

ΔΙΑΛΕΞΗ 6
23/11/2020

Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

4.2 Ενεργειακό Ισοζύγιο Κλειστών Συστημάτων

Το ενεργειακό ισοζύγιο για οποιοδήποτε σύστημα υφίσταται οποιαδήποτε διεργασία διατυπώθηκε ως (βλ. Κεφάλαιο 2)

$$\underbrace{E_{in} - E_{out}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά} \\ \text{ενέργειας μέσω θερμότητας,} \\ \text{έργου, και μάζας}}} = \underbrace{\Delta E_{system}}_{\substack{\text{Μεταβολή εσωτερικής,} \\ \text{κινητικής, δυναμικής κλπ.} \\ \text{ενέργειας}} \quad (\text{kJ}) \quad (4.11)$$

$$(Q_{in}, W_{in}, m_{in,}) - (Q_{out}, W_{out}, m_{out,}) = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

$$(Q_{in}, W_{in}, m_{in,}) - (Q_{out}, W_{out}, m_{out,}) = m(u_2 - u_1) + 1/2 m (u_2^2 - u_1^2) + m g (z_2 - z_1)$$

ΑΣΚΗΣΕΙΣ



A.M.:
 ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: Β. Β. Β. Β. 1
 ΜΑΘΗΜΑ: Θερμοδυναμική
 ΕΞΑΜΗΝΟ: 3
 ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ: class. αερίων α. γ.
 ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:

3.34
 3

R-134a
 $P_1 = 800 \text{ kPa}$
 $V_1 = 200 \text{ L} = 0.2 \text{ m}^3$

$V_{\text{max}} = 200 \text{ L}$
 $T_1 = 50^\circ\text{C}$
 $W = ?$
 $P_2 = 800 \text{ kPa}$
 $T_2 = 50^\circ\text{C}$

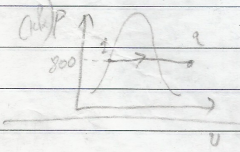
Μείνουν τα 200 λίτρα χωρίς να φύγει τίποτα χωρίς να γίνει αλλαγή δοχείου
 200L χωρητικότητας
 R-134a Το ετήσιο είναι
 ελεύθερο να κινείται και να συμπυκνώνει
 και είναι πάντα υδρατμός ατμού
 από 800 kPa. Το ψυκτικό
 διατηρείται στους 50°C. Να υπολογιστεί
 το έργο που παράγεται

$P_1 = 800 \text{ kPa}$
 κορ. υγρό } $\Rightarrow v_1 = v_f @ 800 \text{ kPa} = 0.0008454 \text{ m}^3/\text{kg}$

$P_2 = 800 \text{ kPa}$
 $T_2 = 50^\circ\text{C}$ } $\Rightarrow v_2 = 0.02846 \text{ m}^3/\text{kg}$

$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{0.2 \text{ m}^3}{0.0008454 \text{ m}^3/\text{kg}} = 236.6 \text{ kg}$

$W_{b,out} = \int P \cdot dV = P(V_2 - V_1) = m P(v_2 - v_1) = 5227 \text{ kJ}$
 $= 236.6 \text{ kg} \cdot 800 \text{ kPa} \cdot (0.02846 - 0.0008454) \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$



+ \Rightarrow από το έργο που παράγεται από το αέριο

* 1 kJ = 1 kPa · m³

TABLE A-12
Saturated refrigerant-134a—Pressure table

Press., MPa	Temp., T_{sat} , °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg		Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg · K)	
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Sat. vapor, s_g
0.06	-37.07	0.0007097	0.3100	3.41	206.12	3.46	221.27	224.72	0.0147	0.9520
0.08	-31.21	0.0007184	0.2366	10.41	209.46	10.47	217.92	228.39	0.0440	0.9447
0.10	-26.43	0.0007258	0.1917	16.22	212.18	16.29	215.06	231.35	0.0678	0.9395
0.12	-22.36	0.0007323	0.1614	21.23	214.50	21.32	212.54	233.86	0.0879	0.9354
0.14	-18.80	0.0007381	0.1395	25.66	216.52	25.77	210.27	236.04	0.1055	0.9322
0.16	-15.62	0.0007435	0.1229	29.66	218.32	29.78	208.18	237.97	0.1211	0.9295
0.18	-12.73	0.0007485	0.1098	33.31	219.94	33.45	206.26	239.71	0.1352	0.9273
0.20	-10.09	0.0007532	0.0993	36.69	221.43	36.84	204.46	241.30	0.1481	0.9253
0.24	-5.37	0.0007618	0.0834	42.77	224.07	42.95	201.14	244.09	0.1710	0.9222
0.28	-1.23	0.0007697	0.0719	48.18	226.38	48.39	198.13	246.52	0.1911	0.9197
0.32	2.48	0.0007770	0.0632	53.06	228.43	53.31	195.35	248.66	0.2089	0.9177
0.36	5.84	0.0007839	0.0564	57.54	230.28	57.82	192.76	250.58	0.2251	0.9160
0.4	8.93	0.0007904	0.0509	61.69	231.97	62.00	190.32	252.32	0.2399	0.9145
0.5	15.74	0.0008056	0.0409	70.93	235.64	71.33	184.74	256.07	0.2723	0.9117
0.6	21.58	0.0008196	0.0341	78.99	238.74	79.48	179.71	259.19	0.2999	0.9097
0.7	26.72	0.0008328	0.0292	86.19	241.42	86.78	175.07	261.85	0.3242	0.9080
0.8	31.33	0.0008454	0.0255	92.75	243.78	93.42	170.73	264.15	0.3459	0.9066
0.9	35.53	0.0008576	0.0226	98.79	245.88	99.56	166.62	266.18	0.3656	0.9054
1.0	39.39	0.0008695	0.0202	104.42	247.77	105.29	162.68	267.97	0.3838	0.9043
1.2	46.32	0.0008928	0.0166	114.69	251.03	115.76	155.23	270.99	0.4164	0.9023
1.4	52.43	0.0009159	0.0140	123.98	253.74	125.26	148.14	273.40	0.4453	0.9003
1.6	57.92	0.0009392	0.0121	132.52	256.00	134.02	141.31	275.33	0.4714	0.8982
1.8	62.91	0.0009631	0.0105	140.49	257.88	142.22	134.60	276.83	0.4954	0.8959
2.0	67.49	0.0009878	0.0093	148.02	259.41	149.99	127.95	277.94	0.5178	0.8934
2.5	77.59	0.0010562	0.0069	165.48	261.84	168.12	111.06	279.17	0.5667	0.8854
3.0	86.22	0.0011416	0.0053	181.88	262.16	185.30	92.71	278.01	0.6156	0.8735

R-134a

TABLE A-13
Superheated refrigerant-134a (Concluded)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)
P = 0.50 MPa (T_{sat} = 15.74°C)				P = 0.60 MPa (T_{sat} = 21.55°C)				P = 0.70 MPa (T_{sat} = 26.72°C)				
Sat.	0.04086	253.64	256.07	0.9117	0.03408	238.74	259.19	0.9097	0.02918	241.42	261.85	0.9080
20	0.04188	239.40	260.34	0.9264					0.02979	244.51	265.37	0.9197
30	0.04416	248.20	270.28	0.9597	0.03581	246.41	267.89	0.9388	0.03157	253.83	275.93	0.9539
40	0.04633	256.99	280.16	0.9918	0.03774	255.45	278.09	0.9719	0.03324	263.08	286.35	0.9867
50	0.04842	265.83	290.04	1.0229	0.03958	264.48	288.23	1.0037	0.03482	272.31	296.69	1.0182
60	0.05043	274.73	299.95	1.0531	0.04134	273.54	298.35	1.0346	0.03634	281.57	307.01	1.0487
70	0.05240	283.72	309.92	1.0825	0.04304	282.66	308.48	1.0645	0.03781	290.88	317.35	1.0784
80	0.05432	292.80	319.96	1.1114	0.04469	291.86	318.67	1.0938	0.03924	300.27	327.74	1.1074
90	0.05620	302.00	330.10	1.1397	0.04631	301.14	328.93	1.1225	0.04064	309.74	338.19	1.1358
100	0.05805	311.31	340.33	1.1675	0.04790	310.53	339.27	1.1505	0.04201	319.31	348.71	1.1637
110	0.05988	320.74	350.68	1.1949	0.04946	320.03	349.70	1.1781	0.04335	328.98	359.33	1.1910
120	0.06168	330.30	361.14	1.2218	0.05099	329.64	360.24	1.2053	0.04468	338.76	370.04	1.2179
130	0.06347	339.98	371.72	1.2484	0.05251	339.38	370.88	1.2320	0.04599	348.66	380.86	1.2444
140	0.06524	349.79	382.42	1.2746	0.05402	349.23	381.64	1.2584	0.04729	358.68	391.79	1.2706
150					0.05550	359.21	392.52	1.2844	0.04857	368.82	402.82	1.2963
160					0.05698	369.32	403.51	1.3100				
P = 0.80 MPa (T_{sat} = 31.33°C)				P = 0.90 MPa (T_{sat} = 35.53°C)				P = 1.00 MPa (T_{sat} = 39.39°C)				
Sat.	0.02547	243.78	264.15	0.9066	0.02255	245.88	266.18	0.9054	0.02020	247.77	267.97	0.9043
40	0.02691	252.13	273.66	0.9374	0.02325	250.32	271.25	0.9217	0.02029	248.39	268.68	0.9066
50	0.02846	261.62	284.39	0.9711	0.02472	260.09	282.34	0.9566	0.02171	258.48	280.19	0.9428
60	0.02992	271.04	294.98	1.0034	0.02609	269.72	293.21	0.9897	0.02301	268.35	291.36	0.9768
70	0.03131	280.45	305.50	1.0345	0.02738	279.30	303.94	1.0214	0.02423	278.11	302.34	1.0093
80	0.03264	289.89	316.00	1.0647	0.02861	288.87	314.62	1.0521	0.02538	287.82	313.20	1.0405
90	0.03393	299.37	326.52	1.0940	0.02980	298.46	325.28	1.0819	0.02649	297.53	324.01	1.0707
100	0.03519	308.93	337.08	1.1227	0.03095	308.11	335.96	1.1109	0.02755	307.27	334.82	1.1000
110	0.03642	318.57	347.71	1.1508	0.03207	317.82	346.68	1.1392	0.02858	317.06	345.65	1.1286
120	0.03762	328.31	358.40	1.1784	0.03316	327.62	357.47	1.1670	0.02959	326.93	356.52	1.1567
130	0.03881	338.14	369.19	1.2055	0.03423	337.52	368.33	1.1943	0.03058	336.88	367.46	1.1841
140	0.03997	348.09	380.07	1.2321	0.03529	347.51	379.27	1.2211	0.03154	346.82	378.46	1.2111
150	0.04113	358.15	391.05	1.2584	0.03633	357.61	390.31	1.2475	0.03250	357.06	389.56	1.2376
160	0.04227	368.32	402.14	1.2843	0.03736	367.82	401.44	1.2735	0.03344	367.31	400.74	1.2638
170	0.04340	378.61	413.33	1.3098	0.03838	378.14	412.68	1.2992	0.03436	377.66	412.02	1.2895
180	0.04452	389.02	424.63	1.3351	0.03939	388.57	424.02	1.3245	0.03528	388.12	423.40	1.3149
P = 1.20 MPa (T_{sat} = 46.32°C)				P = 1.40 MPa (T_{sat} = 52.43°C)				P = 1.60 MPa (T_{sat} = 57.92°C)				
Sat.	0.01663	251.03	270.99	0.9023	0.01405	253.74	273.40	0.9003	0.01208	256.00	275.33	0.8982
50	0.01712	254.98	275.52	0.9164					0.01233	258.48	278.20	0.9069
60	0.01835	265.42	287.44	0.9527	0.01495	262.17	283.10	0.9297	0.01340	269.89	291.33	0.9457
70	0.01947	275.59	298.96	0.9868	0.01603	272.87	295.31	0.9658	0.01435	280.78	303.74	0.9813
80	0.02051	285.62	310.24	1.0192	0.01701	283.29	307.10	0.9997	0.01521	291.39	315.72	1.0148
90	0.02150	295.59	321.39	1.0503	0.01792	293.55	318.63	1.0319	0.01601	301.84	327.46	1.0467
100	0.02244	305.54	332.47	1.0804	0.01878	303.73	330.02	1.0628	0.01677	312.20	339.04	1.0773
110	0.02335	315.50	343.52	1.1096	0.01960	313.88	341.32	1.0927	0.01750	322.53	350.53	1.1069
120	0.02423	325.51	354.58	1.1381	0.02039	324.05	352.59	1.1218	0.01820	332.87	361.99	1.1357
130	0.02508	335.58	365.68	1.1660	0.02115	334.25	363.86	1.1501	0.01887	343.24	373.44	1.1638
140	0.02592	345.73	376.83	1.1933	0.02189	344.50	375.15	1.1777	0.01953	353.66	384.91	1.1912
150	0.02674	355.95	388.04	1.2201	0.02262	354.82	386.49	1.2048	0.02017	364.15	396.43	1.2181
160	0.02754	366.27	399.33	1.2465	0.02333	365.22	397.89	1.2315	0.02080	374.71	407.99	1.2445
170	0.02834	376.69	410.70	1.2724	0.02403	375.71	409.36	1.2576	0.02142	385.35	419.62	1.2704
180	0.02912	387.21	422.16	1.2980	0.02472	386.29	420.90	1.2834	0.02203	396.08	431.33	1.2960
190					0.02541	396.96	432.53	1.3088	0.02263	406.90	443.11	1.3212
200					0.02608	407.73	444.24	1.3338				

R-134a

TABLE A-11

Saturated refrigerant-134a—Temperature table

Temp., T°C	Press., P _{sat} MPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg		Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)	
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Sat. vapor, s _g
-40	0.05164	0.0007055	0.3569	-0.04	204.45	0.00	222.88	222.88	0.0000	0.9560
-36	0.06332	0.0007113	0.2947	4.68	206.73	4.73	220.67	225.40	0.0201	0.9506
-32	0.07704	0.0007172	0.2451	9.47	209.01	9.52	218.37	227.90	0.0401	0.9456
-28	0.09305	0.0007233	0.2052	14.31	211.29	14.37	216.01	230.38	0.0600	0.9411
-26	0.10199	0.0007265	0.1882	16.75	212.43	16.82	214.80	231.62	0.0699	0.9390
-24	0.11160	0.0007296	0.1728	19.21	213.57	19.29	213.57	232.85	0.0798	0.9370
-22	0.12192	0.0007328	0.1590	21.68	214.70	21.77	212.32	234.08	0.0897	0.9351
-20	0.13299	0.0007361	0.1464	24.17	215.84	24.26	211.05	235.31	0.0996	0.9332
-18	0.14483	0.0007395	0.1350	26.67	216.97	26.77	209.76	236.53	0.1094	0.9315
-16	0.15748	0.0007428	0.1247	29.18	218.10	29.30	208.45	237.74	0.1192	0.9298
-12	0.18540	0.0007498	0.1068	34.25	220.36	34.39	205.77	240.15	0.1388	0.9267
-8	0.21704	0.0007569	0.0919	39.38	222.60	39.54	203.00	242.54	0.1583	0.9239
-4	0.25274	0.0007644	0.0794	44.56	224.84	44.75	200.15	244.90	0.1777	0.9213
0	0.29282	0.0007721	0.0689	49.79	227.06	50.02	197.21	247.23	0.1970	0.9190
4	0.33765	0.0007801	0.0600	55.08	229.27	55.35	194.19	249.53	0.2162	0.9169
8	0.38756	0.0007884	0.0525	60.43	231.46	60.73	191.07	251.80	0.2354	0.9150
12	0.44294	0.0007971	0.0460	65.83	233.63	66.18	187.85	254.03	0.2545	0.9132
16	0.50416	0.0008062	0.0405	71.29	235.78	71.69	184.52	256.22	0.2735	0.9116
20	0.57160	0.0008157	0.0358	76.80	237.91	77.26	181.09	258.35	0.2924	0.9102
24	0.64566	0.0008257	0.0317	82.37	240.01	82.90	177.55	260.45	0.3113	0.9089
26	0.68530	0.0008309	0.0298	85.18	241.05	85.75	175.73	261.48	0.3209	0.9082
28	0.72675	0.0008362	0.0281	88.00	242.08	88.61	173.89	262.50	0.3302	0.9076
30	0.77006	0.0008417	0.0265	90.84	243.10	91.49	172.00	263.50	0.3396	0.9070
32	0.81528	0.0008473	0.0250	93.70	244.12	94.39	170.09	264.48	0.3490	0.9064
34	0.86247	0.0008530	0.0236	96.58	245.12	97.31	168.14	265.45	0.3584	0.9058
36	0.91168	0.0008590	0.0223	99.47	246.11	100.25	166.15	266.40	0.3678	0.9053
38	0.96298	0.0008651	0.0210	102.38	247.09	103.21	164.12	267.33	0.3772	0.9047
40	1.0164	0.0008714	0.0199	105.30	248.06	106.19	162.05	268.24	0.3866	0.9041
42	1.0720	0.0008780	0.0188	108.25	249.02	109.19	159.94	269.14	0.3960	0.9035
44	1.1299	0.0008847	0.0177	111.22	249.96	112.22	157.79	270.01	0.4054	0.9030
48	1.2526	0.0008989	0.0159	117.22	251.79	118.35	153.33	271.68	0.4243	0.9017
52	1.3851	0.0009142	0.0142	123.31	253.55	124.58	148.66	273.24	0.4432	0.9004
56	1.5278	0.0009308	0.0127	129.51	255.23	130.93	143.75	274.68	0.4622	0.8990
60	1.6813	0.0009488	0.0114	135.82	256.81	137.42	138.57	275.99	0.4814	0.8973
70	2.1162	0.0010027	0.0086	152.22	260.15	154.34	124.08	278.43	0.5302	0.8918
80	2.6324	0.0010766	0.0064	169.88	262.14	172.71	106.41	279.12	0.5814	0.8827
90	3.2435	0.0011949	0.0046	189.82	261.34	193.69	82.63	276.32	0.6380	0.8655
100	3.9742	0.0015443	0.0027	218.60	248.49	224.74	34.40	259.13	0.7196	0.8117

Source for Tables A-8 through A-10: M. J. Moran and H. N. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 2nd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1992), pp. 710–15. Originally based on equations from D. P. Wilson and R. S. Basu, "Thermodynamic Properties of a New Stratospherically Safe Working Fluid—Refrigerant-134a," *ASHRAE Trans.* 94, Pt. 2 (1988), pp. 2095–118. Used with permission.

TABLE A-6

Superheated water

T °C	P = 0.01 MPa (45.81°C)*				P = 0.05 MPa (81.33°C)				P = 0.10 MPa (99.63°C)			
	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)
Sat. [†]	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.366	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.4	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
P = 0.20 MPa (120.23°C)												
Sat.	0.8857	2529.5	2706.7	7.1272	0.6058	2543.6	2725.3	6.9919	0.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	0.9596	2576.9	2768.8	7.2795	0.6339	2570.8	2761.0	7.0778	0.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	0.7163	2650.7	2865.6	7.3115	0.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	0.7964	2728.7	2967.6	7.5166	0.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	0.8753	2806.7	3069.3	7.7022	0.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	0.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	0.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.705	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1382
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.5	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
P = 0.50 MPa (151.86°C)												
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.3157	2567.4	2756.8	6.7600	0.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.3520	2638.9	2850.1	6.9665	0.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709	0.3938	2720.9	2957.2	7.1816	0.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599	0.4344	2801.0	3061.6	7.3724	0.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6329	0.4742	2881.2	3165.7	7.5464	0.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.5137	2962.1	3270.3	7.7079	0.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0673	0.5920	3127.6	3482.8	8.0021	0.4433	3126.0	3480.6	7.8673
600	0.8041	3299.6	3701.7	7.3522	0.6697	3299.1	3700.9	8.2674	0.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.7472	3477.0	3925.3	8.5107	0.5601	3476.2	3924.2	8.3770
800	0.9896	3662.1	4156.9	8.8211	0.8245	3661.8	4156.5	8.7367	0.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	0.9017	3853.4	4394.4	8.9486	0.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	0.9788	4051.5	4638.8	9.1485	0.7340	4051.0	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3391	0.7919	4255.6	4889.1	9.2050
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	0.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	0.9076	4681.8	5407.9	9.5575
P = 0.80 MPa (170.43°C)												
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.3157	2567.4	2756.8	6.7600	0.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.3520	2638.9	2850.1	6.9665	0.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709	0.3938	2720.9	2957.2	7.1816	0.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599	0.4344	2801.0	3061.6	7.3724	0.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6329	0.4742	2881.2	3165.7	7.5464	0.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.5137	2962.1	3270.3	7.7079	0.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0673	0.5920	3127.6	3482.8	8.0021	0.4433	3126.0	3480.6	7.8673
600	0.8041	3299.6	3701.7	7.3522	0.6697	3299.1	3700.9	8.2674	0.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.7472	3477.0	3925.3	8.5107	0.5601	3476.2	3924.2	8.3770
800	0.9896	3662.1	4156.9	8.8211	0.8245	3661.8	4156.5	8.7367	0.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	0.9017	3853.4	4394.4	8.9486	0.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	0.9788	4051.5	4638.8	9.1485	0.7340	4051.0	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3391	0.7919	4255.6	4889.1	9.2050
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	0.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	0.9076	4681.8	5407.9	9.5575

*The temperature in parentheses is the saturation temperature at the specified pressure.

†Properties of saturated vapor at the specified pressure.

TABLE A-5
Saturated water—Pressure table

H ₂ O	Specific volume, m ³ /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T _{sat} , °C	Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
Press., MPa												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2848.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2878.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-4
Saturated water—Temperature table

H ₂ O	Temp., T, °C	Sat. press., P _{sat} , kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg · K)			
			Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
	0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
	5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
	10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
	15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
	20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
	25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
	30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
	35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
	40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
	45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
	50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0760
	55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
	60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
	65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
	70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
	75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
	80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
	85	57.63	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
	90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4731
	95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
		Sat. press., MPa											
	100	0.10135	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	418.94	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
	105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
	110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
	115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
	120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
	125	0.2321	0.001065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
	130	0.2701	0.001070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
	135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
	140	0.3613	0.001080	0.5099	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
	145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
	150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
	155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
	160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
	165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
	170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
	175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6259
	180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
	185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
	190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
	195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2833	4.1863	6.4698

TABLE A-5
Saturated water—Pressure table

H ₂ O	Specific volume, m ³ /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T _{sat} , °C	Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
Press., MPa												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2848.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2878.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-5
Saturated water—Pressure table

H ₂ O	Specific volume, m ³ /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T _{sat} , °C	Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
Press., MPa												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2848.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2878.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-6
Superheated water (Continued)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)
P = 1.00 MPa (179.91°C)				P = 1.20 MPa (187.99°C)				P = 1.40 MPa (195.07°C)				
Sat.	0.19444	2583.6	2778.1	6.5865	0.16333	2588.8	2784.8	6.5233	0.14084	2592.8	2790.0	6.4693
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.16930	2612.8	2815.9	6.5898	0.14302	2603.1	2803.3	6.4975
250	0.2327	2709.9	2942.6	6.9247	0.19234	2704.2	2935.0	6.8294	0.16350	2698.3	2927.2	6.7467
300	0.2579	2793.2	3051.2	7.1229	0.2138	2789.2	3045.8	7.0317	0.18228	2785.2	3040.4	6.9534
350	0.2825	2875.2	3157.7	7.3011	0.2345	2872.2	3153.6	7.2121	0.2003	2869.2	3149.5	7.1360
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2548	2954.9	3260.7	7.3774	0.2178	2952.5	3257.5	7.3026
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2946	3122.8	3476.3	7.6759	0.2521	3121.1	3474.1	7.6027
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.3339	3295.6	3696.3	7.9435	0.2860	3294.4	3694.8	7.8710
700	0.4476	3475.3	3923.1	8.2731	0.3729	3474.4	3922.0	8.1881	0.3195	3473.6	3920.8	8.1160
800	0.4943	3660.4	4154.7	8.4996	0.4118	3659.7	4153.8	8.4148	0.3528	3659.0	4153.0	8.3431
900	0.5407	3852.2	4392.9	8.7118	0.4505	3851.6	4392.2	8.6272	0.3861	3851.1	4391.5	8.5556
1000	0.5871	4050.5	4637.6	8.9119	0.4892	4050.0	4637.0	8.8274	0.4192	4049.5	4636.4	8.7559
1100	0.6335	4255.1	4888.6	9.1017	0.5278	4254.6	4888.0	9.0172	0.4524	4254.1	4887.5	8.9457
1200	0.6798	4465.6	5145.4	9.2822	0.5665	4465.1	5144.9	9.1977	0.4855	4464.7	5144.4	9.1262
1300	0.7261	4681.3	5407.4	9.4543	0.6051	4680.9	5407.0	9.3698	0.5186	4680.4	5406.5	9.2981
P = 1.60 MPa (201.41°C)				P = 1.80 MPa (207.15°C)				P = 2.00 MPa (212.42°C)				
Sat.	0.12380	2596.0	2794.0	6.4218	0.11042	2598.4	2797.1	6.3794	0.09963	2600.3	2799.5	6.3409
225	0.13287	2644.7	2857.3	6.5518	0.11673	2636.6	2846.7	6.4908	0.10377	2628.3	2835.8	6.4147
250	0.14184	2692.3	2919.2	6.6732	0.12497	2686.0	2911.0	6.6066	0.11144	2679.6	2902.5	6.5453
300	0.15862	2781.1	3034.8	6.8844	0.14021	2776.9	3029.2	6.8226	0.12547	2772.6	3023.5	6.7684
350	0.17456	2866.1	3145.4	7.0694	0.15457	2863.0	3141.2	7.0100	0.13857	2859.8	3137.0	6.9563
400	0.19005	2950.1	3254.2	7.2374	0.16847	2947.7	3250.9	7.1794	0.15120	2945.2	3247.6	7.1271
500	0.2203	3119.5	3472.0	7.5390	0.19550	3117.9	3469.8	7.4825	0.17568	3116.2	3467.6	7.4317
600	0.2500	3293.3	3693.2	7.8080	0.2220	3292.1	3691.7	7.7523	0.19960	3290.9	3690.1	7.7024
700	0.2794	3472.7	3919.7	8.0535	0.2482	3471.8	3918.5	7.9983	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487
800	0.3086	3658.3	4152.1	8.2908	0.2742	3657.6	4151.2	8.2258	0.2467	3657.0	4150.3	8.1765
900	0.3377	3850.5	4390.8	8.4935	0.3001	3849.9	4390.1	8.4386	0.2700	3849.3	4389.4	8.3895
1000	0.3668	4049.0	4635.8	8.6938	0.3260	4048.5	4635.2	8.6391	0.2933	4048.0	4634.6	8.5901
1100	0.3958	4253.7	4887.0	8.8937	0.3518	4253.2	4886.4	8.8290	0.3166	4252.7	4885.9	8.7600
1200	0.4248	4464.2	5143.9	9.0643	0.3776	4463.7	5143.4	9.0096	0.3398	4463.3	5142.9	8.9607
1300	0.4538	4679.9	5406.0	9.2364	0.4034	4679.5	5405.6	9.1818	0.3631	4679.0	5405.1	9.1329
P = 2.50 MPa (223.99°C)				P = 3.00 MPa (233.90°C)				P = 3.50 MPa (242.60°C)				
Sat.	0.07998	2603.1	2803.1	6.2575	0.06668	2604.1	2804.2	6.1869	0.05707	2603.7	2803.4	6.1253
225	0.08027	2605.6	2806.3	6.2639								
250	0.08700	2662.6	2880.1	6.4085	0.07058	2644.0	2855.8	6.2872	0.05872	2623.7	2829.2	6.1749
300	0.09890	2761.6	3008.8	6.6438	0.08114	2750.1	2993.5	6.5390	0.06842	2738.0	2977.5	6.4461
350	0.10976	2851.9	3126.3	6.8403	0.09053	2843.7	3115.3	6.7428	0.07678	2835.3	3104.0	6.6579
400	0.12010	2939.1	3239.3	7.0148	0.09936	2932.8	3230.9	6.9212	0.08453	2926.4	3222.3	6.8405
450	0.13014	3025.5	3350.8	7.1746	0.10787	3020.4	3344.0	7.0834	0.09198	3015.3	3337.2	7.0052
500	0.13993	3112.1	3462.1	7.3234	0.11619	3108.0	3456.5	7.2339	0.09918	3103.0	3450.9	7.1572
600	0.15930	3288.0	3686.3	7.5960	0.13243	3285.0	3682.3	7.5065	0.11324	3282.1	3678.4	7.4339
700	0.17832	3468.7	3914.5	7.8435	0.14838	3466.5	3911.7	7.7571	0.12699	3464.3	3908.9	7.6837
800	0.19716	3655.3	4148.2	8.0720	0.16414	3653.5	4145.9	7.9862	0.14056	3651.8	4143.7	7.9134
900	0.21590	3847.9	4387.6	8.2853	0.17980	3846.5	4385.9	8.1999	0.15402	3845.0	4384.1	8.1276
1000	0.2346	4046.7	4633.1	8.4861	0.19541	4045.4	4631.6	8.4009	0.16743	4044.1	4630.1	8.3288
1100	0.2532	4251.5	4884.6	8.6782	0.21098	4250.3	4883.3	8.5912	0.18080	4249.2	4881.9	8.5192
1200	0.2718	4462.1	5141.7	8.8569	0.22652	4460.9	5140.5	8.7720	0.19415	4459.8	5139.3	8.7000
1300	0.2905	4677.8	5404.0	9.0291	0.24206	4676.6	5402.8	8.9442	0.20749	4675.5	5401.7	8.8723

H₂O

TABLE A-5
Saturated water—Pressure table

H ₂ O	Specific volume, m ³ /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T _{sat} , °C	Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
Press., MPa												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2848.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2878.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-5
Saturated water—Pressure table

H ₂ O	Specific volume, m ³ /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T _{sat} , °C	Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
Press., MPa												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2848.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2878.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-6
Superheated water (Continued)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)
P = 1.00 MPa (179.91°C)				P = 1.20 MPa (187.99°C)				P = 1.40 MPa (195.07°C)				
Sat.	0.19444	2583.6	2778.1	6.5865	0.16333	2588.8	2784.8	6.5233	0.14084	2592.8	2790.0	6.4693
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.16930	2612.8	2815.9	6.5898	0.14302	2603.1	2803.3	6.4975
250	0.2327	2709.9	2942.6	6.9247	0.19234	2704.2	2935.0	6.8294	0.16350	2698.3	2927.2	6.7467
300	0.2579	2793.2	3051.2	7.1229	0.2138	2789.2	3045.8	7.0317	0.18228	2785.2	3040.4	6.9534
350	0.2825	2875.2	3157.7	7.3011	0.2345	2872.2	3153.6	7.2121	0.2003	2869.2	3149.5	7.1360
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2548	2954.9	3260.7	7.3774	0.2178	2952.5	3257.5	7.3026
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2946	3122.8	3476.3	7.6759	0.2521	3121.1	3474.1	7.6027
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.3339	3295.6	3696.3	7.9435	0.2860	3294.4	3694.8	7.8710
700	0.4476	3475.3	3923.1	8.2731	0.3729	3474.4	3922.0	8.1881	0.3195	3473.6	3920.8	8.1160
800	0.4943	3660.4	4154.7	8.4996	0.4118	3659.7	4153.8	8.4148	0.3528	3659.0	4153.0	8.3431
900	0.5407	3852.2	4392.9	8.7118	0.4505	3851.6	4392.2	8.6272	0.3861	3851.1	4391.5	8.5556
1000	0.5871	4050.5	4637.6	8.9119	0.4892	4050.0	4637.0	8.8274	0.4192	4049.5	4636.4	8.7559
1100	0.6335	4255.1	4888.6	9.1017	0.5278	4254.6	4888.0	9.0172	0.4524	4254.1	4887.5	8.9457
1200	0.6798	4465.6	5145.4	9.2822	0.5665	4465.1	5144.9	9.1977	0.4855	4464.7	5144.4	9.1262
1300	0.7261	4681.3	5407.4	9.4543	0.6051	4680.9	5407.0	9.3698	0.5186	4680.4	5406.5	9.2981
P = 1.60 MPa (201.41°C)				P = 1.80 MPa (207.15°C)				P = 2.00 MPa (212.42°C)				
Sat.	0.12380	2596.0	2794.0	6.4218	0.11042	2598.4	2797.1	6.3794	0.09963	2600.3	2799.5	6.3409
225	0.13287	2644.7	2857.3	6.5518	0.11673	2636.6	2846.7	6.4908	0.10377	2628.3	2835.8	6.4147
250	0.14184	2692.3	2919.2	6.6732	0.12497	2686.0	2911.0	6.6066	0.11144	2679.6	2902.5	6.5453
300	0.15862	2781.1	3034.8	6.8844	0.14021	2776.9	3029.2	6.8226	0.12547	2772.6	3023.5	6.7684
350	0.17456	2866.1	3145.4	7.0694	0.15457	2863.0	3141.2	7.0100	0.13857	2859.8	3137.0	6.9563
400	0.19005	2950.1	3254.2	7.2374	0.16847	2947.7	3250.9	7.1794	0.15120	2945.2	3247.6	7.1271
500	0.2203	3119.5	3472.0	7.5390	0.19550	3117.9	3469.8	7.4825	0.17568	3116.2	3467.6	7.4317
600	0.2500	3293.3	3693.2	7.8080	0.2220	3292.1	3691.7	7.7523	0.19960	3290.9	3690.1	7.7024
700	0.2794	3472.7	3919.7	8.0535	0.2482	3471.8	3918.5	7.9983	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487
800	0.3086	3658.3	4152.1	8.2908	0.2742	3657.6	4151.2	8.2258	0.2467	3657.0	4150.3	8.1765
900	0.3377	3850.5	4390.8	8.4935	0.3001	3849.9	4390.1	8.4386	0.2700	3849.3	4389.4	8.3895
1000	0.3668	4049.0	4635.8	8.6938	0.3260	4048.5	4635.2	8.6391	0.2933	4048.0	4634.6	8.5901
1100	0.3958	4253.7	4887.0	8.8937	0.3518	4253.2	4886.4	8.8290	0.3166	4252.7	4885.9	8.7800
1200	0.4248	4464.2	5143.9	9.0643	0.3776	4463.7	5143.4	9.0096	0.3398	4463.3	5142.9	8.9607
1300	0.4538	4679.9	5406.0	9.2364	0.4034	4679.5	5405.6	9.1818	0.3631	4679.0	5405.1	9.1329
P = 2.50 MPa (223.99°C)				P = 3.00 MPa (233.90°C)				P = 3.50 MPa (242.60°C)				
Sat.	0.07998	2603.1	2803.1	6.2575	0.06668	2604.1	2804.2	6.1869	0.05707	2603.7	2803.4	6.1253
225	0.08027	2605.6	2806.3	6.2639								
250	0.08700	2662.6	2880.1	6.4085	0.07058	2644.0	2855.8	6.2872	0.05872	2623.7	2829.2	6.1749
300	0.09890	2761.6	3008.8	6.6438	0.08114	2750.1	2993.5	6.5390	0.06842	2738.0	2977.5	6.4461
350	0.10976	2851.9	3126.3	6.8403	0.09053	2843.7	3115.3	6.7428	0.07678	2835.3	3104.0	6.6579
400	0.12010	2939.1	3239.3	7.0148	0.09936	2932.8	3230.9	6.9212	0.08453	2926.4	3222.3	6.8405
450	0.13014	3025.5	3350.8	7.1746	0.10787	3020.4	3344.0	7.0834	0.09198	3015.3	3337.2	7.0052
500	0.13993	3112.1	3462.1	7.3234	0.11619	3108.0	3456.5	7.2339	0.09918	3103.0	3450.9	7.1572
600	0.15930	3288.0	3686.3	7.5960	0.13243	3285.0	3682.3	7.5065	0.11324	3282.1	3678.4	7.4339
700	0.17832	3468.7	3914.5	7.8435	0.14838	3466.5	3911.7	7.7571	0.12699	3464.3	3908.9	7.6837
800	0.19716	3655.3	4148.2	8.0720	0.16414	3653.5	4145.9	7.9862	0.14056	3651.8	4143.7	7.9134
900	0.21590	3847.9	4387.6	8.2853	0.17980	3846.5	4385.9	8.1999	0.15402	3845.0	4384.1	8.1276
1000	0.2346	4046.7	4633.1	8.4861	0.19541	4045.4	4631.6	8.4009	0.16743	4044.1	4630.1	8.3288
1100	0.2532	4251.5	4884.6	8.6782	0.21098	4250.3	4883.3	8.5912	0.18080	4249.2	4881.9	8.5192
1200	0.2718	4462.1	5141.7	8.8569	0.22652	4460.9	5140.5	8.7720	0.19415	4459.8	5139.3	8.7000
1300	0.2905	4677.8	5404.0	9.0291	0.24206	4676.6	5402.8	8.9442	0.20749	4675.5	5401.7	8.8723

H₂O

TABLE A-5
Saturated water—Pressure table

H ₂ O	Specific volume, m ³ /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T _{sat} , °C	Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
Press., MPa												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2848.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2878.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-6

Superheated water

T °C	P = 0.01 MPa (45.81°C)*				P = 0.05 MPa (81.33°C)				P = 0.10 MPa (99.63°C)			
	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)
Sat. [†]	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.366	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.4	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
P = 0.20 MPa (120.23°C)												
Sat.	0.8857	2529.5	2706.7	7.1272	0.6058	2543.6	2725.3	6.9919	0.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	0.9596	2576.9	2768.8	7.2795	0.6339	2570.8	2761.0	7.0778	0.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	0.7163	2650.7	2865.6	7.3115	0.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	0.7964	2728.7	2967.6	7.5166	0.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	0.8753	2806.7	3069.3	7.7022	0.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	0.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	0.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.705	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1382
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.5	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
P = 0.50 MPa (151.86°C)												
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.3157	2567.4	2756.8	6.7600	0.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.3520	2638.9	2850.1	6.9665	0.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709	0.3938	2720.9	2957.2	7.1816	0.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599	0.4344	2801.0	3061.6	7.3724	0.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6329	0.4742	2881.2	3165.7	7.5464	0.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.5137	2962.1	3270.3	7.7079	0.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0673	0.5920	3127.6	3482.8	8.0021	0.4433	3126.0	3480.6	7.8673
600	0.8041	3299.6	3701.7	7.3522	0.6697	3299.1	3700.9	8.2674	0.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.7472	3477.0	3925.3	8.5107	0.5601	3476.2	3924.2	8.3770
800	0.9896	3662.1	4156.9	8.8211	0.8245	3661.8	4156.5	8.7367	0.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	0.9017	3853.4	4394.4	8.9486	0.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	0.9788	4051.5	4638.8	9.1485	0.7340	4051.0	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3381	0.7919	4255.6	4889.1	9.2050
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	0.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	0.9076	4681.8	5407.9	9.5575
P = 0.80 MPa (170.43°C)												
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.3157	2567.4	2756.8	6.7600	0.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.3520	2638.9	2850.1	6.9665	0.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709	0.3938	2720.9	2957.2	7.1816	0.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599	0.4344	2801.0	3061.6	7.3724	0.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6329	0.4742	2881.2	3165.7	7.5464	0.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.5137	2962.1	3270.3	7.7079	0.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0673	0.5920	3127.6	3482.8	8.0021	0.4433	3126.0	3480.6	7.8673
600	0.8041	3299.6	3701.7	7.3522	0.6697	3299.1	3700.9	8.2674	0.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.7472	3477.0	3925.3	8.5107	0.5601	3476.2	3924.2	8.3770
800	0.9896	3662.1	4156.9	8.8211	0.8245	3661.8	4156.5	8.7367	0.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	0.9017	3853.4	4394.4	8.9486	0.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	0.9788	4051.5	4638.8	9.1485	0.7340	4051.0	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3381	0.7919	4255.6	4889.1	9.2050
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	0.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	0.9076	4681.8	5407.9	9.5575

*The temperature in parentheses is the saturation temperature at the specified pressure.

†Properties of saturated vapor at the specified pressure.

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table

H ₂ O	Temp., T, °C	Sat. press., P _{sat} , kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg · K)		
			Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0760
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.63	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4731
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
	Sat. press., MPa											
100	0.10135	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	418.94	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001080	0.5099	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2033.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6259
180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2833	4.1863	6.4698

TABLE A-17

Ideal-gas properties of air

T K	h kJ/kg	P	u kJ/kg	v_r	s^o kJ/(kg·K)	T K	h kJ/kg	P	u kJ/kg	v_r	s^o kJ/(kg·K)
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751

Air

TABLE A-5
Saturated water—Pressure table

H ₂ O	Specific volume, m ³ /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T _{sat} , °C	Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
Press., MPa												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2848.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2878.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-5
Saturated water—Pressure table

H ₂ O	Specific volume, m ³ /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T _{sat} , °C	Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
Press., MPa												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table

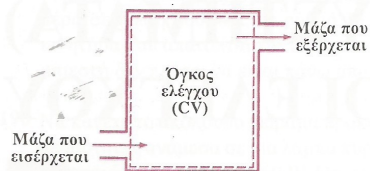
Temp., T, °C	Sat. press., P _{sat} , kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg · K)		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0767
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.63	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
	Sat. press., MPa											
100	0.10135	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	418.94	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001080	0.5099	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6259
180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698

ΑΝΟΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

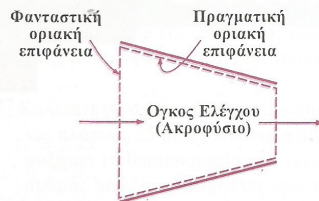
Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

4-1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΟΓΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

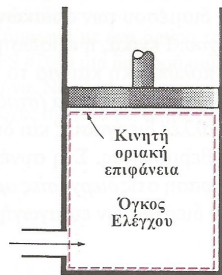
Ενας μεγάλος αριθμός προβλημάτων της μηχανικής έχει σχέση με τη ροή μάζας προς και από ένα σύστημα και εξετάζονται χρησιμοποιώντας το πρότυπο του *όγκου ελέγχου* (Σχήμα 4-1). Οι βραστήρες νερού, τα καλοριφέρ των αυτοκινήτων, οι στρόβιλοι και οι συμπιεστές είναι διατάξεις στις οποίες λαμβάνει χώρα ροή μάζας και θα πρέπει να αναλύονται ως όγκοι ελέγχου (ανοιχτά συστήματα) και όχι ως μάζες ελέγχου (κλειστά



Σχήμα 4-1 Σ'έναν όγκο ελέγχου η μάζα μπορεί να εισέρχεται και να εξέρχεται.



Σχήμα 4-2 Πραγματικές και φανταστικές οριακές επιφάνειες ενός όγκου ελέγχου.



Σχήμα 4-3 Ενας όγκος ελέγχου μπορεί να περιλαμβάνει κινητές οριακές επιφάνειες.

συστήματα). Γενικά, ως όγκος ελέγχου μπορεί να επιλεγεί οποιαδήποτε περιοχή του χώρου και δεν υπάρχουν σταθεροί κανόνες για την επιλογή τους. Η σωστή όμως επιλογή διευκολύνει σημαντικά την ανάλυση. Εάν, για παράδειγμα, εξετάζεται η ροή αέρα διαμέσου ενός ακροφυσίου, τότε μια κατάλληλη επιλογή για τον όγκο ελέγχου είναι η περιοχή μέσα στο ακροφύσιο.

Οι οριακές επιφάνειες ενός όγκου ελέγχου ονομάζονται *επιφάνειες ελέγχου* και μπορεί να είναι πραγματικές ή φανταστικές. Στο ακροφύσιο, η εσωτερική επιφάνεια του στομίου του αποτελεί το πραγματικό μέρος της επιφάνειας ελέγχου, ενώ η είσοδος και η έξοδος του ακροφυσίου αποτελούν το φανταστικό μέρος (Σχήμα 4-2).

Ο όγκος ελέγχου μπορεί να έχει σταθερό μέγεθος και σχήμα, όπως λ.χ. στα ακροφύσια ή να περιλαμβάνει κινητές οριακές επιφάνειες, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4-3. Οι περισσότεροι όγκοι ελέγχου έχουν σταθερές οριακές επιφάνειες, με αποτέλεσμα να μην εμπλέκουν έργο ογκομεταβολής (δηλαδή έργο μετακίνησης οριακών επιφανειών). Επίσης, ο όγκος ελέγχου μπορεί να εμπλέκει εκτός από τη αλληλεπίδραση μάζας και αλληλεπιδράσεις θερμότητας ή έργου ανάλογα με ό,τι ισχύει για ένα κλειστό σύστημα.

Οι όροι *μόνιμος* και *ομοιόμορφος* χρησιμοποιούνται αρκετά στο παρόν κεφάλαιο και είναι σημαντικό να κατανοηθούν σωστά. Ο όρος *μόνιμος* σημαίνει *αμετάβλητος με το χρόνο*. Το αντίθετο του *μόνιμος* είναι *μη-μόνιμος* ή *μεταβατικός*. Επίσης, ο όρος *ομοιόμορφος* σημαίνει ότι δεν υπάρ-

χει μεταβολή μιας ιδιότητας με τη θέση μέσα σε μια ορισμένη περιοχή. Οι όροι αυτοί χρησιμοποιούνται και στην καθομιλουμένη με την ίδια έννοια (μόνιμος φίλος, ομοιόμορφη κατανομή κ.α.).

Παρακάτω παρουσιάζεται μια γενική αναφορά στις αρχές διατήρησης της μάζας και της ενέργειας για τους όγκους ελέγχου (ανοικτά συστήματα).

Αρχή Διατήρησης της Μάζας

Η αρχή διατήρησης της μάζας είναι από τις πιο θεμελιώδεις αρχές στη φύση. Η έννοια της είναι πολύ οικεία και η κατανόηση της δεν είναι δύσκολη. Δεν είναι απαραίτητο να είναι κάποιος μηχανικός για να γνωρίζει πόσο λαδόξυδο θα φτιάξει, εάν αναμίξει 100 g λάδι με 25 g ξύδι. Ακόμη και οι χημικές εξισώσεις γράφονται με βάση την αρχή διατήρησης της μάζας (Σχήμα 4-4). Όταν αντιδρούν 16 kg οξυγόνου με 2 kg υδρογόνου, σχηματίζονται 18 kg νερού. Κατά την ηλεκτρόλυση, το νερό θα διαχωριστεί πάλι σε 2 kg υδρογόνου και 16 kg οξυγόνου.

Η μάζα, όπως και η ενέργεια, είναι μια ιδιότητα που διατηρείται και δεν είναι δυνατό να παραχθεί ή να καταστραφεί. Παρόλα αυτά, η ενέργεια E μπορεί να μετατραπεί σε μάζα m και αντίστροφα, σύμφωνα με τη γνωστή εξίσωση του Einstein:

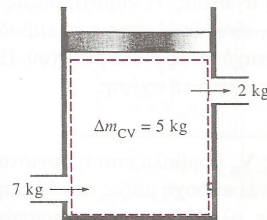
$$E = mc^2$$

όπου με c παριστάνεται η ταχύτητα του φωτός. Η εξίσωση αυτή δηλώνει ότι η μάζα ενός συστήματος θα μεταβληθεί, όταν μεταβληθεί η ενέργειά του. Για όλες όμως τις συνηθισμένες διεργασίες, εκτός των πυρηνικών αντιδράσεων, η μεταβολή της μάζας είναι τόσο μικρή που είναι αδύνατο να προσδιοριστεί, ακόμη και με τα πιο ευαίσθητα όργανα. Για παράδειγμα, όταν 1 kg νερού σχηματίζεται από οξυγόνο και υδρογόνο, η ενέργεια που απελευθερώνεται είναι 15879 J και αντιστοιχεί σε μια ποσότητα μάζας ίση με 1.76×10^{-10} kg. Μια τόσο μικρή ποσότητα μάζας είναι πέρα από την ακρίβεια που απαιτείται σ' όλους τους υπολογισμούς της μηχανικής και γι' αυτό αγνοείται.

Η αρχή διατήρησης της μάζας χρησιμοποιείται έμμεσα και στα κλειστά συστήματα εξαιτίας της απαίτησης να παραμένει η μάζα σταθερή κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας σ' ένα κλειστό σύστημα. Όμως, στους όγκους ελέγχου η μάζα μπορεί να διαπεράσει τις οριακές επιφάνειες του συστήματος. Για το λόγο αυτό πρέπει να παρακολουθείται το ποσό της μάζας που εισέρχεται ή εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου (Σχήμα 4-5).



Σχήμα 4-4 Η μάζα διατηρείται ακόμα και κατά τη διάρκεια χημικών αντιδράσεων.



Σχήμα 4-5 Η αρχή διατήρησης της μάζας για όγκο ελέγχου.

Η αρχή διατήρησης της μάζας μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: η *συνολική μάζα που μεταφέρεται προς ή από ένα σύστημα κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας είναι ίση με τη συνολική μεταβολή (αύξηση ή μείωση) της ολικής μάζας του συστήματος κατά τη διεργασία αυτή*. Δηλαδή:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Ολική μάζα} \\ \text{που εισέρχεται} \\ \text{στον όγκο} \\ \text{ελέγχου} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Ολική μάζα} \\ \text{που εξέρχεται} \\ \text{από τον όγκο} \\ \text{ελέγχου} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Καθαρή} \\ \text{μεταβολή της} \\ \text{μάζας του} \\ \text{όγκου ελέγχου} \end{array} \right)$$

$$m_{\text{in}} - m_{\text{out}} = \Delta m_{\text{system}} \quad (\text{kg}) \quad (4-1)$$

ή με τη μορφή ρυθμών:

$$\dot{m}_{\text{in}} - \dot{m}_{\text{out}} = \Delta \dot{m}_{\text{system}} \quad (\text{kg/s}) \quad (4-2)$$

όπου με \dot{m}_{in} και \dot{m}_{out} παριστάνονται οι ολικοί ρυθμοί ροής μάζας προς και από το σύστημα, ενώ με $\Delta \dot{m}_{\text{system}}$ (ή dm_{system}/dt) παριστάνεται ο ρυθμός μεταβολής της μάζας μέσα στα όρια του συστήματος. Οι παραπάνω σχέσεις αναφέρονται συχνά και ως **ισοζύγια μάζας** και μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε είδος συστήματος και σε οποιαδήποτε διεργασία.

Η αρχή διατήρησης της μάζας βασίζεται σε πειραματικές παρατηρήσεις και απαιτεί να λαμβάνεται υπόψη και η πιο μικρή μάζα που εμπλέκεται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας.

Ένας καταθέτης που ελέγχει το βιβλιάριο των λογαριασμών του (μ'άλλα λόγια ελέγχει τη διατήρηση των χρημάτων του παρακολουθώντας τις αναλήψεις και τις καταθέσεις) δε θα έχει καμιά δυσκολία στην εφαρμογή της αρχής διατήρησης της μάζας στα θερμοδυναμικά συστήματα.

Στη μηχανική των ρευστών, η εξίσωση διατήρησης της μάζας αναφέρεται ως *εξίσωση συνέχειας*.

Παροχή Μάζας και Ογκομετρική Παροχή

Το ποσό της μάζας που ρέει διαμέσου μιας διατομής ανά μονάδα χρόνου ονομάζεται **παροχή μάζας** ή **μαζική παροχή** και συμβολίζεται με \dot{m} . Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η τελεία πάνω από το σύμβολο σημαίνει την ποσότητα ανά μονάδα χρόνου.

Σ'έναν όγκο ελέγχου, το υγρό και το αέριο εισέρχονται ή εξέρχονται μέσα από σωλήνες ή αγωγούς. Η παροχή μάζας ενός ρευστού, που ρέει διαμέσου ενός σωλήνα ή αγωγού, είναι ανάλογη με το εμβαδόν της διατομής A του αγωγού, της πυκνότητας ρ και της ταχύτητας V του ρευστού. Η παροχή μάζας διαμέσου ενός διαφορικού εμβαδού dA δίνεται από τη σχέση:

$$d\dot{m} = \rho \mathbf{V}_n dA \quad (4-3)$$

όπου με \mathbf{V}_n συμβολίζεται η συνισταμένη της ταχύτητας που είναι κάθετη στην επιφάνεια dA . Η παροχή μάζας σε ολόκληρο το εμβαδόν της διατομής του αγωγού υπολογίζεται με ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης:

$$\dot{m} = \int_A \rho \mathbf{V}_n dA \quad (\text{kg/s}) \quad (4-4)$$

Handwritten note: $\dot{m} = \rho \left(\int_A \mathbf{V}_n dA \right) = \rho \dot{V} = \rho \dot{V}$

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, η ροή ενός ρευστού διαμέσου ενός αγωγού μπορεί να λάβει χώρα κατά προσέγγιση σε **μια διάσταση (μονοδιάστατη ροή)**. Δηλαδή, μπορεί να υποθεθεί ότι οι ιδιότητες μεταβάλλονται προς **μια** μόνο διεύθυνση (τη διεύθυνση της ροής). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όλες οι ιδιότητες να είναι **ομοιόμορφες** σε κάθε διατομή που είναι κάθετη στη διεύθυνση της ροής και υποτίθεται ότι οι ιδιότητες έχουν **μέσες τιμές**. Ομως, οι τιμές πάνω στην εγκάρσια διατομή είναι δυνατό να μεταβάλλονται με το χρόνο.

Κατά τη ροή των ρευστών σε σωλήνες ή σε αγωγούς, η προσέγγιση της μονοδιάστατης ροής έχει μικρή επίδραση στις θερμοδυναμικές ιδιότητες, όπως η θερμοκρασία και η πίεση, γιατί αυτές παραμένουν σταθερές στην εγκάρσια διατομή. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και για την **ταχύτητα**, της οποίας η τιμή εξαιτίας του ιξώδους (τριβή μεταξύ υγρών στρωμάτων) μεταβάλλεται από μηδέν, πάνω στο τοίχωμα, έως τη μέγιστη τιμή της που πετυχαίνεται στο κέντρο του αυλού. Με την παραδοχή της μονοδιάστατης ροής, η ταχύτητα κατά μήκος της εγκάρσιας διατομής θεωρείται σταθερή και ίση με τη μέση τιμή της (Σχήμα 4-6). Στην περίπτωση αυτή, η ολοκλήρωση της εξίσωσης 4-4 δίνει:

$$\dot{m} = \rho \mathbf{V}_{av} A \quad (\text{kg/s}) \quad (4-5)$$

όπου ρ = η πυκνότητα, kg/m^3 ($= 1/\nu$)

\mathbf{V}_{av} = η μέση ταχύτητα του ρευστού κάθετα στη διατομή A , m/s

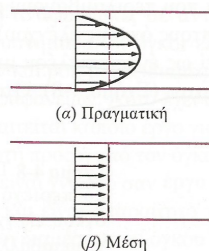
A = το εμβαδόν της διατομής κάθετα στη διεύθυνση της ροής, m^2

Ο όγκος του ρευστού που ρέει διαμέσου της εγκάρσιας διατομής ανά μονάδα χρόνου ονομάζεται **ογκομετρική παροχή** \dot{V} (Σχήμα 4-7) και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

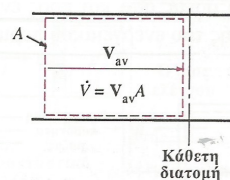
$$\dot{V} = \int_A \mathbf{V}_n dA = \mathbf{V}_{av} A \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4-6)$$

Η ογκομετρική παροχή και η παροχή μάζας συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{\nu} \quad (4-7)$$



Σχήμα 4-6 Η πραγματική και η μέση κατανομή της ταχύτητας σ'έναν αγωγό (η μαζική παροχή είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις).



Σχήμα 4-7 Η ογκομετρική παροχή είναι ο όγκος του ρευστού που διέρχεται από μια κάθετη διατομή ανά μονάδα του χρόνου.

Η εξίσωση 4-7 είναι ανάλογη με τη εξίσωση $m = V\rho$ που δίνει τη σχέση μεταξύ της μάζας και του όγκου ενός ρευστού σ' ένα δοχείο.

Για λόγους απλότητας, παραγράφεται ο δείκτης για τη μέση ταχύτητα. Στη συνέχεια, με V θα συμβολίζεται η μέση ταχύτητα κατά τη διεύθυνση της ροής, εκτός βέβαια εάν δηλώνεται κάτι άλλο. Επίσης, με A θα συμβολίζεται το εμβαδόν της διατομής που είναι κάθετη στη διεύθυνση της ροής.

Ισοζύγιο Ενέργειας σε έναν Όγκο Ελέγχου

Στο κεφάλαιο 3 εκφράστηκε η αρχή διατήρησης της ενέργειας (ή το ισοζύγιο ενέργειας) για *οποιοδήποτε σύστημα* και για *οποιαδήποτε διεργασία* ως εξής: η *συνολική (καθαρή) μεταβολή (αύξηση ή μείωση) της ολικής ενέργειας του συστήματος κατά τη διάρκεια μίας διεργασίας είναι ίση με τη διαφορά ανάμεσα στην ολική ενέργεια που εισέρχεται στο σύστημα και στην ολική ενέργεια που εξέρχεται από το σύστημα κατά τη διεργασία αυτή*. Επίσης τονίστηκε ότι η ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί από ή προς ένα σύστημα με τρεις μορφές -θερμότητα, έργο και ροή μάζας- και ότι η ολική ενέργεια ενός απλού, συμπίεστου συστήματος περιλαμβάνει την εσωτερική, την κινητική και τη δυναμική ενέργεια. Στην περίπτωση αυτή το ισοζύγιο ενέργειας γράφεται ως εξής:

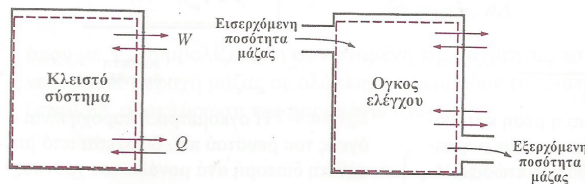
$$\underbrace{E_{in} - E_{out}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά} \\ \text{ενέργειας με τη μορφή} \\ \text{θερμότητας, έργου και μάζας}}} = \underbrace{\Delta E_{system}}_{\substack{\text{Μεταβολή της εσωτερικής,} \\ \text{κινητικής δυναμικής κ.λ.π.} \\ \text{ενέργειας.}}} \quad (\text{kJ}) \quad (4-8)$$

ή με τη μορφή ρυθμών μεταβολής ως εξής:

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς} \\ \text{ενέργειας με τη μορφή} \\ \text{θερμότητας, έργου και μάζας}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της} \\ \text{εσωτερικής, κινητικής} \\ \text{δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας.}}} \quad (\text{kW}) \quad (4-9)$$

Στο κεφάλαιο 3 εξετάστηκαν συστήματα που περιελάμβαναν μόνο μεταφορά θερμότητας και αλληλεπιδράσεις ενέργειας και έργου (π.χ. τα κλειστά συστήματα). Στο κεφάλαιο αυτό η ανάλυση επεκτείνεται σε συστήματα που περιλαμβάνουν ροή μάζας μέσω των οριακών επιφανειών του συστήματος (π.χ. στους όγκους ελέγχου).

Η ροή μάζας από και προς ένα σύστημα λειτουργεί ως ένας επιπλέον μηχανισμός μεταβολής του ενεργειακού περιεχομένου του συστήματος (Σχήμα 4-8). Όταν μια πο-



Σχήμα 4-8 Το ενεργειακό περιεχόμενο ενός όγκου ελέγχου μπορεί να μεταβάλλεται είτε με τη ροή μάζας είτε με τις αλληλεπιδράσεις θερμότητας ή έργου.

σότητα μάζας εισέρχεται σ' έναν όγκο ελέγχου, η ενέργεια του όγκου ελέγχου αυξάνεται, επειδή η μάζα περιέχει κάποια ενέργεια. Αντίστοιχα, όταν μια ποσότητα μάζας εξέρχεται από έναν όγκο ελέγχου, η ενέργεια του όγκου ελέγχου μειώνεται, επειδή η μάζα μεταφέρει κάποια ενέργεια. Για παράδειγμα, όταν μια ποσότητα ζεστού νερού εξέρχεται από έναν θερμαντήρα νερού και αντικαθίσταται από την ίδια ποσότητα ψυχρού νερού, το ενεργειακό περιεχόμενο της δεξαμενής θερμού νερού (όγκος ελέγχου) μειώνεται λόγω αυτής της αλληλεπίδρασης της μάζας.

Η μεταφορά θερμότητας από ή προς τον όγκο ελέγχου δεν πρέπει να συγχέεται με την ενέργεια που μεταφέρεται με τη μάζα μέσα ή έξω από τον όγκο ελέγχου.

Υπενθυμίζεται ότι η θερμότητα είναι η μορφή ενέργειας που μεταφέρεται εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ ενός όγκου ελέγχου και του περιβάλλοντός του.

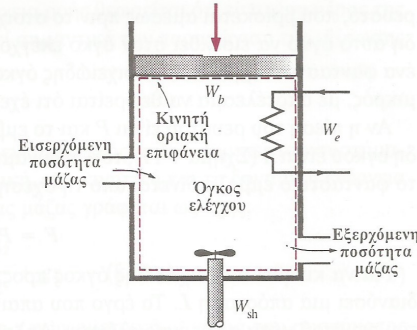
Στον όγκο ελέγχου, όπως και στο κλειστό σύστημα, μπορεί να εμπλέκονται μία ή και περισσότερες μορφές έργου (Σχήμα 4-9). Εάν οι οριακές επιφάνειες του όγκου ελέγχου είναι σταθερές, όπως συμβαίνει συχνά, τότε το έργο ογκομεταβολής είναι ίσο με μηδέν. Οπότε, σε απλά συμπιεστά συστήματα, ο όρος του έργου περιλαμβάνει το έργο ατράκτου ή/και το ηλεκτρικό έργο. Όπως και στα κλειστά συστήματα, όταν ο όγκος ελέγχου είναι θερμομονωμένος, ο όρος μεταφοράς θερμότητας είναι μηδέν.

Η ενέργεια που απαιτείται για να σπρώξει ένα ρευστό μέσα ή έξω από τον όγκο ελέγχου ονομάζεται *έργο ροής* ή *ενέργεια ροής* και θεωρείται ότι είναι ένα μέρος της ενέργειας που μεταφέρεται από το ρευστό.

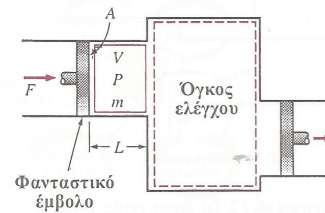
Έργο Ροής

Όπως ήδη αναφέρθηκε, σε αντίθεση με τα κλειστά συστήματα, οι όγκοι ελέγχου περιλαμβάνουν και ροή μάζας διαμέσου των οριακών τους επιφανειών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να απαιτείται κάποιο έργο για να σπρώξει τη μάζα αυτή προς ή από τον όγκο ελέγχου. Το έργο αυτό είναι γνωστό σαν *έργο ροής* ή *ενέργεια ροής* και είναι απαραίτητο για να διατηρείται η ροή διαμέσου του όγκου ελέγχου.

Για να εξαχθεί μια σχέση για το έργο ροής, θεωρείται ένας στοιχειώδης όγκος V του ρευστού, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4-10. Το



Σχήμα 4-9 Ένας όγκος ελέγχου μπορεί να περιλαμβάνει εκτός από έργο ογκομεταβολής και ηλεκτρικό έργο ή έργο ατράκτου.



Σχήμα 4-10 Σχηματική παράσταση του έργου ροής.

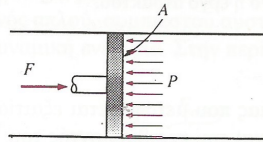
ρευστό, που βρίσκεται αμέσως πριν το στοιχειώδη όγκο, θα εξαναγκάσει το στοιχειώδη αυτό όγκο να εισέλθει στον όγκο ελέγχου, λειτουργώντας κατά κάποιο τρόπο σαν ένα φανταστικό έμβολο. Ο στοιχειώδης όγκος του ρευστού θεωρείται ότι είναι αρκετά μικρός, με αποτέλεσμα να θεωρείται ότι έχει ομοιόμορφες ιδιότητες.

Αν η πίεση του ρευστού είναι P και το εμβαδόν της κάθετης διατομής του στοιχειώδη όγκου είναι A (Σχήμα 4-11), τότε η δύναμη που εξασκείται στο στοιχειώδη όγκο από το φανταστικό έμβολο δίνεται από τη σχέση:

$$F = PA \quad (4-9)$$

Για να κινηθεί ο στοιχειώδης όγκος προς τον όγκο ελέγχου, η δύναμη αυτή πρέπει διανύσει μια απόσταση L . Το έργο που απαιτείται για να σπρώξει το στοιχειώδη όγκο του ρευστού μέσα στον όγκο ελέγχου. Δηλαδή το έργο ροής ισούται με:

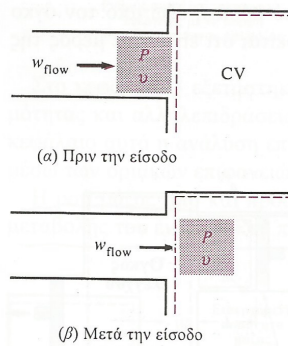
$$W_{\text{flow}} = FL = PAL = PV \quad (\text{kJ}) \quad (4-10)$$



Το έργο ροής ανά μονάδα μάζας υπολογίζεται διαιρώντας και τα δύο σκέλη της εξίσωσης με τη μάζα του στοιχειώδους όγκου του ρευστού:

$$w_{\text{flow}} = Pv \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-11)$$

Σχήμα 4-11 Όταν δεν υπάρχει επιτάχυνση, η δύναμη που ασκείται στο ρευστό από το έμβολο ισούται με τη δύναμη που ασκείται από το ρευστό στο έμβολο.



Σχήμα 4-12 Το έργο ροής είναι η ενέργεια που απαιτείται για να σπρώξει το ρευστό μέσα ή έξω από τον όγκο ελέγχου και ισούται με Pv .

Η σχέση του έργου ροής είναι η ίδια είτε το ρευστό κινείται προς ή από τον όγκο ελέγχου (Σχήμα 4-12).

Ενδιαφέρον είναι επίσης το γεγονός ότι, σε αντίθεση με τις άλλες μορφές έργου, το έργο ροής εκφράζεται από ιδιότητες του συστήματος. Πράγματι, αυτό ισούται με το γινόμενο δύο ιδιοτήτων του ρευστού. Για το λόγο αυτό, μερικοί θεωρούν ότι είναι μια *συνδυαστική ιδιότητα* (όπως η ενθαλπία) και αναφέρονται σ' αυτό με τον όρο *ενέργεια συναγωγής* ή *ενέργεια μεταφοράς* αντί για ενέργεια ροής. Μια άλλη εξίσου σωστή άποψη είναι ότι το γινόμενο Pv παριστάνει μόνο την ενέργεια ροής των ρευστών και δεν παριστάνει καμιά μορφή ενέργειας για συστήματα που δεν περιλαμβάνουν ροή. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να θεωρείται ως έργο. Βέβαια, η παραπάνω διαφωνία δε φαίνεται να έχει τέλος. Είναι όμως παρήγορο το γεγονός ότι και οι δύο θεωρίες οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα, που είναι η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας. Στις

παραγράφους που θα ακολουθήσουν η ενέργεια ροής θεωρείται ότι είναι ένα μέρος της ενέργειας του ρευστού, γιατί αυτό απλοποιεί σημαντικά την παραγωγή της εξίσωσης ενέργειας για όγκους ελέγχου.

Ολική Ενέργεια ενός Ρέοντος Ρευστού

Όπως εξετάστηκε στο κεφάλαιο 1, η ολική ενέργεια ενός απλού συμπιεστού συστήματος αποτελείται από τρία μέρη: την εσωτερική, την κινητική και τη δυναμική ενέργεια (Σχήμα 4-13). Η ενέργεια αυτή ανά μονάδα μάζας γράφεται ως εξής:

$$e = \bar{u} + ke + pe = u + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-12)$$

όπου με V συμβολίζεται η ταχύτητα και με z η υψομετρική διαφορά του συστήματος από κάποιο εξωτερικό σημείο αναφοράς.

Η ροή που εισέρχεται ή εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου περιέχει και μια επιπρόσθετη μορφή ενέργειας - την *ενέργεια ροής* Pv , που εξετάστηκε προηγουμένως. Οπότε, η ολική ενέργεια του **ρέοντος ρευστού** ανά μονάδα μάζας (συμβολίζεται με θ) γίνεται:

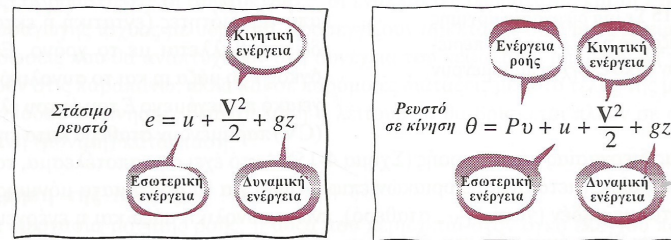
$$\theta = Pv + e = Pv + (u + ke + pe)$$

Όμως, ο **συνδυασμός** $Pv + u$ έχει οριστεί ως η **ενθαλία** h . Έτσι, η παραπάνω εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$\theta = h + ke + pe = h + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-13)$$

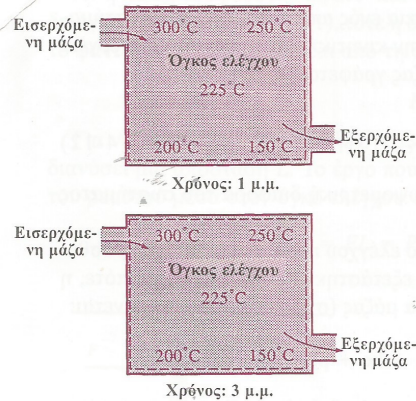
Το 1966, ο καθηγητής J. Kestin πρότεινε για το θ τον όρο **μετενθαλία** (που σημαίνει *πέρα από την ενθαλία*).

Χρησιμοποιώντας την ενθαλία αντί της εσωτερικής ενέργειας για την έκφραση της ενέργειας του **ρέοντος ρευστού**, παραλείπεται ο όρος του έργου ροής. Το έργο που συνοδεύει την ώθηση του ρευστού μέσα ή έξω από τον όγκο ελέγχου περιέχεται αυτόματα στην ενθαλία. Στη συνέχεια και μέχρι το τέλος του βιβλίου, η ενέργεια των

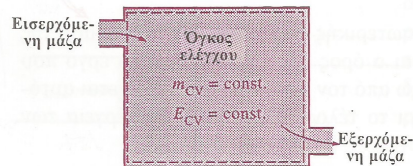


Σχήμα 4-13 Η ολική ενέργεια ενός στάσιμου (στατικού) ρευστού αποτελείται από τρία μέρη, ενώ για ένα ρευστό σε κίνηση αποτελείται από τέσσερα.

ρευμάτων εισόδου ή εξόδου από τον όγκο ελέγχου θα δίνεται από την εξίσωση 4-13 και δε θα γίνεται καμιά ειδική αναφορά στο έργο ή στην ενέργεια ροής. Στις εξισώσεις ενέργειας του όγκου ελέγχου, με W θα παριστάνονται όλες οι μορφές έργου (οριακών επιφανειών ή ογκομεταβολής, ατράκτου, ηλεκτρικό κ.τ.λ.) εκτός του έργου ροής.



Σχήμα 4-14 Σε μια διεργασία μόνιμης ροής, οι ιδιότητες του ρευστού στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου ενδέχεται να μεταβάλλονται με τη θέση, αλλά όχι με το χρόνο.



Σχήμα 4-15 Σε μια διεργασία μόνιμης ροής, η μάζα και η ενέργεια που περιέχονται στον όγκο ελέγχου παραμένουν σταθερές.

κεια μιας διεργασίας μόνιμης ροής (Σχήμα 4-15). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το έργο ογκομεταβολής (μετακίνησης οριακών επιφανειών) για τα συστήματα μόνιμης ροής να ισούται με μηδέν (γιατί $V_{CV} = \text{σταθερό}$), ενώ η συνολική μάζα και η ενέργεια που εισέρχονται στον όγκο ελέγχου πρέπει να είναι ίσες με τη συνολική μάζα και την ενέργεια που εξέρχονται από αυτόν (γιατί $m_{CV} = \text{σταθερό}$ και $E_{CV} = \text{σταθερό}$). Οι παρατηρήσεις αυτές συντελούν στην απλοποίηση της ανάλυσης.

4-2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ (ΜΟΝΙΜΗΣ) ΡΟΗΣ

Ενας μεγάλος αριθμός διατάξεων και μηχανών, όπως οι στρόβιλοι, οι συμπιεστές και τα ακροφύσια, λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα κάτω από τις ίδιες συνθήκες και θεωρούνται *διατάξεις μόνιμης ροής*.

Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται σε διατάξεις μόνιμης ροής περιγράφονται ικανοποιητικά από ένα ιδανικό πρότυπο που ονομάζεται *διεργασία σταθεροποιημένης (μόνιμης) ροής*. Η διεργασία μόνιμης ροής ορίζεται σαν η *διεργασία κατά την οποία ένα ρευστό ρέει σταθεροποιημένα στον όγκο ελέγχου* (Σχήμα 4-14). Αυτό σημαίνει ότι οι *ιδιότητες του ρευστού μέσα στον όγκο ελέγχου ενδέχεται σ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας να μεταβάλλονται από σημείο σε σημείο, αλλά σε κάθε σημείο παραμένουν σταθερές με το χρόνο*. (Υπενθυμίζεται ότι *μόνιμος* σημαίνει *αμετάβλητος με το χρόνο*). Η διεργασία μόνιμης ροής έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1 Στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου καμιά από τις ιδιότητες (εντατική ή εκτατική) δε μεταβάλλεται με το χρόνο. Έτσι, ο όγκος V , η μάζα m και το συνολικό ενεργειακό περιεχόμενο E του όγκου ελέγχου (CV) παραμένουν σταθερά κατά τη διάρ-

2 Στις εξωτερικές επιφάνειες του όγκου ελέγχου καμιά από τις ιδιότητες δε μεταβάλλεται με το χρόνο. Δηλαδή, οι ιδιότητες του ρευστού στα σημεία εισόδου και εξόδου παραμένουν αμετάβλητες σ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας. Οι ιδιότητες όμως μπορεί να είναι διαφορετικές στις διάφορες εισόδους και στις εξόδους. Μπορεί ακόμη να διαφέρουν και στην εγκάρσια διατομή της κάθε εισόδου και εξόδου. Όλες όμως οι ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων της ταχύτητας και της υψομετρικής διαφοράς, πρέπει να παραμένουν σταθερές με το χρόνο σε κάθε σημείο της διατομής. Κατά συνέπεια, κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας μόνιμης ροής, η παροχή μάζας του ρευστού σε κάποια είσοδο ή έξοδο πρέπει να παραμένει σταθερή (Σχήμα 4-16). Μια επιπλέον απλοποίηση μπορεί να προκύψει από την παραδοχή ότι οι ιδιότητες του ρευστού σε κάθε είσοδο ή έξοδο είναι ομοιόμορφες (και ίσες με τη μέση τιμή) στην εγκάρσια διατομή. Δηλαδή, οι ιδιότητες του ρευστού σε μια είσοδο ή έξοδο μπορούν να θεωρηθούν ίσες με τη μέση τιμή τους.



Σχήμα 4-16 Σε μια διεργασία μόνιμης ροής, οι ιδιότητες του ρευστού σε μια είσοδο ή μια έξοδο παραμένουν σταθερές (δε μεταβάλλονται με το χρόνο).

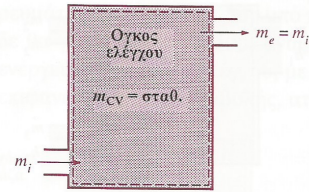
3 Οι αλληλεπιδράσεις θερμότητας και έργου μεταξύ ενός συστήματος μόνιμης ροής και του περιβάλλοντος του δε μεταβάλλονται με το χρόνο. Έτσι, κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας μόνιμης ροής, η ισχύς που παράγεται από το σύστημα και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας προς ή από το σύστημα παραμένουν σταθερά.

Ορισμένες κυκλικές διατάξεις, όπως οι παλινδρομικές μηχανές και οι συμπιεστές, δεν ικανοποιούν τις παραπάνω παραδοχές, γιατί η ροή στην είσοδο και στην έξοδο των διατάξεων αυτών είναι παλμική και όχι μόνιμη. Όμως, στις συσκευές αυτές η μεταβολή των ιδιοτήτων του ρευστού με το χρόνο γίνεται περιοδικά και η ροή μπορεί να αναλυθεί με το πρότυπο των διεργασιών μόνιμης ροής, χρησιμοποιώντας τους χρονικούς μέσους όρους των τιμών των διαφόρων ιδιοτήτων και της παροχής θερμότητας διαμέσου των οριακών επιφανειών.

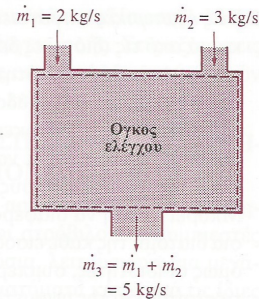
Οι διατάξεις που έχουν σχεδιαστεί για συνεχή λειτουργία, όπως οι στρόβιλοι, οι αντλίες, οι βραστήρες, οι συμπυκνωτές, οι εναλλάκτες θερμότητας και οι εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος με υδρατμό, προσεγγίζουν αρκετά τις συνθήκες μόνιμης ροής. Οι εξισώσεις που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις παραπάνω, αλλά και σε παρόμοιες διατάξεις μετά το τέλος της μεταβατικής περιόδου εκκίνησης, όταν δηλαδή η λειτουργία θα βρίσκεται πλέον σε σταθεροποιημένη (μόνιμη) κατάσταση.

Διατήρηση της Μάζας

Σε μια διεργασία μόνιμης ροής, η μάζα που περιέχεται στον όγκο ελέγχου παραμένει αμετάβλητη με το χρόνο ($m_{CV} = \text{σταθερή}$). Οπότε, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας, η συνολική μάζα που εισέρχεται στον όγκο ελέγχου θα πρέπει να είναι ίση με τη συνολική μάζα που εξέρχεται από αυτόν (Σχήμα 4-17).



Σχήμα 4-17 Κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας μόνιμης ροής, η μάζα που εισέρχεται στον όγκο ελέγχου είναι ίση με τη μάζα που εξέρχεται από αυτόν.



Σχήμα 4-18 Η αρχή διατήρησης της μάζας για ένα σύστημα δύο εισόδων και μιας εξόδου.

Για παράδειγμα, στο ακροφύσιο ενός λάστιχου, που χρησιμοποιείται για το πότισμα του κήπου, σε σταθεροποιημένη λειτουργία το νερό που εισέρχεται ισούται με το νερό που εξέρχεται.

Στις διεργασίες σταθεροποιημένης ροής δεν έχει σημασία η ποσότητα της μάζας που ρέει μέσα ή έξω από τον όγκο ελέγχου, αλλά ο ρυθμός ροής της μάζας ανά μονάδα

$$\left(\begin{array}{l} \text{Ολική μάζα} \\ \text{που εισέρχεται} \\ \text{στον όγκο} \\ \text{ελέγχου ανά} \\ \text{μονάδα χρόνου} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Ολική μάζα που} \\ \text{εγκαταλείπει} \\ \text{τον όγκο} \\ \text{ελέγχου ανά} \\ \text{μονάδα χρόνου} \end{array} \right)$$

χρόνου, δηλαδή η παροχή μάζας. Η αρχή διατήρησης της μάζας σε μια διάταξη, η οποία λειτουργεί σε συνθήκες σταθεροποιημένης ροής, με πολλαπλές εισόδους και εξόδους (Σχήμα 4-18) μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή ρυθμού ως εξής:

ή

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (\text{kg/s}) \quad (4-14)$$

όπου οι δείκτες i και e υποδηλώνουν την *είσοδο* και την *έξοδο*. Οι περισσότερες μηχανικές διατάξεις, όπως τα ακροφύσια, οι διαχυτήρες, οι στρόβιλοι, οι συμπιεστές και οι αντλίες, περιέχουν ένα ρεύμα ροής (μία είσοδο και μία έξοδο).

Στις περιπτώσεις αυτές, η είσοδος δηλώνεται με το δείκτη 1 και η έξοδος με το δείκτη 2. Οπότε, στα συστήματα μιας εισόδου, μιας εξόδου και σταθεροποιημένης ροής, η εξίσωση 4-14 ανάγεται στην ακόλουθη μορφή:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (\text{kg/s}) \quad (4-15)$$

ή

$$\rho_1 \mathbf{V}_1 A_1 = \rho_2 \mathbf{V}_2 A_2 \quad (4-16)$$

ή

$$\frac{1}{v_1} V_1 A_1 = \frac{1}{v_2} V_2 A_2 \quad (4-17)$$

όπου ρ = η πυκνότητα, kg/m³

v = ο ειδικός όγκος, m³/kg (= 1/ρ)

V = η μέση ταχύτητα ροής στη διεύθυνση της ροής, m/s

A = το εμβαδόν της κάθετης διατομής κατά τη διεύθυνση ροής, m²

Υπενθυμίζεται ότι δεν υφίσταται αντίστοιχη αρχή διατήρησης του όγκου και επομένως οι ογκομετρικές παροχές εισόδου και εξόδου ($\dot{V} = VA$, m³/s) μπορεί να είναι μεταξύ τους διαφορετικές. Η ογκομετρική παροχή στην έξοδο ενός αεροσυμπιεστή θα είναι πολύ μικρότερη από ό,τι στην είσοδο, παρά το γεγονός ότι η παροχή μάζας του αέρα στο συμπιεστή είναι σταθερή (Σχήμα 4-19). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην έξοδο του συμπιεστή ο αέρας έχει μεγαλύτερη πυκνότητα.

Όσον αφορά στα υγρά, τόσο η ογκομετρική όσο και η μαζική παροχή παραμένουν σταθερές, γιατί τα υγρά είναι ουσιαστικά ασυμπίεστες ουσίες (έχουν σταθερή πυκνότητα). Καλό παράδειγμα για την τελευταία περίπτωση αποτελεί η ροή του νερού μέσα από το ακροφύσιο στο λάστιχο ποτίσματος.



Σχήμα 4-19 Κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας σταθεροποιημένης ροής, οι ογκομετρικές παροχές δε διατηρούνται κατ'άνγκη σταθερές.

Ισοζύγιο Ενέργειας σε Συστήματα Σταθεροποιημένης Ροής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας σταθεροποιημένης ροής το ολικό ενεργειακό περιεχόμενο ενός όγκου ελέγχου παραμένει σταθερό ($E_{CV} = \text{σταθερό}$). Δηλαδή κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας διεργασίας, η μεταβολή της ολικής ενέργειας του όγκου ελέγχου είναι ίση με μηδέν ($\Delta E_{CV} = 0$). Άρα σε μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής η ενέργεια που εισέρχεται σ' έναν όγκο ελέγχου με όλες τις μορφές (θερμότητα, έργο, μεταφορά μάζας) θα πρέπει να είναι ίση με την ενέργεια που εξέρχεται. Στην περίπτωση αυτή το γενικό ισοζύγιο ενέργειας με τη μορφή των ρυθμών γράφεται:

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \Delta \dot{E}_{system} \rightarrow 0 \text{ (Σταθεροποιημένο)} = 0 \quad (4-18)$$

ή
 Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας

Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας.

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad (4-19)$$

Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας

Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας.

Επειδή η ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί μέσω της θερμότητας, του έργου και της μά-

ζας, το παραπάνω ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γραφεί (για ένα γενικό σύστημα σταθεροποιημένης ροής) στην ακόλουθη μορφή:

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_i \theta_i = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum \dot{m}_e \theta_e \quad (4-20)$$

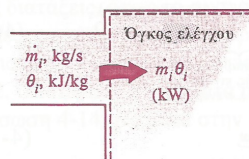
ή

$$\underbrace{\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right)}_{\text{για κάθε είσοδο}} = \underbrace{\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)}_{\text{για κάθε έξοδο}} \quad (4-21)$$

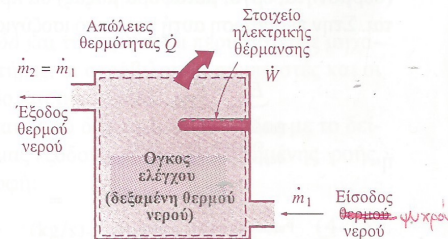
Εφόσον, η ενέργεια ενός ρέοντος ρευστού ανά μονάδα μάζας είναι $\theta = h + ke + pe = h + V^2/2 + gz$ (Σχήμα 4-20). Η σχέση του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής για συστήματα σταθεροποιημένης ροής διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 1859 από τον Gustav Zeuner σε ένα γερμανικό βιβλίο θερμοδυναμικής.

Θεωρείται, για παράδειγμα, ένας συνηθισμένος ηλεκτρικός βραστήρας νερού υπό σταθερή λειτουργία, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-21. Στο βραστήρα εισάγεται ένα ρεύμα ψυχρού νερού με παροχή μάζας \dot{m}_1 , ενώ το ρεύμα του θερμού νερού που εξέρχεται έχει την ίδια παροχή μάζας. Η απώλεια θερμότητας του βραστήρα (όγκου ελέγχου) προς το περιβάλλον είναι \dot{Q}_{out} . Το ηλεκτρικό θερμαντικό στοιχείο παρέχει στο νερό ηλεκτρικό έργο (θέρμανση) με ρυθμό \dot{W}_{in} . Με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η ολική ενέργεια του ρεύματος του νερού θα αυξηθεί, καθώς το νερό ρέει μέσα από το βραστήρα. Η αύξηση αυτή θα είναι ίση με την ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στο νερό μείον τις θερμικές απώλειες.

Το ισοζύγιο ενέργειας (ή ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής) που δίνεται παραπάνω χρησιμοποιείται πολύ εύκολα, όταν είναι γνωστά τα μεγέθη και οι κατευθύνσεις προς τις οποίες μεταφέρεται θερμότητα και έργο. Όταν όμως γίνεται μια γενική αναλυτική μελέτη ή κατά την επίλυση ενός προβλήματος που περιλαμβάνει μια άγνωστη θερμική ή ενεργειακή αλληλεπίδραση, θα πρέπει να επιλεγεί μια κατεύθυνση για αυτές τις αλληλεπιδράσεις. Στις περιπτώσεις αυτές συνήθίζεται η παραδοχή ότι η θερμότητα μεταφέρεται προς το σύστημα (είσοδος θερμότητας) με ρυθμό \dot{Q} και ότι το σύστημα παράγει ισχύ με ρυθμό \dot{W} (έξοδος έργου). Ο πρώτος νόμος ή η σχέση του ισοζυγίου ενέργειας για ένα γενικό σύστημα σταθεροποιημένης ροής γράφεται ως εξής:



Σχήμα 4-20 Το γινόμενο $\dot{m}_i \theta_i$ δίνει την ενέργεια που μεταφέρει η μάζα προς τον όγκο ελέγχου ανά μονάδα χρόνου.



Σχήμα 4-21 Ένας θερμαντήρας νερού που λειτουργεί σε συνθήκες σταθεροποιημένης ροής.

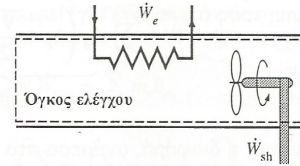
εσωτερική ενέργεια, όταν το σύστημα περιλαμβάνει ροή μάζας. Στην περίπτωση αυτή, το \dot{W} παριστάνει τις υπόλοιπες μορφές έργου ανά μονάδα χρόνου (Σχήμα 4-22).

Πολλές διατάξεις σταθεροποιημένης ροής, όπως οι στρόβιλοι, οι συμπιεστές και οι αντλίες, μεταφέρουν την ισχύ διαμέσου μιας ατράκτου και το \dot{W} παριστάνει την ισχύ ατράκτου των διατάξεων αυτών. Αν υπάρχουν ηλεκτρικά καλώδια που διαπερνούν την επιφάνεια ελέγχου (όπως στην περίπτωση του ηλεκτρικού βραστήρα), το \dot{W} θα παριστάνει το ηλεκτρικό έργο ανά μονάδα χρόνου. Αν δεν υπάρχει καμία από τις παραπάνω μορφές έργου, τότε $\dot{W} = 0$.

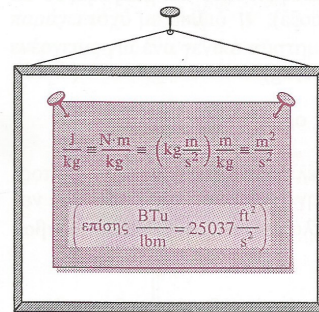
$\Delta h = h_{\text{outlet}} - h_{\text{inlet}}$. Για τις καταστάσεις εισόδου και εξόδου, η μεταβολή της ενθαλπίας του ρευστού μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από τις τιμές ενθαλπίας των πινάκων. Για τα ιδανικά αέρια, οι τιμές της ενθαλπίας μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση $\Delta h = C_{p, \text{av}}(T_2 - T_1)$. Σημειώνεται ότι το γινόμενο (kg/s) (kJ/kg) \equiv (kW).

$\Delta ke = (V_2^2 - V_1^2) / 2$. Η μονάδα της κινητικής ενέργειας είναι m^2/s^2 η οποία ισοδυναμεί με J/kg (Σχήμα 4-23). Η ενθαλπία επίσης δίνεται συχνά σε kJ/kg. Για να προστεθούν οι δύο αυτές ποσότητες, θα πρέπει να εκφραστεί και η κινητική ενέργεια σε kJ/kg. Αυτό πετυχαίνεται εύκολα διαιρώντας τον όρο της κινητικής ενέργειας με 1000.

Η ταχύτητα 45 m/s αντιστοιχεί σε κινητική ενέργεια μάζας 1 kJ/kg, που είναι μια πολύ μικρή τιμή σε σύγκριση με τις συνηθισμένες τιμές ενθαλπίας. Έτσι, για μικρές ταχύτητες, ο όρος της κινητικής ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος. Όταν το ρεύμα ροής ενός ρευστού εισέρχεται και εξέρχεται από μια διάταξη μόνιμης ροής με την ίδια



Σχήμα 4-22 Σε μόνιμη κατάσταση, το έργο ατράκτου και το ηλεκτρικό έργο είναι οι μόνες μορφές έργου που μπορεί να περιλαμβάνει ένα απλό συμπιεστό σύστημα.



Σχήμα 4-23 Οι μονάδες m^2/s^2 και J/kg είναι ισοδύναμες.

V_1 m/s	V_2 m/s	Δke kJ/kg
0	40	1
50	67	1
100	110	1
200	205	1
500	502	1

Σχήμα 4-24 Σε μεγάλες ταχύτητες, ακόμα και οι μικρές μεταβολές των ταχυτήτων μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές μεταβολές στην κινητική ενέργεια του ρευστού.

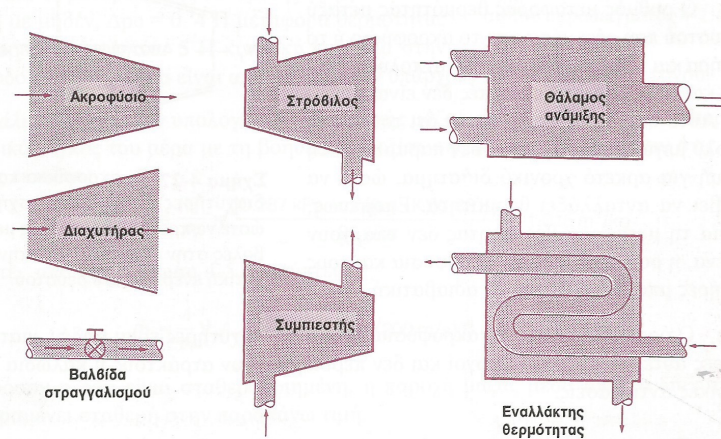
περίπου ταχύτητα ($V_1 \cong V_2$), η μεταβολή της κινητικής ενέργειας είναι σχεδόν μηδέν ανεξάρτητα από την ταχύτητα. Όταν όμως η ταχύτητα είναι μεγάλη, θα πρέπει να εξεταστεί ο όρος της κινητικής ενέργειας, γιατί ακόμα και μικρές μεταβολές της ταχύτητας μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές μεταβολές στην κινητική ενέργεια (Σχήμα 4-24).

$\Delta pe = g(z_2 - z_1)$. Ανάλογα με τα παραπάνω είναι και αυτά που ισχύουν για τον όρο της δυναμικής ενέργειας. Η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας κατά 1 kJ/kg αντιστοιχεί σε διαφορά ύψους 102 m. Η διαφορά ύψους, μεταξύ της εισόδου και της εξόδου, των περισσότερων βιομηχανικών διατάξεων, όπως οι στρόβιλοι και οι συμπιεστές, είναι πολύ μικρότερη και ο όρος της δυναμικής ενέργειας θεωρείται αμελητέος. Η μόνη περίπτωση που ο όρος της δυναμικής ενέργειας γίνεται σημαντικός είναι, όταν η διεργασία περιλαμβάνει την άντληση ρευστού σε μεγάλο ύψος. Αυτό ισχύει κυρίως για συστήματα με αμελητέα μεταφορά θερμότητας.

4-3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ (ΜΟΝΙΜΗΣ) ΡΟΗΣ

Πολλές από τις διατάξεις που ενδιαφέρουν τους μηχανικούς λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα ουσιαστικά κάτω από σταθερές συνθήκες. Για παράδειγμα, οι διατάξεις μιας εγκατάστασης παραγωγής ισχύος (στρόβιλοι, συμπιεστές, εναλλάκτες και αντλίες) λειτουργούν ασταμάτητα για μήνες πριν η όλη εγκατάσταση σταματήσει για συντήρηση (Σχήμα 4-25). Οπότε, οι παραπάνω διατάξεις μπορούν να θεωρηθούν διατάξεις σταθεροποιημένης ροής.

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται μερικές από τις πιο κοινές διατάξεις μόνιμης ροής και αναλύονται οι θερμοδυναμικές πτυχές της ροής μέσα από αυτές. Για τις διατάξεις αυτές, οι αρχές διατήρησης της μάζας και της ενέργειας δίνονται στη συνέχεια με παραδείγματα.



Σχήμα 4-25 Διατάξεις σταθεροποιημένης ροής που λειτουργούν ασταμάτητα για μεγάλες χρονικές περιόδους.