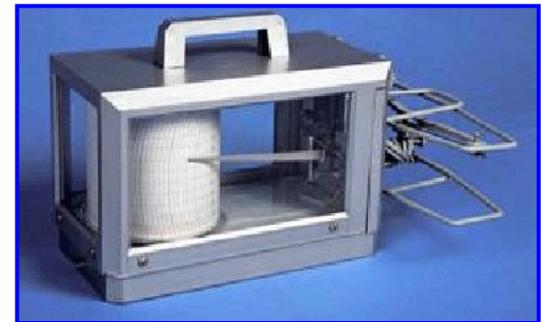


Тема 2. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ



СОДЕРЖАНИЕ ТЕМЫ

- 2.1. Психрометрический метод измерения влажности.
- 2.2. Деформационные гигрометры.
- 2.3. Конденсационные гигрометры.
- 2.4. Электролитические гигрометры.
- 2.5. Сорбционные гигрометры.
- 2.6. Радиационные гигрометры.
- 2.7. Конденсаторные гигрометры.

2.1. Психрометрический метод.

С понятием «влажность воздуха» связаны следующие величины:

1. Абсолютная влажность воздуха – a – масса водяного пара, содержащаяся в единице объема воздуха.

2. Парциальное давление водяного пара – e .

3. Давление насыщения – E . $E = \max e$.

4. Относительная влажность воздуха $f = \frac{e}{E} \cdot 100\%$.

5. Массовая доля водяного пара – c – количество водяного пара в единице массы воздуха.

6. Температура точки росы – t_d – та температура, при которой водяной пар становится насыщенным ($f = 100\%$).

2.1. Психрометрический метод.

Психрометрический метод заключается в измерении разности температур между сухим и смоченным термометрами.

С поверхности смоченного термометра происходит испарение воды. Затраченное тепло уходит с водяным паром, температура смоченного термометра понижается.

Скорость испарения тем больше, чем ниже относительная влажность. Докажем, что разность температур между сухим и смоченным термометром связана с влажностью и выведем формулу для чувствительности психрометра.

2.1. Психрометрический метод.

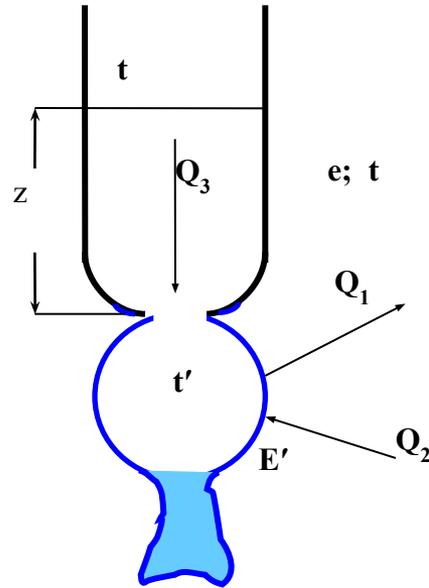


Рис. 2.1.1. Смоченный термометр.

Пусть t' - температура смоченного термометра,

t - температура сухого термометра,

e - парциальное давление водяного пара,

E' - давление насыщения при температуре t' ,

Q_1 - поток тепла, связанный с испарением,

Q_2 - поток тепла из воздуха к охлажденному термометру,

Q_3 - поток тепла по стержню термометра к охлажденному резервуару.

2.1. Психрометрический метод.

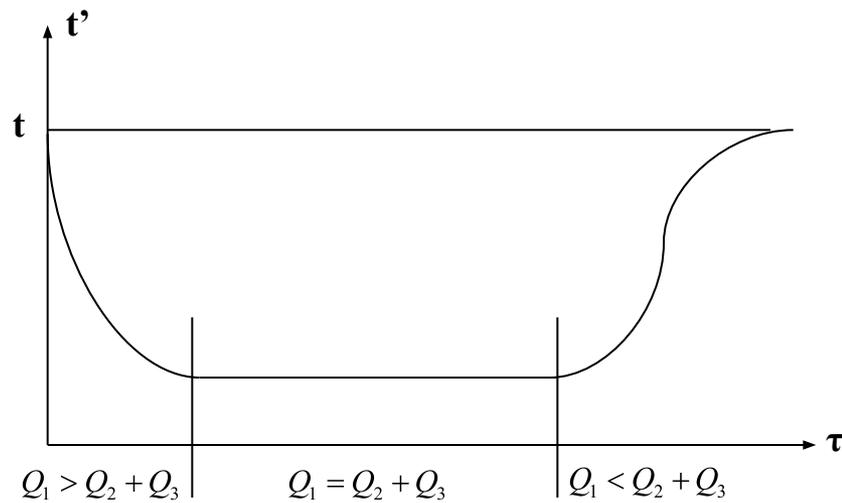
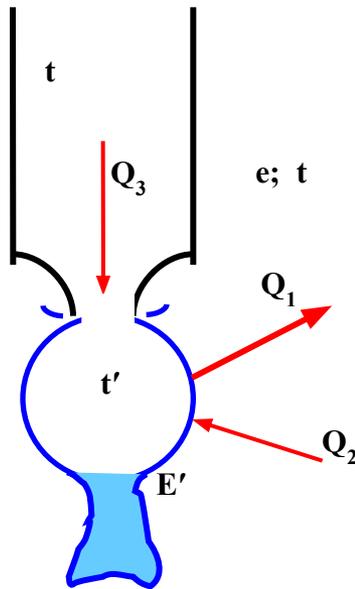


Рис. 2.1.2. Изменение температуры смоченного термометра.

Температура смоченного термометра постоянна при условии:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

(2.1.1)

2.1. Психрометрический метод.

Для записи потока Q_1 воспользуемся уравнением Максвелла:

$$J = -4\pi \cdot R^2 \rho \cdot D \frac{dc}{dr} \quad (2.1.2)$$

J - поток водяного пара с поверхности резервуара,

R - радиус резервуара,

ρ - плотность воздуха,

D - коэффициент диффузии водяного пара в воздухе,

c - массовая доля водяного пара в воздухе,

r - текущая координата – расстояние от центра резервуара.

2.1. Психрометрический метод.

Или:

$$J = -\frac{0,622 \cdot S \cdot \rho \cdot D}{p} \cdot \frac{de}{dr} \quad (2.1.3)$$

$S = 4\pi R^2$ - площадь резервуара,

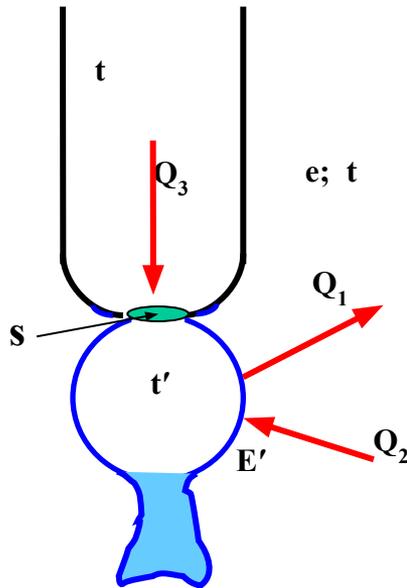
p - атмосферное давление.

Поток тепла получим, умножив (2.1.3) на теплоту парообразования L :

$$Q_1 = -\frac{0,622 \cdot L \cdot S \cdot \rho \cdot D}{p} \cdot \frac{de}{dr} \quad (2.1.4)$$

2.1. Психрометрический метод.

Теперь запишем выражения для Q_2 и Q_3 .



$$Q_2 = \alpha \cdot S \cdot \frac{dt}{dr} \quad (2.1.5)$$

$$Q_3 = \lambda_2 \cdot s \cdot \frac{dt}{dr} \quad (2.1.6)$$

α - коэффициент теплообмена резервуара с воздухом,

λ_2 - коэффициент теплопроводности материала, из которого сделан стержень термометра,

s - поверхность шейки термометра.

2.1. Психрометрический метод.

Тогда уравнение (2.1.1):

$$-\frac{0,622 \cdot L \cdot S \cdot \rho \cdot D}{p} \cdot \frac{de}{dr} = \alpha \cdot S \cdot \frac{dt}{dr} + \lambda_2 \cdot s \cdot \frac{dt}{dr}$$

Умножим на dr :

$$-\frac{0,622 \cdot L \cdot S \cdot \rho \cdot D}{p} \cdot de = (\alpha \cdot S + \lambda_2 \cdot s) \cdot dt \quad (2.1.7)$$

Проинтегрируем (2.1.7) от условий на поверхности резервуара до условий в атмосфере:

$$-\int_{E'}^e \frac{0,622 \cdot L \cdot S \cdot \rho \cdot D}{p} \cdot de = \int_{t'}^t (\alpha \cdot S + \lambda_2 \cdot s) \cdot dt$$

2.1. Психрометрический метод.

$$-\int_{E'}^e \frac{0,622L \cdot S \cdot \rho \cdot D}{p \cdot p} \cdot (E' \cdot de) = \int_{t'}^t (\alpha \cdot S + \lambda_2 s) \cdot p \cdot dt$$

Отсюда выразим парциальное давление – e:

$$E' - e = \frac{(\alpha \cdot S + \lambda_2 s) \cdot p}{0,622LS\rho D} \cdot (t - t')$$

$$e = E' - \frac{(\alpha \cdot S + \lambda_2 s) \cdot p}{0,622LS\rho D} \cdot (t - t')$$

Получим психрометрическую формулу:

$$e = E' - Ap \cdot (t - t') \quad (2.1.8)$$

Где: $A = \frac{(\alpha \cdot S + \lambda_2 s)}{0,622LS\rho D}$ - психрометрический коэффициент.

2.1. Психрометрический метод.

Учтем зависимость **D** от давления:

$$D_0 \cdot p_0 = D \cdot p \quad (2.1.9)$$

Тогда:

$$A = \frac{\alpha + \lambda_2 \cdot \frac{s}{S}}{0,622 \cdot L \cdot \frac{\rho}{p} \cdot D_0 \cdot p_0} \quad (2.1.10)$$

Коэффициенты α и D_0 зависят от скорости ветра:

$$\alpha \propto \sqrt{V} \quad D_0 \propto \sqrt{V}$$

Значит, **A** тоже должен зависеть от скорости ветра.

2.1. Психрометрический метод.

$$A = \frac{\alpha + \lambda_2 \cdot \frac{s}{S}}{0,622 \cdot L \cdot \frac{\rho}{p} \cdot D_0 \cdot p_0}$$

Если $\alpha \ll \lambda_2 \frac{s}{S}$ (при малой V), то A уменьшается с ростом V .

Если же (при большой V):

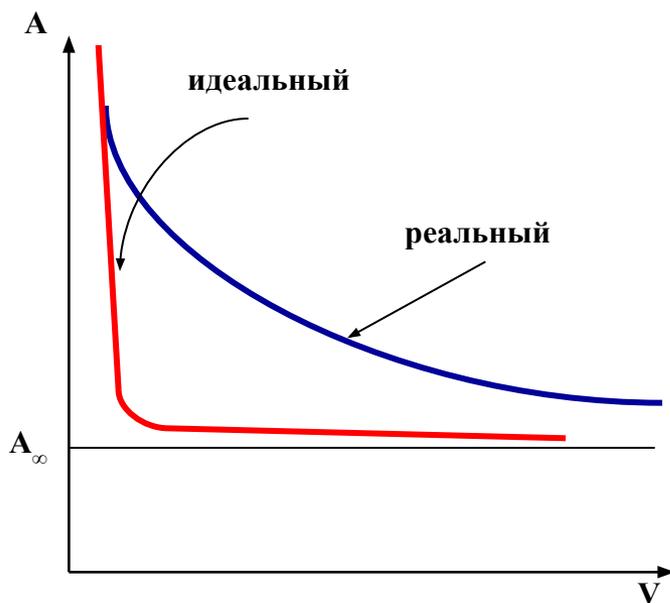
$$\alpha \gg \lambda_2 \frac{s}{S} \quad (2.1.11)$$

то $A = \text{const.}$

Психрометр, сконструированный с учетом (2.1.11) называется **идеальным психрометром.**

2.1. Психрометрический метод.

Условие (2.1.11) означает, что смоченный термометр должен обладать **тонкой шейкой**.



$$A = \frac{\alpha + \lambda_2 \cdot \frac{s}{S}}{0,622 \cdot L \cdot \frac{\rho}{p} \cdot D_0 \cdot p_0}$$

Эту зависимость можно аппроксимировать формулой:

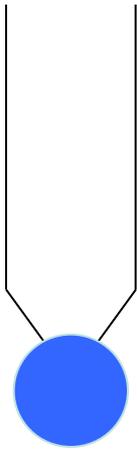
$$A = A_\infty \left(1 + \frac{a}{\sqrt{V}} \right) \quad (2.2.12)$$

Рис.2.1.3 Зависимость психрометрического коэффициента от скорости ветра.

Для термометров ТМ-4 психрометрический коэффициент принимается равным $A = 7,947 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$. Скорость ветра внутри будки принимается равной 0,8 м/с.

2.1. Психрометрический метод.

Термометр ТМ-4 имеет форму:



Термометр для аспирационного психрометра имеет другую форму:



Он близок к идеальному.

Здесь не позаботились о близости к идеальному.

Но почему?...

2.1. Психрометрический метод.

А может ли быть такое состояние, когда $t = -10^{\circ}$, а $t' = -9,7^{\circ}$?...



Теперь напишем выражение для относительной влажности:

$$f = \frac{e}{E} = \frac{E'}{E} - \frac{Ap}{E}(t - t') \quad (2.2.13)$$

Свяжем отношение $\frac{E'}{E}$ с психрометрической разностью $t - t'$.

2.1. Психрометрический метод.

Воспользуемся уравнением Клаузеуса-Клапейрона:

$$\frac{dE}{E} = \frac{L}{R_v} \cdot \frac{dT}{T^2} \quad (2.2.14)$$

R_v - газовая постоянная для водяного пара.

Проинтегрируем это уравнение:

$$\int_{E'}^E \frac{dE}{E} = \int_{T'}^T \frac{L}{R_v} \cdot \frac{dT}{T^2}$$

$$\ln \frac{E}{E'} = -\frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} \right)$$

2.1. Психрометрический метод.

Из формулы:

$$\ln \frac{E}{E'} = -\frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} \right)$$

получим:

$$\ln \frac{E}{E'} = -\frac{L}{R_v} \left(\frac{T' - T}{TT'} \right)$$

Или:

$$-\ln \frac{E'}{E} = -\frac{L}{R_v} \left(\frac{T' - T}{TT'} \right)$$

Или:

$$\ln \frac{E'}{E} = -\frac{L}{R_v} \left(\frac{T - T'}{TT'} \right)$$

Учтем: $TT' \approx T^2$

Тогда:

$$\ln \frac{E'}{E} = -\frac{L}{R_v T^2} (t - t')$$

(2.2.15)

2.1. Психрометрический метод.

$$\ln \frac{E'}{E} = -\frac{L}{R_v T^2} (t - t')$$

Откуда:

$$\frac{E'}{E} = e^{-\frac{L}{R_v T^2} (t - t')} \approx 1 - \frac{L}{R_v T^2} (t - t') \quad (2.2.16)$$

Подставим (1.2.16) в (1.2.13):

$$f = \frac{E'}{E} - \frac{Ap}{E} (t - t') = 1 - \left(\frac{L}{R_v T^2} + \frac{Ap}{E} \right) \cdot (t - t') \quad (2.2.17)$$

2.1. Психрометрический метод.

$$f = 1 - \left(\frac{L}{R_v T^2} + \frac{Ap}{E} \right) \cdot (t - t')$$

Выразим отсюда психрометрическую разность Δt :

$$\Delta t = t - t' = \frac{1 - f}{\frac{L}{R_v T^2} + \frac{Ap}{E}} \quad (2.2.18)$$

Отсюда выразим чувствительность психрометра:

$$S = \frac{d(\Delta t)}{df} = - \frac{1}{\frac{L}{R_v T^2} + \frac{Ap}{E}}$$

2.1. Психрометрический метод.

$$S = - \frac{1}{\frac{L}{R_v T^2} + \frac{A_p}{E}} \quad (2.2.19)$$

Чувствительность психрометра оказалась отрицательной, т.к. при увеличении влажности Δt уменьшается.

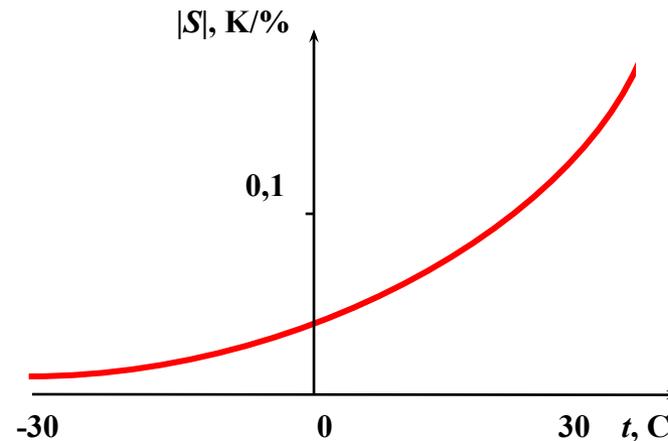


Рис. 2.1.4. Зависимость чувствительности психрометра от температуры.