

В. М. Свистунов, Н. К. Пушняков

ОТОПЛЕНИЕ,
ВЕНТИЛЯЦИЯ
И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ
ВОЗДУХА

*объектов агропромышленного
комплекса и жилищно-
коммунального
хозяйства*



Электронный аналог печатного издания: Свистунов В. М., Пушняков Н. К. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства : учебник для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Политехника, 2010. — 428 с. : ил.



ПОЛИТЕХНИКА
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Санкт-Петербург 2012

www.polytechnics.ru

Рекомендовано в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности теплоэнергетика (550900, 650800), строительство (550100, 653500), агроинженерия (560800, 660300), а также жилищно-коммунальное хозяйство

Р е ц е н з е н т ы: доктор технических наук профессор Ю. К. Яхонтов;
кафедра № 21 Академии тыла и транспорта

Свистунов В. М., Пушняков Н. К.

С24 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства: Учебник для вузов. — 4-е изд. — СПб.: Политехника, 2012. — 428 с.: ил.

ISBN 978-5-7325-0941-0

В книге представлены требования к параметрам микроклимата в отапливаемых, вентилируемых и кондиционируемых помещениях зданий агропромышленного комплекса и коммунального хозяйства, теоретические основы и физическая сущность процессов кондиционирования воздуха, принципиальные схемы систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, примеры устройства этих систем в зданиях различного назначения, описаны основное оборудование систем, методы поверочных расчетов систем и оборудования, сведения по испытанию, наладке и эксплуатации систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

УДК 644.1; 697.1/.8
ББК 38.762

ISBN 978-5-7325-0941-0

© Издательство «Политехника», 2012

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МИКРОКЛИМАТУ ПОМЕЩЕНИЙ**1.1. СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА**

Чистый воздух приземного слоя атмосферы представляет собой смесь нескольких газов и водяного пара. Газы, входящие в состав чистого атмосферного воздуха (азот 78,09 %, кислород 20,95 %, аргон и другие инертные газы 0,93 %, углекислый газ 0,03 % по объему), образуют сухую часть воздуха. Смесь сухой части воздуха и водяного пара принято называть в л а ж н ы м в о з д у х о м. Содержание кислорода в приземном слое атмосферы считается постоянным, а количество углекислого газа колеблется от 0,03 % по объему в атмосфере сельской местности до 0,14 % (и более) в воздухе крупных промышленных центров.

Кроме перечисленных основных газов, составляющих сухую часть чистого атмосферного воздуха, в нем содержатся примеси газообразных и парообразных продуктов естественных химических и биологических процессов, пыль космического и земного происхождения, микроорганизмы и пыльца растений. Все эти примеси образуют естественное загрязнение атмосферы.

В атмосфере могут содержаться также продукты искусственного загрязнения. Искусственное загрязнение возникает в результате работы промышленных предприятий, автотранспорта и авиации, теплоцентралей, сжигания топлива и мусора. В результате производственной деятельности человека в атмосферу Земли выбрасываются в год сотни миллионов тонн различных загрязняющих атмосферу веществ (пыль, различные газообразные вещества, пестициды и др.) Эти вещества оказывают неблагоприятное воздействие на здоровье людей, жизнедеятельность растений, животных и микроорганизмов, разрушают здания, сооружения, памятники, вредно влияют на оборудование и технические процессы.

Газовый состав воздуха помещений зданий агропромышленного комплекса и коммунального хозяйства может существенно отличаться от атмосферного как по содержанию кислорода, так и по содержанию примесей. Характер загрязнений воздуха помещений зависит от наличия людей и животных в помещении, технологических процессов, осуществляемых в помещениях, вида веществ, поступающих в воздух помещений.

Физические свойства влажного воздуха характеризуются параметрами его состояния, к которым относятся температура по сухому термометру, температура по мокрому термометру, температура точки росы, влагосодержание, относительная влажность воздуха, плотность, энтальпия, полное давление влажного воздуха, парциальное давление водяного пара.

Поскольку влажный воздух в системах вентиляции и кондиционирования воздуха используется при атмосферном или

близком к нему давлению, то с достаточной для технических расчетов точностью можно рассматривать и сухую часть воздуха, и водяной пар как идеальные газы, а влажный воздух — как смесь идеальных газов, каждый компонент которой (в том числе и водяной пар) занимает весь объем смеси, имеет одинаковую с ней температуру и находится под своим парциальным давлением.

П а р ц и а л ь н о е д а в л е н и е идеального газа в смеси газов пропорционально температуре смеси и обратно пропорционально объему:

$$p_i = m_i \frac{R_\mu T}{\mu_i V}, \quad (1.1)$$

где p_i — парциальное давление идеального газа в смеси газов, Па; m_i — масса газа, кг; R_μ — универсальная газовая постоянная, равная 8314,33 Дж/(кмоль · К); μ_i — молекулярная масса газа, кг/моль; T — термодинамическая температура, К; V — объем газа, равный объему всей смеси, м³.

Уравнение $p_i V = m_i R_i T$ известно как уравнение состояния идеального газа массой m_i .

Величина $R_i = \frac{R_\mu}{\mu_i}$ есть газовая постоянная конкретного газа.

Так как влажный воздух рассматривают как бинарную смесь, состоящую из сухой части и водяного пара, то полное давление влажного воздуха p представляют суммой парциальных давлений сухой части $p_{с.в}$ и водяного пара $p_{п}$:

$$p = p_{с.в} + p_{п}. \quad (1.2)$$

Уравнение состояния сухой части воздуха массой $m_{с.в}$:

$$p_{с.в} V = m_{с.в} R_{с.в} T, \quad (1.3)$$

где $R_{с.в}$ — газовая постоянная сухой части воздуха,

$$R_{с.в} = \frac{R_\mu}{\mu_{с.в}} = \frac{8314,33}{28,96} = 287,14 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Уравнение состояния водяного пара массой $m_{п}$:

$$p_{п} V = m_{п} R_{п} T, \quad (1.4)$$

где $R_{п}$ — газовая постоянная водяного пара,

$$R_{п} = \frac{R_\mu}{\mu_{п}} = \frac{8314,33}{18,016} = 461 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Газовая постоянная влажного воздуха массой $m = m_{с.в} + m_{п}$

$$R_B = \frac{m_{с.в}}{m} R_{с.в} + \frac{m_{п}}{m} R_{п}; \quad (1.5)$$

$$R_B = \frac{m_{c.в}}{m} \frac{R_{\mu}}{\mu_{c.в.}} + \frac{m_{п}}{m} \frac{R_{\mu}}{\mu_{п}}, \quad (1.6)$$

где $m = m_{c.в} + m_{п}$ масса влажного воздуха, кг.

Для воздуха, не содержащего водяного пара, $p_{п} = 0$; $p = p_{c.в.}$ Чем больше водяного пара содержится во влажном воздухе, тем больше парциальное давление $p_{п}$. Однако парциальное давление водяного пара во влажном воздухе не может быть выше давления насыщенного водяного пара $p_{н}$ при данной температуре влажного воздуха, поэтому $0 \leq p_{п} \leq p_{н}$. Обычно водяной пар находится в воздухе в перегретом состоянии. Если воздух, содержащий некоторое количество перегретого водяного пара, охлаждать при постоянном полном давлении, то при вполне определенной температуре этот пар станет насыщенным. Температура, при которой водяной пар вследствие охлаждения становится насыщенным, называется температурой точки росы. При дальнейшем понижении температуры из воздуха будет выпадать влага и уменьшаться парциальное давление водяного пара. Парциальное давление насыщенного водяного пара определяется только температурой и не зависит от полного давления влажного воздуха.

Если состояние сухого воздуха (не содержащего водяного пара) изменяется при постоянном давлении, то объем воздуха V_T при температуре T равен $\frac{T}{T_0} V_0$, где V_0 — объем воздуха при начальной температуре T_0 . Если принять $T_0 = 273^\circ \text{C}$, а $T = (273 + t)$,

то $V_T = \left(1 + \frac{1}{273} t\right) V_0$, где $\beta = \frac{1}{273}$ — коэффициент объемного расширения сухого воздуха.

При изменении состояния влажного воздуха обычно переменной является масса водяного пара в воздухе при неизменной массе сухой части воздуха, поэтому принято влагосодержание, энтакальпию относить к 1 кг сухой части влажного воздуха.

Влажность воздуха характеризуется массой содержащейся в ней влаги. Массу влаги, приходящуюся на 1 кг сухой части влажного воздуха, называют влагосодержанием и ем. Обычно массу влаги

во влажном воздухе измеряют в граммах, а влагосодержание в граммах на килограмм. Если известно влагосодержание d_0 , то масса влажного воздуха этого состояния

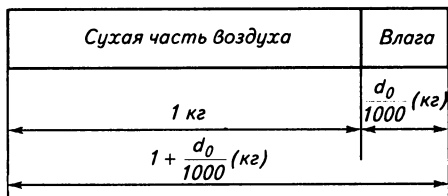


Рис. 1.1. Соотношение сухой и влажной частей воздуха

будет равна $1 + \frac{d_0}{1000}$ (кг)

(рис. 1.1). В общем случае

влагосодержание складывается из паросодержания и содержания влаги в жидкой или твердой фазе. В технике вентиляции и кондиционирования воздуха чаще приходится иметь дело с влажным воздухом, в котором влага содержится в виде перегретого или насыщенного водяного пара, а капельная влага или кристаллы льда, образовавшиеся в воздухе в процессе его обработки, отводятся. Поэтому под влагосодержанием воздуха часто понимают его паросодержание и обозначают буквой d .

Для влажного воздуха в количестве $1 + \frac{d_0}{1000}$ (кг) уравнения состояния 1 кг сухой части воздуха и $d/1000$ (кг) водяного пара:

$$p_{c.v}V = 1 \cdot R_{c.v}T; \quad p_{п}V = \frac{d}{1000} R_{п}T,$$

откуда $d = 1000 \frac{R_{п}}{R_{c.v}} \frac{R_{c.v}}{R_{п}} = 622 \frac{P_{п}}{P_{c.v}}$.

Так как $p_{c.v} = p - p_{п}$, то

$$d = 622 \frac{P_{п}}{p - P_{п}}. \quad (1.7)$$

Влагосодержание воздуха может быть различным, однако его максимальное значение при данной температуре ограничено состоянием насыщенного водяного пара. Максимально возможное влагосодержание $d_{н}$ при заданной температуре влажного воздуха можно определить из уравнения (1.7), если вместо парциального давления перегретого водяного пара $p_{п}$ подставить давление насыщенного водяного пара $p_{н}$ при этой же температуре. Тогда

$$d_{н} = 622 \frac{P_{н}}{p - P_{н}}. \quad (1.8)$$

Из уравнения (1.8) следует, что максимальное влагосодержание зависит от полного давления p и температуры влажного воздуха, так как величина $p_{н}$ однозначно определяется температурой. Так как давление насыщенного водяного пара $p_{н}$ увеличивается с ростом температуры, то, следовательно, чем выше температура воздуха, тем больше его возможное максимальное влагосодержание.

В процессах кондиционирования воздуха масса сухой части влажного воздуха остается неизменной, а влагосодержание может уменьшаться (осушка воздуха) или увеличиваться (увлажнение воздуха).

Из уравнения (1.7) следует, что

$$p_{п} = \frac{pd}{622 + d}. \quad (1.9)$$

Следовательно, парциальное давление водяного пара во влажном воздухе при неизменном полном давлении определяется влажностью и не зависит от температуры.

Так как влажность воздуха при данной температуре может изменяться в пределах от 0 до d_n , то для характеристики степени увлажненности воздуха используется показатель относительной влажности воздуха.

Относительной влажностью φ называют отношение парциального давления водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, к парциальному давлению насыщенного водяного пара при той же температуре:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}}. \quad (1.10)$$

Относительная влажность выражается в процентах или долях единицы и показывает степень приближения содержащегося во влажном воздухе водяного пара к состоянию насыщения при данной температуре воздуха. Поскольку $0 \leq p_{\text{п}} \leq p_{\text{н}}$, то $0 \leq \varphi \leq 1$. Для сухого воздуха $\varphi = 0$. Для влажного воздуха, в котором водяной пар содержится в насыщенном состоянии, $\varphi = 1$.

Если влажность воздуха сохраняется постоянным, а температура его повышается, то относительная влажность уменьшается, так как с ростом температуры увеличивается парциальное давление насыщенного водяного пара $p_{\text{н}}$. Наоборот, если температура влажного воздуха понижается, то при постоянном влажностном состоянии относительная влажность воздуха возрастает и при некоторой температуре достигнет 100 %, т. е. водяной пар, содержащийся в воздухе, станет насыщенным. Дальнейшее охлаждение воздуха вызовет конденсацию водяного пара, выпадение влаги из воздуха и снижение парциального давления водяного пара. Отсюда вытекает определение понятия температуры точки росы: температурой точки росы называется та наименьшая температура, до которой можно охлаждать влажный воздух при постоянном его влажностном состоянии.

Пользуясь понятием относительной влажности воздуха, влажность воздуха можно представить следующей зависимостью:

$$d = 622 \frac{\varphi p_{\text{н}}}{p - \varphi p_{\text{н}}}. \quad (1.11)$$

Плотность влажного воздуха ρ (кг/м³) представляет собой массу воздуха в единице объема:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.12)$$

Масса влажного воздуха $m = m_{\text{с.в}} + m_{\text{п}}$. Выразив $m_{\text{с.в}}$ и $m_{\text{п}}$ из уравнений состояния сухой части влажного воздуха и водяного пара, содержащегося в этом воздухе, после преобразований получим

$$\rho = \frac{p}{R_{с.в}T} - \frac{\varphi p_H}{T} \left(\frac{1}{R_{с.в}} - \frac{1}{R_H} \right). \quad (1.13)$$

Уравнение (1.13) позволяет определить плотность влажного воздуха при различных его состояниях. Входящие в это уравнение величины T , φ , p могут быть измерены приборами. Из уравнения (1.13) следует, что влажный воздух при данной температуре тем легче сухого, чем выше его относительная влажность. Влажный воздух всегда легче сухого.

Э н т а л ь п и я 1 (кДж/кг) представляет собой полную энергию, связанную с данным состоянием тела. В расчетах вентиляции и кондиционирования воздуха энтальпию, как и влагосодержание, относят к 1 кг сухой части влажного воздуха. Если во влажном воздухе содержится влага только в виде водяного

пара, то энтальпия $1 + \frac{d}{1000}$ (кг) влажного воздуха равна сумме энтальпии $i_{с.в}$ 1 кг сухой части влажного воздуха и энтальпии i_H содержащегося в воздухе водяного пара. Приняв за начало отсчета энтальпий сухой части влажного воздуха и водяного пара температуру $t = 0$ °С, получим

$$I = c_{с.в}t + \frac{d}{1000}(r_0 + c_H t), \quad (1.14)$$

где $c_{с.в}$ — удельная изобарная теплоемкость сухой части воздуха, $c_{с.в} = 1,005$ кДж/(кг · К); t — температура воздуха по сухому термометру, °С; r_0 — удельная теплота парообразования при $t = 0$ °С, $r_0 = 2500$ кДж/кг; c_H — удельная изобарная теплоемкость водяного пара, $c_H = 1,89$ кДж/(кг · К).

Если уравнение (1.14) переписать в виде

$$I = \left(c_{с.в} + c_H \frac{d}{1000} \right) t + r_0 \frac{d}{1000}, \quad (1.15)$$

то $\left(c_{с.в} + c_H \frac{d}{1000} \right) t$ — явная теплота; $r_0 \frac{d}{1000}$ — скрытая теплота; $c_{с.в} + c_H \frac{d}{1000} = c_{в}$ — удельная изобарная теплоемкость влажного воздуха, кДж/(кг · К).

В зависимости от температуры и соотношения явной и скрытой теплоты энтальпия влажного воздуха может принимать как положительное, так и отрицательное значение. Энтальпия влажного воздуха не зависит от давления; это естественно, поскольку компоненты влажного воздуха считаем идеальными газами, не реагирующими между собой.

В наиболее общем случае влажный воздух может содержать влагу не только в виде перегретого или насыщенного водяного пара, но и в виде жидкости (туман) и льда (снег). В этом случае

влажносодержание d_0 представляет собой сумму масс влаги разных фазовых состояний, приходящейся на 1 кг сухой части влажного воздуха:

$$d_0 = d + d_{\text{ж}} + d_{\text{т}},$$

где $d_{\text{ж}}$, $d_{\text{т}}$ — содержание в воздухе воды и льда соответственно, г/кг.

Энтальпия влажного воздуха, содержащего водяной пар, капли воды и кристаллы льда

$$I = c_{\text{с.в}}t + \frac{d}{1000}(r_0 + c_{\text{пт}}t) + c_{\text{ж}}t \frac{d_{\text{ж}}}{1000} + \frac{d_{\text{т}}}{1000}(c_{\text{т}}t + r_{\text{т}}), \quad (1.16)$$

где $c_{\text{ж}}$ — удельная теплоемкость воды, $c_{\text{ж}} = 4,19$ кДж/(кг Ч К); $c_{\text{т}}$ — удельная теплоемкость льда, $c_{\text{т}} = 2,1$ кДж/(кг Ч К); $r_{\text{т}}$ — теплота плавления льда, $r_{\text{т}} = 335$ кДж/кг.

В случае, когда во влажном воздухе содержится вода или лед, водяной пар находится в насыщенном состоянии, т. е. при $d_{\text{ж}} > 0$, $d_{\text{т}} > 0$ имеем $d = d_{\text{н}}$.

Зависимости (1.1) — (1.16) позволяют вычислять все физические параметры состояния влажного воздуха, если известны два независимых друг от друга параметра. Однако следует отметить, что аналитическое определение параметров влажного воздуха по приведенным выше формулам весьма трудоемко. Трудоемкость намного увеличивается при расчетах процессов изменения состояния воздуха. Поэтому в настоящее время такие расчеты ведут графоаналитическим методом с использованием $I-d$ -диаграммы влажного воздуха.

$I-d$ -ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

$I-d$ -диаграмма влажного воздуха является графическим представлением зависимости энтальпии от влагосодержания. $I-d$ -диаграмма построена в косоугольной системе координат (рис. 1.2). Косоугольная система координат позволяет увеличить площадь рабочего поля диаграммы и обеспечивает ей большую наглядность. На вертикальной оси в выбранном масштабе отложены от начала координат положительные и отрицательные значения энтальпии I влажного воздуха. На наклонной оси нанесены в определенном масштабе значения влагосодержания d влажного воздуха. Начало координат соответствует состоянию сухого воздуха, имеющего температуру $t = 0$ °С и, следовательно, $d = 0$, $I = 0$. Угол между осями диаграммы выбирают обычно равным 135 °С.

Параллельно осям OI и Od проведены линии, образующие координатную сетку. Линии, параллельные наклонной оси Od , являются линиями постоянных значений энтальпии ($I = \text{const}$). Ли-

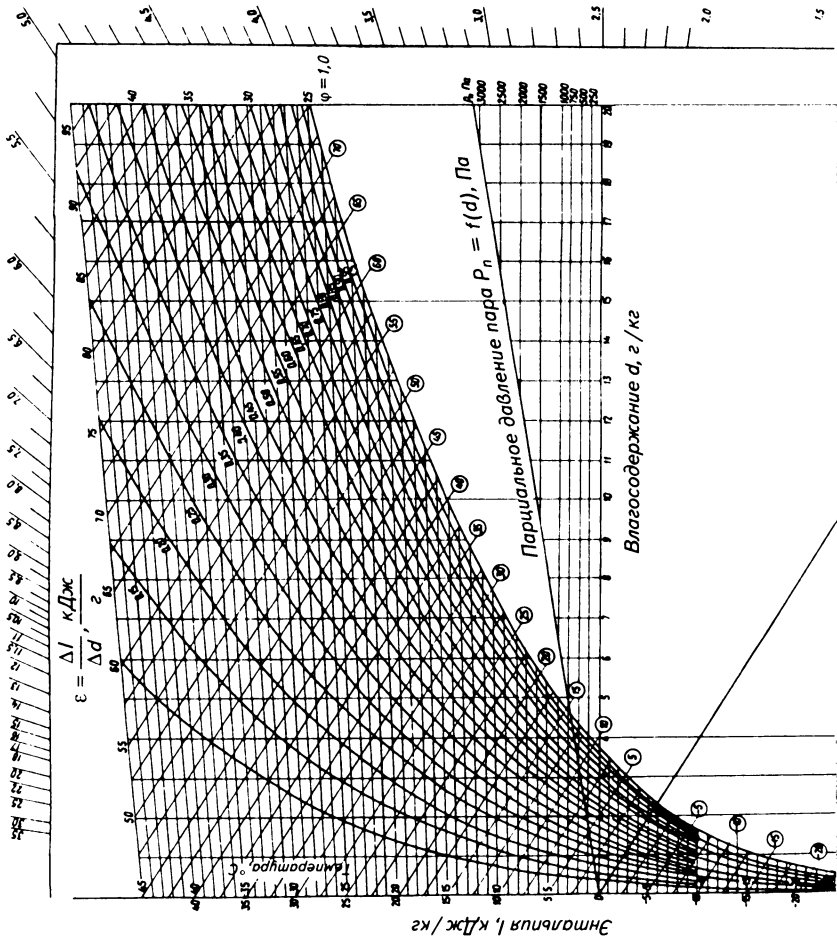


Рис. 1.2. $I-d$ диаграмма влажного воздуха (диаграмма построена для барометрического давления 101 325 Па)

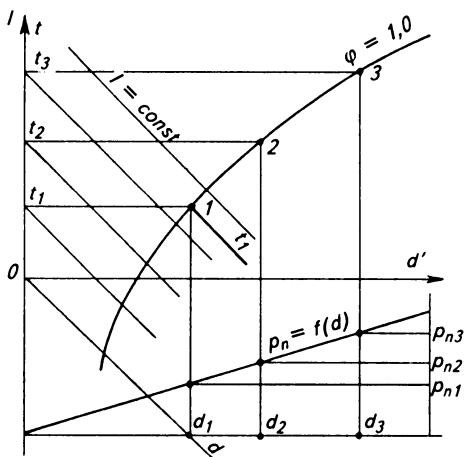


Рис. 1.3. Построение на $I-d$ -диаграмме линий $I = \text{const}$ и $p_n = f(d)$

грамме зависимость между энтальпией, влагосодержанием и температурой влажного воздуха при постоянной относительной влажности.

Каждая точка диаграммы соответствует некоторому состоянию воздуха, характеризуемому параметрами I , d , t , φ , значения которых могут быть определены по положению точки. Линия $\varphi = 1$ является геометрическим местом точек, соответствующих насыщенному состоянию пара в воздухе.

Линия $\varphi = 1$ делит $I-d$ -диаграмму на две зоны: верхнюю зону, расположенную над кривой $\varphi = 1$, и нижнюю зону, расположенную под кривой $\varphi = 1$. Верхняя зона определяет состояние воздуха, в котором содержится водяной пар в перегретом состоянии ($p_n < p_n$), относительная влажность $\varphi < 1$, это зона однофазного состояния воздуха. Нижняя зона характеризует такое состояние воздуха, в котором содержится влага в виде насыщенного водяного пара и тумана, состоящего из мельчайших капель воды или кристаллов льда (зона тумана).

Изотермы, построенные на основании формулы (1.16), действительны только в верхней зоне $I-d$ -диаграммы до кривой $\varphi = 1$. При переходе в зону тумана изотерма претерпевает излом на линии $\varphi = 1$, резко меняет свое направление (рис. 1.3). Продолжения изотерм в зоне тумана должны строиться по формуле (1.17), учитывающей наличие во влажном воздухе, кроме насыщенного водяного пара, влагу в капельно-жидком или твердом состоянии. В диапазоне температур, с которыми приходится иметь дело в практике вентиляции и кондиционирования воздуха, изотермы в зоне тумана считают параллельными изоэнтальпиям.

нии, параллельные вертикальной оси OI , являются линиями постоянных значений влагосодержания ($d = \text{const}$). На полученной координатной сетке построены изотермы (линии $t = \text{const}$) и линии относительной влажности (линии $\varphi = \text{const}$).

Изотермы на $I-d$ -диаграмме выражают зависимость между энтальпией и влагосодержанием, а также между энтальпией и относительной влажностью при постоянной температуре. Линии $\varphi = \text{const}$ выражают на $I-d$ -диа-

На $I-d$ -диаграмме имеется также линия, позволяющая определить парциальное давление водяного пара в зависимости от влагосодержания. Эта линия построена по уравнению (1.11) в виде графика в прямоугольной системе координат.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ $I-d$ -ДИАГРАММЫ

Любой точке на $I-d$ -диаграмме соответствуют определенные значения параметров состояния влажного воздуха $t, \varphi, I, d, p_{\text{п}}$. Значения этих параметров определяются графически по соответствующим линиям, проходящим через заданную точку (рис. 1.4).

Для нахождения на $I-d$ -диаграмме точки, соответствующей некоторому состоянию воздуха, достаточно задать два независимых друг от друга параметра (t и I, t и φ, d и φ и т. п.). Например, пусть задано некоторое состояние влажного воздуха значениями энтальпии I_A и температуры t_A . Для определения положения на $I-d$ -диаграмме точки, соответствующей заданному состоянию воздуха, проводят линии $I_A = \text{const}$ и $t_A = \text{const}$ до их взаимного пересечения в точке A . Найденное таким образом положение точки A характеризует заданное состояние воздуха. Для определения других параметров состояния воздуха через точку A проводят линии $d_A = \text{const}, \varphi_A = \text{const}$, и считывают по $I-d$ -диаграмме соответствующие значения влагосодержания d_A и относительной влажности воздуха φ_A . Для определения парциального давления водяного пара проводят через точку A линию $d_A = \text{const}$ до пересечения ее с линией $p_{\text{п}} = f(d)$ и далее по графику определяют значение $p_{\text{п}A}$.

Также просто определяется по $I-d$ -диаграмме температура точки росы $t_{\text{р}A}$. Так как температура точки росы означает самую низкую температуру, до которой можно охлаждать воздух при постоянном его влагосодержании, то для нахождения температуры точки росы достаточно провести линию $d_A = \text{const}$ до пересечения с кривой $\varphi = 1$. Точка пересечения линии $d_A = \text{const}$ с кривой $\varphi = 1$ на-

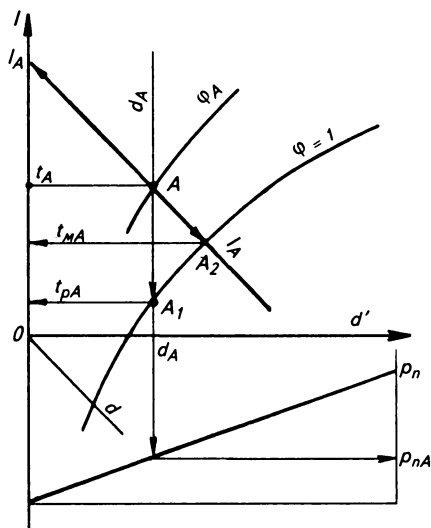


Рис. 1.4. Определение параметров воздуха на $I-d$ -диаграмме: A_1 — точка росы; A_2 — точка мокрого термометра

зывается точкой росы, а соответствующая ей температура есть температура точки росы t_{pA} .

С помощью $I-d$ -диаграммы можно определить температуру воздуха по мокрому термометру. Для этого через точку A проводят изоэнтальпу I_A до пересечения с линией $\phi = 1$. Температура, соответствующая точке пересечения линии I_A с кривой $\phi = 1$, есть температура смоченного термометра t_{mA} .

Температура мокрого термометра является именно той температурой, которую при определенных условиях фиксирует термометр, баллончик с расширяющейся жидкостью которого покрыт тонкой пленкой воды.

Значение температуры мокрого термометра зависит от интенсивности испарения воды с поверхности смоченного баллончика термометра. Чем больше воды испаряется в воздух, тем ниже температура пленки воды. Количество воды, способной испариться в воздух, тем больше, чем меньше его относительная влажность. Следовательно, по температуре мокрого термометра можно судить об относительной влажности воздуха. На этом основан психрометрический метод ее измерения.

Психрометр, с помощью которого реализуется этот метод, представляет собой прибор, состоящий из двух расположенных рядом термометров. Один из термометров обычный, называется сухим. Второй термометр мокрый, баллончик его обернут тонкой и гигроскопичной тканью, например батистом, и смочен водой. Сухой термометр показывает температуру t воздуха, а второй — температуру мокрого термометра t_M . Разность показаний сухого и мокрого термометров $t - t_M$ называется психрометрической разностью. Она тем больше, чем меньше относительная влажность воздуха. При относительной влажности воздуха $\phi = 1$ психрометрическая разность равна нулю, показания термометров одинаковы ($t = t_M$), так как при этих условиях испарения воды с поверхности баллончика мокрого термометра не происходит.

Зная температуру t воздуха и психрометрическую разность $t - t_M$, по психрометрическим таблицам или на $I-d$ -диаграммах определяют относительную влажность воздуха.

В расчетах по вентиляции и кондиционированию воздуха с достаточной для практических целей точностью можно считать, что энтальпия воздуха в тонком слое непосредственно на поверхности воды смоченного баллончика термометра и энтальпия всего омывающего термометры воздуха равны. Тогда линии $t_M = \text{const}$ и

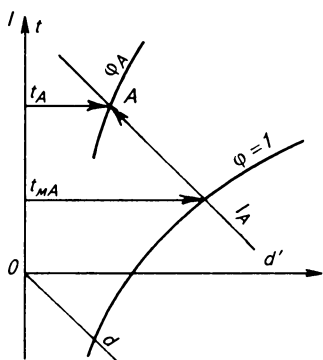


Рис. 1.5. Определение относительной влажности по температурам сухого и смоченного термометров с помощью $I-d$ -диаграммы

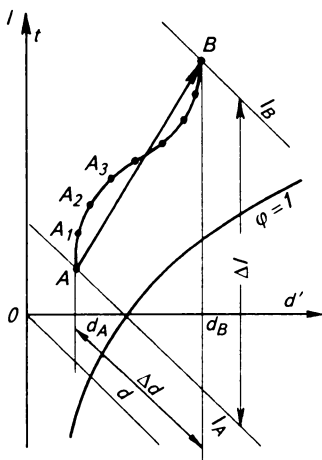


Рис. 1.6. Изображение на I — d -диаграмме изменения состояния воздуха

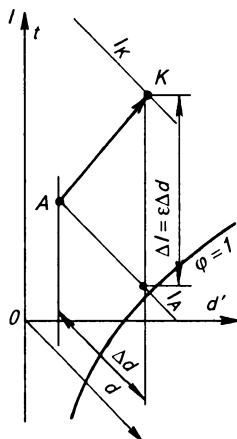


Рис. 17. Построение линий изменения состояния воздуха

$I = \text{const}$ совпадут и температура смоченного термометра найдется по изотерме, проходящей через точку пересечения линий $I = \text{const}$ и $\varphi = 1$. Это значение t_m соответствует всем состояниям воздуха, имеющим энтальпию I_A .

По показаниям сухого и мокрого термометров легко определить по I — d -диаграмме состояние воздуха. Для этого на I — d -диаграмму наносят изотермы t и t_m (рис. 1.5). Через точку пересечения изотермы t_m с кривой $\varphi = 1$ проводят линию $I = \text{const}$ до пересечения с изотермой $t = \text{const}$. Точка пересечения изоэнтальпы с изотермой t характеризует состояние воздуха, t и t_m которого были измерены психрометром.

Изменение состояния влажного воздуха может быть представлено на I — d -диаграмме последовательностью точек, соответствующих начальному и каждому последующему состояниям воздуха (точки A_1, A_2, A_3 и т. д. на рис. 1.6). Линия, соединяющая эти точки, изображает изменение состояния влажного воздуха. В общем случае эта линия кривая. Если нас интересуют только начальное и конечное состояния воздуха, а промежуточные состояния не имеют значения, то линию процесса можно представить прямой, соединяющей точки, характеризующие на I — d -диаграмме начальное и конечное состояния воздуха (линия AK на рис. 1.7).

Положение линии процесса на I — d -диаграмме определяется приращениями энтальпии ΔI и влагосодержания Δd . Если задана точка A начального состояния влажного воздуха, то положение линии процесса можно определить по заданным значениям ΔI и

Δd или их отношению $\varepsilon = \frac{\Delta I}{\Delta d}$. Для этого необходимо от точки A отложить величину Δd (рис. 1.7) в направлении оси Od (по изотэмпле I_A). Из точки, для которой влагосодержание равно $d_A + \Delta d$, проводят линию $d = \text{const}$, откладывая на ней величину $\Delta I = \varepsilon \Delta d$ и таким образом находят точку K , характеризующую конечное состояние воздуха. Линия, проведенная через точки A и K , является линией процесса при заданных значениях ΔI и Δd .

Величина ε является тепловлажностным отношением и называется угловым коэффициентом процесса.

Все процессы, изображаемые на $I-d$ -диаграмме параллельными линиями, характеризуются одной и той же величиной ε независимо от протяженности этих линий и положения точки, соответствующей начальному состоянию воздуха. Это дает возможность построить на $I-d$ -диаграмме угловой масштаб, облегчающий практическое нанесение линий процесса.

Угловым масштаб $I-d$ -диаграммы представляет собой пучок лучей, исходящих из начала координат диаграммы и соответствующих направлениям изменения состояния воздуха с определенным тепловлажностным отношением ε .

Для построения углового масштаба диаграммы рассматривают ряд различных изменений состояния влажного воздуха, приняв

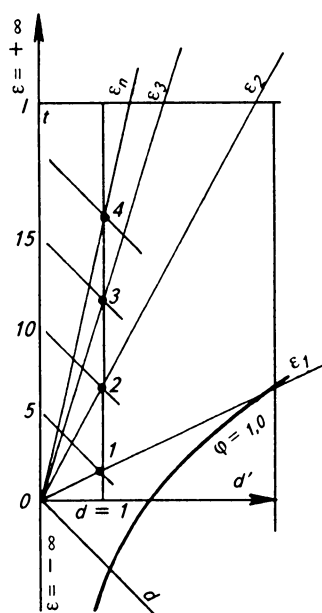


Рис. 1.8. Построение углового масштаба $I-d$ -диаграммы

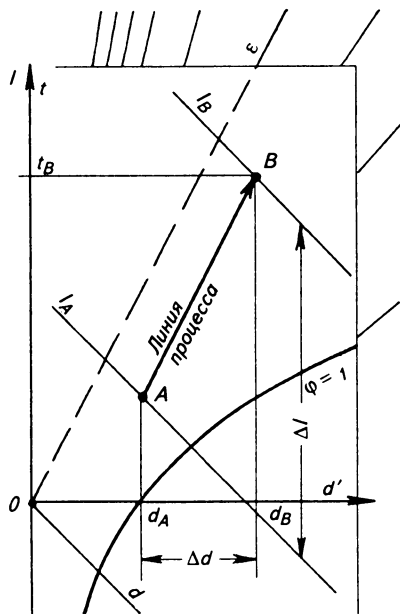


Рис. 1.9. Построение линии процесса изменения состояния воздуха по известному значению углового коэффициента

при этом для всех случаев одинаковые начальные параметры воздуха: $I_1 = 0$ и $d_1 = 0$ (точка начала координат $I-d$ -диаграммы). Если параметры конечного состояния воздуха обозначить I_2 и d_2 , то выражение для углового коэффициента приобретает вид

$$\varepsilon = \frac{\Delta I}{\Delta d} 1000 = \frac{I_2 - I_1}{d_2 - d_1} 1000 = \frac{I_2}{d_2} 1000. \quad (1.17)$$

Для каждого сочетания I_2 и d_2 проводят на $I-d$ -диаграмме линию процесса, исходящую из начала координат и проходящую через точку, соответствующую принятым значениям I_2 и d_2 . Если принять $d_2 = 1$, то $\varepsilon = I_2 \cdot 1000$. Задаваясь значениями I_2 , равными 5, 10, 15 и т. д., на $I-d$ -диаграмме получим точки 1, 2, 3 и т. д. как точки пересечения линии $d_2 = 1$ линиями I_2 (рис. 1.8). Линии, проведенные через эти точки из начала координат, являются линиями процессов при различных значениях ε . Совокупность этих линий представляет собой угловой масштаб $I-d$ -диаграммы. Угловой масштаб либо наносят на $I-d$ -диаграмму в виде круга с лучами, обозначенными соответствующими значениями ε от $-\infty$ до $+\infty$, либо концы этих лучей фиксируют за рамкой диаграммы (рис. 1.8).

Так как все процессы, изображенные на $I-d$ -диаграмме параллельными линиями, характеризуются одним и тем же значением углового коэффициента, то для построения линии процесса, соответствующего заданному значению ε для некоторого исходного состояния воздуха A , которое не совпадает с началом координат диаграммы, необходимо линию заданного ε перенести параллельно самой себе в точку A . Конечное состояние воздуха определяется точкой пересечения линии процесса с линией одного из параметров конечного состояния воздуха (точка B на рис. 1.9).

1.2. ТРЕБОВАНИЯ К ГАЗОВОМУ СОСТАВУ ВОЗДУХА

Присутствием воздуха в приземном пространстве Земли обусловлена животная и растительная жизнь планеты. Воздух представляет собой сложную смесь газов, изменяющуюся в зависимости от природных условий или условий жизнедеятельности людей, животных и растений, как по составу, так и по объему содержащихся в воздухе газов.

Газовый состав воздуха в значительной степени влияет на основной процесс жизнедеятельности живых организмов и растений — г а з о о б м е н . Газообмен между живым организмом и окружающим этот организм воздухом называют д ы х а н и е м .

Дыхание обеспечивается работой всего организма и, прежде всего, его кровеносной системой, доставляющей кислород к клеткам организма и освобождающий клетки от CO_2 .

Обмен газами между кровью, протекающей через малый круг кровообращения (клетка—легкие—клетка), и внешней средой на-

зывают в н е ш н и м д ы х а н и е м. Газообмен через кожу и желудочно-кишечный тракт у человека, а также таких животных, как овцы, коровы, лошади, очень мал и составляет всего лишь 1–2 % от общего объема газообмена.

Поступление и удаление воздуха из легких обеспечиваются действием дыхательной мускулатуры, прежде всего межреберных мышц, диафрагмой и мышцами плечевого пояса. У человека отношение времени вдоха к времени выдоха при различных режимах дыхания колеблется от 1:1 до 1:2. При выполнении легкой работы и в состоянии покоя частота дыхания человека составляет 12–18 вдохов и выдохов в минуту. У физически тренированных людей частота дыхания в покое может составлять 6–8 вдохов и выдохов в минуту.

Внешнее дыхание человеческого организма осуществляется в альвеолах легких, диаметр которых равен 0,2 мм, а толщина стенок 0,001–0,004 мм. Суммарная площадь поверхности легких человека составляет от 90 до 100 м². В процессе дыхания кислород связывается с гемоглобином крови и разносится кровью к клеткам всего организма, где гемоглобин освобождается от кислорода и насыщается диоксидом углерода. Далее гемоглобин с СО₂ доставляется к альвеолам легких, где замыкается процесс газообмена. В процессе дыхания организм поглощает только до 20 % кислорода вдыхаемого воздуха; если вдыхаемый воздух содержит 20,95 % кислорода и 0,03 % диоксида углерода, то выдыхаемый воздух содержит 15,5–18 % кислорода и 2,5–5 % диоксида углерода. Обмен газов в легких обусловлен различием их парциальных давлений в альвеолярном воздухе и венозной крови легочных капилляров.

Внешнее дыхание представляет собой саморегулирующую систему, зависящую от процессов жизнедеятельности организма и других факторов, обуславливающих газообмен и потребление энергии организмом.

Повышение содержания СО₂ и снижение содержания О₂ в воздухе приводят к увеличению внешнего дыхания. Повышение интенсивности внешнего дыхания происходит из-за увеличения количества потребляемого кислорода, связанного с характером деятельности человеческого организма.

Зависимость энергозатрат и потребления кислорода от характера деятельности представлена в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

**Энергозатраты и потребление кислорода человеком
в зависимости от характера деятельности**

Характер деятельности	Энергозатраты, Вт	Потребление кислорода, л/ч
Относительный покой	85–100	15–18
Очень легкая работа	100–175	18–30
Легкая работа	175–350	30–60
Средняя работа	350–520	60–90
Тяжелая работа	520–700	90–100

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Г Л А В А 1	
ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МИКРОКЛИМАТУ ПОМЕЩЕНИЙ	4
1.1. Свойства влажного воздуха	—
<i>I—d-диаграмма влажного воздуха</i>	<i>10</i>
<i>Определение параметров воздуха с помощью I—d-диаграммы</i>	<i>13</i>
1.2. Требования к газовому составу воздуха	17
1.3. Требования к чистоте воздуха помещений	26
1.4. Требования к метеорологическим параметрам воздуха помеще- ний	28
Г Л А В А 2	
ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЗДАНИЙ	34
2.1. Температурные условия комфортности человека в помещениях	—
2.2. Расчетные параметры наружного воздуха	36
2.3. Теплотери через ограждающие конструкции помещений назем- ных зданий	38
2.4. Тепловой баланс помещений	47
2.5. Особенности расчета систем отопления теплиц	53
2.6. Виды систем отопления и режимы их работы	58
Г Л А В А 3	
МЕСТНЫЕ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ	62
3.1. Печное отопление	—
<i>Основные конструкции отопительных печей</i>	<i>64</i>
<i>Выбор отопительных печей и их расчет</i>	<i>68</i>
<i>Основные требования при эксплуатации отопительных пе- чей</i>	<i>75</i>
3.2. Газовое отопление	81
<i>Газовые отопительные печи</i>	<i>85</i>
<i>Газовые камины</i>	<i>86</i>
<i>Газовые водонагреватели</i>	<i>87</i>
<i>Газовые воздухонагреватели</i>	<i>—</i>
<i>Газовые инфракрасные излучатели</i>	<i>88</i>
3.3. Электрическое отопление	89
<i>Электрические отопительные приборы</i>	<i>90</i>
<i>Электрические инфракрасные обогреватели</i>	<i>93</i>
<i>Электродотлы</i>	<i>97</i>
Г Л А В А 4	
ЦЕНТРАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ	100
4.1. Системы водяного отопления	—
4.2. Однотрубные системы водяного отопления	102
4.3. Двухтрубные системы водяного отопления	109
4.4. Основные элементы систем водяного отопления	110
4.5. Циркуляционное давление в системах водяного отопления	118
4.6. Гидравлический расчет систем водяного отопления	126
4.7. Гидравлический расчет систем водяного отопления по удельной линейной потере давления	129

4.8. Тепловой расчет систем водяного отопления	138
4.9. Эксплуатация оборудования систем водяного отопления	149
<i>Подготовка систем отопления к пуску</i>	–
<i>Пуск в действие систем отопления</i>	153
<i>Регулирование системы отопления</i>	155
<i>Эксплуатационное регулирование тупиковых систем отопления</i>	160
<i>Техническое обслуживание систем водяного отопления</i>	163
<i>Особенности эксплуатации оборудования систем водяного отопления</i>	164
4.10. Воздушное отопление	167
<i>Местное воздушное отопление</i>	169
<i>Центральное воздушное отопление</i>	171
<i>Воздушно-тепловые завесы</i>	173
Г Л А В А 5	
СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА	177
5.1. Виды систем вентиляции	–
<i>Естественная вентиляция</i>	178
<i>Механическая (искусственная) вентиляция</i>	183
5.2. Конструктивные элементы систем вентиляции	191
5.3. Системы кондиционирования воздуха	204
5.4. Местные системы кондиционирования воздуха	213
5.5. Особенности вентиляции и кондиционирования воздуха зданий агропромышленного комплекса и коммунального хозяйства	216
Г Л А В А 6	
РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА	239
6.1. Определение количества вредных веществ, теплоты и влаги, поступающих в воздух помещений	–
6.2. Определение количества вентиляционного воздуха при общеобменной вентиляции	241
<i>Определение количества вентиляционного воздуха по расчету на ассимиляцию вредных выделений</i>	–
<i>Определение расхода воздуха из условий воздушного отопления</i>	248
<i>Определение количества вентиляционного воздуха по укрупненным измерителям</i>	249
6.3. Определение расхода воздуха в местных системах вентиляции	250
6.4. Определение продолжительности вентилирования помещений	252
Г Л А В А 7	
ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ	255
7.1. Сопротивления движению воздуха в воздуховодах	–
7.2. Аэродинамический расчет воздуховодов	258
7.3. Распределение давлений воздуха в воздуховодах	262
7.4. Борьба с шумом вентиляционных установок	268
Г Л А В А 8	
ОЧИСТКА ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА	272
8.1. Аэрозоли	–
8.2. Запыленность воздуха и степени его очистки от пыли	273
8.3. Фильтры	275
8.4. Пылеуловители	281
8.5. Очистка воздуха от капелек электролита	282
8.6. Освобождение воздуха от неприятных запахов	283
Г Л А В А 9	
ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ВОЗДУХА	285
9.1. Назначение тепловлажностной обработки воздуха	–

9.2. Смешение потоков воздуха различных состояний	288
9.3. Тепло- и влагообмен между воздухом и водой	290
Г Л А В А 10	
АППАРАТЫ КОНТАКТНОГО ТИПА	296
10.1. Виды аппаратов контактного типа	—
10.2. Форсуночные камеры	297
10.3. Камеры с орошаемой насадкой	305
10.4. Аппараты пенного типа	306
Г Л А В А 11	
ПОВЕРХНОСТНЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ	308
11.1. Устройство поверхностных теплообменных аппаратов	—
11.2. Воздухонагреватели	310
11.3. Воздухоохладители	323
Г Л А В А 12	
ОСУШКА ВОЗДУХА	329
12.1. Механическая осушка воздуха	—
12.2. Осушка воздуха твердыми сорбентами	331
12.3. Осушка воздуха жидкими сорбентами	335
Г Л А В А 13	
КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА	341
13.1. Термодинамическая модель системы кондиционирования воз- духа	—
13.2. Система кондиционирования воздуха с первой рециркуляцией	353
13.3. Тепло- и холодоснабжение систем кондиционирования воздуха	359
Г Л А В А 14	
ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗ- ДУХА	364
14.1. Задачи эксплуатации и ее организация	—
14.2. Приемка систем в эксплуатацию	366
14.3. Испытания и наладка систем	367
14.4. Определение технических характеристик оборудования и сис- тем	370
14.5. Аэродинамическое испытание сетей воздухопроводов и регулирова- ние расходов воздуха	386
14.6. Испытание вентиляторов	390
14.7. Испытание и наладка калориферных установок	394
14.8. Испытание и наладка форсуночной камеры орошения	398
14.9. Испытание воздушных фильтров	402
14.10. Испытание неавтономных кондиционеров	403
14.11. Испытание и наладка автономных кондиционеров	404
14.12. Испытание и наладка систем кондиционирования воздуха	405
14.13. Техническое обслуживание систем	406
Приложения	411
Список литературы	419