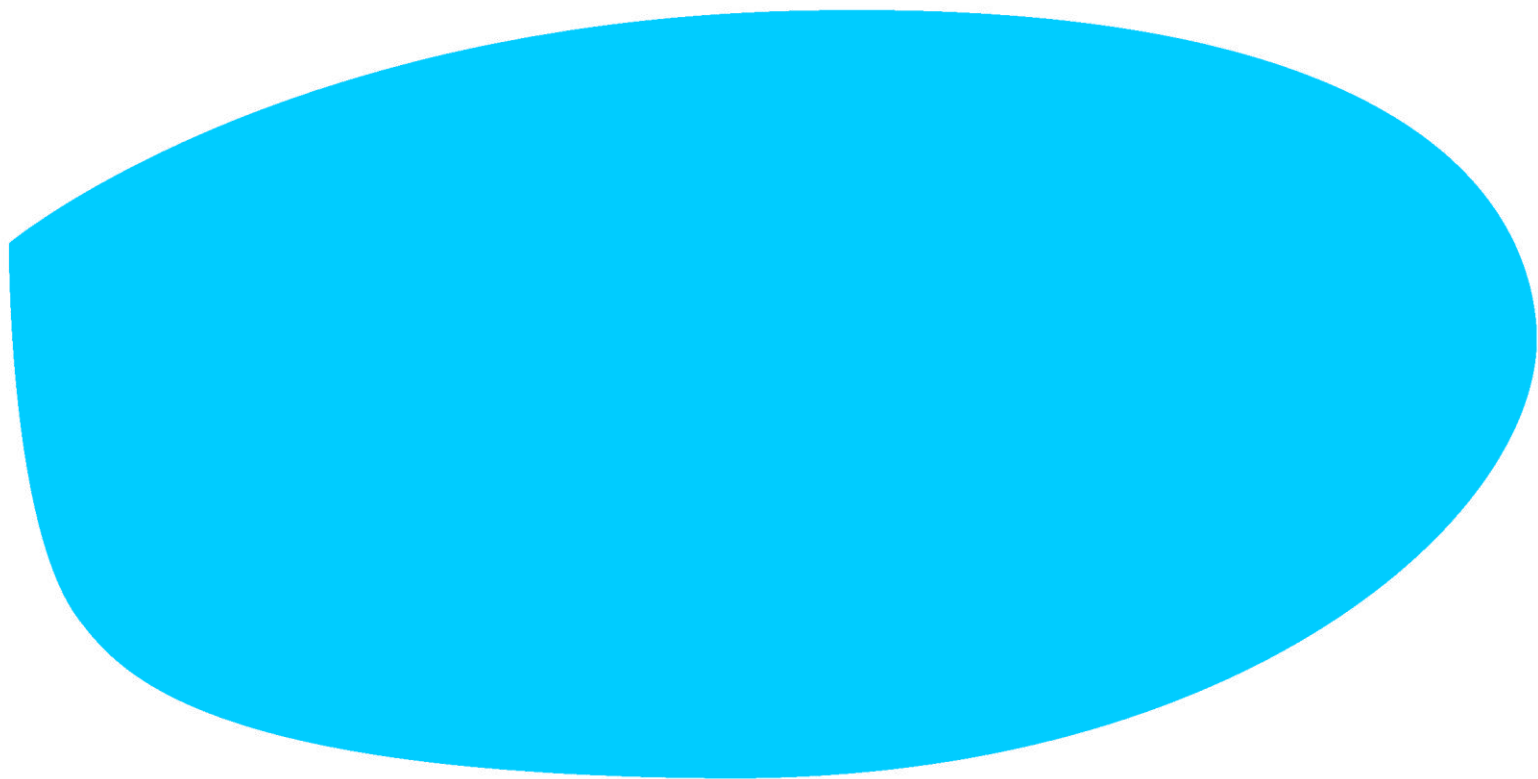


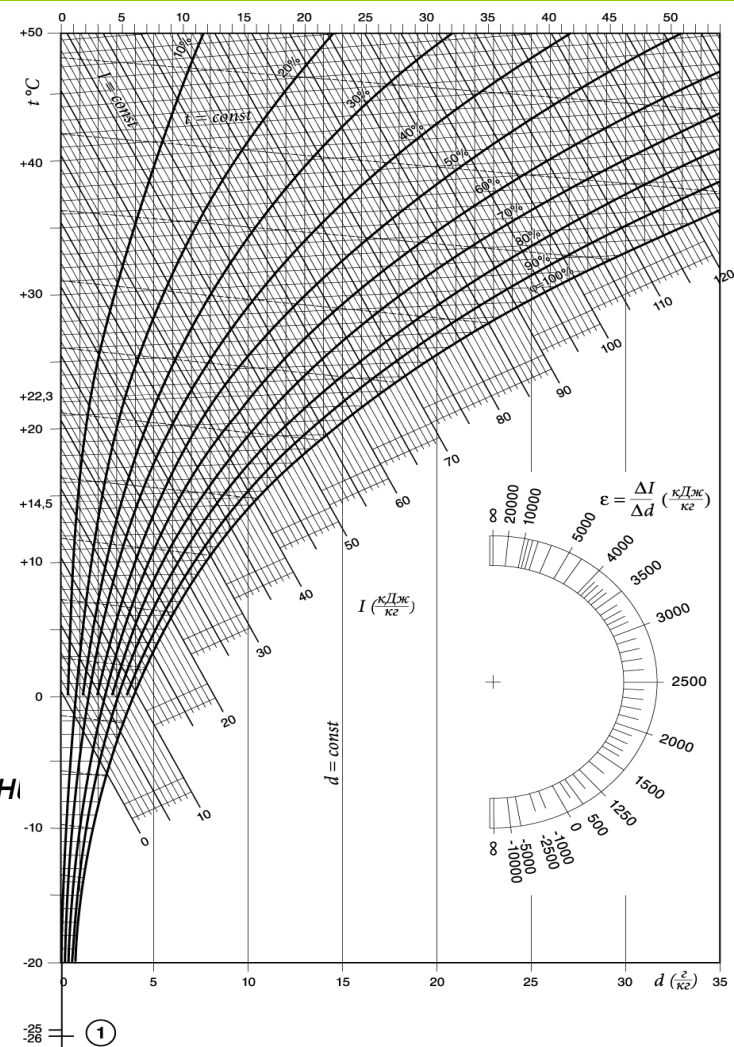
# Физические величины, характеризующие состояние и свойства влажного воздуха



Волков В.А.

## 3.8 H-d Диаграмма Физические параметры влажного воздуха

- **Температура**
- **Абсолютная влажность воздуха**
- **Относительная влажность воздуха**
- **Влагосодержание (массовое) 3.8.5**
- **Температура (точка) росы**
- **Теплоемкость воздуха**
- **Теплоемкость водяного пара**
- **Теплоемкость влажного воздуха 3.8.2**
- **Теплосодержание (энтальпия) воздуха 3.8.3**
- **Теплопроводность воздуха**
- **Температурный коэффициент объемного расширения**
- **Плотность влажного воздуха 3.8.1**
- **Давление насыщенного водяного пара 3.8.4**
- **Универсальная газовая постоянная**



### 3.8.1 Плотность влажного воздуха (научный подход)

$$\rho_{air} = 1.2 \text{ кг} / \text{м}^3$$

■ Формула

$$\rho_{air} = 3.488 \frac{P_{bar}}{273.15 + t_{air}} - 1.32 \frac{P_v}{273.15 + t_{air}} \quad (*)$$

■ Барометрическое давление

$$P_{bar} [\text{кПа}]$$

■ Парциальное давление (упругость) водяного пара при заданной температуре и относительной влажности воздуха (расчет отдельным блоком 3.8.4)

$$P_v [\text{кПа}]$$

### 3.8.1 Плотность влажного воздуха (инженерный подход)

$$\rho_{air} = 1.2 \text{ кг} / \text{м}^3$$

- Формула в системе СИ

$$\rho_{air} = \frac{3.49}{273 + t_{air}} P_{bar} \quad (*) \quad P_{bar} [\text{кПа}]$$

- Расчетное барометрическое давление в СНиП приведено в гектопаскалях.

$$\rho_{air} = \frac{0.349}{273 + t_{air}} P_{bar} \quad (*) \quad P_{bar} [\text{гПа}]$$

1 гПа = 100 Па.

*При расчете систем вентиляции и кондиционирования воздуха  $d \ll 1000$ , и находится в диапазоне от 0 до 20 г/кг сух.возд. При этом парциальное давление водяного пара не превышает 3 кПа. Поэтому для большинства расчетов, с достаточной точностью плотность воздуха можно считать без учета его влагосодержания, по упрощенной зависимости*

## 3.8.2 Теплоемкость влажного воздуха



- Формула

$$c_{air} = c_{d\_air} + c_v d_{air} \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$$

- Средняя удельная теплоемкость сухого воздуха

$$c_{d\_air} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}} \right]$$

- Средняя удельная теплоемкость водяного пара

$$c_v \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}} \right]$$

- Влагосодержание влажного воздуха

$$d_{air} \left[ \frac{\text{г}}{\text{кг}} \right]$$

- Для практических расчетов

$$c_{air} = 1.005 + 1.84d \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$$



### 3.8.3 Теплосодержание (энтальпия) воздуха

Что такое энтальпия ?

- Формула 
$$h_{air} = c_{d\_air} t_{air} + r d_{air} \cdot 10^{-3} + c_v t_{air} d_{air} \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right]$$
- Удельная теплоемкость сухого воздуха 
$$c_{d\_air} \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} \right]$$
- Удельная теплоемкость водяного пара 
$$c_v \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} \right]$$
- Удельная теплота парообразования 2500 кДж/(кг °С) 
$$r \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} \right]$$
- Для расчетов 
$$h = 1.0056 t + (2500 + 1.84 t) d * 10^{-3} \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right]$$

### 3.8.4 Давление насыщенного водяного пара



■ Формула

$$\lg P_{s\_v} = 2.125 + \frac{156 + 8.12 \cdot t_{s\_air}}{236 + t_{s\_air}} \quad (*)$$

■ Температура насыщенного влажного воздуха

$$t_{s\_air} [^{\circ}C]$$

■ Т.е.

$$P_{s\_v} = 10^{2.125 + \frac{156 + 8.12 \cdot t_{s\_air}}{236 + t_{s\_air}}} [Па] \quad (*)$$

*Давление насыщенного водяного пара при температурах от –20 до 100 °С представлено в таблицах.*

*Пересчет в СИ: 1 мм рт. ст. = 133,3 Па*

### 3.8.4 Давление насыщенного водяного пара



$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ мм рт.ст.	$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ мм рт.ст.	$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ мм рт.ст.	$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ мм рт.ст.	$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ мм рт.ст.
-20	0,772	5	6,54	30	31,82	55	118,0	80	355,1
-19	0,850	6	7,01	31	33,70	56	123,8	81	369,7
-18	0,935	7	7,51	32	35,66	57	129,8	82	384,9
-17	1,027	8	8,05	33	37,73	58	136,1	83	400,6
-16	1,128	9	8,61	34	39,90	59	142,6	84	416,8
-15	1,238	10	9,21	35	42,18	60	149,4	85	433,6
-14	1,357	11	9,84	36	44,56	61	156,4	86	450,9
-13	1,486	12	10,52	37	47,07	62	163,8	87	468,7
-12	1,627	13	11,23	38	49,65	63	171,4	88	487,1
-11	1,780	14	11,99	39	52,44	64	179,3	89	506,1
-10	1,946	15	12,79	40	55,32	65	187,5	90	525,8
-9	2,125	16	13,63	41	58,34	66	196,1	91	546,1
-8	2,321	17	14,53	42	61,50	67	205,0	92	567,0
-7	2,532	18	15,48	43	64,80	68	214,2	93	588,6
-6	2,761	19	16,48	44	68,26	69	223,7	94	610,9
-5	3,008	20	17,54	45	71,88	70	233,7	95	633,9
-4	3,276	21	18,65	46	75,65	71	243,9	96	657,6
-3	3,566	22	19,83	47	79,60	72	254,6	97	682,1
-2	3,879	23	21,07	48	83,71	73	265,7	98	707,3
-1	4,216	24	22,38	49	88,02	74	277,2	99	733,2
0	4,579	25	23,76	50	92,51	75	289,1	100	760,0
+1	4,93	26	25,21	51	97,20	76	301,4		
+2	5,29	27	26,74	52	102,1	77	314,1		
+3	5,69	28	28,35	53	107,2	78	327,3		
+4	6,10	29	30,04	54	112,5	79	341,0		

### 3.8.5 Влагосодержание воздуха

$$d_{air} \left[ \frac{г}{кг} \right]$$

---

- Формула

$$d_{air} = \frac{M_v}{M_{св}}$$

- масса водяного пара, содержащаяся во влажном воздухе

$$M_v \left[ г \right]$$

- масса сухой части влажного воздуха

$$M_{сн} \left[ кг \right]$$

- Или через парциальные давления

$$d_{air} = 623 \frac{P_v}{P_{св}}$$

### 3.8.5 Влагосодержание воздуха

$$d_{air} \left[ \frac{г}{кг} \right]$$

---

- Формула для расчетов

$$d_{air} = 623 \frac{\varphi \cdot P_{sv}}{(P_{bar} - \varphi \cdot P_{sv})} \quad (*)$$

- парциальное давление водяного пара в насыщенном влажном воздухе (3.8.4)

$$P_{s.v.} [кПа]$$

- Барометрическое давление воздуха

$$P_{bar} [кПа]$$

- Относительная влажность воздуха

$$\varphi [\%]$$

# ПОСТРОЕНИЕ процессов в H-d диаграмме

1. нагрев
2. охлаждение
3. смешение
4. паровое увлажнение
5. адиабатическое  
увлажнение

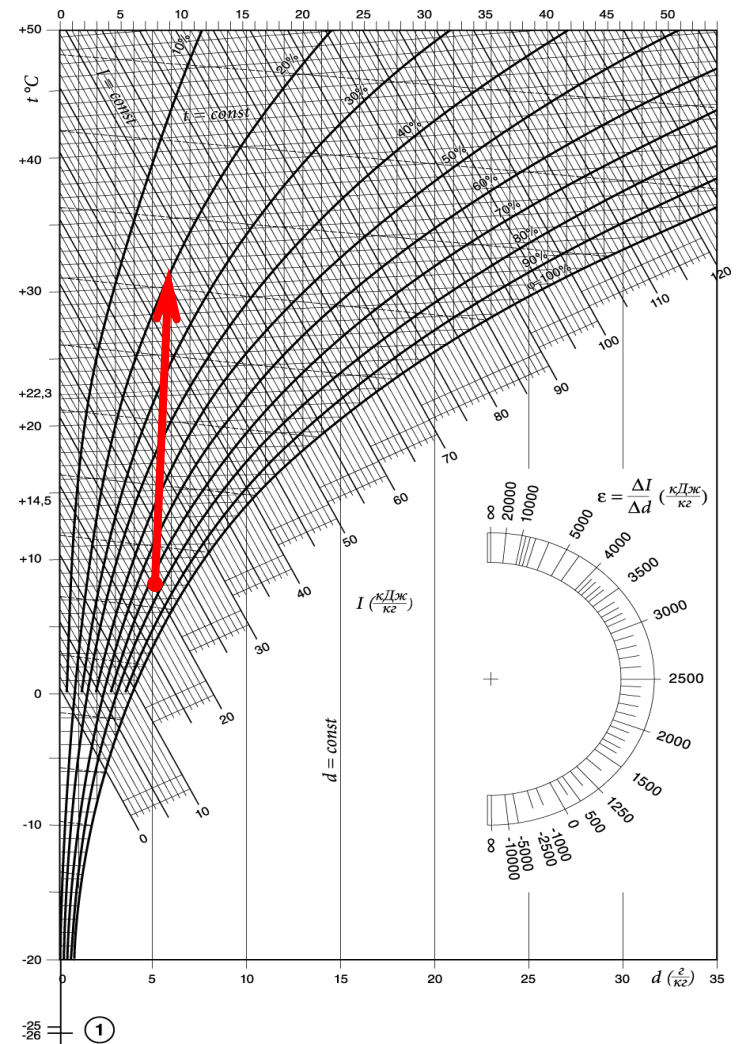
PROJECT/SUBJECT IDENTIFIER

Оборудование для  
кондиционирования воздуха



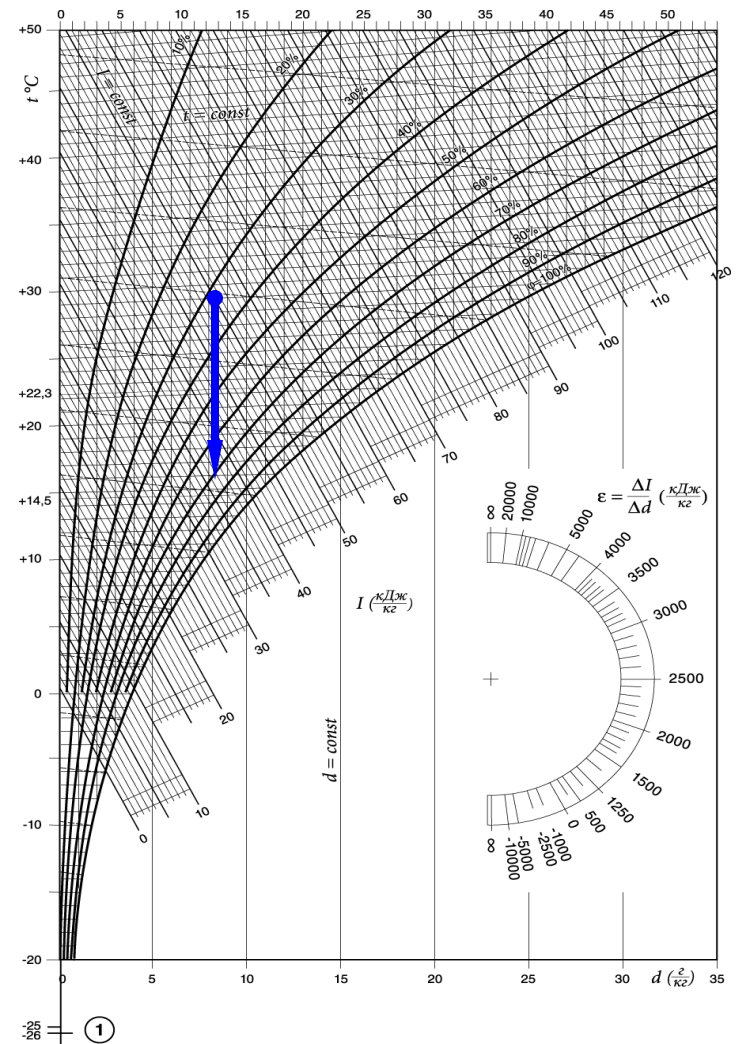
# 1. Нагрев

- Относительная влажность уменьшается, т.е. «по ощущениям» воздух становится суше.
- Но влагосодержание постоянное!



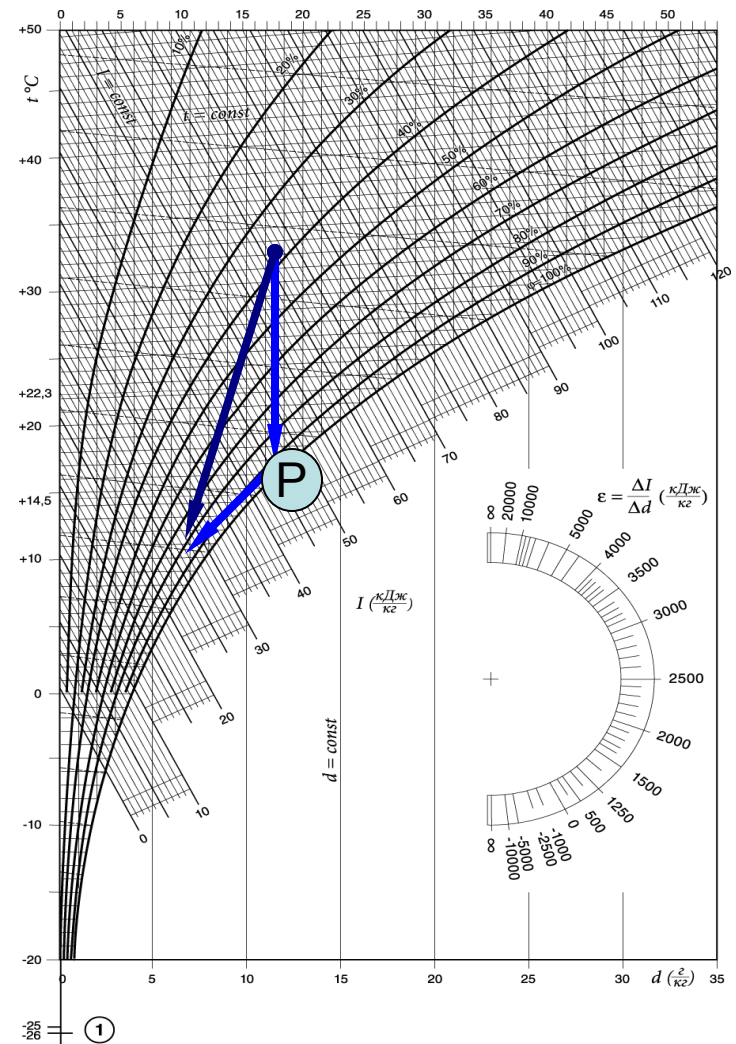
## 2. Охлаждение

- Относительная влажность увеличивается
- Но в начале процесса влагосодержание постоянное



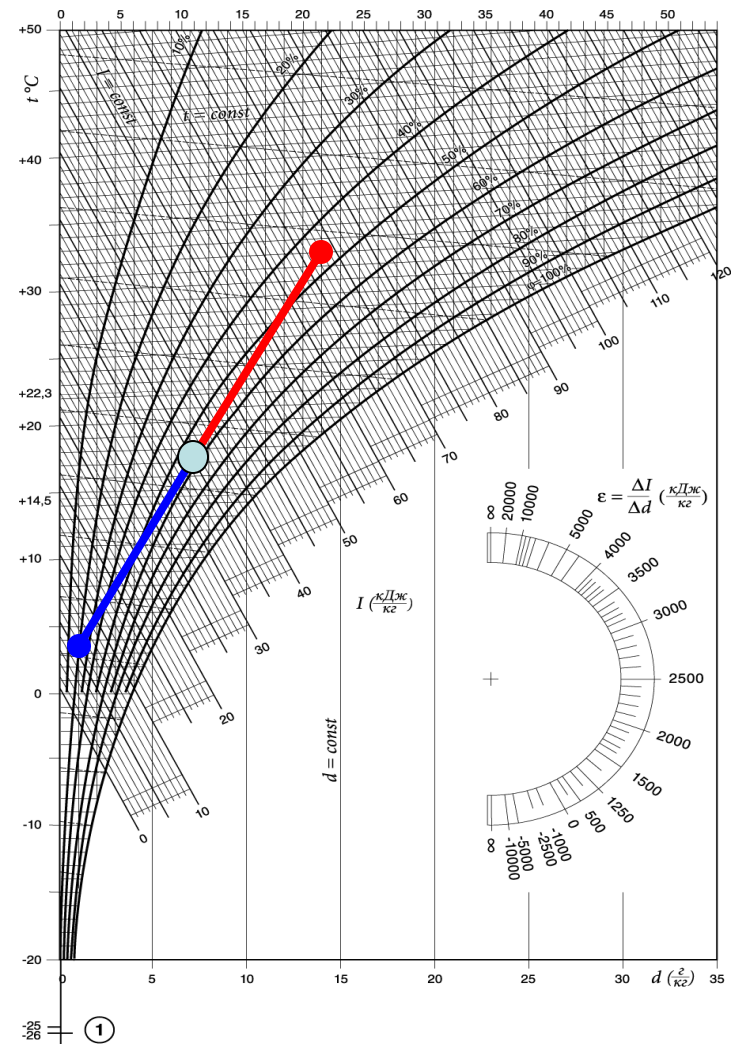
## 2. Охлаждение Температура (точка) росы

- После достижения 100% относительной влажности из воздуха «выпадает» первая капля воды
- Далее процесс охлаждения происходит по линии 100% относительной влажности с постоянным выпадением воды
- При этом уменьшается влагосодержания
- Воздух Осушается



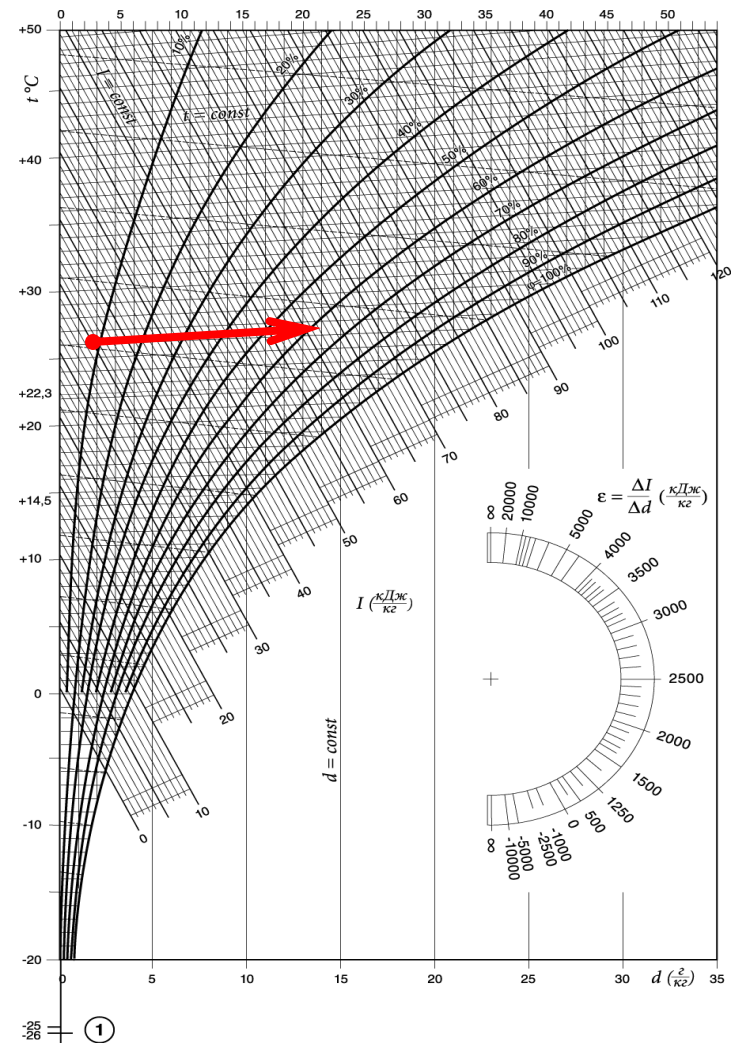
### 3. Смешение

- Процесс идет по линии соединяющей «точки» смешиваемых потоков
- Точка смеси разбивает линию смешения в соотношении обратном пропорциональном объемам смешиваемых потоков



## 4. Паровое увлажнение

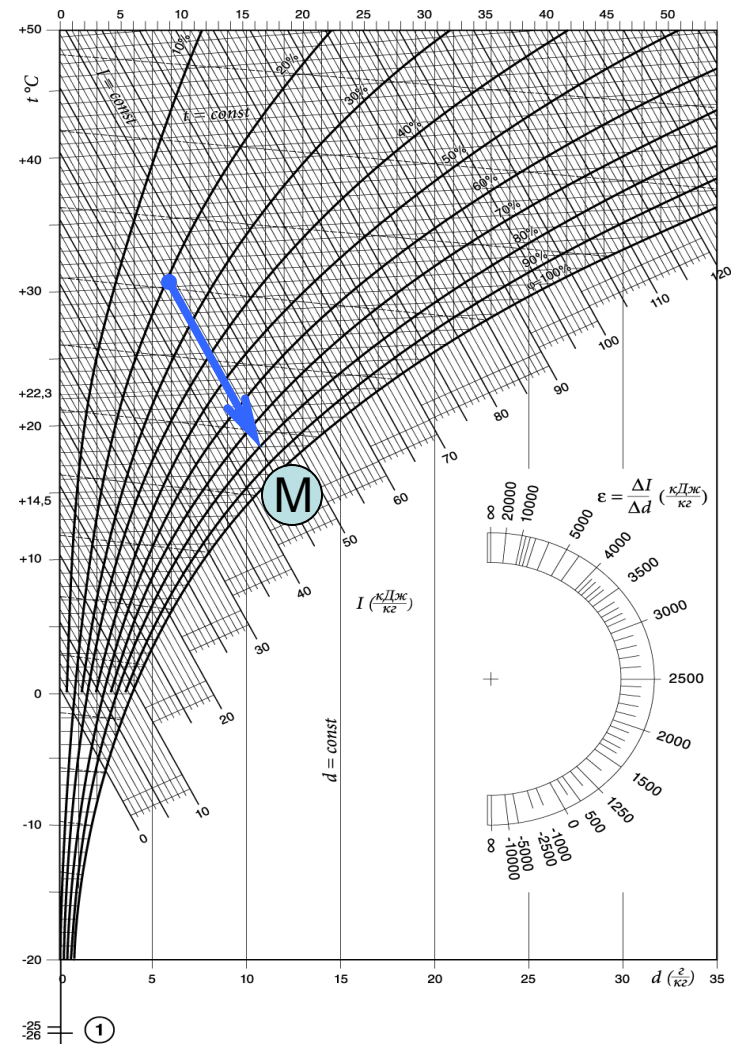
- Процесс идет при постоянной температуре воздушного потока
- Температура воздуха практически не меняется, независимо от температуры пара
- Влажность, относительная влажность и энтальпия увеличивается



## 5. Адиабатическое увлажнение

### Температура (точка) мокрого термометра

- Процесс идет при постоянном значении энтальпии
- Температура воздуха уменьшается, т.е. происходит Охлаждение
- Влагосодержание и относительная влажность увеличивается
- При 100% эффективности увлажнителя будет достигнута точка мокрого термометра



# Физические величины, характеризующие состояние и свойства влажного воздуха

