

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«Витебский государственный технологический университет»

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА**

Методические указания  
к курсовому и дипломному проектированию для студентов специальностей  
50 01 01 «Технология пряжи, тканей, трикотажа и нетканых материалов»  
дневной и заочной форм обучения

Витебск  
2007

## УДК 502.3

Проектирование систем кондиционирования воздуха : методические указания к курсовому и дипломному проектированию для студентов специальностей 50 01 01 «Технология пряжи, тканей, трикотажа и нетканых материалов» дневной и заочной форм обучения.

Составители:      доцент      Казарновский В.Я.  
                          ассистент    Гречаников А.В.  
                          ст. преп.     Трутнёв А.А.

В методических указаниях приведены исходные данные для построения *i-d*-диаграммы влажного воздуха, представлена демонстрационная *i-d*-диаграмма влажного воздуха, показано изображение процессов изменения состояния воздуха, используемых при проектировании систем кондиционирования воздуха. Эти указания могут быть использованы в дипломном проектировании студентами специальностей 50 01 01.

Одобрено кафедрой «Охрана труда и промэкология» УО «Витебский государственный технологический университет».

«14» ноября 2007 г.      Протокол № 4.

Рецензент                                      проф. Ковчур С.Г.  
 Редактор                                         доц. Потоцкий В.Н.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ».

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г.                                      Протокол № \_\_\_\_\_

Ответственный за выпуск Трутнёв А.А.

Учреждение образования  
 «Витебский государственный технологический университет»

---

Подписано к печати \_\_\_\_\_ г.    Формат \_\_\_\_\_ Уч.-изд. лист \_\_\_\_\_  
 Печать ризографическая. Тираж \_\_\_\_\_ экз Заказ № \_\_\_\_\_ Цена \_\_\_\_\_ р.

---

Отпечатано на ризографе Учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Лицензия № 02330/0133005 от 1 апреля 2004 г.  
 210035, Витебск, Московский пр-т, 72.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

СОДЕРЖАНИЕ .....	3
1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА.....	4
1.1 Основные параметры влажного воздуха.....	4
2. $i - d$ - ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА .....	10
3. ИЗОБРАЖЕНИЕ НА $i-d$ -ДИАГРАММЕ ПРОЦЕССОВ СМЕШИВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОЛИЧЕСТВ ВОЗДУХА, ИМЕЮЩИХ РАЗНЫЕ ПАРАМЕТРЫ.....	14
4. ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В $i-d$ -ДИАГРАММЕ.....	18
ЛИТЕРАТУРА.....	25
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	26

# 1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

## 1.1 Основные параметры влажного воздуха

Атмосферный воздух, состоящий из кислорода, азота, углекислоты и небольшого количества инертных газов, всегда содержит некоторое количество водяного пара. Смесь сухого воздуха с водяным паром называется влажным воздухом (в дальнейшем воздушно-паровая смесь). Состав сухой части атмосферного воздуха приведен в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Составные компоненты сухой части влажного воздуха	Символ или формула	Содержание, %	
			по весу	по объему
1.	Азот	N <sub>2</sub>	75,55	78,13
2.	Кислород	O <sub>2</sub>	23,10	20,90
3.	Аргон, неон и другие инертные газы	Ar, Ne,	1,3	0,94
4.	Углекислота	CO <sub>2</sub>	0,05	0,03

К числу инертных газов, указанных в табл. 1, кроме аргона и неона, относятся также гелий, ксенон и криптон. Помимо этого, в воздухе содержится весьма незначительное количество водорода, озона и некоторых других газов. Причем, если содержание газов в сухой части воздуха относительно стабильно, то количество водяных паров изменяется в широких пределах и зависит от времени года и местных климатических условий.

С достаточной для технических расчетов точностью можно считать, что влажный воздух подчиняется всем законам смеси идеальных газов. Каждый газ, в том числе и пар, входящий в состав смеси, занимает тот же объем  $V$ , что и вся смесь. Он имеет температуру смеси  $T$ , находится под своим парциальным давлением  $p_i$ , которое определяют по уравнению Клапейрона

$$p_i = \frac{M_i RT}{V m_i} = \frac{m_i}{V} RT, \quad (1.1)$$

где  $n_i = \frac{M_i}{m_i}$  – количество молей  $i$ -того газа, входящего в состав смеси;

$M_i$  – масса  $i$ -того газа, кг;

$m_i$  – молекулярный вес газа, кг/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – объем газа, м<sup>3</sup>.

Размерность универсальной газовой постоянной надо выбирать в зависимости от единиц измерения давления и объема.

В системе единиц СИ универсальная газовая постоянная равна

$$R = 8,314 \times 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \times \text{град}} \cdot$$

Отношение массы газа ( $M_i$ ) к объему смеси  $V$  называется концентрацией ( $w_i$ ) данного газа в смеси.

Сумма парциальных давлений газовых компонентов смеси равна полному давлению смеси (закон Дальтона)

$$P = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_i = \sum p_i \quad (1.2)$$

Влажный воздух можно в первом приближении рассматривать как бинарную смесь, состоящую из водяного пара и приведенного однородного газа – сухой части атмосферного воздуха, эффективный молекулярный вес которого  $m_B = 29$ . Тогда барометрическое давление влажного воздуха  $P_6$  будет равно сумме парциальных давлений сухого воздуха  $p_6$  и водяного пара  $p_n$  т. е.

$$P_6 = p_B + p_n \quad (1.3)$$

В системе единиц СИ давление измеряется в  $Па$  ( $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,332 \text{ Па}$ ,  $Па = Н/м^2$ ).

Смесь, которая состоит из сухого воздуха и перегретого водяного пара, называют ненасыщенным влажным воздухом, а смесь, состоящую из сухого воздуха и насыщенного водяного пара, – насыщенным влажным воздухом.

Относительная влажность воздушно-паровой смеси представляет собой отношение концентрации водяного пара ненасыщенного воздуха к концентрации водяного пара насыщенного воздуха при одинаковых температурах и давлениях

$$j \text{ в} = \frac{w_{\text{II}}}{w_{\text{III}}} \quad (1.4)$$

где  $w_{\text{II}}$  – концентрация водяного пара ненасыщенного воздуха,  $кг/м^3$ ;

$w_{\text{III}}$  – концентрация водяного пара насыщенного воздуха  $кг/м^3$ .

Из выражения (1.4) следует, что относительная влажность насыщенного влажного воздуха равна единице.

Относительную влажность воздуха можно также выразить отношением парциальных давлений водяного пара. Для этой цели воспользуемся уравнением Клапейрона (1.1):

$$j \zeta = \frac{p_{\Pi}}{p_{\Pi\Pi}}, \quad (1.5)$$

где  $p_{\Pi}$  и  $p_{\Pi\Pi}$  – соответственно парциальное давление ненасыщенного пара и давление насыщенного пара при температуре воздушно-паровой смеси.

Давление насыщенного водяного пара является функцией только температуры, оно может быть найдено по приложению 1 (табл. 1) или, с известным приближением, по формуле справедливой для интервала температур от 0 до 100°C

$$\lg p_{\Pi\Pi} = 0,622 + \frac{7,5t_H}{238 + t_H}, \quad (1.6)$$

где  $t_H$  – температура насыщенного воздуха.

Величину относительной влажности часто выражают в процентах, т. е.

$$j = j \zeta \times 100\% = \frac{W_{\Pi}}{W_{\Pi\Pi}} \times 100\% .$$

Влагосодержание влажного воздуха  $d$  представляет собой отношение массы пара к единице массы сухого воздуха, содержащегося в смеси, т. е.

$$d = \frac{M_{\Pi}}{M_B}, \quad (1.7)$$

где  $M_{\Pi}$  и  $M_B$  – соответственно масса пара и масса сухого воздуха.

Если массу пара выражают в граммах, а массу сухого воздуха – в килограммах, то величина влагосодержания обозначается через  $d$ , как это записано в выражении (1.7). Если же массу пара и сухого воздуха выражают в килограммах, то значение влагосодержания принято обозначать буквой  $x$ . Таким образом,  $x$  и  $d$  связаны следующей зависимостью:

$$x = \frac{d}{1000} \frac{\text{г}}{\text{кг сух. возд}}$$

Если воспользоваться уравнением Клапейрона, написанным для пара и воздуха, то выражение (1.7) можно представить в следующем виде:

$$d = \frac{M_{\Pi}}{M_B} \times 1000 = \frac{m_{\Pi} p_{\Pi}}{m_B p_B} \frac{\text{г}}{\text{кг сух. возд}}, \quad (1.8)$$

где  $m_{\Pi}$  – молекулярный вес пара;

$m_B$  – молекулярный вес воздуха.

Подставив соответствующие значения молекулярных весов, получим

$$d = \frac{18}{29} \times \frac{p_{\Pi}}{p_B} \times 1000 = 622 \frac{p_{\Pi}}{P_0 - p_{\Pi}} = 622 \frac{j \cdot \rho_{\Pi\Pi}}{P_0 - j \cdot \rho_{\Pi\Pi}} \quad \left[ \frac{\text{кг сух. возд}}{\text{м}^3} \right] \quad (1.9)$$

Полученное таким образом выражение влагосодержания показывает, что влагосодержание воздуха пропорционально барометрическому давлению и является функцией только парциального давления пара.

Величина барометрического давления атмосферного воздуха на уровне моря в среднем составляет 760 мм рт. ст. ( $101,3 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ ) и колеблется в пределах от 680 до 810 мм рт. ст. (от  $90,6 \cdot 10^3$  до  $107,9 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ ).

С изменением высоты над уровнем моря барометрическое давление изменяется и его можно вычислить с достаточной точностью по формуле

$$A = (18,4 + 0,067t) \lg \frac{P_0^{\rho}}{P_0^{\rho}}, \quad (1.10)$$

где  $A$  – высота над уровнем моря, км;

$t$  – средняя температура воздуха на участке между уровнем моря и рассматриваемой точкой;

$P_0^{\rho}$  – давление над уровнем моря, в среднем равное 760 мм рт. ст.;

$P_0^{\rho}$  – искомое давление на высоте  $A$  км, мм рт. ст.

Выражение (1.10) позволяет получить соотношение для парциального давления пара

$$p_{\Pi} = \frac{P_0^{\rho} d}{622 + d} \quad [\text{мм рт. ст.}] \quad (1.11)$$

Плотность влажного воздуха представляет собой отношение массы воздушно-паровой смеси  $M$  к объему этой смеси  $V$

$$g_{CM} = \frac{M}{V} \quad \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right] \quad (1.12)$$

Величина  $M$  состоит из массы сухого воздуха  $M_B$  и массы водяного пара  $M_{\Pi}$ . Поэтому формулу (1.12) можно переписать в следующем виде:

$$g_{CM} = \frac{M_B}{V} + \frac{M_{\Pi}}{V} = w_B + w_{\Pi}, \quad (1.13)$$

где  $w_B$  – концентрация сухого воздуха в смеси,  $\text{кг/м}^3$ ;

$w_{\Pi}$  – концентрация водяного пара в смеси,  $\text{кг/м}^3$ .

Используя выражения (1.7) и (1.13) можно написать

$$g_{CM} = w_B + \frac{\alpha}{\zeta} \left( 1 + \frac{d}{1000} \frac{\rho}{\rho_0} \frac{e}{e_0} \frac{Kz}{T} \right) \quad (1.14)$$

Так как давление абсолютно сухого воздуха ( $d=0$ ) равно барометрическому давлению ( $p_B = P_0$ ), то его концентрация в этом случае будет равна его плотности, т. е.  $g_B = w_B$ .

Плотность газа прямо пропорциональна давлению и обратно пропорциональна температуре. Поэтому концентрацию сухого воздуха в смеси можно считать как его плотность при парциальном давлении  $p_B$ :

$$w_B = g_0 \times \frac{p_B}{760} \times \frac{273}{T} \frac{e}{e_0} \frac{Kz}{T} \quad (1.15)$$

где  $g_0$  – плотность сухого воздуха при  $t = 0^\circ$  и  $P_0 = 760$  мм рт. ст. (равная  $1,293$  кг/м<sup>3</sup>).

На основании выражений (1.14), (1.15) и (1.7) плотность влажного воздуха можно выразить в следующем виде:

$$g_{CM} = g_0 \frac{273}{T} \frac{e}{e_0} \frac{P_0}{760} - \frac{\alpha}{\zeta} \left( 1 - \frac{m_{II}}{m_B} \frac{\rho}{\rho_0} \frac{p_{II}}{760} \right) \frac{e}{e_0} \frac{Kz}{T} \quad (1.16)$$

Подставив соответствующие значения молекулярных весов и  $g_0$  получим

$$g_{CM} = 1,293 \frac{273}{T} \frac{e}{e_0} \frac{P_0}{760} - 0,378 \frac{p_{II}}{760} \frac{e}{e_0} \frac{Kz}{T} \quad (1.17)$$

Из этого выражения видно, что влажный воздух всегда легче сухого, так как молекулярный вес пара меньше молекулярного веса воздуха. Таким образом, чем больше величина  $p_{II}$ , тем легче будет воздушно-паровая смесь. Однако это будет справедливо только в том случае, когда молекулярный вес паров меньше молекулярного веса воздуха. Если молекулярный вес пара какого-либо вещества (например, паров бензола) будет больше молекулярного веса воздуха, то картина наблюдается обратная (подобные случаи встречаются в практике промышленной вентиляции).

Влияние температуры на плотность смеси в обоих случаях будет одинаковым: с повышением температуры плотность смеси начнет уменьшаться, и наоборот.

Удельную теплоемкость влажного воздуха  $c_{CM}$  относят, как и влагосодержание, к единице массы сухой части воздуха:

$$c_{CM} = c_B + c_{II} \frac{d}{1000} \frac{e}{e_0} \frac{Kz}{T} \quad (1.18)$$



где  $c_B$  – средняя удельная теплоемкость сухого воздуха (для температур в интервале 0–100°C  $c_B$  принимают равной 1,005 кДж/кг·град);  
 $c_H$  – средняя удельная теплоемкость водяного пара – 1,8 кДж/кг·град.

Удельная энтальпия сухого воздуха равна

$$i = c_B t \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot \frac{\text{град}}{\text{град}}, \quad (1.19)$$

где  $t$  – температура воздуха.

Энтальпия насыщенного пара определяется выражением

$$i_{\text{нп}} = i_{\text{ж}} + r = c_{\text{ж}} t_{\text{ж}} + r \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot \frac{\text{град}}{\text{град}}, \quad (1.20)$$

где  $i_{\text{ж}}$  – энтальпия жидкости, кДж/кг;

$c_{\text{ж}}$  – теплоемкость жидкости, кДж/кг·град;

$r$  – удельная теплоемкость испарения кДж/кг;

$t_{\text{ж}}$  – температура жидкости.

Величина  $r$  зависит от температуры жидкости, и ее можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$r = 2500 - 2,38 t_{\text{ж}} \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot \frac{\text{град}}{\text{град}}.$$

Подставив соответствующие значения в выражение (1.20) получим

$$i_{\text{нп}} = 4,1868 t_{\text{ж}} + 2500 - 2,38 t_{\text{ж}} = 2500 + 1,8068 t_{\text{ж}} \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot \frac{\text{град}}{\text{град}}, \quad (1.21)$$

где 4,1868 кДж/кг·град – средняя теплоемкость воды в интервале от 0°C до 100°C.

Удельная энтальпия перегретого пара, содержащегося во влажном воздухе при температуре  $t$ , равна

$$i_{\text{пп}} = i_{\text{нп}} + c(t - t_{\text{ж}}) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot \frac{\text{град}}{\text{град}}. \quad (1.22)$$

С достаточной для практических расчетов точностью удельную энтальпию перегретого пара можно выразить следующей формулой:

$$i_{\text{пп}} = 2500 + 1,8068 t_{\text{ж}} \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot \frac{\text{град}}{\text{град}}. \quad (1.23)$$

Энтальпию влажного воздуха обычно относят к единице массы сухого воздуха.

В системе единиц СИ основное уравнение энтальпии влажного воздуха имеет вид

$$i = 1,005t + (2500 + 1,8068 t) \times d \times 10^{-3} \frac{\text{кДж}}{\text{кг сух. возд.}} \quad (1.24)$$

## 2. *i* – *d* - ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Используя выражение (1.24) построим *i-d*-диаграмму, которая широко применяется в расчетах сушки, кондиционирования воздуха и в ряде других расчетов, связанных с изменением состояния влажного воздуха. Эта диаграмма выражает графическую зависимость основных параметров воздуха (*t*, *j*, *p*<sub>п</sub>, *d* и *i*) при заданном барометрическом давлении.

*i-d* – диаграмма (рис. 2.1) построена в косоугольной системе координат с углом между осями (*i* и *d*)  $\alpha = 135^\circ$ . На вспомогательной оси *Od*<sub>1</sub> в масштабе с интервалом, соответствующим 1 г, откладываются величины влагосодержаний *d* и через полученные таким образом точки проводятся вертикальные линии постоянного влагосодержания (*d*=const).

По оси ординат в масштабе вдвое большем, чем для *d*, откладываются величины энтальпий *i* с интервалом в 2 кДж/кг сух. возд, причем вверх от точки 0, соответствующей температуре воздушно-паровой смеси  $t = 0^\circ$  и влагосодержанию  $d = 0$  (а значит, и  $i = 0$ ), откладывают положительные, а вниз – отрицательные значения энтальпий. Через полученные точки на оси ординат проводят линии постоянных энтальпий (*i* = const) под углом  $\alpha = 135^\circ$  к линиям *d*=const (т. е. параллельно основной оси *Od*). На полученной таким образом сетке, состоящей из параллелограммов, построены линии изотерм ( $t = const$ ) и кривые постоянных относительных влажностей ( $\phi = const$ ).

Если принять  $t = const$ , то уравнение (1.24) будет уравнением прямой линии. Следовательно, изотермы являются прямыми линиями, лежащими на поле *i-d*-диаграммы. Для построения изотермы  $t = 0$  возьмем два крайних состояния воздушно-паровой смеси: при  $\phi = 0\%$  и при  $\phi = 100\%$ . Так как при  $t = 0^\circ$  и  $\phi = 0\%$ ,  $d = 0$ , то и  $i = 0$ . Отсюда следует, что изотерма  $i = 0^\circ$  должна пройти через начало координат (через точку 0). Далее при  $\phi = 100\%$  с помощью выражения (1.9) находим соответствующее значение влагосодержания *d*, приняв  $P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$  (значение  $P_0$  могут быть приняты и другими, в зависимости от конкретных условий: – 715, 745 мм рт. ст. и др.).

В системе координат  $i-d$  (см. рис. 2.1) сначала находим точку  $a$ , имеющую параметры, соответствующие состоянию воздуха  $i = 0$  и  $d = 0$  (т.е. точка начала координат). Затем находим точку  $b$ , проведя через эти точки прямую линию, получим линию изотермы  $t = 0^\circ$ .

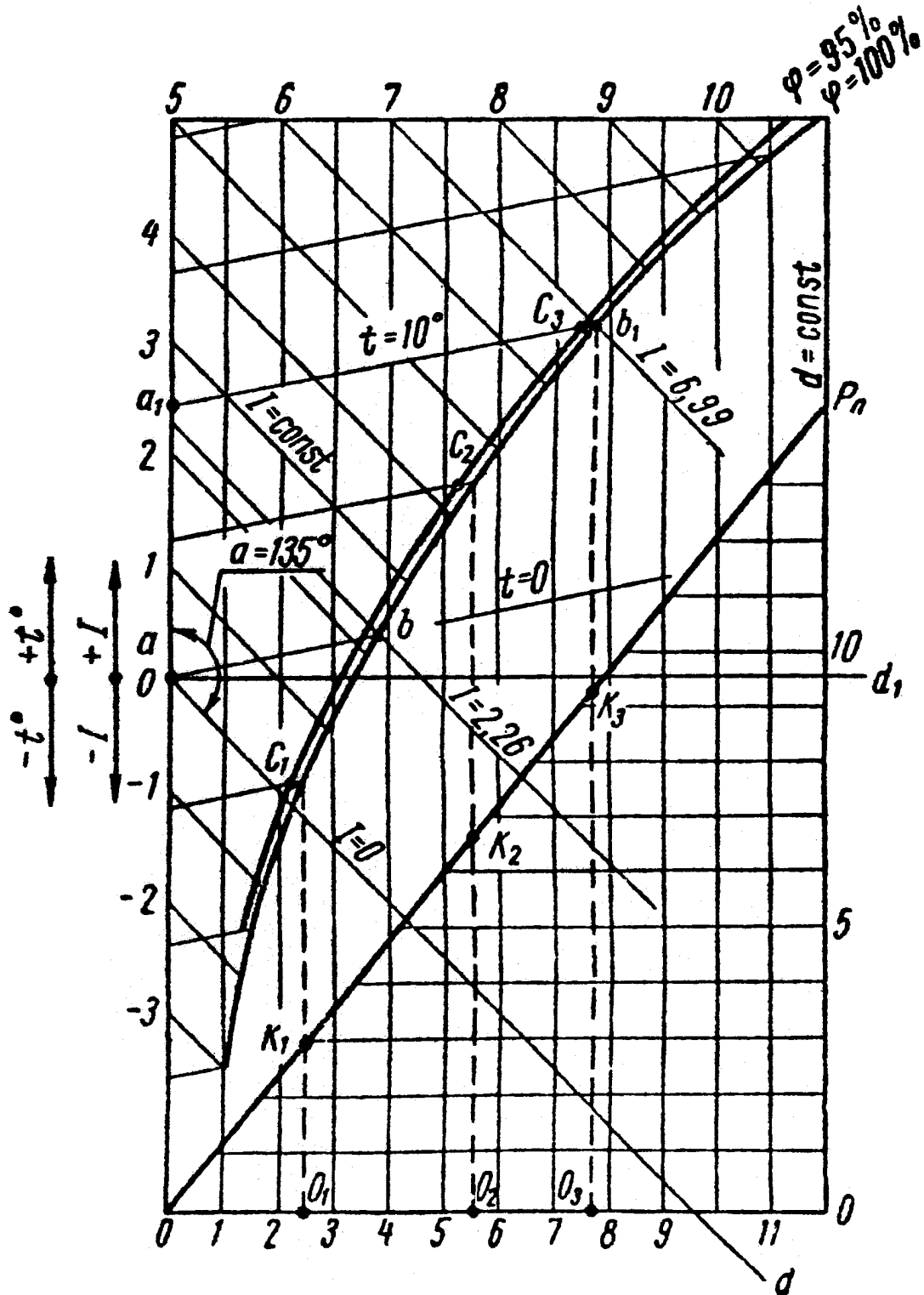


Рис. 2.1. Построение  $i-d$ -диаграммы

Аналогичным путем можно построить любую другую изотерму с другими параметрами.

Соответствующее значение  $i$  находим по уравнению (1.24). По полученным значениям  $i$  и  $d$  находим на диаграмме точки  $a_1$  и  $b_1$ , проведя через которые прямую, получим линию изотермы  $t = 10^\circ$ .

Приведенные на диаграмме линии температур соответствуют значениям по сухому термометру.

При пользовании диаграммой необходимо иметь в виду, что изотермы между собой непараллельны; особенно эта непараллельность сказывается при высоких значениях температур. При построении изотермы видели, что точки  $b$ ,  $b_1$  и т. д. соответствовали насыщенному состоянию воздуха, т. е.  $\phi = 100\%$ . Если соединить точки  $b$ , и  $b_1$  и другие плавной кривой, то получим линию относительной влажности  $\phi = 100\%$ , или, как иногда ее называют, *пограничную кривую*.

Вся область диаграммы, лежащая выше этой кривой, относится к воздуху, не насыщенному водяными парами.

Для построения кривой относительной влажности  $\phi = 95\%$  следует предварительно определить влагосодержания, отвечающие этому насыщению при различных температурах воздушно-паровой смеси, и затем найти точки  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  и т. д., соответствующие найденным влагосодержаниям и температурам. Соединив эти точки плавной кривой, получим кривую  $\phi = 95\%$ .

С помощью описанного метода можно построить и остальные кривые относительной влажности воздушно-паровой смеси.

Для построения линии парциального давления пара с правой стороны диаграммы на линии, параллельной оси ординат, наносится шкала парциальных давлений в *мм рт. ст.*, начиная с  $p_{II} = 0$  до величины возможного значения  $p_{II}$  в диапазоне данной диаграммы.

Масштаб этой шкалы выбирается возможно крупным, но с таким расчетом, чтобы линия  $p_{II}$  не пересекалась с кривой  $\phi = 100\%$ . На вертикалях (см. пунктирные линии), проходящих через точки пересечения прямых  $t$  с кривой  $\phi = 100\%$ , откладывают в принятом масштабе для парциальных давлений пара отрезки  $O_1K_1$ ,  $O_2K_2$ ,  $O_3K_3$  и т. д., соответствующие по величине парциальным давлениям водяных паров, насыщающих воздух при данных температурах. Значения парциальных давлений пара берут из таблицы (приложение 1, табл. 2). Плавная линия, проведенная через точки  $O$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  и т. д., является искомой кривой парциального давления водяного пара. На этом построение  $i$ - $d$ -диаграммы заканчивается.

Каждая точка на поле диаграммы соответствует определенному состоянию воздуха. Положение точки определяется любыми двумя из четырех ( $t$ ,  $j$ ,  $d$ ,  $i$ ) параметрами состояния.

При построении диаграммы принят следующий масштаб: для энтальпии 1 см соответствует  $2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг сух. возд}}$ , для влагосодержания

1 см соответствует  $1 \frac{\text{г}}{\text{кг сух. возд}}$ . В шкале парциальных давлений водяных

паров 1 см соответствует  $0,2 \text{ кН/м}^2$ .

С помощью этих диаграмм на основании известных двух любых параметров воздуха можно найти и остальные параметры его.

Допустим, что известными параметрами являются:  $t = 20^\circ$  и  $\phi = 50\%$ . На  $i-d$ -диаграмме это состояние воздуха будет определяться точкой пересечения изотермы  $t = 20^\circ$  с кривой  $\phi = 50\%$  (точка а, рис. 2.2).

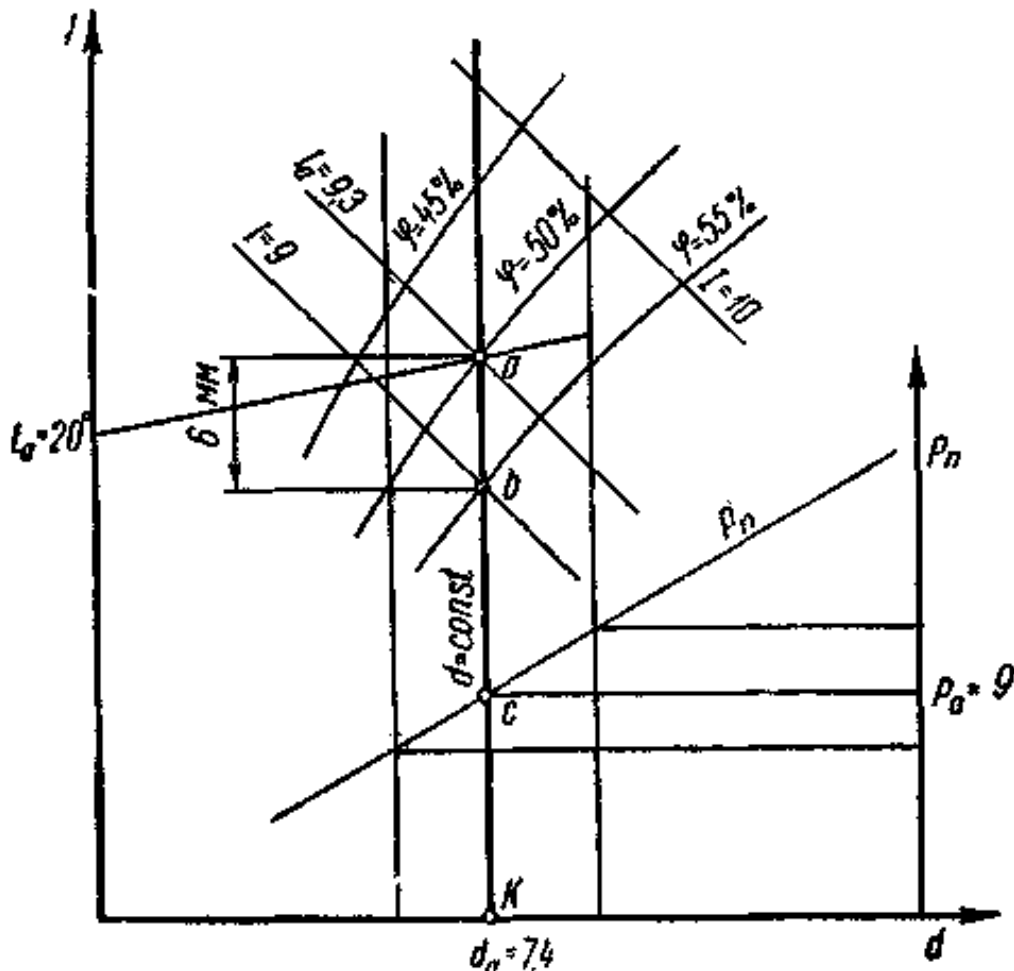


Рис. 2.2 Определение параметров воздуха с помощью  $i-d$ -диаграммы

Для иллюстрации пользования  $i-d$ -диаграммой, построенной в системе единиц СИ, рассмотрим пример. Находим на  $i-d$ -диаграмме точку, соответствующую заданному состоянию воздуха. Значение

энтальпии этой точки лежит между линиями  $i = 38$  и  $i = 40$   $2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг сух. возд}}$ , на 4 мм выше линии  $i = 38$ . В принятом масштабе энтальпии этот отрезок соответствует

$$\frac{2 \times 4}{10} = 0,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг сух. возд}}.$$

Тогда значение энтальпии искомой точки будет равно

$$i_{ac} = 38 + 0,8 = 38,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг сух. возд}}.$$

Величина влагосодержания будет равна  $d_{ac} = 7,4 \frac{\text{г}}{\text{кг сух. возд}}$ .

Парциальное давление водяных паров составляет  $p_a = 1,18 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$ .

### **3. ИЗОБРАЖЕНИЕ НА $i$ - $d$ -ДИАГРАММЕ ПРОЦЕССОВ СМЕШИВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОЛИЧЕСТВ ВОЗДУХА, ИМЕЮЩИХ РАЗНЫЕ ПАРАМЕТРЫ**

Допустим, что в смесь вступает  $L_a$  кг влажного воздуха с параметрами точки А (рис. 3.1) и  $L_b$  кг влажного воздуха с параметрами точки

Б; при этом отношение  $\frac{L_b}{L_a} = n$ .

В этом случае с 1 кг воздуха состояния, соответствующего точке А, будет смешиваться  $n$  кг воздуха состояния, соответствующего точке Б. энтальпия смеси  $i_c$  в количестве  $(1 + n)$  кг будет равно

$$i_c(1 + n) = i_a + ni_b, \quad (3.1)$$

откуда

$$i_c = \frac{i_a + ni_b}{1 + n}. \quad (3.2)$$

Выражение влагосодержания соответственно можно написать в следующем виде:

$$\frac{d_c}{1000}(1 + n) = \frac{d_a}{1000} + n \frac{d_b}{1000}. \quad (3.3)$$

Отсюда

$$\frac{d_c}{1000} = \frac{d_a + nd_0}{1000(1+n)}. \quad (3.4)$$

Перепишем уравнения 3.1 и 3.4 в следующем виде:

$$i_a - i_c = n(i_c - i_0); \quad (3.5)$$

$$\frac{d_a - d_c}{1000} = \frac{n(d_c - d_0)}{1000}. \quad (3.6)$$

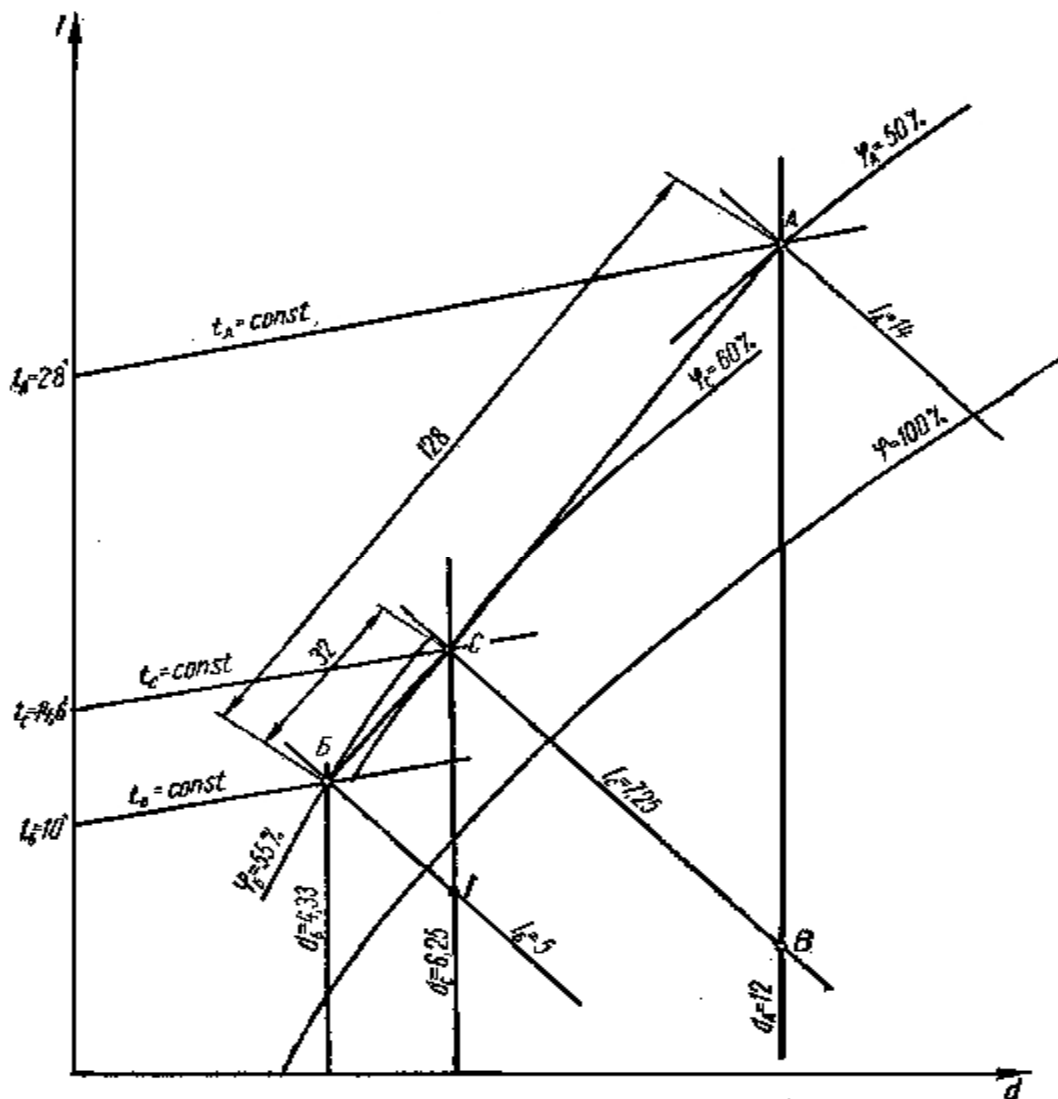


Рис. 3.1. Изображение на  $i$ - $d$ -диаграмме процесса смешивания воздуха двух различных состояний.

Разделив выражение (3.5) на выражение (3.6), получим уравнение прямой линии, проходящей через точки  $A$  и  $B$  и точку  $C$  с текущими координатами  $i_c$  и  $d_c$

$$\frac{i_B - i_C}{d_a - d_C} \times 1000 = \frac{i_C - i_b}{d_C - d_b} \times 1000. \quad (3.7)$$

Выражение (3.7) показывает, что точка смеси  $C$  лежит на прямой, соединяющей точки  $A$  и  $B$  (т. е. точки, характеризующие состояния отдельных количеств воздуха, вступающих в смесь).

Таким образом, прямая  $AB$  является геометрическим местом точек возможных состояний смеси воздуха. Однако при этом следует иметь в виду, что каждому состоянию смеси должно соответствовать вполне определенное отношение количеств воздуха состояния  $A$  и  $B$ , вступающих в смесь, т. е. величина

$$n = \frac{L_b}{L_a}.$$

Для доказательства этого утверждения рассмотрим два треугольника (рис. 3.1)  $ACB$  и  $CBG$ . Исходя из подобия этих треугольников, можно написать

$$\frac{CA}{BC} = \frac{AB}{CG} = \frac{i_a - i_C}{i_C - i_b}. \quad (3.8)$$

А так как из уравнения (3.5) следует, что

$$\frac{i_a - i_C}{i_C - i_b} = n,$$

то выражение (3.8) может быть переписано в следующем виде:

$$\frac{CA}{BC} = \frac{i_B - i_C}{i_C - i_b} = n = \frac{L_b}{L_a}. \quad (3.9)$$

Выражение (3.9) показывает, что точка  $C$  делит прямую смеси  $AB$  на отрезки, обратно пропорциональные количествам воздуха, вступающим в смесь.

Таким образом, для получения какого-либо состояния смеси, например, характеризуемого точкой  $C$ , лежащей на прямой  $AB$ , необходимо смешать воздух состояния  $A$  в количестве, пропорциональном длине отрезка  $BC$ , с воздухом состояния  $B$  в количестве, пропорциональном длине отрезка  $AC$ . Длина прямой  $AB$  в этом случае будет пропорциональна общему количеству смеси.



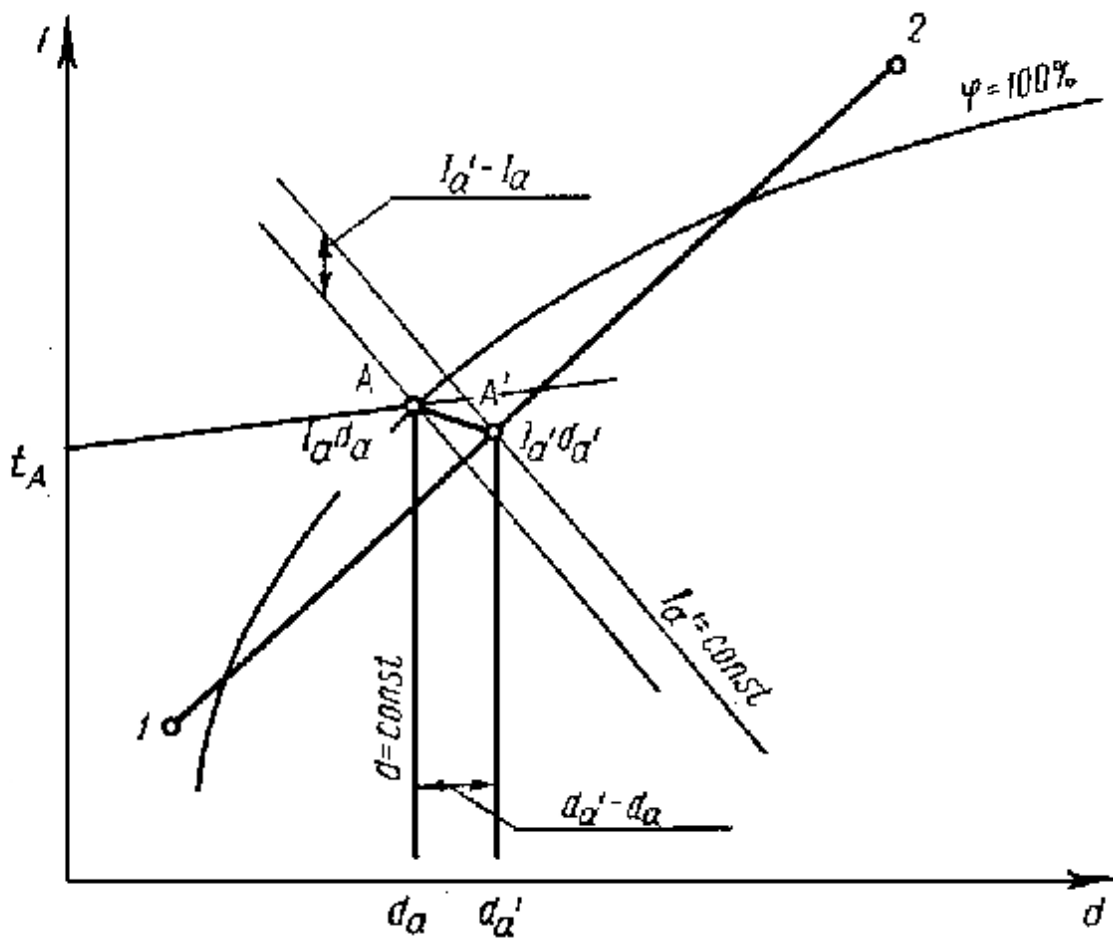


Рис. 3.2. Случай, когда точка смеси получается за пределами пограничной кривой ( $\psi = 100\%$ )

Если прямая смеси, соединяющая точки 1 и 2 (рис. 3.2), пересекается с кривой насыщения, то в некоторых случаях точка смеси  $A'$  может оказаться в зоне, лежащей ниже кривой насыщения.

Такое положение точки смеси показывает, что в результате смешивания будет выпадать влага из воздуха. Так как температура выпадающей влаги весьма близка температуре воздушно-паровой смеси  $t_a$ , то параметры действительного состояния воздушно-паровой смеси (точка  $A$ ) можно найти из уравнения

$$i_{ac} = i_a + (d_{ac} - d_a) \frac{t_a}{1000} \quad (3.10)$$

или из

$$i_{ac} - i_a = (d_{ac} - d_a) \frac{t_a}{1000} \cdot \quad (3.11)$$

Это уравнение можно решить при помощи  $i$ - $d$ -диаграммы. Для этого на кривой насыщения надо искать такую точку с параметрами  $i_a$  и  $d_a$ , которая удовлетворит вышеприведенному уравнению. Обычно  $i_a$  незначительно меньше  $i_{a'}$ , так как количество выпавшей влаги весьма мало.

Таким образом, вместо практически невозможного состояния смеси воздуха, характеризуемого параметрами  $i_{a'}$  и  $d_{a'}$ , в действительности будем иметь состояние смеси, определяемое параметрами  $i_a$  и  $d_a$ .

#### **4. ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В $i$ - $d$ -ДИАГРАММЕ**

Рассмотрим характерные тепловлажностные состояния воздуха. Когда состояние влажного воздуха характеризуется точкой  $A$  (рис. 4.1), лежащей выше кривой  $\phi = 100\%$ , водяной пар в воздухе находится в перегретом состоянии. Если состояние влажного воздуха характеризуется точкой  $A_1$  (на кривой насыщения  $\phi = 100\%$ ), то водяной пар в воздухе находится в насыщенном состоянии. И наконец, если заданная точка  $A_2$  лежит ниже кривой насыщения, то температура влажного воздуха ниже температуры насыщения и в воздухе находится влажный пар, т.е. смесь сухого насыщенного пара и капелек воды.

В проектной практике  $i$ - $d$ -диаграмму используют не только для определения параметров состояния воздуха, но и для построения изменения его состояния при нагревании, охлаждении, увлажнении, осушении, смешении, при произвольной последовательности и сочетании этих процессов. На  $i$ - $d$ -диаграмме могут быть построены еще два параметра, которые широко используются при расчетах вентиляции и кондиционирования воздуха, – температура точки росы  $t$  и температура мокрого термометра  $t_M$ .

Температурой точки росы воздуха  $t$  называется температура, до которой нужно охладить ненасыщенный воздух, чтобы он стал насыщенным при сохранении постоянного влагосодержания. Для определения температуры точки росы необходимо на поле  $i$ - $d$ -диаграммы из точки, характеризующей заданное состояние влажного воздуха, провести прямую, параллельную оси ординат, до пересечения с кривой  $\phi = 100\%$ . Изотерма (линия  $t = const$ ), пересекающая в этой точке кривую насыщения ( $\phi = 100\%$ ), будет характеризовать температуру точки росы  $t$ .

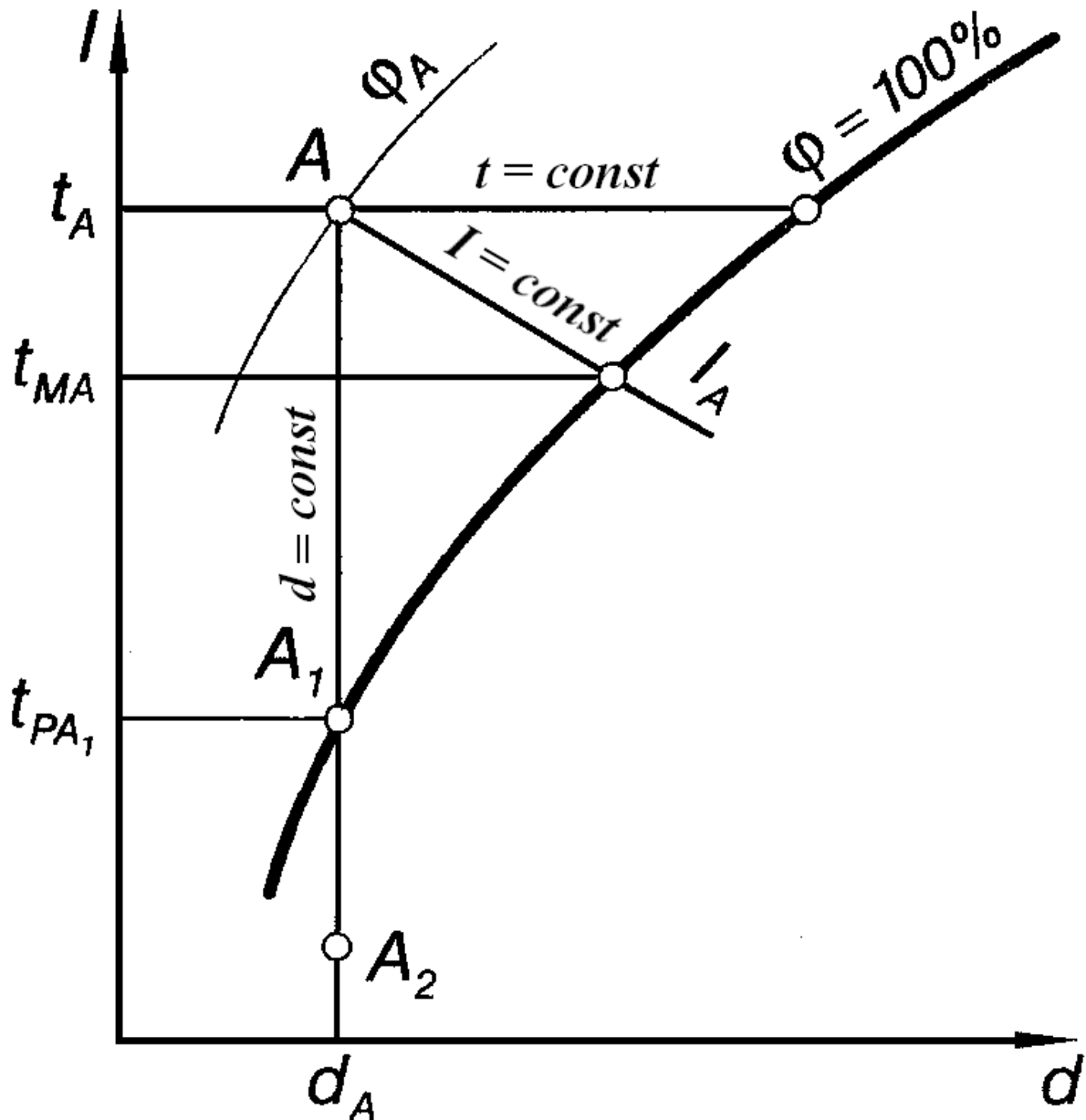


Рис. 4.1. Тепловлажностные характеристики состояния воздуха

Температурой мокрого термометра  $t_M$  является такая температура, которую принимает влажный воздух при достижении насыщенного состояния и сохранения постоянной энтальпии воздуха, равной начальной. Для определения температуры мокрого термометра необходимо на поле  $i$ - $d$ -диаграммы через точку, соответствующую состоянию влажного воздуха, провести линию  $i = const$  до пересечения с кривой  $\phi = 100\%$ . Изотерма, проходящая через точку пересечения, соответствует значению температуры воздуха по мокрому термометру.

Процессы изменения термовлажностного состояния воздуха происходят постоянно в помещениях, а также в системах вентиляции и кондиционирования. Воздух подвергается нагреванию, охлаждению, увлажнению, осушке, происходит смешивание воздуха с различными температурами и влагосодержаниями. Процессы, связанные с обработкой и перемешиванием воздуха в системах вентиляции и кондиционирования, а также процессы, происходящие в помещениях, обслуживаемых этими системами, могут быть изображены на  $i-d$ -диаграмме.

Процессы перехода воздуха из одного состояния в другое на поле  $i-d$ -диаграммы изображаются прямыми линиями (лучами), проходящими через точки, соответствующие начальному и конечному состоянию влажного воздуха.

Уравнение перехода представляет собой уравнение пучка прямых, положение которых на  $i-d$ -диаграмме определяется точкой начального состояния воздуха  $1 (i_1, d_1)$  и величиной термовлажностного коэффициента  $e$ , представляющего собой отношение изменения энтальпии воздуха к изменению его влагосодержания

$$e = \frac{i_2 - i_1}{d_2 - d_1} 1000, \quad (4.1)$$

где  $e$  термовлажностный (или угловой) коэффициент линии процесса (иначе называемой «лучом процесса»), характеризующий изменение состояния воздуха,  $кДж/кг$ . Конкретные значения  $e$  в диапазоне от 20000 до  $-10000$  приведены на поле  $i-d$ -диаграммы (рис. 4.2)

Характер изменения состояния воздуха определяется величиной (или направлением) термовлажностного коэффициента  $e$ .

Рассмотрим характерные случаи изменения состояния влажного воздуха и их схематичное изображение на  $i-d$ -диаграмме, представленной на рис. 4.3.

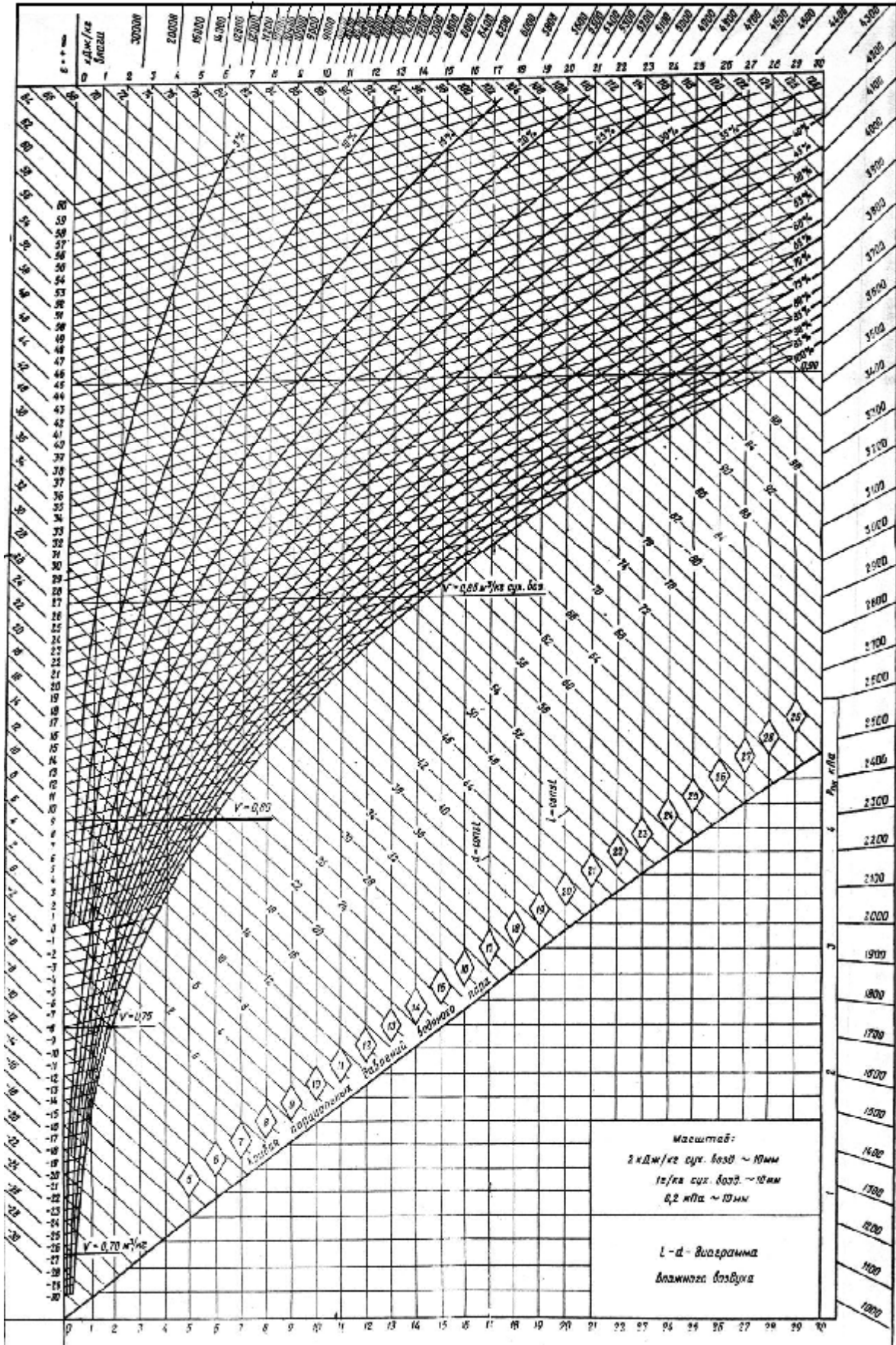


Рис. 4.2. i-d-диаграмма

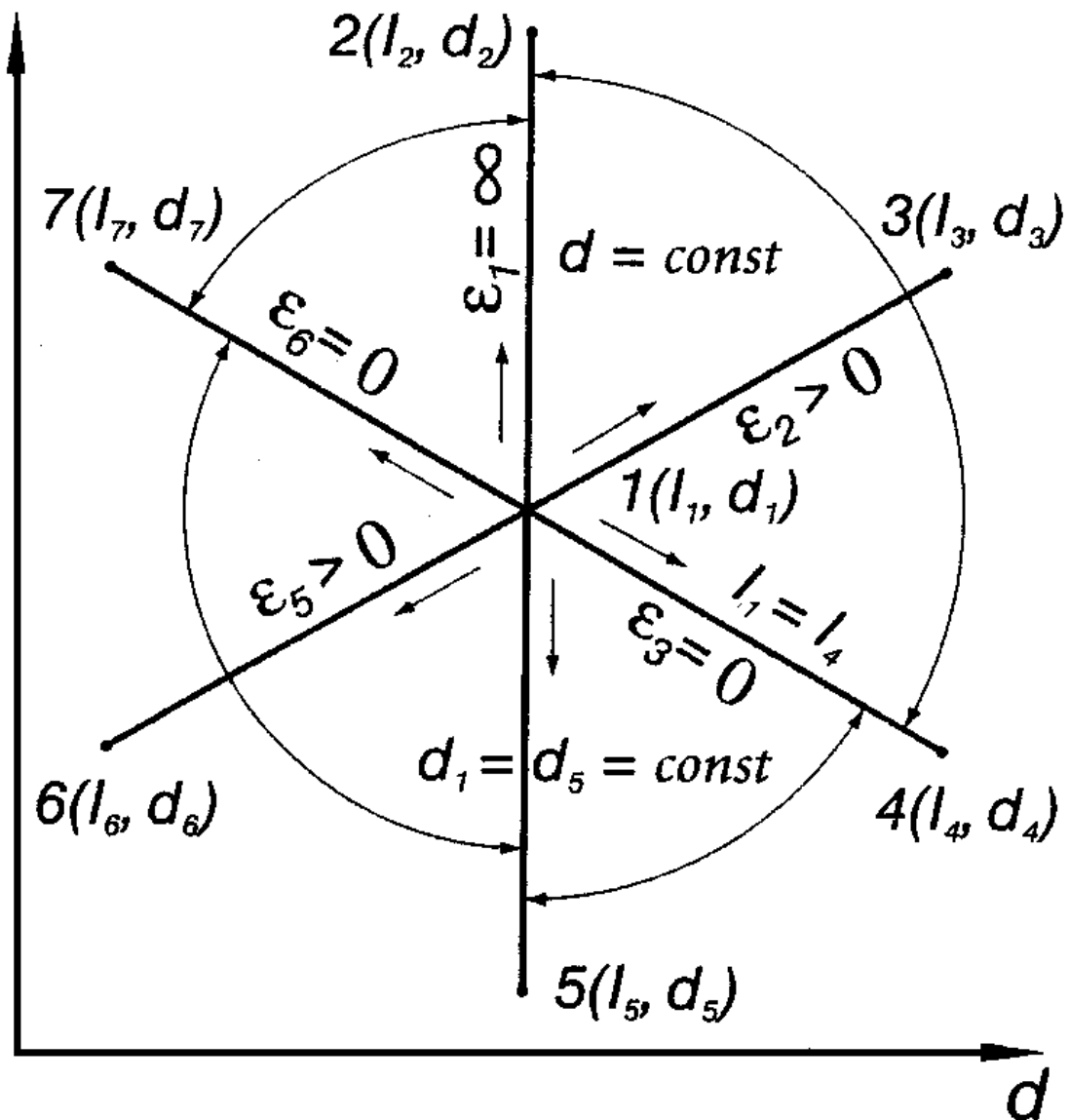


Рис. 4.3. Изображение на I-d-диаграмме процессов изменения состояния воздуха: при нагревании без подвода и отвода влаги (линия 1-2), нагревания с одновременным увлажнением (линия 1-3), увлажнением без подвода и отвода теплоты (линия 1-4), охлаждении без подвода и отвода влаги (линия 1-5), охлаждении с одновременным осушением (линия 1-6), осушения без подвода и отвода теплоты (линия 1-7)

1. Влажный воздух, имеющий начальные параметры  $i_1, d_1$ , подвергается нагреванию при неизменном влагосодержании, т.е.  $d_1 = d_2 = \text{const}$ .

Нагревание при постоянном влагосодержании осуществляется, например, в воздухоподогревателях. При нагревании воздуха повышается его температура, энтальпия, понижается относительная влажность. Луч процесса изображается вертикальной прямой, параллельной линии  $d = \text{const}$ , и направлен снизу вверх. Точка 1 соответствует начальному состоянию воздуха, точка 2 — конечному.

Величина тепловлажностного (углового) коэффициента  $e = \infty$  при условии  $i_2 > i_1$ .

2. Влажный воздух поглощает одновременно тепло и влагу (т.е. нагревается и увлажняется).

Если начальное состояние воздуха определяется теми же параметрами  $i_1$  и  $d_1$  (точка 1), а конечное состояние будет определяться параметрами  $i_3$  и  $d_3$ , то при  $i_3 > i_1$  и  $d_3 > d_1$  направление луча процесса будет соответствовать направлению луча процесса 1-3.

Такое изменение параметров влажного воздуха обычно происходит в обслуживаемых помещениях. В этом случае воздух, обработанный в кондиционере с параметрами  $i_1, d_1$ , поступает в помещение, где в результате ассимиляции теплоты и влаги приобретает параметры  $i_3, d_3$ .

3. Влажный воздух поглощает влагу ( $d_4 > d_1$ ) при неизменной энтальпии ( $i_4 = i_1$ ). Так, если процесс происходит при постоянной энтальпии, то луч, характеризующий это изменение состояния, должен быть параллелен линии  $i = const$ . Величина углового коэффициента искомого луча  $e = 0$ .

Данное выражение показывает, что процесс протекает по линии  $i_1 = i_4 = const$  (прямая 1-4). Такие процессы называют адиабатными, т.е. протекающими при постоянной энтальпии воздуха.

Адиабатное увлажнение, т.е. повышение влагосодержания воздуха при постоянной энтальпии, широко применяется в системах кондиционирования, в частности, в оросительной камере, где с помощью форсунок производится распыление воды.

Температура испаряемой воды постепенно устанавливается равной температуре воздуха по мокрому термометру. Воздух, находясь в контакте с водой, имеющей температуру мокрого термометра  $t_M$ , теряет явную теплоту, которая затрачивается на испарение воды. В то же время воздух получает такое же количество скрытой теплоты с водяными парами. Энтальпия воздуха остается постоянной, поскольку притока теплоты со стороны практически нет,  $i_1 - i_4 = const$ . Процесс изображен на  $i-d$ -диаграмме. Точка 1 показывает начальное состояние воздуха. Изменение состояния происходит по линии  $i = const$ . Практически в камерах орошения воздух удается увлажнить до значения  $\varphi = 90-95\%$ . Этому состоянию соответствует точка 4.

4. Влажный воздух отдает теплоту ( $i_5 < i_1$ ) при неизменном влагосодержании ( $d_5 = d_1 = const$ ), т.е. процесс, как и в первом случае, будет характеризоваться лучом, параллельным линии  $d = const$ , но

направление его будет от точки  $1$  не вверх, а вниз. Значение тепловлажностного коэффициента  $e = -\infty$ . Охлаждение воздуха при  $d = const$ , как и нагревание, может быть осуществлено в поверхностных теплообменниках. Луч процесса охлаждения направлен из точки  $1$  вертикально вниз к точке  $5$ . При охлаждении луч может быть вертикально продолжен до точки росы  $5$ , расположенной на линии  $\phi = 100\%$ . Дальнейшее охлаждение будет идти по линии насыщения и сопровождаться конденсацией водяных паров и осушкой воздуха. Охлаждение влажного воздуха при  $d = const$  может осуществляться лишь до точки росы.

5. Влажный воздух отдает теплоту ( $i_6 < i_1$ ) и влагу ( $d_6 < d_1$ ), т.е. происходит охлаждение и осушка воздуха.

Значение углового коэффициента в этом случае  $e > 0$ .

Приращение энтальпии ( $\Delta i$ ) и приращение влагосодержания ( $\Delta d$ ) имеют отрицательные знаки, поэтому направление процесса изменения состояния будет характеризоваться лучом  $1-6$ , имеющим направление от точки  $1$  к точке  $6$ . Такой процесс может происходить как в камере орошения кондиционера, так и в других установках для обработки воздуха. Для охлаждения и осушки воздуха в оросительной камере должна установиться температура ниже точки росы, что достигается подачей к распылительным форсункам охлажденной воды.

6. Влажный воздух, имеющий параметры  $i_1, d_1$ , отдает влагу ( $d_7 < d_1$ ) при постоянной энтальпии ( $i_7 = i_1 = const$ ), т.е. воздух осушается. При этом тепловлажностный коэффициент  $e = 0$ .

Приращение влагосодержания в этом случае будет отрицательным, но направление луча процесса будет от точки  $1$  к точке  $7$ .

Процесс осушки воздуха при  $i = const$  можно осуществить с помощью абсорбентов, например, концентрированных растворов солей хлористого кальция, хлористого лития и др., а также с помощью адсорбентов, например, силикагеля.



## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Нестеренко, А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха : учебное пособие / А. В. Нестеренко. – 3-е изд. – Москва : Высшая школа, 1971. – 460 с.
2. Расчет и выбор камер орошения ОКФ типовых центральных кондиционеров с использованием ЭВМ : метод. указ. к дипломному проектированию / ВТИЛП ; Сост. В. Я. Казарновский. – Витебск, 1984. – 27 с.
3. СанПиН 9–80 РБ 98. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – Взамен ГОСТ 12.1.005–88 ; введ. 1998–07–01. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 1998. – 10 с.
4. СНиП 2.04.05-91. Отопление, вентиляция и кондиционирование. с изм. № 1, № 2, № 3, № 4. – Взамен СНиП 2.04.05-86 ; введ. 1992 – 01 – 01. – Москва : АПП ЦИТП, 1992. – 64 с.
5. СНБ 2.04.02-2000. Строительная климатология. – Взамен СНиП 2.01.01-82 ; введ. впервые. 2001 – 01 – 01. – Минск : Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2001. – 35 с.
6. СНБ 4.02.01-2004. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Введ. впервые. 2004 – 06 – 01. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2004. – 32 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1

## Физические свойства влажного воздуха при давлении 760 мм рт. ст.

Температура, °С	1 м <sup>3</sup> сухого воздуха			Упругость насыщенных водяных паров, мм рт. ст.	Содержание водяного пара при полном насыщении		
	масса, кг	взятый при 0° даст при t° $1 + at$ , м <sup>3</sup>	взятый при 0° даст при t° $\frac{1}{1 + at}$ , м <sup>3</sup>		в 1 м <sup>3</sup> воздуха, г	в 1 кг влажного воздуха, г	на 1 кг сухого воздуха, г
1	2	3	4	5	6	7	8
-20	1,396	0,927	1,079	0,927	1,1	0,80	0,77
-19	1,390	0,930	1,075	1,015	1,2	0,85	0,86
-18	1,385	0,934	1,071	1,116	1,3	0,92	0,93
-17	1,379	0,938	1,066	1,207	1,4	1,03	1,04
-16	1,374	0,941	1,062	1,308	1,5	1,10	1,11
-15	1,368	0,945	1,058	1,400	1,6	1,19	1,20
-14	1,363	0,949	1,054	1,549	1,7	1,29	1,30
-13	1,358	0,952	1,050	1,680	1,9	1,39	1,40
-12	1,353	0,956	1,046	1,831	2,0	1,49	1,50
-11	1,348	0,959	1,042	1,985	2,2	1,64	1,65
-10	1,342	0,963	1,038	2,140	2,3	1,78	1,79
-9	1,337	0,967	1,034	2,267	2,5	1,91	1,93
-8	1,332	0,971	1,030	2,455	2,7	2,06	2,08
-7	1,327	0,974	1,026	2,658	2,9	2,23	2,25
-6	1,322	0,978	1,023	2,876	3,1	2,38	2,40
-5	1,317	0,982	1,019	3,160	3,4	2,58	2,60
-4	1,312	0,985	1,015	3,368	3,6	2,78	2,80

Продолжение табл.1

1	2	3	4	5	6	7	8
-3	1,308	0,989	1,011	3,644	3,9	3,09	3,10
-2	1,303	0,993	1,007	3,941	4,2	3,29	3,28
-1	1,298	0,996	1,004	4,263	4,5	3,57	3,58
0	1,293	1,000	1,000	4,580	4,9	3,78	3,80
1	1,288	1,004	0,996	4,940	5,2	4,07	4,15
2	1,284	1,007	0,993	5,302	5,6	4,40	4,48
3	1,279	1,011	0,989	5,687	6,0	4,71	4,77
4	1,275	1,015	0,986	6,097	6,4	5,05	5,10
5	1,270	1,018	0,982	6,534	6,8	5,35	5,40
6	1,265	1,022	0,979	6,998	7,3	5,70	5,78
7	1,261	1,026	0,975	7,492	7,7	6,10	6,21
8	1,256	1,029	0,972	8,017	8,3	6,60	6,65
9	1,252	1,033	0,968	8,574	8,8	7,00	7,13
10	1,248	1,037	0,965	9,210	9,4	7,50	7,63
11	1,243	1,040	0,961	9,840	9,9	8,00	8,35
12	1,239	1,044	0,958	10,520	Ю,6	8,60	8,75
13	1,235	1,048	0,955	11,222	П,2	9,20	9,35
14	1,230	1,051	0,951	11,988	12,0	9,80	9,97
15	1,226	1,055	0,948	12,79	12,8	10,5	10,6
16	1,222	1,059	0,945	13,63	13,6	11,2	11,4
17	1,217	1,062	0,941	14,53	14,4	П,9	12,1
18	1,213	1,066	0,938	15,48	15,3	12,7	12,9
19	1,209	1,070	0,935	16,48	16,2	13,5	13,8
20	1,205	1,073	0,932	17,53	17,2	14,4	14,7
21	1,201	1,077	0,929	18,65	18,2	15,3	15,6
22	1,197	1,081	0,925	19,83	19,3	16,3	16,8
23	1,193	1,084	0,922	21,07	20,4	17,3	17,7
24	1,189	1,088	0,919	22,38	21,6	18,4	18,8
25	1,185	1,092	0,916	23,76	22,9	19,5	20,0

*Окончание табл.1*

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
26	1,181	1,095	0,913	25,21	24,2	20,7	21,4
27	1,177	1,099	0,910	26,74	25,6	22,0	22,6
28	1,173	1,103	0,907	28,35	27,0	23,4	24,0
29	1,169	1,106	0,904	30,04	28,5	24,8	25,6
30	1,165	1,110	0,901	31,82	30,1	26,3	27,2