



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Методические указания
к выполнению практических работ по дисциплине
«Безопасность труда»
для студентов направления подготовки
280700 «Техносферная безопасность»
и дисциплине «Безопасность жизнедеятельности»
для студентов всех направлений
подготовки и форм обучения

«Тепловлажностная обработка воздушной среды производственных помещений»

Авторы

Гаршин В.И.,
Гапонов С.В.,
Гераськова С.Е.,
Гапонова Е.Ю.

Ростов-на-Дону, 2014



Аннотация

Методические указания разработаны в соответствии с учебным планом дисциплин «Безопасность труда» для студентов направления подготовки 280700 и «Безопасность жизнедеятельности» для студентов всех направлений подготовки и форм обучения.

Автор

кандидат технических наук, доцент
ст. преподаватель
ст. преподаватель
ст. преподаватель

Гаршин В.И.
Гапонова Е.Ю.
Гапонов С.В.
Гераськова С.Е.





Оглавление

| | |
|--------------------------------------------|-----------|
| Цель работы | 4 |
| Общие сведения | 4 |
| Контрольные вопросы по работе | 15 |
| Литература | 16 |



ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение термодинамических свойств и процессов влажного атмосферного воздуха.

Определение параметров рабочих процессов с использованием $I-d$ -диаграммы.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Влажным воздухом называется парогазовая смесь, состоящая из сухого воздуха и водяных паров. Знание его свойств инженеру необходимо для понимания и расчета таких технических устройств, как сушилки, системы отопления и вентиляции и т. п.

Влажный воздух, содержащий максимальное количество водяного пара при данной температуре, называется насыщенным.

Воздух, в котором не содержится максимально возможное при данной температуре количество водяного пара, называется ненасыщенным.

Ненасыщенный влажный воздух состоит из смеси сухого воздуха и перегретого водяного пара, а насыщенный влажный воздух из сухого воздуха и насыщенного водяного пара.

Водяной пар содержится в воздухе обычно в небольших количествах и в большинстве случаев в перегретом состоянии, поэтому к нему с достаточной для технических расчетов точностью могут быть применены законы идеальных газов.

Давление влажного воздуха P , согласно закону Дальтона, равно:

$$P = P_B + P_n, \quad (1)$$

где P_B , P_n — парциальные давления соответственно сухого воздуха и водяного пара, Па.

Парциальное давление P_n можно определить из таблиц насыщенного пара по температуре точки росы, т. е. по той температуре, до которой нужно охладить ненасыщенный воздух при постоянном влагосодержании, чтобы он стал насыщенным.

Таким образом, если охлаждать ненасыщенный воздух с температурой t_B , то при некоторой температуре $t_D < t_B$ он станет насыщенным.



Эта температура и является температурой точки росы.

Основными характеристиками влажного воздуха является следующее.

1. **Относительная влажность φ** , которая определяет степень насыщения воздуха водяным паром:

$$\varphi = \frac{P_n}{P_H}, \quad (2)$$

т.е. отношение действительной абсолютной влажности к максимально возможной абсолютной влажности в насыщенном воздухе при той же температуре.

При постоянной температуре давление изменяется пропорционально плотности (закон Бойля — Мариотта), поэтому можно написать:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_H} = \frac{P_n}{P_H}, \quad (3)$$

Для насыщенного воздуха $\varphi=1$ или 100%, а для ненасыщенного влажного воздуха $\varphi<1$.

Относительную влажность воздуха определяют с помощью прибора, называемого психрометром (рис. 1).

Психрометр состоит из двух одинаковых термометров, один из которых имеет резервуар, обернутый батистом, непрерывно смачиваемым водой.

С поверхности резервуара термометра происходит испарение воды, интенсивность которого зависит от влажности окружающего воздуха; чем меньше насыщен влагой окружающий воздух, тем интенсивнее испарение с «мокрого» термометра и тем ниже его показания, так как на испарение расходуется тепло.

По разности показаний «сухого» и «мокрого» термометров с помощью психрометрической таблицы можно определить относительную влажность воздуха.

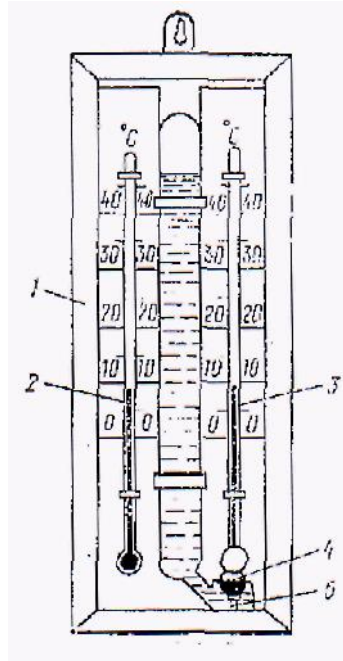


Рисунок 1 Психрометр
 1 – доска; 2 – сухой
 термометр; 3 – мокрый
 термометр; 4 – ткань;
 5 – сосуд с водой

Абсолютная влажность D , которая определяет массу водяного пара, содержащегося в 1 м^3 влажного воздуха.

Влагосодержание воздуха d , г/кг сухого воздуха, т. е. отношение массы водяного пара к единице массы сухого воздуха, содержащегося во влажном воздухе:

$$d = \frac{g_n}{g_B} 1000, \quad (4)$$

где g_n , g_B — соответственно масса водяного пара и сухого воздуха во влажном воздухе.

Если воспользоваться уравнением Клапейрона, то выражение (4) можно написать в следующем виде:



$$d = \frac{g_n}{g_B} 1000 = \frac{r_n \mu_n}{r_B \mu_B} 1000, \quad (5)$$

где ρ_n – молекулярная масса водяного пара; ρ_B – молекулярная масса воздуха; r_n , r_B – объемные доли пара и сухого воздуха.

Подставив соответствующие значения молекулярных масс, получим:

$$d = \frac{P_n}{P_g} \frac{18,010}{28,95} \cdot 1000 = 622 \frac{P_n}{P - P_n} = 622 \frac{\varphi P_n}{P - \varphi P_n}, \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что между влажностью и парциальным давлением пара $P_n = \varphi P_n$, (при одном и том же P) существует однозначная зависимость, т. е. каждому значению P_n соответствует вполне определенное значение d и наоборот.

Энтальпия – (от греч. enthalpo - нагреваю) – однозначная функция H состояния термодинамической системы при независимых параметрах энтропии S и давлении p , связана с внутренней энергией U соотношением $H = U + pV$, где V - объем системы. При постоянном p изменение энтальпии равно количеству теплоты, подведенной к системе, поэтому энтальпию называют часто тепловой функцией или теплосодержанием.

Энтальпия I влажного воздуха является одним из основных его параметров и широко используется при расчетах сушильных установок, систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

Энтальпию влажного воздуха обычно относят к единице массы сухого воздуха, т. е. к 1 кг, и определяют как сумму сухого воздуха и водяного пара, кДж/кг сухого воздуха;

$$I = 1,005t + (2500 + 1,8068t)d \cdot 10^{-3}, \quad (7)$$

Так как теплоемкость влажного воздуха $c_{cm} = 1,005 + 1,8068d \times 10^{-3}$ кДж/кг сухого воздуха, то формулу (7) можно написать в виде:

$$I = c_{cm}t + 2500d \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$



Отображение процессов обработки воздуха на $I-d$ -диаграмме

Вопросы, относящиеся к влажному воздуху, удобно и легко решаются с помощью $I-d$ -диаграммы, предложенной в 1918 г. проф. Л. К. Рамзиным.

В диаграмме (рис. 2) на оси абсцисс отложены значения влагосодержания d , г/кг, а по оси ординат — энтальпия I влажного воздуха, ккал/кг, отнесенные к 1 кг сухого воздуха.

Для лучшего использования площади диаграммы линии $I=\text{const}$ проведены под углом 135° к линиям $d=\text{const}$ и значения d снесены на горизонтальную линию.

На $I-d$ -диаграмме нанесены изотермы ($t=\text{const}$) в виде прямых линий, кривые $\varphi=\text{const}$, а также показана в виде кривой второго порядка зависимость $P_n=f(d)$, причем значения P_n приведены справа на оси ординат.

Таким образом, **любая точка $I-d$ -диаграммы определяет все параметры (t , φ , d , I , P_n), характеризующие состояние влажного воздуха.**

Зная два каких-либо параметра (обычно φ и t), можно найти остальные на пересечении соответствующих линий $I-d$ -диаграммы.

По $I-d$ -диаграмме для каждого состояния влажного воздуха можно **определить температуру точки росы**. Для этого из точки, характеризующей состояние воздуха, надо провести вертикаль (линию $d=\text{const}$) до пересечения с линией $\varphi = 100\%$. Изотерма, проходящая через полученную точку пересечения, определит искомую точку росы воздуха.

При использовании $I-d$ -диаграммы для решения задач, связанных с сушкой материалов, следует иметь в виду, что процесс сушки распадается на два отдельных процесса.

Вначале атмосферный воздух с относительной влажностью φ_1 и температурой t_1 проходит через калорифер, где температура его повышается до t_2 , а относительная влажность уменьшается до φ_2 .

Этот процесс протекает при постоянном влагосодержании ($d=\text{const}$) и изображается в $I-d$ -диаграмме вертикальной линией (см. рис. 2). Разность энтальпии в диаграмме определяет количество тепла, расходуемого на подогрев 1 кг сухого воздуха.

В общем виде процессы обработки воздуха отображаются на диаграмме следующим образом:

Процесс нагревания воздуха в калорифере происходит при постоянном влагосодержании ($d \sim \text{const}$), и поэтому в диаграмме на рис. 3 изображается прямой вертикальной линией (линия $a - б$). Процесс протекает снизу вверх.

Процесс сухого охлаждения воздуха также изображается в диаграмме вертикальной прямой линией. Процесс протекает сверху вниз (линия $в - д$).

Процесс адиабатического увлажнения и охлаждения происходит при постоянном теплосодержании ($I - \text{const}$) и изображается в диаграмме наклонной линией (линия $в - г$).

Температура мокрого термометра определяется точкой пересечения линии адиабатического процесса с кривой относительной влажности $\varphi = 100\%$ (точка $г$).

Точка росы, т. е. температура, соответствующая началу конденсации водяных паров в воздухе, определяется точкой пересечения линии сухого охлаждения с кривой относительной влажности $\varphi = 100\%$ (точка $д$).

Процесс смешивания двух количеств воздуха в диаграмме изображается линией между точками, характеризующими состояние смешиваемых количеств воздуха (линия $е - ж$). Точка $з$ характеризует состояние смеси.

Отрезок $е - з$ характеризует количество смешиваемого воздуха с параметрами точки $ж$, а отрезок $ж - з$ — количество смешиваемого воздуха с параметрами точки $е$.

При одновременном изменении влаго- и теплосодержания воздуха процесс изменения состояния воздуха является политропным и происходит в направлении, определяемом угловым масштабом.

Угловой масштаб определяется отношением:

$$\Delta I / \Delta d = \frac{16507}{10000} = 1,65$$

где I — избыточное тепловыделение или потери тепла, ккал/ч , определяемые по тепловому балансу, при составлении теплового баланса учитывается скрытое теплосодержание выделившихся в помещение водяных паров;

d — количество водяного пара, выделившегося в помещении, г/ч.

Направление луча углового масштаба в диаграмме находят наложением линейки на точку O (на шкале температур) и на соответствующую черту шкалы угловых масштабов (по краю диаграммы — справа, снизу и вверх).

На рис. 3 линия $ик$ — k , параллельная лучу углового масштаба:

$$\Delta I / \Delta d = \frac{16507}{10000} = 1,65.$$

показывает процесс изменения состояния воздуха от точки $и$ до k .

Рассмотрим порядок определения параметров рабочих процессов с использованием $I-d$ диаграммы

Пример 1. Известно, что температура воздуха $t = 18^{\circ}$, относительная влажность $\varphi = 50\%$. Определить остальные параметры воздуха.

Точка на пересечении изотермы 18° с кривой относительной влажности 50% определяет остальные параметры воздуха (см. рис. 3, точка $в$): теплосодержание $I = 8,25$ ккал/кг; влагосодержание $d = 6,4$ г/кг; парциальное давление равно $7,6$ мм рт. ст.

| № п/п | $t_{\text{воздуха}}, ^{\circ}\text{C}$ | $\varphi, \%$ | № п/п | $t_{\text{воздуха}}, ^{\circ}\text{C}$ | $\varphi, \%$ |
|-------|----------------------------------------|---------------|-------|----------------------------------------|---------------|
| 1 | 30 | 50 | 11 | 23 | 60 |
| 2 | 25 | 70 | 12 | 18 | 80 |
| 3 | 20 | 80 | 13 | 25 | 50 |
| 4 | 30 | 40 | 14 | 15 | 60 |
| 5 | 15 | 70 | 15 | 31 | 40 |
| 6 | 25 | 60 | 16 | 16 | 80 |
| 7 | 20 | 50 | 17 | 30 | 20 |
| 8 | 30 | 30 | 18 | 20 | 70 |
| 9 | 25 | 30 | 19 | 25 | 40 |
| 10 | 15 | 90 | 20 | 32 | 60 |

Пример 2. Определить расход тепла на нагревание 10000 кг воздуха, если наружный воздух подогревается от температуры -20° при относительной влажности $\varphi_n = 50\%$ до $+20^{\circ}$.

Так как процесс проходит без изменения влагосодержания воздуха, проводим через точку *a* вертикальную линию ($d = \text{const}$) до пересечения с изотермой $+20^{\circ}$ (точка *б*).

Линия *a – б* характеризует весь процесс нагревания воздуха.

Расход тепла на нагревание воздуха определяется по разности теплосодержаний в точках *a* и *б* (рис. 3)

$$Q = (I_{\text{б}} - I_{\text{a}})10000 = (5,1 - (-4,5))10000 = 96000 \text{ ккал.}$$

| № п/п | $t_{\text{нагр.}}$, °C | t_r , °C | φ , % | № п/п | $t_{\text{нагр.}}$, °C | t_r , °C | φ , % |
|-------|-------------------------|------------|---------------|-------|-------------------------|------------|---------------|
| 1 | -25 | 25 | 50 | 11 | -23 | 23 | 60 |
| 2 | -25 | 25 | 70 | 12 | -18 | 18 | 80 |
| 3 | -20 | 20 | 80 | 13 | -25 | 25 | 50 |
| 4 | -30 | 30 | 40 | 14 | -15 | 15 | 60 |
| 5 | -15 | 15 | 70 | 15 | -31 | 31 | 40 |
| 6 | -25 | 25 | 60 | 16 | -16 | 16 | 80 |
| 7 | -20 | 20 | 50 | 17 | -30 | 30 | 20 |
| 8 | -30 | 30 | 30 | 18 | -20 | 20 | 70 |
| 9 | -25 | 25 | 30 | 19 | -25 | 25 | 40 |
| 10 | -15 | 15 | 90 | 20 | -32 | 32 | 60 |

Пример 3. Определить точку росы для воздуха с параметрами: $t = 18^{\circ}$, $\varphi = 50^{\circ}$ (рис. 3, точка *в*).

Ответ: Точка росы $7,2^{\circ}$ (рис. 3, точка *д*).

Данные для определения точки росы берем из 1-го примера.

Пример 4. Воздух при $t = 18^{\circ}$, $\varphi = 50\%$ и $d = 6,4 \text{ г/кг}$ увлажняется до 90%. Определить параметры воздуха после увлажнения, количество испарившейся воды и температуру увлажняющей воды, если применена рециркуляция воды.

Процесс адиабатический и на рис. 3 изображается линией *б – н*. Температура воды определяется точкой *г* и равна $12,1^{\circ}$.

Состояние воздуха после увлажнения определяется точкой *н*, её параметры: $t = 13^{\circ}$; $I = 8,25 \text{ ккал/кг}$; $d = 8,6 \text{ г/кг}$; $\varphi = 90\%$.

Количество испарившейся воды определяется разностью влажностей в точках b и n

$$d_n - d_b = 8,6 - 6,4 = 2,2 \text{ г/кг.}$$

| № п/п | $t_{\text{воздуха}}, ^\circ\text{C}$ | $\varphi, \%$ | № п/п | $t_{\text{воздуха}}, ^\circ\text{C}$ | $\varphi, \%$ |
|-------|--------------------------------------|---------------|-------|--------------------------------------|---------------|
| 1 | 15 | 50 | 11 | 20 | 30 |
| 2 | 16 | 40 | 12 | 18 | 70 |
| 3 | 20 | 60 | 13 | 17 | 50 |
| 4 | 20 | 40 | 14 | 17 | 60 |
| 5 | 15 | 60 | 15 | 17 | 40 |
| 6 | 18 | 60 | 16 | 16 | 60 |
| 7 | 20 | 50 | 17 | 16 | 40 |
| 8 | 19 | 30 | 18 | 16 | 50 |
| 9 | 19 | 40 | 19 | 18 | 40 |
| 10 | 15 | 70 | 20 | 14 | 60 |

Пример 5. Определить, какое количество воздуха с параметрами точки $ж$ необходимо смешать с воздухом с параметрами точки $е$, чтобы получить смесь с параметрами точки $з$ в количестве $10\,000 \text{ кг/ч}$ (см. рис. 3).

Необходимое количество воздуха с параметрами точки $ж$ определяется отрезком $е-з$, а точки $е$ – отрезком $з-е$.

Величину отрезков $е-з$, $з-ж$ и $е-ж$ измеряют в мм по $I-d$ -диаграмме.

Тогда смешиваемое количество воздуха с параметрами точек $ж$ и $з$:

$$G_{ж} = 10000 \frac{е-з}{е-ж} = 10000 \frac{5}{28} = 1780 \text{ кг/ч};$$

$$G_e = 10000 \frac{з-ж}{е-ж} = 10000 \frac{23}{28} = 8220 \text{ кг/ч.}$$

Пример 6. Приточной системой подается в помещение воздух с температурой 10^0 и относительной влажностью $\varphi = 50 \%$. Удаляется воздух из помещения с температурой 16^0 . В помещении выделяются 10 кг/ч пара при давлении 2 атм. и 10000 ккал/ч тепла от различных источников. Построить схематично процесс поглощения тепла и влаги в $I-d$ – диаграмме и определить параметры и количество удаляемого воздуха.

Отделяем теплосодержание пара (используя справочник)



$$10 \cdot 650,7 = 6507 \text{ ккал/ч.}$$

Суммарное количество выделяющегося тепла равно:

$$10000 + 6507 = 16507 \text{ ккал/ч.}$$

Определяем угловой масштаб процесса

$$\Delta I / \Delta d = \frac{16507}{10000} = 1,65.$$

Наносим точку приточного воздуха и выписываем недостающие параметры: $I = 4,8 \text{ ккал/кг}$; $d = 3,9 \text{ г/кг}$ (рис. 2, точка $и$);

через точку $и$ проводим линию $и-к$, параллельно лучу углового масштаба, до пересечения с изотермой 16^0 .

Точка пересечения $к$ характеризует параметры уходящего воздуха:

$$t = 16^0; I = 7 \text{ ккал/кг}; d = 5,23 \text{ г/кг}; \varphi = 47 \text{ \%}.$$

Необходимое количество вентиляционного воздуха может быть определено по тепловыделениям:

$$G_{\text{возд}} = \Delta I / (I_k - I_u) = 16507 / (7 - 4,8) = 7500 \text{ кг/ч};$$

или по влаговыведениям:

$$G_{\text{возд}} = 10000 / (5,23 - 3,9) = 7500 \text{ кг/ч.}$$



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО РАБОТЕ

1. Напишите определение влажного воздуха.
2. Напишите определение насыщенного влажного воздуха.
3. Из чего состоит насыщенный влажный воздух.
4. Чему равно давление влажного воздуха, согласно закону Дальтона (напишите формулу с пояснением параметров)?
5. Поясните, какая температура является температурой точки росы.
6. По какой формуле определяется относительная влажность (напишите формулу с пояснением параметров)?
7. Что определяет массу водяного пара, содержащегося в 1 м^3 влажного воздуха?
8. По какой формуле определяется влагосодержание воздуха (напишите формулы (4—6) с пояснением параметров)?
9. Напишите определение энтальпии.
10. Один из основных параметров влажного воздуха, используемый при расчетах сушильных установок, систем вентиляции и кондиционирования (напишите формулы 7-8 с пояснением параметров)?
11. Какие параметры, характеризующая состояние влажного воздуха, определяет любая точка $I-d$ диаграммы?
12. Напишите последовательность определения **температуры точки росы** по $I-d$ диаграмме?
13. Как определяется по $I-d$ диаграмме количество тепла, расходуемого на подогрев 1 кг сухого воздуха?
14. Опишите процесс нагревания воздуха в калорифере, и как он определяется по $I-d$ диаграмме и как протекает при этом процесс?
15. Опишите процесс сухого охлаждения воздуха, и как он определяется по $I-d$ диаграмме как протекает при этом процесс?
16. Опишите процесс адиабатического увлажнения и охлаждения?



ЛИТЕРАТУРА

1. Безопасность жизнедеятельности: Учеб. для вузов / Белов С.В., Девисилов В.А., Ильницкая А.В. и др.; Под общ. ред. С.В. Белова. — 4-е изд., испр. и доп. — М.: Высш. шк., 2004.
2. Безопасность жизнедеятельности: Учеб. для вузов / Белов С.В., Ильницкая А.В., Козьяков А.Ф. и др.; Под общ. ред. С.В. Белова. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Высш. шк., 2001.
3. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. Учеб. для Вузов под ред. Тихомирова В.К.,- 3-е изд., испр. и доп. М. Стройиздат, 1981.(п.19 стр.31-33).

