h_w = \frac{100,59 - 35,43}{0,0195} = 3341,5 \text{ kJ/kg}$$

Jest ona taka sama po zdławieniu, jak i przedtem, przy ciśnieniu 20 MPa. Zglądamy do tablicy pary nasyconej i stwierdzamy, że przy ciśnieniu 20 MPa jest $h'' = 2413,7 \text{ kJ/kg}$. Tak więc para nawilżająca musi być parą przegrzaną: $h_w = 3341,5 > h''$. Temperaturę pary nawilżającej znajdujemy, poszukując w tablicy 6 pary przegrzanej: w kolumnie ciśnienia 20 MPa, entalpii $h = 3341,5 \text{ kJ/kg}$. Znajdujemy bliskie tego wartości: 3334,5 kJ/kg przy temperaturze 530°C i 3364,6 kJ/kg przy temperaturze 540°C , a po interpolacji między tymi wartościami otrzymujemy poszukiwaną temperaturę pary: $t_2 = 532,3^\circ\text{C}$.

Zadanie 15.33

Powietrze o stanie 1, scharakteryzowanym przez $t_1 = 26^\circ\text{C}$ i $\phi = 0,9$ przy ciśnieniu 100 kPa, ma uzyskać stan 3, w którym posłuży do nawiewu pomieszczeń, mając $t_3 = 20^\circ\text{C}$ i $\phi = 0,78$ przy tym samym, co poprzednio, ciśnieniu. W tym celu powietrze świeże przepuszczane jest przez chłodnicę, której powierzchnie chłodzące mają temperaturę 16°C (równą punktowi rosy powietrza o stanie 3). Oziębione do tej temperatury powietrze w stanie nasycenia 2 jest następnie podgrzewane do osiągnięciażądanego stanu 3 (rys. 15.9). Wyznaczyć: względną ilość wydzielonej podczas chłodzenia wilgoci $\Delta X_{1,2}$, ilość ciepła q_{1-2} odprowadzonego na każdy 1 kg suchego powietrza, entalpię wody h_w odprowadzonej z chłodnicy oraz ilość ciepła q_{2-3} doprowadzoną w nagrzewnicy na każdy 1 kg suchego powietrza.



Rys. 15.9

Wyniki: $\Delta X_{1,2} = \Delta X_{2,3} = 7,8 \text{ g/kg p.s.}$, $q_{1-2} = \Delta h_{1,2} = 30,16 \text{ kJ/kg p.s.}$, $h_w = 0,52 \text{ kJ/kg p.s.}$,
 $q_{2-3} = \Delta h_{2,3} = 4,11 \text{ kJ/kg p.s.}$

Zadanie 15.34

Przepływające przez suszarkę powietrze ma odbierać od suszonego materiału wodę w ilości 500 kg/h. Powietrze pobierane jest z otoczenia z temperaturą $t_1 = 10^\circ\text{C}$ i wilgotnością względną $\phi_1 = 0,4$, następnie jest podgrzewane w nagrzewnicy do $t_2 = 50^\circ\text{C}$, przepływa przez złożę zboża i opuszcza suszarkę z temperaturą $t_3 = 21^\circ\text{C}$ i wilgotnością względną $\phi_3 = 0,9$. Suszenie przebiega przy ciśnieniu 100 kPa. Naszkicować na wykresie $h-x$ zmiany stanu powietrza w suszarce i obliczyć: strumień objętości zasysanego powietrza i strumień ciepła przekazywany powietrzu w nagrzewnicy.

Wyniki: $v_{1+x} = 0,817 \text{ m}^3/\text{kg p.s.}$, $\dot{V}_1 = 9,4 \text{ m}^3/\text{s}$, $\dot{m}_g = 11,50 \text{ kg/s}$, $\dot{Q}_{1-2} = 465 \text{ kW}$.

16. STECHIOMETRIA I TERMODYNAMIKA SPALANIA

Zadanie 16.1

Węgiel kamienny o następującym składzie masowym substancji bezpopiołowej i bezwodnej:

$$79\% \text{ C} + 5\% \text{ H} + 1,1\% \text{ S}_p + 14\% \text{ O} + 0,9\% \text{ N} = 100\%$$

zawiera 6% wilgoci i 10% popiołu. Obliczyć skład masowy węgla w stanie roboczym, a następnie zapotrzebowanie powietrza do spalania oraz ilości i składy spalin wilgotnych i suchych, jeżeli liczba nadmiaru powietrza $\lambda = 1,4$.

Rozwiązanie

Skoro udział wilgoci i popiołu wynosi:

$$W + A = 16\%$$

to substancja bezpopiołowa i bezwodna stanowi 84% całej masy węgla, a skład elementarny tego węgla uzyskuje się, mnożąc podane wyżej udziały przez 0,84:

$$66,36\% \text{ C} + 4,2\% \text{ H} + 0,924\% \text{ S}_p + 11,76\% \text{ O} + 0,756\% \text{ N} + 6,0\% \text{ W} + 10,0\% \text{ A} = 100\%$$

Minimalna ilość powietrza do spalania:

$$\begin{aligned} V_{p_{\min}} &= \frac{22,71}{0,21} \left(\frac{\text{C}}{12} + \frac{\text{H} - \frac{\text{O} - \text{S}_p}{8}}{4} \right) = \\ &= \frac{22,71}{21} \left(\frac{66,36}{12} + \frac{4,2 - \frac{11,76 - 0,924}{8}}{4} \right) = 6,75 \text{ um}^3/\text{kg pal} \end{aligned}$$

Rzeczywista ilość powietrza doprowadzanego do spalania:

$$V_p = \lambda \cdot V_{p_{\min}} = 1,4 \cdot 6,75 = \mathbf{9,45 \text{ um}^3/\text{kg pal.}}$$

Ilość powstających spalin wilgotnych:

$$\begin{aligned} V_{sp} &= 22,71 \left[\frac{\text{C}}{12} + \left(\frac{\text{H}}{2} + \frac{\text{W}}{18} \right) + \frac{\text{S}_p}{32} + \frac{\text{N}}{28} \right] + 0,79 V_p + 0,21(\lambda - 1) V_{p_{\min}} = \\ &= \frac{22,71}{100} \left[\frac{66,36}{12} + \left(\frac{4,2}{2} + \frac{6,0}{18} \right) + \frac{0,924}{32} + \frac{0,756}{28} \right] + 0,79 \cdot 9,45 + \\ &\quad + 0,21(1,4 - 1)6,75 = \mathbf{9,854 \text{ um}^3/\text{kg pal.}} \end{aligned}$$

Ilość spalin suchych

$$V_{sp_{\text{such}}} = V_{sp} - V_{\text{H}_2\text{O}} = 9,854 - 0,2271 \left(\frac{4,2}{2} + \frac{6}{18} \right) = \mathbf{9,301 \text{ um}^3/\text{kg pal}}$$

Celem wyznaczenia składów spalin obliczamy objętości poszczególnych składników spalin:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,2271 \cdot \frac{66,36}{12} = 1,256 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,2271 \left(\frac{4,2}{2} + \frac{6,0}{18} \right) = 0,5525 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,2271 \frac{0,924}{32} = 0,00656 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,2271 \frac{0,756}{28} + 0,79 \cdot 9,45 = 7,4716 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(1,4-1) \cdot 6,75 = 0,567 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$$

Skład spalin **wilgotnych**:

$$(\text{CO}_2) = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{sp}}} = \frac{1,256}{9,854} = 0,1275 = \mathbf{12,75\%}$$

$$(\text{H}_2\text{O}) = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{sp}}} = \frac{0,5525}{9,854} = 0,0561 = \mathbf{5,61\%}$$

$$(\text{SO}_2) = \frac{V_{\text{SO}_2}}{V_{\text{sp}}} = \frac{0,00656}{9,854} = 0,00067 = \mathbf{0,07\%}$$

$$(\text{N}_2) = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{sp}}} = \frac{7,4716}{9,854} = 0,7582 = \mathbf{75,82\%}$$

$$(\text{O}_2) = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{sp}}} = \frac{0,567}{9,854} = 0,0575 = \mathbf{5,75\%}$$

Razem: 100,00%

Skład spalin **suchych**:

$$[\text{CO}_2] = \frac{V_{\text{sp}}}{V_{\text{sp such}}} = \frac{1,256}{9,301} = 0,1350 = \mathbf{13,50\%}$$

$$[\text{SO}_2] = \frac{V_{\text{SO}_2}}{V_{\text{sp such}}} = \frac{0,00656}{9,301} = 0,000705 = \mathbf{0,07\%}$$

$$[\text{N}_2] = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{sp such}}} = \frac{7,4716}{9,301} = 0,8033 = \mathbf{80,33\%}$$

$$[\text{O}_2] = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{sp such}}} = \frac{0,567}{9,301} = 0,0610 = \mathbf{6,10\%}$$

Razem: 100,00%.

Zadanie 16.2

Dla węgla z poprzedniego zadania wyznaczyć maksymalną zawartość dwutlenku węgla w spalinach suchych $[\text{CO}_2]_{\text{max}}$, a następnie określić przybliżoną wartość liczby nadmiaru powietrza λ dla zmierzonych analizatorem wartości $[\text{CO}_2] = 13,5\%$ i $[\text{O}_2] = 6,1\%$.

Wyniki: $V_{\text{sp min}} = 6,601 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$, $[\text{CO}_2]_{\text{max}} = 19,03\%$, $\lambda_{\text{CO}_2} \cong 1,41$, $\lambda_{\text{O}_2} \cong 1,41$.

Zadanie 16.3

Sprawdzić, czy emisja dwutlenku siarki SO_2 w zad. 16.1 nie przekracza wartości dopuszczalnej przez rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska z dnia 12 II 1990 r. dla nowych kotłów pyłowych lub z rusztem mechanicznym, wynoszącej 200 g/GJ.

Rozwiązanie

Obliczoną uprzednio ilość SO_2 wyrazić trzeba w gramach:

$$m_{\text{SO}_2} = n_{\text{SO}_2} M_{\text{SO}_2} = \frac{0,00656}{22,71} \cdot 64 = 0,0185 \text{ kg/kg pal.}$$

czyli

$$m_{\text{SO}_2} = 18,5 \text{ g SO}_2/\text{kg pal.}$$

Energię chemiczną 1 kg paliwa wyraża wartość opałowa tego paliwa – w przypadku węgla można ją obliczyć ze wzoru Dulonga:

$$\begin{aligned} Q_i &= 32\,800 C + 120\,600 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 9\,300 S_p - 2\,500 W = \\ &= 32\,800 \cdot 0,6636 + 120\,600 \left(0,042 - \frac{0,1176}{8} \right) + \\ &+ 9\,300 \cdot 0,00924 - 2\,500 \cdot 0,06 = 24\,994 \text{ kJ/kg} = 24,994 \cdot 10^{-3} \text{ GJ/kg} \end{aligned}$$

Emitowana masa SO_2 odniesiona do energii chemicznej spalanego węgla wynosi więc:

$$\frac{m_{\text{SO}_2}}{E_{\text{CH}}} = \frac{18,5}{24,994 \cdot 10^{-3}} = 720,2 \text{ g/GJ} > 200 \text{ g/GJ}$$

i jest znacznie większa od wartości dopuszczalnej. Aby palenisko spalające ten węgiel spełniało wymagania ochrony środowiska, trzeba usunąć ze spalin:

$$\frac{\Delta m_{\text{SO}_2}}{m_{\text{SO}_2}} = \frac{720 - 200}{720} = 0,722 \text{ kg/kg}$$

czyli co najmniej 72,2% zawartej w nich masy SO_2 .

Zadanie 16.4

Olej opałowy zawierający w swojej masie 86% węgla elementarnego C, 12% wodoru atomowego H, 1% siarki palnej S_p , 0,6% tlenu atomowego O i 0,4% azotu atomowego N spalany jest z nadmiarem powietrza wyrażonym przez liczbę nadmiaru powietrza $\lambda = 1,15$. Obliczyć zapotrzebowanie powietrza oraz ilości i składy spalin: wilgotnych i suchych.

Wyniki: $V_p = 12,66 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$, $V_{sp} = 13,35 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$, $V_{sp_{\text{such}}} = 11,99 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$

$$\begin{aligned} (\text{CO}_2) &= 12,19\%, & [\text{CO}_2] &= 13,58\%, \\ (\text{H}_2\text{O}) &= 10,21\%, \\ (\text{SO}_2) &= 0,05\%, & [\text{SO}_2] &= 0,06\%, \\ (\text{N}_2) &= 74,95\%, & [\text{N}_2] &= 83,47\%, \\ (\text{O}_2) &= 2,60\%, & [\text{O}_2] &= 2,89\%. \end{aligned}$$

Zadanie 16.5

Dla spalin z poprzedniego zadania obliczyć maksymalną zawartość dwutlenku węgla w spalinach suchych $[\text{CO}_2]_{\text{max}}$, a następnie wyznaczyć przybliżoną wartość liczby nadmiaru powietrza dla zmierzonych wartości: $[\text{CO}_2] = 13,6\%$ i $[\text{O}_2] = 2,9\%$.

Wyniki: $(V_{sp_{\text{such}}})_{\text{min}} = 10,33 \text{ um}^3/\text{um}^3 \text{ pal.}$, $[\text{CO}_2]_{\text{max}} = 15,75\%$, $\lambda_{\text{CO}_2} \cong 1,16$, $\lambda_{\text{O}_2} \cong 1,16$.

Zadanie 16.6

Sprawdzić, czy spaliny z zad. 16.4. spełniają wymagania przepisów ochrony środowiska dla dopuszczalnej emisji dwutlenku siarki SO_2 : (a) z małych palenisk o mocy $\dot{E}_{\text{CH}} < 50 \text{ MW}$ i (b) z dużych palenisk o mocy $\dot{E}_{\text{CH}} > 50 \text{ MW}$.

W przypadku (a) dopuszcza się 1250 g SO₂/GJ, natomiast w przypadku (b) 170 g SO₂/GJ. Do obliczania wartości opałowej oleju można posłużyć się wzorem Boie'go:

$$Q_w = 33,15C + 120H + 10,46(S-O) \text{ [MJ/kg]}$$

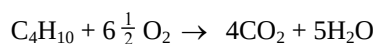
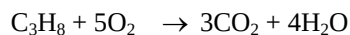
Wynik: m_{SO₂}/E_{CH} = 481 g/GJ spełnia warunek (a), natomiast przekracza prawie 3-krotnie granicę dopuszczalną dla dużych palenisk (b).

Zadanie 16.7

Tak zwany gaz płynny składa się z 80% propanu C₃H₈ i 20% butanu C₄H₁₀. Obliczyć ilość powietrza do spalania, przy 5-procentowym jego nadmiarze, oraz ilości i składy spalin wilgotnych i suchych.

Rozwiązanie

Spalanie obu składników gazu płynnego odbywa się według równań:



Ilość tlenu do spalania:

$$V_{O_2} \left[\frac{\text{um}^3}{\text{um}^3 \text{ pal}} \right] = n_{O_2} \left[\frac{\text{kmol}}{\text{kmol pal.}} \right] = 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} = \\ = 5 \cdot 0,8 + 6,5 \cdot 0,2 = \mathbf{5,3 \text{ um}^3 / \text{um}^3 \text{ pal.}}$$

Ilość powietrza:

$$V_{p_{\min}} = \frac{V_{O_2}}{0,21} = \frac{5,3}{0,21} = \mathbf{25,24 \text{ um}^3 / \text{um}^3 \text{ pal.}} \\ V_p = \lambda V_{p_{\min}} = 1,05 \cdot 25,24 = 26,50 \text{ um}^3$$

Objętości składników spalin:

$$V_{CO_2} = 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} = 3 \cdot 0,8 + 4 \cdot 0,2 = 3,2 \text{ um}^3 / \text{um}^3 \text{ pal.} \\ V_{H_2O} = 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} = 4 \cdot 0,8 + 5 \cdot 0,2 = 4,2 \text{ um}^3 / \text{um}^3 \text{ pal.} \\ V_{N_2} = 0,79 \cdot V_p = 0,79 \cdot 26,5 = 20,935 \text{ um}^3 / \text{um}^3 \text{ pal.} \\ V_{O_2} = 0,21(\lambda - 1)V_{p_{\min}} = 0,21 \cdot 0,05 \cdot 25,2 = 0,265 \text{ um}^3 / \text{um}^3 \text{ pal.}$$

Objętość spalin całkowitych:

$$V_{sp} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} = 28,60 \text{ um}^3 / \text{um}^3 \text{ pal.}$$

Objętość spalin suchych:

$$V_{sp_{\text{such.}}} = V_{sp} - V_{H_2O} = 24,40 \text{ um}^3 / \text{um}^3 \text{ pal.}$$

Skład spalin wilgotnych:

$$(\text{CO}_2) = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{sp}}} = \frac{3,2}{28,6} = 0,1119 = \mathbf{11,19\%}$$

$$(\text{H}_2\text{O}) = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{sp}}} = \frac{4,2}{28,6} = 0,1468 = \mathbf{14,68\%}$$

$$(\text{N}_2) = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{sp}}} = \frac{20,935}{28,6} = 0,7320 = \mathbf{73,20\%}$$

$$(\text{O}_2) = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{sp}}} = \frac{0,267}{28,6} = 0,0093 = \mathbf{0,93\%}$$

Razem: 100,00%

Skład spalin suchych:

$$[\text{CO}_2] = \frac{V_{\text{sp}}}{V_{\text{sp}_{\text{such}}}} = \frac{3,2}{24,4} = 0,1311 = \mathbf{13,11\%}$$

$$[\text{N}_2] = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{sp}_{\text{such}}}} = \frac{20,935}{24,4} = 0,8579 = \mathbf{85,80\%}$$

$$[\text{O}_2] = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{sp}_{\text{such}}}} = \frac{0,267}{24,4} = 0,011 = \mathbf{1,09\%}$$

Razem: 100,00%

Zadanie 16.8

Wyznaczyć maksymalną zawartość dwutlenku węgla CO_2 w spalinach suchych z poprzedniego zadania i obliczyć przybliżone wartości liczby nadmiaru powietrza λ w przypadku znanych z pomiaru zawartości: $[\text{CO}_2] = 13\%$ i $[\text{O}_2] = 1,1\%$.

Wyniki: $(V_{\text{sp}_{\text{such}}})_{\min} = 23,14 \text{ um}^3/\text{um}^3\text{pal.}$, $[\text{CO}_2]_{\max} = 13,8\%$, $\lambda_{\text{CO}_2} \cong 1,06$, $\lambda_{\text{O}_2} \cong 1,055$.

Zadanie 16.9

Gaz koksowniczy mający następujący skład objętościowy (molowy):

$$50\% \text{H}_2 + 8\% \text{CO} + 29\% \text{CH}_4 + 4\% \text{C}_x\text{H}_y + 2\% \text{CO}'_2 + 7\% \text{N}'_2 = 100\%$$

spalany jest z nadmiarem powietrza wyrażonym liczbą: $\lambda = 1,04$. Obliczyć zapotrzebowanie powietrza oraz ilości i składy spalin: całkowitych i suchych.

Wyniki: $V_p = 5,00 \text{ um}^3/\text{um}^3\text{pal.}$, $V_{\text{sp}} = 5,73 \text{ um}^3/\text{um}^3\text{pal.}$, $V_{\text{sp}_{\text{such}}} = 4,53 \text{ um}^3/\text{um}^3\text{pal.}$

$$(\text{CO}_2) = 8,20\%, \quad [\text{CO}_2] = 10,37\%,$$

$$(\text{H}_2\text{O}) = 20,93\%,$$

$$(\text{N}_2) = 70,17\%, \quad [\text{N}_2] = 88,75\%,$$

$$(\text{O}_2) = 0,70\%. \quad [\text{O}_2] = 0,88\%,$$

Zadanie 16.10

Obliczyć dla gazu koksowniczego z poprzedniego zadania maksymalną zawartość CO_2 w spalinach suchych: $[\text{CO}_2]_{\max}$ i określić przybliżone liczby nadmiaru powietrza dla zmierzonych analizatorami zawartości: $[\text{CO}_2] = 10,4\%$ i $[\text{O}_2] = 0,9\%$.

Wyniki: $(V_{\text{sp}_{\text{such}}})_{\min} = 4,34 \text{ um}^3/\text{um}^3\text{pal.}$, $[\text{CO}_2]_{\max} = 10,83\%$, $\lambda_{\text{CO}_2} \cong 1,04$, $\lambda_{\text{O}_2} \cong 1,04$.

Zadanie 16.11

Zbadać rachunkowo, na ile zmieni się skład spalin w zad. 16.1, jeżeli uwzględni się wilgotność powietrza użytego do spalania, skoro powietrze to przy temperaturze 12°C i ciśnieniu 100 kPa ma wilgotność względną $\phi = 0,7$.

Rozwiązanie

Zawartość wilgoci przypadająca na 1 kg suchego powietrza:

$$X = \frac{m_w}{m_g} = \frac{0,622 \phi P_s}{P - \phi P_s} = \frac{0,622 \cdot 0,7 \cdot 1,405}{100 - 0,7 \cdot 1,405} = 0,00616 \text{ kg/kg}$$

Masa 1 um³ powietrza suchego wynosi:

$$m_g = \frac{P_u V}{RT_u} = \frac{100 \cdot 1}{0,287 \cdot 273,15} = 1,2756 \text{ kg}$$

Tak więc 1 um³ powietrza suchego wnosi do procesu spalania parę wodną (wilgoć) w ilości:

$$m_w = X m_g = 0,00616 \cdot 1,2756 = 0,00786 \text{ kg/um}^3$$

Do spalania 1 kg węgla doprowadzane jest powietrze w ilości $V_p = 9,45 \text{ um}^3$ i wnosi ono wilgoć w łącznej ilości:

$$m'_w = m_w \cdot V_p = 0,00786 \cdot 9,45 = 0,07428 \text{ kg/kg pal.}$$

lub

$$V'_w = m'_w \frac{\tilde{v}}{M} = 0,07428 \cdot \frac{22,71}{18} = 0,0937 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$$

Wilgoć wnoszona do procesu z powietrzem, przechodzi bez zmian chemicznych do spalin i powiększa ilość spalin całkowitych oraz udział pary wodnej w tych spalinach.

Obliczona w zad. 16.1 ilość powietrza $V_p = 9,45 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$ jest ilością powietrza suchego – wskazuje na to udział tlenu: 21% (dokładniej: 20,95%) w powietrzu suchym.

Razem z wilgocią ilość powietrza wynosi $V'_p = 9,544 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$, jest go więc tylko o 1% więcej. W praktyce nie ma to znaczenia wobec poważniejszej niepewności oszacowania (przyjętej do obliczania V_p) liczby nadmiaru powietrza λ .

Ilość spalin całkowitych powiększa się do

$$V_{sp} = 9,854 + 0,0937 = 9,948 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$$

a zawarta w spalinach ilość pary do

$$V_{H_2O} = 0,5525 + 0,0937 = 0,6462 \text{ um}^3/\text{kg pal.}$$

Skład spalin wilgotnych jest więc następujący:

$$\begin{aligned} (CO_2) &= \frac{V_{CO_2}}{V_{sp}} = \frac{1,256}{9,948} = 0,1263 = 12,63\% \\ (H_2O) &= \frac{V_{H_2O}}{V_{sp}} = \frac{0,6462}{9,948} = 0,0650 = \mathbf{6,50\%} \\ (SO_2) &= \frac{V_{SO_2}}{V_{sp}} = \frac{0,00656}{9,948} = 0,00066 = 0,07\% \\ (N_2) &= \frac{V_{N_2}}{V_{sp}} = \frac{7,4716}{9,948} = 0,7511 = 75,11\% \\ (O_2) &= \frac{V_{O_2}}{V_{sp}} = \frac{0,567}{9,948} = 0,0570 = 5,70\% \end{aligned}$$

Udział pary wodnej w spalinach wzrósł z 5,61 do 6,50%, czyli o 0,89 punktu procentowego, a więc jest to wzrost o 16%. Udziały pozostałych, głównych składników zmalały o 0,9%. Skład spalin suchych pozostaje oczywiście niezmieniony.

Zadanie 16.12

Obliczyć skład spalin wilgotnych powstających ze spalania oleju w zad. 16.4 z uwzględnieniem wilgotności powietrza, określonej przez wilgotność względną 75% przy 20°C i 100 kPa, oraz porównać wyniki obydwu obliczeń.

Wynik: (CO_2) = 11,99%, (H_2O) = **11,70%**, (SO_2) = 0,05%, (N_2) = 74,70%, (O_2) = 2,55%.

Zadanie 16.13

Obliczyć zmieniony, wskutek uwzględnienia wilgotności względnej powietrza: $\varphi = 0,6$ przy 15°C i 100 kPa, skład spalin wilgotnych powstałych z gazu koksowniczego wg danych zadania 16.9 i porównać wyniki obydwu obliczeń.

Wynik: (CO_2) = 8,13%, (H_2O) = **21,65%**, (N_2) = 69,54%, (O_2) = 0,69%.

Zadanie 16.14

Obliczyć temperaturę rosy spalin z zadania 16.1, jeżeli ciśnienie tych spalin wynosi 100 kPa.

Rozwiązanie

Temperaturą rosy jest temperatura nasycenia (parą wodną) odpowiadająca ciśnieniu składnikowemu pary w mieszaninie gazów – w tym przypadku w spalinach.

Ciśnienie składnikowe pary:

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = r_{\text{H}_2\text{O}}P = (\text{H}_2\text{O})P = 0,0561 \cdot 100 = 5,61 \text{ kPa}$$

Z tablicy 5 pary wodnej nasyconej (w załączniku) odczytujemy dla 5,61 kPa temperaturę nasycenia (po interpolacji):

$$t_s \equiv t_r = 34,9 \approx 35,0^\circ\text{C}$$

Zadanie 16.15

Obliczyć temperaturę rosy spalin z zad. 16.1, po uwzględnieniu wilgotności powietrza (zad. 16.11), dla ciśnienia spalin 100 kPa.

Wynik: $t'_r = 37,4^\circ\text{C}$

Zadanie 16.16

Obliczyć temperaturę rosy spalin z oleju opałowego wg zad. 16.4 oraz zad. 16.12 (z uwzględnioną wilgotnością powietrza) przy ciśnieniu spalin wynoszącym 100 kPa.

Wyniki: $t_r = 46,2^\circ\text{C}$, $t'_r = 49,9^\circ\text{C}$.

Zadanie 16.17

Obliczyć teoretyczną temperaturę spalania węgla w warunkach zad. 16.1, jeżeli wartość opałowa tego węgla $Q_i = 24\,994 \text{ kJ/kg}$, temperatury początkowe wynoszą: powietrza $t_p = 15^\circ\text{C}$, węgla $t_{\text{pal}} = 12^\circ\text{C}$, popiołu opuszczającego palenisko $t_A = 50^\circ\text{C}$, a ciepło właściwe: węgla $c_{\text{pal}} = 1,0 \text{ kJ/kgK}$ i popiołu $c_A = 0,8 \text{ kJ/kgK}$. Dysocjację spalin pominąć – jest ona w tym zakresie temperatur niewielka.

Rozwiązanie

Teoretyczną temperaturę spalania oblicza się ze znanego wzoru bilansowego, zakładając zupełne i całkowite spalanie ($Q_{i_{\text{sp}}} = Q_{i_A} = 0$) oraz adiabatyczność procesu ($Q_{\text{ot}} = 0$):

$$t_{sp_{max}} = \frac{Q_i + c_{pal} t_{pal} + V_p C_{p_p} t_p - A c_A t_A}{V_{sp} C_{p_{sp}} \Big|_0^{t_{sp}}} = \frac{24994 + 1,0 \cdot 12 + 9,45 \cdot 1,28 \cdot 15 - 0,1 \cdot 0,8 \cdot 50}{9,854 C_{p_{sp}} \Big|_0^{t_{sp}}} = \frac{2555,7}{C_{p_{sp}} \Big|_0^{t_{sp}}}$$

Podstawiono tu $C_{p_p} \Big|_0^{15} = 1,28 \text{ kJ/um}^3\text{K}$ wyznaczone z tablicy 3 w załączniku przez interpolację podanych tam wartości $\tilde{c}_p$ i podzielenie wyniku przez $\tilde{v}_u = 22,71 \text{ um}^3/\text{kmol}$.

Otrzymane równanie:

$$C_{p_{sp}} \Big|_0^{t_{sp_{max}}} \cdot t_{sp_{max}} = 2555,7$$

rozwiązać trzeba metodą prób, zakładając wartość $t_{sp_{max}}$ i licząc następnie średnie ciepło

spalin $C_{p_{sp}} \Big|_0^{t_{sp}}$, jak pokazano w tablicy.

Składnik	Udział $r_i = z_i$	$\tilde{c}_{pi} \Big _0^t [\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}]$		
		1500°C	1600°C	1700°C
CO ₂	0,1275	52,348	52,800	53,218
H ₂ O	0,0561	41,525	42,056	42,576
SO ₂	0,0007	52,251	52,544	52,796
N ₂	0,7582	32,502	32,699	32,883
O ₂	0,0575	34,282	34,474	34,658
$\tilde{c}_p \Big _0^{t_{sp}} [\text{kJ/kmolK}]$		35,655	35,902	36,1355
$C_{p_{sp}} \Big _0^{t_{sp}} [\text{kJ/um}^3\text{K}]$		1,570	1,581	1,591
$C_{p_{sp}} \Big _0^{t_{sp}} \cdot t_{sp}$		2355	2529	2705

Jak widać, wynik leży między 1600 i 1700°C. Interpolacja liniowa (graficzna lub numeryczna) daje wynik:

$$t_{sp_{max}} = 1615^\circ\text{C}$$

Interpolacja liniowa jest tu w pełni uzasadniona, gdyż sieczne krzywej zmieniają nachylenie w obliczanym zakresie zaledwie o 1%.

Zadanie 16.18

Jaka byłaby teoretyczna temperatura płomienia w poprzednim zadaniu, gdyby popiół pozostawał w komorze spalania razem ze spalinami?

Wynik: $t_{sp_{max}} = t_A = 1608^\circ\text{C}$.

Zadanie 16.19

Jaka byłaby teoretyczna temperatura spalania w zad. 16.17, gdyby została uwzględniona wilgotność powietrza, tak jak w zad. 16.11?

Wynik: $t_{sp_{max}} = 1599^{\circ}\text{C}$.

Zadanie 16.20

Obliczyć teoretyczną temperaturę spalania oleju opałowego w warunkach zad. 16.4, jeżeli wartość opałowa oleju $Q_i = 42\,951\text{ kJ/kg}$, temperatury: powietrza $t_p = 15^{\circ}\text{C}$, oleju $t_{pal} = 80^{\circ}\text{C}$, a średnie ciepło właściwe oleju $c_{pal} = 1,88\text{ kJ/kgK}$. W obliczeniu pominąć dysocjację spalin.

Wynik: $t_{sp_{max}} = 1995^{\circ}\text{C}$.

Zadanie 16.21

Obliczyć teoretyczną temperaturę płomienia z gazu płynnego spalanego w warunkach podanych w zad. 16.7, jeżeli wartość opałowa tego gazu wynosi $95\,293\text{ kJ/um}^3$, a temperatury powietrza i gazu są jednakowe i wynoszą 15°C ; ciepło właściwe gazu palnego: $C_p = 3,29\text{ kJ/um}^3\text{K}$.

Dysocjację spalin, dla uproszczenia obliczeń, pominąć.

Wynik: $t_{sp_{max}} = 2027^{\circ}\text{C}$.

Zadanie 16.22

Obliczyć temperaturę rosy spalin z gazu płynnego wg zad. 16.7 przy ciśnieniu 100 kPa.

Wynik: $t_r = 53,5^{\circ}\text{C}$.

Zadanie 16.23

Obliczyć teoretyczną temperaturę płomienia z gazu koksowniczego spalanego w warunkach zadania 16.9, jeżeli wartość opałowa tego gazu $Q_i = 19\,045\text{ kJ/um}^3$, jego temperatura wynosi 15°C , a ciepło właściwe $C_p = 1,385\text{ kJ/um}^3\text{K}$. Powietrze doprowadzane jest do palnika z temperaturą 10°C . Dysocjację spalin pominąć.

Wynik: $t_{sp_{max}} = 2037^{\circ}\text{C}$.

Zadanie 16.24

Obliczyć temperaturę rosy spalin z gazu koksowniczego wg zad. 16.9 i zad. 16.13 przy ciśnieniu spalin 100 kPa.

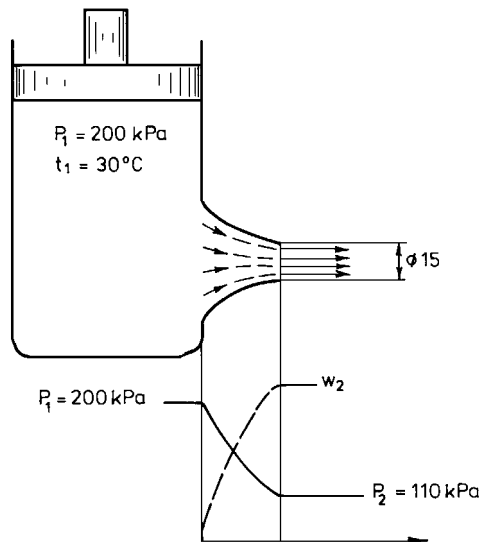
Wyniki: $t_r = 61,0^{\circ}\text{C}$, $t'_t = 61,7^{\circ}\text{C}$.

17. TERMODYNAMIKA PRZEPŁYWÓW

Zadanie 17.1

W zbiorniku znajduje się powietrze ($\kappa = 1,4$; $R = 287 \text{ Nm/kgK}$) o stałym ciśnieniu absolutnym 200 kPa i temperaturze 30°C.

Jaka jest prędkość wypływu powietrza z dyszy zbieżnej, wmontowanej w ściankę zbiornika, do przestrzeni o stałym ciśnieniu bezwzględnym 110 kPa, gdy stosunek prędkości $\varphi = 0,96$? Jaka jest prędkość przepływu w najwęższym przekroju o średnicy 15 mm i jaki strumień masowy powietrza opuszcza dyszę?



Rys. 17.1

Rozwiązanie

Ciśnienie krytyczne wynosi

$$P_{kr} = \beta P_1 = 0,528 \cdot 200 = 105,6 \text{ kPa}$$

wobec krytycznego stosunku ciśnień β dla gazu 2-atomowego:

$$\beta = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = \left(\frac{2}{1,4 + 1} \right)^{\frac{1,4}{1,4 - 1}} = 0,528$$

Ciśnienie krytyczne nie zostaje w wypływającym z dyszy powietrzu osiągnięte, gdyż u wylotu panuje ciśnienie wyższe:

$$P_2 = 110 \text{ kPa} > P_{kr} = 105,6 \text{ kPa}$$

Wypływ z dyszy jest więc poddźwiękowy, a prędkość wypływu wynosi zgodnie z równaniem de St Venanta (do którego podstawiamy ciśnienie w N/m²!):

$$w_2 = \varphi \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} =$$

$$= 0,96 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} \cdot 200\,000 \cdot 0,435 \cdot \left[1 - \left(\frac{110}{200} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 296,9 \text{ m/s}$$

Potrzebną w tym wzorze objętość właściwą v_1 obliczono z równania stanu:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{0,287 \cdot (273,15 + 30)}{200} = 0,435 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Prędkość w największym przekroju jest równa prędkości wypływu:

$$w_m = w_2 = 296,9 \text{ m/s}$$

Do obliczenia strumienia masy wypływającego powietrza potrzebna jest wartość funkcji przepływu w przekroju wylotowym:

$$\psi_2 = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} \left(\frac{105,6}{200} \right)^{\frac{2}{1,4}} \left[1 - \left(\frac{105,6}{200} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 0,685$$

Zatem

$$\dot{m} = \varphi A_2 \psi_2 \sqrt{\frac{P_1}{v_1}} =$$

$$= 0,96 \frac{\pi \cdot 0,015^2}{4} \cdot 0,685 \cdot \sqrt{\frac{110\,000}{0,435}} = 0,0788 \text{ kg/s} = 283,7 \text{ kg/h}$$

Zadanie 17.2

Do zbiornika z poprzedniego zadania podłączono zamiast dyszy zbieżnej dyszę zbieżno-rozbieżną (de Lavalą) o średnicy najmniejszego przekroju równej 15 mm, a za dyszą zapanowało ciśnienie 80 kPa. Obliczyć: prędkość wypływu z dyszy, jeżeli dla całej dyszy jest $\varphi_2 = 0,94$, prędkość w najmniejszym przekroju, gdy dla części zwężającej się jest $\varphi_1 = 0,97$ oraz strumień masy wypływającego powietrza (z użyciem $\varphi = \varphi_2 = 0,94$).

Wyniki: $w_2 = 352,1 \text{ m/s}$, $w_m = 309,0 \text{ m/s}$, $\dot{m} = 277,6 \text{ kg/h}$.

Zadanie 17.3

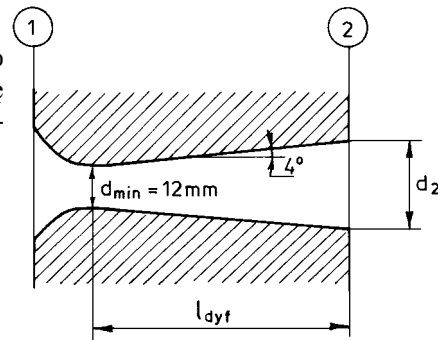
Powietrze o ciśnieniu początkowym 600 kPa i temperaturze 130°C ma się rozprężyć w dyszy ze sprawnością $\eta_i = 0,95$ do ciśnienia 120 kPa. Jakie będą: prędkości i liczba Macha na wylocie i jaki kształt: zbieżny czy zbieżno-rozbieżny musi mieć dysza? Powietrze traktować jak gaz doskonały o właściwościach określonych przez $\kappa = 1,40$ i $R = 287 \text{ Nm/kgK}$.

Wyniki: $w_2 = 532 \text{ m/s}$, $(\text{Ma})_2 = 1,665$, dysza zbieżno-rozbieżna.

Zadanie 17.4

Jaka będzie przepustowość dyszy z poprzedniego zadania dla minimalnej średnicy 12 mm? Jaką średnicę będzie miała dysza u wylotu i jak długi będzie jej dyfuzor dla półkąta rozwarcia $\alpha = 4^\circ$?

Wyniki: $\dot{m}_{\max} = 0,1332 \text{ kg/s}$, $d_2 = 14,1 \text{ mm}$,
 $l_{\text{dyf}} = 15 \text{ mm}$.



Rys. 17.2

Zadanie 17.5

Przez dyszę z poprzedniego zadania ma przepływać hel ($\kappa = 1,667$; $M = 4 \text{ kg/kmol}$) o początkowych parametrach takich jak w zad. 1 (600 kPa, 130°C). Zakładając taką samą sprawność dyszy $\eta_i = 0,95$ i ciśnienie wylotowe 120 kPa, obliczyć: prędkość wypływu helu z dyszy w_2 , liczbę Macha u wylotu $(Ma)_2$, przepustowość dyszy $\dot{m}_{\max}$ i średnicę wylotową dyszy d_2 .

Wyniki: $w_2 = 1410,2 \text{ m/s}$, $(Ma)_2 = 1,61$, $\dot{m}_{\max} = 0,054 \text{ kg/s} = 194,4 \text{ kg/h}$, $d_2 = 13,5 \text{ mm}$.

Zadanie 17.6

Przegrzana para wodna o ciśnieniu 1500 kPa i temperaturze 300°C dopływa do dyszy, w której rozpręża się do 1000 kPa. Jaką prędkość osiąga para u wylotu z dyszy jeżeli stosunek prędkości $\phi = 0,96$? Jaka jest tam liczba Macha i jaki kształt dyszy jest w tym przypadku właściwy?

Rozwiązanie

Z wykresu h-s dla pary wodnej odczytujemy: $h_1 = 3058 \text{ kJ/kg} = 3058 \cdot 10^3 \text{ Nm/kg}$, $h_{2s} = 2940 \text{ kJ/kg} = 2940 \cdot 10^3 \text{ Nm/kg}$ i podstawiamy we właściwych jednostkach do wzoru:

$$w_2 = \phi \sqrt{2(h_1 - h_{2s})} = 0,96 \cdot \sqrt{2(3058 - 2940) \cdot 10^3} = 466,4 \text{ m/s}$$

Do obliczenia prędkości dźwięku w parze wypływającej z dyszy konieczna jest znajomość objętości właściwej v_2 i temperatury wypływającej pary t_2 . Temperaturę t_2 wyznaczamy z obliczonej entalpii:

$$h_2 = h_1 - \eta_i (h_1 - h_{2s}) = 3058 - 0,96^2 \cdot (3058 - 2940) = 2949,2 \text{ kJ/kg}$$

wykorzystano tu zależność:

$$\phi = \sqrt{\eta_i}, \text{ czyli } \eta_i = \phi^2 = 0,96^2 = 0,9216$$

Na wykresie h-s (lub w tablicy 6 pary przegrzanej) odczytujemy dla $P_2 = 1000 \text{ kPa}$ i $h_2 = 2949,2 \text{ kJ/kg}$ temperaturę:

$$t_2 = 253^\circ\text{C}$$

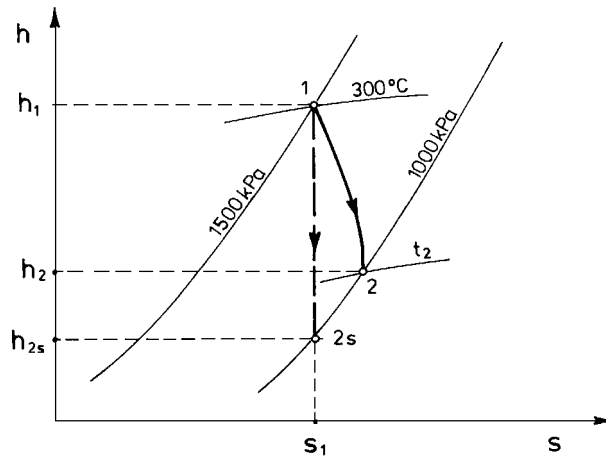
Objętość właściwą pary w stanie 2, określonym przez P_2 i t_2 , wyznaczamy z wykresu h-s lub bierzemy z tablic pary przegrzanej: $v_2 = 0,2342 \text{ m}^3/\text{kg}$. Zatem prędkość dźwięku u wylotu dyszy (z ciśnieniem wyrażonym w N/m^2):

$$a_2 = \sqrt{\kappa P_2 v_2} = \sqrt{1,30 \cdot 1000 \cdot 10^3 \cdot 0,2342} = 551,5 \text{ m/s}$$

Gdyby użyć wzoru dla gazu doskonałego:

$$a_2 = \sqrt{\kappa R T_2} = \sqrt{1,3 \cdot \frac{8314,3}{18} (73,15 + 253)} = 562,1 \text{ m/s}$$

otrzymany wynik byłby o 2 % za duży – para nie jest gazem doskonałym.



Rys. 17.3

Liczba Macha

$$(Ma)_2 = \frac{w_2}{d_2} = \frac{466,4}{551,5} = 0,85 < 1$$

Wypływ pary jest poddźwiękowy i właściwym kształtem dyszy jest konfuzor, czyli kanał zbieżny (dysza Bendemanna).

Zadanie 17.7

Jaki strumień masy pary przepływa przez dyszę z poprzedniego zadania, jeżeli ma ona przekrój kołowy, a średnica wylotowa wynosi $d_2 = 10 \text{ mm}$?

Rozwiązanie

a) Znając prędkość wypływu $w_2 = 466,4 \text{ m/s}$ i średnicę $d_2 = 10 \text{ mm}$, możemy posłużyć się równaniem ciągłości strugi – potrzebna jest jedynie znajomość gęstości pary ρ_2 lub objętości właściwej w przekroju wylotowym dyszy v_2 . Tę ostatnią wyznaczyliśmy uprzednio z tablic pary przegrzanej lub z wykresu $h-s$ dla $P_2 = 1000 \text{ kPa}$ i $t_2 = 253^\circ\text{C}$. Obliczamy więc gęstość:

$$\rho_2 = \frac{1}{v_2} = \frac{1}{0,2342} = 4,270 \text{ kg/m}^3$$

a zatem:

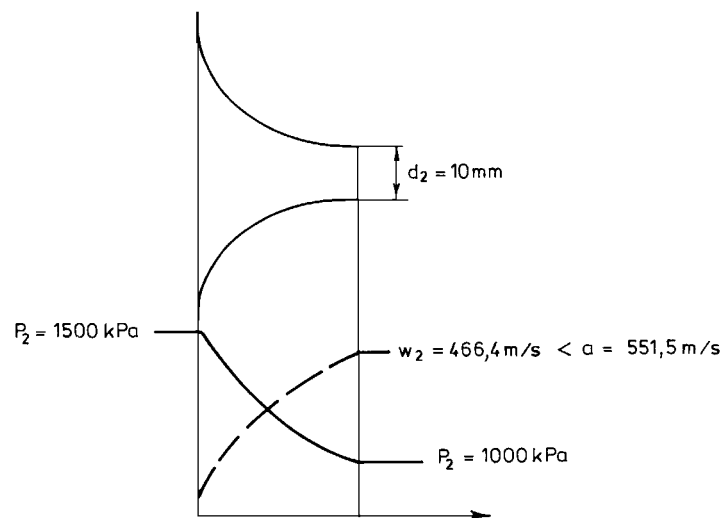
$$\dot{m} = A_2 w_2 \rho_2 = \frac{\pi \cdot 0,01^2}{4} \cdot 466,4 \cdot 4,27 = 0,1564 \text{ kg/s} = 563,1 \text{ kg/h}$$

b) Obliczenie można było wykonać inaczej. Zakładając, że przegrzana para wodna jest gazem doskonałym scharakteryzowanym przez $\kappa = 1,30$, można skorzystać, z opartej na

tym założeniu, teorii dysz i wzoru, na strumień masowy, w którym występuje funkcja przepływu:

$$\psi = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 1,3}{1,3-1} \left(\frac{1000}{1500}\right)^{\frac{2}{1,3}} \left[1 - \left(\frac{1000}{1500}\right)^{\frac{1,3-1}{1,3}}\right]} = 0,644$$



Rys. 17.4

Potrzebną jeszcze do obliczeń objętość właściwą pary przegrzanej: $v_1 = 0,1697 \text{ m}^3/\text{kg}$ dla $P_1 = 1500 \text{ kPa}$ i $t_1 = 300^\circ\text{C}$ znajdujemy w tablicach, lub (z mniejszą dokładnością) odczytujemy, stosując interpolację, na wykresie $h-s$.
Zatem:

$$\dot{m} = \varphi \psi_2 A_2 \sqrt{\frac{P_1}{v_1}} = 0,96 \cdot 0,644 \cdot \frac{\pi 0,01^2}{4} \sqrt{\frac{1500 \cdot 10^3}{0,1697}} = 0,1444 \text{ kg/s} = 519,7 \text{ kg/h}$$

Wynik ten, oparty na upraszczającym założeniu, że para jest gazem doskonałym, różni się od uzyskanego pod (a) wyniku o wartość względną:

$$\frac{519 - 563,6}{563,6} = -0,078$$

jest więc od wyniku dokładnego mniejszy o 7,8%.

Zadanie 17.8

Przegrzana para wodna dopływa do dyszy o przekroju kołowym z temperaturą $t_1 = 300^\circ\text{C}$ i ciśnieniem $P_1 = 500 \text{ kPa}$ w ilości $\dot{m} = 0,1 \text{ kg/s}$. Rozprężanie w dyszy odbywa się ze sprawnością $\eta_i = 0,89$ i przebiega do ciśnienia końcowego za dyszą $P_2 = 100 \text{ kPa}$. Określić charakter użytej dyszy i obliczyć: prędkość wypływu pary z dyszy w_2 , temperaturę wypływającej pary t_2 , liczbę Macha wypływającej pary $(Ma)_2$, średnicę wylotową dyszy d_2 oraz

średnicę najmniejszego przekroju $d_{\min}$ przyjmując stosunek prędkości dla konfuzora dyszy $\varphi_k = 0,96$.

Wyniki: $P_2/P_1 = 0,2 < \beta = 0,546$, dysza de Laval, $w_2 = 790$ m/s, $t_2 = 128,5^\circ\text{C}$,
 $(Ma)_2 = 1,61$, $d_2 = 17,2$ mm, $d_{\min} = 14,3$ mm.

Zadanie 17.9

Kocioł parowy wytwarza 2,5 t/h pary suchej nasyconej o ciśnieniu absolutnym 1,6 MPa. Jaką średnicę musi mieć zawór bezpieczeństwa, jeżeli – przy niezmienionej produkcji pary – pobór pary zostanie zatrzymany? Ciśnienie otoczenia wynosi 100 kPa. Straty w zaworze pominąć.

Rozwiązanie

Ciśnienie krytyczne dla $\kappa = 1,135$ w przypadku pary suchej nasyconej:

$$P_k = \beta P_1 = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} P_1 = \left(\frac{2}{1,135 + 1} \right)^{\frac{1,135}{0,135}} \cdot 1,6 = 0,9239 \text{ MPa}$$

Ciśnienie za zaworem $P_2 = 100$ kPa jest mniejsze od ciśnienia krytycznego $P_{kr} = 923,9$ kPa. Zatem w przekroju gniazda zaworu bezpieczeństwa ustali się ciśnienie krytyczne (jak w dyszy zbieżnej) i krytyczna (lawalowska) prędkość wypływu – dalsza ekspansja pary połączona z silnymi efektami akustycznymi przebiegać będzie za zaworem. Wypływający strumień masy pary wyniesie (przy $\varphi = 1$):

$$\dot{m}_{\max} = \psi_{\max} A_2 \sqrt{\frac{P_1}{v_1}} = \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}} A_2 \sqrt{\frac{P_1}{v_1}}$$

Musi on być co najmniej równy strumieniowi produkowanej pary:

$$\dot{m} = 2,5 \text{ t/h} = \frac{2500}{3600} = 0,6944 \text{ kg/s}$$

Zatem

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{\dot{m}_{\max}}{\sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}} \cdot \sqrt{\frac{P_1}{v_1}}} = \\ &= \frac{0,6944}{\sqrt{1,135 \left(\frac{2}{1,135 + 1} \right)^{\frac{1,135 + 1}{1,135 - 1}}} \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^6}{0,1237}}} = 0,000304 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Średnica zaworu:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4A_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000304}{\pi}} = 0,01967 \text{ m} = 19,7 \text{ mm}$$

Zadanie 17.10

Para przegrzana o ciśnieniu $P_1 = 500$ kPa i temperaturze $t_1 = 320^\circ\text{C}$ rozpręża się adiabaticznie w dyszy de Laval do 5 kPa. Stosunek prędkości tej dyszy $\varphi = 0,95$. Obliczyć: stopień suchości pary po rozprężeniu i prędkość wypływu pary.

Wyniki: $x_2 = 0,923$, $w_2 = 1208$ m/s.

Zadanie 17.11

W rurociągu, w którym płynie gaz ziemny, wykonano otwór o średnicy 2 mm. Gaz ziemny zawiera 95% metanu (CH_4) i 5% azotu (N_2) ma temperaturę 15°C i ciśnienie 180 kPa. Ciśnienie w otoczeniu $P_{\text{ot}} = 100$ kPa. Jaka objętość gazu wypływa w ciągu godziny z rurociągu, jeżeli stosunek prędkości wynosi $\varphi = 0,9$, a stosunek zwężenia wypływającej strugi $\mu = 0,65$? Składniki gazu ziemnego traktować jak gazy doskonałe o wartościach $\kappa = 1,30$ dla CH_4 i $\kappa = 1,40$ dla N_2 .

Rozwiązanie

Do określenia charakteru wypływu niezbędny jest stosunek ciepł właściwych gazu ziemnego:

$$\begin{aligned}\kappa &= \frac{\sum g_i c_{p_i}}{\sum g_i c_{v_i}} = \frac{\sum r_i \tilde{c}_{p_i}}{\sum r_i \tilde{c}_{v_i}} = \frac{\sum r_i \frac{\kappa_i}{\kappa_i - 1} \tilde{R}}{\sum r_i \frac{\tilde{R}}{\kappa_i - 1}} = \\ &= \frac{0,95 \cdot \frac{1,30}{1,30-1} + 0,05 \cdot \frac{1,40}{1,40-1}}{0,95 \cdot \frac{1}{1,30-1} + 0,05 \cdot \frac{1}{1,40-1}} = 1,304\end{aligned}$$

Krytyczny stosunek ciśnień wynosi więc:

$$\beta = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1,304}{1,304-1}} = 0,545$$

a ciśnienie krytyczne:

$$P_{\text{kr}} = \beta P_1 = 0,545 \cdot 180 = 98,1 \text{ kPa} < P_2 = 100 \text{ kPa}$$

jest więc niższe od ciśnienia otoczenia i nie zostaje przez wypływający gaz osiągnięte – wypływ jest poddźwiękowy.

W otworach ostrokrawędziowych krytyczny stosunek ciśnień jest mniejszy niż w zaokrąglonych (dyszach) i wynosi $\beta = 0,245$ dla gazów 2-atomowych oraz $\beta = 0,268$ dla 3-atomowych, a więc ciśnienie krytyczne w rozpatrywanym przypadku będzie jeszcze niższe niż obliczono.

Do obliczenia prędkości wypływu potrzebna jest objętość właściwa gazu v_1 , a do jej wyznaczenia potrzebna masa molowa:

$$M = \sum M_i r_i = 0,98 \cdot 16 + 0,02 \cdot 28 = 16,6 \text{ kg/kmol}$$

A więc

$$v_1 = \frac{\tilde{R} T_1}{M P_1} = \frac{8,3143 \cdot (273,15 + 15)}{16,6 \cdot 180} = 0,8018 \text{ m}^3/\text{kg}$$

prędkość wypływu:

$$\begin{aligned}w_2 &= \varphi \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} = \\ &= 0,9 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,308}{1,308-1} 180000 \cdot 0,8018 \left[1 - \left(\frac{100}{180} \right)^{\frac{0,304}{1,304}} \right]} = 358,4 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Strumień objętości wypływający przez otwór ostrokrawędziowy przy stosunku przewężenia strugi $\mu = 0,65$ wynosi:

$$\dot{V} = \mu A_2 w_2 = 0,65 \cdot \frac{\pi \cdot 0,002^2}{4} \cdot 358,4 = 0,000732 \text{ m}^3/\text{s} = 2,635 \text{ m}^3/\text{h}$$

Zadanie 17.12

Jaki jest strumień masy gazu ziemnego wypływający z otworu o średnicy 2 mm w warunkach poprzedniego zadania.

Rozwiązanie

U wylotu z otworu panuje ciśnienie $P_2 = 100 \text{ kPa}$ i nieznana na razie temperatura T_2 po adiabatycznym rozprężaniu ze sprawnością:

$$\eta_i = \varphi^2 = 0,9^2 = 0,81$$

Dla izentropowego rozprężania byłoby:

$$T_{2s} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 288,15 \left(\frac{100}{180} \right)^{1,308} = 250,90 \text{ K}$$

Spadek entalpii spowodowany rozprężaniem adiabatycznym z tarcie:

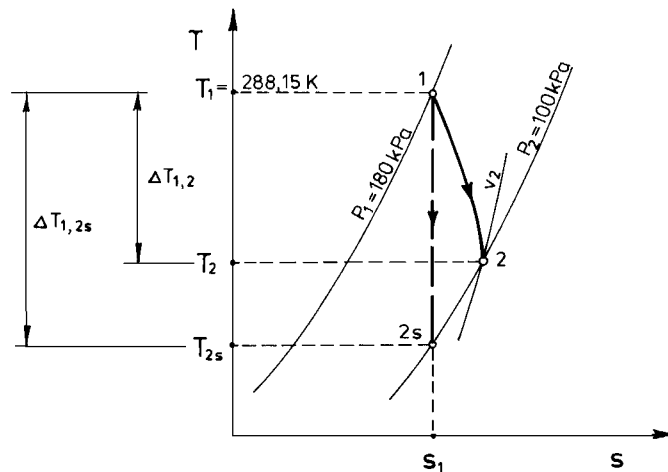
$$\Delta h_{1,2} = \eta_i \Delta h_{1,2s}, \quad \text{czyli} \quad c_p \Delta T_{1,2} = \eta_i c_p \Delta T_{1,2s}$$

daje dla gazu doskonałego (gdy $c_p = \text{const}$) spadek temperatury:

$$\Delta T_{1,2} = \eta_i \Delta T_{1,2s} = 0,81 (288,15 - 250,90) = 30,17 \text{ K}$$

Zatem temperatura po rozprężeniu rzeczywistym:

$$T_2 = T_1 - \Delta T_{1,2} = 288,15 - 30,17 = 257,98 \text{ K}$$



Rys. 17.5

Objętość właściwa gazu ziemnego po rozprężeniu:

$$v_2 = \frac{\tilde{R} T_2}{MP_2} = \frac{8,3143 \cdot 257,98}{16,6 \cdot 100} = 1,291 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Obliczony przedtem strumień objętości $\dot{V}$ można teraz przeliczyć na strumień masy otrzymując poszukiwany wynik:

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v_2} = \frac{2,635}{1,292} = 2,04 \text{ kg/h}$$

Zadanie 17.13

W suszarce próżniowej podtrzymuje się pompą podciśnienie wynoszące 40 kPa przy ciśnieniu otoczenia wynoszącym 102,5 kPa i temperaturze otoczenia 18°C. Określić masę powietrza, jaka napływa do suszarki w ciągu godziny przez szczelinę o powierzchni 8 mm², przy stosunku prędkości $\phi = 0,75$ i stosunku zwężenia strugi $\mu = 0,8$.

Wyniki: $w_2 = 208 \text{ m/s}$, $T_2 = 269,6 \text{ K}$, $\dot{m} = 3,87 \text{ kg/h}$.

18. PRZENOSZENIE CIEPŁA

PRZEWODZENIE CIEPŁA

Zadanie 18.1

Mur ceglany o grubości 24 cm ma przewodność cieplną $\lambda = 0,814 \text{ W/mK}$. Jedna z jego ścian (rys. 18.1) o wymiarach $4 \times 10 \text{ m}$ ma temperaturę 30°C , a druga 5°C . Określić opór cieplny ścianki i obliczyć strumień ciepła przewodzony przez ściankę. Efekty na obrzeżach ścianki pominąć, zakładając adiabatyczne umocowanie obwodu ścianki.

Rozwiązanie

Opór cieplny ścianki płaskiej:

$$R_w = \frac{\delta}{\lambda A_w} = \frac{0,24}{0,814(4 \cdot 10)} = 7,37 \cdot 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Strumień cieplny przewodzony przez ściankę:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} A_w (t_{w1} - t_{w2}) = \frac{0,814}{0,24} (4 \cdot 10) \cdot (30 - 5) = 3392 \text{ W}$$

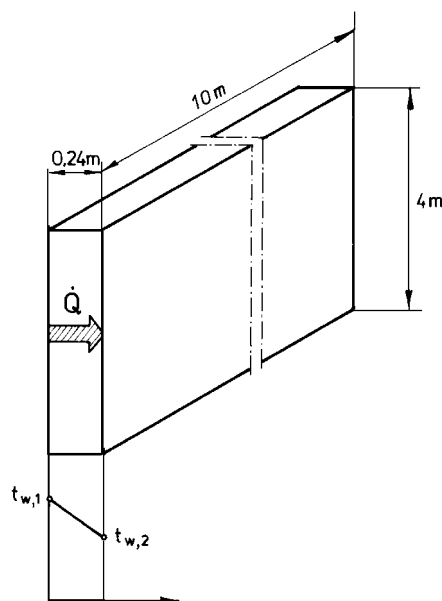
Strumień ten można też obliczyć za pomocą oporu cieplnego:

$$\dot{Q} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{R_w} = \frac{30 - 5}{7,37 \cdot 10^{-3}} = 3392 \text{ W}.$$

Zadanie 18.2

Na mur z poprzedniego zadania nałożono szczelnie warstwę 8 cm styropianu ($\lambda = 0,033 \text{ W/mK}$). Obliczyć przewodzony przez tę ścianę dwuwarstwową strumień cieplny, jeżeli temperatury na obydwu powierzchniach zewnętrznych mają te same wartości: 30°C i 5°C . Wyznaczyć ponadto temperaturę na powierzchni styku obydwu materiałów t_{st} . W rozwiązaniu zadania uwzględnić szeregowe łączenie oporów cieplnych.

Wyniki: $\dot{Q} = 368 \text{ W}$, $t_{st} = 27,3^\circ\text{C}$.



Rys. 18.1

Zadanie 18.3

Na stalowej ($\lambda = 45 \text{ W/mK}$), płaskiej ścianie kotła wodnego o grubości 10 mm wytworzyła się warstwa kamienia kotłowego ($\lambda = 1,7 \text{ W/mK}$) o grubości 1,5 mm. Przy metalicznie czystej powierzchni jednostkowe obciążenie cieplne powierzchni ogrzewalnej wynosiło $\dot{q} = 450 \text{ kW/m}^2$. Do jakiej wartości obniżyła się gęstość strumienia cieplnego $\dot{q}$, jeżeli temperatury na zewnętrznych powierzchniach ściany czystej i ściany pokrytej kamieniem pozostały te same?

Wynik: $\dot{q}_2 = 89,7 \text{ kW/m}^2$.

Zadanie 18.4

Kanał spalinowy pieca przemysłowego o przekroju prostokątnym wykonano z betonu ($\lambda = 1,27 \text{ W/mK}$) o grubości 18 cm i wymurowano wewnątrz cegłą szamotową ($\lambda = 0,84 \text{ W/mK}$) na grubość 24 cm. Temperatura ściany wewnętrznej wynosi 450°C , a zewnętrznej 32°C . Obliczyć: stratę ciepłą z 1 m^2 powierzchni i najwyższą temperaturę betonu.

Wyniki: $\dot{q} = 1147 \text{ W/m}^2$, $t_{b,\max} = 122^\circ\text{C}$.

Zadanie 18.5

Ściana domu o powierzchni 60 m^2 składa się z 24 cm muru ceglanego ($\lambda = 0,81 \text{ W/mK}$), 2 cm tynku zewnętrznego ($\lambda = 0,75 \text{ W/mK}$) i 1 cm wewnętrznej warstwy boazerii ($\lambda = 0,15 \text{ W/mK}$). Temperatura ściany wewnętrznej wynosi 16°C , a ściany zewnętrznej 3°C poniżej zera. Obliczyć: strumień ciepła w ścianie $\dot{Q}$, całkowity opór cieplny ściany R_w oraz temperatury na granicach warstw.

Wyniki: $\dot{Q} = 2\,927,6 \text{ W}$, $R = 6,49 \cdot 10^{-3} \text{ K/W}$, $t_{w,2} = 12,8^\circ\text{C}$, $t_{w,3} = -1,7^\circ\text{C}$.

Zadanie 18.6

Jaka powinna być powierzchnia okna o pojedynczej szybie grubości 4 mm ($\lambda = 0,74 \text{ W/mK}$), aby przy tych samych temperaturach powierzchni zewnętrznych przewodziło ono tę samą ilość ciepła, jak ściana z poprzedniego zadania?

Wynik: $A = 0,833 \text{ m}^2$.

PRZEJMOWANIE CIEPŁA**Zadanie 18.7**

Ogrzewane elektrycznie, płaskie okrągłe dno kotła warzelnego ma średnicę 1,5 m i temperaturę na powierzchni 180°C . Ile ciepła oddaje dno do cieczy, która wrze w temperaturze 120°C , jeżeli współczynnik przejmowania ciepła $\alpha = 2\,200 \text{ W/m}^2\text{K}$?

Wynik: $\dot{Q} = 233,2 \text{ kW}$.

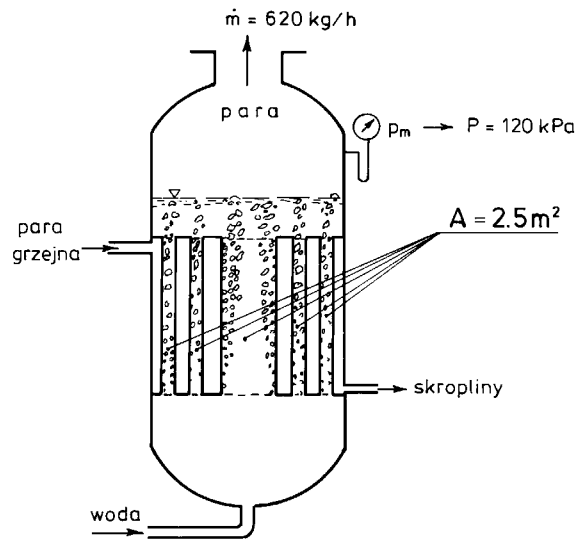
Zadanie 18.8

Wyparka o powierzchni grzejnej $2,5 \text{ m}^2$ wytwarza 620 kg/h pary wodnej nasyconej suchej, o ciśnieniu 120 kPa. Temperatura powierzchni wrzenia została zmierzona wtopioną w nią termoparą – wynosi ona 115°C . Jaki jest średni współczynnik przejmowania ciepła α na powierzchni wrzenia?

Rozwiązanie

Z tablicy 5 pary nasyconej odczytujemy ciepło parowania przy 120 kPa: $r = 2\,244,5 \text{ kJ/kg}$. Strumień ciepła przekazywany przez powierzchnię grzejną do wrzącej wody wynosi więc:

$$\dot{Q} = \dot{m} r = \frac{620}{3600} \cdot 2\,244,5 = 386,55 \text{ kJ/s} = 386,55 \cdot 10^3 \text{ W}$$



Rys. 18.2

Dla przejmowania ciepła obowiązuje prawo Newtona:

$$\dot{Q} = \alpha A (t_w - t_f)$$

Potrzebną tu temperaturę wrzącej wody odczytuje się z tablicy 5 dla $P = 120 \text{ kPa}$; wynosi ona $t_f = t_s = 104,81^\circ\text{C}$. Tak więc poszukiwany średni współczynnik przejmowania ciepła dla wrzenia wody na powierzchni grzejnej wyparki:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A(t_w - t_f)} = \frac{386,55 \cdot 10^3}{2,5(115 - 104,81)} = 15174 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Zadanie 18.9

Jaka musi być powierzchnia zewnętrzna rur skraplacza, do którego dopływa 2,5 t/h pary mokrej o ciśnieniu 5 kPa i stopniu suchości $x = 0,93$, jeżeli współczynnik przejmowania ciepła przy skraplaniu na rurach wynosi $8500 \text{ W/m}^2\text{K}$, a średnia temperatura zewnętrznych powierzchni rur, chłodzonych od wewnątrz wodą, wynosi 25°C ? Z jakiej liczby rur – o średnicy zewnętrznej 20 mm i długości 2,4 m – składać się będzie skraplacz?

Wyniki: $A = 23,31 \text{ m}^2$, $i = 155$.

Zadanie 18.10

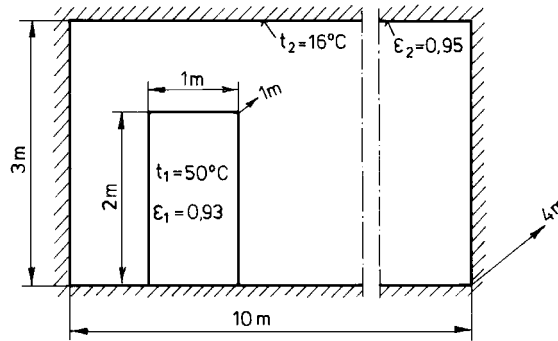
Jaka jest gęstość strumienia cieplnego oddawanego do otoczenia przez ściankę wagonu, jeżeli ściana ma temperaturę 14°C , w otoczeniu jest 2°C , a współczynnik przejmowania ciepła dla omywanej powietrzem powierzchni ścianki wynosi $24 \text{ W/m}^2\text{K}$?

Wynik: $\dot{q}_{ot} = 276 \text{ W/m}^2$.

PROMIENIOWANIE CIEPŁA

Zadanie 18.11

W pomieszczeniu o długości 10 m szerokości 4 m i wysokości 3 m znajduje się piec kaflowy o wymiarach poziomych 1×1 i wysokości 2 m. Ile ciepła wypromieniowuje powierzchnia pieca do pomieszczenia, jeżeli ma ona temperaturę $t_1 = 50^\circ\text{C}$ i emisyjność $\varepsilon_1 = 0,93$, a ściany pomieszczenia o temperaturze $t_2 = 16^\circ\text{C}$ mają emisyjność $\varepsilon_2 = 0,95$.



Rys. 18.3

Rozwiązanie

Mamy do czynienia z układem zamkniętym dwu powierzchni, dla którego emisyjność zastępczą oblicza się ze wzoru:

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} = \frac{1}{\frac{1}{0,93} + \frac{9}{163} \left(\frac{1}{0,95} - 1 \right)} = 0,928$$

Powierzchnie pieca i ścian pomieszczenia wynoszą bowiem:

$$A_1 = 4 \cdot (2 \cdot 1) + 1 \cdot 1 = 9 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2 \cdot (4 \cdot 10 + 3 \cdot 10 + 3 \cdot 4) - 1 \cdot 1 = 163 \text{ m}^2$$

Strumień ciepła przeniesiony przez **promieniowanie** od pieca do ścian pomieszczenia wynosi:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= 5,67 \varepsilon_{1-2} A_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \\ &= 5,67 \cdot 0,928 \cdot 9 \left[\left(\frac{273,15 + 50}{100} \right)^4 - \left(\frac{273,15 + 16}{100} \right)^4 \right] = 1854 \text{ W} \end{aligned}$$

Zadanie 18.12

Piec z poprzedniego zadania oddaje ciepło również na drodze przejmowania przez otaczające go powietrze o temperaturze 20°C . Oceniając wielkość współczynnika przejmowania ciepła na $\alpha = 4,2 \text{ W/m}^2\text{K}$, określić strumień ciepła $\dot{Q}_k$ przejęty konwekcyjnie przez powietrze i określić całkowity strumień ciepła $\dot{Q}$ oddany przez powierzchnię pieca.

Wyniki: $\dot{Q}_k = 1\,134 \text{ W}$, $\dot{Q} = 2\,988 \text{ W}$.

Zadanie 18.13

Termos napełniony jest 2 litrami wody. Między ściankami o powierzchniach zwierciadlanych (naparowane aluminium) mających emisyjność $\varepsilon = 0,06$ nie ma powietrza (próżnia), co wyklucza przenoszenie ciepła przez przewodzenie i konwekcję. Średnie powierzchnie obu ścianek wynoszą $0,15 \text{ m}^2$. Jaki strumień ciepła przenoszony jest przez ścianki termosu, jeżeli temperatury obu powierzchni dane są jako $t_{w,1} = 92^\circ\text{C}$ i $t_{w,2} = 20^\circ\text{C}$? Po jakim czasie τ zawartość termosu obniży swą temperaturę o 1 K? W obliczeniach pominąć oddziaływanie korka zamykającego termos. Właściwości wody zaczerpnąć z tablicy nasyconej wody i pary.

Wyniki: $\dot{Q} = 2,73 \text{ W}$, $\tau = 2\,968 \text{ s} = 0,824 \text{ h}$.

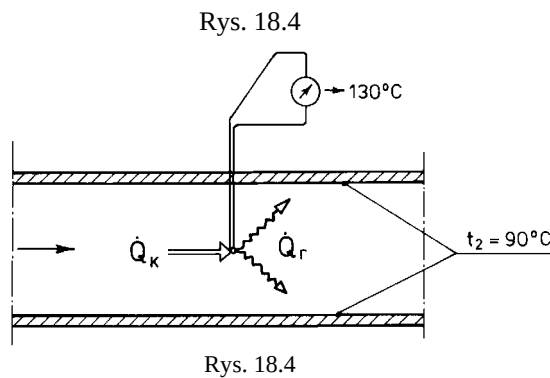
Zadanie 18.14

Wewnątrz betonowego kanału ($\varepsilon = 0,83$) o przekroju kołowym i średnicy 1,5 m znajduje się stalowy rurociąg o średnicy 400 mm i powierzchni pokrytej rdzą ($\varepsilon = 0,70$). Powierzchnie mają temperatury: rurociągu $t_{w1} = 250^\circ\text{C}$, betonu $t_{w2} = 30^\circ\text{C}$. Jaki jest strumień ciepły przenoszony przez promieniowanie (tylko!) między rurą a ścianą betonu na odcinku 1 m długości kanału? Jaki będzie ten strumień po pomalowaniu rurociągu brązem aluminium ($\varepsilon = 0,30$)?

Wyniki: $\dot{Q}_{1-2} = 3192,5 \text{ W}$, $\dot{Q}_{1-2} = 1397,3 \text{ W}$.

Zadanie 18.15

Do pomiaru temperatury spalin w kanale wylotowym kotła wodnego, którego ściany mają temperaturę 90°C użyto nieosłoniętej termopary, która pokazała temperaturę 130°C . Emisyjność zastępcza dla układu termopara – ścianki kanału wynosi $\varepsilon_{1-2} = 0,44$, zaś współczynnik przejmowania ciepła między spalinami a termoparą wynosi $\alpha = 95 \text{ W/m}^2\text{K}$. Promieniowanie gazu (niewielkie) pomija się. Jaka jest rzeczywista temperatura spalin?

**Rozwiązanie**

W występującym podczas pomiaru stanie ustalonym (bo trwałe jest wskazanie 130°C) ilość ciepła przejęta przez termoparę konwekcyjnie od spalin $\dot{Q}_k$ jest równa ilości ciepła oddanej radiacyjnie przez termoparę do ścianek kanału $\dot{Q}_r$:

$$\dot{Q}_k = \dot{Q}_r$$

czyli

$$\alpha A_1 (t_{sp} - t_1) = 5,67 \cdot \varepsilon_{1-2} A_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

a stąd

$$\begin{aligned} t_{sp} &= t_1 + \frac{5,67 \cdot \varepsilon_{1-2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\alpha} = \\ &= 130 + \frac{5,67 \cdot 0,44 (4,0315^4 - 3,6315^4)}{95} = 130 + 83 = 213^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Jak widać, pomiar temperatury spalin nieosłoniętą termoparą dał wynik aż o 83 K za mały, na skutek silnego wypromieniowania ciepła z tej termopary do stosunkowo zimnych ścian kotła wodnego.

Zadanie 18.16

Jaka jest wartość radiacyjnego współczynnika przejmowania ciepła α_r i całkowitego współczynnika przejmowania ciepła α_c dla nieizolowanego przewodu parowego o średnicy zewnętrznej 150 mm i temperaturze powierzchni zewnętrznej 155°C , poprowadzonego poziomo w dużej hali przemysłowej? Temperatura ścian wynosi 16°C , a temperatura powietrza 20°C . Konwekcyjny współczynnik przejmowania ciepła na rurociągu: $7,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Powierzchnia przewodu parowego A_1 jest bardzo mała w stosunku do powierzchni ścian hali A_2 . Dlatego zastępcza emisyjność tego układu powierzchni jest równa emisyjności (pokrytej rdzą) rury:

$$\varepsilon_{1-2} = \varepsilon_1 = 0,65$$

Wyniki: $\alpha_r = 7,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_c = 14,8 \text{ W/m}^2\text{K}$

PRZENIKANIE CIEPŁA

Zadanie 18.17

Płaska, stalowa ($\lambda = 48 \text{ W/m}^2\text{K}$) ścianka w kotle parowym mająca grubość 15 mm omywana jest z jednej strony spalinami o temperaturze 620°C , z których ciepło wnika do ścianki ze współczynnikiem $\alpha_1 = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$, a z drugiej strony wrze na niej woda pod ciśnieniem 1,2 MPa, przejmując ciepło ze współczynnikiem $\alpha_2 = 8\,200 \text{ W/m}^2\text{K}$. Jaki jest współczynnik przenikania ciepła k , jaka gęstość strumienia cieplnego $\dot{q}$ i jakie są temperatury obu ścian $t_{w,1}$ i $t_{w,2}$?

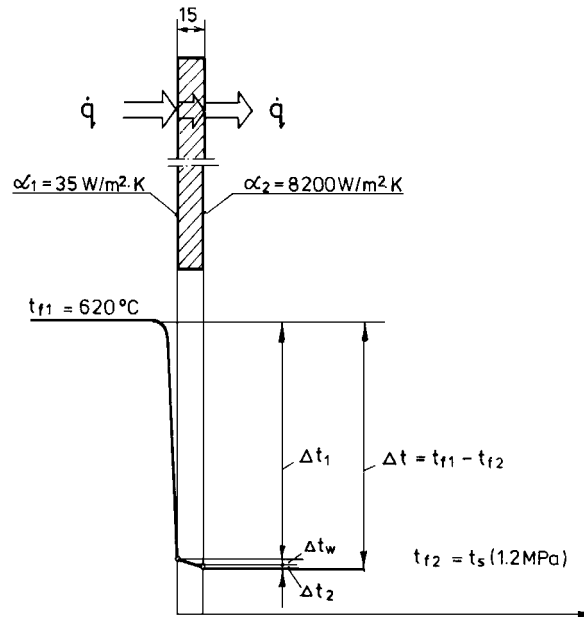
Rozwiązanie

Współczynnik przenikania ciepła dla ścianki płaskiej:

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{35} + \frac{15 \cdot 10^{-3}}{48} + \frac{1}{8200}} = \\ &= \frac{10^3}{28,57 + 0,3125 + 0,122} = \frac{10^3}{29,0} = 34,48 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned}$$

Liczby w mianowniku są składowymi oporami cieplnymi tego złożonego z trzech etapów procesu. Jak widać, największy jest opór cieplny przejmowania ciepła po stronie spalin i on

decyduje o oporze całkowitym przenikania ciepła, a więc i o współczynniku przenikania ciepła $k = 34,48 \text{ W/m}^2\text{K} < \alpha_1 = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Rys. 18.5

Gęstość strumienia cieplnego obliczamy z prawa Pécleta, do którego wprowadzamy temperaturę nasycenia wody: $187,96^\circ\text{C}$ zaczerpniętą z tablicy 5 pary nasyconej:

$$\dot{q} = k(t_{f1} - t_{f2}) = 34,48(620 - 188) = 34,48 \cdot 432 = 14895 \text{ W/m}^2$$

Do wyznaczenia temperatury ścianki posłuży spadek temperatury w przyściennej warstwie spalin Δt_1 , który wyznaczamy z prawa Newtona dla przejmowania ciepła od spalin do ścianki:

$$\dot{q} = \alpha \Delta t_1$$

skąd:

$$\Delta t_1 = \frac{\dot{q}}{\alpha} = \frac{14895}{35} = 425,6 \text{ K}$$

Zatem temperatura ścianki od strony spalin:

$$t_{w,1} = t_{f1} - \Delta t_1 = 620 - 425,6 = 194,4^\circ\text{C}$$

Spadek temperatury w materiale ścianki Δt_w obliczamy ze wzoru dla przewodzenia w ścianie płaskiej:

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t_w = \frac{\Delta t_w}{R_w}$$

skąd:

$$\Delta t_w = \dot{q} R_w = \dot{q} \frac{\delta}{\lambda} = 14895 \cdot \frac{0,015}{48} = 4,6 \text{ K}$$

Zatem temperatura ścianki po stronie wrzącej wody:

$$t_{w,2} = t_{w,1} - \Delta t_w = 194,4 - 4,6 = 189,8^\circ\text{C}$$

Można jeszcze obliczyć z prawa Newtona spadek temperatury po stronie wrzącej wody:

$$\Delta t_2 = \frac{\dot{q}}{\alpha_2} = \frac{14895}{8200} = 1,8 \text{ K}$$

po to, by sprawdzić dokładność obliczeń przez zsumowanie poszczególnych spadków temperatury:

$$\sum \Delta t_i = \Delta t_1 + \Delta t_w + \Delta t_2 = 425,6 + 4,6 + 1,8 = 432 \text{ K}$$

Otrzymany wynik zgodny jest z całkowitym spadkiem $\Delta t = 432 \text{ K}$.

Zadanie 18.18

Wyznaczyć współczynnik przenikania ciepła od skraplającej się pary wodnej ($\alpha_1 = 10\,800 \text{ W/m}^2\text{K}$) przez płaską, stalową ($\lambda = 52 \text{ W/mK}$) ściankę o grubości 5 mm do wody przepływającej po drugiej stronie ($\alpha_2 = 2\,800 \text{ W/m}^2\text{K}$). Rozważyć przypadek: czystej powierzchni (k_1) i powierzchni pokrytej warstwą oleju ($\lambda = 0,14 \text{ W/mK}$) o grubości 0,3 mm (k_2).

Wyniki: $k_1 = 1\,832 \text{ W/m}^2\text{K}$, $k_2 = 372 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Zadanie 18.19

Wyznaczyć temperatury obydwu powierzchni stalowej ścianki ($\lambda = 52 \text{ W/mK}$) o grubości 5 mm, przez którą przenika ciepło od skraplającej się w temperaturze 120°C pary ($\alpha_1 = 10\,800 \text{ W/m}^2\text{K}$) do wody ($\alpha_2 = 2800 \text{ W/m}^2\text{K}$) o średniej temperaturze 40°C .

Wyniki: $t_{w,1} = 106,4^\circ\text{C}$, $t_{w,2} = 92,3^\circ\text{C}$.

Zadanie 18.20

Płomienica stalowa ($\lambda = 48 \text{ W/mK}$) o grubości 6 mm przejmuje ciepło od spalin o lokalnej temperaturze 1100°C , a całkowity współczynnik przyjmowania ciepła uwzględniający konwekcję i promieniowanie ma wielkość $\alpha_c = 90 \text{ W/m}^2\text{K}$. Przenikające przez płomienicę ciepło oddawane jest do wrzącej pod ciśnieniem 1,2 MPa wody ($\alpha_2 = 8\,700 \text{ W/m}^2\text{K}$). Przyjmując upraszczająco, że płomienica jest przegrodą płaską, wyznaczyć: współczynnik przenikania ciepła, opór cieplny przenikania ciepła dla 1 m^2 powierzchni grzejnej i temperatury obydwu powierzchni płomienicy.

Wyniki: $k = 88,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_k = 11,35 \cdot 10^{-3} \text{ K/W}$, $t_{w,1} = 207,3^\circ\text{C}$, $t_{w,2} = 197,2^\circ\text{C}$.

Zadanie 18.21

Wyznaczyć strumień ciepła przewodzony przez szybę okienną o grubości 4 mm ($\lambda_{sz} = 0,74 \text{ W/mK}$) i rozmiarach $1,6 \times 2 \text{ m}$ oraz przez ścianę betonową ($\lambda_b = 1,2 \text{ W/mK}$) o powierzchni 14 m^2 i grubości 10 cm przy założeniu, że na wewnętrznych powierzchniach obydwu przegród temperatura wynosi 10°C a na zewnętrznych -5°C .

Rozwiązanie

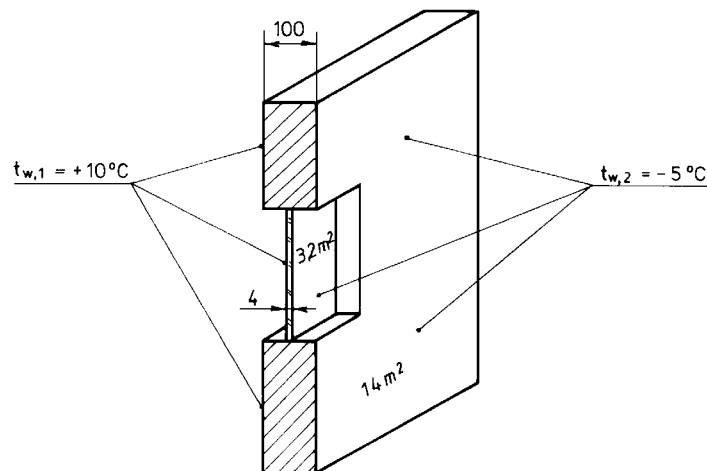
Mamy do czynienia z równoległym przewodzeniem ciepła w dwu przegrodach płaskich. Strumień ciepła oblicza się ze wzoru, wyprowadzonego z prawa Fouriera:

- dla szyby

$$\dot{Q}_{sz} = \frac{\lambda_{sz}}{\delta_{sz}} A_{sz} (t_{w1} - t_{w2}) = \frac{0,74}{4 \cdot 10^{-3}} (1,6 \cdot 2) [10 - (-5)] = 8880 \text{ W} \cong 8,9 \text{ kW}$$

- dla ściany betonowej

$$\dot{Q}_b = \frac{\lambda_b}{\delta_b} A_b (t_{w1} - t_{w2}) = \frac{1,2}{0,1} \cdot 14 \cdot [10 - (-5)] = 2520 \text{ W}$$



Rys. 18.6

Przy założeniu identycznych temperatur na obu powierzchniach, czyli przy identycznym spadku temperatury w obu przegrodach: $\Delta t_w = 15 \text{ K}$, otrzymaliśmy dla szyby 3,5-krotnie większy strumień ciepła niż dla 4,4-krotnie większej powierzchni ściany betonowej.

Opory cieplne obu przegród wynoszą:

- szyby

$$R_{sz} = \frac{\delta_{sz}}{\lambda_{sz} A_{sz}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{0,74 \cdot 3,2} = 17 \cdot 10^{-4} \text{ K/W}$$

- ściany betonowej

$$R_b = \frac{\delta_b}{\lambda_b A_b} = \frac{0,1}{1,2 \cdot 14} = 59,5 \cdot 10^{-4} \text{ K/W}$$

Opór cieplny szyby jest, dla przewodzenia ciepła w niej, 3,5 razy mniejszy niż opór cieplny ściany betonowej, stąd 3,5 razy większy strumień ciepła w szybie – oczywiście przy założeniu jednakowego spadku temperatury w obydwu przegrodach, co w praktyce raczej nie występuje.

Zadanie 18.22

Niech ściana betonowa z poprzedniego zadania z umieszczoną w niej szybą oddziela pomieszczenie, w którym panuje temperatura 20°C od powietrza atmosferycznego o temperaturze -8°C , a współczynniki przejmowania (wnikania) ciepła po obydwu stronach przegród wynoszą: $\alpha_1 = \alpha_2 = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Jakie są strumienie ciepła przenoszone przez obie części ściany: szklaną i betonową w tym przypadku, i jakie są teraz spadki temperatury w obu przegrodach?

Rozwiązanie

Mamy do czynienia z przenikaniem ciepła, które podlega prawu Pécleta:

$$\dot{Q} = kA_o(t_{f1} - t_{f2})$$

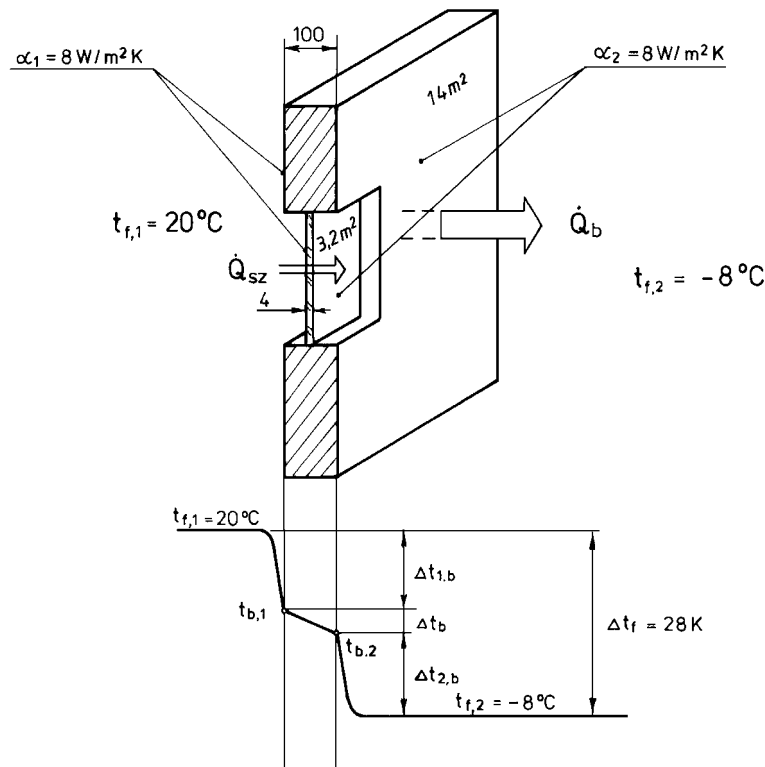
Obliczamy współczynniki przenikania ciepła przez obie przegrody płaskie:

- przez szybę

$$k_{sz} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{sz}}{\lambda_{sz}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{4 \cdot 10^{-4}}{0,74} + \frac{1}{8}} = 3,915 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- przez ścianę betonową

$$k_b = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_b}{\lambda_b} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,1}{1,2} + \frac{1}{8}} = 3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$$



Rys. 18.7

Strumień ciepły przenikający przez szybę:

$$\dot{Q}_{sz} = k_{sz} A_{sz} (t_{f1} - t_{f2}) = 3,915 \cdot 3,2 \cdot [20 - (-8)] = 350,8 \text{ W}$$

a przez ścianę betonową:

$$\dot{Q}_b = k_b A_b (t_{f1} - t_{f2}) = 3,0 \cdot 14 \cdot [20 - (-8)] = 1176 \text{ W}$$

W stosunku do poprzedniego zadania proporcje się odwróciły: szyba przenosi 3,35 razy mniejszy strumień ciepła niż okalająca ją ściana betonowa. A jest to przypadek praktycznej przegrody budowlanej, której całkowita strata ciepła na rzecz otoczenia wynosi:

$$\dot{Q}_{ot} = \dot{Q}_b + \dot{Q}_{sz} = 1176 + 350,8 = 1526,8 \text{ W}$$

Odwrócone proporcje strumieni ciepła (szyby i ściany betonowej) mają swe źródło (przy tym samym z natury rzeczy $\Delta t_f = 28 \text{ K}$) w odwróconych proporcjach oporów cieplnych **przenikania** ciepła:

$$R_{k,sz} = \frac{1}{k_{sz} A_{sz}} = \frac{1}{3,915 \cdot 3,2} = 798,2 \cdot 10^{-4} \text{ K/W dla szyby}$$

$$R_{k,b} = \frac{1}{k A_b} = \frac{1}{3,0 \cdot 14} = 238,1 \cdot 10^{-4} \text{ K/W dla betonu}$$

Pomimo że opory cieplne **przewodzenia** ciepła obu przegród R_λ są takie same, jak uprzednio w zadaniu 18.21, ich znaczenie jest teraz drugorzędne wobec dużych oporów **przejmowania** ciepła przez (nieruchome) powietrze: $R_{\alpha,1}$ i $R_{\alpha,2}$.

Rozkłady oporu cieplnego przenikania ciepła są bowiem następujące:

- dla szyby

$$\begin{aligned} R_{k,sz} &= R_{\alpha,1} + R_{sz} + R_{\alpha,2} = \frac{1}{\alpha_1 A_{sz}} + \frac{\delta_{sz}}{\lambda_{sz} A_{sz}} + \frac{1}{\alpha_2 A_{sz}} = \\ &= \frac{1}{8 \cdot 3,2} + \frac{4 \cdot 10^{-3}}{0,74 \cdot 3,2} + \frac{1}{8 \cdot 3,2} = \\ &= 390,6 \cdot 10^{-4} + \mathbf{17 \cdot 10^{-4}} + 390 \cdot 10^{-4} = 798,2 \cdot 10^{-4} \text{ K/W} \end{aligned}$$

- dla ściany betonowej

$$\begin{aligned} R_{k,b} &= R_{\alpha,1} + R_b + R_{\alpha,2} = \frac{1}{\alpha_1 A_b} + \frac{\delta_b}{\lambda_b A_b} + \frac{1}{\alpha_2 A_b} = \\ &= \frac{1}{8 \cdot 14} + \frac{0,1}{1,2 \cdot 14} + \frac{1}{8 \cdot 14} = \\ &= 89,3 \cdot 10^{-4} + \mathbf{59,5 \cdot 10^{-4}} + 89,3 \cdot 10^{-4} = 238,1 \cdot 10^{-4} \text{ K/W} \end{aligned}$$

Spadki temperatury:

- w samej przegrodzie szklanej

$$\Delta t_{sz} = \dot{Q}_{sz} \frac{\delta_{sz}}{\lambda_{sz} A_{sz}} = \dot{Q}_{sz} R_{sz} = 350,8 \cdot 17 \cdot 10^{-4} = 0,6 \text{ K}$$

- w przegrodzie betonowej

$$\Delta t_b = \dot{Q}_b \frac{\delta_b}{\lambda_b A_b} = \dot{Q}_b R_b = 1176 \cdot 59,5 \cdot 10^{-4} = 7,0 \text{ K}$$

Spadki temperatury w warstwach przysściennych (tam, gdzie ma miejsce przejmowanie ciepła) wynoszą:

- na przegrodzie szklanej

$$\Delta t_{1,sz} = \Delta t_{2,sz} = \frac{\dot{Q}_{sz}}{\alpha A_{sz}} = \dot{Q}_{sz} R_{\alpha,sz} = 350,8 \cdot 390,6 \cdot 10^{-4} = 13,7 \text{ K}$$

- na przegrodzie betonowej

$$\Delta t_{1,b} = \Delta t_{2,b} = \frac{\dot{Q}_b}{\alpha A_b} = \dot{Q}_b R_{\alpha,b} = 1176 \cdot 89,3 \cdot 10^{-4} = 10,5 \text{ K}$$

Sumy tych odmiennych spadków temperatury: w przejmowaniu, przewodzeniu i ponownym przejmowaniu po zewnętrznej stronie przegród, są oczywiście jednakowe na obu przegrodach:

$$\text{na szybie: } \Sigma \Delta t_{i,sz} = 13,7 + 0,6 + 13,7 = 28,0 \text{ K}$$

$$\text{na ścianie: } \Sigma \Delta t_{i,b} = 10,5 + 7 + 10,5 = 28,0 \text{ K}$$

Temperatury wewnętrznych (od strony pomieszczenia) powierzchni przegród wynoszą:

- szyby: $t_{sz,1} = t_{f1} - \Delta t_{1,sz} = 20 - 13,7 = 6,3^\circ\text{C}$
- ściany: $t_{b,1} = t_{f1} - \Delta t_{1,b} = 20 - 10,5 = 9,5^\circ\text{C}$

a temperatury powierzchni zewnętrznych:

- szyby: $t_{sz,2} = t_{f2} - \Delta t_{2,sz} = -8 + 13,7 = +5,7^\circ\text{C}$
- ściany: $t_{b,2} = t_{f2} - \Delta t_{2,b} = -8 + 10,5 = +2,5^\circ\text{C}$

Warto zauważyć, że mimo panującego mrozu: -8°C , zewnętrzne powierzchnie obu przegród mają temperatury dodatnie.

Zadanie 18.23

Na ścianę z poprzedniego zadania nałożono szczelnie przylegającą warstwę styropianu o grubości 8 cm i przewodności cieplnej $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$. Obliczyć: współczynnik przenikania ciepła ocieplonej ściany, strumień ciepła przenikający przez ścianę betonową, całkowitą stratę ciepłą szyby i zaizolowanej ściany betonowej na rzecz otoczenia oraz temperatury powierzchni: wewnętrznej i zewnętrznej ocieplonej ściany.

Wyniki: $k = 0,382 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $\dot{Q}_b = 149,7 \text{ W}$, $\dot{Q}_{ot} = 500,5 \text{ W}$, $t_{b,1} = +18,7^\circ\text{C}$, $t_{b,2} = -6,7^\circ\text{C}$.

Jak widać, nie tylko zmalała prawie 8-krotnie strata ciepła ściany betonowej, ale podniosła się znacznie temperatura wewnętrznej powierzchni tej ściany, co dla komfortu cieplnego przebywających w pomieszczeniu ludzi ma znaczenie zasadnicze.

**TABLICE
TERMODYNAMICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI
GAZÓW I PAR**

Tablica 1. Właściwości wybranych gazów

Gaz	Symbol chemiczny	Masa molowa M	Objętość molowa v_u	Gęstość ρ_u	$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ dla 0°C	Indywidualna stała gazowa R_i
		kg /kmol	um ³ / kmol	kg /um ³		Nm / kg·K
Acetylen	C ₂ H ₂	26,038	22,525	1,145	1,23	319,3
Amoniak	NH ₃	17,031	22,366	0,750	1,32	488,2
Argon	Ar	39,948	22,711	1,759	1,666	208,1
Azot	N ₂	28,013	22,695	1,233	1,401	296,8
Dwutlenek węgla	CO ₂	44,010	22,551	1,937	1,310	188,9
Etylen	C ₂ H ₄	28,054	22,546	1,234	1,25	296,4
Hel	He	4,003	22,710	0,176	1,667	2077,0
Metan	CH ₄	16,043	22,670	0,706	1,300	518,3
Para wodna	H ₂ O	18,015	22,691	0,793	1,332	461,5
Powietrze	-	28,964	22,693	1,275	1,402	287,0
Tlen	O ₂	31,999	22,685	1,409	1,400	259,8
Dwutlenek siarki	SO ₂	64,063	22,175	2,818	1,271	129,8
Tlenek węgla	CO	28,010	22,699	1,233	1,401	296,8
Wodór	H ₂	2,016	22,724	0,089	1,407	4124,2

Masy molowe w skali węglowej (1962 r.)

Tablica 2. Średnie ciepła właściwe przy stałym ciśnieniu $c_p \Big|_0^t$ [kJ/kgK]

t [°C]	H ₂	N ₂	O ₂	CO	H ₂ O	CO ₂	SO ₂	CH ₄	Pow.	He	Ar
0	14,195	1,039	0,915	1,040	1,859	0,815	0,607	2,167	1,004	5,192	0,521
100	14,353	1,040	0,923	1,042	1,873	0,866	0,636	2,296	1,006	5,192	0,521
200	14,421	1,043	0,935	1,046	1,894	0,910	0,662	2,459	1,012	5,192	0,521
300	14,446	1,049	0,950	1,054	1,919	0,949	0,687	2,637	1,019	5,192	0,521
400	14,477	1,057	0,965	1,063	1,948	0,983	0,708	2,818	1,028	5,192	0,521
500	14,509	1,066	0,979	1,075	1,978	1,013	0,724	2,993	1,039	5,192	0,521
600	14,542	1,076	0,993	1,086	2,009	1,040	0,737	3,161	1,050	5,192	0,521
700	14,587	1,087	1,005	1,098	2,042	1,064	0,754	3,323	1,061	5,192	0,521
800	14,641	1,097	1,016	1,109	2,075	1,085	0,762	3,487	1,071	5,192	0,521
900	14,706	1,108	1,026	1,120	2,110	1,104	0,775	3,639	1,081	5,192	0,521
1000	14,776	1,119	1,035	1,130	2,144	1,122	0,783	3,774	1,091	5,192	0,521
1100	14,853	1,127	1,043	1,140	2,177	1,138	0,791	3,896	1,100	5,192	0,521
1200	14,934	1,136	1,051	1,149	2,211	1,153	0,799	4,003	1,108	5,192	0,521
1300	15,023	1,145	1,058	1,158	2,243	1,166	0,806	-	1,117	5,192	0,521
1400	15,113	1,153	1,065	1,166	2,274	1,178	0,811	-	1,124	5,192	0,521
1500	15,202	1,160	1,071	1,173	2,305	1,189	0,816	-	1,131	5,192	0,521
1600	15,294	1,167	1,077	1,180	2,335	1,200	0,820	-	1,138	5,192	0,521
1700	15,383	1,174	1,083	1,187	2,363	1,209	0,824	-	1,144	5,192	0,521
1800	15,472	1,180	1,089	1,192	2,391	1,218	0,828	-	1,150	5,192	0,521
1900	15,561	1,186	1,094	1,198	2,417	1,226	0,831	-	1,156	5,192	0,521
2000	15,649	1,191	1,099	1,203	2,442	1,233	0,835	-	1,161	5,192	0,521
R[kJ/kg·K]	4,1242	0,2968	0,2598	0,297	0,4615	0,189	0,1298	0,5183	0,287	2,077	0,208

Średnie ciepło właściwe przy stałej objętości $c_v \Big|_0^t$ wyznacza się z zależności: $c_v \Big|_0^t = c_p \Big|_0^t - R_i$.

Tablica 3. Średnie ciepła molowe $\tilde{c}_p^t$ [kJ/kmolK] gazów

t [°C]	H ₂	N ₂	O ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	Po- wietrze	NO	OH
0	28,617	29,115	29,274	29,123	35,860	33,499	38,854	29,073	29,977	29,990
100	28,935	29,144	29,538	29,178	38,112	33,741	40,654	29,153	29,906	29,760
200	29,073	29,228	29,931	29,303	40,059	34,118	42,329	29,299	29,998	29,643
300	29,123	29,383	30,400	29,517	41,755	34,575	43,878	29,521	30,229	29,601
400	29,186	29,601	30,878	29,789	43,250	35,090	45,217	29,789	30,530	29,584
500	29,249	29,864	31,334	30,099	44,573	35,630	46,390	30,095	30,869	29,605
600	29,316	30,149	31,761	30,425	45,753	36,195	47,353	30,405	31,213	29,672
700	29,408	30,451	32,150	30,752	46,813	36,789	48,232	30,723	31,552	29,772
800	29,517	30,748	32,502	31,070	47,763	37,392	48,944	31,028	31,874	29,898
900	29,647	31,037	32,825	31,376	48,617	38,008	49,614	31,321	32,171	30,049
1000	29,789	31,313	33,118	31,665	49,392	38,619	50,150	31,598	32,456	30,220
1100	29,944	31,577	33,386	31,937	50,099	39,226	50,660	31,862	32,716	30,409
1200	30,107	31,828	33,633	32,192	50,740	39,825	51,079	32,109	32,958	30,601
1300	30,287	32,067	33,863	32,427	51,322	40,407	51,623	32,343	33,180	30,790
1400	30,467	32,293	34,076	32,653	51,858	40,976	51,958	32,565	33,390	30,974
1500	30,647	32,502	34,282	32,858	52,348	41,525	52,251	32,774	33,582	31,179
1600	30,832	32,699	34,474	33,051	52,800	42,056	52,544	32,967	33,767	31,355
1700	31,012	32,883	34,658	33,231	53,218	42,576	52,796	33,151	33,934	31,543
1800	31,192	33,055	34,834	33,402	53,604	43,0704	53,047	33,319	34,089	31,723
1900	31,372	33,218	35,006	33,561	53,959	43,539	53,214	33,482	34,231	31,899
2000	31,548	33,373	35,169	33,700	54,290	43,995	53,465	33,641	34,389	32,075
2100	31,723	33,520	35,328	33,850	54,596	44,435	53,633	33,787	34,499	32,247
2200	31,891	33,658	35,483	33,980	54,881	44,853	53,800	33,926	34,621	32,414
2300	32,058	33,787	35,634	34,106	55,144	45,255	53,968	34,060	34,734	32,577
2400	32,222	33,909	35,785	34,223	55,391	45,644	54,135	34,185	34,838	32,737
2500	32,385	34,022	35,927	34,336	55,617	46,017	54,261	34,307	34,943	32,887
2600	32,540	34,206	36,069	34,499	55,852	46,381	54,387	34,332	35,039	33,034
2700	32,691	34,290	36,207	34,583	56,061	46,729	54,5125	34,457	35,131	33,176
2800	32,866	34,415	36,341	34,667	56,229	47,060	4,596	34,541	35,219	33,314
2900	33,034	34,499	36,509	34,750	56,438	47,378	54,721	34,625	35,303	33,448
3000	33,159	34,583	36,676	34,834	56,606		54,847	34,709	35,383	33,578
M [kg/ kmol]	2,016	28,013	31,999	28,011	44,010	18,015	64,063	28,964	30,005	17,007

cd. tabl. 3

t [°C]	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₆ H ₆	CS ₂	H ₂ S	COS	N ₂ O	C ₂ H ₅ OH
0	34,738	41,910	40,947	49,530	59,997	68,329	73,688	44,504	33,787	40,277	37,451	70,087
100	36,806	45,871	46,222	55,919	68,329	78,670	89,472	46,683	34,332	42,622	39,712	77,288
200	39,427	48,517	51,163	62,195	75,739	88,886	103,540	48,483	35,002	44,589	41,675	83,903
300	42,274	50,677	55,936	68,232	83,066	97,929	116,561	49,907	35,755	46,180	43,371	90,477
400	45,180	52,536	60,206	74,161	89,765	106,680	127,907	51,121	36,593	47,520	44,862	96,464
500	47,977	54,160	64,184	79,629	96,003	114,174	137,871	52,126	37,430	48,651	46,185	101,990
600	50,673	55,638	67,826	84,674	101,739	121,752	146,831	53,005	37,309	49,614	47,390	107,140
700	53,277	56,999	71,050	89,355	107,056	128,284	154,744	53,759	39,147	50,493	48,475	111,788
800	55,902	58,268	74,148	93,713	111,871	134,229	161,862	54,387	39,984	51,246	49,454	116,100
900	58,330	59,444	76,912	97,766	116,351	141,765	168,309	54,931	40,738	51,916	50,334	120,077
1000	60,503	60,537	79,507	101,526	120,412	144,821	174,171	55,391	41,491	52,544	51,133	123,678
1100	62,454	61,571	81,936	104,984	124,170	149,678	179,488	55,852	42,203	53,089	51,866	127,111
1200	64,175	62,542	84,113	108,162	127,697	154,242	184,261	56,229	42,831	53,591	-	130,209
M [kg/kmol]	16,043	26,038	28,054	30,070	42,081	44,097	78,115	76,139	34,080	60,075	44,013	46,070

Tablica 4. Wyciąg z tablic pary nasyconej H₂O uszeregowany według temperatur

t	P _s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
°C	kPa	m ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg·K	kJ/kg·K
0,00	0,6108	0,0010002	206,0	0,04	2501,0	2501,0	0,0002	9,1564
<u>0,01</u>	<u>0,6112</u>	0,0010002	206,18	0,00	2501,0	2501,0	<u>0,0000</u>	9,1562
1	0,6566	0,0010001	192,62	4,17	2502,8	2498,6	0,0153	9,1299
2	0,7054	0,0010001	179,93	8,39	2504,7	2496,3	0,0306	9,1035
3	0,7575	0,0010001	168,17	12,60	2506,5	2493,9	0,0459	9,0773
4	0,8129	0,0010000	157,27	16,80	2508,3	2491,5	0,0611	9,0514
5	0,8719	0,0010000	147,16	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0257
6	0,9346	0,0010000	137,77	25,21	2512,0	2486,8	0,0913	9,0003
7	1,0012	0,0010001	129,06	29,41	2513,9	2484,5	0,1063	8,9751
8	1,0721	0,0010001	120,96	33,60	2515,7	2482,1	0,1213	8,9501
9	1,1473	0,0010002	113,43	37,80	2517,5	2479,7	0,1362	8,9254
10	1,2271	0,0010003	106,42	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9008
11	1,3118	0,0010003	99,90	46,19	2521,2	2475,0	0,1658	8,8766
12	1,4015	0,0010004	93,83	50,38	2523,1	2472,7	0,1805	8,8525
13	1,4967	0,0010006	88,17	54,57	2524,9	2470,3	0,1952	8,8286
14	1,5974	0,0010007	82,89	58,75	2526,7	2468,0	0,2098	8,8050
15	1,7041	0,0010008	77,97	62,94	2528,6	2465,6	0,2243	8,7815
16	1,8170	0,0010010	73,38	67,13	2530,4	2463,3	0,2388	8,7583
17	1,9364	0,0010012	69,09	71,31	2534,2	2460,9	0,2533	8,7363
18	2,063	0,0010013	65,09	75,50	2534,0	2458,6	0,2677	8,7125
19	2,196	0,0010015	61,34	79,68	2535,9	2456,2	0,2820	8,6898
20	2,337	0,0010017	57,83	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674
21	2,485	0,0010019	54,56	88,04	2539,5	2451,5	0,3105	8,6452
22	2,642	0,0010022	51,49	92,23	2541,4	2449,1	0,3247	8,6232
23	2,808	0,0010024	48,62	96,41	2543,2	2446,8	0,3389	8,6013
24	2,982	0,0010026	45,93	100,59	2545,0	2444,4	0,3530	8,5797
25	3,166	0,0010029	43,40	104,77	2546,8	2442,1	0,3670	8,5583
26	3,360	0,0010032	41,03	108,95	2548,6	2439,7	0,3810	8,5370
27	3,654	0,0010034	38,81	113,13	2550,5	2437,3	0,3949	8,5159
28	3,778	0,0010037	36,73	117,31	2552,3	2435,0	0,4088	8,4950
29	4,004	0,0010040	34,77	121,48	2554,1	2432,6	0,4227	8,4743
30	4,242	0,0010043	32,93	125,66	2555,9	2430,3	0,4365	8,4537
31	4,491	0,0010046	31,20	129,84	2557,7	2427,9	0,4503	8,4334
32	4,754	0,0010049	29,57	134,02	2559,5	2425,5	0,4640	8,4132
33	5,029	0,0010053	28,04	138,20	2561,4	2423,2	0,4777	8,3931
34	5,318	0,0010056	26,60	142,38	2563,2	2420,8	0,4913	8,3733
35	5,622	0,0010060	25,25	146,56	2565,0	2418,4	0,5049	8,3536
36	5,940	0,0010063	23,97	150,74	2566,8	2416,0	0,5184	8,3341
37	6,274	0,0010067	22,76	154,91	2568,6	2413,7	0,5319	8,3147
38	6,624	0,0010070	21,63	159,09	2570,4	2411,3	0,5453	8,2955
39	6,991	0,0010074	20,56	163,27	2572,2	2408,9	0,5588	8,2765

cd. tabl. 4

t	P _s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
40	7,375	0,0010078	19,55	167,45	2574,0	2406,5	0,5721	8,2576
41	7,777	0,0010082	18,59	171,63	2575,8	2404,1	0,5854	8,2389
42	8,198	0,0010086	17,69	175,81	2577,6	2401,8	0,5987	8,2203
43	8,639	0,0010090	16,84	179,99	2579,4	2399,4	0,6120	8,2019
44	9,100	0,0010094	16,04	184,17	2581,1	2397,0	0,6252	8,1836
45	9,582	0,0010099	15,28	188,35	2582,9	2394,6	0,6383	8,1655
46	10,085	0,0010103	14,56	192,53	2584,7	2392,2	0,6514	8,1475
47	10,612	0,0010107	13,88	196,71	2586,5	2389,8	0,6645	8,1297
48	11,161	0,0010112	13,23	200,89	2588,3	2387,4	0,6776	8,1120
49	11,735	0,0010117	12,63	205,07	2590,1	2385,0	0,6906	8,0945
50	12,335	0,0010121	12,05	209,26	2591,8	2382,6	0,7035	8,0771
51	12,960	0,0010126	11,50	213,44	2593,6	2380,2	0,7164	8,0598
52	13,612	0,0010131	10,98	217,62	2595,4	2377,8	0,7293	8,0427
53	14,292	0,0010136	10,49	221,80	2597,2	2375,4	0,7422	8,0257
54	15,001	0,0010140	10,02	225,99	2598,9	2372,9	0,7550	8,0089
55	15,740	0,0010145	9,581	230,17	2600,7	2370,5	0,7677	7,9922
56	16,510	0,0010150	9,161	234,35	2602,4	2368,1	0,7804	7,9756
57	17,312	0,0010156	8,762	238,54	2604,2	2365,7	0,7931	7,9591
58	18,146	0,0010161	8,383	242,72	2606,0	2363,2	0,8058	7,9428
59	19,015	0,0010166	8,023	246,91	2607,7	2360,8	0,8184	7,9266
60	19,919	0,0010171	7,681	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106
62	21,837	0,0010182	7,046	259,46	2613,0	2353,5	0,8560	7,8788
64	23,910	0,0010193	6,471	267,84	2616,4	2348,6	0,8809	7,8475
66	26,148	0,0010205	5,950	276,21	2619,9	2343,7	0,9057	7,8167
68	28,561	0,0010217	5,478	284,59	2623,3	2338,8	0,9303	7,7864
70	31,161	0,0010228	5,048	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565
72	33,957	0,0010241	4,657	301,36	2630,2	2328,9	0,9792	7,7270
74	36,963	0,0010253	4,302	309,74	2633,6	2323,9	1,0034	7,6980
76	40,190	0,0010266	3,977	318,13	2637,0	2318,9	1,0275	7,6694
78	43,650	0,0010279	3,681	326,52	2640,4	2313,9	1,0514	7,6413
80	47,359	0,0010292	3,410	334,92	2643,7	2308,8	1,0753	7,6135
82	51,328	0,0010305	3,163	343,31	2647,1	2303,8	1,0990	7,5862
84	55,572	0,0010319	2,936	351,71	2650,4	2298,7	1,1225	7,5592
86	60,107	0,0010333	2,728	360,12	2653,7	2293,6	1,1460	7,5326
88	64,947	0,0010347	2,538	368,53	2657,0	2288,5	1,1693	7,5064
90	70,108	0,0010361	2,362	376,94	2660,3	2283,3	1,1925	7,4805
92	75,607	0,0010376	2,201	385,36	2663,5	2278,2	1,2156	7,4550
94	81,460	0,0010391	2,053	393,78	2666,8	2273,0	1,2386	7,4299
96	87,685	0,0010406	1,916	402,20	2670,0	2267,8	1,2615	7,4051
98	94,301	0,0010421	1,790	410,63	2673,2	2262,5	1,2842	7,3806
100	101,32	0,0010437	1,674	419,06	2676,3	2257,3	1,3069	7,3564
102	108,78	0,0010453	1,566	427,50	2679,5	2252,0	1,3294	7,3326
104	116,68	0,0010469	1,467	435,95	2682,6	2246,6	1,3518	7,3090
106	125,04	0,0010485	1,375	444,40	2685,7	2241,3	1,3742	7,2858
108	133,90	0,0010502	1,290	452,85	2688,8	2235,9	1,3964	7,2629

cd. tabl. 4

t	P _s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
°C	kPa	m ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg·K	kJ/kg·K
110	143,26	0,0010519	1,211	461,32	2691,8	2230,5	1,4185	7,2402
112	153,16	0,0010536	1,137	469,78	2694,8	2225,0	1,4405	7,2179
114	163,61	0,0010553	1,069	478,26	2697,8	2219,5	1,4624	7,1958
116	174,64	0,0010571	1,006	486,74	2700,8	2214,0	1,4842	7,1739
118	186,28	0,0010588	0,9469	495,23	2703,7	2208,5	1,5060	7,1524
120	198,54	0,0010606	0,8920	503,72	2706,6	2202,9	1,5276	7,1310
125	232,09	0,0010652	0,7707	524,99	2713,8	2188,8	1,5813	7,0788
130	270,12	0,0010700	0,6685	546,31	2720,7	2174,4	1,6344	7,0281
135	313,06	0,0010750	0,5821	567,68	2727,4	2159,8	1,6869	6,9787
140	361,36	0,0010801	0,5087	589,11	2734,0	2144,9	1,7390	6,9307
145	415,50	0,0010853	0,4462	610,60	2740,3	2129,7	1,7906	6,8838
150	475,97	0,0010908	0,3926	632,15	2746,3	2114,9	1,8416	6,8381
155	543,31	0,0010964	0,3466	653,78	2752,1	2098,4	1,8923	6,7934
160	618,04	0,0011022	0,3068	675,48	2757,7	2082,2	1,9425	6,7498
165	700,75	0,0011082	0,2725	697,26	2763,0	2065,7	1,9923	6,7070
170	792,02	0,0011145	0,2426	719,12	2768,0	2048,8	2,0416	6,6652
175	892,46	0,0011209	0,2166	741,07	2772,7	2031,6	2,0907	6,6241
180	1002,7	0,0011275	0,1938	763,12	2777,1	2013,9	2,1393	6,5838
185	1123,4	0,0011344	0,1739	785,27	2781,2	1995,9	2,1876	6,5441
190	1255,2	0,0011415	0,1563	807,52	2784,9	1977,4	2,2356	6,5052
200	1555,1	0,0011565	0,1271	852,38	2791,4	1939,0	2,3307	6,4289
210	1908,0	0,0011726	0,1042	897,75	2796,4	1898,7	2,4247	6,3547
220	2320,1	0,0011900	0,08602	943,69	2799,9	1856,2	2,5178	6,2819
230	2797,9	0,0012087	0,07143	990,29	2801,7	1811,4	2,6102	6,2103
240	3348,0	0,0012291	0,05964	1037,6	2801,6	1764,0	2,7021	6,1396
250	3977,6	0,0012513	0,05002	1085,8	2799,5	1713,7	2,7936	6,0693
260	4694,0	0,0012756	0,04212	1135,0	2795,2	1660,2	2,8850	5,9989
270	5505,1	0,0013025	0,03557	1185,4	2788,3	1603,0	2,9766	5,9278
280	6419,1	0,0013324	0,03011	1237,0	2778,6	1541,6	3,0686	5,8555
290	7444,8	0,0013659	0,02551	1290,0	2765,5	1475,2	3,1615	5,7812
300	8592	0,0014041	0,02162	1345,4	2748,5	1403,1	3,2558	5,7039
310	9870	0,0014480	0,01830	1402,9	2726,9	1324,0	3,3521	5,6286
320	11290	0,0014995	0,01544	1463,3	2699,7	1236,5	3,4512	5,5358
330	12865	0,0015614	0,01296	1527,4	2665,6	1138,1	3,5544	5,4414
340	15608	0,0016386	0,01078	1596,7	2622,3	1025,6	3,6637	5,3363
350	16537	0,0017407	0,008822	1672,9	2566,1	893,1	3,7816	5,2149
360	18674	0,0018930	0,006970	1763,1	2485,7	722,6	3,9189	5,0603
370	21053	0,0022306	0,004958	1896,2	2335,7	439,4	4,1198	4,8031
374,12	22115	0,003147		2095,2		0,0	4,4237	

Tablica 5. Wyciąg z tablic pary nasyconej H₂O uszeregowany według ciśnień

P	t _s	v'	v''	h'	h''	r = h''-h'	s'	s''
kPa	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg·K	kJ/kg·K
1	6,98	0,0010001	129,208	29,33	2513,8	2484,5	0,1060	8,9755
1,5	13,03	0,0010006	87,981	54,71	2525,0	2470,2	0,1956	8,8278
2	17,51	0,0010012	67,006	73,45	2533,2	2459,7	0,2606	8,7236
3	24,10	0,0010027	45,668	101,00	2545,2	2444,2	0,3543	8,5776
4	28,98	0,0010040	34,803	121,41	2554,1	2432,7	0,4224	8,4747
5	32,90	0,0010052	28,196	137,77	2561,2	2423,4	0,4763	8,3952
6	36,18	0,0010064	23,743	151,50	2567,1	2415,6	0,5209	8,3305
7	39,02	0,0010074	20,533	163,38	2572,2	2408,8	0,5591	8,2760
8	41,53	0,0010084	18,106	173,87	2576,7	2402,9	0,5926	8,2289
9	43,79	0,0010094	16,206	183,28	2580,8	2397,5	0,6224	8,1875
10	45,83	0,0010102	14,676	191,84	2584,4	2392,6	0,6493	8,1505
12	49,45	0,0010119	12,364	206,94	2590,9	2383,9	0,6963	8,0867
14	52,58	0,0010133	10,696	220,03	2596,4	2376,4	0,7367	8,0329
16	55,34	0,0010147	9,4349	231,60	2601,3	2369,7	0,7721	7,9865
18	57,83	0,0010160	8,4469	242,00	2603,5	2363,7	0,8036	7,9456
20	60,09	0,0010172	7,6515	251,46	2609,6	2358,2	0,8321	7,9092
25	64,99	0,0010199	6,2061	272,00	2618,2	2346,2	0,8933	7,8322
30	69,13	0,0010223	5,2308	289,31	2625,3	2336,0	0,9441	7,7695
35	72,70	0,0010245	4,5305	304,30	2631,4	2327,1	0,9877	7,7168
40	75,89	0,0010265	3,9948	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
45	78,89	0,0010265	3,5792	329,62	2641,6	2312,0	1,0603	7,6310
50	81,35	0,0010301	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951
60	85,95	0,0010303	2,7329	359,93	2653,7	2293,7	1,1454	7,5332
70	89,96	0,0010361	2,3658	359,77	2660,2	2283,5	1,1921	7,4811
80	93,51	0,0010387	2,0880	391,72	2666,0	2274,3	1,2330	7,4360
90	96,71	0,0010412	1,8701	405,21	2671,1	2265,9	1,2696	7,3963
100	99,63	0,0010434	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608
120	104,81	0,0010476	1,4289	439,36	2683,8	2244,5	1,3609	7,2996
140	109,32	0,0010513	1,2370	458,42	2690,8	2232,3	1,4109	7,2479
160	113,32	0,0010547	1,0917	475,38	2696,8	2221,4	1,4550	7,2032
180	116,93	0,0010579	0,97776	490,70	2702,1	2211,4	1,4550	7,1638
200	120,23	0,0010608	0,88592	504,71	2706,9	2202,2	0,4365	7,1286
220	123,27	0,0010636	0,81027	517,63	2711,3	2193,7	0,4503	7,0967
240	126,09	0,0010663	0,74685	529,64	2715,3	2185,6	0,4640	7,0676
260	128,73	0,0010688	0,69287	540,88	2718,9	2178,1	0,4777	7,0409
280	131,20	0,0010712	0,64637	551,45	2722,3	2170,9	0,4913	7,0161
300	133,54	0,0010735	0,60586	561,44	2725,5	2164,1	1,6717	6,9930
350	138,88	0,0010789	0,52424	584,28	2732,5	2148,2	1,7273	6,9414
400	143,62	0,0010839	0,46242	604,68	2738,5	2133,9	1,7764	6,8966
450	147,92	0,0010885	0,41391	623,17	2743,8	2120,7	1,8204	6,8570
500	151,85	0,0010928	0,37481	640,13	2748,5	2108,4	1,8604	6,8215
600	158,84	0,0011009	0,31556	670,43	2756,4	2086,0	1,9309	6,7598
700	164,96	0,0011082	0,27274	697,07	2762,9	2065,8	1,9918	6,7074
800	170,42	0,0011150	0,24029	720,94	2768,4	2047,4	2,0457	6,6617
900	175,36	0,0011213	0,21483	742,64	2773,0	2030,3	2,0941	6,6212

cd. tabl. 5

P	t_s	v'	v''	h'	h''	$r = h'' - h'$	s'	s''
MPa	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg·K	kJ/kg·K
1,0	179,88	0,0011539	0,19431	762,60	2777,0	2014,4	2,1382	6,5847
1,1	184,06	0,0011586	0,17739	781,12	2780,4	1999,3	2,1786	6,5515
1,2	187,96	0,0011633	0,16320	798,42	2783,4	1985,0	2,2160	6,5210
1,3	191,60	0,0011678	0,15112	814,69	2786,1	1971,4	2,2509	6,4928
1,4	195,04	0,0011723	0,14071	830,06	2788,4	1958,3	2,2836	6,4665
1,5	198,28	0,0011539	0,13165	844,65	2790,4	1945,7	2,3144	6,4418
1,6	201,37	0,0011586	0,12368	858,55	2792,2	1933,6	2,3436	6,4186
1,7	204,3	0,0011633	0,11661	871,83	2793,8	1921,9	2,3712	6,3967
1,8	207,10	0,0011678	0,11031	884,56	2795,1	1910,6	2,3976	6,3759
1,9	209,79	0,0011723	0,10464	896,79	2796,3	1899,6	2,4227	6,3561
2,0	212,37	0,0011766	0,09953	908,57	2797,4	1888,8	2,4468	6,3372
2,2	217,24	0,0011850	0,09064	930,94	2799,1	1868,2	2,4922	6,3018
2,4	221,78	0,0011932	0,08319	951,92	2800,4	1848,4	2,5343	6,2691
2,6	226,03	0,0012011	0,07685	971,72	2801,2	1929,5	2,5736	6,2386
2,8	230,04	0,0011723	0,07138	990,49	2801,7	1811,2	2,6106	6,2101
3,0	233,84	0,0012163	0,06662	1008,36	2801,9	1793,5	2,6455	6,1831
3,5	242,54	0,0012345	0,05701	1049,79	2801,3	1751,5	2,7253	6,1218
4,0	250,33	0,0012521	0,04974	1087,46	2899,4	1712,0	2,7967	6,0670
4,5	257,41	0,0012691	0,04402	1122,21	2796,5	1674,3	2,8614	6,0171
5,0	263,92	0,0012858	0,03941	1154,60	2792,8	1638,2	2,9209	5,9712
6	275,56	0,0013187	0,03241	1213,90	2783,3	1569,4	3,0277	5,8878
7	285,80	0,0013514	0,02735	1267,69	2771,4	1503,7	3,1224	5,8127
8	294,98	0,0013843	0,02349	1317,45	2757,6	1440,1	3,2083	5,7431
9	303,31	0,0014179	0,02046	1364,16	2741,9	1377,8	3,2874	5,6775
10	310,96	0,0014526	0,01801	1408,55	2724,6	1316,0	3,3615	5,6145
11	318,04	0,0014887	0,01597	1451,17	2705,5	1254,4	3,4315	5,5533
12	324,64	0,0015267	0,01425	1492,18	2684,9	1192,4	3,4984	5,4931
13	330,81	0,0015670	0,01278	1532,85	2662,4	1139,6	3,5630	5,4333
14	336,63	0,0016104	0,01149	1572,64	2638,1	1065,4	3,6260	5,3732
15	342,12	0,0016581	0,01035	1612,19	2611,6	999,5	3,6877	5,3123
16	352,22	0,0017101	0,009331	1651,52	2582,8	931,3	3,7487	5,2496
17	352,26	0,0017690	0,008401	1691,66	2550,8	859,2	3,8103	5,1842
18	356,96	0,0019231	0,007535	1733,42	2514,4	781,0	3,8739	5,1135
19	361,44	0,0019231	0,006700	1778,17	2470,0	691,9	3,9417	5,0320
20	365,71	0,0020376	0,005873	1828,74	2413,7	585,0	4,0180	4,9337
21	369,79	0,0022179	0,005008	1892,28	2340,4	448,1	4,1138	4,8109
22	373,68	0,0026750	0,003757	2007,75	2192,6	184,8	4,2891	4,5749
22,115	374,12	0,0031470		2095,20		0,0	4,4237	

Tablica 6. Wyciąg z tablic pary przegrzanej H₂O

P	100 kPa			500 kPa			1000 kPa		
t	t _s = 99,63[°C			t _s = 151,85°C			t _s = 179,88°C		
	v' = 0,0010434 v'' = 1,695			v' = 0,0010926 v'' = 0,3748			v' = 0,0011274 v'' = 0,1943		
	h' = 417,51 h'' = 2675,7			h' = 640,13 h'' = 2748,5			h' = 762,60 h'' = 2777,0		
	s' = 1,3027 s'' = 7,3608			s = 1,8604 s'' = 6,8215			s' = 2,1382 s'' = 65847		
°C	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0,01	0,0010002	0,0	0,0000	0,0010000	0,5	0,0000	0,0009997	1,0	0,0001
10	0,0010002	42,1	0,1510	0,0010000	42,5	0,1509	0,0009998	43,0	0,1509
20	0,0010017	84,0	0,2963	0,0010015	84,3	0,2962	0,0010013	84,8	0,2961
30	0,0010043	125,8	0,4365	0,0010041	126,1	0,4364	0,0010039	126,6	0,4362
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010076	167,9	0,5719	0,0010074	168,3	0,5717
50	0,0010121			0,0010119	209,7	0,7033	0,0010117	210,1	0,7031
60	0,0010171	209,3	0,7035	0,0010169	251,5	0,8307	0,0010167	251,9	0,8305
70	0,0010228	251,2	0,8309	0,0010226	293,4	0,9545	0,0010224	293,8	0,9542
80	0,0010292	293,0	0,9548	0,0010290	335,3	1,0750	0,0010287	335,7	1,0746
90	0,0010361	335,0	1,0752	0,0010359	377,3	1,1922	0,0010357	377,7	1,1919
		377,0	1,1925						
100	1,696			0,0010435	419,4	1,3066	0,0010432	419,7	1,3062
110	1,745	2676,5	7,3626	0,0010517	461,6	1,4182	0,0010514	461,9	1,4178
120	1,793	2696,7	7,4164	0,0010605	503,9	1,5273	0,0010602	504,3	1,5269
130	1,841	2716,8	7,4681	0,0010699	546,5	1,6341	0,0010696	546,8	1,6337
140	1,889	2736,8	7,5182	0,0010800	589,2	1,7388	0,0010796	589,5	1,7383
		2756,6	7,5669						
150	1,937			0,0010908	632,2	1,8416	0,0010904	632,5	1,8411
160	1,984	2776,5	7,6143	0,3836	2767,3	6,8654	0,0011019	675,7	1,9420
170	2,031	2796,2	7,6605	0,3942	2789,9	6,9170	0,0011143	719,2	2,0414
180	2,078	2816,0	7,7056	0,4046	2812,1	6,9665	0,1944	2777,3	6,5854
190	2,125	2835,7	7,7496	0,4149	2833,9	7,0141	0,2002	2802,9	6,6413
		2855,4	7,7927						

cd. tabl. 6

°C	100 kPa			500 kPa			1000 kPa		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
200	2,172	2875,2	7,8348	0,4250	2855,5	7,0602	0,2059	2827,6	6,6940
210	2,219	2894,9	7,8761	0,4350	2876,8	7,1048	0,2115	2851,5	6,7442
220	2,266	2914,7	7,9166	0,4450	2898,0	7,1481	0,2169	2874,9	6,7921
230	2,313	2934,5	7,9564	0,4548	2919,0	7,1903	0,2223	2897,9	6,8382
240	2,359	2954,3	7,9954	0,4646	2939,9	7,2315	0,2275	2920,5	6,8826
250	2,406	2974,2	8,0337	0,4744	2960,7	7,2717	0,2327	2942,8	6,9256
260	2,453	2994,1	8,0714	0,4841	2981,5	7,3110	0,2379	2964,8	6,9674
270	2,499	3014,0	8,1085	0,4938	3002,2	7,3495	0,2429	2986,6	7,0080
280	2,546	3034,0	8,1449	0,5034	3022,9	7,3872	0,2480	3008,3	7,0475
290	2,592	3054,0	8,1808	0,5130	3043,6	7,4242	0,2530	3029,9	7,0861
300	2,639	3074,1	8,2162	0,5226	3064,2	7,4606	0,2580	3051,3	7,1239
310	2,685	3094,3	8,2510	0,5321	3084,9	7,4963	0,2629	3072,7	7,1609
320	2,732	3114,4	8,2853	0,5416	3105,5	7,5314	0,2678	3094,0	7,1971
330	2,778	3134,7	8,3192	0,5511	3126,2	7,5659	0,2727	3115,3	7,2326
340	2,824	3155,0	8,3525	0,5606	3146,9	7,6000	0,2776	3136,5	7,2675
350	2,871	3175,3	8,3854	0,5701	3167,6	7,6335	0,2825	3157,7	7,3018
360	2,917	3195,7	8,4178	0,5796	3188,3	7,6664	0,2873	3178,8	7,3355
370	2,964	3216,2	8,4500	0,5890	3209,2	7,6992	0,2921	3200,2	7,3690
380	3,010	3236,7	8,4817	0,5984	3230,0	7,7314	0,2970	3221,5	7,4019
390	3,056	3257,3	8,5130	0,6078	3250,9	7,7631	0,3018	3242,8	7,4342
400	3,103	3278,0	8,5439	0,6172	3271,8	7,7944	0,3066	3264,0	7,4660
410	3,149	3298,7	8,5744	0,6266	3292,8	7,8253	0,3113	3285,3	7,4974
420	3,195	3319,5	8,6046	0,6360	3313,8	7,8558	0,3161	3306,6	7,5283
430	3,242	3340,3	8,6345	0,6454	3334,8	7,8860	0,3209	3327,9	7,5588
440	3,288	3361,2	8,6640	0,6548	3355,9	7,9158	0,3256	3349,3	7,5890
450	3,334	3382,2	8,6932	0,6641	3377,1	7,9452	0,3304	3370,7	7,6188
460	3,380	3403,2	8,7220	0,6735	3398,3	7,9743	0,3351	3392,1	7,6482
470	3,427	3424,3	8,7506	0,6828	3419,6	8,0031	0,3399	3413,6	7,6773
480	3,473	3445,4	8,7789	0,6922	3440,9	8,0316	0,3446	3435,1	7,7061
490	3,519	3466,7	8,8069	0,7015	3462,2	8,0598	0,3493	3456,7	7,7345

cd. tabl. 6

°C	100 kPa			500 kPa			1000 kPa		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
500	3,565	3487,9	8,8346	0,7109	3483,7	8,0877	0,3540	3478,3	7,7627
510	3,612	3509,3	8,8620	0,7202	3505,2	8,1154	0,3588	3500,0	7,7905
520	3,658	3530,7	8,8892	0,7295	3526,7	8,1427	0,3635	3521,7	7,8181
530	3,704	3552,2	8,9162	0,7388	3548,3	8,1698	0,3682	3543,5	7,8454
540	3,750	3573,8	8,9428	0,7482	3570,0	8,1966	0,3729	3565,3	7,8724
550	3,797	3595,4	8,9693	0,7575	3591,7	8,2232	0,3776	3587,2	7,8991
560	3,843	3617,1	8,9954	0,7668	3613,5	8,2495	0,3823	3609,1	7,9256
570	3,889	3638,8	9,0214	0,7761	3635,4	8,2756	0,3870	3631,1	7,9519
580	3,935	3660,7	9,0471	0,7854	3657,3	8,3014	0,3916	3653,2	8,9779
590	3,982	3682,6	9,0727	0,7947	3679,3	8,3271	0,3963	3675,3	8,0036
600	4,028	3704,5	9,0980	0,8040	3701,4	8,3525	0,4010	3697,4	8,0292
610	4,074	3726,6	9,1230	0,8133	3723,5	8,3776	0,4057	3719,6	8,0545
620	4,120	3748,7	9,1479	0,8226	3745,7	8,4026	0,4104	3741,9	8,0795
630	4,166	3770,8	9,1726	0,8319	3767,9	8,4274	0,4151	3764,3	8,1044
640	4,213	3793,1	9,1971	0,8412	3790,2	8,4519	0,4197	3786,7	8,1291
650	4,259	3815,4	9,2214	0,8505	3612,6	8,4763	0,4244	3809,1	8,1535
660	4,305	3837,8	9,2455	0,8597	3835,0	8,5005	0,4291	3831,6	8,1778
670	4,351	3860,2	9,2694	0,8690	3857,6	8,5245	0,4338	3854,2	8,2019
680	4,397	3882,7	9,2932	0,8783	3880,1	8,5483	0,4384	3876,9	8,2258
690	4,444	3905,3	9,3168	0,8876	3902,8	8,5720	0,4431	3899,6	8,2495
700	4,490	3928,0	9,3402	0,8969	3925,5	8,5954	0,4478	3922,4	8,2731

cd. tabl. 6

P	1,5 MPa			2,0 MPa			2,5 MPa		
t	t _s = 198,28°C			t _s = 212,37°C			t _s = 223,94°C		
	v' = 0,0011538 h' = 844,65 s' = 2,3144	v'' = 0,1316 h'' = 2790,4 s'' = 6,4418		v' = 0,0011766 h' = 908,57 s = 2,4468	v'' = 0,09953 h'' = 2797,4 s'' = 6,3372		v' = 0,0011972 h' = 961,95 s' = 2,5543	v'' = 0,07990 h'' = 2800,8 s'' = 6,2536	
°C	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0,01	0,0009995	1,5	0,0001	0,0009992	2,0	0,0002	0,0009990	2,6	0,0002
10	0,0009995	43,5	0,1509	0,0009993	43,9	0,1508	0,0009991	44,4	0,1508
20	0,0010010	85,3	0,2960	0,0010008	85,7	0,2959	0,0010006	86,2	0,2958
30	0,0010036	127,0	0,4360	0,0010034	127,5	0,4359	0,0010032	127,9	0,4357
40	0,0010071	168,8	0,5715	0,0010069	169,2	0,5713	0,0010067	169,7	0,5711
50	0,0010114	210,5	0,7028	0,0010112	211,0	0,7026	0,0010110	211,4	0,7023
60	0,0010165	252,3	0,8302	0,0010162	252,7	0,8299	0,0010160	253,2	0,8297
70	0,0010222	294,2	0,9539	0,0010219	294,6	0,9536	0,0010217	295,0	0,9533
80	0,0010285	336,1	1,0743	0,0010282	336,5	1,0740	0,0010280	336,9	1,0736
90	0,0010354	378,0	1,1915	0,0010352	378,4	1,1911	0,0010349	378,8	1,1908
100	0,0010430	420,1	1,3058	0,0010427	420,5	1,3054	0,0010425	420,9	1,3050
110	0,0010511	462,3	1,4173	0,0010508	462,7	1,4169	0,0010506	463,0	1,4165
120	0,0010599	504,6	1,5264	0,0010596	505,0	1,5260	0,0010593	505,3	1,5255
130	0,0010693	547,1	1,6332	0,0010690	547,5	1,6327	0,0010687	547,8	1,6322
140	0,0010793	589,8	1,7378	0,0010790	590,2	1,7373	0,0010787	590,5	1,7368
150	0,0010901	632,8	1,8405	0,0010897	633,1	1,8399	0,0010894	633,4	1,8394
160	0,0011016	676,0	1,9414	0,0011012	676,3	1,9408	0,0011008	676,6	1,9402
170	0,0011139	719,5	2,0407	0,0011135	719,8	2,0401	0,0011131	720,1	2,0395
180	0,0011271	763,4	2,1386	0,0011267	763,6	2,1379	0,0011262	763,9	2,1373
190	0,0011413	807,6	2,2352	0,0011408	807,9	2,2345	0,0011403	808,1	2,2338

cd. tabl. 6

°C	1,5 MPa			2,0 MPa			2,5 MPa		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
200	0,1324	2795,3	6,4522	0,0011560	852,6	2,3300	0,0011555	852,8	2,3292
210	0,1366	2822,9	6,5099	0,0011725	897,8	2,4245	0,0011719	898,0	2,4237
220	0,1406	2849,2	6,5639	0,1021	2820,4	6,3842	0,0011897	943,7	2,5175
230	0,1445	2874,7	6,6150	0,1053	2849,0	6,4416	0,8164	2820,4	6,2927
240	0,1483	2899,3	6,6635	0,1085	2876,3	6,4953	0,8439	2851,0	6,3529
250	0,1520	2923,4	6,7100	0,1115	2902,5	6,5460	0,08701	2879,9	6,4087
260	0,1556	2947,0	6,7546	0,1144	2927,9	6,5941	0,08953	2907,5	6,4610
270	0,1592	2970,2	6,7977	0,1172	2952,7	6,6401	0,09197	2934,0	6,5104
280	0,1627	2993,0	6,8394	0,1200	2976,9	6,6842	0,09434	2959,8	6,5573
290	0,1662	3015,6	6,97984	0,1228	3000,6	6,7267	0,09665	2984,9	6,6023
300	0,1697	3037,9	6,9192	0,1255	3024,0	6,7679	0,09892	3009,4	6,6454
310	0,1731	3060,1	6,9575	0,1282	3047,0	6,8078	0,1011	3033,5	6,6870
320	0,1765	3082,1	6,9949	0,1308	3069,8	6,8466	0,1033	3057,1	6,7273
330	0,1799	3104,0	7,0315	0,1334	3092,4	6,8843	0,1055	3080,5	6,7664
340	0,1832	3125,8	7,0674	0,1360	3114,9	6,9212	0,1076	3103,6	6,8044
350	0,1866	3147,6	7,1026	0,1386	3137,2	6,9574	0,1098	3126,6	6,8416
360	0,1899	3169,2	7,1370	0,1411	3159,4	6,9927	0,1119	3149,4	6,8779
370	0,1932	3191,1	7,1713	0,1437	3181,8	7,0278	0,1139	3172,3	6,9137
380	0,1964	3212,9	7,2049	0,1462	3204,0	7,0621	0,1160	3195,0	6,9488
390	0,1997	3234,5	7,2378	0,1487	3226,1	7,0956	0,1180	3217,5	6,9830
400	0,2030	3256,1	7,2702	0,1512	3248,1	7,1285	0,1201	3239,9	7,0165
410	0,2062	3277,7	7,3020	0,1536	3270,0	7,1609	0,1221	3262,2	7,0494
420	0,2095	3299,3	7,3334	0,1561	3291,9	7,1927	0,1241	3284,5	7,0817
430	0,2127	3320,9	7,3644	0,1586	3313,9	7,2241	0,1261	3306,7	7,1135
440	0,2159	3342,6	7,3949	0,1610	3335,8	7,2550	0,1281	3328,9	7,1449
450	0,2191	3364,2	7,4250	0,1635	3357,7	7,2855	0,1301	3351,0	7,1758
460	0,2223	3385,9	7,4548	0,1659	3379,6	7,3156	0,1321	3373,2	7,2062
470	0,2255	3407,6	7,4842	0,1684	3401,5	7,3454	0,1340	3395,4	7,2362
480	0,2287	3429,3	7,5132	0,1708	3423,5	7,3747	0,1360	3417,5	7,2659
490	0,2319	3451,1	7,5420	0,1732	3445,4	7,4037	0,1380	3439,7	7,2951

cd. tabl. 6

°C	1,5 MPa			2,0 MPa			2,5 MPa		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
500	0,2351	3472,9	7,5703	0,1756	3467,4	7,4323	0,1399	3461,9	7,3240
510	0,2383	3494,7	7,5984	0,1780	3489,5	7,4606	0,1419	3484,1	7,3526
520	0,2415	3516,6	7,6262	0,1804	3511,5	7,4886	0,1438	3506,4	7,3808
530	0,2446	3538,6	7,6537	0,1828	3533,6	7,5163	0,1458	3528,7	7,4087
540	0,2478	3560,5	7,6809	0,1852	3555,8	7,5437	0,1477	3551,0	7,4363
550	0,2509	3582,6	7,7078	0,1876	3577,9	7,5708	0,1496	3573,3	7,4636
560	0,2541	3604,6	7,7345	0,1900	3600,2	7,5977	0,1516	3595,7	7,4907
570	0,2573	3626,8	7,7609	0,1924	3622,4	7,6243	0,1535	3618,1	7,5174
580	0,2604	3649,0	7,7871	0,1948	3644,8	7,6506	0,1554	3640,5	7,5439
590	0,2636	3671,2	7,8130	0,1972	3667,1	7,6766	0,1573	3663,0	7,5700
600	0,2667	3693,5	7,8386	0,1995	3689,5	7,7024	0,1592	3685,5	7,5960
610	0,2698	3715,8	7,8640	0,2019	3711,9	7,7279	0,1612	3708,0	7,6216
620	0,2730	3738,2	7,8892	0,2043	3734,4	7,7533	0,1631	3730,6	7,6471
630	0,2761	3760,6	7,9142	0,2067	3756,9	7,7783	0,1650	3753,2	7,6722
640	0,2793	3783,1	7,9390	0,2090	3779,5	7,8032	0,1669	3775,9	7,6972
650	0,2824	3805,6	7,9635	0,2114	3802,1	7,8279	0,1688	3798,6	7,7220
660	0,2855	3828,2	7,9879	0,2138	3824,8	7,8523	0,1707	3821,4	7,7465
670	0,2887	3850,9	8,0121	0,2161	3847,6	7,8766	0,1726	3844,3	7,7709
680	0,2918	3873,7	8,0361	0,2185	3870,4	7,9007	0,1745	3867,2	7,7950
690	0,2949	3896,5	8,0599	0,2208	3893,3	7,9245	0,1764	3890,2	7,8190
700	0,2980	3919,4	8,0835	0,2232	3916,3	7,9483	0,1783	3913,2	7,8428

cd. tabl. 6

P	3,0 MPa			4,0 MPa			5,0 MPa		
t	t _s = 233,84°C			t _s = 250,33°C			t _s = 263,92°C		
	v' = 0,0012163 h' = 1008,4 s' = 2,6455	v'' = 0,06662 h'' = 2801,9 s'' = 6,1831		v' = 0,0012521 h' = 108,5 s = 2,7967	v'' = 0,04974 h'' = 2799,4 s'' = 6,0670		v' = 0,0012858 h' = 1154,6 s' = 2,9209	v'' = 0,03941 h'' = 2792,8 s'' = 5,9712	
°C	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0,01	0,0009987	3,1	0,0002	0,0009982	4,1	0,0003	0,0009977	5,1	0,0004
10	0,0009988	44,9	0,1507	0,0009984	45,9	0,1506	0,0009979	46,9	0,1505
20	0,0010004	86,7	0,2957	0,0009999	87,6	0,2955	0,0009995	88,6	0,2952
30	0,0010030	128,4	0,4356	0,0010025	129,3	0,4353	0,0010021	130,2	0,4350
40	0,0010065	170,1	0,5709	0,0010060	171,0	0,5706	0,0010056	171,9	0,5702
50	0,0010108	211,8	0,7021	0,0010103	212,7	0,7017	0,0010099	213,5	0,7012
60	0,0010158	253,6	0,8294	0,0010153	254,4	0,8289	0,0010149	255,3	0,8283
70	0,0010215	295,4	0,9530	0,0010210	296,2	0,9524	0,0010205	297,0	0,9518
80	0,0010278	337,3	1,0733	0,0010273	336,1	1,0726	0,0010268	338,8	1,0720
90	0,0010347	379,2	1,1904	0,0010342	380,0	1,1897	0,0010337	380,7	1,1890
100	0,0010422	421,2	1,3046	0,0010417	422,0	1,3038	0,0010412	422,7	1,3030
110	0,0010503	463,4	1,4161	0,0010498	464,1	1,4152	0,0010492	464,9	1,4144
120	0,0010590	505,7	1,5251	0,0010584	506,4	1,5242	0,0010579	507,1	1,5233
130	0,0010684	548,2	1,6317	0,0010677	548,8	1,6308	0,0010671	549,5	1,6298
140	0,0010783	590,8	1,7363	0,0010777	591,5	1,7352	0,0010771	592,1	1,7342
150	0,0010890	633,7	1,8388	0,0010883	634,3	1,8377	0,0010877	635,0	1,8366
160	0,0011005	676,9	1,9396	0,0010997	677,5	1,9385	0,0010990	678,1	1,9373
170	0,0011127	720,3	2,0388	0,0011119	720,9	2,0376	0,0011111	721,4	2,0373
180	0,0011258	764,1	2,1366	0,0011249	764,6	2,1352	0,0011241	765,2	2,1339
190	0,0011399	808,3	2,2330	0,0011389	808,8	2,2316	0,0011380	809,3	2,2301

cd. tabl. 6

°C	3,0 MPa			4,0 MPa			5,0 MPa		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
200	0,0011550	853,0	2,3284	0,0011540	853,4	2,3268	0,0011530	853,8	2,3253
210	0,0011714	898,1	2,4228	0,0011702	898,5	2,4211	0,0011691	898,8	2,4195
220	0,0011891	943,9	2,5166	0,0011878	944,2	2,5147	0,0011866	944,4	2,5129
230	0,0012084	990,3	2,6098	0,0012070	990,5	2,6078	0,0012056	990,7	2,6058
240	0,06818	2823,0	6,2245	0,0012280	1037,7	2,7006	0,0012264	1037,8	2,6985
250	0,07058	2855,2	6,2867	0,0012512	1085,8	2,7936	0,0012494	1085,8	2,7911
260	0,07286	2885,4	6,3440	0,05173	26,35,6	6,1355	0,0012750	1135,0	2,8842
270	0,07504	2914,2	6,3974	0,05366	2870,1	6,1995	0,04053	2818,4	6,0184
280	0,07714	2941,7	6,4477	0,05547	2902,2	6,2581	0,04224	2857,0	6,0889
290	0,07917	2968,3	6,4953	0,05719	2932,5	6,3125	0,04383	2892,4	6,1523
300	0,08116	2994,2	6,5408	0,05885	2961,5	6,3634	0,04532	2925,4	6,2104
310	0,08310	3019,3	6,5843	0,06045	2989,3	6,4115	0,04675	2956,5	6,2643
320	0,08500	3044,0	6,6262	0,06200	3016,2	6,4573	0,04811	2986,2	6,3147
330	0,08687	3068,2	6,6667	0,06351	3042,3	6,5010	0,04942	3014,6	6,3623
340	0,08871	3092,1	6,7059	0,06499	3067,9	6,5430	0,05070	3042,2	6,4077
350	0,09053	3115,7	6,7442	0,06645	3093,1	6,5838	0,05194	3069,2	6,4513
360	0,09232	3139,2	6,7815	0,06787	3117,9	6,6234	0,05316	3095,6	6,4934
370	0,09410	3162,6	6,8183	0,06928	3142,6	6,6620	0,05435	3121,7	6,5342
380	0,09586	3185,8	6,8541	0,07066	3166,9	6,6995	0,05551	3147,2	6,5736
390	0,09760	3208,8	6,8890	0,07203	3190,9	6,7359	0,05666	3172,2	6,6116
400	0,09933	3231,6	6,9231	0,07339	3214,5	6,7714	0,05780	3196,9	6,6486
410	0,1011	3254,3	6,9566	0,07473	3238,0	6,8060	0,05891	3221,3	6,6845
420	0,1028	3276,9	6,9894	0,07606	3261,4	6,8399	0,06002	3245,4	6,7196
430	0,1045	3299,4	7,0217	0,07738	3284,6	6,8732	0,06111	3269,4	6,7539
440	0,1061	3321,9	7,0535	0,07869	3307,7	6,9058	0,06220	3293,2	6,7875
450	0,1078	3344,4	7,0847	0,07999	3330,7	6,9379	0,06327	3316,8	6,8204
460	0,1095	3366,8	7,1155	0,08128	3353,7	6,9694	0,06434	3340,4	6,8528
470	0,1112	3389,2	7,1459	0,08257	3376,6	7,0005	0,06539	3363,8	6,8846
480	0,1128	3411,6	7,1758	0,08384	3399,5	7,0310	0,06644	3387,2	6,9158
490	0,1145	3434,0	7,2054	0,08512	3422,3	7,0612	0,06749	3410,5	6,9466

cd. tabl. 6

°C	3,0 MPa			4,0 MPa			5,0 MPa		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
500	0,1161	3456,4	7,2345	0,08638	3445,2	7,0909	0,06853	3433,8	6,9768
510	0,1178	3478,8	7,2633	0,08764	3468,0	7,1202	0,06956	3457,0	7,0067
520	0,1194	3501,2	7,2918	0,08890	3490,8	7,1491	0,07058	3480,2	7,0361
530	0,1211	3523,7	7,3199	0,09015	3513,6	7,1777	0,07161	3503,4	7,0651
540	0,1227	3546,1	7,3477	0,09140	3536,4	7,2059	0,07262	3526,5	7,0938
550	0,1243	3568,6	7,3752	0,09263	3559,2	7,2338	0,07363	3549,6	7,1221
560	0,1259	3591,1	7,4024	0,09387	3582,0	7,2614	0,07464	3572,8	7,1501
570	0,1275	3613,7	7,4293	0,09511	3604,9	7,2887	0,07564	3596,0	7,1777
580	0,1292	3636,3	7,4560	0,09634	3627,7	7,3156	0,07665	3619,1	7,2050
590	0,1308	3658,93	7,4823	0,09757	3650,6	7,3423	0,07764	3642,2	2,2319
600	0,1324	3681,5	7,5084	0,09879	3673,4	7,3686	0,07864	3665,3	7,2586
610	0,1340	3704,1	7,5341	0,1000	3696,3	7,3947	0,07963	3688,5	7,2849
620	0,1356	3726,8	7,5597	0,1012	3719,2	7,4204	0,08062	3711,6	7,3109
630	0,1372	3749,6	7,5850	0,1025	3742,1	7,4460	0,08161	3734,7	7,3367
640	0,1388	3772,3	7,6101	0,1037	3765,1	7,4713	0,08259	3757,9	7,3622
650	0,1404	3795,1	7,6349	0,1049	3786,1	7,4963	0,08358	3781,1	7,3875
660	0,420	3818,0	7,6596	0,1061	3811,2	7,5211	0,08456	3804,3	7,4125
670	0,1436	3840,9	7,6840	0,1073	3834,3	7,5458	0,08554	3827,6	7,4375
680	0,1452	3863,9	7,7083	0,1085	3857,4	7,5702	0,08651	3850,9	7,4619
690	0,1468	3887,0	7,7323	0,1097	3880,7	7,5944	0,08749	3874,3	7,4863
700	0,1483	3910,1	7,7562	0,1109	3903,9	7,6185	0,08846	3897,7	7,5105

cd. tabl. 6

P	6,0 MPa			7,0 MPa			8,0 MPa		
t	t _s = 275,56°C			t _s = 285,80°C			t _s = 294,98°C		
	v' = 0,0013187 h' = 1213,9 s' = 3,0277	v'' = 0,03241 h'' = 2783,3 s'' = 6,8878		v' = 0,0013514 h' = 1267,7 s = 3,1224	v'' = 0,02735 h'' = 2771,4 s'' = 5,8127		v' = 0,0013843 h' = 1317,4 s' = 3,2083	v'' = 0,02349 h'' = 2757,6 s'' = 5,7431	
°C	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0,01	0,0009972	6,1	0,0004	0,0009967	7,1	0,0005	0,0009962	8,1	0,0006
10	0,0009974	47,8	0,1505	0,0009970	48,8	0,1504	0,0009965	49,8	0,1503
20	0,0009990	89,5	0,2950	0,0009986	90,4	0,2948	0,0009981	91,4	0,2946
30	0,0010016	131,1	0,4347	0,0010012	132,0	0,4344	0,0010008	132,9	0,4340
40	0,0010052	172,7	0,5698	0,0010047	173,6	0,5694	0,0010043	174,5	0,5690
50	0,0010094	214,4	0,7007	0,0010090	215,3	0,7003	0,0010086	216,1	0,6998
60	0,0010144	256,1	0,8278	0,0010140	256,9	0,8273	0,0010135	257,8	0,8267
70	0,0010201	297,8	0,9512	0,0010196	298,7	0,95-6	0,0010192	299,5	0,9501
80	0,0010263	339,6	1,0713	0,0010259	340,4	1,0707	0,0010254	341,2	1,0700
90	0,0010332	381,5	1,1883	0,0010327	382,3	1,1875	0,0010322	383,1	1,1868
100	0,0010406	423,5	1,3023	0,0010401	424,2	1,3015	0,0010396	425,0	1,3007
110	0,0010487	465,6	1,4136	0,0010481	466,3	1,4127	0,0010476	467,0	1,4119
120	0,0010573	507,8	1,5224	0,0010567	508,5	1,5215	0,0010562	509,2	1,5206
130	0,0010665	550,2	1,6288	0,0010660	550,9	1,6279	0,0010654	551,6	1,6269
140	0,0010764	592,8	1,7332	0,0010758	593,4	1,7321	0,0010752	594,1	1,7311
150	0,0010870	635,6	6,8355	0,0010863	636,2	1,8345	0,0010856	636,8	1,8334
160	0,0010983	678,6	1,9361	0,0010976	679,2	1,9350	0,0010968	679,8	1,9338
170	0,0011103	722,0	2,0351	0,0011096	722,6	2,0338	0,0011088	723,1	2,0326
180	0,0011232	765,7	2,1325	0,0011224	766,2	2,1312	0,0011216	766,7	2,1299
190	0,0011371	809,7	2,2287	0,0011362	810,2	2,2273	0,0011353	810,7	2,2258

cd. tabl. 6

°C	6,0 MPa			7,0 MPa			8,0 MPa		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
200	0,0011519	854,2	2,3237	0,0011510	854,6	2,3222	0,0011500	855,1	2,3207
210	0,0011680	899,2	2,4176	0,0011669	899,6	2,4161	0,0011658	899,9	2,4145
220	0,0011853	944,7	2,5111	0,0011841	945,0	2,5093	0,0011829	945,3	2,5075
230	0,0012042	990,9	2,6038	0,0012028	991,2	2,6019	0,0012015	991,4	2,5999
240	0,0012249	1037,9	2,6963	0,0012233	1038,0	2,6941	0,0012218	1038,2	2,6920
250	0,0012476	1085,8	2,7887	0,0012458	1085,8	2,7863	0,0012441	1085,8	2,7840
260	0,0012729	1134,8	2,8815	0,0012708	1134,7	2,8788	0,0012687	1134,5	2,8762
270	0,0013013	1185,2	2,9751	0,0012988	1184,9	2,9721	0,0012964	1184,5	2,9691
280	0,03317	2803,9	5,9253	0,0013307	1236,7	3,0666	0,0013277	1236,1	3,0633
290	0,03473	2846,5	6,0016	0,02801	2792,9	5,8509	0,0013639	1289,8	3,1594
300	0,03616	2885,0	6,0693	0,02946	2839,0	5,9322	0,02425	2785,4	5,7919
310	0,3750	2920,4	6,1306	0,03078	2880,2	6,0034	0,02560	2834,7	5,8772
320	0,03876	2953,5	6,1869	0,03199	2917,8	6,0673	0,02682	2878,1	5,9511
330	0,03996	2984,9	6,2393	0,03313	2952,7	6,1256	0,02682	2917,5	6,0169
340	0,04111	3014,9	6,2886	0,03421	2985,5	6,1797	0,02897	2953,9	6,0768
350	0,04223	3043,9	6,3356	0,03524	3017,0	6,2305	0,02995	2988,3	6,1324
360	0,04331	3072,1	6,3806	0,03623	3047,3	6,2789	0,03089	3021,0	6,1845
370	0,04436	3099,7	6,4238	0,03719	3076,7	6,3249	0,03179	3052,5	6,2338
380	0,04539	3126,6	6,4653	0,03812	3105,2	6,3688	0,03265	3082,7	6,2804
390	0,04639	3152,9	6,5052	0,03903	3132,8	6,4108	0,03349	3111,8	6,3247
400	0,04738	3178,7	6,5438	0,03992	3159,7	6,4511	0,03431	3140,1	6,3670
410	0,04835	3204,0	6,5812	0,04079	3186,1	6,4900	0,03511	3167,7	6,4076
420	0,04931	3229,0	6,6175	0,04165	3212,1	6,5278	0,03589	3194,7	6,4469
430	0,05026	3253,8	6,6530	0,04249	3237,7	6,5644	0,03665	3221,2	6,4849
440	0,05119	3278,3	6,6876	0,04332	3263,0	6,6002	0,03741	3247,3	6,5218
450	0,05212	3302,6	6,7214	0,04414	3288,0	6,6350	0,03815	3273,1	6,5577
460	0,05303	3326,8	6,7546	0,04495	3312,8	6,6691	0,03888	3298,6	6,5928
470	0,05394	3350,8	6,7872	0,04575	3337,5	6,7025	0,03960	3323,9	6,6270
480	0,05484	3374,7	6,8191	0,04654	3361,9	6,7352	0,04031	3349,0	6,6605
490	0,05573	3398,5	6,8505	0,04733	3386,3	6,7673	0,04102	3373,8	6,6933

cd. tabl. 6

°C	6,0 MPa			7,0 MPa			8,0 MPa		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
500	0,05662	3422,2	6,8814	0,04810	3410,5	6,7988	0,04172	3398,5	6,7255
510	0,05750	3445,9	6,9118	0,04888	3434,6	6,8298	0,04241	3423,1	6,7570
520	0,05837	3469,5	6,9418	0,04964	3458,6	6,8602	0,04309	3447,6	6,7881
530	0,05924	3493,0	6,9713	0,05040	3482,5	6,8902	0,04378	3471,9	6,8186
540	0,06011	3516,5	7,0003	0,05115	3506,4	6,9198	0,04445	3496,2	6,9926
550	0,06096	3540,0	7,0291	0,05191	3530,2	6,9490	0,04512	3520,4	7,0202
560	0,06182	3563,5	7,0575	0,05266	3554,1	6,9778	0,04579	3544,6	7,0473
570	0,06267	3587,0	7,0855	0,05340	3577,9	7,0062	0,04645	3568,7	7,0742
580	0,06352	3610,4	7,1131	0,05414	3601,6	7,0342	0,04711	3592,8	7,1007
590	0,06436	3633,8	7,1404	0,05488	3625,3	7,0618	0,04776	3616,8	7,1269
600	0,06521	3657,2	7,1673	0,05561	3649,0	7,0890	0,04841	3640,7	7,1526
610	0,06604	3680,5	7,1939	0,05634	3672,6	7,1159	0,04906	3664,6	7,1784
620	0,06688	3703,9	7,2202	0,05707	3696,2	7,1425	0,04970	3688,4	7,2038
630	0,06772	3727,2	7,2462	0,05779	3719,7	7,1687	0,05035	3712,2	7,2290
640	0,06855	3750,6	7,2719	0,05851	3743,3	7,1947	0,05099	3736,0	7,2539
650	0,06938	3774,0	7,2974	0,05923	3766,9	7,2204	0,05162	3759,8	7,1528
660	0,07020	3797,4	7,3227	0,05995	3790,5	7,2458	0,05226	3783,6	7,1784
670	0,07103	3820,9	7,3477	0,06067	3814,2	7,2710	0,05289	3807,4	7,2038
680	0,07185	3844,4	7,3725	0,06138	3837,8	7,2960	0,05352	3831,3	7,2290
690	0,07267	3867,9	7,3970	0,06209	3861,6	7,3207	0,05415	3855,2	7,2539
700	0,07349	3891,5	7,4214	0,06280	3885,3	7,3453	0,05478	3879,1	7,2787

cd. tabl. 6

P	9,0 MPa			10,0 MPa			20,0 MPa		
t	t _s = 303,31°C			t _s = 310,96°C			t _s = 365,71°C		
	v' = 0,0014179 h' = 1364,2 s' = 3,2874	v'' = 0,02046 h'' = 2741,9 s'' = 5,6775		v' = 0,0014526 h' = 1408,5 s = 3,3615	v'' = 0,01801 h'' = 2724,6 s'' = 5,6145		v' = 0,0020376 h' = 1828,7 s' = 4,0180	v'' = 0,005673 h'' = 2413,7 s'' = 4,9337	
°C	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0,01	0,0009958	9,2	0,0006	0,0009953	10,2	0,0007	0,0009904	20,2	0,0010
10	0,0009960	50,7	0,1502	0,0009956	51,7	0,1501	0,0009910	61,3	0,1489
20	0,0009977	92,3	0,2944	0,0009972	93,2	0,2942	0,0009929	102,5	0,2919
30	0,0010003	133,8	0,4337	0,0009999	134,7	0,4334	0,0009956	143,8	0,4303
40	0,0010039	175,4	0,5686	0,0010034	176,3	0,5682	0,0009992	185,1	0,5643
50	0,0010081	217,0	0,6993	0,0010077	217,8	0,6989	0,0010034	226,4	0,6943
60	0,0910131	258,6	0,8262	0,0010127	259,4	0,8257	0,0010083	267,8	0,8204
70	0,0010187	300,3	0,9495	0,0010183	301,1	0,9489	0,0010138	309,3	0,9430
80	0,0010249	342,0	1,0694	0,0010245	342,8	1,0687	0,0010199	350,8	1,0623
90	0,0010317	383,8	1,1861	0,0010312	384,6	1,1854	0,0010265	392,4	1,1784
100	0,0010391	425,8	1,3000	0,0010366	426,5	1,2992	0,0010337	434,0	1,2916
110	0,0010471	467,8	1,4111	0,0010465	468,5	1,4103	0,0010414	475,8	1,4022
120	0,0010556	509,9	1,5197	0,0010551	510,6	1,5188	0,0010497	517,7	1,5101
130	0,0010648	552,2	1,6260	0,0010642	522,9	1,6250	0,0010585	559,8	1,6156
140	0,0010745	594,7	1,7301	0,0010739	595,4	1,7291	0,0010679	602,0	1,7192
150	0,0010850	637,5	1,8323	0,0010843	638,1	1,8312	0,0010779	644,5	1,8207
160	0,0010961	680,4	1,9326	0,0010954	681,0	1,9315	0,0010886	687,1	1,9203
170	0,0011080	723,7	2,0314	0,0011073	724,2	2,0301	0,0010999	730,0	2,0182
180	0,0011207	767,2	2,1286	0,0011199	767,8	2,1272	0,0011120	773,1	2,1145
190	0,0011344	811,2	2,2244	0,0011335	811,6	2,2230	0,0011249	816,6	2,2094

cd. tabl. 6

°C	9,0 MPa			10,0 MPa			20,0 MPa		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
200	0,0011490	855,5	2,3191	0,0011480	855,9	2,3176	0,0011387	860,4	2,3030
210	0,0011647	900,3	2,4128	0,0011636	900,7	2,4112	0,0011534	904,7	2,3955
220	0,0011817	945,6	2,5057	0,0011805	946,0	2,5040	0,0011693	949,3	2,4870
230	0,0012001	991,6	2,5980	0,0011988	991,8	2,5961	0,0011863	994,5	2,5777
240	0,0012203	1038,3	2,6899	0,0012188	1038,4	2,6878	0,0012047	1040,3	2,6678
250	0,0012423	1085,9	2,7817	0,0012406	1085,9	2,7793	0,0012247	1086,8	2,7575
260	0,0012667	1134,4	2,8736	0,0012648	1134,3	2,8711	0,0012466	1134,0	2,8470
270	0,0012940	1184,3	2,9662	0,0012917	1184,0	2,9633	0,0012706	1182,3	2,9366
280	0,0013249	1235,6	3,0599	0,0013221	1235,1	3,0567	0,0012971	1231,6	3,0266
290	0,0013604	1289,0	3,1555	0,0013570	1288,2	3,1517	0,0013269	1282,3	3,1174
300	0,0014022	1344,9	3,2539	0,0013978	1343,7	3,2494	0,0013606	1334,6	3,2095
310	0,02142	2781,8	5,7463	0,0014472	1402,6	3,3513	0,0013994	1389,1	3,3037
320	0,02269	2833,5	5,8342	0,01925	2782,1	5,7122	0,0014450	1446,3	3,4010
330	0,02381	2878,8	5,9099	0,02043	2835,5	5,8015	0,001500	1507,3	3,5029
340	0,02484	2919,7	5,9772	0,02147	2882,1	5,8783	0,001570	1573,7	3,6121
350	0,02579	2957,5	6,0384	0,02242	2924,3	5,9465	0,001666	1648,4	3,7327
360	0,02670	2993,1	6,0950	0,02330	2963,2	6,0085	0,001823	1742,0	3,8818
370	0,02755	3026,9	6,1480	0,02414	2999,9	6,0659	0,006951	2531,3	5,1172
380	0,02837	3059,1	6,1977	0,02492	3034,4	6,1191	0,008273	2663,2	5,3209
390	0,02916	1090,0	6,2446	0,02568	3067,1	6,1689	0,009197	2750,8	5,4540
400	0,02993	3119,7	6,2891	0,02641	3098,5	6,2158	0,009952	2820,1	5,5578
410	0,03067	3148,5	6,3316	0,02711	3128,7	6,2605	0,01061	2879,0	5,6446
420	0,03139	3176,7	6,3725	0,02779	3158,1	6,3031	0,01119	2931,0	5,7202
430	0,03210	3204,2	6,4120	0,02846	3186,7	6,3442	0,01173	2978,1	5,7878
440	0,03280	3231,3	6,4502	0,02910	3214,8	6,3837	0,01223	3021,7	5,8493
450	0,03348	3257,9	6,4872	0,02974	3242,3	6,4220	0,01271	3062,5	5,9061
460	0,03415	3284,1	6,5233	0,03036	3269,3	6,4591	0,01315	3101,0	5,9590
470	0,03481	3310,1	6,5584	0,03098	3296,0	6,4953	0,01358	3137,8	6,0088
480	0,03546	3335,7	6,5928	0,03158	3322,3	6,5305	0,01399	3173,1	6,560
490	0,03611	3361,2	6,6263	0,03218	3348,3	6,5648	0,01439	3207,2	6,1010

cd. tabl. 6

°C	9,0 MPa			10,0 MPa			20,0 MPa		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
500	0,03675	3386,4	6,6592	0,03277	3374,1	6,5984	0,01477	3240,2	6,1440
510	0,03738	3411,5	6,6914	0,03335	3399,7	6,6313	0,01514	3272,3	6,1853
520	0,03800	3436,4	6,7230	0,03392	3425,1	6,6635	0,01551	3303,7	6,2251
530	0,03862	3461,2	6,7541	0,03449	3450,4	6,6951	0,01586	3334,5	6,2636
540	0,03923	3485,9	6,7846	0,03505	3475,5	6,7262	0,01621	3364,6	6,3009
550	0,03984	3510,5	6,8147	0,03561	3500,4	6,7568	0,01655	3394,3	6,3373
560	0,04044	3535,0	6,8444	0,03616	3525,4	6,7869	0,01688	3423,6	6,3726
570	0,04104	3559,5	6,8736	0,03671	3550,2	6,8165	0,01721	3452,4	6,4071
580	0,04163	3583,9	6,9023	0,03726	3574,9	6,8456	0,01753	3480,9	6,4407
590	0,04222	3608,2	6,9306	0,03780	3599,5	6,8743	0,01765	3509,1	6,4735
600	0,04281	3632,4	6,9585	0,03833	3624,0	6,9025	0,01816	3536,9	6,5055
610	0,04340	3656,5	6,9860	0,03887	3648,4	6,9303	0,01847	3564,4	6,5369
620	0,04398	3680,6	7,0131	0,03940	3672,7	6,9577	0,01878	3591,7	6,5676
630	0,04456	3704,6	7,0399	0,03993	3697,0	6,9847	0,01908	3618,7	6,5976
640	0,04513	3728,6	7,0663	0,04045	3721,2	7,0114	0,01938	3645,5	6,6271
650	0,04571	3752,6	7,0924	0,04097	3745,4	7,0378	0,01967	3672,1	6,6561
660	0,04628	3776,6	7,1183	0,04149	3769,7	7,0639	0,01997	3698,6	6,6847
670	0,04685	3800,7	7,1439	0,04201	3793,9	7,0897	0,02026	3724,9	6,7127
680	0,04742	3824,7	7,1693	0,04253	3818,1	7,1153	0,02055	3751,2	6,7404
690	0,04798	3848,8	7,1944	0,04304	3842,4	7,1406	0,02083	3777,4	6,7678
700	0,04855	3872,9	7,2193	0,04356	3866,6	7,1656	0,02111	3803,5	6,7947

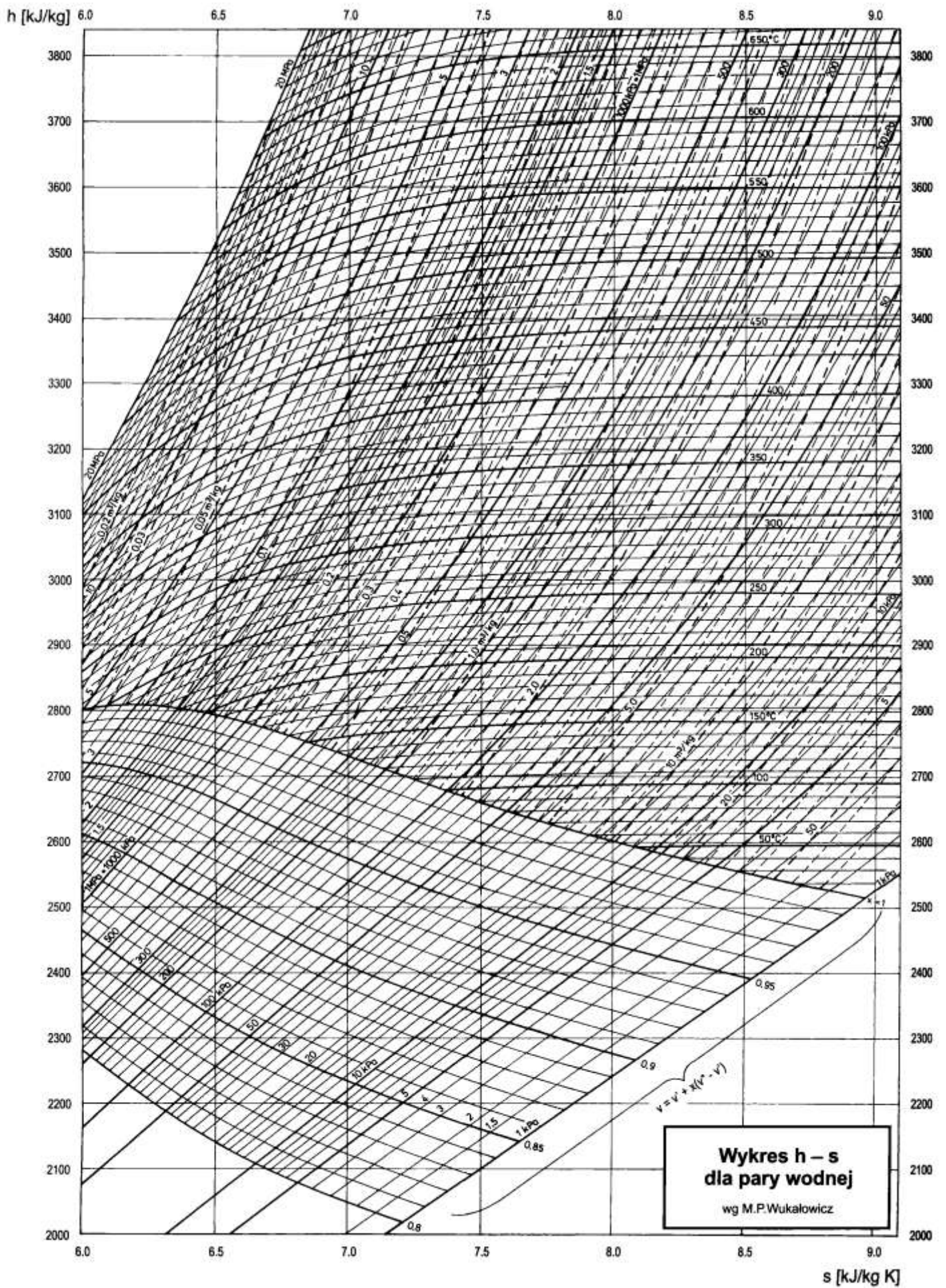
Tablica 7. Para nasycona amoniaku NH_3

t	P_s	$v' \cdot 10^3$	v''	h'	h''	$r = h'' - h'$	s'	s''
°C	kPa	m^3/kg	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg		$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
-50	40,9	1,424	2,623	275,2	1689,5	1414,3	1,1132	7,4336
-45	54,4	1,437	2,007	296,5	1697,8	1401,3	1,1905	7,3334
-40	71,8	1,449	1,550	319,1	1706,2	1387,1	1,2862	7,2377
-35	93,2	1,462	1,215	341,2	1714,3	1373,1	1,3804	7,1473
-30	119,5	1,476	0,963	363,6	1722,2	1358,6	1,4742	7,0618
-25	125,4	1,489	0,771	386,0	1729,8	1343,8	1,5646	6,9806
-20	190,2	1,504	0,624	408,6	1737,0	1328,4	1,6546	6,9027
-18	207,6	1,510	0,574	417,6	1739,8	1322,2	1,6898	6,8726
-16	226,4	1,515	0,529	426,7	1742,6	1315,9	1,7249	6,8429
-14	246,5	1,521	0,489	435,9	1745,3	1309,4	1,7601	6,8140
-12	267,9	1,528	0,452	444,9	1747,9	1303,0	1,6342	6,7855
-10	290,9	1,534	0,418	451,1	1750,5	1299,4	1,8296	6,7570
-8	315,4	1,540	0,388	463,2	1753,0	1289,8	1,8639	6,7294
-6	341,4	1,546	0,360	472,4	1755,4	1283,0	1,8983	6,7022
-4	368,8	1,553	0,334	481,5	1757,8	1276,3	1,9326	6,6754
-2	398,2	1,559	0,311	490,7	1760,1	1269,4	1,9665	6,6486
0	429,4	1,566	0,290	500,0	1762,4	1262,4	2,0000	6,6226
2	462,5	1,573	0,270	509,3	1764,6	1255,3	2,0335	6,5967
4	497,5	1,580	0,252	518,5	1766,7	1248,2	2,0670	6,5716
6	534,5	1,587	0,235	527,8	1768,8	1241,0	2,1005	6,5464
8	573,6	1,594	0,220	537,1	1770,7	1233,6	2,1372	6,5213
10	615,0	1,601	0,206	546,5	1772,6	1226,1	2,1662	6,4970
12	658,5	1,608	0,193	555,9	1774,5	1218,6	2,1989	6,4728
14	704,4	1,616	0,181	565,3	1776,1	1210,8	2,2315	6,4489
16	752,9	1,623	0,169	574,7	1777,8	1203,1	2,2642	6,4254
18	803,8	1,631	0,159	584,2	1779,4	1195,2	2,2968	6,4020
20	857,2	1,639	0,149	593,7	1780,9	1187,2	2,3287	6,3790
25	1002,7	1,659	0,128	617,6	1784,3	1166,7	2,4086	6,3225
30	1166,5	1,680	0,111	641,7	1787,2	1145,5	2,4878	6,2668
35	1349,9	1,702	0,096	666,0	1789,4	1123,4	2,5661	6,2123
40	1554,4	1,726	0,083	690,6	1891,1	1100,5	2,6439	6,1587
45	1781,4	1,750	0,726	715,3	1792,1	1076,8	2,7210	6,1060
50	2032,6	1,778	0,0635	740,2	1792,5	1052,3	2,7976	6,0541

Tablica 8. Para nasycona H_2O w równowadze z lodem lub wodą
wg F. Bošnjakovića

t	P_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
°C	Pa	dm ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg		kJ/kg	kJ/kg·K	
-60	1,080	1,081	91080	-447	2389	2836	-1,6844	11,6208
-50	3,935	1,083	26170	-430	2407	2837	-1,6045	11,1089
-40	12,83	1,084	8386	-412	2426	2838	-1,5279	10,6445
-30	37,98	1,086	2955	-393	2445	2838	-1,5960	10,2216
-20	103,2	1,088	1132	-374	2464	2838	-1,3755	9,8352
-10	259,6	1,089	467,8	-354	2482	2836	-1,2958	9,4813
+0,01	611,2	1,091	206,2	-333,4	2501	2834	-1,2205	9,1558
+0,01	611,2	1,0002	206,2	0,001	2501	2501	0,0000	9,1558
10	1227,1	1,0004	106,4	42	2519	2477	0,1575	8,9055
20	2337	1,0018	57,84	84	2537	2453	0,2963	8,6640
30	4241	1,0044	32,93	126	2556	2430	0,4366	8,4524
40	7375	1,0079	19,55	168	2574	2406	0,5722	8,2554
50	12335	1,0121	12,04	210	2593	2383	0,7037	8,0780

W punkcie potrójnym (stanie odniesienia) jest dla wody: $s'_0 = 0$ i $f_0 = 0$. Wobec tego, że: $f_0 = u' - T_0 \cdot s'_0 = 0$ jest również $u' = 0$, a entalpia jest równa: $h'_0 = u'_0 + P_0 \cdot v_0 = P_0 \cdot v_0 = 6,11 \cdot 10^{-4} \cong 0,001$ kJ/kg



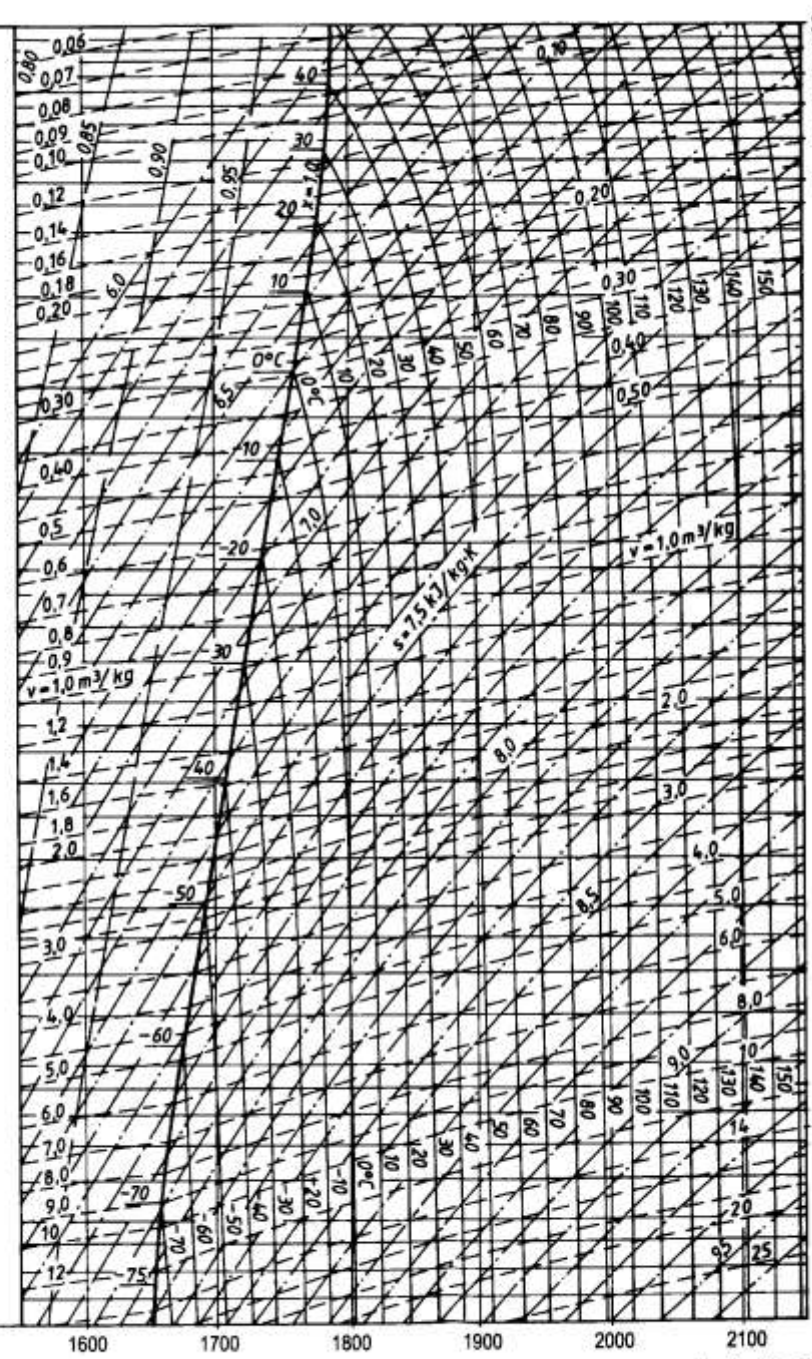
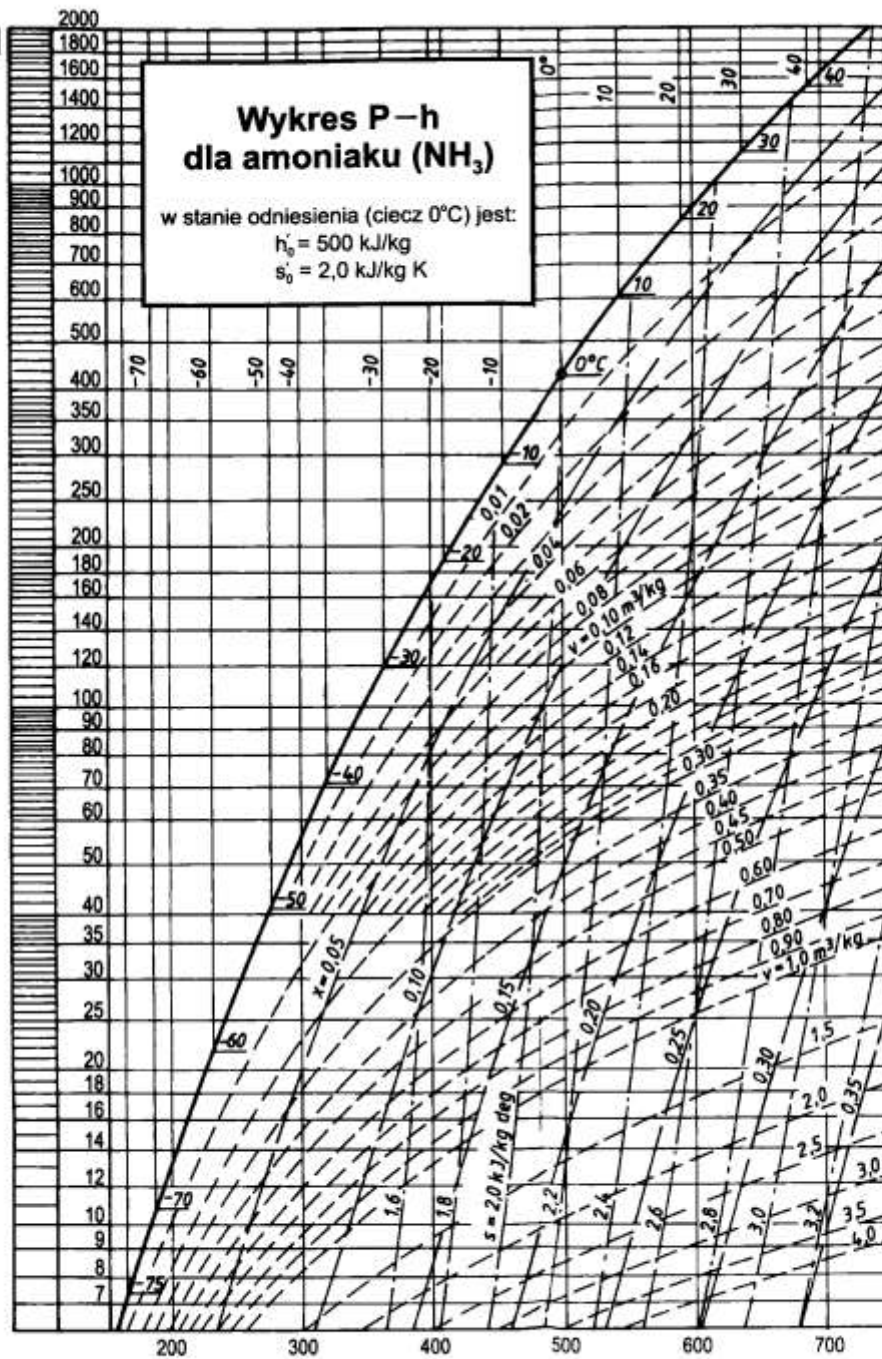
P[kPa]

Wykres P-h dla amoniaku (NH₃)

w stanie odniesienia (ciecz 0°C) jest:

$$h'_0 = 500 \text{ kJ/kg}$$

$$s'_0 = 2,0 \text{ kJ/kg K}$$



h [kJ/kg]

