

8.1. PODSTAWY TEORETYCZNE

8.1.1. Wiadomości ogólne

W procesie tworzenia się pary występują przy tym samym ciśnieniu dwa charakterystyczne stany, tj. stan wrzenia i stan pary suchej nasyconej. Parametry stanu wrzenia i pary suchej nasyconej wyznaczają na wykresie $p-v$, $i-s$, $T-s$ linie: dolną graniczną (wrzenia) i górną graniczną (nasylenia). Punkt wspólny dla dolnej i górnej granicznej określa stan krytyczny K charakteryzujący się tym, że parametry wrzenia i nasylenia są sobie równe, a temperatura punktu krytycznego jest najwyższą temperaturą wrzenia cieczy i pary nasyconej suchej. Temperatura wrzenia cieczy jest jednoznaczna z temperaturą nasylenia pary przy danym ciśnieniu.

W zależności od parametrów stanu, parę dzieli się na:

a) parę nasyconą suchą - której parametry wyznaczają górną krzywą graniczną. Do wyznaczenia parametrów pary z tablic parowych czy wykresów wystarczy znać tylko ciśnienie nasylenia p_s lub temperaturę nasylenia t_s ;

b) parę nasyconą wilgotną - stanowiącą mieszaninę wody wrzącej i pary suchej nasyconej. Stan pary określają ciśnienie nasylenia p_s lub temperaturę nasylenia t_s i stopień suchości pary x wyrażający się wzorem:

$$x = \frac{m_s}{m} \quad (8.1a)$$

gdzie: m_s - masa pary suchej nasyconej zawartej w parze wilgotnej

m - masa pary wilgotnej.

Stopień suchości pary x przyjmuje wartość:

$$x = 0 \quad \text{dla wody wrzającej,}$$

$$0 < x < 1 \quad \text{dla pary nasyconej wilgotnej,}$$

$$x = 1 \quad \text{dla pary nasyconej suchej;}$$

c) parę przegrzaną - charakteryzującą się tym, że przy danym ciśnieniu p temperatura pary t_p jest większa od temperatury nasycenia t_s odpowiadającej ciśnieniu p . Stan pary określa się zazwyczaj przez ciśnienie p oraz temperaturę pary t_p .

8.1.2. Określenie parametrów pary

Para nasycona sucha

Parametry pary nasyconej i wody w stanie wrzenia podane są w tablicach 9 i 10 w zależności od ciśnienia nasycenia (p_s) lub temperatury nasycenia (t_s).

Para nasycona wilgotna

Parametry pary nasyconej wilgotnej określa się na podstawie parametrów pary nasyconej i wody w stanie wrzenia podane w tablicach 9 i 10 korzystając z poniższych równań:

objętość właściwa

$$v_x = v' + x(v'' - v'); \quad (8.1)$$

entalpia

$$i_x = i' + x(i'' - i'), \quad (8.2)$$

gdzie

$$i'' - i' = r, \quad (8.3)$$

gdzie: r - ciepło parowania, określające niezbędną ilość ciepła do zamiany przy stałym ciśnieniu 1 kg wody wrzącej na parę suchą nasyconą

$$r = \varphi + \psi, \quad (8.4)$$

φ - wewnętrzne ciepło parowania, konieczne na zmianę energii wewnętrznej związanej z równoważeniem sił międzydrobinowych w cieczy kJ/kg,

ψ - zewnętrzne ciepło parowania, konieczne na wykonanie pracy rozprężania pary kJ/kg

$$\psi = 0,001 \cdot p(v'' - v'); \quad (8.5)$$

entropia

$$s_x = s' + x(s'' - s'), \quad (8.6)$$

$$s_x = s' + x \frac{r}{T}, \quad (8.6a)$$

$$s' = c_p \ln \frac{T_s}{273}, \quad (8.7)$$

gdzie: v' , i' , s' - objętość właściwa, entalpia właściwa, entropia właściwa wody wrzącej,
 v'' , i'' , s'' - ditto dla pary nasyconej suchej.

Para przegrzana

Wartość entalpii i_p oraz entropia s_p pary przegrzanej określa się wg wzorów:

$$i_p = i'' + c_p \left|_{t_s}^{t_p} (t_p - t_s), \quad (8.8)$$

$$s_p = s'' + c_p \left|_{t_s}^{t_p} \ln \frac{T_p}{T_s}. \quad (8.9)$$

Parametry pary przegrzanej podane są w tablicy 12.

W tablicach nie podaje się wartości energii wewnętrznej właściwej, którą dla każdego stanu pary można określić z równania:

$$u = i - 0,001 \cdot p \cdot v, \quad (8.10)$$

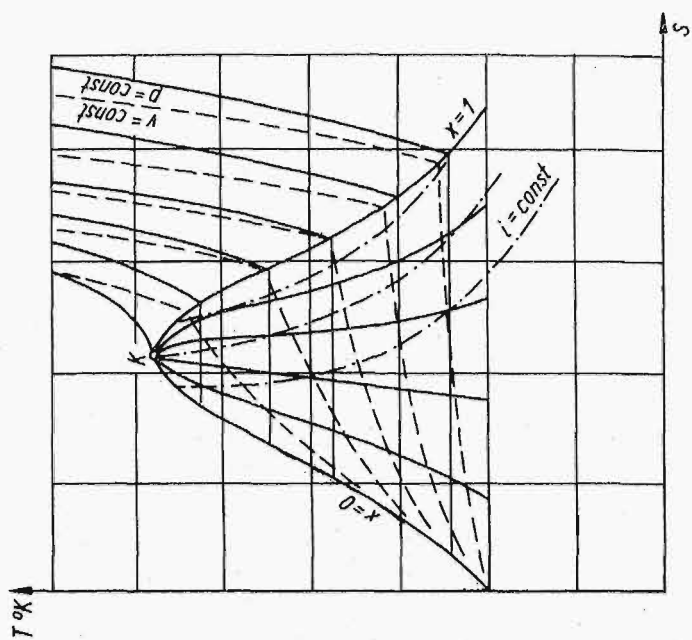
gdzie: u - energia wewnętrzna właściwa [kJ/kg],
 i - entalpia właściwa [kJ/kg],
 p - ciśnienie [N/m²],
 v - objętość właściwa [m³/kg].

Wykresy dla pary wodnej

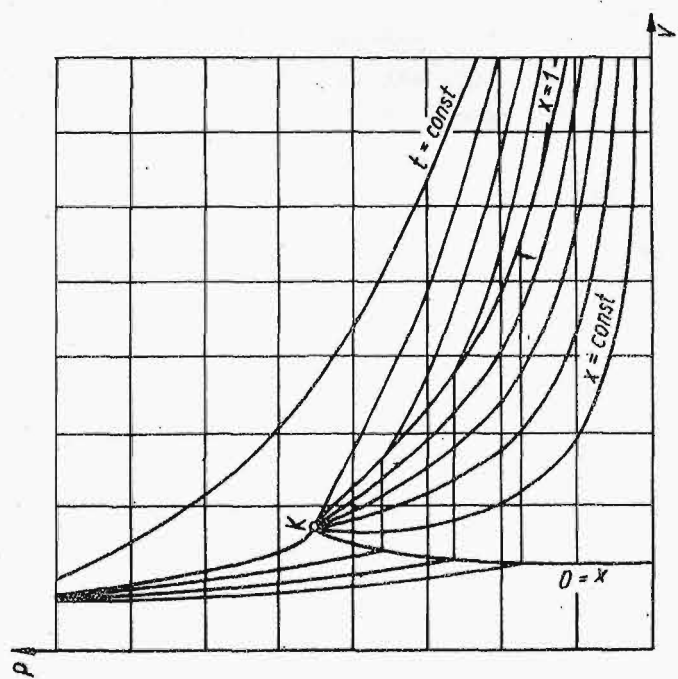
Posługiwanie się tablicami przy rozwiązywaniu zadań z zakresu pary wodnej stwarza często duże trudności, dlatego dla wygody korzysta się z wykresów.

Podstawowe wykresy zostały sporządzone w układzie $p-v$, $T-s$ oraz $i-s$ (rys.8.1, 8.2, 8.3).

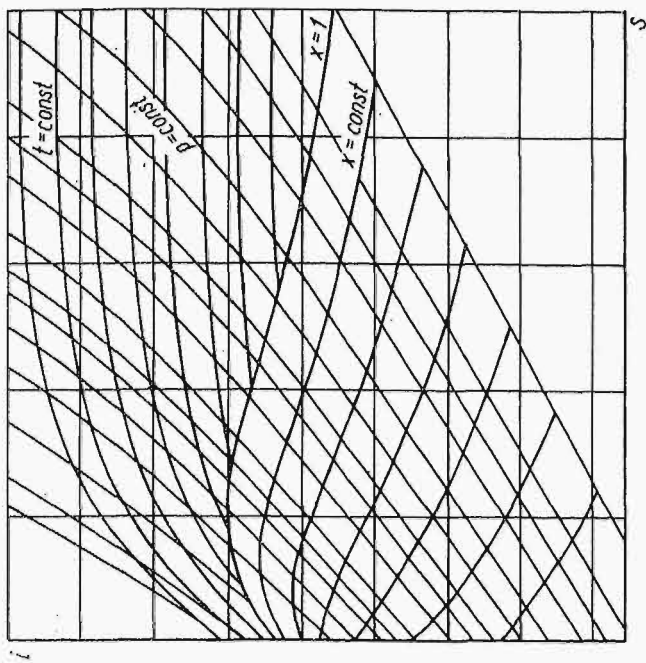
Ze względu na przejrzystość najczęściej w obliczeniach korzysta się z wykresu, $i-s$, którego obszar podano na rys.8.4.



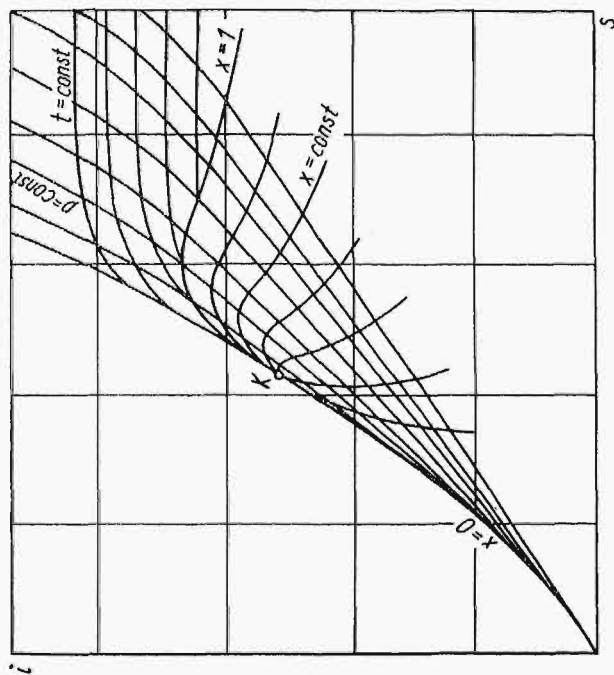
Rys.8.2



Rys.8.1



Rys. 8.4



Rys. 8.3

Znając dwa dowolne parametry pary (za wyjątkiem pary nasyconej suchej) można za pomocą wykresu określić pozostałe parametry stanu pary.

8.1.3. Przemiany charakterystyczne pary nasyconej i przegrzanej

Brak prostego w budowie równania stanu dla pary pociąga za sobą konieczność posługiwania się przy rozwiązywaniu zadań ogólnymi zależnościami termodynamiki, nie związanymi z równaniem stanu, a mianowicie:

- pierwszą zasadą termodynamiki w obu jej postaciach:

$$q = u_2 - u_1 + l, \quad \text{gdzie} \quad l = \int_{v_1}^{v_2} p \, dv \quad (8.11)$$

lub

$$q = i_2 - i_1 + l_t, \quad \text{gdzie} \quad l_t = - \int_{p_1}^{p_2} v \, dp. \quad (8.11a)$$

- drugą zasadą termodynamiki

$$ds = \frac{dq}{T}. \quad (8.12)$$

- matematycznym określeniem pojęcia entalpii (równanie Gibbsa)

$$i = u + p v. \quad (8.13)$$

Rozwiązywania zadań związanych ze zmianą stanu pary wodnej dokonuje się sposobem analitycznym lub graficznym. Zazwyczaj przy rozwiązywaniu zadań stosuje się obydwa te sposoby jednocześnie. Część szukanych parametrów odczytuje się z wykresu a pozostałe na drodze analitycznej przy pomocy tablic dla pary wodnej.

W każdym przypadku należy ustalić stan pary przed i po przemianie, co łatwo uczynić przy pomocy wykresu lub tablic.

Przy analitycznym rozwiązywaniu zadań stosuje się następujące zależności:

Przemiana izochoryczna ($v = \text{const}$, tj. $dv = 0$)

Określenie stopnia suchości x

Przypadek I - stany brzegowe przemiany są parą nasyconą wilgotną

$$v_1'' x_1 + (1 - x_1) v_1' = v_2'' x_2 + (1 - x_2) v_2' \quad (8.14)$$

pomijając drugie człony po obu stronach równania (nie popełnia się większego błędu) otrzymuje się:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{v_1''}{v_2''} \quad (8.14a)$$

Przypadek II - jednym ze stanów brzegowych przemiany jest para nasycona a drugim para przegrzana

$$v_1'' x_1 + (1 - x) v_1' = v_2 \quad (8.14b)$$

pomijając drugi człon po lewej stronie równania otrzymuje się

$$x_1 = \frac{v_2}{v_1''}; \quad (8.14c)$$

Praca bezwzględna przemiany $l = 0$;

Ciepło przemiany

$$q = u_2 - u_1, \quad (8.15)$$

$$q = i_2 - i_1 + v(p_2 - p_1); \quad (8.15a)$$

Przemiana izobaryczna ($p = \text{const}$, tj. $dp = 0$)

Określenie stopnia suchości x

$$v_1 = v'' x_1 + (1 - x_1) v',$$

$$v_2 = v'' x_2 + (1 - x_2) v'$$

pomijając drugie człony po prawej stronie równania i po podzieleniu stronami

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{v_1}{v_2}; \quad (8.16)$$

Przyrost energii wewnętrznej właściwej

$$\Delta u = q - l, \quad (8.17)$$

$$\Delta U = m \Delta u; \quad (8.17a)$$

Praca bezwzględna właściwa przemiany

$$l = p(v_2 - v_1), \quad (8.18)$$

$$L = m l; \quad (8.18a)$$

Ciepło przemiany (właściwe)

$$q = i_2 - i_1, \quad (8.19)$$

jeśli przemiana zachodzi w obszarze pary nasyconej, słuszny jest wzór:

$$q = T(s_2 - s_1), \quad (8.19a)$$

$$q = r(x_2 - x_1), \quad (8.19b)$$

$$Q = m q. \quad (8.19c)$$

Przemiana izotermiczna ($t = \text{const}$, czyli $dt = 0$)

Dla obszaru pary nasyconej słuszne są zależności wyprowadzone dla przemiany izobarycznej.

W obszarze pary przegrzanej dla obliczenia q , l , Δu stosuje się wzory:

Ciepło przemiany (8.19a);

Praca właściwa przemiany

$$l = T(s_2 - s_1) - \Delta u; \quad (8.20)$$

Przyrost energii wewnętrznej

$$\Delta u = i_2 - i_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1). \quad (8.21)$$

Przemiana adiabatyczna (izentropowa) ($dq = 0$, $s = \text{const}$, $ds = 0$)

Określenie stopnia suchości

Przypadek I

$$s'_1 + x_1 \frac{r_1}{T_1} = s'_2 + x_2 \frac{r_2}{T_2}. \quad (8.22)$$

Przypadek II

skąd

$$s_1 = s'_2 + x_2 \frac{r_2}{T_2},$$
$$x_2 = \frac{(s_1 - s'_2)T_2}{r_2} \quad (8.23)$$
$$x_2 = \frac{s_1 - s'_2}{s''_2 - s'_2} \quad (8.23a)$$

Praca bezwzględna właściwa przemiany

$$l = -\Delta u.$$

Z wystarczającą dokładnością można dla przemiany stosować równanie adiabaty

$$p v^k = \text{const},$$

$k = 1,3$ - dla pary wodnej przegrzanej,

$k = 1,135$ - dla pary wodnej suchej nasyconej,

$k = 1,035 + 0,1 x$ - dla pary wodnej nasyconej wilgotnej.

Przemiana izoentalpowego dławienia

Przy dławieniu zakłada się, że wartość entalpii przed i po dławieniu pozostaje taka sama

$$i_1 = i_2.$$

Na wykresie i - s przemianę tę umownie ilustruje się odcięciem prostej równoległej do osi s łączącym stan pary przed i po dławieniem, które są rzeczywistymi stanami pary.

8.2. ZADANIA

8.2.1. Dla pary wodnej suchej nasyconej przy ciśnieniu manometrycznym $p_n = 0,5 \text{ MN/m}^2$ określić na podstawie tablic pozostałe jej parametry:

- temperaturę nasycenia t_s ,
- objętość właściwą v'' ,
- entalpię właściwą i'' ,
- entropię właściwą s'' ,

jeżeli ciśnienie barometryczne wynosiło $b = 0,1 \text{ MN/m}^2$.

Rozwiązanie

Ze względu na to, że podane w tablicy wartości odnoszą się do ciśnienia absolutnego oblicza się wielkość tego ciśnienia:

$$p = p_n + b,$$

$$p = 0,5 + 0,1 \text{ MN/m}^2,$$

$$p = 0,6 \text{ MN/m}^2.$$

Ponieważ tabl.9 dla pary nasyconej ułożona jest w zależności od ciśnienia wyrażonego w b a r a c h, ciśnienie należy wyrazić również w barach

$$p = 10 \cdot 0,6,$$

$$p = 6 \text{ bar}.$$

Dla tego ciśnienia odczytuje się z tabl.9 $t = 158,84^\circ\text{C}$
 $v'' = 0,3156 \text{ m}^3/\text{kg}$ $i'' = 2757 \text{ kJ/kg}$, $s'' = 6,761 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{deg})$.

8.2.2. Dla pary wodnej suchej nasyconej o temperaturze $t_s = 200^\circ\text{C}$ określić w oparciu o tablice pozostałe jej parametry

Rozwiązanie

$$p = 1,5551 \text{ MN/m}^2; \quad v'' = 0,1272 \text{ m}^3/\text{kg};$$

$$i'' = 2793 \text{ kJ/kg}; \quad s'' = 6,4318 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{deg}).$$

8.2.3. Obliczyć właściwą energię wewnętrzną pary wodnej suchej nasyconej o temperaturze $t_s = 180^\circ\text{C}$.

Rozwiązanie

Energię wewnętrzną oblicza się z równania (8.10).

Z tablicy 10 odczytuje się dla $t_s = 180^\circ\text{C}$
 $p = 1,0027 \text{ MN/m}^2; \quad v'' = 0,1939 \text{ m}^3/\text{kg}; \quad i'' = 2778 \text{ kJ/kg},$

$$u'' = 2778 - 0,001 \cdot 1,0027 \cdot 10^6 \cdot 0,1939,$$

$$u'' = 2778 - 194,$$

$$u'' = 2584 \text{ kJ/kg}.$$

8.2.4. W zbiorniku o pojemności $V = 3000$ l znajduje się $m = 2500$ kg wody o temperaturze $t = 120^{\circ}\text{C}$, przy ciśnieniu $p_n = 0,9 \text{ MN/m}^2$. Określić:

- czy woda jest w stanie wrzenia?
- jaką objętość V_1 zajmuje woda w zbiorniku?
- o ile wzrośnie objętość wody po jej podgrzaniu do stanu wrzenia (gdyby okazało się, że na początku woda nie była w stanie wrzenia)?

Rozwiązanie

Dla ustalenia czy woda była w stanie wrzenia należy z tabl. 9 określić temperaturę nasycenia (t_s) odpowiadającą ciśnieniu absolutnemu panującemu w zbiorniku.

Ciśnienie absolutne w zbiorniku wynosi:

$$p = 0,9 + 0,1 \quad (\text{przyjęto ciśnienie barometryczne równe } 0,1 \text{ MN/m}^2)$$

$$p = 1,0 \text{ MN/m}^2$$

ciśnieniu $p = 1 \text{ MN/m}^2 = 10 \text{ bar}$ odpowiada $t_s = 179,88^{\circ}\text{C}$.

Ponieważ $t_s = 179,88^{\circ}\text{C}$ jest większe od $t = 120^{\circ}\text{C}$, więc woda nie była w stanie wrzenia.

Znając masę wody m , objętość jej oblicza się ze wzoru:

$$V = m v \quad (\text{m}^3).$$

Objętość właściwą wody odczytujemy z tabl. 10 dla $t = 120^{\circ}\text{C}$ (przy założeniu, że woda jest nieściśliwa)

$$v' = 0,0010603 \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$V_1 = 2500 \cdot 0,0010603 \cdot 1000,$$

$$V_1 = 2650,75 \text{ l}.$$

Przyrost objętości ΔV oblicza się ze wzoru:

$$\Delta V = m(v_2 - v_1)$$

v_2, v_1 - objętość właściwa wody po i przed podgrzaniem.

Z tabl. 9 dla ciśnienia $p = 1 \text{ MN/m}^2$ odczytuje się objętość właściwą wody w stanie wrzenia:

$$v' = 0,0011273 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\Delta V = 2500(0,0011273 - 0,0010603) \cdot 1000,$$

$$\Delta V = 167,5 \text{ l}.$$

8.2.5. Pojemność wodna instalacji centralnego ogrzewania wynosi $V_0 = 5000$ l. Obliczyć niezbędną objętość naczynia zbiorczego, które przejmie przyrost objętości wody, jeśli średnia temperatura wody w instalacji w okresie sezonu ogrzewczego waha się w granicach od $t_{\min} = 30^\circ\text{C}$ do $t_{\max} = 80^\circ\text{C}$.

Odp. $\Delta V = 122,4$ l.

8.2.6. W masie pary wilgotnej $m = 200$ kg znajduje się $m_s = 190$ kg pary suchej nasyconej. Określić:

- stopień suchości pary x ,
- wilgotność pary $(1-x)$.

Rozwiązanie

Stopień suchości pary określa wg wzoru (8.1a)

$$x = \frac{190}{200},$$

$$x = 0,95.$$

Stopień wilgotności pary oznacza się przez $(1-x)$ a zatem:

$$(1-x) = 1 - 0,95,$$

$$(1-x) = 0,05.$$

8.2.7. Obliczyć wartość entropii pary suchej nasyconej przy ciśnieniu $p = 1,6$ MN/m², na podstawie jej temperatury nasycenia t_s i ciepła parowania r .

Rozwiązanie

Obliczenia dokonuje się w oparciu o wzory (8.6a) i (8.7). Z tabl. 9 odczytuje się dla $p = 1,6$ MN/m² wartość $t_s = 201,36^\circ\text{C}$ oraz $r = 1935$ kJ/kg a z tabl. 11 wartość ciepła właściwego wody $c_p = 4,498$ kJ/(kg·deg)

$$s' = 4,498 \ln \frac{273 + 201,36}{273}$$

$$s' = 2,47 \text{ kJ/(kg·deg)};$$

$$s'' = 2,47 + \frac{1935}{273 + 201,36},$$

$$s'' = 6,545 \text{ kJ/(kg·deg)}.$$

8.2.8. Dla pary wodnej nasyconej przy ciśnieniu $p = 0,8 \text{ MN/m}^2$ wyznaczono na drodze pomiarów wartość entalpii $i = 2650 \text{ kJ/kg}$. Określić:

- rodzaj pary nasyconej (sucha czy wilgotna)?
- stopień suchości pary x ?

Rozwiązanie

Z tablicy 9 odczytuje się dla ciśnienia $p = 0,8 \text{ MN/m}^2$ wartość entalpii $i'' = 2769 \text{ kJ/kg}$. Wobec tego, że wartość entalpii pary $i = 2650 \text{ kJ/m}^2$ jest mniejsza od $i'' = 2769 \text{ kJ/kg}$ wynika, że para jest parą wilgotną.

Korzystając ze wzoru (8.2) po jego przekształceniu określa się stopień suchości pary x

$$x = \frac{i_x - i'}{i'' - i'}$$

Podstawiając odpowiednie wartości entalpii $i_x = 2650 \text{ kJ/kg}$, i' oraz i'' odczytane z tablic otrzymuje się

$$x = \frac{2650 - 720,9}{2769 - 720,9},$$

$$x = 0,94.$$

8.2.9. Objętość właściwa pary nasyconej przy ciśnieniu $p = 0,6 \text{ MN/m}^2$ wynosi $v = 0,3 \text{ m}^3/\text{kg}$. Obliczyć dla tej pary:

- entalpię i ,
- energię wewnętrzną u ,
- entropię s .

Odp. $i = 2652,5 \text{ kJ/kg}$; $u = 2473,0 \text{ kJ/kg}$;

$s = 6,521 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{deg)}$.

8.2.10. Walczak kotła o pojemności $V = 3 \text{ m}^3$ wypełnia para wodna przy ciśnieniu $p = 1,5 \text{ MN/m}^2$ i stopniu suchości $x = 0,4$. Obliczyć:

- masę pary mokrej m ,
- objętość zajmowaną przez wodę V_w oraz
- objętość zajmowaną przez parę suchą nasyconą V_n .

Odp. $m = 56,25 \text{ kg}$; $V_w = 0,04 \text{ m}^3$; $V_p = 2,96 \text{ m}^3$.

8.2.11. Posługując się tablicami dla pary wodnej wyznaczyć wartość ciepła właściwego pary przegrzanej o parametrach $p = 2 \text{ bar}$ i $t_p = 150^\circ\text{C}$.

Rozwiązanie

Obliczenia dokonuje się z przekształconego wzoru (8.8)

$$c_p \Big|_{t_s}^{t_p} = \frac{i_p - i''}{t_p - t_s}.$$

Z tablic 9 i 12 odczytuje się przy $p = 2 \text{ bar}$ wartości i_{pp} , i'' , t_s

$$c_p \Big|_{t_s}^{t_p} = \frac{2769 - 2707}{150 - 120,23},$$

$$c_p = 2,12 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{deg}).$$

8.2.12. Obliczyć ilość ciepła Q uzyskaną ze skroplenia $\dot{m} = 100 \text{ kg/h}$ pary o parametrach $p = 150 \text{ kN/m}^2$ i $x = 0,97$, jeśli temperatura skroplin była równa temperaturze nasycenia przy ciśnieniu p .

Odp. $Q = 262,72 \text{ MJ/h}$.

8.2.13. W kotle parowym wytwarzającym w ciągu godziny $\dot{m} = 2000 \text{ kg/h}$ pary przy ciśnieniu $p_n = 0,8 \text{ MN/m}^2$ wbudowano przegrzewacz pary. Obliczyć ilość ciepła przejętego przez parę w przegrzewaczu, jeśli wilgotność pary przed przegrzewaczem była równa $(1-x) = 0,05$ a temperatura pary za przegrzewaczem $t_p = 200^\circ\text{C}$.

Odp. $Q_p = 0,3204 \text{ GJ/h}$.

8.2.14. Całkowite straty ciepłne budynku wynoszą $Q = 2,2 \text{ GJ/h}$. Instalacja centralnego ogrzewania zasilana jest parą wodną nasyconą wilgotną o $p_n = 1,5 \text{ bara}$ i $x = 0,98$. Obliczyć:

- godzinowe zapotrzebowanie pary \dot{m} dla ogrzewania budynku,

- średnicę d przewodu parowego doprowadzającego parę do budynku, zakładając prędkość pary w przewodzie $w = 40 \text{ m/s}$,

- godzinowe zapotrzebowanie paliwa B dla kotła wytwarzającego parę, jeśli wartość opałowa spalanego paliwa

$Q_u = 21\,700 \text{ kJ/kg}$ a sprawność kotła $\eta_k = 0,7$.

Wskazówka: zadanie rozwiązać przy założeniu, że w odbiornikach ciepła zachodziło całkowite skraplanie pary, skropliny opuszczające odbiorniki miały temperaturę równą temperaturze nasycenia t_s przy $p_n = 0,15 \text{ MN/m}^2$ oraz doprowadzenie pary z kotłowni do budynku odbywało się bez strat ciepła do otoczenia.

Rozwiązanie

Obliczenia dokonuje się ze wzoru:

$$Q = \dot{m}(i_1 - i_2),$$

$$\dot{m} = \frac{Q}{i_1 - i_2}.$$

Wartość i_1 oblicza się ze wzoru (8.2) natomiast za wartość i_2 podstawia się wartość i' odpowiadającą temperaturze t_s

$$\dot{m} = \frac{Q}{i' + x r - i'},$$

$$\dot{m} = \frac{Q}{x r}.$$

Przyjmując przeciętne ciśnienie barometryczne $b = 10^5 \text{ N/m}^2$ określa się ciśnienie absolutne $p = 0,15 + 0,1 \text{ MN/m}^2$ na podstawie którego z tablicy 9 określa się wartość ciepła parowania $r = 2182 \text{ kJ/kg}$

$$\dot{m} = \frac{2,2 \cdot 10^6}{0,98 \cdot 2182},$$

$$\dot{m} = 1030 \text{ kg/h}.$$

Przekrój przewodu oblicza się wg wzoru:

$$F = \frac{V}{w},$$

$$F = \frac{\dot{m} v}{3600 \cdot w}.$$

Objętość właściwą v dla pary nasyconej wilgotnej oblicza się wg wzoru (8.1).

Z tablicy 9 dla ciśnienia $p = 0,25 \text{ MN/m}^2$ określa się wartość $v'' = 0,7185 \text{ m}^3/\text{kg}$ i $v' = 0,0010672 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$v = 0,0010672 + 0,98(0,7185 - 0,0010672),$$

$$v = 0,7174 \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$F = \frac{1030 \cdot 0,7174}{3600 \cdot 40},$$

$$F = 0,00513 \text{ m}^2,$$

$$d = 81 \text{ mm}.$$

Ilość paliwa oblicza się opierając się na definicji sprawności

$$\eta_k' = \frac{Q}{Q_{\text{paliwa}}},$$

$$Q_{\text{paliwa}} = B Q_u,$$

$$\eta_k = \frac{Q}{B Q_u},$$

$$B = \frac{Q}{\eta_k Q_u},$$

$$B = \frac{2,2 \cdot 10^6}{0,7 \cdot 21 \cdot 700},$$

$$B = 145 \text{ kg/h}.$$

8.2.15. Obliczyć zapotrzebowanie pary przy $p_n = 0,5 \text{ bar}$ i $x = 1$ dla podgrzania w ciągu godziny $V_1 = 7 \text{ m}^3$ wody o temperaturze $t_1 = 15^\circ\text{C}$ do $t_2 = 90^\circ\text{C}$.

Zadanie rozwiązać dla przypadku podgrzewania:

- pośredniego (wymiennik przeponowy) \dot{m}_1
- bezpośredniego (przez zmieszanie pary z wodą) \dot{m}_2 .

Rozwiązanie

Podgrzewanie pośrednie

Ilość pary określa się z bilansu cieplnego

$$\dot{m}_1(i_1 - i_2) = \dot{m}_w c_p(t_2 - t_1)$$

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m}_w c_p(t_2 - t_1)}{i_1 - i_2}$$

podstawiając za $\dot{m}_w = V_1 \frac{1}{v_1}$

$$\dot{m}_1 = \frac{V_1 c_p(t_2 - t_1)}{v_1(i_1 - i_2)}.$$

Po podstawieniu z tabl. 9 przy $p = 0,15 \text{ MN/m}^2$ wartości $i_1 = i_1''$, $i_2 = i_1'$, z tabl.10 $v_1 = v_1'$ przy $t_1 = 15^\circ\text{C}$ a z tabl.11 $c_p = 4,19 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)}$

$$\dot{m}_1 = \frac{7 \cdot 4,19(90 - 15)}{0,001001 \cdot (2693 - 467,2)},$$

$$\dot{m}_1 = 990 \text{ kg/godz.}$$

Podgrzewanie bezpośrednie

Obliczenia dokonuje się opierając się na bilansie masy i ciepła mieszających się ze sobą czynników.

Bilans masy

$$\dot{m} = \dot{m}_w + \dot{m}_2 \quad (\text{a}).$$

Bilans ciepła

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot t_2 = \dot{m}_w c_p t_1 + \dot{m}_2 i_1 \quad (\text{b}).$$

Rozwiązując układ równań (a) i (b) wyznacza się \dot{m}_2

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_w \frac{c_p(t_2 - t_1)}{i_1 - c_p t_2},$$

$$\dot{m}_2 = \frac{v_1}{v_1} \cdot \frac{c_p(t_2 - t_1)}{(i_1 - c_p t_2)},$$

$$\dot{m}_2 = \frac{7}{0,001001} \cdot \frac{4,19(90 - 15)}{(2693 - 4,19 \cdot 90)},$$

$$\dot{m}_2 = 950 \text{ kg/h.}$$

8.2.16. Określić jakie parametry powinna mieć para u dostawcy, jeśli odbiorca żąda pary w ilości $\dot{m} = 10^4 \text{ kg/h}$ przy $p_n = 0,8 \text{ MN/m}^2$ i stopniu wilgotności $(1-x) \leq 0,01$. Zadanie rozwiązać przy założeniu, że długość przewodu parowego $l = 1500 \text{ m}$, jednostkowa strata ciepła przewodu do otoczenia $q_s = 800 \text{ kJ/m} \cdot \text{h}$, strata ciśnienia przy przepływie pary $\Delta p = 150 \text{ kN/m}^2$.

Odp. $p_1 = 1,05 \text{ MN/m}^2$; $t_p = 220^\circ\text{C}$ (para przegrzana).

8.2.17. Nawiązując do treści przykładu 8.2.16 określić stopień suchości pary x dopływającej do odbiorcy, jeśli pobór pary przez odbiorcę zmniejszy się o 30%, przy założeniu tych samych parametrów pary u dostawcy i tego samego ciśnienia u odbiorcy oraz jednostkowej straty ciepła przewodu do otoczenia.

Odp. $x = 0,964$.

8.2.18. Zasobnik ciepła z bezpośrednim systemem podgrzewania parą napełniono wodą o temperaturze $t_1 = 120^\circ\text{C}$ w ilości $V_1 = 12 \text{ m}^3$. Określić:

- masę wody m_w znajdującą się w zasobniku po jego napełnieniu oraz panujące w nim ciśnienie p_1 ;

- ciśnienie p_2 i objętość zajmowaną przez wodę V_2 , jeśli do zbiornika doprowadzi się

$m = 1100 \text{ kg}$ pary o $p = 1 \text{ MN/m}^2$ i $t_p = 280^\circ\text{C}$.

Wskazówka: w rozwiązaniu pominąć masę pary znajdującą się nad zwiędkiem wody.

Odp. $m_w = 13\,200 \text{ kg}$; $p_1 = 0,19854 \text{ MN/m}^2$;

$p_2 = 0,82 \text{ MN/m}^2$; $V_2 = 13,9 \text{ m}^3$.

8.2.19. Do określenia entalpii czynnika nośnego ciepło stosuje się często układ pomiarowy, podany na rys.8.5, polegający na bezpośrednim podgrzewaniu określonej ilości wody m_1 od temperatury t_1 do t_2 za pomocą czynnika nośnego ciepła w ilości m_k .

Układ powyższy zastosowano do sprawdzenia prawidłowości działania odwadniacza odbiornika ciepła zasilanego parą nasyconą przy ciśnieniu $p = 0,6 \text{ MN/m}^2$. Z pomiarów otrzymano następujące wyniki:

$$p_n = 0,5 \text{ MN/m}^2, \quad t_1 = 20^\circ\text{C},$$

$$t_2 = 70^\circ\text{C},$$

$$m_1 = 5 \text{ kg}, \quad m_2 = 7,5 \text{ kg}.$$

Określić:

- czy odwadniacz działał prawidłowo,
- jeśli pracował wadliwie to ile przepuszczał pary \dot{m}_u , przy wydajności odbiornika ciepła $Q = 2,5 \text{ GJ/h}$.

Rozwiązanie

Dla stwierdzenia prawidłowości pracy odwadniacza określa się entalpię i_s skroplin, którymi została podgrzana woda m_1 . Obliczenia dokonuje się z układu równań:

$$m_2 = m_k + m_1 \quad (a),$$

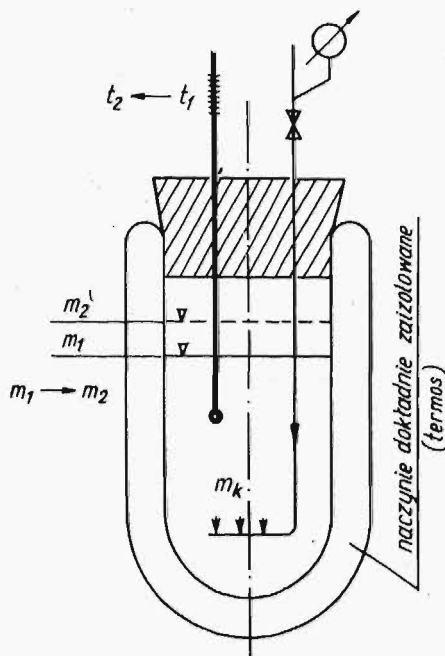
$$m_2 c t_2 = m_1 c t_1 + m_k i_s \quad (b),$$

$$i_s = \frac{m_2 c t_2 - m_1 c t_1}{m_2 - m_1},$$

$$i_s = \frac{7,5 \cdot 4,19 \cdot 70 - 5 \cdot 4,19 \cdot 20}{7,5 - 5},$$

$$i_s = 712,5 \text{ kJ/kg}.$$

Z tablicy 9 odczytuje się przy $p = 0,6 \text{ MN/m}^2$ wartość entalpii wody wrzącej $i' = 670,5 \text{ kJ/kg}$.



Rys.8.5

Ponieważ $i_s > i'$ świadczy to, że wraz ze skroplinami przedostaje się para a zatem odwadniacz pracuje wadliwie.

Dla obliczenia ilości pary uchodzącej ze skroplinami m_k należy określić jednostkową wartość uchodzącej pary w odniesieniu do całkowitej ilości pary doprowadzonej do odbiornika

$$\alpha = \frac{m_u}{m_k}, \quad (c)$$

$$m_k = m_2 - m_1,$$

m_u - ilość pary uchodzącej ze skroplinami podczas pomiarów.
Obliczenia m_u dokonuje się z równania:

$$m_1 c t_1 + (m_2 - m_1 - m_u) i' + m_u i = m_2 c t_2,$$

$$m_u = \frac{m_2 c t_2 - m_1 c t_1 - (m_2 - m_1) i'}{i - i'}.$$

Podstawiając wyznaczoną z równania (b) wartość

$$m_2 c t_2 - m_1 c t_1 = (m_2 - m_1) i_s$$

otrzymuje się

$$m_u = \frac{(m_2 - m_1) i_s - (m_2 - m_1) i'}{i - i'}$$

po podstawieniu do wzoru (c) otrzymuje się

$$\alpha = \frac{i_s - i'}{i - i'} \quad \text{kg/kg} \quad (d)$$

Ilość pary uchodzącej przez odwadniacz odbiornika o wydajności $Q = 2,5 \text{ GJ/h}$

$$\dot{m}_u = \alpha \dot{m},$$

$$\dot{m} = \frac{Q}{i - i_s},$$

i - entalpia pary zasilającej odbiornik

$$\dot{m}_u = \alpha \cdot \frac{Q}{i - i_s}. \quad (e)$$

Podstawiając do wzoru (d) i (e) wartości odczytane z tablicy 9 przy $p = 0,6 \text{ MN/m}^2$ oblicza się:

$$\alpha = \frac{712,5 - 670,5}{2757 - 670,5},$$

$$\alpha = 0,02015 \text{ kg/kg},$$

$$\dot{m}_u = 0,02015 \frac{2,5 \cdot 10^6}{2757 - 712,5},$$

$$\dot{m}_u = 24,65 \text{ kg/h}.$$

8.2.20. Opierając się na wynikach pomiaru pary przeprowadzonego wg układu pomiarowego omówionego w przykładzie 8.2.19

$$p_n = 0,15 \text{ MN/m}^2, \quad t_1 = 15^\circ\text{C}, \quad t_2 = 80^\circ\text{C},$$

$$m_1 = 8 \text{ kg}, \quad m_2 = 8,95 \text{ kg}.$$

Określić:

- rodzaj pary,
- podstawowe parametry pary.

Odp. para nasycona wilgotna, $p = 0,25 \text{ MN/m}^2$, $x = 0,962$.

8.2.21. Skropliny z instalacji grzejnej o wydajności $Q = 21 \text{ GJ/h}$ zasilanej parą suchą nasyconą o ciśnieniu $p_{n1} = 0,4 \text{ MN/m}^2$, spływają do otwartego zbiornika skroplin mając temperaturę t_g odpowiadającą ciśnieniu p_1 . Obliczyć ilość pary (tzw. wtórnej) \dot{m}_{pw} powstałej z rozprężenia skroplin jeśli ciśnienie barometryczne $b = 0,1 \text{ MN/m}^2$.

Rozwiązanie

Entalpia skroplin przy $p_1 = 0,5 \text{ MN/m}^2$ wynosi $i' = 640,1 \text{ kJ/kg}$ natomiast przy $p_2 = b = 0,1 \text{ MN/m}^2$, $i'_2 = 417,4 \text{ kJ/kg}$, wobec tego kosztem ilości ciepła $i'_1 - i'_2$ nastąpi odparowanie pewnej ilości wody. Określenie ilości pary \dot{m}_{pw} dokonuje się na podstawie równań bilansu ciepła i masy.

$$\dot{m}_1 i'_1 = \dot{m}_{pw} i''_2 + \dot{m}_2 i'_2, \quad (a)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{pw} + \dot{m}_2. \quad (b)$$

Z równań (a) i (b) wyznacza się \dot{m}_{pw} ;

$$\dot{m}_{pw} = \dot{m}_1 \cdot \frac{i_1' - i_2'}{i_2'' - i_2'},$$

$$\dot{m}_{pw} = \dot{m}_1 \cdot \frac{i_1' - i_2'}{r_2},$$

$$\dot{m}_1 = \frac{21 \cdot 10^6}{2109}$$

$$\dot{m}_1 = 9950 \text{ kg/h},$$

$$\dot{m}_{pw} = 9950 \cdot \frac{640,1 - 417,4}{2258}$$

$$\dot{m}_{pw} = 980 \text{ kg/h}.$$

8.2.22. Pojemność wodna zasobnika ciepła po jego naładowaniu wynosi $V_1 = 12 \text{ m}^3$ a temperatura wody $t_1 = 200^\circ\text{C}$. Obliczyć:

- ilość pary m uzyskanej po rozładowaniu zasobnika do ciśnienia $p_{n2} = 0,2 \text{ MN/m}^2$, jeśli średnie ciśnienie pary wtórnej było $p_n = 0,5 \text{ MN/m}^2$;

- objętość V_2 jaką zajmowała woda w zasobniku po jego rozładowaniu?

$$\text{Odp. } m = 1375 \text{ kg}; \quad V_2 = 9,7 \text{ m}^3.$$

8.2.23. Określić podstawowe parametry pary po zmieszaniu ze sobą $m_1 = 5000 \text{ kg}$ pary nasyconej o $x = 0,9$ przy $p_n = 0,9 \text{ MN/m}^2$ z $m_2 = 8 \cdot 10^3 \text{ kg}$ pary przegrzanej o $t_p = 220^\circ\text{C}$ przy $p_n = 0,9 \text{ MN/m}^2$.

$$\text{Odp. } p_n = 0,9 \text{ MN/m}^2; \quad x = 0,99.$$

8.2.24. Posługując się wykresem i - s dla pary wodnej określić dla pary o $x = 0,9$ przy $p_n = 0,7 \text{ MN/m}^2$ następujące parametry: v_x , i_x , s_x , i'' , s'' , t_s .

$$\text{Odp. } v_x = 0,216 \text{ m}^3/\text{kg}; \quad i_x = 2566 \text{ kJ/kg}; \quad s_x = 6,44 \text{ kJ/kg};$$

$$i'' = 2770 \text{ kJ/kg}; \quad s'' = 6,66 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{deg)};$$

$$v'' = 0,24 \text{ m}^3/\text{kg}; \quad t_s = 170^\circ\text{C}.$$

8.2.25. Posługując się tablicami dla pary wodnej nasyconej suchej i wody wrzącej wykreślić w układzie i - s izobary $p = 6,0; 1,5; 0,1 \text{ MN/m}^2$, dolną i górną linię graniczną oraz linię stałej suchości $x = 0,8$.

8.2.26. Posługując się wykresem i - s określić parametry pary:

- nasyconej wilgotnej o $x = 0,95$ przy $p = 3 \text{ MN/m}^2$,
- suchej nasyconej przy $p = 2,5 \text{ MN/m}^2$,
- suchej nasyconej przy $t = 180^\circ\text{C}$,
- przegrzanej o $t_p = 200^\circ\text{C}$ przy $p_n = 0,7 \text{ MN/m}^2$.

Odp.

i	s	t	v
2716 kJ/kg	6,02 kJ/(kg·deg)	235°C	0,063 m ³ /kg
2802 kJ/kg	6,26 kJ/(kg·deg)	225°C	0,08 m ³ /kg
2779 kJ/kg	6,59 kJ/(kg·deg)	180°C	0,20 m ³ /kg
2836 kJ/kg	6,8 kJ/(kg·deg)	200°C	0,26 m ³ /kg

8.2.27. Rozwiązać przykład 8.2.23 korzystając z wykresu i - s przy ustalaniu parametrów pary.

8.2.28. Kocioł parowy wypełnia mieszanina parowo-wodna w ilości $m = 6000 \text{ kg}$ przy $p_{n1} = 0,2 \text{ MN/m}^2$ i $x_1 = 0,002$. Obliczyć w jakim czasie τ przy zamkniętych zaworach odcinających kocioł ciśnienie w nim wzrośnie do $p_{n2} = 7 \text{ bar}$, przy założeniu, że do mieszaniny będzie doprowadzone ciepło w ilości $Q_\tau = 12 \text{ MJ/min}$.

Rozwiązanie

Z treści zadania wynika, że podgrzewanie będzie zachodziło przy $v = \text{const}$, a zatem ciepło doprowadzone zostanie zużyte na podniesienie energii wewnętrznej mieszaniny

$$Q = m(u_2 - u_1),$$

czas nagrzewania określa się ze wzoru:

$$\tau = \frac{Q}{Q_\tau}.$$

Obliczenia wewnętrznej energii właściwej dokonuje się na podstawie wzoru (8.10). W tym celu należy określić stopień suchości pary po podgrzaniu, co dokonuje się wg wzoru (8.14a) po uprzednim ustaleniu z tablic wartości v_1'' i v_2'' oraz entalpię mieszaniny przed i po podgrzaniu i_1 , i_2 oraz objętość właściwą mieszaniny $v_1 = v_2$

$$x_2 = 0,002 \frac{0,6057}{0,2403}, \quad x_2 = 0,00505;$$

$$i_1 = 561,4 + 0,002 \cdot 2164, \quad i_1 = 565,73 \text{ kJ/kg};$$

$$i_2 = 720,9 + 0,00505 \cdot 2048, \quad i_2 = 731,24 \text{ kJ/kg};$$

$$v_1 \approx 0,002 \cdot 0,6057, \quad v_1 = 0,0012114 \text{ m}^3/\text{kg};$$

$$u_1 = 567,73 - 0,3 \cdot 10^6 \cdot 0,0012114 \cdot 10^{-3}, \quad u_1 = 565,37 \text{ kJ/kg};$$

$$u_2 = 731,24 - 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,0012114 \cdot 10^{-3}, \quad u_2 = 730,27 \text{ kJ/kg};$$

$$Q = 6000(730,27 - 565,37),$$

$$Q = 990 \text{ MJ};$$

$$\tau = \frac{990}{12},$$

$$\tau = 82' 30''.$$

8.2.29. Zbiornik o pojemności $V = 30 \text{ l}$ napełniono parą przy ciśnieniu $p_{n1} = 4 \text{ bar}$ i stopniu suchości $x_1 = 0,75$. Obliczyć ile ciepła należy doprowadzić, aby para w zbiorniku uzyskała stan pary suchej nasyconej.

Zilustrować przemianę na wykresach: p - v , T - s , i - s .

Rozwiązanie

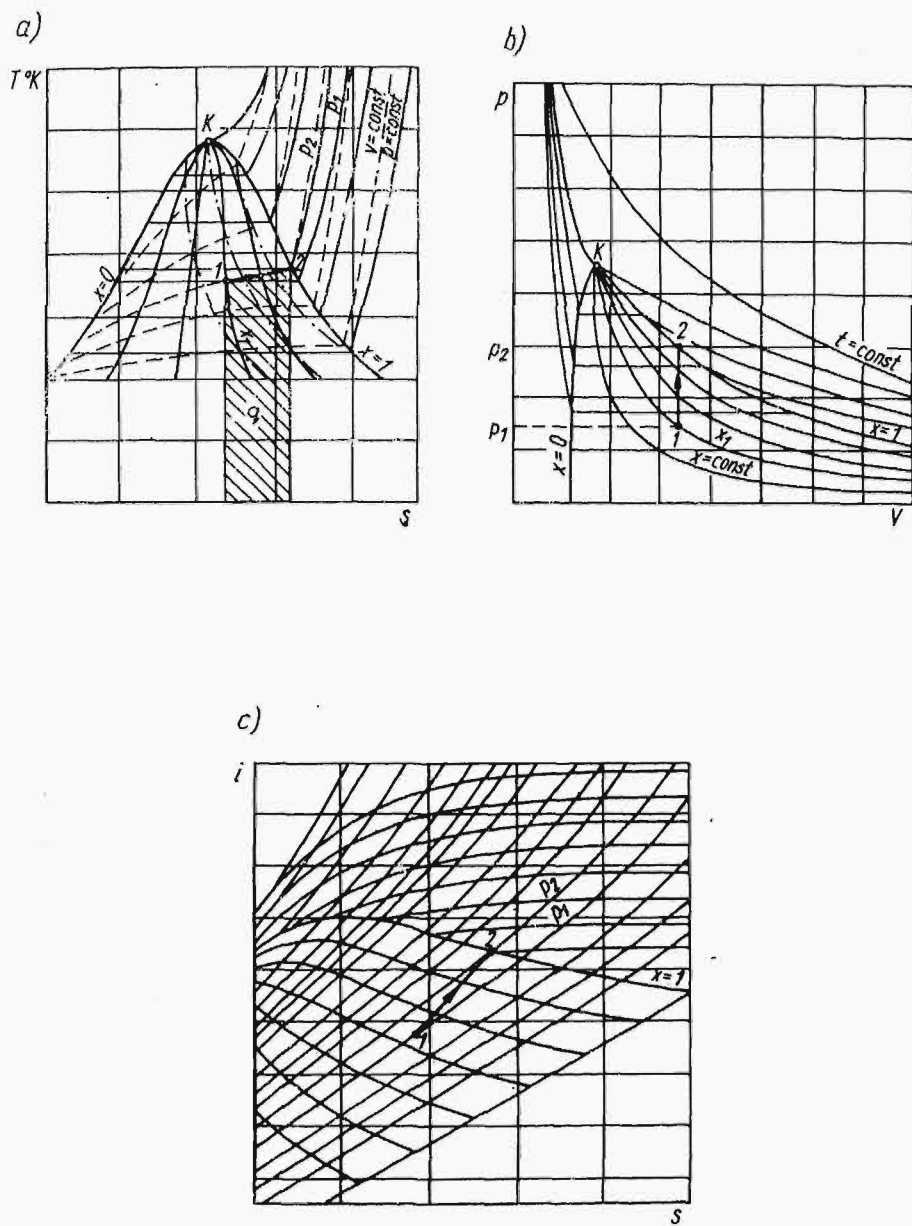
$$Q = m(u_2 - u_1), \quad Q = m[(i_2 - p_2 v_2) - (i_1 - p_1 v_1)];$$

$$m = \frac{V}{v_1},$$

$$v_1 = x_1 v_1'',$$

$$v_1 = 0,75 \cdot 0,3747, \quad v_1 = 0,281 \text{ m}^3/\text{kg};$$

$$i_1 = 640,1 + 0,75 \cdot 2109, \quad i_1 = 2222,1 \text{ kJ/kg};$$



Rys. 8.6

dla ustalenia i_2 należy określić p_2 , w tym celu zakładając zgodnie z treścią zadania $v_1 = v_2 = v_2''$ odczytuje się z tabl.9 dla $v_2'' = 0,281 \text{ m}^3/\text{kg}$ wartość $p_2 = 6,7 \text{ bar}$ oraz $i_2'' = 2761,5 \text{ kJ/kg}$.

$$Q = \frac{0,030}{0,281} \left[(2761,5 - 6,7 \cdot 10^5 \cdot 0,281 \cdot 10^{-3}) + \right. \\ \left. - (2222,1 - 5 \cdot 10^5 \cdot 0,281 \cdot 10^{-3}) \right],$$

$$Q = 52,5 \text{ kJ}.$$

8.2.30. 4 kg pary wodnej o $t_1 = 300^\circ\text{C}$ i $p_1 = 3 \text{ MN/m}^2$ ochłodzono przy $v = \text{const}$ do $t_2 = 160^\circ\text{C}$. Obliczyć parametry pary (p_2, i_2, s_2) po ochłodzeniu oraz ilość odebranego ciepła Q . Zilustrować przemianę na wykresach $p-v$, $T-s$, $i-s$.

$$\text{Odp. } p_2 = 0,618 \text{ MN/m}^2; \quad i_2 = 1225,5 \text{ kJ/kg};$$

$$s_2 = 3,2127 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)}, \quad Q = 6830 \text{ kJ}.$$

8.2.31. Wyłączony z pracy kocioł parowy o pojemności $V = 12 \text{ m}^3$ wypełnia $m = 3000 \text{ kg}$ wody i pary przy ciśnieniu $p_{n1} = 3 \text{ bar}$ i odpowiadającej temu ciśnieniu temperaturze nasycenia. Obliczyć niezbędną ilość ciepła dla podgrzania wody, aby ciśnienie w kotle wzrosło do ciśnienia $p_{n2} = 15 \text{ bar}$.

$$\text{Odp. } Q = 879 \text{ MJ}.$$

8.2.32. Masę $m = 5 \text{ kg}$ pary wodnej o temperaturze $t_1 = 170^\circ\text{C}$ i stopniu suchości $x_1 = 0,85$ podgrzano przy $p = \text{const}$ do stanu, w którym para uzyskała $x_2 = 1$ a następnie do $t_3 = 300^\circ\text{C}$. Obliczyć:

- ilość ciepła Q_{1-2} niezbędnej dla podgrzania do stanu pary suchej nasyconej $x_2 = 1$,

- ilość ciepła Q_{2-3} niezbędną do podgrzania pary od stanu pary suchej nasyconej do $t_3 = 300^\circ\text{C}$.

Zilustrować przemianę na wykresach w układzie $p-v$, $T-s$, $i-s$.

$$\text{Odp. } Q_{1-2} = 1539 \text{ kJ}; \quad Q_{2-3} = 1425 \text{ kJ}.$$

8.2.33. Masę $m = 3 \text{ kg}$ pary wodnej o ciśnieniu $p_{n1} = 15 \text{ bar}$ ozłębiono izobarycznie tak, że początkowa objętość

właściwa pary $v_1 = 0,155 \text{ m}^3/\text{kg}$ zmalała do $v_2 = 0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$.
Obliczyć:

- stan pary na początku i końcu przemiany,
- ilość odprowadzonego ciepła Q ,
- pracę bezwzględną przemiany L ,
- zmianę energii wewnętrznej pary U ,

Zilustrować przemianę na wykresach w układzie p - v , T - s ,
 i - s .

Rozwiązanie

Dla ustalenia parametrów początkowych ustala się przy
 $p = 16 \text{ bar}$ wartość $v_2'' = 0,1238 \text{ m}^3/\text{kg}$. Ponieważ $v_2'' < v_1$,
jest to para przegrzana o $t_{pp} = 290^\circ\text{C}$ i $i = 3008 \text{ kJ/kg}$.
Po sprężeniu $v_2 < v_2''$, a zatem jest to para nasycona wil-
gotna, której stopień suchości określa wzór (8.1)

$$x_2 = 0,808.$$

$$Q_{1-2} = m(i_2 - i_1),$$

$$i_2 = 858,3 + 0,808 \cdot 1935,$$

$$i_2 = 2420,3 \text{ kJ/kg},$$

$$Q_{1-2} = 3(2420,3 - 3008),$$

$$Q_{1-2} = -1763,1 \text{ kJ}.$$

Pracę bezwzględną oblicza się ze wzoru (8.18)

$$L = m p (v_2 - v_1),$$

$$L = 3 \cdot 16 \cdot 10^5 (0,1 - 0,155),$$

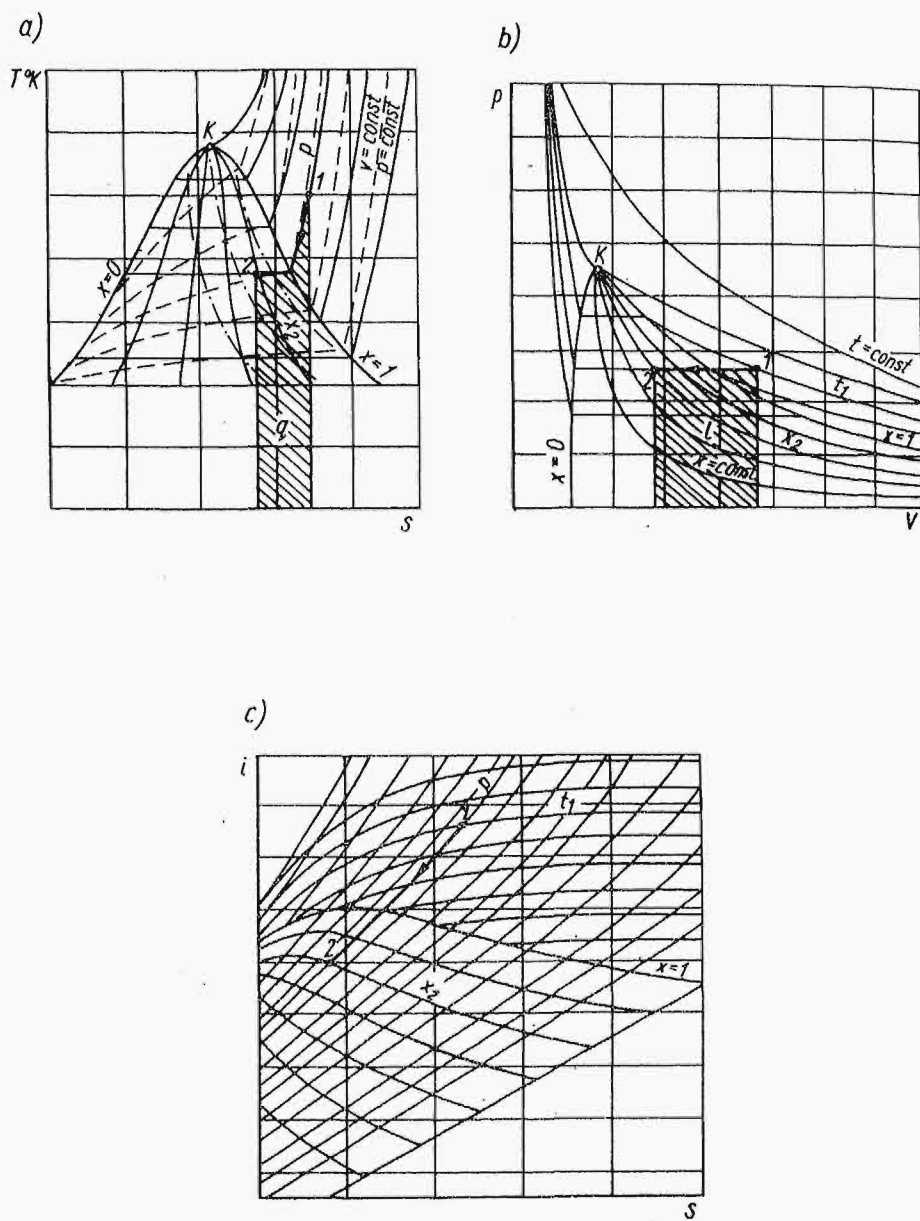
$$L = -264 \text{ kJ}.$$

Przyrost energii wewnętrznej oblicza się po przekształce-
niu wzoru (8.11)

$$\Delta U = Q - L,$$

$$\Delta U = -1763,1 + 264,$$

$$\Delta U = -1499,1 \text{ kJ}.$$



Rys.8.7

8.2.34. Zachowując stałe ciśnienie $p_n = 0,8 \text{ MN/m}^2$ w wyniku ochłodzenia zamieniono 1 kg pary wodnej suchej nasyconej na ciecz. Obliczyć:

- bezwzględną pracę właściwą l ,
- odprowadzoną ilość ciepła q ,
- zmianę energii wewnętrznej właściwej Δu .

Odp. $l = -192,4 \text{ kJ/kg}$; $q = -2031 \text{ kJ/kg}$; $\Delta u = -1918,6 \text{ kJ/kg}$

8.2.35. Do kondensatora turbiny parowej dopływa $\dot{m} = 15\,000 \text{ kg/h}$ pary wilgotnej przy $p = 0,5 \text{ bar}$ i $x = 0,85$. Obliczyć ilość wody chłodzącej \dot{m}_w przepływającej przez skraplacz, przy założeniu, że przyrost temperatury wody wynosi $\Delta t = 10 \text{ deg}$ i nie nastąpi ochłodzenie kropli poniżej temperatury nasycenia t_s .

Odp. $\dot{m}_w = 739\,000 \text{ kg/h}$.

8.2.36. Zapotrzebowanie pary dla celów grzewczych zakładu wynosi $\dot{m}_o = 10^4 \text{ kg/h}$ przy $p_n = 5 \text{ bar}$ i $x = 1$. Zakład zasilany jest parą z elektrowni o ciśnieniu $p_n = 5 \text{ bar}$ i temperaturze $t = 220^\circ\text{C}$ a wymagane przez zakład parametry pary uzyskuje się przez jej schłodzenie. Obliczyć:

- ilość wody \dot{m}_w o temperaturze nasycenia odpowiadającej $p_n = 5 \text{ bar}$, którą należy doprowadzić do schładzacza pary celem uzyskania wymaganych przez zakład parametrów,
- ilość pary \dot{m} dostarczonej przez elektrownię.

Rozwiązanie

Ilość wody \dot{m}_w oblicza się w oparciu o bilans ciepła i masy:

$$\dot{m}_o \cdot i_o = \dot{m} \cdot i + \dot{m}_w \cdot i_w, \quad (a)$$

$$\dot{m}_o = \dot{m} + \dot{m}_w; \quad (b)$$

z układu równań (a) i (b) otrzymuje się:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_o \frac{i - i_o}{i - i_w},$$

$$\dot{m}_w = 10000 \frac{2891 - 2757}{2891 - 670,5},$$

$$\dot{m}_w = 604 \text{ kg/h}.$$

Ilość pary \dot{m} określa się z równania (b)

$$\dot{m} = 10000 - 604,$$

$$\dot{m} = 9396 \text{ kg/h.}$$

8.2.37. Początkowa objętość zajmowana przez $m = 15 \text{ kg}$ pary wodnej przy ciśnieniu $p = 8 \text{ bar}$ wynosi $V_1 = 2,7 \text{ m}^3$, wskutek izobarycznego podgrzania objętość wzrosła do $V_2 = 3,3 \text{ m}^3$. Obliczyć:

- parametry pary x , v przed i po podgrzaniu,
- pracę przemiany L ,
- ciepło doprowadzone Q .

Zilustrować przemianę na wykresach w układzie p - v , T - s , i - s .

Odp. $x_1 = 0,749$; $x_2 = 0,915$; $L = 760 \text{ kJ}$; $Q = 5110 \text{ kJ}$,
 $v_1 = 0,18 \text{ m}^3/\text{kg}$; $v_2 = 0,22 \text{ m}^3/\text{kg}$.

8.2.38. Masę $m = 5 \text{ kg}$ pary przy $p_{n1} = 0,8 \text{ MN/m}^2$ i $x_1 = 0,9$ rozpręża się izotermicznie do ciśnienia $p = 1 \text{ bar}$. Obliczyć:

- ciepło doprowadzone podczas przemiany Q ,
- zmianę energii wewnętrznej ΔU ,
- pracę bezwzględną przemiany L .

Zilustrować przemianę na wykresach w układzie p - v , T - s , i - s .

Rozwiązanie

Obliczenia dokonuje się wg wzoru:

$$Q = m \cdot q,$$

posługując się dla obliczenia q wzorem (8.19a)

$$s_1 = 2,094 + 0,9(6,623 - 2,094),$$

$$s_1 = 6,17 \text{ kJ/kg.}$$

Wartości $s_2 = 7,721 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{deg)}$; $i_2 = 2825,5 \text{ kJ/kg}$;

$v_2 = 2,054 \text{ m}^3/\text{kg}$ odczytuje się z tabl.12 dla

$$t_2 = t_{s1} = 175,35^\circ\text{C przy } p = 1 \text{ bar}$$

- 153 -

$$Q = 5(273 + 175,35)(7,721 - 6,17),$$

$$Q = 3475 \text{ kJ}.$$

Przyrost energii wewnętrznej oblicza się ze wzoru:

$$\Delta U = m(u_2 - u_1).$$

Wartość energii właściwej u określa się po przekształceniu wzoru (8.13)

$$u_2 = 2825,5 - 1 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 054 \cdot 10^{-3},$$

$$u_2 = 2620,1 \text{ kJ/kg};$$

$$v_1 = x_1 v_1'',$$

$$i_1 = 742,8 + 0,9 \cdot 2031,$$

$$v_1 = 0,9 \cdot 0,2149,$$

$$i_1 = 2570,8 \text{ kJ/kg};$$

$$v_1 = 0,1934 \text{ m}^3/\text{kg};$$

$$u_1 = 2570,8 - 9,0 \cdot 10^5 \cdot 0,1934 \cdot 10^{-3},$$

$$u_1 = 2396,74 \text{ kJ/kg};$$

$$\Delta U = 5(2620,10 - 2396,74),$$

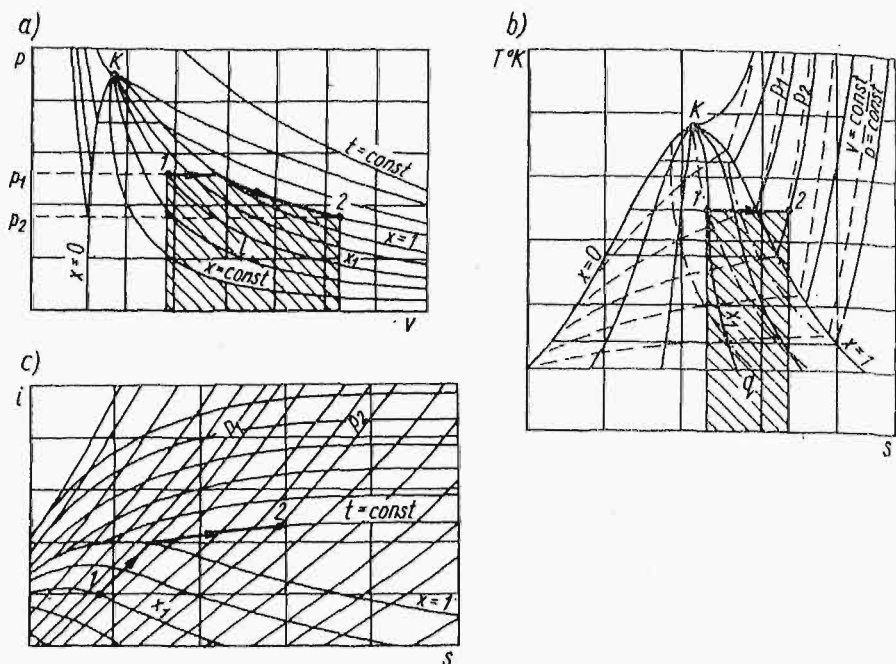
$$\Delta U = 1116,8 \text{ kJ}.$$

Obliczenia dokonuje się wg wzoru (8.11)

$$L = 3465 - 1116,8,$$

$$L = 2358,2 \text{ kJ}.$$

8.2.39. Rozwiązać przykład 8.2.38 posługując się wykresem i - s . Porównać ze sobą otrzymane wyniki.



Rys.8.8 .

8.2.40. Masę $m = 5$ kg pary o początkowych parametrach $p_1 = 3 \text{ MN/m}^2$ i $x_1 = 0,9$ rozprężono izotermicznie doprowadzając w trakcie przemiany $Q = 2000 \text{ kJ}$ ciepła. Posługując się wykresem $i-s$ dla pary wodnej określić parametry pary p_2, v_2, i_2 po jej rozprężeniu.

Odp. $p_2 = 15 \text{ bar}$; $v_2 = 0,145 \text{ m}^3/\text{h}$; $i_2 = 2886 \text{ kJ/kg}$.

8.2.41. Masę $m = 5$ kg pary o stopniu suchości $x_1 = 0,96$ zajmującej objętość $V_1 = 2,25 \text{ m}^3$ sprężono izotermicznie do stanu, który uzyskano kosztem wykonanej pracy $L = 200 \text{ kJ}$. Obliczyć:

- parametry krańcowych stanów przemiany p, v, i, s ,
- ilość odebranego ciepła podczas przemiany Q .

Rozwiązanie

Zadanie rozwiązuje się przy pomocy wykresu $i-s$ i tablic parowych.

Punkt określający stan na początku przemiany wyznaczają na wykresie $i-s$ $x_1 = 0,96$ oraz objętość właściwa

$$v_1 = \frac{2,25}{5} = 0,45 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Stanowi początkowemu odpowiadają parametry:

$$p_1 = 4 \text{ bar}; \quad t_1 = 145^\circ\text{C}; \quad i_1 = 2654 \text{ kJ/kg}; \quad s_1 = 6,69 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{deg}).$$

Parametry stanu pary po rozprężeniu, ze względu na większą dokładność, wyznacza się na podstawie tablic parowych przyjmując $t_2 = t_1 = 145^\circ\text{C}$ oraz objętością właściwą v_2 .

Wobec tego, że sprężanie przebiega w obszarze pary nasyconej, w którym przemiana izotermiczna pokrywa się z przemianą izobaryczną, wartość v_2 wyznacza się ze wzorów (8.18a) i (8.18), po przekształceniu których otrzymuje się:

$$v_2 = v_1 + \frac{L}{m \cdot p},$$

$$v_2 = 0,45 + \left(- \frac{200\,000}{5 \cdot 4 \cdot 10^5} \right),$$

$$v_2 = 0,45 - 0,1,$$

$$v_2 = 0,35 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Stopień suchości x_2 określa się ze wzoru (8.1) po jego przekształceniu:

$$x_2 = \frac{0,35 - 0,0010836}{0,4624 - 0,0010836},$$

$$x_2 = 0,757.$$

Wartość entropii s_2 oblicza się ze wzoru (8.6):

$$s_2 = 1,777 + 0,757(6,897 - 1,777),$$

$$s_2 = 5,652 \text{ kJ/kg}.$$

Ilość ciepła oblicza się ze wzorów (8.19c) i (8.19a)

$$Q = 5(273,15 + 145)(5,652 - 6,69),$$

$$Q = - 2170 \text{ kJ}.$$

8.2.42. Masa $m = 8$ kg pary o stopniu suchości $x_1 = 0,895$ zajmuje objętość $V_1 = 1,28$ m³, wskutek izotermicznego rozprężania para wykonała pracę $L = 88$ kJ. Obliczyć:

- ilość doprowadzonego ciepła Q ,
- zmianę energii wewnętrznej ΔU ,
- określić stan pary po rozprężeniu p , x , v_2 .

Zilustrować przemianę na wykresach w układzie p - v , i - s , T - s .

Odp. $Q = 992$ kJ, $\Delta U = 804$ kJ,
para nasycona przy $x_2 = 0,957$; $p_2 = p_1 = 11$ bar;
 $v_2 = 0,17$ m³/kg.

8.2.43. Parę wodną suchą nasyconą rozprężono adiabatycznie od ciśnienia $p_1 = 1,5$ MN/m² do $p_{n2} = 0,5$ bar. Określić stopień suchości pary x_2 po rozprężeniu,

Rozwiązanie

Dla przemiany adiabatycznej zachodzi równość

$$s_1 = s_2;$$

z treści zadania wynika, że $s_1 = s_1''$, ponieważ para jest sucha nasycona.

Ponieważ po rozprężeniu para osiągnie stan pary nasyconej wilgotnej, obliczenie x_2 dokonuje się na podstawie wzoru (8.6a) po jego przekształceniu

$$x_2 = \frac{T_2}{r_2} (s_1'' - s_2'),$$

$$x_2 = \frac{273,15 + 111,38}{2226} (6,445 - 1,4336),$$

$$x_2 = 0,865.$$

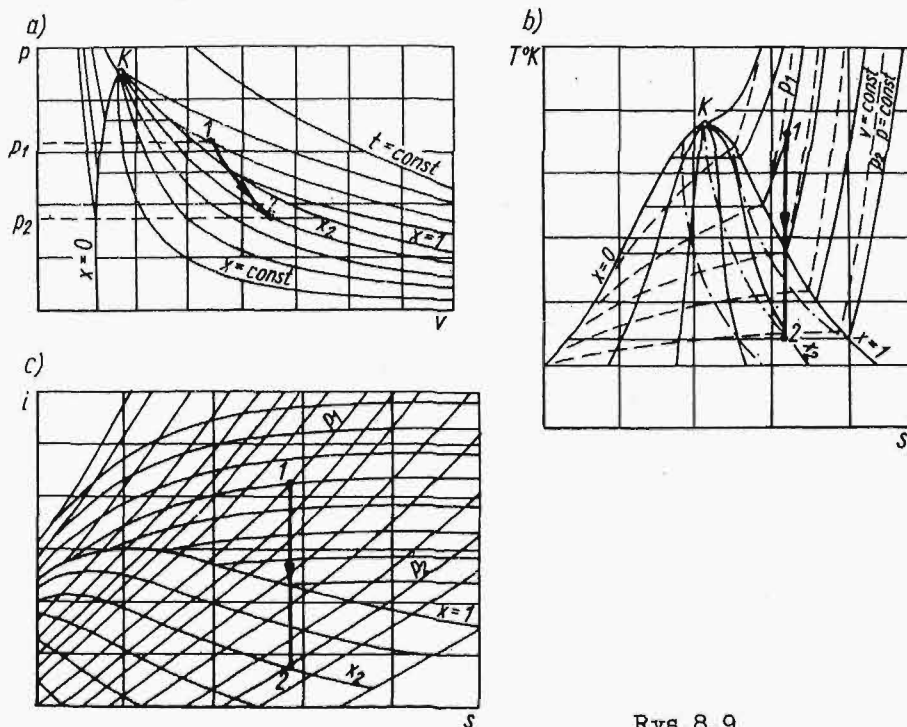
8.2.44. Masę $m = 3$ kg pary o początkowych parametrach $p_1 = 2,0$ MN/m² i $t_1 = 300^\circ\text{C}$ rozprężono adiabatycznie do ciśnienia $p_2 = 1$ bar.

Posługując się wykresem i - s dla pary określić:

- parametry na początku i końcu przemiany p , t , x , v ,
- pracę bezwzględną przemiany L ,
- pracę techniczną przemiany L_t .

Zilustrować przebieg przemiany w układach p-v, i-s, T-s.

Odp. $i_1 = 3016 \text{ kJ/kg}$; $v_1 = 0,123 \text{ m}^3/\text{kg}$; $i_2 = 2448 \text{ kJ/kg}$;
 $x = 0,9$; $v_2 = 1,52 \text{ m}^3/\text{kg}$; $L = 1011,9 \text{ kJ}$,
 $L_t = 1704 \text{ kJ}$.



Rys.8.9

8.2.45. Rozwiązać treść zadania 8.2.44 posługując się wyłącznie tablicami dla pary wodnej.

8.2.46. Określić do jakiego ciśnienia należy sprężyć adiabatycznie parę o ciśnieniu $p_{n1} = 0,2 \text{ bar}$ i stopniu suchości $x_1 = 0,2$, aby zamieniła się w ciecz?

Odp. $p_2 = 24,75 \text{ bar}$.

8.2.47. Masę $m = 2 \text{ kg}$ pary o $p_1 = 25 \text{ bar}$ i $t = 290^\circ\text{C}$ rozprężono adiabatycznie tak, że stosunek objętości przed i po rozprężeniu wynosił $\frac{v_1}{v_2} = 0,125$. Określić:

- pracę bezwzględną przemiany L ,
 - parametry pary po rozprężeniu p_2 , x_2 ,
- Zilustrować przebieg przemiany w układach p - v , i - s , T - s .
 Odp. $L = 633,2 \text{ kJ}$, $p_2 = 2,1 \text{ bar}$, $x_2 = 0,907$.

8.2.48. $V = 5 \text{ m}^3$ pary o ciśnieniu $p_1 = 10 \text{ bar}$ i temperaturze $t_1 = 300^\circ\text{C}$ rozprężono adiabatycznie, w jednym przypadku do ciśnienia $p_2 = 1 \text{ bar}$ a w drugim do $p'_2 = 0,1 \text{ bar}$. Obliczyć różnicę między bezwzględnymi pracami rozprężania w obu przypadkach oraz zaznaczyć przebieg przemiany na wykresie p - v dla pary wodnej.

Odp. $\Delta L = 4040 \text{ kJ}$.

8.2.49. Traktując parę jako gaz półdoskonały spełniający równanie adiabaty $p v^k = \text{const}$ obliczyć wykładnik adiabaty k w przypadku rozprężania pary od ciśnienia $p_1 = 30 \text{ bar}$ i temperatury $t_1 = 350^\circ\text{C}$ do momentu osiągnięcia przez parę stanu pary suchej nasyconej.

Odp. $k = 1,3$.

8.2.50. Rozwiązać zadanie 8.2.49 przyjmując za stan końcowy rozprężania:

- temperaturę $t_2 = 180^\circ\text{C}$,
- stopień suchości $x_2 = 0,85$.

8.2.51. Masę $m = 4 \text{ kg}$ pary przy ciśnieniu $p_{n1} = 9 \text{ bar}$ i stopniu suchości $x_1 = 0,91$ podgrzano izochorycznie do temperatury $t_2 = 400^\circ\text{C}$ a następnie rozprężono adiabatycznie do stanu pary suchej nasyconej. Określić:

- parametry pary w charakterystycznych punktach przemian p , i , v , s ,
- zmianę energii wewnętrznej pary ΔU ,
- pracę bezwzględną wykonaną przez parę L .

Zilustrować przebieg przemian na wykresach w układach p - v , i - s , T - s .

Odp.

$p \text{ bar}$	10	17	1,6
$v = \text{m}^3/\text{kg}$	0,18	0,18	1,1
$i \text{ kJ/kg}$	2596	3252	2696
$s \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{deg})$	6,2	7,12	7,12

$$\Delta U = 416 \text{ kJ/kg}$$

$$L = 1704 \text{ kJ}$$

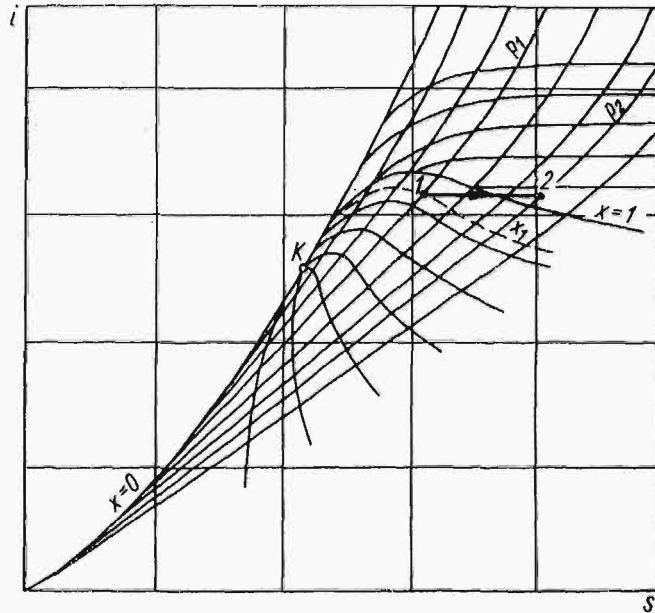
8.2.52. Parę o ciśnieniu $p_1 = 2 \text{ MN/m}^2$ i stopniu suchości $x_1 = 0,99$ zdławiono do ciśnienia $p_2 = 5 \text{ bar}$. Określić:
- parametry pary po zdławieniu p, t, i, s ,
- przyrost entropii właściwej pary Δs ,
Wykonać szkic ilustrujący przebieg przemiany w układzie $i-s$.

Rozwiązanie

Przemianę izoentalpowego dławienia charakteryzuje równość entalpii przed i po zdławieniu

$$i_2 = i_1.$$

Tęgo typu zadania najwygodniej rozwiązywać na wykresie $i-s$.



Rys.8.10

Para przegrzana:

$$t_2 = 165^{\circ}\text{C},$$

$$v_2 = 0,40 \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$s_2 = 6,89 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{deg}).$$

$$\Delta s = 6,89 - 6,31,$$

$$\Delta s = 0,58 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{deg}).$$

8.2.53. Rozwiązać zadanie 8.2.52 posługując się wyłącznie tablicami dla pary wodnej.

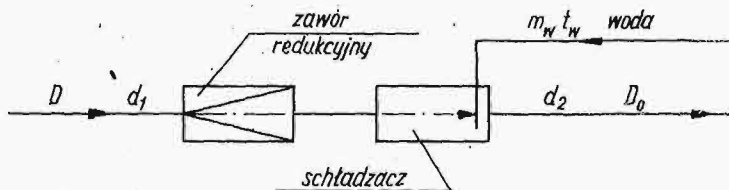
8.2.54. Określić średnice przewodów przed (d_1) i za (d_2) zaworem redukcyjnym, przez które przepływa $\dot{m} = 10^4 \text{ kg/h}$ pary o parametrach podanych na rys.8.11.



Rys.8.11

Odp. $d_1 = 106,2 \text{ mm}$, $d_2 = 164 \text{ mm}$.

8.2.55. Na szkicu rys.8.12 podano schemat stacji redukcyjno-schładzającej pary wodnej.



Rys.8.12

Zadaniem stacji jest obniżenie parametrów pary z $p_1 = 10 \text{ bar}$ i $t_1 = 250^\circ\text{C}$ do $p_{n2} = 3 \text{ bar}$ i $x_2 = 1$, którą zasilane są odbiorniki ciepła o ogólnej wydajności cieplnej $Q = 10 \text{ GJ/h}$. Określić:

- średnice przewodu parowego przed (d_1) i za (d_2) stacją redukcyjną, zakładając prędkość pary w przewodzie $w = 50 \text{ m/s}$,
- zapotrzebowanie wody m_w niezbędnej dla schłodzenia pary, jeśli temperatura wody $t_w = 100^\circ\text{C}$.

Zilustrować przebieg procesu na wykresie i-s.

Rozwiązanie

Proces zachodzący w stacji redukcyjno-schładzającej składa się z przemiany izoentalpowego dławienia zachodzącego

w zaworze redukcyjnym oraz przemiany izobarycznej zachodzącej w schładzaczu.

Przebieg przemian w stacji zilustrowano na szkicu rys.8.13. Z wykresu i - s odczytuje się parametry krańcowych punktów przemian

$$i_1 = 2940 \text{ kJ/kg},$$

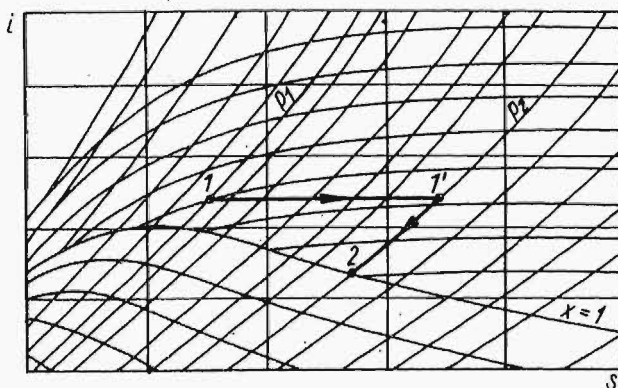
$$v_1 = 0,23 \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$i_{1'} = i_1,$$

$$v_{1'} = 0,57 \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$i_2 = 2740 \text{ kJ/kg},$$

$$v_2 = 0,465 \text{ m}^3/\text{kg}.$$



Rys.8.13

Dla określenia d_1 i d_2 należy ustalić masę pary przepływającej przewodem przed (\dot{m}) i za (\dot{m}_0) stacją redukcyjno-schładzającą.

Ilość pary \dot{m}_0 określa się przy założeniu entalpii skroplin za odbiornikami ciepła równą i_2' odpowiadającej ciśnieniu $p_2 = 4 \text{ bar}$ ze wzoru:

$$Q = \dot{m}_0 (i_2 - i_2'),$$

$$\dot{m}_0 = \frac{10\,000\,000}{2740 - 604,7},$$

$$\dot{m}_0 = 4680 \text{ kg/h}.$$

Ilość pary \dot{m} określa się w oparciu o bilans masy ciepła dla schładzacza, a mianowicie:

$$\dot{m} + \dot{m}_W = \dot{m}_O, \quad (a)$$

$$\dot{m} i_1 + \dot{m}_W i_W = \dot{m}_O i_2, \quad (b)$$

$$\dot{m} = \dot{m}_O \frac{i_2 - i_W}{i_1 - i_W},$$

$$\dot{m} = 4680 \frac{2740 - 419,1}{2940 - 419,1},$$

$$\dot{m} = 4310 \text{ kg/h.}$$

Obliczenie średnicy d_1 i d_2 :

$$f_1 = \frac{4310 \cdot 0,23}{3600 \cdot 50} = 0,00551 \text{ m}^2,$$

$$d_1 = 83,8 \text{ mm};$$

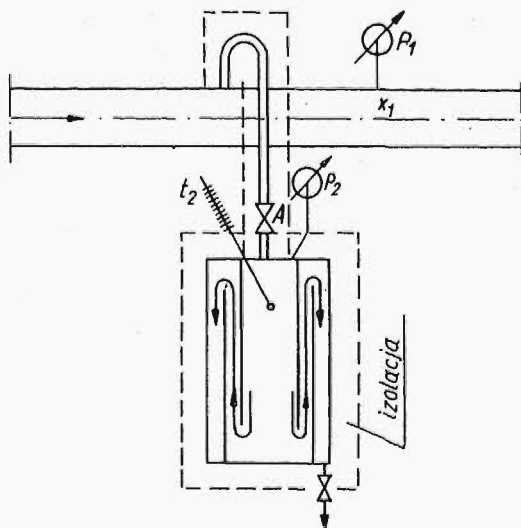
$$f_2 = \frac{4680 \cdot 0,465}{3600 \cdot 50} = 0,0121 \text{ m}^2,$$

$$d_2 = 124,1 \text{ mm.}$$

Ilość wody \dot{m}_W określa się z równania (a)

$$\dot{m}_W = 4680 - 4310,$$

$$\dot{m}_W = 370 \text{ kg/h.}$$



Rys.8.14

8.2.56. Przemiana izoentalpowego dławienia znajduje zastosowanie przy oznaczaniu stopnia suchości pary. Na tej zasadzie zbudowany jest kalorymetr dławiający rys.8.14.

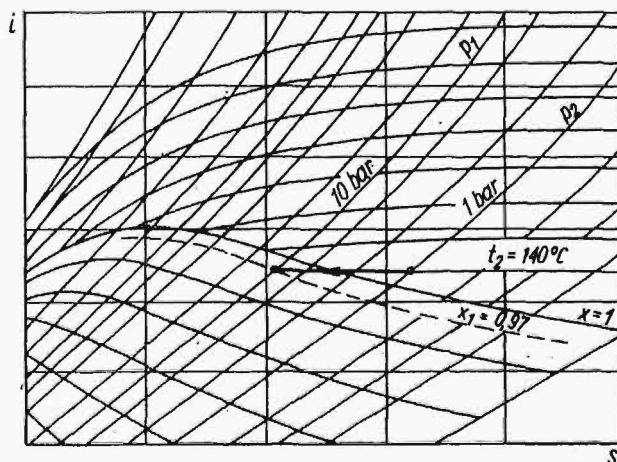
Z przewodu parowego przez zawór dławiający A doprowadza się parę do kalorymetru dławiającego. W kalorymetrze dokonuje się pomiaru temperatury t_2 i ciśnienia p_2 pary uprzednio zdławionej za-

worem A do stanu pary przegrzanej. Poza pomiarem parametrów pary w kalorymetrze należy dokonywać pomiaru ciśnienia pary p_1 . Opierając się na pomiarach p_1 , p_2 , t_2 można na podstawie wykresu i - s względnie tablic parowych ustalić stopień suchości pary x_1 .

Określić stopień suchości pary, jeśli ciśnienie pary $p_1 = 10$ bar a pomierzone w kalorymetrze ciśnienie $p_2 = 1$ bar i temperatura $t_2 = 140^\circ\text{C}$.

Rozwiązanie

Na wykresie i - s rys.8.15 wyznacza się punkt charakteryzujący stan pary przegrzanej; znajduje się on na przecięciu izobary $p_2 = 1$ bar z izotermą $t_2 = 140^\circ\text{C}$. Przez ten punkt



Rys.8.15

prowadzi się linię prostą równoległą do osi s (izoentalpę). Przecięcie tej linii z izobarą $p_1 = 10$ bar wyznacza punkt charakteryzujący stan pary przed zdławieniem i dla tego punktu odczytuje się wartość stopnia suchości $x_1 = 0,99$.

8.2.57. Parę nasyconą przy ciśnieniu $p_{n1} = 0,7 \text{ MN/m}^2$ zdławiono w zaworze redukcyjnym do ciśnienia $p_2 = 1 \text{ ata}$, przy którym temperatura pary była równa $t_2 = 110^\circ\text{C}$. Określić:

- stopień suchości pary przed dławieniem x_1 ,
- entalpię pary przed dławieniem i_1 .

Odp. $x_1 = 0,964$; $i_1 = 2896 \text{ kJ/kg}$.

8.2.58. Do jakiego ciśnienia należy zdławić parę o ciśnieniu $p_1 = 20$ bar i stopniu $x_1 = 0,95$, aby po zdławieniu osiągnęła stan pary suchej nasyconej. Zadanie rozwiązać korzystając wyłącznie z tablic dla pary wodnej.

Odp. $p_2 = 1,95$ bar.

8.2.59. Silnik parowy, w którym rozprężanie pary przebiega wg przemiany adiabatycznej, zasilany jest parą o ciśnieniu $p_{n1} = 15$ bar i temperaturę $t_1 = 305^\circ\text{C}$. Para opuszczająca silnik odprowadzona jest do skraplacza, w którym utrzymywane jest ciśnienie $p = 0,1$ bar.

Określić o ile zmniejszy się praca bezwzględna Δl , jeśli para o $p_1 = 15$ bar przed wprowadzeniem do silnika zostanie zdławiona do $p = 5$ bar.

Wykonać szkic ilustrujący przebieg przemiany w układzie $p-v$, $i-s$, $T-s$.

Odp. $\Delta l = 159,5$ kJ/kg.

8.2.60. Wymiennik ciepła o wydajności $Q = 2$ GJ/h zasilany jest parą o ciśnieniu $p_n = 2$ bar powstałą po zdławieniu pary o ciśnieniu $p_1 = 1$ MN/m² i stopniu suchości $x_1 = 0,99$;

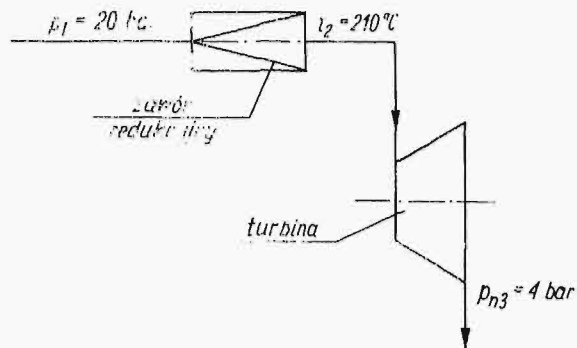
- określić zapotrzebowanie pary \dot{m}_1 oraz średnicę przewodu doprowadzającego parę do wymiennika (d_1),

- obliczyć zapotrzebowanie pary (\dot{m}_2) oraz średnicę przewodu (d_2), jeśli wymiennik zasilany byłby parą o parametrach przed zdławieniem.

Do obliczenia średnic przewodu przyjąć prędkość pary $w = 50$ m/s.

Odp. $\dot{m}_1 = 910$ kg/h, $d_1 = 63$ mm,
 $\dot{m}_2 = 1003$ kg/h, $d_2 = 37,6$ mm.

8.2.61. Zapotrzebowanie pary dla celów technologicznych wynosi $\dot{m} = 5000$ kg/h przy $p_{n3} = 4$ bar i $x_3 = 0,99$. Parę o powyższych parametrach uzyskano w wyniku zdławienia pary o $p_1 = 20$ bar i $t_1 = 230^\circ\text{C}$ do stanu, w którym para osiągnęła temperaturę $t_2 = 210^\circ\text{C}$, a następnie jej rozprężeniu adiabatycznym w turbinie do wymaganego ciśnienia $p_{n3} = 4$ bar. Przebieg redukcji ciśnienia pary zilustrowano na schemacie rys.8.16. Określić:



Rys.8.16

- parametry pary p , v , i w krańcowych punktach przemiany,

- pracę techniczną L_t rozprężania pary oraz teoretyczną moc turbiny N .

Wykonać szkic ilustrujący przebieg przemian na wykresie w układzie i - s .

Odp.

p bar	20	11	5
v m ³ /kg	0,105	0,19	0,37
i kJ/kg	2846	2846	2690

$$L_t = 780 \text{ MJ}$$

$$N = 217 \text{ kW}$$