

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**В.И. Лысёв, Т.В. Рябова, А.А. Тихонов**

**ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ  
ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА**

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2016**

УДК 628.8

**Лысёв В.И., Рябова Т.В., Тихонов А.А.** Основы термодинамики влажного воздуха: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 33 с.

Представлены основные сведения о термодинамике влажного атмосферного воздуха и методах расчета процессов его тепловлажностной обработки. Описан порядок расчета систем обеспечения микроклимата. В конце работы дан список литературы.

Предназначено для бакалавров направления 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения по дисциплине «Термодинамика влажного воздуха» очной и заочной форм обучения.

**Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.А. Пронин**

**Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 7 от 18.03. 2016 г.**



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5–100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016

© Лысёв В.И., Рябова Т.В., Тихонов А.А., 2016

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Основы термодинамики влажного воздуха» входит в учебный план направления подготовки бакалавров 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения.

В соответствии с рабочей программой дисциплины в данном курсе рассматриваются следующие группы вопросов:

Раздел 1. Термодинамические параметры влажного воздуха  
Дидактическая единица 1.1. Основные свойства идеальных газов.

Дидактическая единица 1.2. Диаграмма состояния влажного воздуха.

Раздел 2. Процессы тепловлажностной обработки воздуха  
Дидактическая единица 2.1. Процессы нагревания и увлажнения воздуха.

Дидактическая единица 2.2. Процессы охлаждения и осушения воздуха.

Раздел 3. Воздухообмен в помещении

Дидактическая единица 3.1. Тепловлажностное отношение и луч процесса в помещении.

Дидактическая единица 3.2. Расход приточного в помещении воздуха.

Раздел 4. Режимы функционирования систем обеспечения микроклимата

Дидактическая единица 4.1. Режимы функционирования с потреблением теплоты и влаги (водяного пара).

Дидактическая единица 4.2. Режимы функционирования с потреблением холода и конденсацией водяного пара.

В системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВК), объединенных единым термином *системы жизнеобеспечения (СЖ)*, основным «рабочим агентом» является атмосферный влажный воздух.

Термодинамические параметры влажного воздуха (такие как, температура, относительная влажность и ряд других) оказывают существенное влияние как на самочувствие людей и других живых организмов, так и на характер разнообразных технологических процессов.

Отклонение термодинамических параметров от нормируемых значений связано с поступлением в воздух помещений теплоты и испаряющейся влаги. Кроме того, выделяющиеся от разных источников вредные вещества увеличивают их концентрацию в воздухе, значение которой не должно превышать предельно допустимого уровня.

Для обеспечения необходимых параметров микроклимата в помещения, как правило, подают приточный воздух, расход которого рассчитывают, исходя из условий нейтрализации (ассимиляции) избытков теплоты, испаряющейся влаги и вредных веществ.

Наружный приточный воздух в течение года имеет различные значения термодинамических параметров. Поэтому в приточных установках с целью достижения требуемых параметров на притоке в помещения предусматривается необходимая тепловлажностная обработка наружного воздуха: нагрев и увлажнение в холодный период года и охлаждение и осушение в теплый период года.

Данная дисциплина является исходной («стартовой») в комплексе специальных дисциплин в образовательной программе «*Системы жизнеобеспечения*».

Ниже приводятся необходимые пояснения для самостоятельного изучения основных положений, составляющих основу данного курса.

## 1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

В технике вентиляции и кондиционирования *атмосферный* воздух рассматривается как *смесь идеальных* газов: *сухого воздуха* и *водяного пара* [1, 2].

Согласно *закону Дальтона*, атмосферное (барометрическое) давление влажного воздуха определяется *суммой парциальных давлений* сухой части воздуха  $P_v$  и водяного пара  $P_p$ .

*Тепловой потенциал* воздуха определяется значением его *температуры  $t$* , *влажностный* – величиной (массой) водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, сухая часть которого составляет 1 кг. Этот *параметр* называют *влажностью* и обозначают буквой  $d$ .

Предельное (максимально-возможное) количество водяных паров, приходящихся на **1 кг сухого воздуха** зависит от атмосферного давления (которое в расчетах систем жизнеобеспечения принимается *неизменным*) и *температуры воздуха* и обозначается  $d_n$ . При превышении этого предела часть водяного пара переходит в жидкое состояние (туман).

При неизменном атмосферном давлении масса водяного пара, необходимого для насыщения воздуха, увеличивается с повышением температуры воздуха. При постоянной температуре масса водяного пара, насыщающего воздух, уменьшается с повышением атмосферного давления.

Для *практических* (инженерных) расчетов *допустимо* определять значение *относительной влажности* ( $\phi$ ) воздуха как отношение:

$$\phi = (d / d_n) 100 \%$$

Содержащиеся во влажном воздухе *водяные пары* обладают *тепловым потенциалом*, величина которого может быть определена как:  $(r \cdot d)$ , где  $r$  – *теплота испарения (парообразования)*.

Тогда общий (суммарный) *тепловой потенциал* влажного воздуха (как смеси двух идеальных газов) может быть определен следующим образом:

$$h = (c_v \cdot t_v) + (r \cdot d).$$

Комплексный параметр  $h$  называют *удельной энтальпией* влажного воздуха, которая является суммой энтальпии *сухой* части воздуха ( $c_v \cdot t_v$ ) и водяного пара ( $r \cdot d$ ).

Представленные выше зависимости позволяют проводить *приближенное* определение параметров влажного воздуха (при **постоянном** значении атмосферного давления) и используются для построения **диаграммы состояния влажного воздуха**.

**Диаграмма состояния влажного воздуха** обычно имеет две координатные оси: ось *абсцисс* – **влажностендержанне**  $d$  и ось *ординат* – **удельная энтальпия**  $h$  (см. эскиз на рис.1).

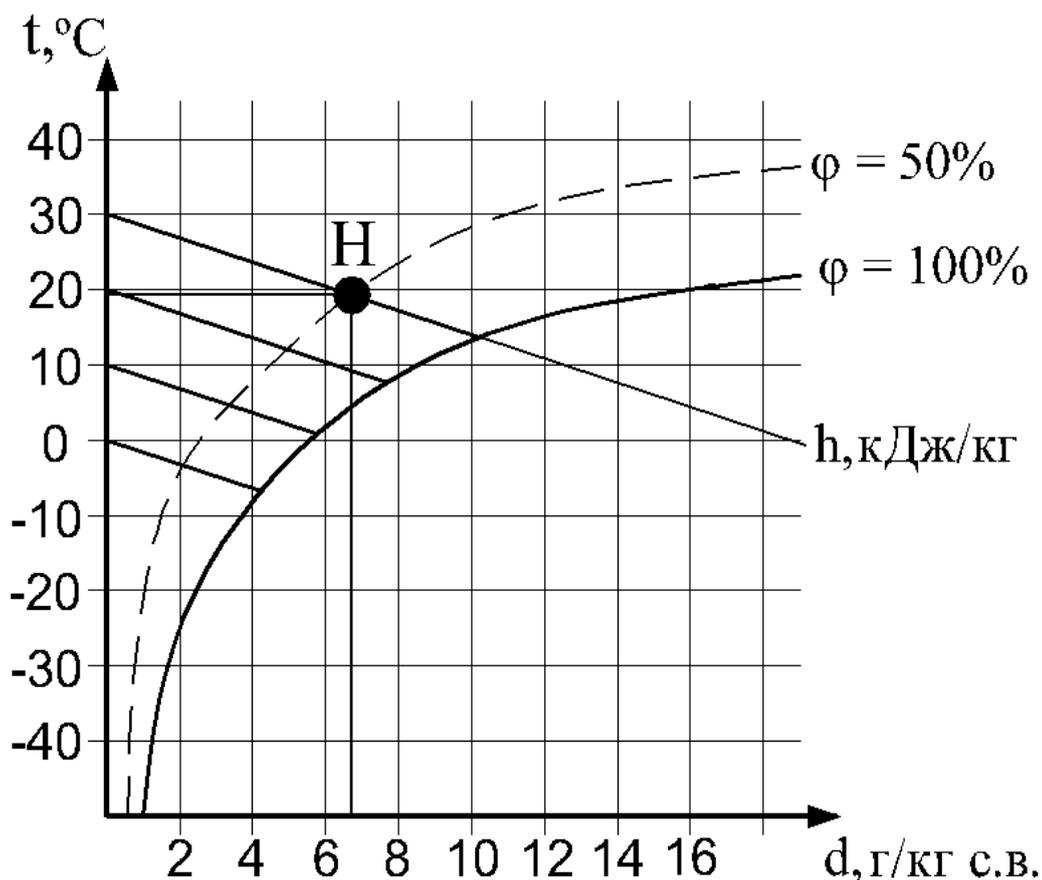


Рис.1. Фрагмент диаграммы состояния влажного воздуха

Для определения параметров влажного воздуха с помощью диаграммы необходимо знать не менее *двух независимых* параметров (см. эскиз фрагмента диаграммы на рис. 2).

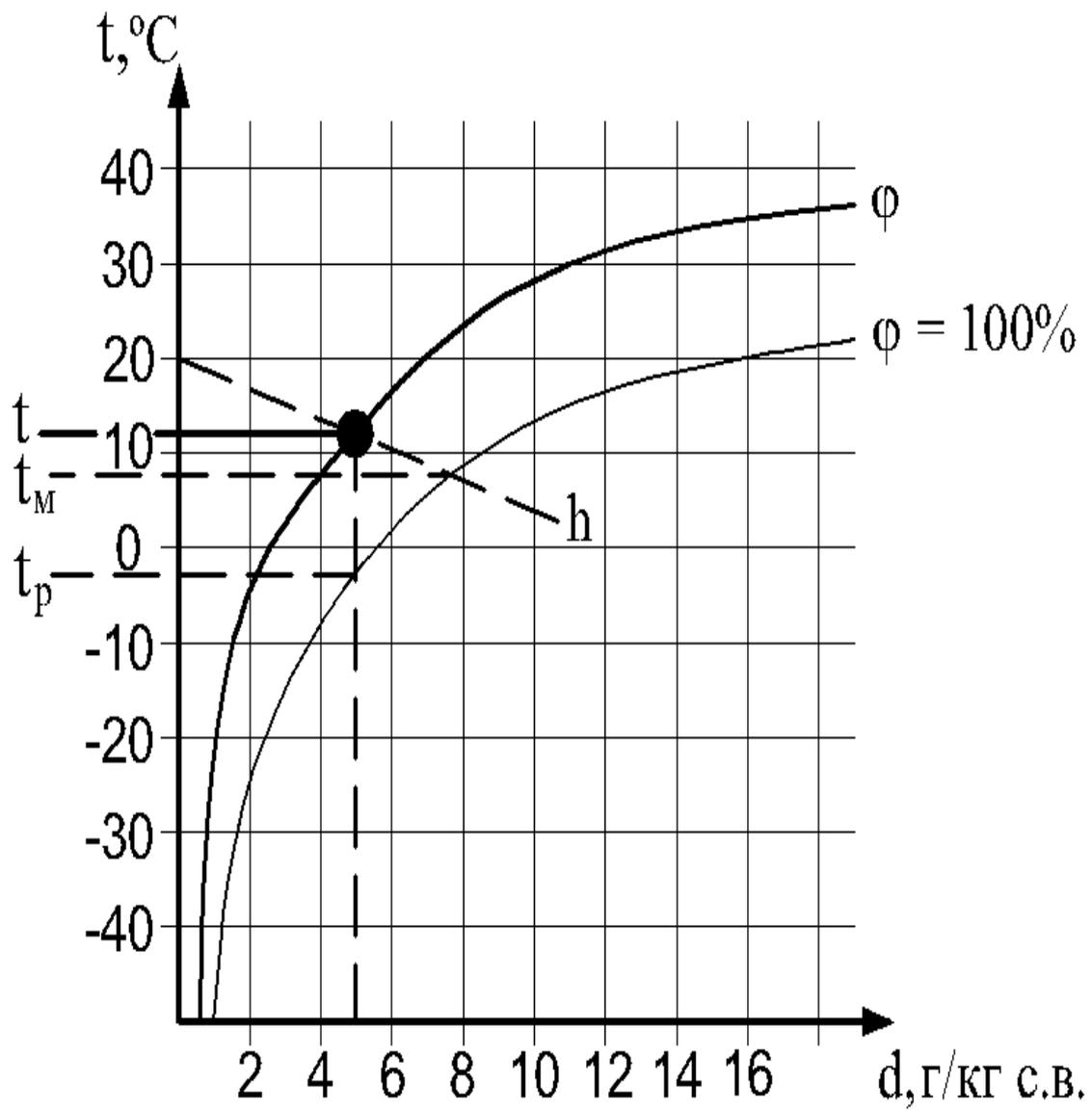


Рис. 2. Определение параметров влажного воздуха по значениям температуры  $t$  и относительной влажности  $\phi$

## 2. ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА

### Процессы нагрева влажного воздуха

Процессы *нагрева* воздуха, как правило (чаще всего), происходят в теплообменных аппаратах – поверхностных воздухонагревателях (ПВН). Обратимся к следующей *расчетной* схеме (см. рис. 3).

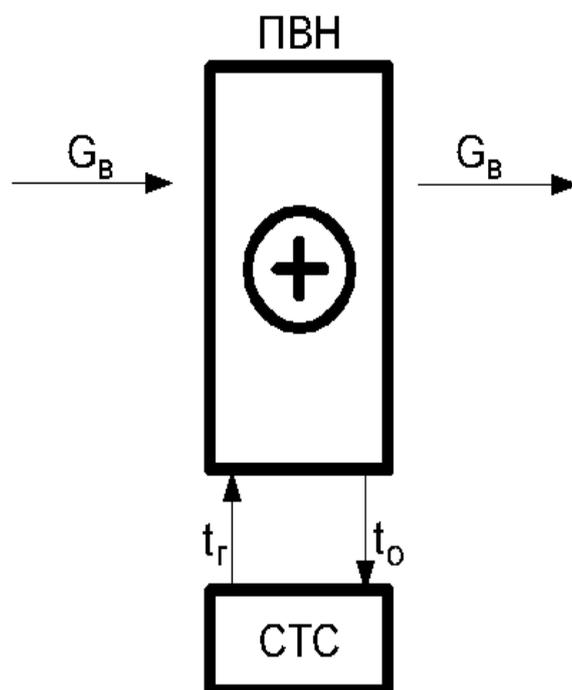


Рис. 3. Расчетная схема поверхностного воздухонагревателя

Составим уравнение теплового баланса:

$$Q_H + Q_T = Q_K,$$
$$(c_B \cdot G_B \cdot t_H) + Q_T = (c_B \cdot G_B \cdot t_K).$$

После несложных преобразований, получим расход теплоты, необходимый для нагрева воздуха

$$Q_T = c_B \cdot G_B (t_K - t_H) = G_B (h_K - h_H).$$

Расход теплоты, передаваемый теплоносителем от системы теплоснабжения (СТС), определяется из уравнения теплового баланса

$$Q_{T(w)} = c_w \cdot G_w (t_T - t_0),$$

где  $c_w$ ,  $G_w$  – соответственно удельная теплоемкость и массовый расход теплоносителя (горячей воды);  $t_T$ ,  $t_0$  – температура теплоносителя, поступающего в воздухонагреватель и отводимого от теплообменного аппарата.

На фрагменте диаграммы (см. рис. 4) представлен процесс нагрева воздуха, происходящий в поверхностном воздухонагревателе.

Индексом **Н** обозначены параметры наружного воздуха до аппарата, индексом **К** – параметры после воздухонагревателя. Необходимо отметить, что в этом процессе значение *влажностного содержания* воздуха остается *постоянным*.

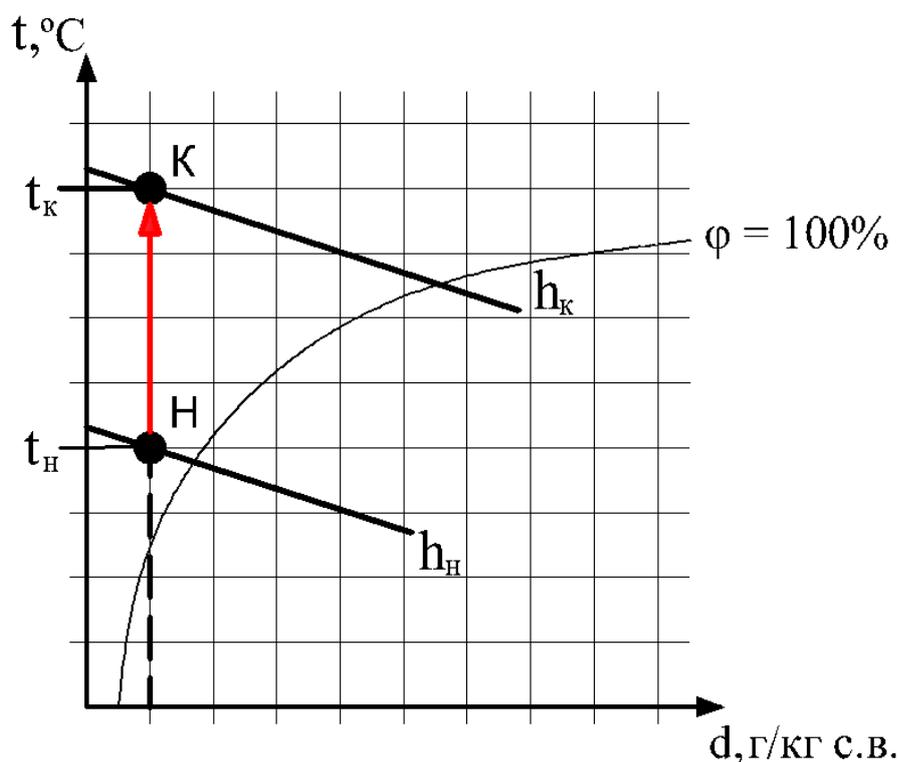


Рис. 4. Фрагмент диаграммы параметров влажного воздуха

## Процессы охлаждения и осушения влажного воздуха

Процессы *охлаждения* (в том числе и с *осушением*) воздуха происходят в поверхностном воздухоохладителе (ПВО). Обратимся к следующей *расчетной* схеме (см. рис. 5).

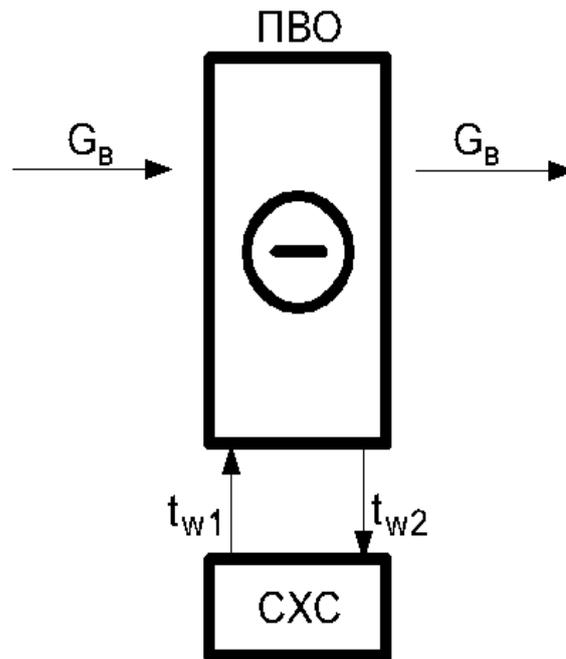


Рис. 5. Расчетная схема поверхностного воздухоохладителя (ПВО)

Составим уравнение теплового баланса:

$$Q_H - Q_X = Q_K,$$

$$G_B \cdot h_H - Q_X = G_B \cdot h_K.$$

После несложных преобразований получим расход теплоты, необходимый для *охлаждения* воздуха,

$$Q_X = G_B (h_H - h_K).$$

Расход холода (теплоты, отводимой системой холодоснабжения – СХС) определяется из уравнения теплового баланса

$$Q_{x(w)} = c_w \cdot G_w (t_{w2} - t_{w1}).$$

На фрагменте диаграммы (см. рис. 6) представлены процессы охлаждения воздуха, происходящие в поверхностном воздухоохладителе. При этом значение влагосодержания воздуха остается *постоянным*, если температура поверхности *выше температуры росы* для воздуха начального состояния, т.е.  $t_{к1} > t_p$ .

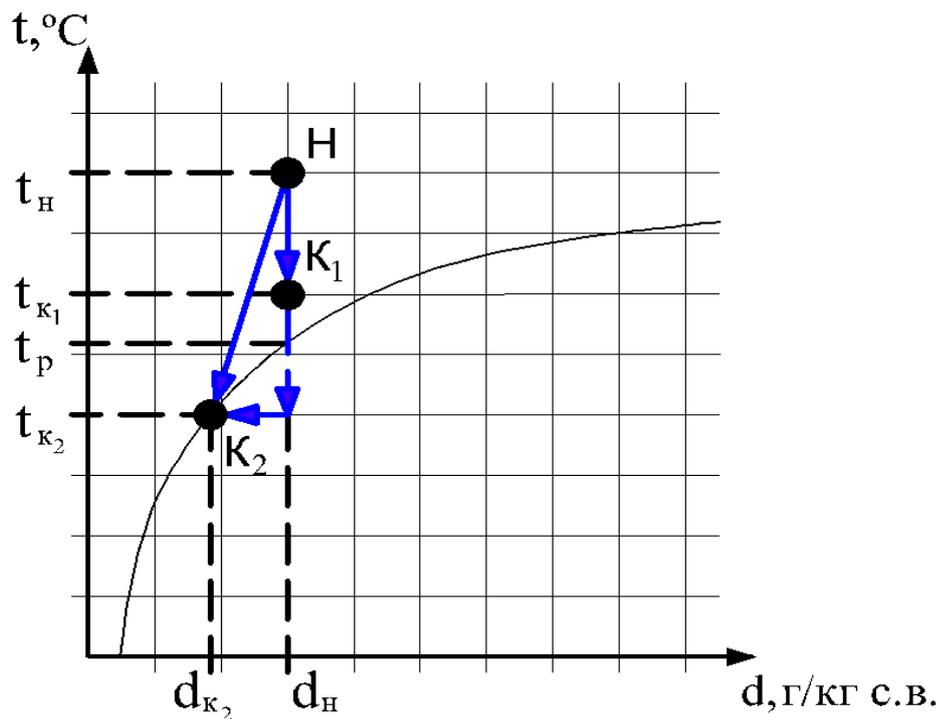


Рис. 6. Фрагмент диаграммы параметров влажного воздуха

При температуре поверхности *ниже температуры росы*, когда  $t_p > t_{к2}$ , процесс охлаждения происходит со снижением влагосодержания охлаждаемого воздуха, то есть с *конденсацией* из воздуха водяного пара.

При «сухом» охлаждении (без выпадения конденсата) расход холода определяется как:

$$Q_{x1} = G_B (h_H - h_{K1}) = c_B \cdot G_B (t_H - t_{K1}).$$

При «мокром» охлаждении (с выпадением конденсата) необходимо учитывать *теплоту конденсации* водяных паров

$$r \cdot G_B (d_H - d_{K2}).$$

Тогда расход холода определяется как:

$$Q_{x2} = c_B \cdot G_B (t_H - t_{K2}) + r \cdot G_B (d_H - d_{K2}).$$

### Процесс увлажнения воздуха паром

В этом процессе *водяной пар* непосредственно вводится в поток увлажняемого воздуха в паровом увлажнителе (ПУ). Пар производится в парогенераторе (ПГ). Обратимся к следующей расчетной схеме (см. рис. 7).

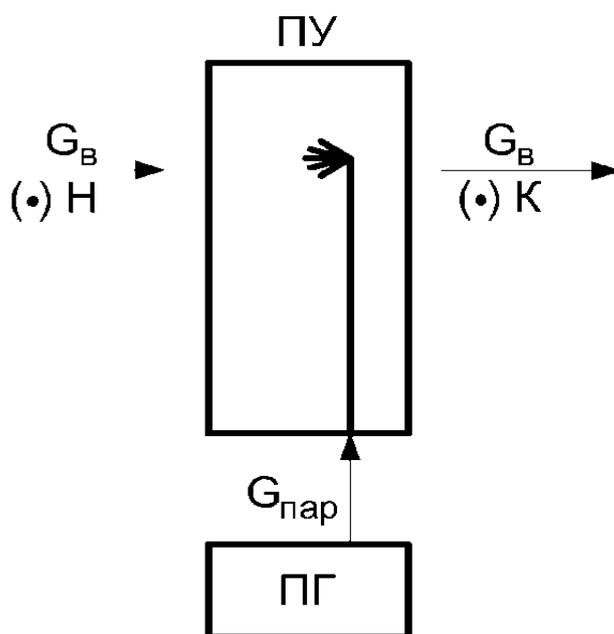


Рис. 7. Расчетная схема парового увлажнителя (ПУ)

На рис. 8 представлен фрагмент диаграммы параметров влажного воздуха с изображением процесса увлажнения воздуха водяным паром.

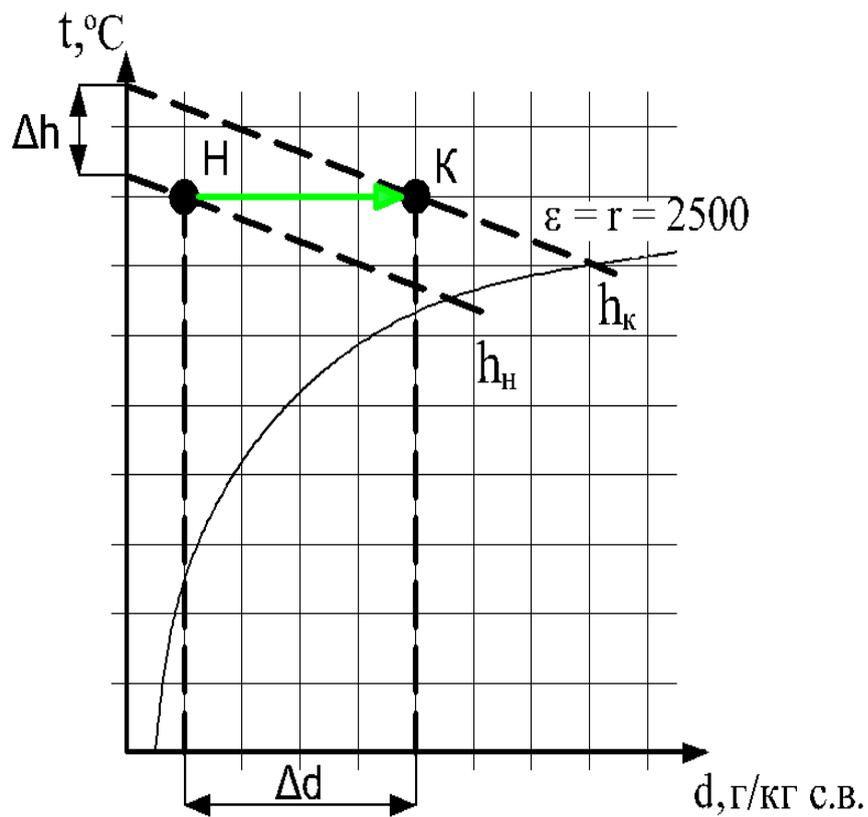


Рис. 8. Фрагмент диаграммы параметров влажного воздуха

Составим уравнения баланса по теплоте и влаге:

$$(G_B \cdot h_H) + (r \cdot G_{\text{пар}}) = (G_B \cdot h_K),$$

$$(G_B \cdot d_H) + G_{\text{пар}} = (G_B \cdot d_K).$$

После несложных преобразований получим следующее соотношение:

$$(h_K - h_H) / (d_K - d_H) = 2500 \text{ кДж / кг} = 2,5 \text{ кДж / г}.$$

## Процессы смешения воздуха двух состояний

Процессы *смешения* воздуха *двух состояний* могут иметь место, как в холодный, так и в теплый периоды года. Эти процессы представлены на схеме приточной установки (рис. 9) и фрагменте диаграммы (см. рис. 10).

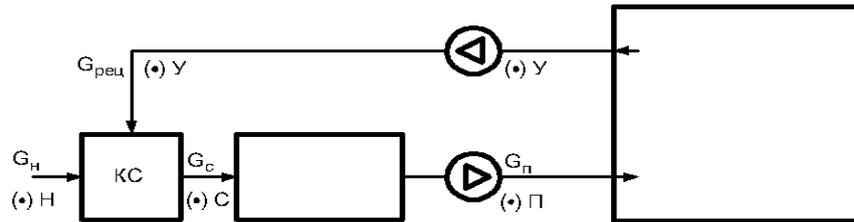


Рис. 9. Расчетная схема приточной установки

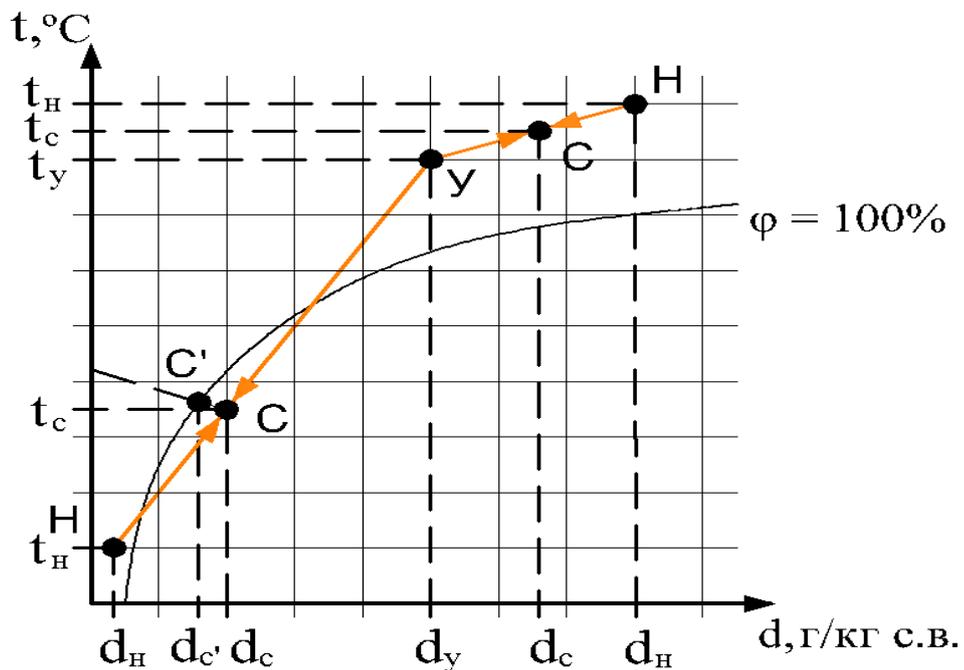


Рис.10. Фрагмент диаграммы влажного воздуха

Запишем уравнения соответственно теплового и влажностного балансов:

$$(h_c \cdot G_c) = (h_n \cdot G_n) + (h_y \cdot G_{\text{рец}}),$$

$$(d_c \cdot G_c) = (d_n \cdot G_n) + (d_y \cdot G_{\text{рец}}).$$

Зная смешиваемые расходы воздуха и их параметры (энтальпию и влагосодержание), можно вычислить параметры «смеси» – энтальпию  $h_c$  и влагосодержание  $d_c$ :

$$h_c = \frac{(h_n \cdot G_n) + (h_y \cdot G_{\text{рец}})}{G_n + G_{\text{рец}}}; \quad d_c = \frac{(d_n \cdot G_n) + (d_y \cdot G_{\text{рец}})}{G_n + G_{\text{рец}}}.$$

Рассмотрим теплый период года (см. фрагмент диаграммы на рис. 10).

Расход теплоты, получаемый рециркуляционным воздухом в камере смешения (КС), равен расходу теплоты, отдаваемой наружным воздухом, т.е.  $Q_y = Q_n$ .

Последнее равенство можно записать следующим образом:

$$G_y (h_c - h_y) = G_n (h_n - h_c).$$

Откуда следуют следующие соотношения, необходимые для практических расчетов:

$$\frac{G_n}{G_y} = \frac{C_y}{H_c} = \frac{d_c - d_y}{d_n - d_c} = \frac{h_c - h_y}{h_n - h_c}.$$

В холодный период года (см. рис.10) возможно выпадение *конденсата* из смеси наружного и рециркуляционного (удаляемого из помещения) воздуха. Массовый расход конденсата может быть определен из уравнения влажностного баланса

$$G_{w(\text{конд})} = G_c (d_c - d_c').$$

## Процессы обработки воздуха водой

Данные процессы *традиционно* используются в установках вентиляции и кондиционирования воздуха. Если процессы «взаимодействия» воздуха и воды рассматривать как **процессы смешения** воздуха *исходного* (данного) состояния с *насыщенным* воздухом в поверхностном (*пограничном*) слое воды, то в **идеальном процессе** (когда расход воды и время контакта *бесконечно велики*) параметры «смеси», т.е. воздуха после обработки водой, будут зависеть **только** от **температуры воды**.

Рассмотрим различные (характерные) случаи изменения параметров воздуха при его обработке водой с разными значениями ее **температуры** (см. фрагмент диаграммы на рис. 11).

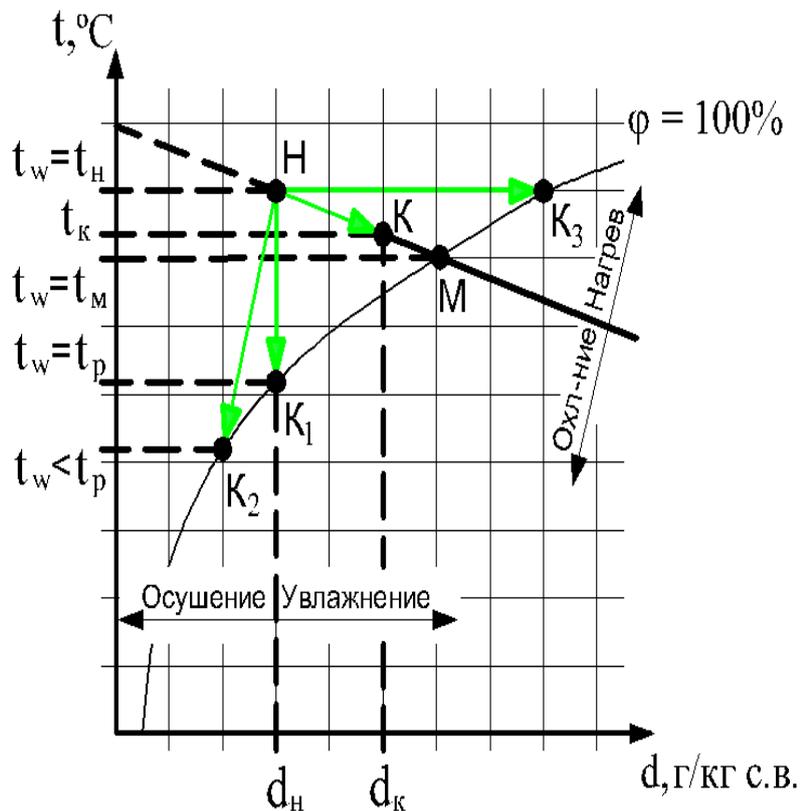


Рис. 11. Фрагмент диаграммы параметров влажного воздуха

Теплообмен между воздухом и водой в установившемся (стационарном) режиме описывается уравнениями теплового баланса:

$$Q_{x(w)} = c_w \cdot G_w (t_{wk} - t_{wn}),$$

$$Q_{x(b)} = G_b (h_n - h_k).$$

В процессе испарительного охлаждения воздуха водой (когда вода в контактном аппарате циркулирует по *замкнутому* циклу – см. расчетную схему на рис. 12) воздух, снижая свою температуру, отдает теплоту воде. Эта теплота идет на испарение воды, и влагосодержание воздуха в данном процессе увеличивается.

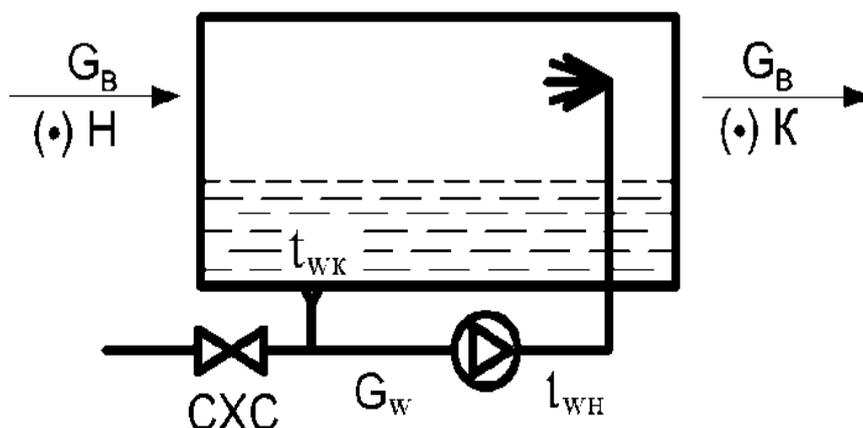


Рис.12. Расчетная схема контактного аппарата

Такой процесс традиционно называют *адиабатным* (или *изоэнтальпийным*). В этом процессе количество теплоты (явной или ощутимой), отдаваемой воздухом воде, равно теплоте испарения («скрытой» теплоте). Адиабатный процесс можно описать следующими соотношениями:

$$- Q_{явн} = c_b \cdot G_b (t_n - t_k),$$

$$+ Q_{скр} = r \cdot G_b (d_k - d_n).$$

Алгебраическая сумма этих величин равна нулю, что можно записать следующим образом:

$$Q_{\text{полн}} = (-Q_{\text{явн}}) + Q_{\text{скр}} = 0.$$

Так как изменения энтальпии не происходит, то этот процесс можно назвать *изоэнтальпийным* и записать как:

$$Q_{\text{полн}} = G_{\text{в}} (h_{\text{н}} - h_{\text{к}}) = 0.$$

Эффективность данного процесса определяется из следующего соотношения:

$$E = \frac{\text{НК}}{\text{НМ}} = \frac{t_{\text{н}} - t_{\text{к}}}{t_{\text{н}} - t_{\text{м}}} = 1 - \frac{t_{\text{к}} - t_{\text{м}}}{t_{\text{н}} - t_{\text{м}}}.$$

В зависимости от значения *температуры воды* могут осуществляться процессы как с увеличением влагосодержания (процессы увлажнения), так и с его уменьшением (процессы осушения).

На фрагменте диаграммы (см. рис. 11) представлены различные процессы обработки воздуха водой в зависимости от ее температуры.

### 3. ВОЗДУХООБМЕН В ПОМЕЩЕНИИ

Рассмотрим следующую *расчетную схему* объекта (см. рис.13).

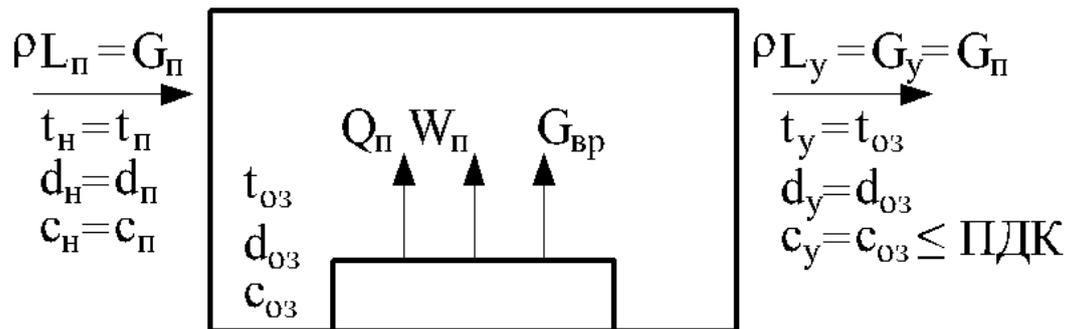


Рис. 13. Расчетная схема объекта

В данной схеме используются следующие обозначения:  $t$ ,  $d$ ,  $c$  – параметры приточного ( $\text{п}$ ), удаляемого ( $\text{у}$ ) воздуха, воздуха в обитаемой (обслуживаемой) зоне ( $\text{оз}$ );  $G_{\text{п}}$ ,  $G_{\text{у}}$  – расход воздуха (массовый) соответственно приточного и удаляемого (кг/с);  $Q_{\text{п}}$  – избыточные (суммарные) поступления теплоты в объект (кВт);  $c_{\text{в}}$  – удельная теплоемкость воздуха (кДж/(кг · °С)).

Введем следующие *допущения* (условия) [2]:

- процесс рассматривается как *установившийся* (стационарный);
- параметры воздуха во всем объеме объекта *одинаковые*;
- ограждающие конструкции объекта *герметичны*.

При данных условиях (допущениях) можно составить следующее уравнение *теплового* баланса:

$$(c_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}}) + Q_{\text{п}} = (c_{\text{в}} \cdot G_{\text{у}} \cdot t_{\text{у}}).$$

Запишем это уравнение в «стандартной» форме:

$$Q_{\text{п}} = c_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}} (t_{\text{у}} - t_{\text{п}}).$$

Расчетный *расход приточного воздуха (воздухообмен, необходимый для ассимиляции избытков теплоты* в объекте):

$$G_{\text{п}} = Q_{\text{п}} / c_{\text{в}} (t_{\text{у}} - t_{\text{п}}).$$

Аналогично, рассматривая уравнения *материального баланса по влаге и вредным веществам*, можно определить необходимый расход приточного воздуха (воздухообмен) по избыткам испаряющейся *влаги, газам и вредным веществам*.

Уравнение *влажностного* баланса:

$$(d_{\text{п}} \cdot G_{\text{п}}) + W_{\text{п}} = (d_{\text{у}} \cdot G_{\text{у}}),$$

где  $d_{\text{п}}, d_{\text{у}}$  – *влажностное содержание* соответственно воздуха приточного и удаляемого (г/кг сухого воздуха);  $G_{\text{п}}, G_{\text{у}}$  – расход воздуха (*массовый*) соответственно приточного и удаляемого (кг/с);  $W_{\text{п}}$  – избыточные (суммарные) поступления *испаряющейся влаги* (г/с).

Уравнение *материального* баланса по *вредным веществам*:

$$(c_{\text{п}} \cdot L_{\text{п}}) + G_{\text{вр}} = (c_{\text{у}} \cdot L_{\text{у}}),$$

где  $c_{\text{п}}, c_{\text{у}}$  – концентрация соответственно воздуха приточного и удаляемого (г/м<sup>3</sup>);  $L_{\text{п}}, L_{\text{у}}$  – расход воздуха (объемный) соответственно приточного и удаляемого (м<sup>3</sup> / ч);  $G_{\text{вр}}$  – избыточные (суммарные) поступления вредного вещества (г/ч).

Тогда расчетный расход приточного воздуха (воздухообмен) может быть определен следующим образом:

– по избыткам испаряющейся *влаги*

$$G_{\text{п}} = W_{\text{п}} / (d_{\text{у}} - d_{\text{п}});$$

– по *вредным* веществам и газам

$$L_{\text{п}} = G_{\text{вр}} / (c_{\text{у}} - c_{\text{п}}).$$

## Определение величин возмущающих воздействий

Воздействия, влияющие на параметры микроклимата, могут быть:

- *тепловые*, влияющие на *температуру* воздуха в объекте;
- *влажностные*, влияющие на *влажностное содержание* воздуха;
- *пылегазовые*, влияющие на *чистоту* и *концентрацию* вредных веществ в воздухе объекта.

Ниже представлены основные *расчетные зависимости* для определения отдельных составляющих перечисленных воздействий.

## Внутренние составляющие теплоступлений

### *Тепловлажностные поступления от людей*

Тепловлажностные поступления зависят от характера физической деятельности людей и *температуры* окружающего их воздуха в помещении.

Полные поступления теплоты (явные и скрытые)  $Q_{п}$  от людей определяются по уравнению

$$Q_{п} = (q + r \cdot g) n,$$

где  $q$  – *явные* теплоступления от *одного* человека (Вт/чел.) (при температуре воздуха, равной 20 °С, и легком характере работы  $q = 100$  Вт/чел.);  $r$  – удельная теплота парообразования (кДж/кг),  $r = 2500$  кДж/кг;  $g$  – влажностные поступления от *одного* человека ((г/ч)/чел.) (при температуре воздуха, равной 20 °С, и легком характере работы  $g = 72$  (г / ч) / чел.);  $n$  – количество людей в помещении (например,  $n = 4$  чел.).

Тогда *полные* теплоступления от людей составят:

$$Q_{п} = [100 + 2500 \cdot (72 / 3600)] 4 = 600 \text{ Вт.}$$

Суммарные *явные* тепlopоступления  $Q_{я}$  от людей определяются следующим образом:

$$Q_{я} = q \cdot n.$$

Тогда поступления *явной* теплоты от людей составят:

$$Q_{я} = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт.}$$

*Скрытые* (с испаряющейся влагой) поступления теплоты  $Q_{исп}$  от людей определяются по уравнению

$$Q_{исп} = r \cdot g \cdot n.$$

Они составят:  $Q_{исп} = 2500 \cdot 0,02 \cdot 4 = 200 \text{ Вт.}$

Суммарные *влагопоступления* (в виде испаряющегося *водяного пара*) от людей определяются следующим образом:

$$W = g \cdot n.$$

Они составят:  $W = 0,02 \cdot 4 = 0,08 \text{ г/с.}$

### ***Тепlopоступления от оборудования и освещения***

Поступления теплоты от *оборудования* могут быть определены по следующей формуле:

$$Q_{об} = q_{об} \cdot m,$$

где  $q_{об}$  – тепlopоступления от *одного* комплекта оборудования (например, персонального компьютера (Вт)) (согласно техническим данным  $q_{об} = 150 \text{ Вт}$ );  $m$  – количество комплектов оборудования (компьютеров) – (например,  $m = 4$ ).

Тогда суммарные поступления теплоты от оборудования составят:

$$Q_{об} = 150 \cdot 4 = 600 \text{ Вт.}$$

Поступления теплоты от приборов *освещения* могут быть определены следующим образом:

$$Q_{осв} = k \cdot q_{осв} \cdot F,$$

где  $k$  – коэффициент перехода электрической энергии в энергию тепловую ( $k = 0,55$ );  $q_{осв}$  – удельные тепlopоступления от освещения на  $1 \text{ м}^2$  площади пола помещения ( $q = 60 \text{ Вт/м}^2$ );  $F$  – площадь пола ( $\text{м}^2$ ) (например,  $F = 30 \text{ м}^2$ ).

Тогда поступления теплоты от приборов освещения составят:

$$Q_{осв} = 0,55 \cdot 60 \cdot 30 = 990 \text{ Вт.}$$

## Внешние составляющие тепlopоступлений

### *Тепlopоступления за счет теплопередачи*

Поступления (потери) теплоты через наружные ограждающие конструкции определяются по уравнению *теплопередачи*:

$$Q_{огр} = k_{огр} \cdot F (t_n - t_v),$$

где  $k_{огр}$  – коэффициент теплопередачи ограждения, здесь  $k_{огр} = 0,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ;  $F$  – площадь поверхности ограждения ( $F = 10 \text{ м}^2$ );  $t_v$  – расчетная температура воздуха в помещении ( $+ 20 \text{ °C}$ );  $t_n$  – расчетная температура наружного воздуха ( $- 30 \text{ °C}$ ).

Тогда *потери* теплоты через наружное ограждение составят:

$$Q_{огр} = 0,5 \cdot 10 (20 - (-30)) = 250 \text{ Вт.}$$

### ***Теплопоступления от солнечной радиации***

Для определения возможных поступлений теплоты от **солнечной радиации** необходимы данные о поступлении **лучистой теплоты** (прямой и рассеянной) для географического региона, где расположен объект. Поступление теплоты через **прозрачное ограждение (остекление)** можно вычислить по следующей формуле:

$$Q_{с.р} = k_{с/з} \cdot q_{с.р} \cdot F,$$

где  $k_{с/з}$  – коэффициент **солнцезащиты**, учитывающий уменьшение теплопоступлений за счет солнцезащитных мероприятий (например, шторы или жалюзи, принимаем по справочным данным:  $k_{с/з} = 0,5$ );  $q_{с.р}$  – расчетное значение интенсивности солнечной радиации ( $Вт / м^2$ );  $F$  – площадь поверхности остекления ( $м^2$ ) (стандартная площадь оконного проема около  $3 м^2$ ).

Тогда поступление теплоты через прозрачное ограждение составит:

$$Q_{с.р} = 0,5 \cdot 666 \cdot 3 = 1000 \text{ Вт.}$$

### ***Минимально необходимый расход наружного воздуха***

**Санитарная норма** расхода **наружного** воздуха на одного человека при 8 - часовом рабочем дне составляет:

$$L_{с.н} = 60 \text{ (м}^3\text{/ч) /чел.}$$

Если общее количество людей ( $n = 5$ ) человек, то **минимально необходимый** расход **наружного** («свежего») воздуха  $L_n$  определяется из следующего выражения:

$$L_n = L_{с.н} \cdot n.$$

Тогда общий (суммарный) расход **минимально необходимого** расхода **наружного** воздуха составит:

$$L_n = 60 \cdot 5 = 300 \text{ м}^3\text{/ч.}$$

#### 4. РЕЖИМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА

Принципиальная схема (ПС) системы обеспечения микроклимата (СОМ) представлена на рис. 14 и имеет в своем составе, как правило, следующие блоки (элементы):

- объект (одно или несколько помещений – зоны);
- установка для обработки воздуха, включающая технические средства для обработки воздуха, его **нагрева**, **увлажнения**, **охлаждения** и (возможно, **осушения**), при необходимости, **шумоглушения**;
- коммуникации (воздуховоды и трубопроводы и т.п.);
- внешние системы: системы теплоснабжения (СТС), холодно-снабжения (СХС), водоснабжения (СВС) и энергоснабжения (СЭС);
- средства автоматизации – система автоматического управления (САУ), реализующая необходимые функции регулирования, контроля и диспетчеризации.

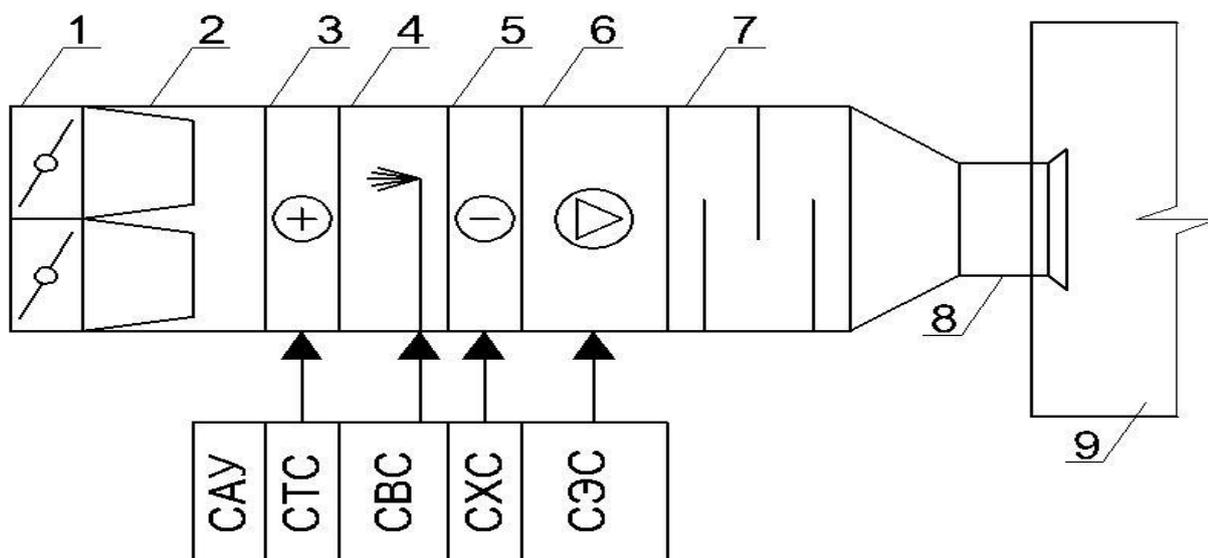


Рис. 14. Принципиальная схема системы обеспечения микроклимата:

1 – 9 – элементы приточной установки

Состав функциональных элементов (см. рис. 15), необходимых для тепловлажностной обработки воздуха и образующих технологическую схему (ТС), зависит от *режимов функционирования* системы [3].

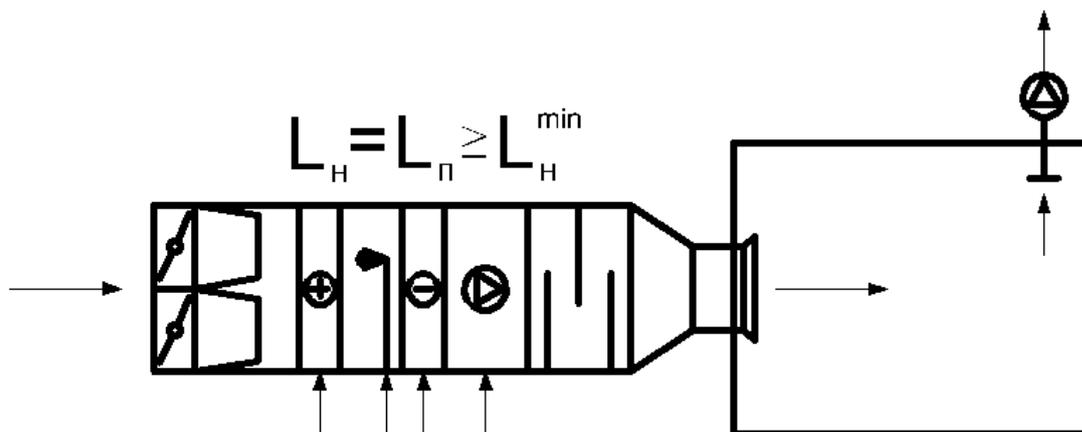


Рис. 15. Технологическая схема СКВ

Режимами функционирования (РФ) систем обеспечения микроклимата называют *последовательность (сочетание) процессов* тепловлажностной обработки воздуха. Так, например, для центральной однозональной системы, работающей без рециркуляции (когда ассимиляционная способность минимального расхода наружного воздуха достаточна), могут быть следующие *режимы функционирования* (см. рис.16):

- режим функционирования с потреблением теплоты и влаги, когда энтальпия наружного воздуха *ниже* энтальпии приточного воздуха;
- режим функционирования без потребления теплоты и холода, когда энтальпия наружного воздуха *равна* энтальпии приточного воздуха;
- режим функционирования с потреблением холода, когда энтальпия наружного воздуха *выше* энтальпии приточного воздуха.

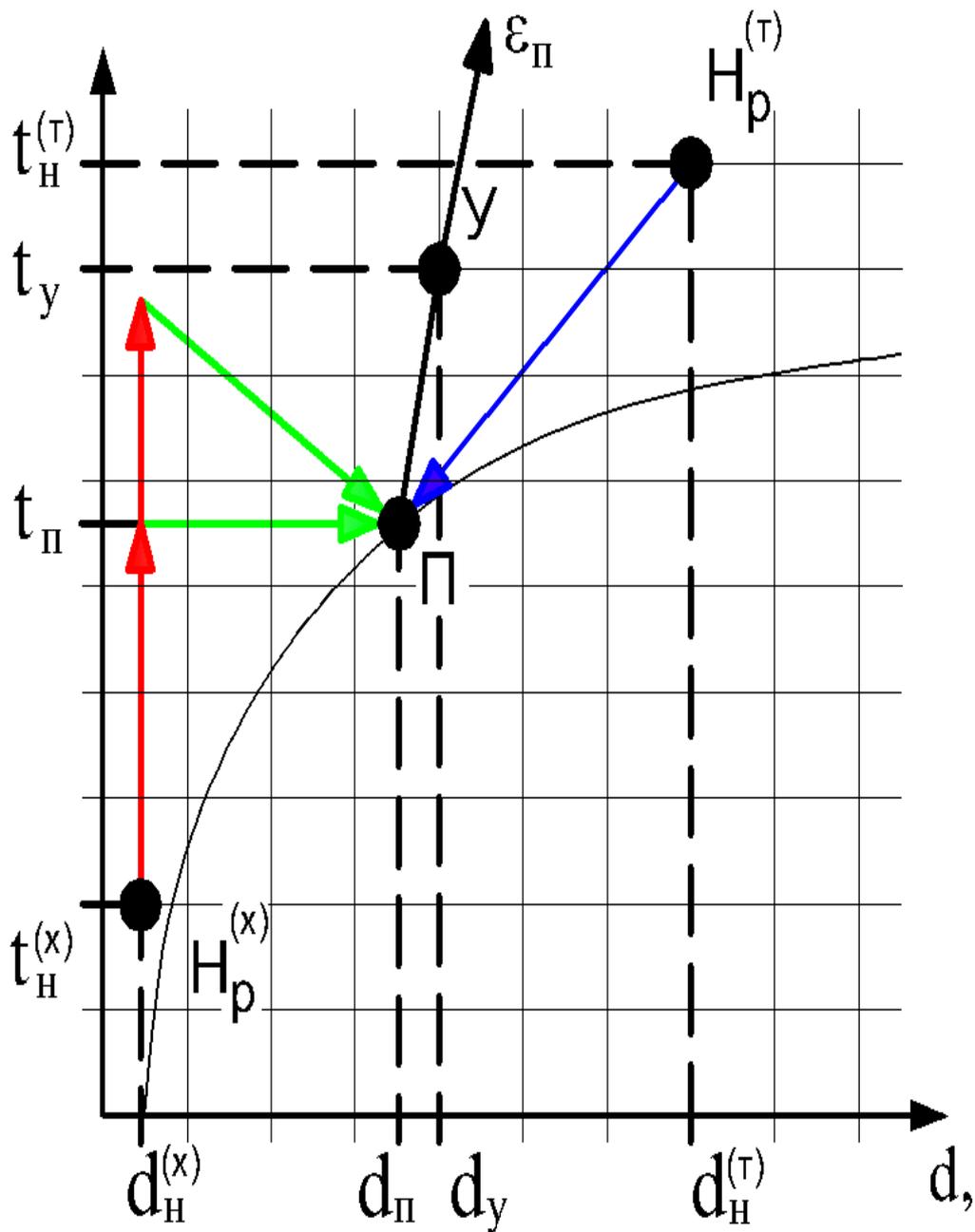


Рис. 16. Режимы функционирования системы

Для реализации перечисленных режимов функционирования необходимы следующие **функциональные элементы**, составляющие **технологическую схему** системы обеспечения микроклимата:

- воздухозаборное устройство (приемный блок);
- воздушный фильтр;

– поверхностный воздухонагреватель для повышения температуры и энтальпии воздуха;

– водяной (адиабатный, испарительный) или паровой увлажнитель для повышения влагосодержания воздуха;

– охладитель воздуха (контактного или поверхностного типа), необходимый для снижения энтальпии, а также увеличения или снижения влагосодержания воздуха;

– приточный вентилятор для перемещения наружного воздуха через аппараты и подачи в помещение;

– вытяжной вентилятор для удаления воздуха из помещения и выброса в атмосферу.

Исходными данными для подбора и расчета оборудования системы обеспечения микроклимата являются:

– расчетная производительность по воздуху;

– расчетная производительность по теплоте;

– расчетная производительность по холоду.

Расход воздуха, необходимый для *ассимиляции* поступлений теплоты и влаги, в установившемся режиме (стационарных условиях) определяется из уравнений соответственно *теплого* и *влажностного* (материального) балансов:

$$G_{\Pi} = Q_{\text{пом}} / c_{\text{в}} (t_{\text{в}} - t_{\Pi}),$$

$$G_{\Pi} = G_{\text{пом}} / (d_{\text{в}} - d_{\Pi}),$$

где  $G_{\Pi}$  – массовый расход приточного воздуха;  $Q_{\text{пом}}$  – суммарные (от различных источников) поступления теплоты;  $G_{\text{пом}}$  – суммарные (от различных источников) поступления влаги;  $t_{\text{в}}$ ,  $t_{\Pi}$  – температура воздуха в помещении и приточного;  $d_{\text{в}}$ ,  $d_{\Pi}$  – влагосодержание воздуха в помещении и приточного.

Расчетная производительность по теплоте  $Q_{\text{т}}$  и холоду  $Q_{\text{х}}$  определяется при *расчетных параметрах наружного воздуха*.

При увлажнении воздуха *паром* расход теплоты составит:

$$Q_T = c_v \cdot G_{\Pi} (t_{\Pi} - t_{н(x)}).$$

При адиабатном увлажнении *водой* расход теплоты определяется следующим образом:

$$Q_T = G_{\Pi} (h_{\Pi} - h_{н(x)}).$$

Расчетный расход холода определяется по известной зависимости (см. раздел 2):

$$Q_X = G_{\Pi} (h_{н(Т)} - h_{\Pi}),$$

где  $t_{\Pi}$ ,  $h_{\Pi}$  – соответственно значение температуры и удельной энтальпии приточного воздуха;  $t_{н(x)}$ ,  $h_{н(x)}$  и  $h_{н(Т)}$  – расчетное значение температуры и удельной энтальпии наружного воздуха в *холодный* период года и значение удельной энтальпии наружного воздуха в *теплый* период года.

Расчетная *производительность* по воздуху, теплоте и холоду используется для *подбора* основного оборудования: вентиляторов, узлов нагрева и охлаждения воздуха.

Технико-экономические показатели (ТЭП) могут быть натуральные и стоимостные [4]. Натуральные показатели выражают ресурсы, необходимые для сооружения и функционирования (эксплуатации) системы.

К ним относятся различные материалы, тепловая и электрическая энергия и т.д. Стоимостные (экономические) показатели выражают натуральные в денежном исчислении.

Для определения ТЭП необходимо знать *типоразмер* оборудования, используемого в системе кондиционирования, и условия его работы за годовой цикл эксплуатации системы. Как известно [4], типоразмер оборудования определяется величиной расчетной производительности системы по воздуху, теплоте и холоду.

Ресурсы, потребляемые системой за год, определяются режимами ее функционирования и особенностями наружного климата (в частности, повторяемостью наружных параметров за год). Таковыми являются *годовые расходы* теплоты, холода и электроэнергии.

При известных затратах на оборудование и его монтаж, определяющих *капитальные* затраты (необходимые инвестиции) (**К**), *эксплуатационные* (**С**) и *приведенные* затраты (**П**) могут быть определены следующим образом:

$$C = S_T Q_{T.год} + S_{\text{Э}} \text{Э} + S_X Q_{X.год},$$

$$П = К / T_H + С,$$

где  $S_T$ ,  $S_{\text{Э}}$ ,  $S_X$  – соответственно тарифы на теплоту, электроэнергию и себестоимость холода;  $T_H$  – нормативный срок окупаемости капитальных затрат.

Годовой расход теплоты может быть определен по формуле

$$Q_{T.год} = Q_{T.ср} T_T,$$

где  $Q_{T.ср}$  и  $T_T$  – среднегодовой расход теплоты (в холодный период года) и время работы системы с потреблением теплоты.

Годовой расход холода определяется по уравнению

$$Q_{X.год} = Q_{X.ср} T_X,$$

где  $Q_{X.ср}$  и  $T_X$  – среднегодовой расход холода (в теплый период года) и время работы системы с потреблением холода.

Годовой расход электроэнергии вычисляется по следующей зависимости:

$$\text{Э} = P G T,$$

где  $P$ ,  $G$  и  $T$  – соответственно полное давление вентилятора, его производительность и время работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Свистунов В.М., Пушняков Н.К.** Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: Учеб. для вузов. – СПб.: Политехника, 2005.

2. **Стефанов Е.В.** Вентиляция и кондиционирование воздуха. – СПб.: АВОК Северо-Запад, 2005.

3. **Сотников А.Г.** Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха // Полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СГВС и СХС (В 2 т. с продолжением). Т.1. – СПб., 2013.

4. **Сотников А.Г.** Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха // Полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СГВС и СХС (В 2 т. с продолжением). Т.11. – СПб., 2013.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА .....	5
2. ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА .....	8
3. ВОЗДУХООБМЕН В ПОМЕЩЕНИИ .....	19
4. РЕЖИМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА.....	25
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	31

Лысёв Владимир Иванович  
Рябова Татьяна Владимировна  
Тихонов Андрей Анатольевич

# ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Учебно-методическое пособие

*Ответственный редактор*  
Т.Г. Смирнова

*Компьютерная верстка*  
В.И. Лысёв

*Дизайн обложки*  
Н.А. Потехина

*Печатается*  
*в авторской редакции*

---

Подписано в печать 29.12.2016. Формат 60 x 84 1/16  
Усл. печ. л. 2,09. Печ. л. 2,25. Уч.-изд. л. 2,06  
Тираж 50 экз. Заказ № С 70

---

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49  
Издательско-информационный комплекс  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9