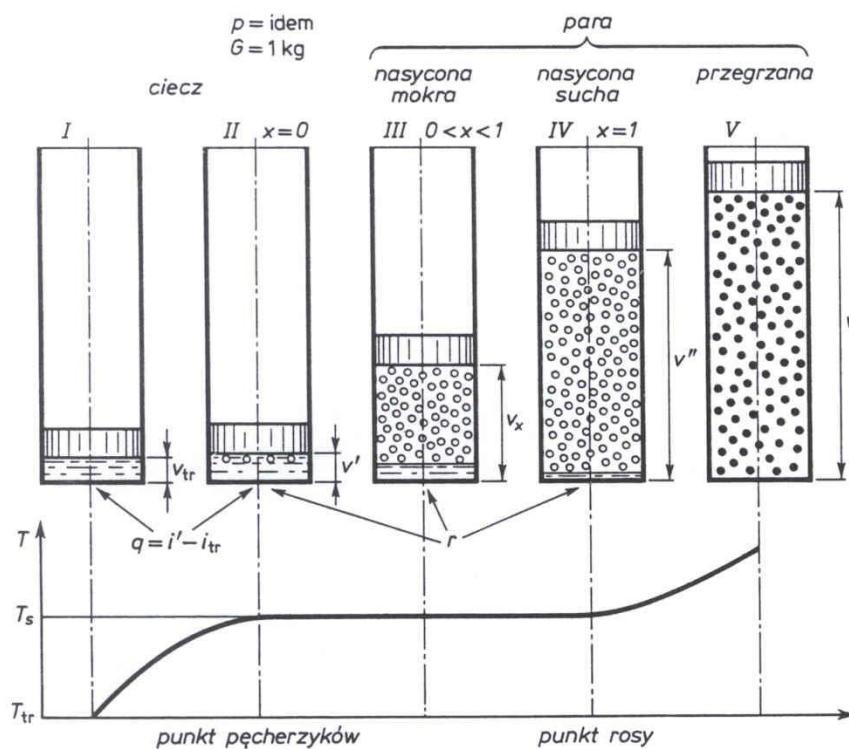


PARA WODNA

1. PRZEMIANY FAZOWE SUBSTANCJI JEDNORODNYCH

Para wodna najczęściej jest produkowana w warunkach stałego ciśnienia.



Rys. 5.23. Izobaryczny proces parowania

Przy niezmiennym ciśnieniu zmiana wody o stanie początkowym odpowiadającym punktowi pęcherzyków w parę nasyconą suchą odbywa się w stałej temperaturze. Tak samo zachowują się inne jednoskładnikowe ciecze.

Para mokra (nasycona mokra) zawiera dwie fazy: ciekłą i lotną. Fazą ciekłą jest woda o stanie punktu pęcherzyków. Fazą lotną jest para nasycona sucha. Stopień suchości pary mokrej (pary nasyconej mokrej) oblicza się ze wzoru

$$x = \frac{m''}{m} = \frac{m''}{m' + m''} \quad (1.1)$$

m'' – ilość pary nasyconej suchej w parze mokrej, kg

m' – ilość cieczy o stanie punktu pęcherzyków w parze mokrej, kg

m – ilość pary mokrej, kg

Ciepło (entalpia) parowania dla procesu izobaryczno-izotermicznego

$$r = i'' - i' = T_s (s'' - s') \quad (1.2a)$$

i'' – entalpia właściwa pary nasyconej suchej, kJ/kg

i' – entalpia cieczy w punkcie pęcherzyków, kJ/kg

T_s – temperatura wrzenia (nasyconia), K

s'' – entropia właściwa pary nasyconej suchej, kJ/(kg·K)

s' – entropia właściwa cieczy w punkcie pęcherzyków, kJ/(kg·K)

Strumień ciepła oddawanego podczas skraplania strumienia \dot{m} pary nasyconej mokrej o stopniu suchości x oblicza się ze wzoru

$$\dot{Q} = -\dot{m}xr \quad (1.2b)$$

Przyjmuje się, że H₂O ma energię wewnętrzną i entropię równą zero w stanie ciekłym dla parametrów punktu potrójnego:

$$p_{tr} = 611,2 \text{ Pa}$$

$$T_{tr} = 273,16 \text{ K (0,01°C)}$$

1 kg pary mokrej składa się z $1 - x$ kg cieczy w stanie punktu pęcherzyków oraz x kg pary nasyconej suchej. Stąd objętość właściwą, entalpię właściwą i entropię właściwą pary mokrej wyznacza się odpowiednio z zależności

$$v_x = (1 - x)v' + xv'' = v' + x(v'' - v') \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (1.3)$$

$$i_x = (1 - x)i' + xi'' = i' + x(i'' - i') \quad [\text{J}/\text{kg}] \quad (1.4)$$

$$s_x = (1 - x)s' + xs'' = s' + x(s'' - s') \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (1.5)$$

Energia wewnętrzna właściwa pary (nasyconej) mokrej

$$u_x = i_x - pv_x \quad [\text{J}/\text{kg}] \quad (1.6)$$

$$u_x = (1 - x)u' + xu'' = u' + x(u'' - u') \quad [\text{J}/\text{kg}] \quad (1.7)$$

Entalpia właściwa cieczy

$$i \cong c_p t \quad [\text{J/kg}] \quad (1.8)$$

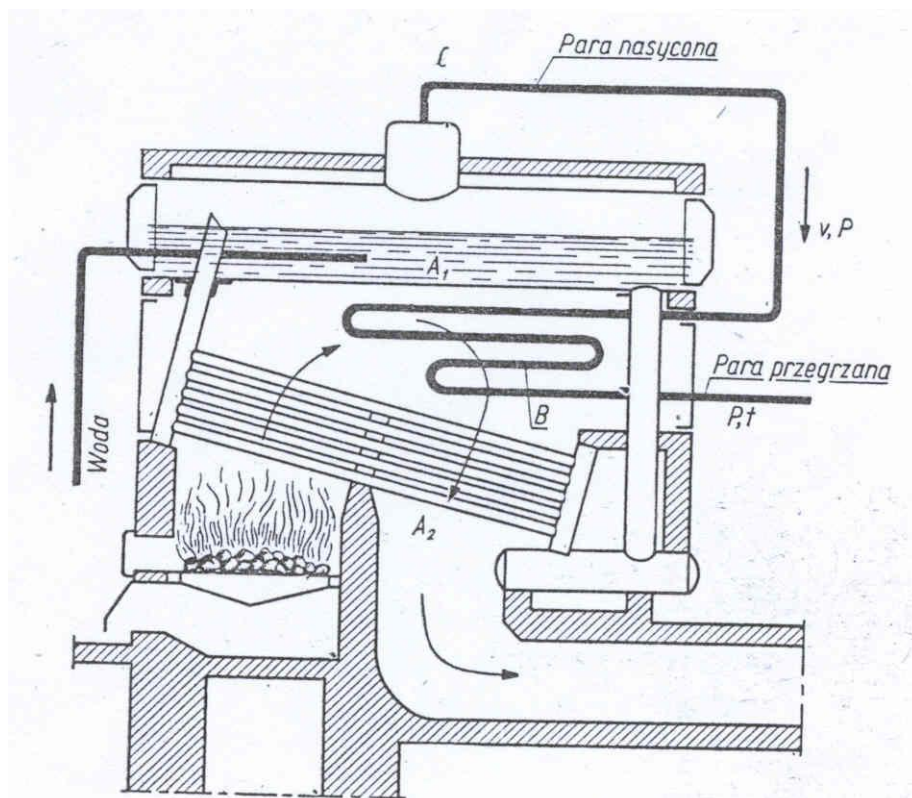
Parametry stanu dla punktu pęcherzyków (oznaczone *prim*) i pary nasyconej suchej (oznaczone *bis*) można odczytać z tablic parowych.

Tylko w wyjątkowych przypadkach możemy traktować parę wodną jako gaz doskonały lub półdoskonały. Najczęściej, aby uzyskać odpowiednią dokładność obliczeń, musimy traktować parę jako gaz rzeczywisty.

**Parametry określające stan wody na linii granicznej $x = 0$
i $x = 1$ uszeregowane według ciśnienia**

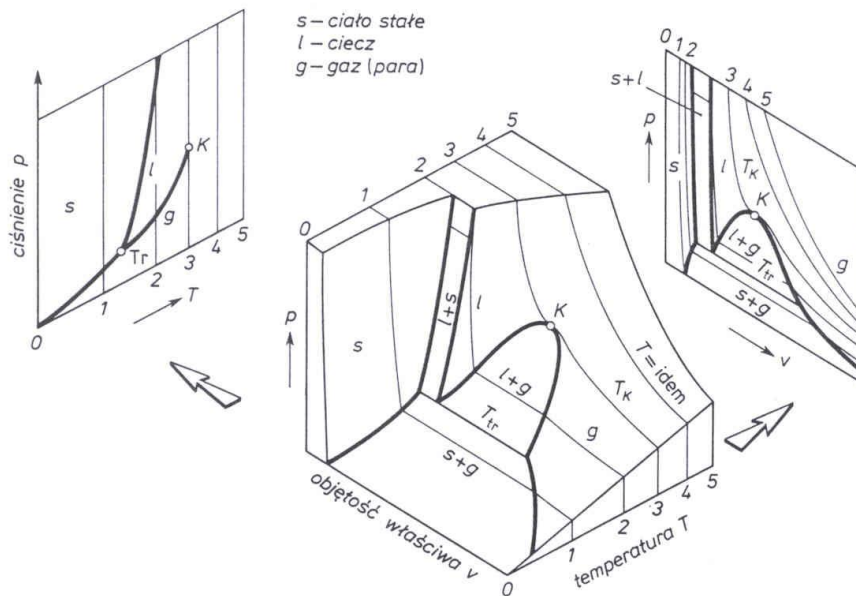
Ciśnienie p	Temperatura T	Objętość właściwa		Entalpia właściwa		Ciepło parowania r	Entropia właściwa	
		cieczy v'	pary v''	cieczy i'	pary i''		cieczy s'	pary s''
MPa	K	m ³ /kg		kJ/kg			kJ/(kg K)	
0,0010	280,132	0,0010001	129,208	29,33	2513,8	2484,5	0,1060	8,9756
0,0015	286,134	0,0010006	87,982	54,71	2525,0	2470,3	0,1956	8,8278
0,002	290,661	0,0010012	67,006	73,45	2533,2	2459,8	0,2606	8,7236
0,003	297,248	0,0010027	45,668	101,00	2545,2	2444,2	0,3543	8,5776
0,004	302,131	0,0010040	34,803	121,41	2554,1	2432,7	0,4224	8,4747
0,005	306,05	0,0010052	28,196	137,77	2561,2	2423,4	0,4762	8,3952
0,006	309,33	0,0010064	23,742	151,50	2567,1	2415,6	0,5209	8,3305
0,008	314,68	0,0010084	18,106	173,87	2576,7	2402,8	0,5926	8,2289
0,010	318,98	0,0010102	14,676	191,84	2584,4	2392,6	0,6493	8,1505
0,012	322,60	0,0010119	12,364	206,94	2590,9	2384,0	0,6963	8,0867
0,015	327,15	0,0010140	10,025	225,98	2598,9	2372,9	0,7549	8,0089
0,020	333,24	0,0010172	7,6515	251,46	2609,6	2358,1	0,8321	7,9092
0,025	338,14	0,0010199	6,2060	271,99	2618,1	2346,1	0,8932	7,8321
0,030	342,27	0,0010223	5,2308	289,31	2625,3	2336,0	0,9441	7,7695
0,040	349,04	0,0010265	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
0,05	354,5	0,0010301	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951
0,06	359,1	0,0010333	2,7329	359,93	2653,6	2293,7	1,1454	7,5332
0,07	363,11	0,0010361	2,3658	376,77	2660,2	2283,4	1,1921	7,4811
0,08	366,66	0,0010387	2,0879	391,72	2666,0	2274,3	1,2330	7,4360
0,09	369,86	0,0010412	1,8701	405,21	2671,1	2265,9	1,2696	7,3963
0,10	372,78	0,0010434	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608
0,11	375,47	0,0010455	1,5501	428,84	2680,0	2251,2	1,3330	7,3288
0,12	377,96	0,0010476	1,4289	439,36	2683,8	2244,4	1,3609	7,2996
0,13	380,28	0,0010495	1,3258	449,19	2687,4	2238,2	1,3868	7,2728
0,14	382,47	0,0010513	1,2370	458,42	2690,8	2232,4	1,4109	7,2480
0,15	384,52	0,0010530	1,1597	467,13	2693,9	2226,8	1,4336	7,2248
0,16	386,47	0,0010547	1,0917	475,38	2696,8	2221,4	1,4550	7,2032
0,18	390,08	0,0010579	0,97775	490,70	2702,1	2211,4	1,4944	7,1638
0,20	393,38	0,0010608	0,88592	504,7	2706,9	2202,2	1,5301	7,1286

Ciśnienie p	Temperatura T	Objętość właściwa		Entalpia właściwa		Ciepło parowania r	Entropia właściwa	
		cieczy v'	pary v''	cieczy i'	pary i''		cieczy s'	pary s''
MPa	K	m^3/kg		kJ/kg			kJ/(kg K)	
0,22	396,42	0,0010636	0,81027	517,6	2711,3	2193,7	1,5628	7,0967
0,24	399,24	0,0010663	0,74684	529,6	2715,3	2185,7	1,5929	7,0676
0,26	401,88	0,0010688	0,69288	540,9	2719,0	2178,1	1,6209	7,0409
0,28	404,35	0,0010712	0,64636	551,4	2722,3	2170,9	1,6471	7,0161
0,30	406,69	0,0010735	0,60586	561,4	2725,5	2164,1	1,6717	6,9930
0,32	408,91	0,0010757	0,57027	570,9	2728,4	2157,5	1,6948	6,9714
0,34	411,01	0,0010779	0,53871	579,9	2731,2	2151,3	1,7168	6,9511
0,36	413,02	0,0010799	0,51056	588,5	2733,8	2145,3	1,7376	6,9320
0,38	414,94	0,0010819	0,48527	596,8	2736,2	2139,4	1,7575	6,9138
0,40	416,77	0,0010839	0,46242	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966
0,45	421,07	0,0010885	0,41392	623,2	2743,8	2120,6	1,8204	6,8570



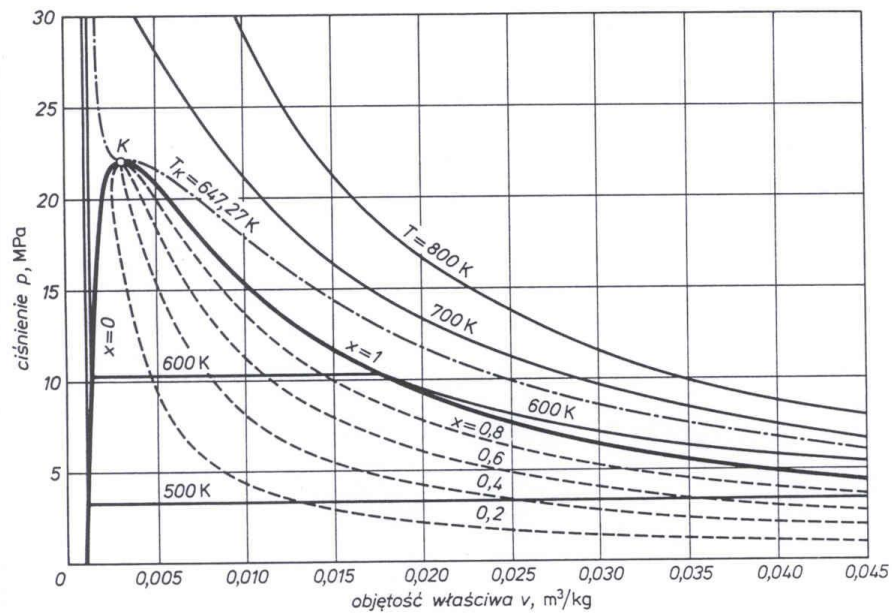
Rys. 67. Schemat kotła parowego

Woda zasilająca, z której wytwarzana jest para, doprowadzana jest do walczyka A_1 . Ponieważ woda ta ma temperaturę niższą od temperatury nasycenia, a tym samym większą gęstość, gromadzi się ona przy dnie walczyka, skąd sływa pionową rurą do podgrzewacza wody A_2 . Woda podgrzana w podgrzewaczu wody unosi się do góry i wpływa do walczyka przy zwierciadle cieczy. Woda o temperaturze nasycenia znajdująca się przy powierzchni cieczy paruje, a para nasyczona rurociągiem C przepływa do przegrzewacza pary B , skąd para przegrzana transportowana jest do odbiornika. Podgrzewacz wody, walec i przegrzewacz pary ogrzewane są spalinami powstającymi wskutek spalania paliwa w palenisku.



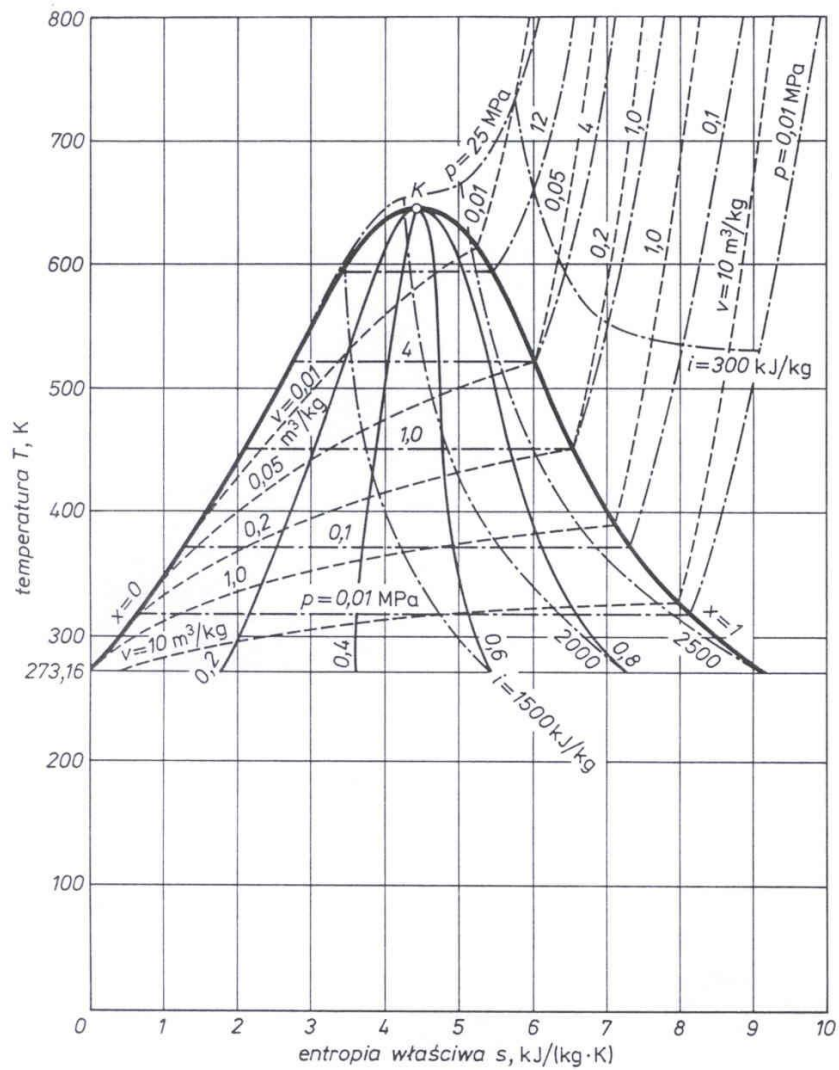
Rys. 5.25. Graficzne przedstawienie termicznego równania stanu

Parametry punktu krytycznego dla H_2O : $p_K = 220,6 \text{ bar}$; $T_K = 647 \text{ K}$ ($373,8^\circ\text{C}$)



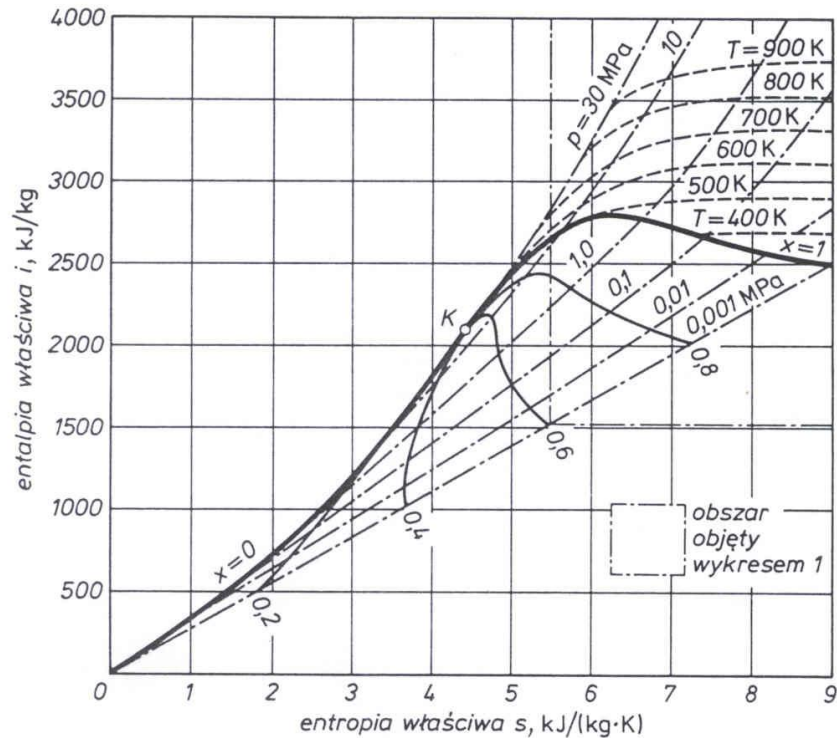
Rys. 5.24. Wykres p, v wody

W obszarze pary mokrej (tzn. od $x = 0$ do $x = 1$) izobary pokrywają się z odpowiednimi izotermami. Np. izobara 1,01325 bar pokrywa się z izotermą 100°C .



Rys. 5.27. Wykres T, s wody

Wykresy p - v oraz T - s pary wodnej są wykorzystywane podczas różnorodnych analiz teoretycznych.



Rys. 5.29. Wykres i, s wody

Wykres $i-s$ pary wodnej ma największe znaczenie praktyczne. Wykorzystywany jest on do obliczeń inżynierskich.

2. PRZEMIANY CHARAKTERYSTYCZNE PAR

2.1. Przemiana izobaryczna $p = idem$

Przemiana izobaryczna występuje m.in. w: kotłach parowych, nagrzewnicach parowych i skraplaczach.

Jednostkowa praca bezwzględna

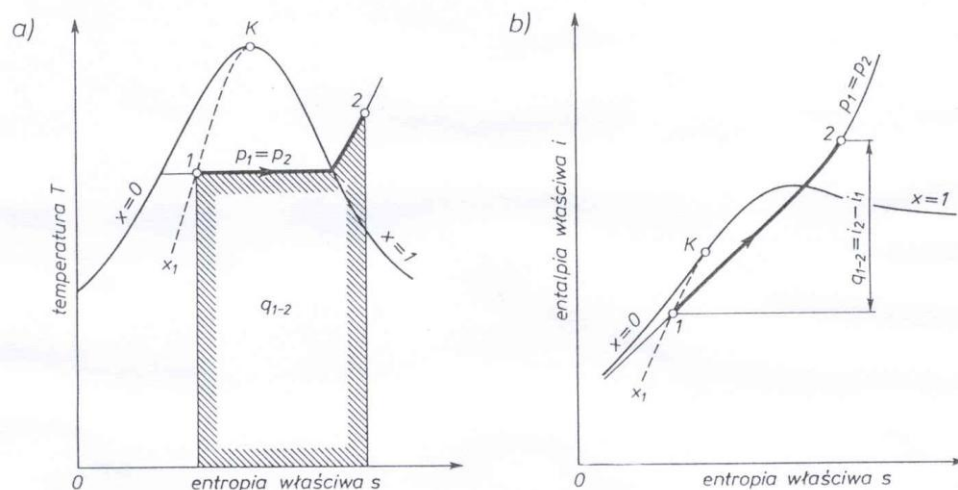
$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} p(v)dv = p(v_2 - v_1) \quad [\text{J/kg}] \quad (2.1)$$

Jednostkowa praca techniczna

$$l_{t1-2} = 0 \quad [\text{J/kg}] \quad (2.2)$$

Ponieważ $l_{t1-2} = 0$, na podstawie pierwszej zasady termodynamiki jednostkowe ciepło przemiany jest równe

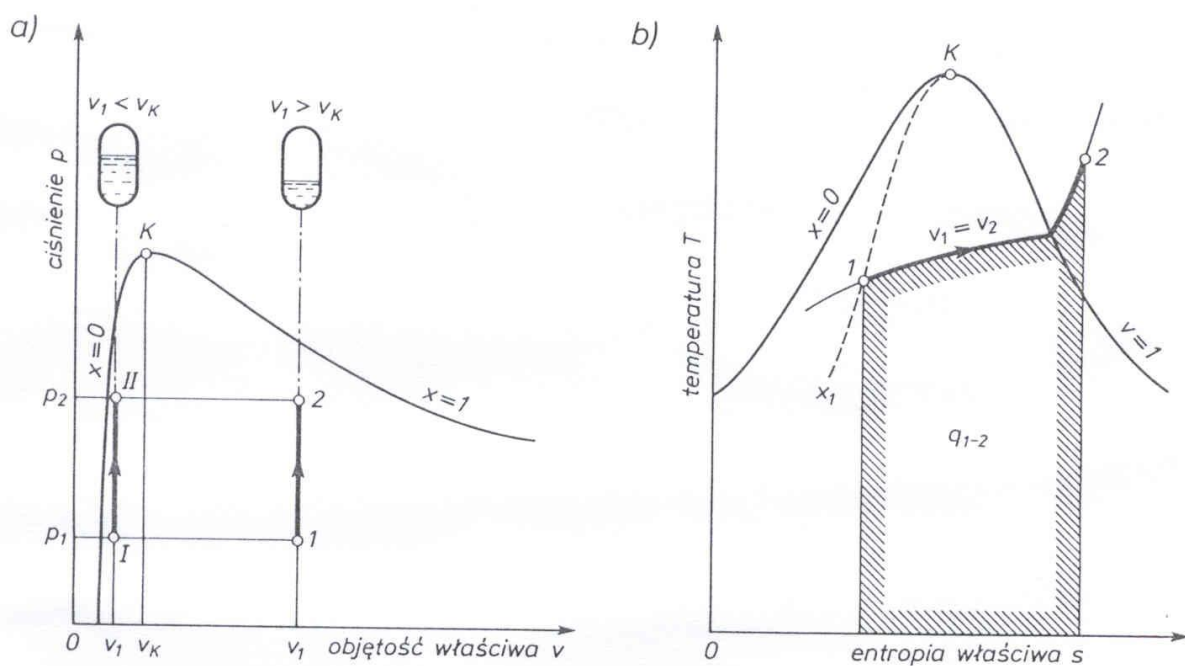
$$q_{1-2} = i_2 - i_1 \quad [\text{J/kg}] \quad (2.3)$$



Rys. 5.31. Izobara pary nasyconej i przegrzanej

Wartość entalpii właściwej i najczęściej odczytujemy z wykresu i - s lub z tablic parowych.

2.2. Przemiana izochoryczna $v = idem$



Rys. 5.30. Izochora pary nasyconej i przegrzanej

Ponieważ objętość czynnika się nie zmienia, jednostkowa praca bezwzględna jest równa

$$l_{1-2} = 0 \quad (2.4)$$

Jednostkową pracę techniczną można obliczyć ze wzoru

$$l_{1-2} = - \int_{p_1}^{p_2} v(p) dp = v(p_1 - p_2) \quad (2.5)$$

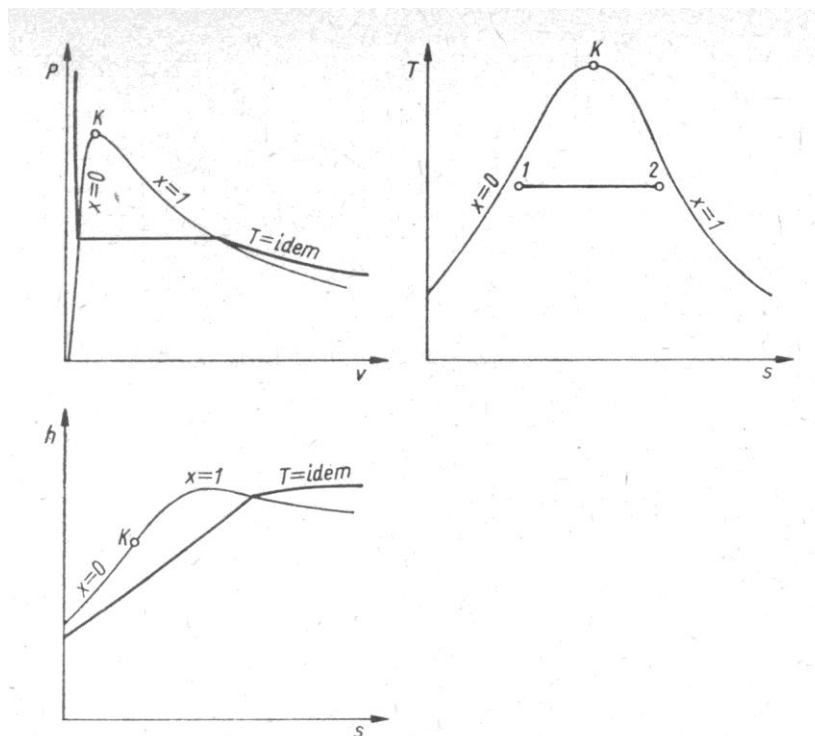
Na podstawie pierwszej zasady termodynamiki, przy $l_{1-2} = 0$, jednostkowe ciepło przemiany jest równe

$$q_{1-2} = u_2 - u_1 \quad (2.6)$$

gdzie energię wewnętrzną można wyznaczyć z równania

$$u = i - pv \quad (2.7)$$

2.3. Przemiana izotermiczna $T = idem$



Rys. Przemiana izotermiczna pary wodnej.

Jednostkową pracę bezwzględną można obliczyć z równania I ZT.

$$l_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2} \quad (2.8)$$

Podobnie jednostkową pracę techniczną

$$l_{t1-2} = q_{1-2} - \Delta i_{1-2} \quad (2.9)$$

Dla stałej temperatury czynnika jednostkowe ciepło przemiany można obliczyć z zależności

$$q_{1-2} = T\Delta s_{1-2} \quad (2.10)$$

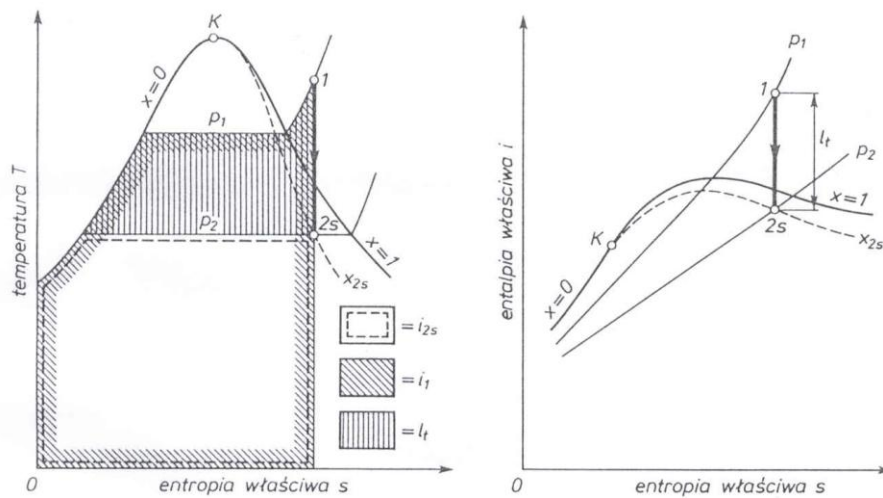
2.4. Adiaterna odwracalna - izentropa

$$dq = 0, q_{1-2} = 0, s_1 = s_2$$

Ponieważ $q_{1-2} = 0$, z równań pierwszej zasady termodynamiki dostajemy

$$l_{1-2} = -\Delta u_{1-2s} = u_1 - u_{2s} \quad (2.11)$$

$$l_{t1-2} = -\Delta i_{1-2s} = i_1 - i_{2s} \quad (2.12)$$



Rys. 5.32. Izentropowe rozprężanie pary przegrzanej

2.5. Adiaterna nieodwracalna $dq = 0, q_{1-2} = 0, \Delta s_{1-2} > 0$

Przemiana adiatermiczna występuje m.in. w turbinach parowych.

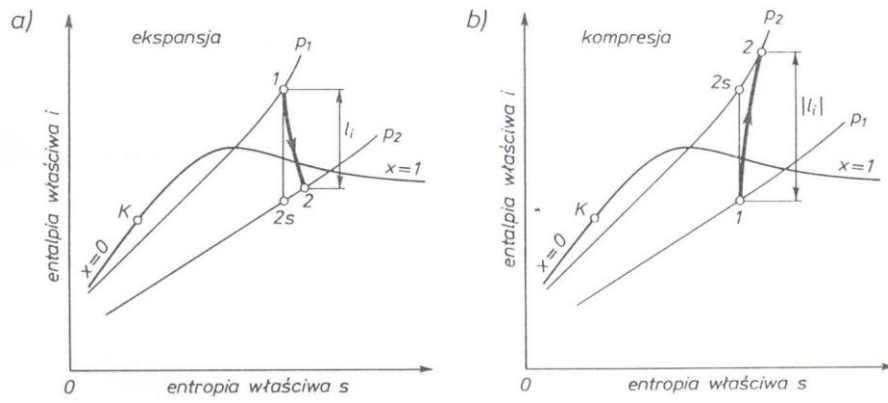
$$l_{i1-2} = -\Delta i_{1-2} = i_1 - i_2 \quad (2.13)$$

Sprawność wewnętrzna maszyny przepływowej

$$\text{- rozprężanie} \quad \eta_i = \frac{l_{i1-2}}{l_{t1-2s}} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2s}} \quad (2.14)$$

$$\text{- sprężanie} \quad \eta_i = \frac{|l_{t1-2s}|}{|l_{i1-2}|} = \frac{i_{2s} - i_1}{i_2 - i_1} \quad (2.15)$$

-



Rys. 5.34. Adiabaticzna nieodwracalna przemiana pary wodnej