



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Практикум по дисциплине

«Основы обеспечения микроклимата зданий (включая теплофизику здания)»

Раздел 2. Основы обеспечения микроклимата
зданий
Часть 2

Авторы
Глазунова Е.К.,
Скорик Т.А.,
Галкина Н.И.

Ростов-на-Дону, 2017

Аннотация

Методические указания предназначены для бакалавров направления подготовки 08.03.01 «Строительство», профиль подготовки «Теплогасоснабжение и вентиляция», изучающих дисциплину «Основы обеспечения микроклимата зданий (включая теплофизику здания)».

В части 2 методических указаний представлены материалы по ряду тем изучаемой дисциплины, не охваченных в части 1. Приводится краткая теоретическая часть, дающая основные понятия и формулы, пояснение к ним, а также задачи с примерами решений.

Авторы

к.т.н., доцент кафедры «ТиВ» Глазунова Е.К.,
к.т.н., доцент кафедры «ТиВ» Скорик Т.А.,
к.т.н., доцент кафедры «ТиВ» Галкина Н.И.,





Оглавление

1 i – d – диаграмма влажного воздуха	4
2 Процессы изменения состояния влажного воздуха в i – d – диаграмме	17
3 Процессы тепло- и влагообмена между водой и воздухом	46
4 Аэродинамика вентилируемого помещения	59
Список использованных источников	73

1 I – D – ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

На основе уравнений:

$$d = 623 \frac{p_n}{B - p_n};$$

$$d = 623 \frac{\varphi \cdot p_n}{B - \varphi \cdot p_n};$$

$$i = 1,005t + \frac{(2,500 + 1,8t)d}{1000}$$

профессор Л.К. Рамзин в 1918 г. составил так называемую $i-d$ – диаграмму, широко используемую в расчетах вентиляции, кондиционирования воздуха, осушки и других процессах, связанных с изменением состояния влажного воздуха. В $i-d$ – диаграмме графически связаны все параметры, определяющие тепловлажностное состояние воздуха: i, d, t, φ, p_n для заданного барометрического давления. Постоянные значения (const) этих параметров представлены линиями.

В $i-d$ – диаграмме выбраны в качестве координат параметры i и d . Для обеспечения четкого графического изображения параметров влажного воздуха диаграмма построена в косоугольной системе координат, где ось ординат i , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, проведена на вертикально, а ось абсцисс $d, \text{г/кг}$, под углом 135° к оси i . Это позволяет расширить на $i-d$ – диаграмме область ненасыщенного воздуха (рисунок 1.1).

Для удобства ось d на диаграмме не вычерчивается, а вместо нее через начало координат проводится горизонтальная вспомогательная линия, на которой откладываются значения влагосодержаний. Через полученные точки проводятся вертикали, представляющие собой линии постоянного влагосодержания $d - \text{const}$.

На поле диаграммы нанесены также линии $i - \text{const}, t - \text{const}$. Изотермы не параллельны между собой и чем



выше температура влажного воздуха, тем больше отклоняются вверх его изотермы.

Кроме линий постоянных значений i, d, t на поле $i - d$ – диаграммы нанесены линии постоянных значений относительной влажности воздуха $\varphi - const$. Кривая, соответствующая $\varphi = 100\%$, является геометрическим местом точек, соответствующих состоянию полного насыщения воздуха водяными парами (кривую $\varphi = 100\%$ иногда называют пограничной кривой). Эта кривая построена по экспериментальным данным зависимости давления водяного пара в насыщенном состоянии от температуры (эти данные приводятся в специальных таблицах термодинамического состояния, влажного воздуха, составленных М. П. Вукаловичем).

Все поле $i - d$ – диаграммы разделено линией $\varphi = 100\%$ на две части. Выше этой линии расположена область **ненасыщенного** влажного воздуха. Линия $\varphi = 100\%$ соответствует состоянию воздуха, насыщенного водяными парами. Ниже этой линии – область **перенасыщенного** воздуха (воздуха в метастабильном состоянии, область тумана).

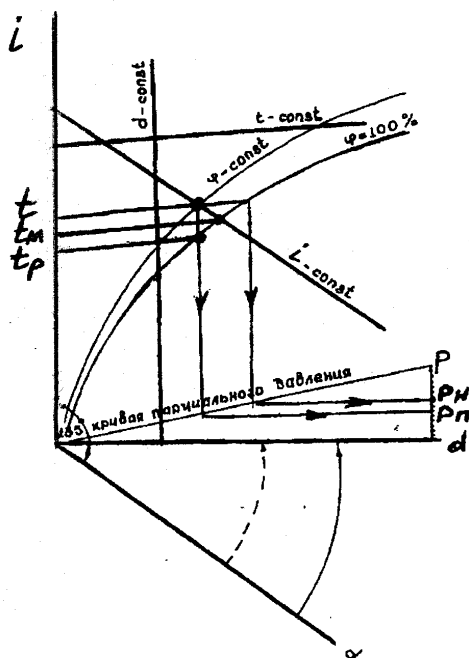


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема $i-d$ – диаграммы

Если положение изотерм $t-const$ и изоэнтальпий $i-const$ в $i-d$ – диаграмме практически не зависит от барометрического давления B , то положение кривых $\varphi-const$ меняется в зависимости от B . При повышении B линия насыщения на $i-d$ – диаграмме смещается вверх, а при понижении – вниз, но при изменениях B в пределах $\pm 10 \text{ мм. рт. ст.}$ эти изменения незначительны, и их можно не учитывать. Наиболее часто применяется на практике $i-d$ – диаграмма, составленная для $B=760$ мм. рт. ст. или для $B=745$ мм. рт. ст., характерном для центральных районов России, расположенных на высоте около 200 м над уровнем моря.

В нижней части $i-d$ – диаграммы расположена кривая, имеющая самостоятельную ось ординат. Эта кривая связывает влагосодержание d с парциальным давлением (упругостью) водя-

ных паров p_n . Для любой точки $i-d$ – диаграммы соответствующее P_n определится, если провести вниз линию по $d - const$ до пересечения с линией P_n , т. к. линии постоянного парциального давления совпадают с линиями $d - const$ (рисунок 1.1).

По контуру $i-d$ – диаграммы построена шкала угловых коэффициентов лучей процессов изменения состояния воздуха \mathcal{E} .

На $i-d$ – диаграмме каждая точка обозначает вполне определенное физическое состояние воздуха. Положение точки определяется любыми двумя из пяти (i, d, t, φ, p_n) параметров состояния. Остальные три могут быть определены по $i-d$ – диаграмме как производные.

Пользуясь $i-d$ – диаграммой, можно получить еще два очень важных параметра тепловлажностного состояния воздуха: температуру точки росы воздуха t_p и температуру мокрого термометра t_m .

Температурой точки росы называется та температура, до которой надо охладить ненасыщенный воздух, чтобы он стал насыщенным при сохранении постоянного влагосодержания.

Для получения этой температуры нужно на $i-d$ – диаграмме от точки, соответствующей данному состоянию воздуха, опустится по линии $d - const$ до пересечения с линией $\varphi = 100\%$. Проходящая через точку пересечения линия $t - const$ будет соответствовать значению t_p (рисунок 1.1)

Температура мокрого термометра – это такая температура, которую принимает влажный воздух при достижении насыщенного состояния и сохранении постоянной энтальпии воздуха, равной начальной, т. е. это предельная температура адиабатического охлаждения.

В $i-d$ – диаграмме температуре t_m соответствует линия $t - const$, проходящая через точку пересечения линии



i – const заданного состояния воздуха с линией $\varphi = 100\%$ (рисунок 1.1).

ПРИМЕРЫ:

ЗАДАЧА 1.1. Известна температура внутреннего воздуха в помещении t , °С, и относительная влажность φ % (таблица 1.1) С помощью i - d - диаграммы определить остальные параметры, характеризующие состояние воздуха в помещении.

Таблица 1.1– Исходные данные к задаче 1.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
t , °С	22	23	24	21	22	23	19	20	21	17	18	19	16	17
φ , %	60	45	40	60	50	40	60	55	40	55	50	40	60	55

Вариант	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
t , °С	18	23	24	25	22	23	24	20	21	22	19
φ , %	40	60	50	40	55	50	40	60	55	40	60

Пример: $t = 20$ °С, $\varphi = 40$ %.

Решение: По заданным значениям t и φ на $i = d$ диаграмме строим точку, соответствующую состоянию воздуха в помещении. По положению точки

находим остальные параметры: $d = 5,82$ / кг;

$i = 35$ кДж / кг; $t_p = 6$ °С ; $t_m = 12,5$ °С; $p_n = 0,9$ кПа

ЗАДАЧА 1.2. Состояние влажного воздуха характеризуется параметрами t и d (таблица 1.2). С помощью $i - d$ диаграммы определить φ , i , p_n , t_p и t_m .

Таблица 1.2 – Исходные данные к задаче 1.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
t , °С	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	20
d , г/кг	6	6,5	8	7	7	8	9	10	11	12	13	10	9	10

Вариант	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
t , °С	21	22	23	20	19	24	25	26	27	28	29
d , г/кг	11	12	9	5	9	10	13	12	6	7	8

Пример: $t = 22^{\circ}\text{C}; d = 7\text{г}/\text{кг}$.

Решение: По заданным значениям t и d на $i - d$ диаграмме строим точку, соответствующую данному состоянию воздуха. По положению точки определяем остальные параметры: $\varphi = 43\%$;

$i = 40\text{кДж}/\text{кг}; t_p = 8,9^{\circ}\text{C}; t_m = 12,5^{\circ}\text{C}; p_n = 1,15\text{кПа}$

ЗАДАЧА 1.3. Известна температура мокрого термометра t_m , $^{\circ}\text{C}$, температура сухого термометра t_c , $^{\circ}\text{C}$ (таблица 1.3). Барометрическое давление $B = 760$ мм рт. ст. Определить относительную влажность воздуха φ .

Таблица 1.3 – Исходные данные к задаче 1.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$t_m, ^{\circ}\text{C}$	10	11	12	13	14	15	16	17	10	11	12	13	14	15
$t_c, ^{\circ}\text{C}$	15	16	17	18	19	20	21	22	16	17	18	19	20	21

Вариант	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_m, ^{\circ}\text{C}$	16	17	18	19	20	21	22	10	11	12	13
$t_c, ^{\circ}\text{C}$	22	23	21	22	25	26	27	14	15	16	18

Пример: $t_m = 20^{\circ}\text{C}, t_c = 30^{\circ}\text{C}$.

Решение: По изотерме $t_m = 20^{\circ}$ движемся до пересечения с $\varphi = 100\%$ (рисунок 1.2).

Получаем точку А. От точки поднимаемся по $i - const$ до пересечения с изотермой $t_c = 30^{\circ}$, получаем точку Б. Относительная влажность в точке Б $\varphi = 40\%$.

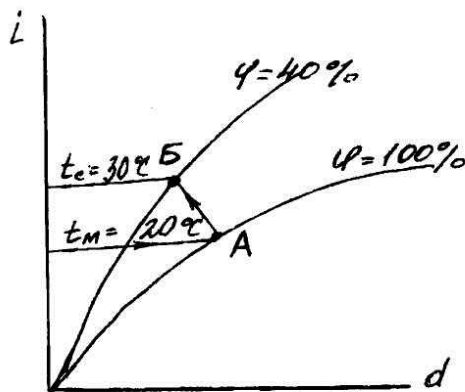


Рисунок 1.2 – К задаче 1.3

ЗАДАЧА 1.4. Пользуясь $i-d$ – диаграммой, найти парциальное давление водяных паров p_n в воздухе при относительной влажности $\varphi_1 = 100\%$ и φ_2 , если температура воздуха t (таблица 1.4) $B=760$ мм. рт. ст.

Таблица 1.4 – Исходные данные к задаче 1.4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\varphi_2, \%$	40	45	50	55	60	70	75	70	60	55	50	45
$t, ^\circ C$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26

Вариант	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$\varphi_2, \%$	40	45	50	55	60	70	60	55	50	45	40	50	60
$t, ^\circ C$	27	28	29	30	15	16	17	18	19	20	22	24	26

Пример. $\varphi_1 = 100\%, \varphi_2 = 60\%, t = 17^\circ C$.

Решение. По изотерме $t = 17^\circ C$ движемся до пересечения с $\varphi = 100\%$ (точка А) и с $\varphi = 60\%$ (точка Б) (рисунок 1.3). Из полученных точек по $d - const$ опускаемся до пересече-

ния с линией парциального давления водяного пара и определяем значения p_n .

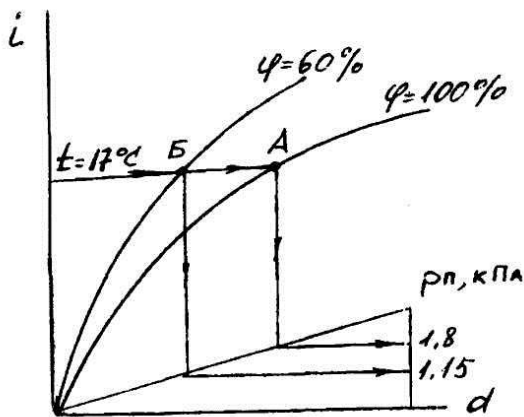


Рисунок 1.3 – К задаче 1.4

ЗАДАЧА 1.5. Если температура воздуха по сухому термометру $t_c, ^\circ C$, а температура точки росы $t_p, ^\circ C$ (таблица 1.5), то чему равна температура по мокрому термометру $t_m, ^\circ C$.

Таблица 1.5 – Исходные данные к задаче 1.5

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_c, ^\circ C$	15	16	17	18	19	20	21	22	24	25	26	27
$t_p, ^\circ C$	8	9	10	11	12	13	14	15	14	13	12	11

Вариант	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_c, ^\circ C$	28	29	30	31	32	33	34	35	30	31	32	22	20
$t_p, ^\circ C$	10	9	8	10	11	12	13	14	9	10	13	11	9

Пример. $t_c = 30^\circ C, t_p = 14^\circ C$.

Решение. По изотерме $t_p = 14^{\circ}C$ движемся до пересечения с $\varphi = 100\%$, получаем точку А (рисунок 1.4). Из точки А по $d - const$ поднимаемся вверх до пересечения с изотермой $t_c = 30^{\circ}C$, получаем точку Б. На пересечении с $i_B - const$ и $\varphi = 100\%$ получаем точку мокрого термометра (точка С).

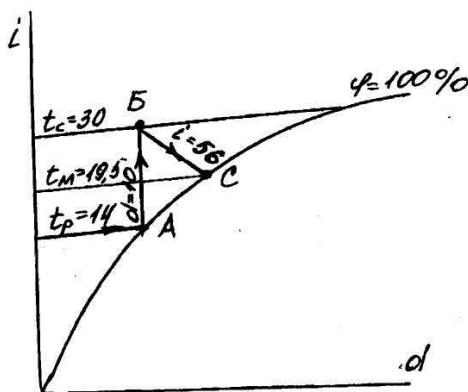


Рисунок 1.4 – К задаче 1.5

ЗАДАЧА 1.6 Если температура точки росы t_p , а температура сухого термометра t_c (таблица 1.6), то чему равна относительная влажность воздуха φ , и энтальпия i .

Таблица 1.6 – Исходные данные к задаче 1.6

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_p, ^{\circ}C$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	11
$t_c, ^{\circ}C$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26

Вариант	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_p, ^{\circ}C$	12	13	14	15	16	17	18	19	20	5	8	10	12
$t_c, ^{\circ}C$	27	28	29	30	31	32	33	34	35	17	20	22	24

Пример. $t_p = 11^{\circ}\text{C}$; $t_c = 25^{\circ}\text{C}$.

Решение. Точку росы получаем на пересечении $t_p = 11^{\circ}\text{C}$ и $\varphi = 100\%$. Из нее по $d = 8,1$ поднимаемся вверх до пересечения с изотермой $t_c = 25^{\circ}\text{C}$. Для полученной точки $\varphi = 48\%$, $i = 46 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ (рисунок 1.5).

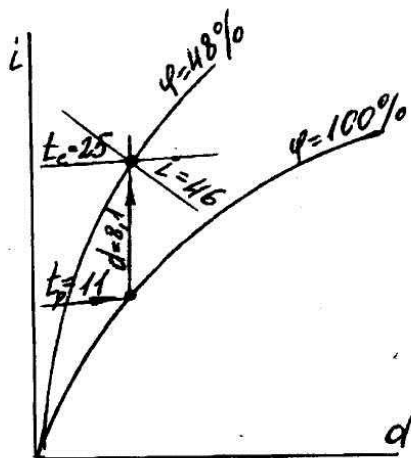


Рисунок 1.5 – К задаче 1.6

ЗАДАЧА 1.7 Во время отопительного сезона надо нагреть воздух от температуры сухого термометра t_1 и температуры мокрого термометра t_{m1} до температур соответственно t_2 и t_{m2} (таблица 1.7). Определить количество явной теплоты, которое необходимо подвести к 1кг сухого воздуха.



Таблица 1.7 – Исходные данные к задаче 1.7

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_1, ^\circ C$	19	21	19,5	24	22	22	26	20,2	26	25	20	21
$t_{.m1}, ^\circ C$	15	16	16	20	18,5	17	19	15,5	17,5	21	16,5	15
$t_2, ^\circ C$	23	26	25	25,8	26	25	28,8	23	29	27,5	23	24
$t_{.m2}, ^\circ C$	16,5	17,5	18	20,5	20,9	18	20	16,5	18,5	21,7	17,5	16,2

Вариант	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_1, ^\circ C$	25,5	23	21	19,3	20	19	21	14	12	22	21	20	23
$t_{.m1}, ^\circ C$	19,5	16	14	16,1	14,5	14	14	12,8	8	10	12	12,5	12,8
$t_2, ^\circ C$	27,5	29	29	30	28	25	27	20	18	30	28	26,5	29
$t_{.m2}, ^\circ C$	20	18	16,8	19,5	17,5	16	16	15,5	10,8	13,2	14,5	15	15

Пример. $t_1 = 18^\circ C; t_{.m1} = 10^\circ C; t_2 = 31^\circ C; t_{.m2} = 15^\circ C$.

Решение. На $i-d$ -диаграмме строим точку 1, соответствующую начальному состоянию воздуха ($t_1 = 18^\circ C, t_{.m1} = 10^\circ C$.) и точку 2, соответствующую состоянию воздуха после нагрева ($t_2 = 31^\circ C, t_{.m2} = 15^\circ C$) (рисунок 1.6).

Соответственно находим $i_1 = 29 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; i_2 = 42 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

$$\Delta i = i_2 - i_1; \Delta i = 42 - 29 = 13 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$\Delta i = 13 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ - это изменение теплоты, являющееся изме-

нением количества только **сухой** теплоты, т. к. нет изменения влагосодержания.

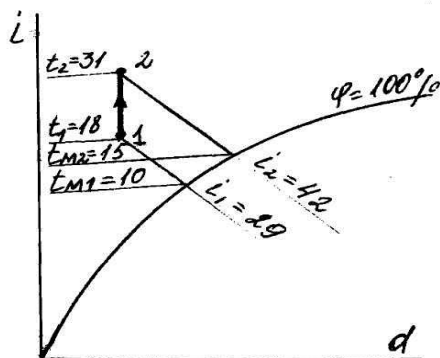


Рисунок 1.6 – К задаче 1.7

ЗАДАЧА 1.8 Воздух имеющий параметры t_1, t_{M1} , должен быть обработан так, чтобы его параметры стали t_2, t_{M2} . (таблица 1.8)

Определить необходимое количество добавляемой скрытой теплоты и количества добавляемой влаги.

Таблица 1.8 – Исходные данные к задаче 1.8

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_1, ^\circ C$	19	20	21	19,5	18	22	19	20,5	17	23	21,5	20
$t_{M1}, ^\circ C$	11,2	14,2	16,8	19	17,2	14,3	15	19,5	15	11,5	12	18
$t_{M2}, ^\circ C$	15	16,5	19,5	16,2	12,5	17,8	11,2	11,5	10,3	17,2	18,5	12,5

Вариант	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_1, ^\circ C$	16,5	23	24	18,5	16	19,5	14	23,5	15	21	17	22	18
$t_{M1}, ^\circ C$	9,5	20	11,5	10,8	15,5	12	5,5	10,8	5,8	18,5	6,8	19,5	8
$t_{M2}, ^\circ C$	14,5	12,8	19,5	15,8	8	14,5	12	18	12,5	14	15,5	12,5	15,8

Пример. $t_1 = 25^\circ C$; $t_{M1} = 14,5^\circ C$; $t_{M2} = 21^\circ C$.

Решение. На $i-d$ -диаграмме строим точку 1, соответствующую начальному состоянию воздуха (t_1, t_{m1}) и точку 2, соответствующую состоянию обработанного воздуха (t_2, t_{m2}) (рисунок 1.7).

Соответственно находим

$$i_1 = 40 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, i_2 = 61 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; d_1 = 5,9 \text{ г/кг}, d_2 = 14,1 \text{ г/кг}.$$

Количество влаги, которую следует добавить к обрабатываемому воздуху, составит $\Delta d = d_2 - d_1$; $\Delta d = 14,1 - 5,9 = 8,2$ г/кг. Количество теплоты, добавляемой к этому воздуху, составит

$$\Delta i = i_2 - i_1; \Delta i = 61 - 40 = 21 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Это изменение теплоты является изменением количества только **скрытой** теплоты, т. к. нет изменения температуры.

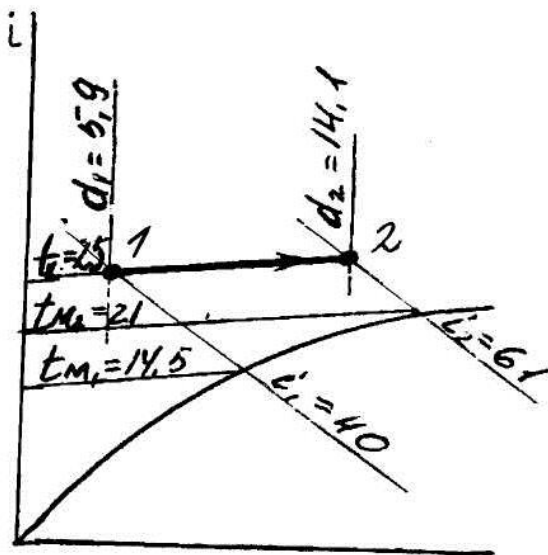


Рисунок 1.7 – К задаче 1.8

2 ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В $i - d$ – ДИАГРАММЕ

Процессы изменения состояния воздуха происходят постоянно в помещениях, а также в системах вентиляции и кондиционирования воздуха. Воздух подвергается нагреванию, охлаждению, увлажнению, осушке, а также применяется смешивание влажного воздуха с различными параметрами. Все эти процессы могут быть изображены и прослежены в $i - d$ – диаграмме.

В общем виде процесс перехода воздуха из одного состояния в другое на поле $i - d$ – диаграммы изображается прямыми линиями (лучами), проходящими через точки, соответствующие начальному и конечному состоянию влажного воздуха. Если воздух изменил свое состояние от начальных значений i_1, d_1 (точка 1) до конечных значений i_2, d_2 (точка 2), то линия, соединяющая эти точки, характеризует изменение тепловлажностного состояния воздуха и называется «**лучом процесса**» (рисунок 2.1). положение луча процесса в $i - d$ – диаграмме определяют **угловым коэффициентом** \mathcal{E} , который представляет собой отношение

$$\mathcal{E} = \frac{i_2 - i_1}{d_2 - d_1} \cdot 1000 \quad (2.1)$$

Коэффициент \mathcal{E} измеряется в кДж/кг_{влаги}, его называют также тепловлажностным коэффициентом, т.к. он показывает величину приращения, количества теплоты на 1 кг полученной (или отданной) воздухом влаги.

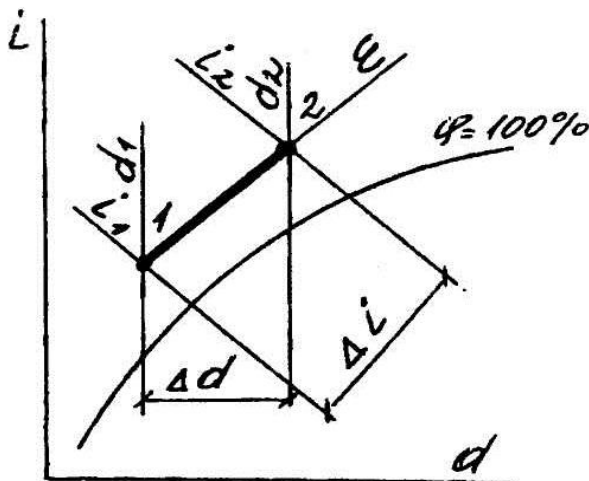


Рисунок 2.1 – Изображение луча процесса изменения состояния воздуха в i - d -диаграмме

Выражение (2.1) можно преобразовать, умножив числитель и знаменатель на расход воздуха G , кг/ч, участвующего в процессе

$$\varepsilon = \frac{(i_2 - i_1)G}{(d_2 - d_1)G} \cdot 1000 = \frac{Q_{\text{п}}}{W_{\text{изб}}}, \quad (2.2)$$

где $Q_{\text{п}}$ – поток полной теплоты, обмененной в процессе изменения состояния воздуха, кДж/ч;

$W_{\text{изб}}$ – расход влаги, обмененной в процессе изменения состояния воздуха, кг/ч.

Для того, чтобы построить на i – d – диаграмме луч процесса, можно использовать нанесенные на полях диаграммы деления (риски) угловых коэффициентов. Все они сходятся в начале координат – точке 0. Изменение состояния воздуха с одинаковыми тепловлажностными отношениями изображаются на i – d – диаграмме параллельными линиями.

Если известны тепловлажностный коэффициент ε и начальные параметры воздуха, то для построения луча процесса необходимо данное деление (риску) соединить с началом координат

нат и перенести линию углового коэффициента параллельно самой себе до встречи с точкой, которая характеризует начальные параметры воздуха.

Изображение на $i - d$ – диаграмме характерных случаев изменения тепловлажностного состояния воздуха представлено на рисунке 2.2.

1. Простейшим является **процесс нагрева** воздуха о результате контакта с сухой нагретой поверхностью, при котором он получает только явную конвективную теплоту. При этом влагосодержание воздуха остается постоянным, а луч процесса изображается прямой, параллельной линии $d = \text{const}$ направлен снизу вверх (линия 1 - 2), $\mathcal{E} = +\infty$. Нагревание при постоянном влагосодержании осуществляется, например, в поверхностных воздухонагревателях. Количество подводимой к 1 кг воздуха теплоты определяется приращением теплосодержания. Для G , кг/ч, воздуха, участвующего в процессе количество теплоты Q , кДж/ч, может быть определено по формуле

$$Q = G \cdot c(t_2 - t_1) = G(i_2 - i_1) \quad (2.3)$$

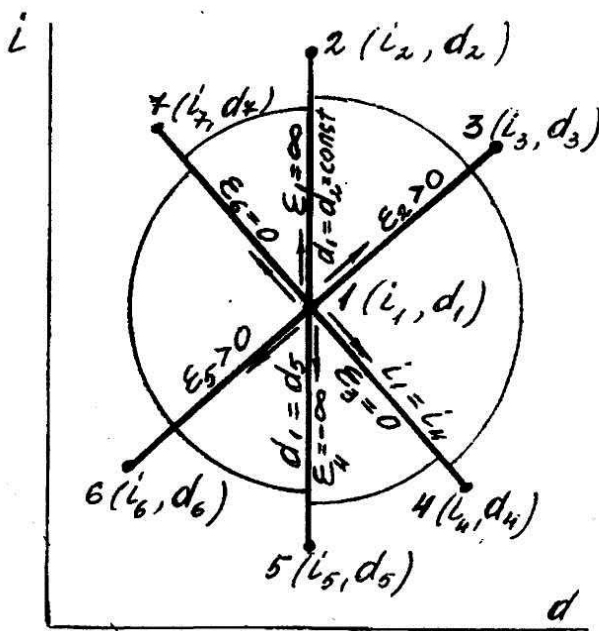


Рисунок 2.2 – Изображение на i - d -диаграмме процессов изменения состояния воздуха

2. Воздух поглощает одновременно теплоту и влагу, т.е. нагревается и увлажняется (линия 1 – 3), $E > 0$. Такой процесс возможен в помещении, где приточный воздух, поданный в помещение, ассимилирует теплоту и влагу.

Количество воздуха, необходимое для ассимиляции теплоизбытков G_Q , кг/ч, определяется по формуле

$$G_Q = \frac{3,6Q_{изб.}}{C(t_3 - t_1)} \text{ или } G_Q = \frac{3,6Q_{изб.}}{i_3 - i_1}, \quad (2.4)$$

где $Q_{изб.}$ – количество избыточной теплоты, Вт;
 C – удельная массовая теплоемкость воздуха, кДж/(кг °С);
 Количество воздуха, необходимое для ассимиляции влаги, поступающей в помещение, определяется по формуле

$$G_w = \frac{W \cdot 10^3}{d_3 - d_1}, \quad (2.5)$$

где W – количество поступающей в помещение влаги, кг/ч.

3. Воздух поглощает влагу при $i = \text{const}$. $\mathcal{E} = 0$ (линия 1-4). Такой процесс называется **адиабатным** (повышение влаго-содержания при постоянной энтальпии). Широко применяется в системах кондиционирования в оросительной камере, где через форсунки распыляется вода. Температура воды постепенно устанавливается равной температуре мокрого термометра t_m . Воздух, находясь в контакте с водой, имеющей температуру мокрого термометра, теряет явную теплоту, которая затрачивается на испарение воды. В то же время воздух получает такое же количество скрытой теплоты с водяными парами. Энтальпия остается постоянной т.к. притока теплоты практически нет.

Практически в камерах орошения воздух можно увлажнить до 90 – 95 %.

4. Воздух отдает теплоту при $d = \text{const}$ (линия 1-5). Уменьшается i . $\mathcal{E} = -\infty$.

Охлаждение воздуха по $d = \text{const}$ (как и нагревание) может быть осуществлено в поверхностных теплообменниках (воздухоохладителях). При охлаждении луч направлен вертикально вниз и может быть продолжен **только до точки росы**, расположенной на $\varphi = 100\%$. Дальнейшее охлаждение будет идти по линии насыщения и сопровождаться конденсацией паров и осушкой воздуха.

Расход холода Q_x , кДж/ч в воздухоохладителе для G , кг/ч, воздуха, участвующего в процессе, может быть определен по формуле

$$Q_x = G \cdot c(t_5 - t_1) = G(i_5 - i_1). \quad (2.6)$$

5. Воздух отдает теплоту и влагу, т.е. идет охлаждение и осушка (линия 1-6). $\mathcal{E} > 0$ (Δi и Δd имеют отрицательные знаки).

Этот процесс может быть в камере орошения и других установках. Для охлаждения и осушки в оросительной камере должна установиться температура ниже точки росы, что достигается подачей к форсункам охлажденной воды.

б. Воздух отдает влагу при постоянной энтальпии, т.е. уменьшается d при $i - \text{const}$. Воздух осушается, $\mathcal{E} = 0$ (линия 1-7).

Процесс осушки при $i - \text{const}$ можно осуществить с помощью **абсорбентов**, (например концентрированных растворов солей хлористого кальция, хлористого лития и др.) или **адсорбентов** (например, силикагеля).

Наружный воздух, подаваемый в помещение, в ряде случаев предварительно смешивают с внутренним воздухом (имеет место рециркуляция внутреннего воздуха). Возможны и другие случаи, связанные с перемешиванием масс воздуха разного состояния.

Процесс смешивания воздуха в $i - d$ – диаграмме изображается прямой, соединяющей точки, соответствующие состоянию смешиваемых масс воздуха. Точка смеси всегда располагается на этой прямой и делит ее на отрезки, длины которых обратно пропорциональны смешиваемым массам воздуха.

Если смешивается воздух состояния А массой G_A и воздух состояния Б массой G_B (рисунок 2.3), то точка смеси С будет лежать на линии АБ и разделит ее на отрезки отношение длин которых

$$\frac{AC}{BC} = \frac{G_B}{G_A}$$

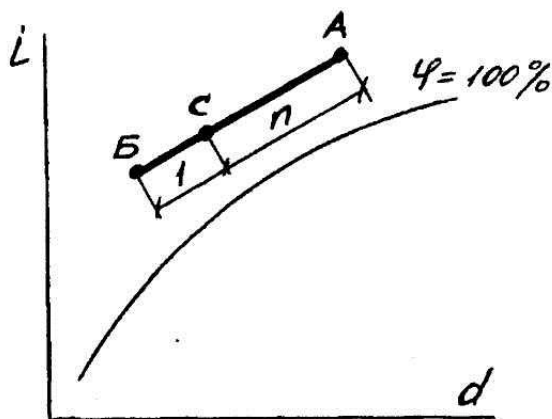


Рисунок 2.3 – Изображение на i - d -диаграмме процесса смешивания воздуха

Пропорцию можно составить и в другом виде

$$\frac{AB}{(G_A + G_B)} = \frac{AC}{G_B}. \quad (2.7)$$

Если обозначить пропорцию смеси $n = \frac{G_A}{G_B}$, то для нахождения положения точки смеси C , нужно прямую AB разделить на количество частей $n + 1$ и от точки B отложить отрезок, равный 1 части, оставив n частей до точки A .

Точку C на прямой AB можно определить по вычисленному значению энтальпии смеси i_c из уравнения теплового баланса (2.8) или влагосодержания смеси d_c из уравнения материального баланса по водяным парам (2.9).

$$G_A i_A + G_B i_B = (G_A + G_B) i_C; \quad (2.8)$$

$$G_A d_A + G_B d_B = (G_A + G_B) d_c. \quad (2.9)$$

Соответственно получим:

$$i_c = \frac{G_A i_A + G_B i_B}{G_A + G_B}; \quad (2.10)$$

$$d_c = \frac{G_A d_A + G_B d_B}{G_A + G_B}. \quad (2.11)$$

Возможен случай, когда точка смеси окажется в области ниже линии $\varphi = 100\%$ (рисунок 2.4), т. е. в области тумана.

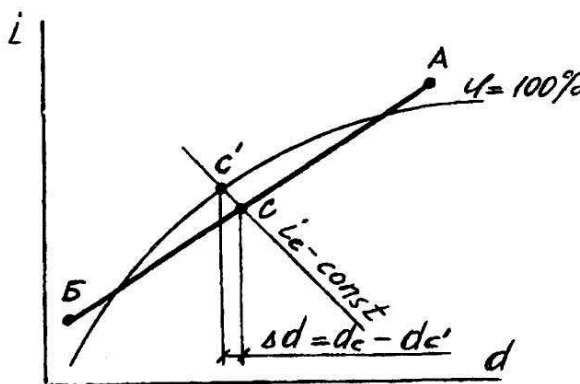


Рисунок 2.4 – Изображение на i - d -диаграмме процесса смешивания воздуха при расположении точки смеси ниже линии $\varphi = 100\%$

Это значит, что при смешивании происходит конденсация водяных паров и выпадение конденсата из воздуха. Если принять, что температура выпадающей влаги близка к температуре мокрого термометра, которой соответствует (i_c -const) точка смеси C , то действительные параметры точки смеси C' будут соответствовать



пересечению линий $i_c = \text{const}$ и $\varphi = 100\%$. Количество выпавшей из 1 кг воздуха влаги

$$\Delta d = d_c - d_{c'}. \quad (2.12)$$

ЗАДАЧА 2.1 Для изотермического процесса обработки воздуха с начальными параметрами t_1^I °С, d_1 , $\frac{\rho}{\text{кг}}$ и воздуха с начальными параметрами t_1^{II} , d_1 (таблица 2.1) найти значения лучей процессов \mathcal{E}^I и \mathcal{E}^{II} , если известно влагосодержание в конечной точке d_2 . Сравнить полученные \mathcal{E}^I и \mathcal{E}^{II}

Таблица 2.1 – Исходные данные к задаче 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t_1^I °С	16	18	20	21	22	15	16	17	19	20	22	21
d_1 , г/кг	6	7	5	6	7	3	4	5	8	7	9	4
t_1^{II} °С	26	29	30	31	32	25	26	28	30	31	32	31
d_2 , г/кг	9	10	9	11	12	8	9	9	12	13	14	10

Вариант	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
t_1^I °С	14	20	16	23	24	25	20	21	19	15	14	16	19
d_1 , г/кг	2	9	3	8	10	8	8	7	5	4	3	5	7
t_1^{II} °С	26	29	26	33	34	35	30	32	29	26	24	27	30
d_2 , г/кг	7	14	9	15	14	13	12	12	10	9	8	10	12

Пример: $t_1^I = 18$ °С; $d_1 = 8$ г/кг; $t_1^{II} = 28$ °С; $d_2 = 12$ г/кг.

Решение: Для первого случая обработки строим на i -диаграмме точку 1 ($t_1^I = 18$; $d_1 = 8$). Находим энтальпию $i_1^I = 38,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Получаем точку 2, двигаясь от точки 1 по $t_1^I = \text{const}$ до пересечения с $d_2 = 12 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$. Определяем $i_2 = 48,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. По формуле

(2.1) определяем угловой коэффициент \mathcal{E}

$$i = \frac{48,4 - 38,3}{12 - 8} \cdot 1000 = 2525.$$



Для изотермического процесса при $t_1^{\text{II}}=28\text{ }^{\circ}\text{C}$ на $i-d$ – диаграмме строим точку 1 ($t_1^{\text{II}}=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $d_1 = 8 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$). Находим энтальпию $i_1^{\text{II}}=48,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Получаем точку 2 для второго случая обработки двигаясь по $t_1^{\text{II}}=\text{const}$ до пересечения с $d_2 = 12 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$. Определяем $i_2=58,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. По формуле (2.1) определяем \mathcal{E}

$$I = \frac{58,8 - 48,6}{12 - 8} \cdot 1000 = 2550.$$

При сравнении \mathcal{E}^I и \mathcal{E}^{II} видно, что чем ниже температура изотермического процесса, тем меньше значение углового коэффициента.

ЗАДАЧА 2.2. Воздух имеет параметры $t_1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $d_1 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$. В процессе обработки воздуха с угловым коэффициентом \mathcal{E} приращение теплосодержания составило $\Delta i \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Определить параметры полученного воздуха (t_2 , i_2 , d_2 , φ_2), построить процесс обработки, проверить правильность решения, сравнить полученное направление процесса с заданным (таблица 2.2.).

Таблица 2.2 – Исходные данные к задаче 2.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_1, \text{ }^{\circ}\text{C}$	21	20	23	21	17	23	16	20	19	21	18	18
$d_1, \text{ г/кг}$	9	5	9	7	8	7	5	6	6	8	7	5
$\Delta i, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	8	10	12	14	16	18	20	19	17	16	15	13
$\mathcal{E}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	5400	6000	4500	4700	4900	5000	5400	5600	6000	6200	6600	6400

Вариант	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_1, ^\circ\text{C}$	16	20	21	22	18	22	19	17	22	18	19	17	19
$d_1, \text{г/кг}$	7	8	9	10	9	6	7	5	8	6	8	6	4
$\Delta i, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	11	9	8	10	12	18	22	24	21	10	11	8	10
$\varepsilon, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	7000	7500	8000	6400	4300	5200	5100	6800	6000	7000	6600	5600	7500

Пример $t_1=18^\circ\text{C}$; $d_1=8 \text{ г/кг}$; $\Delta i=10 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $\varepsilon=6000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

Решение На i - d -диаграмме строим точку 1 ($t_1=18^\circ\text{C}$, $d_1=8 \text{ г/кг}$) и определяем $i_1=38,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ (рисунок 2.5).

Находим $i_2=i_1+\Delta i$; $i_2=38,3+10=48,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Из уравнения (2.1) находим приращение влагосодержания в точке 2 $\Delta d = \frac{\Delta i}{\varepsilon} \cdot 1000 = \frac{10}{6000} \cdot 1000 = 1,7 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$.

Тогда влагосодержание второй точки $d_2=d_1+\Delta d=8+1,7=9,7\text{г/кг}$.

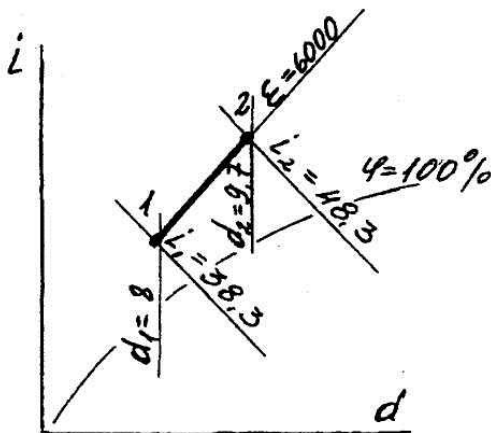


Рисунок 2.5. – К задаче 2.2



Строим точку 2 ($i_2=48,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $d_2=9,7\text{г/кг}$).

Наносим луч процесса, соединяя точку 1 и 2. Полученное направление луча совпало с нанесенным на i-d-диаграмме $\varepsilon=6000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, что подтверждает правильность расчетов.

ЗАДАЧА 2.3 Воздух имеет параметры t_1 °С, d_1 г/кг (точка 1). Задана величина углового коэффициента ε (таблица 2.3). Процесс обработки воздуха идет до влагосодержания d_2 , г/кг (точка 2). На луче процесса лежит точка 3, в которой $i_3=i_1+15$.
 Определить неизвестные параметры точек 1, 2, 3. Правильность их определения проверить, вычислив аналитически значение ε и сравнив полученное значение с заданным.

Таблица 2.3 – Исходные данные к задаче 2.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_1, \text{°C}$	16	19	18	17	18	19	21	20	19	18	21	22
$d_1, \text{г/кг}$	7	4	5	6	7	8	8	8	6	6	9	8
$d_2, \text{г/кг}$	11	9	10	10	11	13	12	14	10	11	13	12
$\varepsilon, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	9000	8500	8000	7500	7000	6800	6600	6400	6200	6000	5800	5600

Вариант	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_1, \text{°C}$	20	17	23	19	21	22	17	18	23	22	16	21	20
$d_1, \text{г/кг}$	5	5	9	7	7	6	8	9	7	10	5	10	6
$d_2, \text{г/кг}$	9	10	13	11	13	11	12	14	11	14	9	14	11
$\varepsilon, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	5400	5200	5100	5000	4900	4800	4700	4600	4500	5000	6000	6400	5400

Пример: $t_1=18 \text{°C}$; $d_1=8 \text{ г/кг}$; $d_2=12 \text{ г/кг}$; $\varepsilon=6000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Решение: Строим на i - d -диаграмме точку 1 ($t_1=18$ °С, $d_1=8$ г/кг) и определяем остальные её параметры: $i_1=38,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, $\varphi_1=62,5\%$ (рисунок 2.6). Определяем $i_3=38,3+15=53,3$.

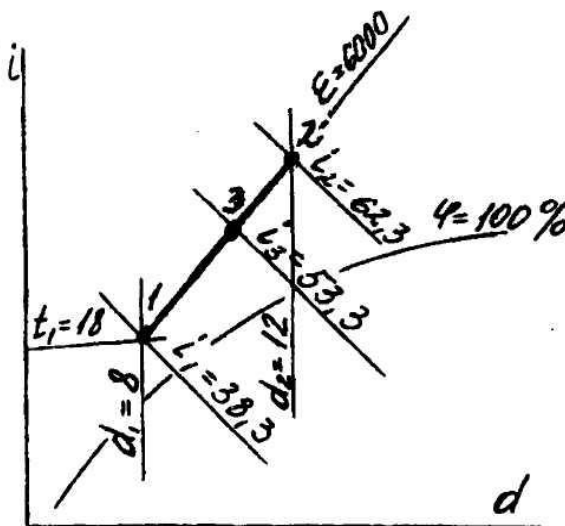


Рисунок 2.6. – К задаче 2.3

Через точку 1 проводим луч процесса $\epsilon=6000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ до пересечения с $d_2=12$ г/кг, получаем точку 2. Выписываем её параметры: $t_2=31,4$ °С, $i_2=62,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $\varphi_2=41,8\%$. Точку 3 получаем на пересечении луча процесса ϵ и $i_3=53,3$. Выписываем параметры точки 3: $t_3=26,3$ °С; $d_3=10,5$ г/кг, $\varphi_3=49,1\%$. Проверяем правильность найденных параметров точек аналитически, рассчитывая значение углового коэффициента ϵ как отношение приращения теплосодержания к приращению влагосодержания. В соответствии с формулой (2.1)

$$\mathcal{E}_{1-2} = \frac{i_2 - i_1}{d_2 - d_1} \cdot 1000 = \frac{62,3 - 38,3}{12 - 8} \cdot 1000 = 6000;$$

$$\mathcal{E}_{1-3} = \frac{i_3 - i_1}{d_3 - d_1} \cdot 1000 = \frac{53,3 - 38,3}{10,5 - 8} \cdot 1000 = 6000.$$

Т. к. полученные значения \mathcal{E}_{1-2} и \mathcal{E}_{1-3} совпали с исходным значением $\mathcal{E} = 6000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, значит, параметры точек были определены правильно.

ЗАДАЧА 2.4 В производственном помещении в процессе работы оборудования выделяется явная и скрытая теплота, избытки которой составляют $Q_{\text{изб}}$. Вт. Кроме того имеются влаговыведения в размере W кг/ч. (таблица 2.4).

Определить величину углового коэффициента процесса ассимиляции тепло- и влагоизбытков \mathcal{E} , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Таблица 2.4 – Исходные данные к задаче 2.4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q _{изб} , Вт	30000	32000	34000	38000	40000	45000	47000	50000	52000	54000	56000	58000
W, кг/ч	18	19	20	22	24	30	35	40	45	43	47	30

Вариант	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Q _{изб} , Вт	60000	65000	68000	55000	48000	44000	42000	37000	35000	30000	28000	26000
W, кг/ч	32	38	52	40	28	26	25	19	23	21	18	20

Пример: Q_{изб.} = 30000 Вт.; W = 20 кг/ч.

Решение: Значение \mathcal{E} определяем по формуле (2.2). Так как в данной формуле величина Q_{изб.} должна быть представлена в кДж/ч, вводим переводной коэффициент 3,6. Тогда $\mathcal{E} = \frac{3,6 \cdot 30000}{20} = 5400 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

ЗАДАЧА 2.5 Требуется найти параметры смеси, если смешивается воздух массой G₁, с температурой t₁ и влажностью d₁ и воздух массой G₂ с параметрами t₂ и d₂ (табл. 2.5)

Таблица 2.5 – Исходные данные к задаче 2.5

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
G ₁ , кг	150	130	110	100	90	70	170	160	155	170	120	140
t ₁ , °C	20	19	22	20	23	27	27	28	29	28	30	31
d ₁ , г/кг	10	9	11	10	11	13	10	14	15	11	15	14
G ₂ , кг	100	50	30	40	50	40	60	90	80	55	60	40
t ₂ , °C	11	14	18	17	21	23	25	25	25	19	27	25
d ₂ , г/кг	5	3	7	6	7	6	5	8	10	5	9	5



Вариант	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
G_1 , кг	120	80	200	250	240	200	180	170	140	130	100	120	140
t_1 , °C	31	22	23	30	31	29	26	25	32	24	21	30	31
d_1 , г/кг	10	12	13	10	12	11	13	15	10	11	10	13	12
G_2 , кг	50	60	150	130	80	90	80	90	60	80	30	40	90
t_2 , °C	24	15	19	25	25	24	19	20	22	20	15	17	20
d_2 , г/кг	4	7	4	5	4	7	7	6	5	4	5	5	7

Пример: $G_1=75$ кг; $t_1=25$ °C; $d_1=10$ г/кг

$G_2=25$ кг; $t_2=19$ °C; $d_2=5$ г/кг

Решение: На i - d -диаграмме строим точку 1 (t_1 , d_1) и точку 2 (t_2 , d_2) (рисунок 2.7).

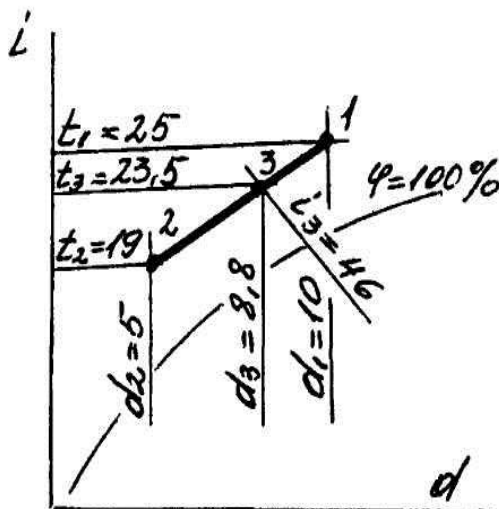


Рисунок 2.7. – К задаче 2.5

Наносим процесс смешивания, соединяя точки 1 и 2. Для получения на прямой положения точки смеси (точки 3), замерим линейкой длину отрезка 1-2 (она составила 50 мм) и составим пропорцию:

$\frac{G_{\text{смеси}}}{1-2} = \frac{G_2}{1-3}$. Из пропорции можно определить

длину отрезка 1-3: $1-3 = \frac{G_2(1-2)}{G_{\text{смеси}}}$; $1-3 = \frac{25 \cdot 50}{(25 + 75)}$; $1-3 = 12,5$

мм. Откладывая от точки 1 влево 12,5 мм, получим положение точки 3 (точки смеси). Её параметры: $t_3 = 23,5$ °С; $i_3 = 46 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $d_3 = 8,8$ г/кг.

ЗАДАЧА 2.6. Воздух с параметрами t_1 , i_1 , в количестве G_1 смешивается с воздухом в количестве G_2 , имеющим параметры t_2 , i_2 (табл. 2.6).

Определить параметры смеси.



Таблица 2.6 – Исходные данные к задаче 2.6

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$t_1, ^\circ\text{C}$	-15	-14	-11	-4	-11	-7	-17	-22	-21	-20	-19	-17	-16
$i_1, \text{кДж/ж}$	-14	-12	-10	-2	-9	-5	-16	-21	-20	-19	-18	-16	-15
$G_1, \text{кг}$	800	1000	1100	1700	1900	2200	2800	3500	4000	4500	4700	5200	5500
$t_2, ^\circ\text{C}$	20	25	22	20	14	24	19	20	19	20	15	14	20
$i_2, \text{кДж/ж}$	45	64	55	54	37	63	45	47	47	50	38	35	48
$G_2, \text{кг}$	730	910	1000	1500	1700	2000	2500	3000	3500	4000	4200	4600	5000

Вариант	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_1, ^\circ\text{C}$	-15	-13	-10	-9	-7	-8	-5	-15	-12	-10	-21	-6
$i_1, \text{кДж/ж}$	-14	-12	-8	-10	-5	-4	-1	-13	-11	-7	-20	-2
$G_1, \text{кг}$	6500	7000	7300	8000	9000	10000	12000	12500	12200	13800	13200	14300
$t_2, ^\circ\text{C}$	17	19	23	18	19	18	22	16	18	19	15	21
$i_2, \text{кДж/ж}$	45	50	56	48	52	46	60	41	46	52	38	50
$G_2, \text{кг}$	5500	6000	6700	7000	8000	9000	10000	10500	11000	11500	12000	13000

Пример: $t_1 = -13 ^\circ\text{C}$; $i_1 = -11 \text{ кДж/кг}$; $G_1 = 1600 \text{ кг}$;

$t_2 = 20 ^\circ\text{C}$; $i_2 = 53 \text{ кДж/кг}$; $G_2 = 1200 \text{ кг}$.

Решение. На $i - d$ диаграмме (рисунок 2.8) строим точку 1 ($t_1 = -13 ^\circ\text{C}$;

$i_1 = -11 \text{ кДж/кг}$) и точку 2 ($t_2 = 20 ^\circ\text{C}$; $i_2 = 53 \text{ кДж/кг}$).

Наносим луч процесса, соединяя точки 1 и 2. Для получения положения точки смеси (точка 3) замеряем линейкой длину отрезка 1 – 2 (она составила 177 мм) и составляем пропорцию

$$\frac{G_{\text{смеси}}}{1-2} = \frac{G_2}{1-3'}$$

Длина отрезка 1 – 3: $1-3 = \frac{(1-2)G_2}{G_{\text{смеси}}}$

$$1-3 = \frac{177 \cdot 1200}{(1600 + 1200)}; 1-3 = 75,9 \text{ мм.}$$

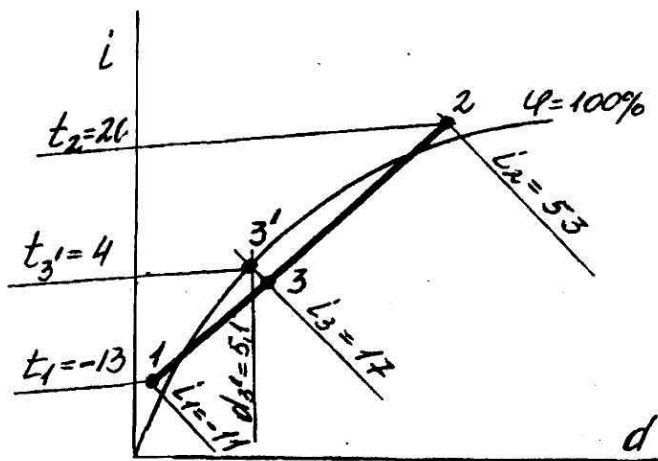


Рисунок 2.8 – К задаче 2.6

Как видно из рисунка, точка смеси находится ниже кривой $\varphi = 100\%$, т.е. в зоне тумана. Это значит, что влажный воздух с параметрами точки 3 существовать не может, при смешивании будет происходить конденсация водяных паров и выполнение конденсата из воздуха. Действительное состояние смеси (точку 3') получим, проведя $i_3\text{-const}$ до пересечения с $\varphi = 100\%$. Параметры полученной смеси (точка 3'): $t = 4^\circ\text{C}$; $i = 17 \text{ кДж/кг}$; $d = 5,1 \text{ г/кг}$; $\varphi = 100\%$.

ЗАДАЧА 2.7. В заданном районе строительства в холодный период года в поверхностном воздухонагревателе приточной системы вентиляции наружный воздух в количестве G кг/ч, должен быть нагрет до температуры притока $t_{пр}$ °С, (таблица 2.7). Определить остальные параметры приточного воздуха и расход теплоты на его нагрев.

Пример. Район строительства г. Ростов н/Д. $G = 10000$ кг/ч, $t_{пр} = 11$ °С.

Решение. Для г. Ростова – на – Дону выбираем расчетные параметры наружного воздуха. Для проектирования вентиляции в холодный период расчетными являются параметры Б. В соответствии со СП 131.13330. 2012 параметры Б: $t_{ext} = -19$ °С; $i_{ext} = -17,9$ кДж/кг; на $i - d$ – диаграмму наносим точку Н, соответствующую этим параметрам и проводим вертикальную прямую $d - const$ до пересечения с изотермой $t_{пр} = 11$ °С. определяем параметры приточного воздуха $d_{пр} = 0,6$ г/кг, $i_{пр} = 12$ кДж/кг; $\phi = 7\%$.

По формуле (2.3) определяем количество теплоты, необходимой на нагрев воздуха $Q = 10000(12 + 17,9) = 299000$ кДж/ч.

Таблица 2.7 – Исходные данные к задаче 2.7

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Район строительства	Астрахань	Брянск	г.Владимир	Воронеж	Волгоград	г.Грозный	Ейск	Калининград	Калуга	Краснодар	Курск	Махачкала	Москва
G, кг/ч	10000	12000	15000	17000	19000	20000	22000	24000	25000	27000	30000	32000	34000
t_{np}	11	12	13	14	15	16	17	18	11	12	13	14	15

Вариант	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Район строительства	Новгород	Новороссийск	г. Орел	Псков	Пятигорск	Рязань	Санкт-Петербург	Саратов	Смоленск	Тамбов	Тверь	Тула
G, кг/ч	35000	31000	26000	23000	21000	33000	35000	40000	42000	44000	50000	60000
t_{np}	16	17	17	11	12	13	14	15	16	17	18	12

ЗАДАЧА 2.8. Воздух в количестве G кг/ч, с параметрами $t_{\text{нач}}, ^\circ\text{C}$, $i_{\text{нач}}$ кДж/кг (таблица 2.8) охлаждается в поверхностном воздухоохладителе до $\varphi = 95\%$. Определить параметры охлажденного воздуха и расход холода в воздухоохладителе Q_x .

Таблица 2.8 – Исходные данные к задаче 2.8

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$t_{\text{нач}}, ^\circ\text{C}$	33	30	28	31	28	33	28	33	36	30	29	27	31
$i_{\text{нач}},$ кДж/кг	52	60	65	69	54	57	52	65	58	70	64	57	65
G , кг/ч	10000	17400	25000	12000	17500	25600	44000	19000	18000	54000	40000	20500	33000

Вариант	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_{\text{нач}}, ^\circ\text{C}$	33	27	29	33	35	36	38	31	29	30	35	31
$i_{\text{нач}},$ кДж/кг	58	55	55	53	67	62	61	57	51	58	63	61
G , кг/ч	21000	19500	42500	31500	19700	12600	13500	41200	27300	16000	15800	22300

Пример. $t_{\text{нач}} = 32 ^\circ\text{C}$, $i_{\text{нач}} = 64$ кДж/кг; $G = 17500$ кг/ч.

Решение. На $i - d$ – диаграмму наносим точку, соответствующую начальному состоянию воздуха ($t_{\text{нач}} = 32^\circ\text{C}$, $i_{\text{нач}} = 64$ кДж/кг). Из полученной точки проводим вертикально вниз по $d = \text{const}$ прямую до пересечения с кривой $\varphi = 95\%$, получаем точку, соответствующую состоянию охлажденного воздуха; его параметры: $t_{\text{охл.}} = 18,2 ^\circ\text{C}$, $i_{\text{охл.}} = 50$ кДж/кг. Расход холода, определенный по формуле (5.6), $Q_x = 17500(64 - 50) = 245000$ кДж/ч (68,1 кВт).

ЗАДАЧА 2.9. Воздух в количестве G кг/ч, с начальными параметрами $t_1 ^\circ\text{C}$, φ (таблица 2.9) необходимо охладить в поверхностном воздухоохладителе до температуры $t_2 ^\circ\text{C}$. Определить параметры охлажденного воздуха и расход холода в воздухоохладителе.

Таблица 2.9 – Исходные данные к задаче 2.9

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$t_1, ^\circ\text{C}$	30	31	30	26	28	25	26	30	24	23	27	35	32
$\varphi, \%$	45	40	55	60	65	45	55	60	50	45	55	35	45
$t_2, ^\circ\text{C}$	10	13	15	10	14	7	7	16	5	7	12	12	8
$G, \text{кг/ч}$	20000	15000	8000	21000	10000	17500	11000	16800	13000	24200	15000	21500	18000

Вариант	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_1, ^\circ\text{C}$	24	25	28	23	32	34	27	23	29	25	27	31
$\varphi, \%$	55	60	45	65	50	40	50	40	60	50	60	55
$t_2, ^\circ\text{C}$	9	6	7	5	9	14	8	5	15	8	12	10
$G, \text{кг/ч}$	31000	25200	19000	16500	24800	16100	25400	10500	17400	21700	26400	15700

Пример. $t_1 = 26 ^\circ\text{C}$, $\varphi = 50 \%$, $G = 24200 \text{ кг/ч}$, $t_2 = 6 ^\circ\text{C}$.

Решение. Наносим на $i - d$ диаграмму точку 1 ($t_1 = 26 ^\circ\text{C}$, $\varphi = 52 \%$) и проводим вертикальную прямую вниз ($d = \text{const}$) до пересечения с изотермой $t_2 = 6 ^\circ\text{C}$ (рисунок 2.9). Полученная точка 2' лежит ниже кривой $\varphi = 100 \%$. Это говорит о том, что воздух с $t_2 = 6 ^\circ\text{C}$ и $d_1 = 10,5 \text{ г/кг}$ существовать не может. Процесс охлаждения будет проходить до точки 2'' на кривой $\varphi = 100 \%$ и далее по этой кривой до точки 2, параметры которой: $d_2 = 5,8 \text{ г/кг}$; $i_2 = 20,5 \text{ кДж/кг}$. Расход холода, определенный по формуле (2.3), $Q_x = 24200(53 - 20,5) = 786500 \text{ кДж/ч}$ (218,5 кВт).

Количество конденсата, выпавшего из воздуха при охлаждении с осушкой $W \text{ кг/ч}$,

$$W = G(d_1 - d_2) \cdot 10^{-3};$$

$$W = 24200(10,5 - 5,8) \cdot 10^{-3} = 113,7 \text{ кг/ч}.$$

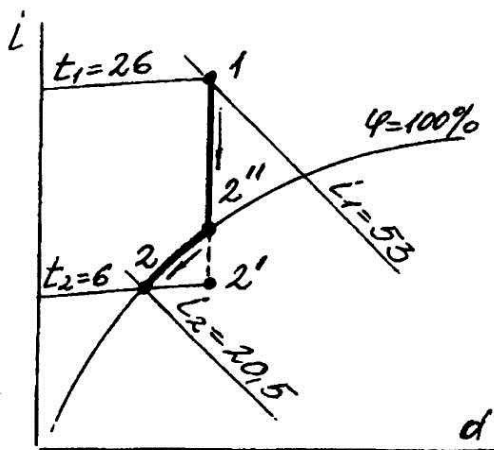


Рисунок 2.9. – К задаче 2.9

ЗАДАЧА 2.10. В заданном районе строительства в теплый период года система общеобменной вентиляции ассимилирует теплоизбытки $Q_{изб}$, Вт, и влаговыделения W , кг/ч (таблица 2.10). Температура внутреннего воздуха принимается $t_в = t_н + 3$ °С. Определить количество подаваемого наружного воздуха и остальные параметры внутреннего воздуха.

Таблица 2.10 – Исходные данные к задаче 2.10

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Район строительства	Братск	Брест	Брянск	Вильнюс	Владивосток	г. Владимир	Вологда	Воронеж	Дербент	Ейск	Екатеринбург	Иваново	Иркутск
$Q_{изб}$, Вт	25000	32200	41600	54400	52500	41300	32000	36000	46600	37500	50500	54400	57600
W , кг/ч	15	20	25	30	35	33	24	26	28	30	35	40	37

Вариант	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Район строительства	Казань	Калуга	Караганда	Киев	Кострома	Москва	Курск	Махачкала	Новгород	Новороссийск	Омск	г.Орел
$Q_{изб}$, Вт	31300	26100	36700	38600	37500	38900	43300	44000	35000	45000	36700	33800
W , кг/ч	25	20	22	24	30	28	26	31	28	27	24	21

Пример. Район строительства г. Ростов н/Д. $Q = 40000$ Вт, $W = 25$ кг/ч.

Решение. Для г. Ростова-на-Дону выбираем расчетные параметры наружного воздуха. При проектировании общественной вентиляции в теплый период года расчетными являются параметры А. В соответствии со СП 131.13330. 2012 параметры А: $t_{\text{ext}} = 27,0$ °С, $i_{\text{ext}} = 57,0$ кДж/кг. Наносим на $i - d$ диаграмму точку Н, соответствуют этим параметрам (рисунок 2.10). Определяем луч процесса в помещении по формуле (2.2).

$$\mathcal{E} = \frac{3,6 \cdot 40000}{25} = 5760 \text{ кДж/кг.}$$

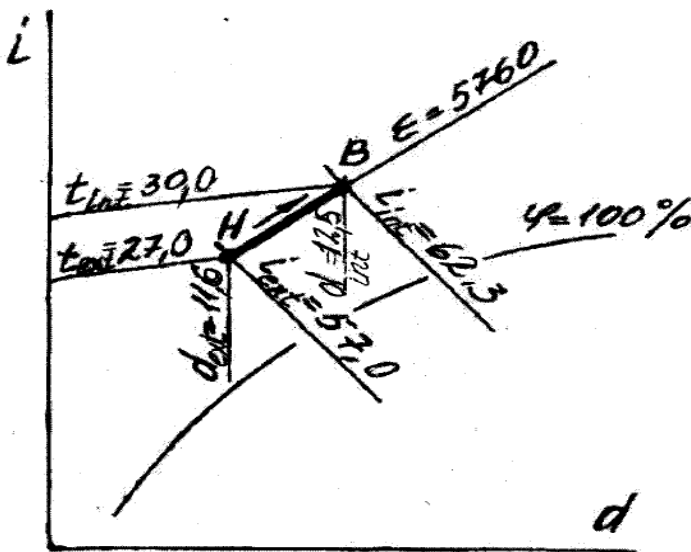


Рисунок 2.10. – К задаче 2.10

Через точку Н проводим луч процесса \mathcal{E} до пересечения с изотермой

$t_{\text{int}} = 27 + 3 = 30$. Получаем точку В, соответствующую состоянию внутреннего воздуха, которое он приобретает в результате ассимиляции тепло- и влагоизбытков в помещении. Ее параметры: $t_{\text{int}} = 30$ °С, $i_{\text{int}} = 62,3$ кДж/кг, $d_{\text{int}} = 12,5$ г/кг. По формулам

(2.4) и (2.5) определяем количество воздуха, необходимое для ассимиляции соответственно тепло- и влагоизбытков:

$$G_Q = \frac{3,6 \cdot 40000}{62,3 - 57} = 27690 \text{ кг/ч};$$

$$G_W = \frac{25 \cdot 10^3}{12,5 - 11,6} = 27780 \text{ кг/ч}.$$

ЗАДАЧА 2.11. В производственном помещении с заданной категорией работ, в холодный период имеют место теплоизбытки $Q_{\text{изб}}$, Вт, Влаговыделения W кг/ч (таблица 2.11). определить количество воздуха, которое необходимо подать приточной системой вентиляции для ассимиляции тепло- и влагоизбытков, температуру притока и количество теплоты, необходимой для его нагрева, если параметры наружного воздуха $t_{\text{ext}} = -22$ °С, $i_{\text{ext}} = -20,9$ кДж/кг.

Таблица 2.11 – Исходные данные к задаче 2.11

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$Q_{изб}$, Вт	65000	51000	38100	46500	36200	32100	41200	52000	54100	41500	32000	25000	57500
W , кг/ч	40	35	30	28	26	24	33	34	30	25	20	16	35
Категория работ	Ia	I6	IIa	II6	III	IIa	II6	I6	Ia	IIa	Ia	I6	IIa

Вариант	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$Q_{изб}$, Вт	31200	26000	36600	38400	37600	38700	43100	35500	44800	36500	33800	42000
W , кг/ч	25	19	21	23	31	27	25	29	26	23	20	34
Категория работ	II6	III	Ia	I6	IIa	II6	Ia	III	I6	IIa	II6	III

Пример. Категория работ, выполняемых в помещении IIб.
 $Q_{\text{изб.}} = 50000 \text{ Вт}$,
 $W = 35 \text{ кг/ч}$.

Решение. В соответствии с СанПиН 2.2.4.548 – 96 для производственных помещений с категорией работ IIб допустимые параметры внутреннего воздуха:

$t_{\text{int}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $\phi = 15 \text{ \%}$. Строим на $i - d$ – диаграмме точку Н ($t_{\text{ext}} = -22 \text{ }^\circ\text{C}$, $i_{\text{ext}} = -20,9 \text{ кДж/кг}$), соответствующую параметрам наружного воздуха, и точку В ($t_{\text{int}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $\phi_{\text{в}} = 15 \text{ \%}$), соответствуют параметрам внутреннего воздуха (рисунок 2.11).

Определяем луч процесса в помещении по формуле (2.2)

$$\varepsilon = \frac{3,6 \cdot 50000}{35} = 5143 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Через точку В проводим луч процесса до пересечения с линией процесса нагрева наружного воздуха в воздухонагревателе, проведенной из точки Н вертикально вверх по $d_{\text{ext}} - \text{const}$. Получаем точку П, соответствующую состоянию приточного воздуха, подаваемого в помещение. Ее параметры $t_{\text{п}} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$, $i_{\text{п}} = 13 \text{ кДж/кг}$. По формулам (2.4) и (2.5) определяем количество воздуха, необходимое для ассимиляции тепло- и влагоизбытков:

$$G_Q = \frac{3,6 \cdot 50000}{(19,1 - 12,9)} = 29030 \text{ кг/ч};$$

$$G_W = \frac{3,5 \cdot 10^3}{1,6 - 0,4} = 29170 \text{ кг/ч}.$$

Количество теплоты, необходимой для нагревания воздуха по формуле (2.3)

$$Q = 50000(12,9 + 20,9) = 1690000 \text{ кДж/ч (469,4 кВт)}.$$

3 ПРОЦЕССЫ ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕНА МЕЖДУ ВОДОЙ И ВОЗДУХОМ

Процесс увлажнения или осушки, а также охлаждения или нагревания воздуха можно осуществить, вводя его в контакт с водой. Для этого воздух пропускают через камеры орошения, в которых разбрызгивается вода, или продувают через пористые слои либо оребренные поверхности, орошаемые водой.

Если температура воды в период соприкосновения остается ниже температуры росы входящего в камеру воздуха, то происходит его осушка; если температура воды выше точки росы, то происходит увлажнение.

Процессы осушки воздуха водой сопровождаются его охлаждением, процессы же увлажнения могут сопровождаться охлаждением или нагреванием воздуха в зависимости от температуры воды.

Граничный (переходный) тонкий слой между водой и воздухом состоит из молекул воды и воздуха. В результате их перемешивания в этом тонком слое образуется насыщенный парами воды воздух, а его температура равна температуре воды. Состояние воздуха в этом слое можно определить по температуре воды, считая его относительную влажность ϕ равной 100 %. Поэтому процесс тепло- и влагообмена воздухом и водой можно рассматривать в *i-d*-диаграмме как процесс смешения воздуха данного состояния с насыщенным воздухом при температуре воды.

Если точка А- начальное состояние воздуха, а t_w - температура воды, то состояние насыщенного воздуха, (граничного слоя) находят в *i-d*-диаграмме на пересечении изотермы t_w -const с кривой $\phi=100\%$, т.е. в точке Б (рисунок 3.1), и процесс смешивания изобразится прямой А-Б.

Если вода будет циркулировать по замкнутому циклу, т.е. ей не сообщается и не отводится теплота, то температура воды будет стремиться к некоторой постоянной величине, называемой пределом охлаждения, после него температура воды остается неизменной.

Эта температура может быть найдена на *i-d* диаграмме, если из точки А, выражающей первоначальное состояние воздуха (рисунок 3.1) провести линию *I*-const до пересечения с $\phi=100\%$ в точке С. Тогда изотерма, проведенная из этой точки, покажет искомую установившуюся температуру воды $t_{w,уст}$. Эту температуру еще называют равновесной, т.е. одинаковой с температурой воздуха.

Наиболее характерные случаи изменения состояния воздуха при контакте с водой представлены на рисунке 3.2

Начальное состояние воздуха на *i-d* диаграмме обозначено точкой А

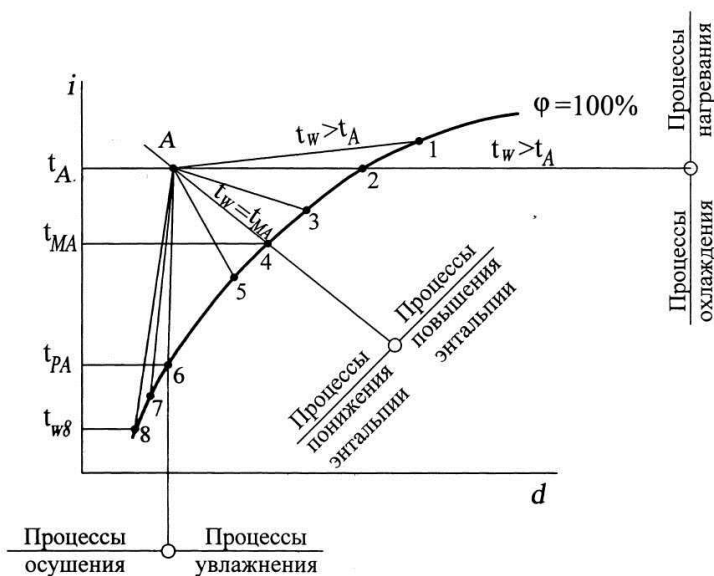


Рисунок 3.2 – Изображение на *i-d* диаграмме процессов тепло- и влагообмена с водой при различных температурах

При контакте воздуха с водой, имеющей температуру больше температуры воздуха ($t_w > t_A$), происходит увлажнение и нагрев воздуха (А-1). Испарение воды осуществляется целиком за счет ее собственной энтальпии (т.е. теплота, необходимая для испарения, берется от самой воды, вследствие чего вода охлаждается).

При температуре воды равной температуре воздуха ($t_w = t_A$) воздух увлажняется не изменяя своей температуры (А-2). На испарение расходуется теплота воды.

При температуре воды в точке 3 ниже температуры воздуха, но выше температуры мокрого термометра ($t_{MA} < t_M < t_A$) происходит увлажнение и некоторое охлаждение воздуха. Теплота на испарение поступает от воздуха и частично от воды.

Если вода имеет температуру, равную температуре мокрого термометра ($t_w = t_{MA}$, точка 4), происходит изоэнтальпийное увлажнение воздуха (А-4). Теплота для испарения поступает только от воздуха и ему же возвращается в виде теплоты парообразования.

В точке 5 температура воды соответствует условию $t_{рА} < t_w < t_{MA}$ ($t_{рА}$ -температура точки росы). Воздух несколько увлажняется и заметно охлаждается (А-5). Теплота воздуха идет на испарение и на нагрев воды.

Если температура воды равна температуре точки росы ($t_w = t_{рА}$, точка 6), происходит охлаждение воздуха при постоянном влагосодержании (А-6).

При температуре воды ниже температуры точки росы ($t_w < t_{рА}$) воздух интенсивно охлаждается и осушается (А-7). Вода охлаждает воздух и отбирает теплоту, выделяющуюся при конденсации водяных паров на ее поверхности.

При дальнейшем снижении температуры воды наступит момент, когда луч процесса станет касательным к кривой $\phi=100\%$ (А-8). При этом температура воды будет t_{w8} , а направление этой линии является предельным для процессов обработки воздуха водой.

Тепловой баланс камеры орошения при отсутствии потерь теплоты в окружающую среду характеризуется уравнением

$$Q = G (i_H - i_k) = W \cdot c_w \cdot (t_{wk} - t_{wH}), \quad (3.2)$$

где G – расход воздуха, кг/ч;

W – расход воды, кг/ч;

i_H, i_K – начальное и конечное теплосодержание воздуха, кДж/кг;

t_{WH}, t_{WK} – начальная и конечная температура воды, °С;

c_w – удельная массовая теплоемкость воды, кДж/(кг °С).

Уравнение можно представить в виде:

$$i_H - i_K = \frac{W}{G} \cdot c_w (t_{WK} - t_{WH}); \quad (3.3)$$

$$\text{т.к. } \frac{W}{G} = \mu, \text{ то } i_H - i_K = \mu \cdot c_w (t_{WK} - t_{WH}) \quad (3.4)$$

$$\text{или } \mu = \frac{\Delta i}{c_w \cdot \Delta t_w} \quad (3.5)$$

ЗАДАЧА 3.1. Через камеру орошения, в которой разбрызгивается вода, проходит воздух с температурой t и относительной влажностью ϕ (таблица 3.1). Определить температуру воды $t_{w \text{ уст.}}$, установившуюся в процессе тепло- и влагообмена с воздухом.

Таблица 3.1 – Исходные данные к задаче 3.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$t, ^\circ\text{C}$	35	27	32	25	30	26	34	28	27	30	28	33	27
$\phi, \%$	30	40	40	45	50	55	40	45	50	55	55	40	45

Вариант	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t, ^\circ\text{C}$	25	31	29	28	32	30	27	29	26	31	27	30
$\phi, \%$	50	55	45	50	55	45	55	50	45	40	30	30

Пример. $t=30^\circ, \phi=40\%$

Решение. На $i-d$ диаграмме строим точку, соответствующую состоянию воздуха. Из полученной точки по $i=\text{const}$ опускаемся до пересечения с $\phi=100\%$. Изотерма, проведенная из этой точки, и есть установившаяся температура воды. $t_{w \text{ уст.}}=20^\circ\text{C}$.

ЗАДАЧА 3.2. В камеру орошения поступает воздух с параметрами t_1 и ϕ_1 (таблица 3.2). Он орошается рециркулирующей водой, имеющей температуру предела охлаждения $t_{w \text{ уст.}}$, и увлажняется до $\phi_2=90\%$.

Определить на сколько градусов охлаждается воздух, прошедший обработку в камере орошения.

Таблица 3.2 – Исходные данные к задаче 3.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$t_1, ^\circ\text{C}$	35	34	33	32	31	30	29	28	27	35	34	33	32
$\varphi, \%$	40	45	35	30	45	48	35	55	48	45	50	48	35

Вариант	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$t_1, ^\circ\text{C}$	31	30	29	28	27	26	35	34	33	32	31	30
$\varphi, \%$	30	50	40	35	52	40	50	47	55	45	35	52

Пример. $t_1=28^\circ, \varphi_1=40\%$

Решение. На $i-d$ диаграмме строим точку, соответствующую состоянию обрабатываемого воздуха ($t_1=28^\circ, \varphi_1=40\%$). Из полученной точки по 1-const опускаемся до пересечения с $\varphi_2=90\%$. Изотерма этой точки – это температура предела охлаждения $t_{w, \text{уст.}}=19,5^\circ\text{C}$. Следовательно, воздух охладится на $28-19,5=8,5^\circ\text{C}$.

ЗАДАЧА 3.3. Воздух в количестве G с параметрами t_1, d_1 (таблица 3.3) увлажняется в адиабатной камере орошения (без подвода и отвода теплоты) оборотной рециркуляционной водой до $\varphi=95\%$.

Определить параметры увлажненного воздуха t_2 и d_2 , количество испарившейся воды W , которую надо добавлять в оборотный цикл, и температуру мокрого термометра t_m .



Таблица 3.3 – Исходные данные к задаче 3.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
G , кг/ч	12000	13500	14500	15000	16300	16800	17100	17400	18500	19000	19300	20000
t_1 , °C	25	24	23	22	26	21	27	25	24	23	22	26
d_1 , г/кг	1	1,5	4	1,5	1	4	1,2	2	3	1	3	1,5

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
21500	23000	21000	19800	19000	18000	17500	17200	16800	16200	15000	14500	13000
21	27	26	22	25	24	23	21	26	22	23	24	25
3	2,4	3,5	4	2,5	1	2,5	2	3	2	3	2	1,5

Пример. $G=21800 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$; $t_1=22^\circ\text{C}$, $d_1=0.8 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$.

Решение. На i - d диаграмме строим точку 1, соответствующую начальному состоянию обрабатываемого воздуха (рисунок 3.3)

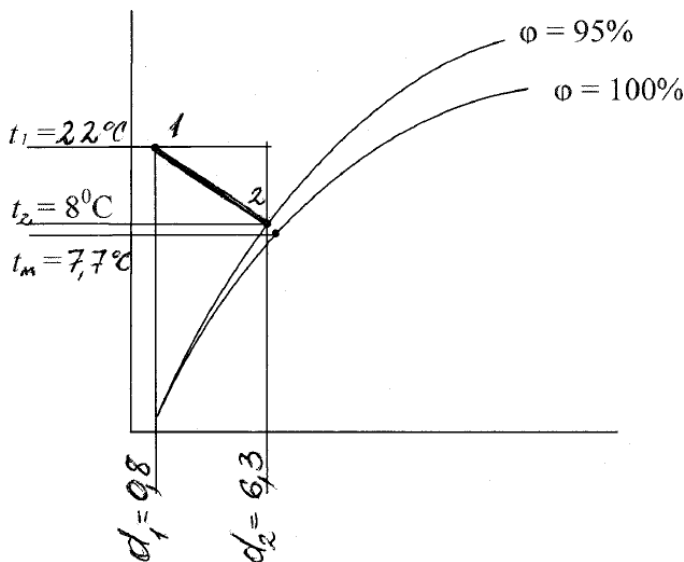


Рисунок 3.3 – К задаче 3.3

Из точки 1 проводим адиабату по $i = \text{const}$ до пересечения с $\phi = 95\%$.

Получаем точку 2, соответствующую состоянию увлажненного воздуха $t_2 = 8^\circ\text{C}$; $d_2 = 6,3 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$.

Количество испарившейся воды $W = G(d_2 - d_1)$,

$$W = 21800(6,3 - 0,8) = 119900 \frac{\text{г}}{\text{ч}}$$

т.е. в оборотный цикл надо добавлять $119,9 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ — воды.

Продолжив прямую 1-2 до пересечения с $\phi = 100\%$, получим температуру мокрого термометра $t_m = 7,7^\circ\text{C}$.

ЗАДАЧА 3.4. В рабочей зоне помещения необходимо обеспечить $t_{в}$, $^\circ\text{C}$, $\phi_{в}$, % (таблица 3.4). Приточный воздух, подаваемый

в помещении в количестве $G_{\text{пр}}, \frac{KZ}{\rho}$, имеет влагосодержание $d_{\text{пр}},$

$\frac{Z}{KZ}$. Увлажнение воздуха в цехе производится путем распыления

воды с полным ее испарением.

Определить с какой температурой $t_{\text{пр}}$ должен подаваться приточный воздух и какое количество воды W необходимо разбрызгивать в помещении.

Таблица 3.4 – Исходные данные к задаче 3.4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_{в}, ^\circ\text{C}$	19	20	18	21	22	16	17	19	20	21	18	19
$\varphi_{в}, \%$	45	30	50	70	45	45	30	40	53	60	40	35
$G_{пр}, \text{кг/ч}$	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000
$d_{пр}, \text{г/кг}$	2	0,8	2,5	5	1,5	1	0,8	3	2,5	2	1	1,5

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
20	21	22	16	17	22	16	17	21	22	18	19	20
55	55	50	30	45	60	50	55	45	30	60	30	45
12000	13000	14000	15000	16000	17500	18000	18500	19000	10000	15000	17000	18000
3	3,5	2	0,5	1	4	1,5	2	1	0,5	3	0,5	1,5

Пример: $t_{в}=22^\circ$, $\varphi_{в}=70\%$, $G_{пр}=17600 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$, $d_{пр}=0,9 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$.

Решение. При испарении воды в воздух помещения теплосодержание его будет повышаться за счет теплосодержания воды, однако настолько незначительно, что в практических расчетах им пренебрегают и процесс увлажнения воздуха считают адиабатическим.

Наносим на i-d-диаграмму точку В, соответствующую параметрам внутреннего воздуха. От нее проводим адиабату $i_{в-const}$ до пересечения с $d_{пр}$, получаем точку П, соответствующую состоянию приточного воздуха. Температура точки П $t_{пр}=49,4^{\circ}$.

Количество воды, распыляемой в помещении $W=G_{пр}(d_{в}-d_{п})$,

$$W=17600(11,8-0,9)=191900 \frac{\text{г}}{\text{ч}}$$

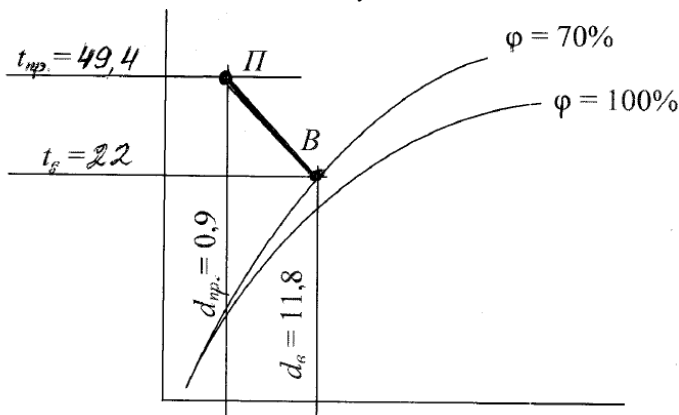


Рисунок 3.4 – К задаче 3.4

ЗАДАЧА 3.5. Воздух в количестве $L, \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$, с температурой t_1 ,

$^{\circ}\text{C}$ и относительной влажностью $\varphi_1, \%$ (таблица 3.5) обрабатывается в адиабатической камере орошения, в результате чего его температура снижается до t_2 $^{\circ}\text{C}$, а относительная влажность увеличивается до $\varphi_2, \%$.

Температура воды, орошающей воздух, повышается с $t_{вн}=12^{\circ}\text{C}$ до $t_{вк}=15^{\circ}\text{C}$.

Определить расход воды на орошение воздуха и коэффициент орошения.

Таблица 3.5 – Исходные данные к задаче 3.5

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$L, \frac{M^3}{ч}$	10000	11000	11500	12000	12700	13000	13500	13800	14000	14500	14800	15000	15500
$t_1, ^\circ C$	35	32	31	35	33	30	28	36	35	34	33	32	31
$t_2, ^\circ C$	20	25	21,5	27	27,5	20,5	21,8	25	23	21	22	23	22
$\varphi_1 \%$	30	30	35	40	47	30	45	35	35	35	42	47	50
$\varphi_2 \%$	80	60	85	75	75	80	80	77	75	80	80	90	90

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
16000	17000	18000	18500	19000	10000	11000	11800	12000	12500	13000	15000
30	29	28	36	33	32	28	30	29	34	27	36
20	16	20	25	22	21	17	18	23	23	17	23
40	30	40	40	40	35	35	35	40	40	35	30
80	75	70	90	85	85	75	90	75	80	85	70

Пример: $L=5000 \frac{M^3}{ч}$; $t_1=30^\circ C$; $\varphi_1=50\%$; $t_2=23^\circ C$; $\varphi_2=80\%$; $t_{WH}=12^\circ C$; $t_{WK}=15^\circ C$.

Решение. По заданным значениям t_1 и ϕ_1 на i - d -диаграмме строим точку 1, соответствующую начальным параметрам обрабатываемого воздуха. По положению точки находим: $d_1 = 13,2 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$;

$$i_1 = 64 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Аналогично строим точку 2, соответствующую состоянию обработанного воздуха, находим: $d_2 = 14 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$; $i_2 = 58,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Плотность обрабатываемого воздуха

$$\rho = \frac{353}{273 + t}; \quad \rho = \frac{353}{273 + 30} = 1,165 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Масса обрабатываемого воздуха $G = L \cdot \rho$;

$$G = 5000 \cdot 1,165 = 5825 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Количество теплоты, потерянной воздухом по формулам

$$(3.2), \quad Q = 5825(64 - 58,7) = 30873 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}.$$

Рассматривая теплообмен в камере орошения как адиабатический процесс, можем с небольшой погрешностью считать, что вся теплота воздуха передается воде. Тогда расход воды W в камере орошения можно определить по преобразованной формуле (3.2)

$$W = \frac{Q}{c_w \cdot (t_{\text{вк}} - t_{\text{вн}})} = \frac{30873}{4,19(15 - 12)} = 2456 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Коэффициент орошения воздуха водой по формуле (3.5)

$$\mu = \frac{64 - 58,7}{4,19(15 - 12)} = 0,42 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

4 АЭРОДИНАМИКА ВЕНТИЛИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ

Вентилирование помещений представляет собой процесс переноса объема воздуха, вытекающего из приточных отверстий и всасываемого вытяжными отверстиями. Кроме того, на характер воздушных потоков влияют температуры воздуха в струе и в помещении, взаимодействие с другими приточными струями и всасывающими факелами, образующимися вблизи вытяжных отверстий. На характер движения воздуха в помещении влияют строительные конструкции помещения, действие различных механизмов технологического оборудования, струи истекающие из отверстий или неплотностей оборудования, находящегося под избыточным давлением, конвективные потоки, образующиеся возле нагретых или холодных поверхностей.

Воздушные потоки – струи, образующиеся в помещении, переносят поступающие в воздух вредные выделения и формируют в объеме воздуха помещения поля скоростей, температур и концентраций.

Знание того, как изменяются в струе по мере ее распространения скорости, температуры и концентрации, позволяет проектировать экономичные и эффективные системы вентиляции и воздушного отопления.

Воздушной струей называют направленный поток с конечными поперечными размерами.

В технике вентиляции струи воздуха истекают в помещение, также заполненное воздухом. Такие струи называются затопленными.

Струю называют свободной, если она истекает в достаточно большое пространство и не имеет никаких помех для своего свободного развития. Если на развитие струи ограждающие конструкции помещения оказывают какое-либо воздействие, то такую струю называют несвободной или стесненной.

Струя, истекающая из отверстия, расположенного вблизи какой-либо плоскости (например, потолка помещения), параллельно этой плоскости называется настилающейся.

Различают струи изотермические и неизотермические. В изотермической струе температура во всем ее объеме одинакова и равна температуре окружающего воздуха. В неизотермической

струе начальная температура приточного воздуха ниже или выше температуры окружающего воздуха.

В зависимости от гидродинамического режима струя может быть ламинарной или турбулентной. Приточные вентиляционные струи всегда турбулентны.

На перемещение воздуха затрачивается энергия: тепловая, источником которой являются нагретые поверхности, или механическая, источником которой можно считать вентилятор, или сочетание тепловой и механической энергии вместе. Следовательно, по виду энергии, расходуемой на образование струи, различают механические и конвективные струи.

Все приточные струи можно разделить на 2 группы: 1 – с параллельными векторами скоростей истечения; 2 – с векторами скоростей истечения, составляющими между собой некоторый угол.

Конструкция воздухораспределительного устройства, в том числе воздуховыпускного отверстия, определяет форму и направление приточной струи и характер ее развития в помещении.

В зависимости от конструкции воздухораспределителя струи могут быть прямоточными или закрученными.

Прямоточные струи подразделяются на компактные и плоские, у которых векторы скорости на истечении параллельны между собой, а также веерные и конические, у которых векторы скорости на истечении образуют некоторый угол.

Закрученные струи, у которых векторы скорости на истечении складываются из векторов скорости поступательного и вращательного движения, подразделяются на компактные и конические.

Компактные струи образуются при истечении воздуха из отверстий круглой формы или формы, близкой к квадратной.

Струя, истекающая из круглого отверстия, остается осесимметричной по всей длине своего развития (круглая струя). При истечении из квадратного или прямоугольного отверстия струя в начале не будет осесимметричной, но на некотором расстоянии от насадка преобразуется в осесимметричную. При истечении воздуха из круглого отверстия с диффузорами для принудительного расширения образуется также компактная струя, которая будет осесимметрична по всей длине; такую струю называют конической.

Плоские струи образуются при истечении воздуха из щелевых отверстий бесконечной длины (в реальных условиях – при соотношении сторон больше 20).

Струя, истекающая из щелевого отверстия из плоской постепенно трансформируется в эллипсоидную и на расстоянии $x = 10d_{\text{щ.л.}}$ в круглую (за $d_{\text{щ.л.}}$ принимают корень квадратный из площади щели).

Веерные струи образуются при принудительном увеличении угла раскрытия струи. Различают полные веерные струи, у которых угол раскрытия составляет 360° и неполные, у которых этот угол менее 360° .

Закрученные струи образуются при установке закручивающих устройств в подводящем патрубке воздухораспределителя или при тангенциальном подводе воздуха к воздухораспределителю. Они имеют форму компактной или конической струи.

Независимо от формы, струи, у которых при истечении нет принудительного изменения их направления, на некотором расстоянии от насадка расширяются; угол бокового расширения $\alpha = 12^\circ 25'$.

Изучение струй проводилось многими исследователями. Наиболее глубокое и полное исследование струй принадлежит Г.Н. Абрамовичу, В.Н. Талиеву, И.А. Шепелеву.

Свободная изотермическая струя

Турбулентная струя, как и всякое турбулентное истечение, характеризуется интенсивным поперечным перемещением частиц. Вследствие этого периферийные слои струи подтормаживаются, а слои окружающего неподвижного воздуха, находящиеся вблизи струи, приходят в движение. В результате создается пограничный слой струи, который по направлению течения непрерывно утолщается. Таким образом, размеры струи по течению увеличиваются, масса ее растет, а скорость убывает.

Перенос вихревых масс, обуславливающий изменение скоростей в струе, обуславливает также распределение в струе концентраций (а для неизотермических струй – и температур).

Упрощенная схема свободной турбулентной изотермической струи представлена на рисунке 4.1.

Воздух, вытекая из сопла, образует струю с криволинейными границами ABC и DEF. В струе различают два участка: начальный ABED и основной CBEF. Сечение BE называют переходным сечением.

Границы основного участка BC и EF при их продолжении пересекаются в точке M, называемой полюсом струи. При равномерном начальном поле скоростей полюс находится в плоскости начала истечения, т.е. $x_0 \approx 0$. боковой угол расширения основного участка струи $\alpha = 12^{\circ}25'$.

На начальном и основном участках закономерности развития струи различны.

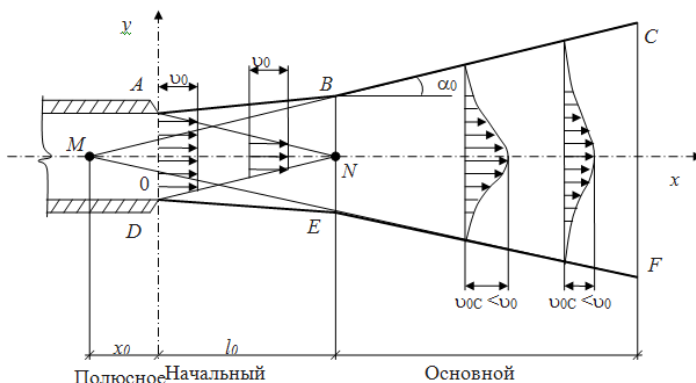


Рисунок 4.1 – Структура свободной изотермической струи

На начальном участке струи поле скоростей истечения, которое может быть равномерным или неравномерным, переходит в поле скоростей основного участка. Начальный участок разделяется на ядро AND, в котором сохраняется постоянная скорость, равная скорости истечения u_0 , и пограничные слои ABN и DNE. Осевая скорость u_0 на протяжении l_0 длины начального участка одинакова и равна начальной.

На основном участке струи поле скоростей неравномерно. Участок сплошь состоит из пограничного слоя. Скорость воздуха на оси потока и в периферийной части по мере удаления от выходного сечения непрерывно уменьшается. Профили скоростей воздуха в различных поперечных сечениях основного участка струи подобны и описываются одними и теми же безразмерными зависимостями.

На структуру струи оказывает влияние начальная турбулентность: чем турбулентнее поток перед выходом из насадка,

тем интенсивнее протекает перемешивание с окружающим воздухом, тем больше угол расширения струи, тем короче длина начального участка, и тем быстрее уменьшение осевой скорости в основном участке.

На основании описанной схемы изотермической струи установлены безразмерные зависимости между геометрическими и физическими величинами различных струй.

Круглая свободная изотермическая струя

Относительная осевая скорость воздуха в рассматриваемой точке поперечного сечения струи по теории Г.Н. Абрамовича в обработке В.Н. Талиева

$$\frac{u_{oc}}{u_0} = \frac{12,4\sqrt{\beta_0}}{x - x_0}, \quad (4.1)$$

где u_{oc} – осевая скорость в рассматриваемой точке;

u_0 – начальная скорость;

β_0 – поправочный коэффициент на количество движения в воздуховыпускном сечении. При равномерном поле скоростей $\beta_0 = 1$;

x – относительное расстояние, т.е. отношение расстояния

от отверстия x к радиусу отверстия R_0 ; $\bar{x} = \frac{x}{R_0}$;

x_0 – относительное полюсное расстояние, т.е. отношение

полюсного расстояния x_0 к радиусу отверстия R_0 ; $\bar{x}_0 = \frac{x_0}{R_0}$.

Основываясь на экспериментальных данных, можно принимать следующие значения относительного полюсного расстояния:

β_0	< 1,04	1,04-1,1	1,1-1,2
x_0	0	0-(-4)	(-4)-(-5,2)

Длину начального участка l_0 при равномерном поле скоростей истечения можно определить по формуле

$$l_0 = 12,4R_0. \quad (4.2)$$

Плоская свободная изотермическая струя

В плоской струе так же, как и в круглой, различают полюсное расстояние, начальный и основной участки.

Понятие полюса плоской струи условно; обычно полюс представляет собой точку; в данном же случае - это прямая линия, образованная пересечением граничных плоскостей основного участка струи.

Относительная осевая скорость воздуха в рассматриваемой точке поперечного сечения струи по теории Г.Н. Абрамовича в обработке В.Н. Талиева

$$\overline{v_{oc}} = \frac{3,8\sqrt{\beta_0}}{\sqrt{x - x_0}}, \quad (4.3)$$

где β_0 – то же, что в формуле (4.1); $\beta_0 = 1$;

x – относительное расстояние, т.е. отношение расстояния от отверстия x к полуширине воздуховыпускной щели B_0 ;

$$\overline{x} = \frac{x}{B_0};$$

x_0 – относительное полюсное расстояние, т.е. отношение полюсного расстояния x_0 к полуширине воздуховыпускной щели B_0 ;

$$\overline{x_0} = \frac{x_0}{B_0}.$$

При равномерном поле скоростей истечения $\overline{x_0} = 0$; $\beta_0 = 1$ длина начального участка

$$l_0 = 14,4B_0. \quad (4.4)$$

Свободная неизотермическая струя

В неизотермической струе действуют инерционные и гравитационные силы; действие гравитационных сил искривляет струю вверх или вниз (рисунок 4.2).

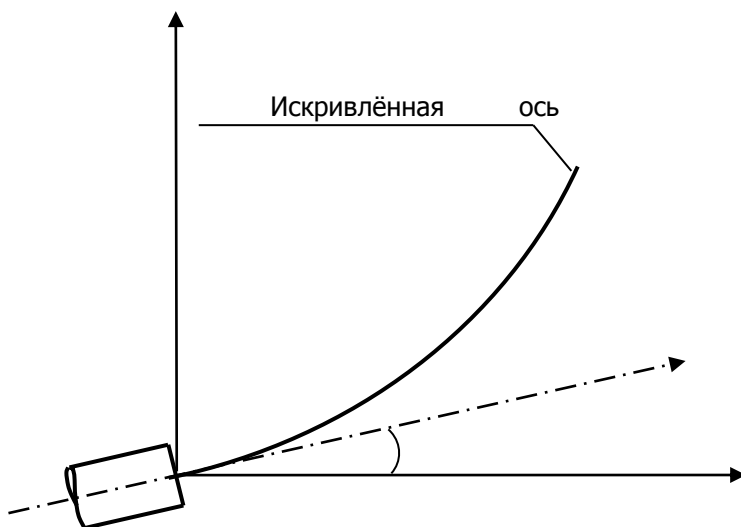


Рисунок 4.2 –Искривление неизотермической струи

Характеристикой неизотермической струи служит безразмерный комплекс, предложенный В.В. Батуриным и В.А. Шепелевым, называемый критерием Архимеда

$$A_r = g \frac{R_0(t_0 - t_{окр})}{v_0^2 \cdot T_{окр}}, \quad (4.5)$$

где g – ускорение свободного падения;
 R_0 – радиус насадка; для щели принимается половина ширины щели v_0 ;
 t_0 и $t_{окр}$ – температура воздуха соответственно в начале струи и в окружающем пространстве;
 $T_{окр}$ – абсолютная температура воздуха в окружающем пространстве;
 v_0 – начальная скорость.

Этот комплекс характеризует соотношение инерционных и гравитационных сил.

В слабо нагретых или слабо охлажденных струях, для которых критерий Архимеда по абсолютному значению меньше 0,0005, влияние гравитационных сил сказывается незначительно, и такие струи развиваются в пространстве без заметного искривления.

Если бы струя, вытекающая из насадка под начальным углом α_0 , была изотермическая или слабо нагретая, то ее ось была бы прямолинейна и направлена к горизонту под углом α_0 , т.е. была бы представлена линией S. Под действием архимедовой силы струя искривляется, и уравнение оси искривленной оси по теории Г.Н. Абрамовича в обработке И.А. Шепелева имеет вид:

$$\bar{y} = \bar{x}tg\alpha_0 + Ar\left(\frac{\bar{x}}{\cos\alpha_0}\right)^2 \left[0,51a\left(\frac{\bar{x}}{\cos\alpha_0}\right) + 0,35 \right], \quad (4.6)$$

где a – коэффициент, характеризующий начальную турбулентность струи, принимаемый по экспериментальным данным (таблица 4.1)

Таблица 4.1– Коэффициент, характеризующий начальную турбулентность

Конструкция насадка	a
Цилиндрический	0,08
Щелевидный	0,12
Квадратный	0,09-0,1

Разность температур на оси струи и окружающего воздуха (по Г.Н. Абрамовичу)

$$t_{oc} - t_{окр} = \frac{0,35(t_o - t_{окр})}{a \frac{x}{\cos\alpha} + 0,145}. \quad (4.6)$$

ЗАДАЧА 4.1. Воздух в количестве L , м³/ч, со скоростью u_0 , м/с, подается в помещение из воздухораспределителя, создающего компактную струю. Определить величину осевой скорости u_{oc}

на расстоянии от воздуховыпускающего отверстия x , м, и длину начального участка l_0 (таблица 4.2).

Пример. $L = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$; $u_0 = 3 \text{ м/с}$; $x = 3 \text{ м}$.

Площадь круглого воздуховыпускающего отверстия

$$F_o = \frac{L}{3600 \cdot v_o}; F_0 = \frac{1000}{3600 \cdot 3} = 0,0926 \text{ м}^2.$$

Диаметр

отверстия

$$d_o = \sqrt{\frac{4F_o}{\pi}}; d_o = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0926}{3,14}} = 0,343.$$

Радиус отверстия $R_o = 0,172 \text{ м}$.

Так как поле скоростей истечения равномерное, принимаем $x_0 = 0$, тогда $\beta_0 = 1,04$.

$$\text{Относительное расстояние } x = \frac{3}{0,172} = 17,44.$$

Относительная осевая скорость по формуле (4.1)

$$v_{oc} = \frac{12,4 \cdot \sqrt{1,04}}{17,44 - 0} = 0,73.$$

Осевая скорость $u_{oc} = v_{oc} \cdot u_0$; $u_{oc} = 0,73 \cdot 3 = 2,16$.

Длина начального участка по формуле (3.2) $l_0 = 12,4 \cdot 0,172 = 2,13 \text{ м}$.

Таблица 4.2 – Исходные данные к задаче 4.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$L, \text{м}^3/\text{ч}$	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	800	900
$U_0, \text{м/с}$	3	4	5	6	4	3,5	6	5	4,5	3,6	4	3,5	4,2
$X, \text{м}$	4,5	5	7	3	6	5,5	4	6,5	5	4	3	6	7

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	1500	1200
4	3,2	3,1	3,6	3,8	4	4,5	5	5,5	4,8	3,7	3,5
7,5	5	6	4	5,5	4,5	6	3	5	6	4,5	4

ЗАДАЧА 4.2. Решить задачу 4.1, считая, что воздух подается в помещение через два отверстия. Сделать вывод о зависимости осевой скорости от размера воздуховыпускающего отверстия.

ЗАДАЧА 4.3. Выполнить задание по условиям задачи 4.1, считая, что воздухораспределитель создает плоскую струю и соотношение сторон воздуховыпускающего отверстия равно 15.

Сделать вывод об изменении осевой скорости от формы струи.

ЗАДАЧА 4.4. Построить ось потока холодного воздуха, врывающегося через окно, расположенное на высоте 5 м от пола, если площадь окна $1 \times 1 = 1 \text{ м}^2$ и известна температура наружного воздуха t_n , температура воздуха в помещении t_v , скорость воздуха в сечении окна u_0 (таблица 4.3). Определить температуру на оси струи у пола.

Таблица 4.3 – Исходные данные к задаче 4.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$t_{н}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	-12	-13	-12	-14	-10	-11	-15	-12	-10	-15	-14	-10	-15
$t_{в}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	26	29	28	29	25	24	29	27	22	28	27	23	27
$v_o, \text{ м/с}$	1,5	2,0	2,2	2,5	3,0	2,0	3,0	3,3	2,0	3,2	2,5	3,0	3,5

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
-16	-11	-14	-16	-17	-13	-16	-11	-10	-14	-12	-13
28	25	26	25	29	25	27	26	24	28	27	28
2,8	1,7	2,0	1,5	3,5	2,0	2,5	3,3	3,0	3,5	2,0	1,5

Пример. $t_{н} = -13 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{в} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $v_o = 2 \text{ м/с}$.

Решение. Критерий Ar по формуле (4.5) составит

$$Ar = \frac{9,81 \cdot 0,5(-13 - 27)}{2^2 \cdot (273 + 27)} = -0,164.$$

Так как $\alpha_0 = 0$, уравнение оси струи (4.5) примет вид:

$$\bar{y} = Ar\bar{x}^2(0,51x + 0,35); \bar{y} = -0,164\bar{x}^2(0,051x + 0,35)$$

При размерах окна 1×1 м, его эквивалентный диаметр $d_0 = 1$ м. Тогда, зная, что $\bar{x} = \frac{x}{R_0}$, получили $\bar{x} = \frac{x}{0,5}$; соответственно

$$\bar{y} = \frac{y}{0,5}.$$

Задавая значения x , получим координаты y :

x	1	2	3	4	5
y	0,132	0,59	1,48	2,90	4,96

Построение потока представлено на рисунке 4.3.

Разность температур на оси струи и окружающего воздуха по формуле (4.7)

$$t_{oc} - t_{окр} = \frac{0,35(-13 - 27)}{0,1 \frac{5}{\cos 0} + 0,145} = -21,7^\circ.$$

Температура на оси струи у пола $t_{oc} = -21,7^\circ + 27^\circ = 4,3^\circ$.

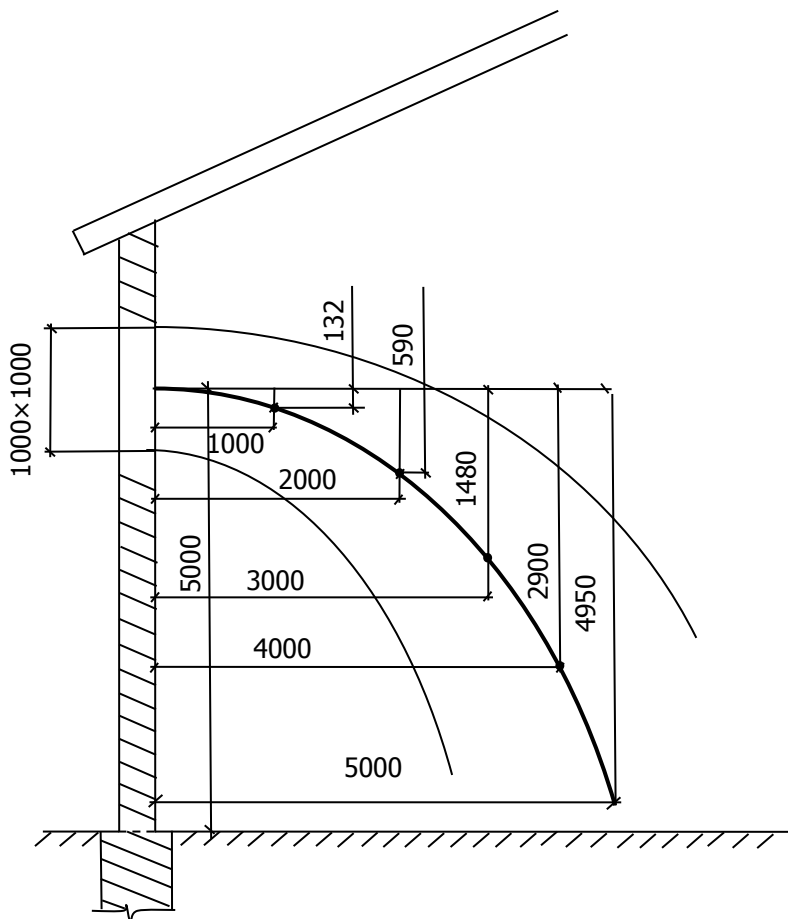


Рисунок 4.3 – К задаче 4.4

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Введ. 1989-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 48 с.
2. ГОСТ 30494—2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – Введ. 2013-01-01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 12 с.
3. СанПиН 2.1.2.2645-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых помещениях: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 27 с.
4. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Введ. 1996-10-01. – М.: Минздрав России, 1997. – 20 с.
5. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* – Введ. 2013-01-01. М.: Минрегион России, 2012. – 109 с.
6. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003.– Введ. 2013-01-01. М.: Минрегион России, 2012. – 76 с.
7. Богословский В.Н., Кокорин О.Я., Петров Л.В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: Учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1985. – 367 с.
8. Отопление и вентиляция: Учебник для вузов. В 2-х ч. Ч.2. Вентиляция / Под ред. В.Н. Богословского. – М.: Стройиздат, 1976. – 439 с.
9. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции: Учебное пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.
10. Батурин В.В. Вентиляция. – М.: Госстройиздат, 1959. – 288 с.