

ЛЕКЦИЯ 3.2

ТАБЛИЦЫ И ДИАГРАММЫ ВОДЯНЫХ ПАРОВ

ТАБЛИЦЫ СУХОГО НАСЫЩЕННОГО ПАРА

Для нахождения параметров сухого пара t_s , v'' , h'' и прочих практически пользуются вместо приведенных в предыдущем разделе формул (в некоторых случаях приближенных) специальными таблицами, в которых приводятся готовые значения этих параметров, вычисленные на основании опытов и теоретических исследований.

Таких таблиц было предложено несколько. В настоящее время широкой известностью пользуются таблицы Теплофизических свойств воды и водяного пара, составленные С.Л. Ривкиным и А.А. Александровым или А.А. Александровым, Б.А. Григорьевым (рис. 1)

В издании А.А. Александрова и Б.А. Григорьева 2006 г. приведены девять таблиц (табл. I–IX). В табл. I (рис. 2) приведены термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температурам). В первом столбце таблицы указаны температуры пара, расположенные в порядке возрастания от 0 до 374 °С; в остальных столбцах приведены соответствующие им значения параметров кипящей воды и сухого насыщенного пара. В табл. II (рис. 3) приведены термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям). В первом столбце таблицы указаны абсолютные давления пара, расположенные также в порядке их возрастания, начиная от $1,00 \cdot 10^3$ Па и до $2,21 \cdot 10^7$ Па, а в остальных столбцах приведены соответствующие им значения параметров кипящей воды и сухого насыщенного пара.

В тех случаях, когда требуется найти значение какого-либо из приведенных в таблицах параметров для промежуточных значений температур и давлений, прибегают к интерполированию. Из табл. I и II видно, что с увеличением температуры и, следовательно, давления удельный объем жидкости v' увеличивается (весьма незначительно), а удельный объем сухого пара v'' уменьшается. При критическом значении температуры $t_k = 374,15$ °С оба эти объема становятся одинаковыми. Если значения удельных объемов v' и v'' для различных давлений нанести в системе vp – координат и провести через полученные таким путем точки кривые, то получим диаграмму, подобную изображенной на рис. 3.

лекции 2.2

А.А. Александров, Б.А. Григорьев

ТАБЛИЦЫ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ
ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

Издательский дом МЭИ

Рис. 1. Обложка таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара

ТАБЛИЦЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

Таблица

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА В СОСТОЯНИИ НАСЫЩЕНИЯ (ПО ТЕМПЕРАТУРЕ)

t	p	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''	$s''-s'$
0	$6,112 \cdot 10^2$	0,0010002	206,140	-0,04	2500,9	2500,9	-0,0002	9,1558	9,1559
0,01	$6,117 \cdot 10^2$	0,0010002	205,997	0,00	2500,9	2500,9	0,0000	9,1555	9,1555
1	$6,571 \cdot 10^2$	0,0010001	192,445	4,18	2502,7	2498,6	0,0153	9,1291	9,1138
2	$7,060 \cdot 10^2$	0,0010001	179,764	8,39	2504,6	2496,2	0,0306	9,1027	9,0721
3	$7,581 \cdot 10^2$	0,0010001	168,014	12,60	2506,4	2493,8	0,0459	9,0765	9,0306
4	$8,135 \cdot 10^2$	0,0010001	157,121	16,81	2508,2	2491,4	0,0611	9,0506	8,9895
5	$8,726 \cdot 10^2$	0,0010001	147,017	21,02	2510,1	2489,1	0,0763	9,0249	8,9486
6	$9,354 \cdot 10^2$	0,0010001	137,638	25,22	2511,9	2486,7	0,0913	8,9994	8,9081
7	$1,0021 \cdot 10^3$	0,0010001	128,928	29,43	2513,7	2484,3	0,1064	8,9742	8,8678
8	$1,0730 \cdot 10^3$	0,0010002	120,834	33,63	2515,6	2481,9	0,1213	8,9492	8,8278
9	$1,1483 \cdot 10^3$	0,0010003	113,309	37,82	2517,4	2479,6	0,1362	8,9244	8,7882
10	$1,2282 \cdot 10^3$	0,0010003	106,309	42,02	2519,2	2477,2	0,1511	8,8998	8,7488
11	$1,3129 \cdot 10^3$	0,0010004	99,793	46,22	2521,1	2474,8	0,1659	8,8755	8,7096
12	$1,4028 \cdot 10^3$	0,0010005	93,724	50,41	2522,9	2472,5	0,1806	8,8514	8,6708
13	$1,4981 \cdot 10^3$	0,0010007	88,070	54,60	2524,7	2470,1	0,1953	8,8275	8,6322
14	$1,5989 \cdot 10^3$	0,0010008	82,798	58,79	2526,5	2467,7	0,2099	8,8038	8,5939
15,0	$1,7057 \cdot 10^3$	0,0010009	77,881	62,98	2528,4	2465,4	0,2245	8,7804	8,5559
15,5	$1,7615 \cdot 10^3$	0,0010010	75,547	65,08	2529,3	2464,2	0,2317	8,7687	8,5370
16,0	$1,8188 \cdot 10^3$	0,0010011	73,291	67,17	2530,2	2463,0	0,2390	8,7571	8,5181
16,5	$1,8777 \cdot 10^3$	0,0010012	71,112	69,27	2531,1	2461,8	0,2462	8,7456	8,4993
17,0	$1,9383 \cdot 10^3$	0,0010013	69,006	71,36	2532,0	2460,6	0,2534	8,7341	8,4806
17,5	$2,0006 \cdot 10^3$	0,0010014	66,971	73,45	2532,9	2459,5	0,2607	8,7226	8,4620
18,0	$2,0647 \cdot 10^3$	0,0010015	65,003	75,55	2533,8	2458,3	0,2678	8,7112	8,4434
18,5	$2,1305 \cdot 10^3$	0,0010015	63,100	77,64	2534,7	2457,1	0,2750	8,6999	8,4248
19,0	$2,1982 \cdot 10^3$	0,0010016	61,261	79,73	2535,7	2455,9	0,2822	8,6886	8,4064
19,5	$2,2677 \cdot 10^3$	0,0010017	59,482	81,83	2536,6	2454,7	0,2894	8,6773	8,3880
20,0	$2,3392 \cdot 10^3$	0,0010018	57,761	83,92	2537,5	2453,5	0,2965	8,6661	8,3696
20,5	$2,4127 \cdot 10^3$	0,0010019	56,097	86,01	2538,4	2452,4	0,3036	8,6550	8,3513
21,0	$2,4881 \cdot 10^3$	0,0010021	54,487	88,10	2539,3	2451,2	0,3108	8,6439	8,3331
21,5	$2,5656 \cdot 10^3$	0,0010022	52,930	90,20	2540,2	2450,0	0,3179	8,6328	8,3150
22,0	$2,6452 \cdot 10^3$	0,0010023	51,422	92,29	2541,1	2448,8	0,3250	8,6218	8,2969
22,5	$2,7270 \cdot 10^3$	0,0010024	49,964	94,38	2542,0	2447,6	0,3320	8,6109	8,2788
23,0	$2,8109 \cdot 10^3$	0,0010025	48,552	96,47	2542,9	2446,4	0,3391	8,6000	8,2609
23,5	$2,8971 \cdot 10^3$	0,0010026	47,186	98,56	2543,8	2445,3	0,3462	8,5891	8,2429
24,0	$2,9856 \cdot 10^3$	0,0010028	45,863	100,66	2544,7	2444,1	0,3532	8,5783	8,2251
24,5	$3,0765 \cdot 10^3$	0,0010029	44,582	102,75	2545,6	2442,9	0,3602	8,5675	8,2073
25,0	$3,1697 \cdot 10^3$	0,0010030	43,341	104,84	2546,5	2441,7	0,3673	8,5568	8,1895
25,5	$3,2655 \cdot 10^3$	0,0010031	42,140	106,93	2547,4	2440,5	0,3743	8,5461	8,1719
26,0	$3,3637 \cdot 10^3$	0,0010033	40,977	109,02	2548,4	2439,3	0,3813	8,5355	8,1542
26,5	$3,4645 \cdot 10^3$	0,0010034	39,850	111,11	2549,3	2438,1	0,3882	8,5249	8,1367

1

Рис. 2. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения
(по температуре)

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА В СОСТОЯНИИ НАСЫЩЕНИЯ
(ПО ДАВЛЕНИЮ)**

p	t	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''	$s'' - s'$
$1,00 \cdot 10^3$	6,97	0,0010001	129,183	29,30	2513,7	2484,4	0,1059	8,9749	8,8690
$1,50 \cdot 10^3$	13,02	0,0010007	87,962	54,69	2524,7	2470,1	0,1956	8,8270	8,6315
$2,00 \cdot 10^3$	17,50	0,0010014	66,990	73,43	2532,9	2459,5	0,2606	8,7227	8,4621
$2,20 \cdot 10^3$	19,01	0,0010016	61,213	79,79	2535,7	2455,9	0,2824	8,6883	8,4059
$0,24 \cdot 10^3$	20,41	0,0010019	56,377	85,66	2538,2	2452,6	0,3024	8,6569	8,3545
$2,50 \cdot 10^3$	21,08	0,0010021	54,242	88,43	2539,4	2451,0	0,3119	8,6422	8,3303
$2,60 \cdot 10^3$	21,72	0,0010022	52,267	91,11	2540,6	2449,5	0,3210	8,6280	8,3071
$2,80 \cdot 10^3$	22,94	0,0010025	48,731	96,20	2542,8	2446,6	0,3382	8,6014	8,2632
$3,00 \cdot 10^3$	24,08	0,0010028	45,655	100,99	2544,9	2443,9	0,3543	8,5766	8,2222
$3,20 \cdot 10^3$	25,16	0,0010030	42,954	105,51	2546,8	2441,3	0,3695	8,5534	8,1839
$3,40 \cdot 10^3$	26,18	0,0010033	40,563	109,78	2548,7	2438,9	0,3838	8,5316	8,1479
$3,50 \cdot 10^3$	26,67	0,0010034	39,468	111,84	2549,6	2437,7	0,3907	8,5213	8,1306
$3,60 \cdot 10^3$	27,15	0,0010036	38,432	113,84	2550,4	2436,6	0,3973	8,5112	8,1138
$3,80 \cdot 10^3$	28,08	0,0010038	36,519	117,71	2552,1	2434,4	0,4102	8,4918	8,0816
$4,00 \cdot 10^3$	28,96	0,0010041	34,792	121,40	2553,7	2432,3	0,4224	8,4735	8,0510
$4,20 \cdot 10^3$	29,81	0,0010044	33,226	124,94	2555,2	2430,3	0,4341	8,4561	8,0219
$4,40 \cdot 10^3$	30,62	0,0010046	31,799	128,33	2556,7	2428,4	0,4453	8,4395	7,9941
$4,50 \cdot 10^3$	31,01	0,0010047	31,132	129,98	2557,4	2427,4	0,4507	8,4314	7,9807
$4,60 \cdot 10^3$	31,40	0,0010048	30,493	131,60	2558,1	2426,5	0,4560	8,4236	7,9676
$4,80 \cdot 10^3$	32,15	0,0010051	29,293	134,74	2559,5	2424,7	0,4663	8,4084	7,9421
$5,00 \cdot 10^3$	32,88	0,0010053	28,186	137,77	2560,8	2423,0	0,4763	8,3939	7,9177
$5,20 \cdot 10^3$	33,58	0,0010056	27,163	140,69	2562,0	2421,3	0,4858	8,3800	7,8942
$5,40 \cdot 10^3$	34,25	0,0010058	26,213	143,52	2563,2	2419,7	0,4950	8,3665	7,8715
$5,50 \cdot 10^3$	34,58	0,0010059	25,763	144,90	2563,8	2418,9	0,4995	8,3600	7,8605
$5,60 \cdot 10^3$	34,91	0,0010060	25,329	146,26	2564,4	2418,2	0,5039	8,3536	7,8497
$5,80 \cdot 10^3$	35,54	0,0010062	24,505	148,92	2565,6	2416,6	0,5125	8,3412	7,8286
$6,00 \cdot 10^3$	36,16	0,0010064	23,734	151,49	2566,7	2415,2	0,5209	8,3291	7,8083
$6,20 \cdot 10^3$	36,76	0,0010067	23,012	154,00	2567,7	2413,7	0,5290	8,3175	7,7886
$6,40 \cdot 10^3$	37,34	0,0010069	22,334	156,43	2568,8	2412,4	0,5368	8,3063	7,7695
$6,50 \cdot 10^3$	37,63	0,0010070	22,010	157,63	2569,3	2411,7	0,5407	8,3008	7,7601
$6,60 \cdot 10^3$	37,91	0,0010071	21,695	158,80	2569,8	2411,0	0,5444	8,2954	7,7509
$6,80 \cdot 10^3$	38,46	0,0010073	21,093	161,11	2570,8	2409,7	0,5519	8,2848	7,7330
$7,00 \cdot 10^3$	39,00	0,0010075	20,525	163,37	2571,8	2408,4	0,5591	8,2746	7,7155
$7,20 \cdot 10^3$	39,53	0,0010077	19,988	165,56	2572,7	2407,1	0,5661	8,2646	7,6985
$7,40 \cdot 10^3$	40,04	0,0010079	19,478	167,71	2573,6	2405,9	0,5730	8,2549	7,6820
$7,50 \cdot 10^3$	40,29	0,0010080	19,234	168,76	2574,1	2405,3	0,5763	8,2502	7,6739
$8,00 \cdot 10^3$	41,51	0,0010085	18,099	173,85	2576,2	2402,4	0,5925	8,2274	7,6349
$8,50 \cdot 10^3$	42,66	0,0010089	17,095	178,68	2578,3	2399,6	0,6078	8,2060	7,5982
$9,00 \cdot 10^3$	43,76	0,0010094	16,200	183,26	2580,3	2397,0	0,6223	8,1859	7,5636
$9,50 \cdot 10^3$	44,81	0,0010098	15,396	187,63	2582,1	2394,5	0,6361	8,1669	7,5308

Рис. 3. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения
(по давлению)

Интересное свойство водяных паров обнаруживается при рассмотрении характера изменения величины энтальпии в зависимости от давления пара (колонка 6 в табл. II рис. 6.3).

Как видим, при давлении $1,00 \cdot 10^3$ Па $h'' = 2513,7$ кДж/кг. С увеличением давления энтальпия увеличивается, достигая для давления $3,80 \cdot 10^6$ Па максимального значения $h'' = 2801,8$ кДж/кг, а затем постепенно уменьшается до $2087,5$ кДж/кг при давлении $2,21 \cdot 10^7$ Па. Таким образом, оказывается, что для получения сухого пара давлением, предположим, в 10 МПа, требуется подвести к нему меньше теплоты, чем для пара в 1 МПа (в первом случае $h'' = 2725$ кДж/кг, а во втором $h'' = 2777$ кДж/кг). В то же время пар давлением в 10 МПа способен совершать гораздо большую механическую работу, чем пар давлением в 1 МПа. Это свойство водяных паров является одной из причин, заставляющих стремиться к внедрению в промышленность и энергетику пара высокого давления.

ТАБЛИЦЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

В табл. III приведены термодинамические свойства воды и перегретого пара. По этим таблицам для заданных давлений и температур можно найти удельный объем, энтальпию и энтропию однофазной среды – воды и перегретого пара.

В первом столбце указаны температуры перегретого пара, расположенные в порядке их возрастания, начиная от 0 до 1000 °С. Для каждой температуры даются значения v , h и s , расположенные в последующих столбцах при различных давлениях перегретого пара. В строках по горизонтали указаны давления начиная от 1 кПа до 100 МПа. Таким образом, эта таблица дает возможность непосредственно или интерполяцией найти значения указанных в ней параметров, не прибегая к вычислениям.

По табл. IV можно определить истинную массовую изобарную теплоемкость воды и водяного пара c_p в зависимости от давления и температуры. В табл. V определяется скорость звука в воде и водяном паре. Пользуясь табл. VI, можно определить поверхностное натяжение воды σ , изобарную теплоемкость c_p , теплопроводность λ , динамическую вязкость μ , число Прандтля Pr для воды и пара в состоянии насыщения. В табл. VII–IX определяется динамическая вязкость μ , теплопроводность λ и число Прандтля Pr воды и водяного пара.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

t	$p = 1 \text{ кПа}$			$p = 2 \text{ кПа}$			$p = 3 \text{ кПа}$			$p = 4 \text{ кПа}$		
	$t_s = 6,98$			$t_s = 17,51$			$t_s = 24,08$			$t_s = 28,96$		
	$v'' = 129,18$	$h'' = 2513,7$	$s'' = 8,9749$	$v'' = 66,99$	$h'' = 2533,9$	$s'' = 8,7227$	$v'' = 45,66$	$h'' = 2544,9$	$s'' = 8,5766$	$v'' = 34,79$	$h'' = 2553,7$	$s'' = 8,4737$
v	h	s	v	h	s	v	h	s	v	h	s	
0	0,0010002	0,0	-0,0002	0,0010002	0,0	-0,0002	0,0010002	0,0	-0,0002	0,0010002	0,0	-0,0002
10	130,59	2519,4	8,9953	0,0010003	42,0	0,1511	0,0010003	42,0	0,1511	0,0010003	42,0	0,1511
20	135,22	2538,2	9,0604	67,57	2537,7	8,7390	0,0010018	83,9	0,2965	0,0010018	83,9	0,2965
30	139,85	2556,9	9,1233	69,89	2556,5	8,8023	46,57	2556,1	8,6141	34,91	2555,7	8,4801
40	144,47	2575,7	9,1841	72,21	2575,3	8,8634	48,12	2575,0	8,6754	36,08	2574,7	8,5418
50	149,10	2594,4	9,2430	74,53	2594,1	8,9224	49,67	2593,9	8,7347	37,24	2593,6	8,6012
60	153,72	2613,2	9,3002	76,84	2613,0	8,9798	51,21	2612,7	8,7921	38,40	2612,5	8,6588
70	158,34	2632,0	9,3558	79,15	2631,8	9,0354	52,76	2631,6	8,8479	39,56	2631,4	8,7146
80	162,96	2650,8	9,4099	81,46	2650,6	9,0896	54,30	2650,5	8,9021	40,72	2650,3	8,7689
90	167,58	2669,6	9,4625	83,77	2669,5	9,1423	55,84	2669,4	8,9549	41,87	2669,2	8,8218
100	172,19	2688,5	9,5138	86,08	2688,4	9,1937	57,38	2688,3	9,0063	43,03	2688,2	8,8732
110	176,81	2707,5	9,5639	88,39	2707,4	9,2438	58,92	2707,3	9,0564	44,19	2707,1	8,9234
120	181,43	2726,4	9,6128	90,70	2726,3	9,2927	60,46	2726,3	9,1054	45,34	2726,2	8,9724
130	186,05	2745,5	9,6606	93,01	2745,4	9,3405	62,00	2745,3	9,1532	46,50	2745,2	9,0203
140	190,66	2764,5	9,7073	95,32	2764,5	9,3872	63,54	2764,4	9,2000	47,65	2764,3	9,0670
150	195,28	2783,6	9,7530	97,63	2783,6	9,4330	65,08	2783,5	9,2457	48,81	2783,4	9,1128
160	199,90	2802,8	9,7978	99,94	2802,7	9,4777	66,62	2802,7	9,2905	49,96	2802,6	9,1576
170	204,51	2822,0	9,8416	102,25	2822,0	9,5216	68,16	2821,9	9,3344	51,12	2821,9	9,2015
180	209,13	2841,3	9,8846	104,56	2841,2	9,5646	69,70	2841,2	9,3774	52,27	2841,1	9,2445
190	213,74	2860,6	9,9268	106,87	2860,6	9,6068	71,24	2860,5	9,4196	53,43	2860,5	9,2867
200	218,36	2880,0	9,9682	109,17	2880,0	9,6482	72,78	2879,9	9,4610	54,58	2879,9	9,3282
210	222,98	2899,4	10,0088	111,48	2899,4	9,6889	74,32	2899,3	9,5017	55,74	2899,3	9,3688
220	227,59	2918,9	10,0488	113,79	2918,9	9,7288	75,86	2918,8	9,5416	56,89	2918,8	9,4088
230	232,21	2938,5	10,0880	116,10	2938,4	9,7680	77,40	2938,4	9,5809	58,04	2938,4	9,4480
240	236,82	2958,1	10,1266	118,41	2958,0	9,8066	78,94	2958,0	9,6194	59,20	2958,0	9,4866
250	241,44	2977,7	10,1645	120,72	2977,7	9,8446	80,47	2977,7	9,6574	60,35	2977,6	9,5246
260	246,05	2997,5	10,2019	123,02	2997,4	9,8819	82,01	2997,4	9,6948	61,51	2997,4	9,5619
270	250,67	3017,2	10,2386	125,33	3017,2	9,9187	83,55	3017,2	9,7315	62,66	3017,2	9,5987
280	255,29	3037,1	10,2748	127,64	3037,1	9,9549	85,09	3037,0	9,7677	63,82	3037,0	9,6349
290	259,90	3057,0	10,3105	129,95	3057,0	9,9906	86,63	3056,9	9,8034	64,97	3056,9	9,6706
300	264,52	3077,0	10,3456	132,26	3076,9	10,0257	88,17	3076,9	9,8385	66,12	3076,9	9,7057
310	269,13	3097,0	10,3803	134,56	3097,0	10,0603	89,71	3096,9	9,8732	67,28	3096,9	9,7404
320	273,75	3117,1	10,4144	136,87	3117,0	10,0945	91,25	3117,0	9,9073	68,43	3117,0	9,7745
330	278,36	3137,2	10,4481	139,18	3137,2	10,1282	92,78	3137,2	9,9410	69,59	3137,2	9,8082
340	282,98	3157,4	10,4814	141,49	3157,4	10,1614	94,32	3157,4	9,9743	70,74	3157,4	9,8415
350	287,59	3177,7	10,5142	143,79	3177,7	10,1943	95,86	3177,7	10,0071	71,89	3177,7	9,8743
360	292,21	3198,1	10,5466	146,10	3198,0	10,2266	97,40	3198,0	10,0395	73,05	3198,0	9,9067
370	296,83	3218,5	10,5785	148,41	3218,4	10,2586	98,94	3218,4	10,0715	74,20	3218,4	9,9387
380	301,44	3238,9	10,6101	150,72	3238,9	10,2902	100,48	3238,9	10,1031	75,36	3238,9	9,9703
390	306,06	3259,5	10,6413	153,03	3259,5	10,3214	102,02	3259,4	10,1343	76,51	3259,4	10,0015
400	310,67	3280,1	10,6722	155,33	3280,1	10,3522	103,55	3280,0	10,1651	77,67	3280,0	10,0323
410	315,29	3300,7	10,7026	157,64	3300,7	10,3827	105,09	3300,7	10,1956	78,82	3300,7	10,0628
420	319,90	3321,5	10,7328	159,95	3321,5	10,4129	106,63	3321,4	10,2257	79,97	3321,4	10,0929
430	324,52	3342,3	10,7626	162,26	3342,3	10,4426	108,17	3342,3	10,2555	81,13	3342,2	10,1227
440	329,13	3363,1	10,7920	164,57	3363,1	10,4721	109,71	3363,1	10,2850	82,28	3363,1	10,1522
450	333,75	3384,1	10,8212	166,87	3384,1	10,5013	111,25	3384,1	10,3141	83,43	3384,0	10,1813
460	338,36	3405,1	10,8500	169,18	3405,1	10,5301	112,79	3405,1	10,3430	84,59	3405,0	10,2102
470	342,98	3426,2	10,8786	171,49	3426,1	10,5587	114,32	3426,1	10,3715	85,74	3426,1	10,2387
480	347,60	3447,3	10,9068	173,80	3447,3	10,5869	115,86	3447,3	10,3998	86,90	3447,3	10,2670
490	352,21	3468,5	10,9348	176,10	3468,5	10,6149	117,40	3468,5	10,4277	88,05	3468,5	10,2950

Рис. 4. Термодинамические свойства воды и перегретого пара

ST-ДИАГРАММА

Для изображения в системе sT -координат процесса парообразования необходимо пользоваться такими соотношениями для этого процесса, которые были бы выражены через параметры s и T . При построении sT -диаграммы для первой стадии парообразования – нагрева 1 кг воды от 0°C до температуры кипения t_s – пользуются уравнением:

$$s = 2,31g \frac{T}{273}, \quad (1)$$

в котором $T \leq T_s$ и $s \leq s'$.

Если T равно 273 К (т.е. 0°C), как видно из уравнения, $s = 0$ и, следовательно, точка, определяющая это состояние воды, должна лежать на оси ординат. Обозначим эту точку через А (рис. 5).

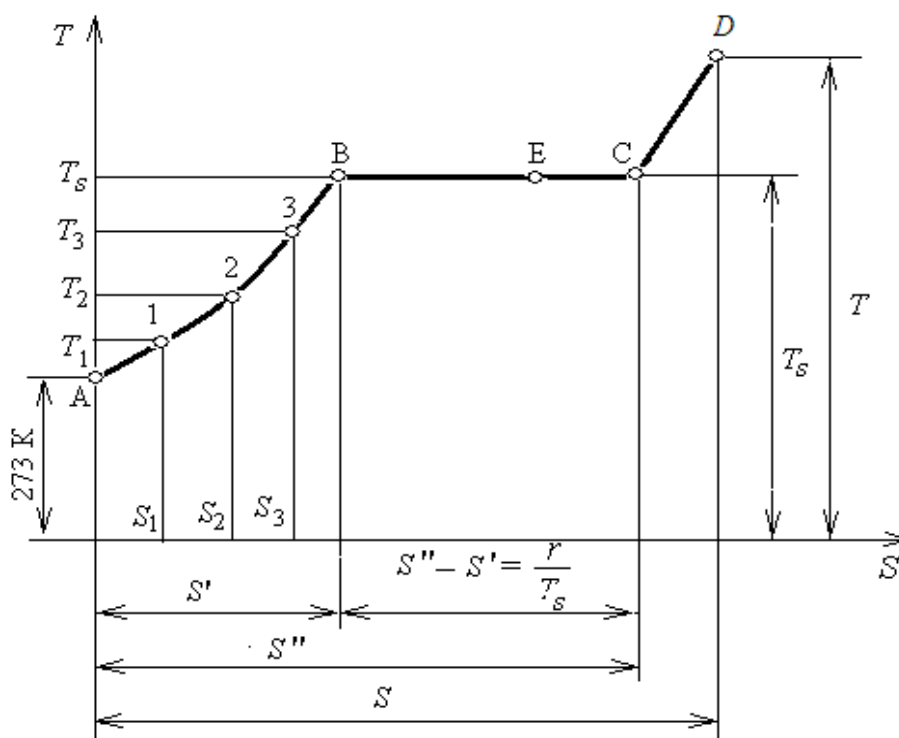


Рис. 5. Изображение процесса парообразования при постоянном давлении
в осях sT

Если воду подогреть до температуры, положим, T_1 , то энтропия, увеличиваясь, станет

равной s_1 , и состояние воды будет определяться точкой 1. Если подогреть воду больше, то температура ее будет возрастать, принимая значения T_2, T_3 и т.д. до температуры T_s , когда вода начнет кипеть. При этом энтропия воды будет также все время увеличиваться и принимать значения соответственно s_2, s_3 и, наконец, s' (при температуре, равной T_s).

Состояние пара при указанных значениях температуры и энтропии будет на диаграмме определяться точками 2, 3 и т.д. точкой B . Если через все эти точки провести плавную кривую, то она будет графически изображать характер изменения энтропии при нагревании воды от 0°C до T_s .

При дальнейшем подводе теплоты вода начнет превращаться в пар, энтропия будет продолжать увеличиваться, но температура не будет изменяться, поэтому линия процесса для этой стадии парообразования изобразится в виде прямой BC , параллельной оси абсцисс. Точка C определяет состояние, в котором вся вода превратилась в пар (состояние сухого пара). Изменение энтропии в процессе парообразования, т.е. от точки B до точки C , может быть подсчитано по уравнению

$$s'' - s' = \frac{r}{T_s}. \quad (2)$$

При дальнейшем подводе теплоты пар перейдет в область перегрева, при этом будут возрастать энтропия и температура его. Линия процесса для данной стадии парообразования CD строится по уравнению

$$s - s'' = 2,3 c_{pm} \lg \frac{T}{T_s}. \quad (3)$$

Таким образом, весь процесс получения перегретого пара изобразится ломаной линией $ABCD$.

Значение энтропии пара в точке C может быть подсчитано по уравнению

$$s'' = s' + \frac{r}{T_s}. \quad (4)$$

Изменение энтропии изобразится на диаграмме суммой отрезков s' и BC ; следовательно,

$$s'' = s' + BC, \quad (5)$$

откуда следует, что

$$BC = \frac{r}{T_s}. \quad (6)$$

Если процесс парообразования не доводить до конца, т.е. остановиться на какой-нибудь

точке E , которая будет определять состояние влажного пара степени сухости x , то изменение энтропии можно подсчитать по уравнению

$$s_x = s' + \frac{xr}{T_s}. \quad (7)$$

На диаграмме

$$s_x = s' + BE, \quad (8)$$

откуда следует, что

$$BE = \frac{xr}{T_s}. \quad (9)$$

Деля уравнение (9) на уравнение (6), получим

$$\frac{BE}{BC} = \frac{\frac{xr}{T_s}}{\frac{r}{T_s}} = x.$$

Следовательно, отношение $\frac{BE}{BC}$ равно степени сухости пара. Если повысить давление

воды, из которой был получен перегретый пар, то очевидно, что при температуре, соответствующей точке B , кипение еще не наступит; для того чтобы вода закипела, ее необходимо подогреть до более высокой температуры, при этом увеличится и энтропия. Момент начала кипения определится точкой B' , расположенной на продолжении линии AB , а состояние сухого пара – C' (рис. 6).

Если же давление воды понизить, то момент начала кипения изобразится какой-нибудь точкой B_1 , лежащей также на прямой AB , но ниже точки B . При этом давлении состояние сухого пара изобразится точкой C_1 .

Беря разные значения давлений воды, получим ряд точек: B_1, B_2, B_3 и т.д., соответствующих началу кипения воды, и ряд точек: C_1, C_2, C_3 и т.д., соответствующих состоянию сухого пара. Если через эти точки провести плавные линии, то на диаграмме получатся две кривые AK и DK : первая из них будет являться кривой жидкости, разделяющей области жидкости и влажного насыщенного пара, разделяющей области влажного и перегретого паров. Как видно на чертеже, эти линии сходятся и точка пересечения их, очевидно, является критической

точкой K , о которой уже говорилось раньше.

Если на линиях $BC, B_1 C_1, B_2 C_2$ и т.д. нанести точки E, E_1, E_2, E_3 и т.д., соответствующие какому-нибудь значению степени сухости, и провести через них плавную кривую, то получим так называемую *линию постоянной степени сухости* (или постоянного паросодержания) KE_4 .

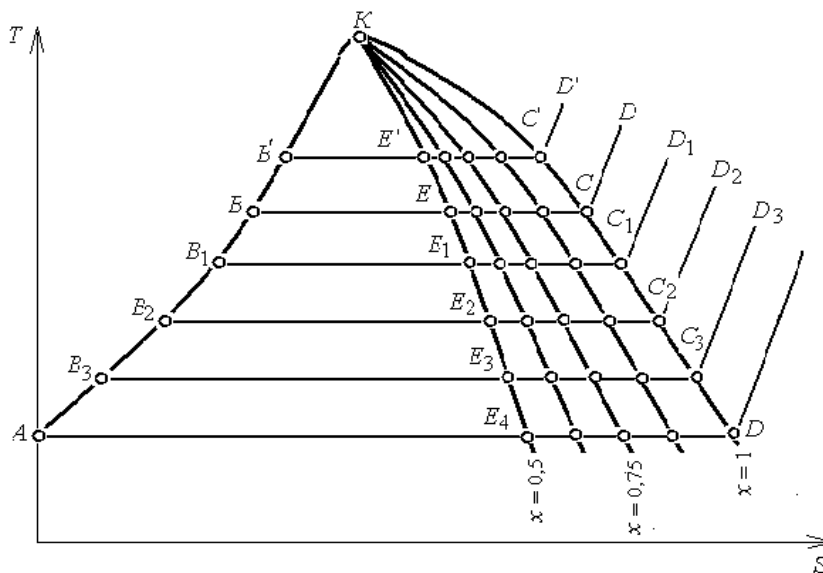


Рис. 6. sT — диаграмма водяного пара (схема)

Таких линий для различных значений степени сухости можно нанести на диаграмме несколько; тогда получим ряд кривых, также сходящихся в критической точке.

В sT -диаграмме площадь, ограниченная линией процесса, осью абсцисс и крайними ординатами, определяет количество теплоты, участвующей в процессе. Применим это свойство sT -диаграммы к процессу парообразования, который изобразим линией $Aabc$ (рис. 7).

Процесс превращения кипящей воды в пар при этом изобразится линией ab . Согласно указанному свойству площадь прямоугольника $abmn$ должна определять теплоту парообразования r . Действительно, для конечной точки этого процесса – точки b , когда пар превратится в сухой, значение энтропии находят по уравнению:

$$s'' - s' = \frac{r}{T_s}.$$

Откуда

$$r = T_s (s'' - s').$$

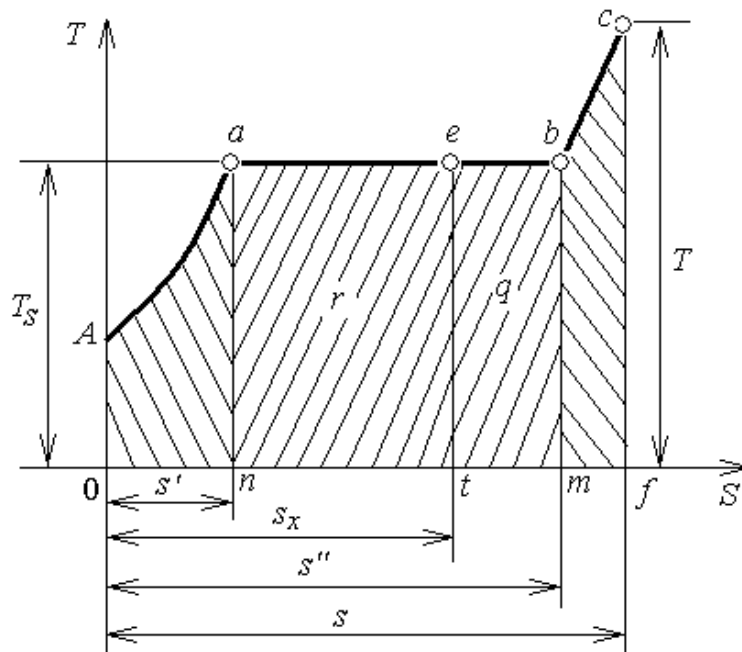


Рис. 7. Изображение в осях sT теплоты в процессе парообразования

На рис. 7 значение температуры T_s определяется отрезком an , т.е. высотой прямоугольника $abmn$, а $s'' - s'$ – отрезком nm , равным основанию этого прямоугольника.

Для других стадий парообразования площадь $0Aan$ определяет количество теплоты λ' , которое требуется подвести к воде, взятой при 0°C , чтобы довести ее до кипения, а площадь $mbcf$ – количество теплоты, затрачиваемый на перегрев.

Понятно, что сумма площадей $0Aan$ и $nabm$ представляет величину полной теплоты сухого пара λ'' . Если же к эти двум площадям прибавить еще и площадь $mbcf$, то получим графическое изображение величины полной теплоты перегретого пара λ . Для влажного пара, состояние которого определяется, например, точкой e , теплота λ_x будет равна сумме площадей $0Aan$ и $naet$. Обратное протекание процесса от точки c к точке A связано с уменьшением энтропии, а следовательно, и с отводом теплоты от рабочего тела. При этом указанные площади будут представлять собой количества отведенной теплоты.

h,S -ДИАГРАММА

sT -диаграмма является очень наглядной при различных исследованиях, связанных с теплотой. Однако в расчетной работе эта диаграмма неудобна тем, что для нахождения по ней количества теплоты, участвующей в процессе, нужно измерять площадь. В тех случаях, когда линия процесса является кривой, это представляет некоторые затруднения. Поэтому в

теплотехнических расчетах часто пользуются диаграммой, в которой по оси ординат отложены величины энтальпии, а по оси абсцисс – изменение энтропии. Для того, чтобы найти величину энтальпии по такой диаграмме, а следовательно, и количество теплоты, необходимо измерить лишь длину соответствующего отрезка по оси ординат, что, конечно, гораздо проще, чем измерять площадь. Эта диаграмма получила название h,S -диаграммы.

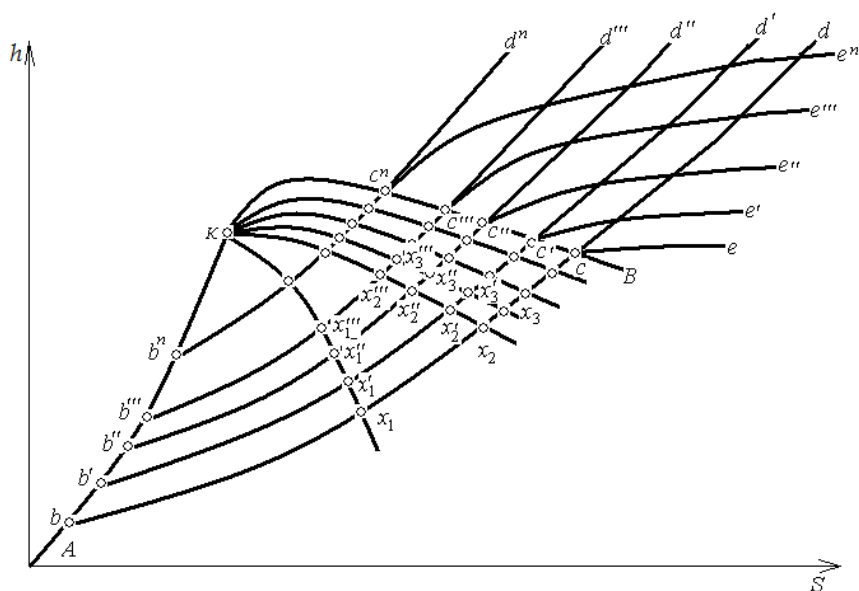


Рис. 8. h,S -диаграмма водяного пара (схема)

На нее наносятся обычно те же линии, что и в sT -диаграмме, т.е. кривые жидкости и сухого насыщенного пара, линии постоянных давлений и линии постоянных степеней сухости. Кроме того, на si -диаграмме наносятся линии постоянных температур, которые в sT -диаграмме имеют вид горизонтальных линий. AK – линия жидкости, KB – линия сухого пара.

На практике обычно не приходится иметь дела с очень влажными парами, область которых находится в нижней части si -диаграммы. Поэтому для практических целей пользуются только правой верхней ее частью, что дает возможность выполнить ее в более крупном масштабе и сделать более подробной и удобной для пользования. Такая диаграмма построена профессором Вукаловичем..