



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный  
технический университет**

---

**Кафедра «Промышленная теплоэнергетика  
и теплотехника»**

# **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

**Лабораторный практикум**

**Часть 4**

**Минск  
БНТУ  
2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторный практикум  
для студентов теплоэнергетических специальностей

В 4 частях

Часть 4

ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск  
БНТУ  
2017

УДК 661.92-913.2:536.7(076.5)(075.8)

ББК 22.317я7

Т38

Составители :

*В. Н. Романюк, А. А. Бобич,*

*Т. В. Бубырь, Д. Б. Муслина*

Рецензенты :

канд. техн. наук, главный специалист отдела общей энергетики

РУП «БЕЛТЭИ» *Ф. И. Молочко;*

канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетика» УО «Белорусский  
государственный аграрный технический университет» *А. Г. Цубанов*

**Т38** **Техническая** термодинамика : лабораторный практикум для  
студентов теплоэнергетических специальностей : в 4 ч. / сост. :  
В. Н. Романюк [и др.]. – Минск : БНТУ, 2017. – Ч. 4 : Влажный  
воздух. – 55 с.

ISBN 978-985-550-105-4(Ч. 4).

Лабораторный практикум предназначен для студентов теплоэнергетических специальностей Белорусского национального технического университета, изучающих курс «Техническая термодинамика». Практикум состоит из нескольких частей. В первых трех частях, изданных ранее, рассматриваются лабораторные работы, относящиеся к идеальным и реальным газам. Материал четвертой части практикума объединяет сведения о влажном воздухе и процессах, протекающих с ним.

Издается с 2002 г. Часть 3 «Термодинамика потока» вышла в 2015 г.

УДК 661.92-913.2:536.7(076.5)(075.8)

ББК 22.317я7

ISBN 978-985-550-105-4(Ч. 4)

ISBN 978-985-550-133-7

© Белорусский национальный

технический университет, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Основные теоретические сведения .....	4
Лабораторная работа № 12 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА.....	22
Лабораторная работа № 13 ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА.....	32
Список использованных источников .....	55

# ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

## Влажный воздух. Общие сведения

Влажным воздухом называется смесь сухого воздуха (далее будем именовать «сухая компонента») с водяным паром, а в более общем случае – с водяным паром и мелкими каплями жидкой воды (туман) или кристаллами льда. Подчеркнем, что сухая компонента влажного воздуха не рассматривается как смесь газов (азот, кислород и др.), а считается индивидуальным веществом.

В подавляющем большинстве случаев давление влажного воздуха близко к атмосферному, а поскольку понятие идеального газа вводилось в ходе изучения поведения атмосферного воздуха, очевидна применимость к сухому воздуху понятия идеального газа и соответствующих соотношений.

Второй компонент бинарной смеси «влажный воздух» может быть в последнем в виде пара, жидкости и твердой фазы. Чаще всего имеет место смесь сухого воздуха и водяного пара, и далее рассматривается только это состояние влажного воздуха.

*Количество водяных паров во влажном воздухе не может быть произвольным. Оно увязано с давлением и температурой влажного воздуха и не может превышать некоторого максимального значения.* Парциальное давление водяного пара  $p_{п}$  во влажном воздухе не может быть больше давления насыщения воды  $p_{сп}$ , соответствующего температуре, равной температуре влажного воздуха ( $t_{вв}$ ), то есть имеет место выражение  $p_{сп} \geq p_{п}$ .

Если  $p_{сп} > p_{п}$ , а в этом случае температура влажного воздуха ( $t_{вв}$ ), следовательно, и температура пара больше температуры насыщения воды ( $t_s$ ), соответствующей парциальному давлению паров воды во влажном воздухе ( $p_{п}$ ), то пары воды во влажном воздухе находятся в состоянии перегретого пара (рис. 1, т. 1–3) и имеет место *ненасыщенный влажный воздух*.

Максимальное количество водяных паров во влажном воздухе будет при выполнении равенства  $p_{ст} = p_p$ . В этом случае водяной пар во влажном воздухе будет в состоянии насыщенного пара, а воздух будет называться *насыщенным влажным воздухом*, рис. 1, т. А.

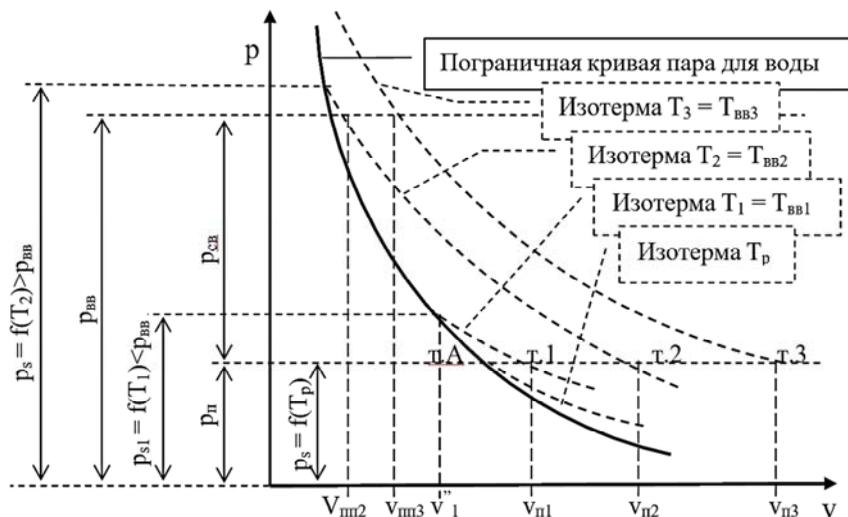


Рис. 1. Состояния водяного пара, находящегося во влажном воздухе, на термодинамической  $p$ - $v$ -диаграмме

Парциальное давление водных паров во влажном воздухе очень небольшое: для воздуха атмосферного давления оно не превышает нескольких килопаскаль. При таком давлении объем водяных паров чрезвычайно большой и именно в этом случае количественное изменение параметров всех реальных веществ описывается соотношениями идеального газа (на это обращалось внимание при изучении свойств реальных газов). Поэтому для влажного воздуха выполняются законы смеси идеальных газов, например, закон Дальтона

$$p_{ВВ} = p_{ск} + p_p,$$

где  $p_{\text{вв}}$  – давление влажного воздуха;

$p_{\text{ск}}, p_{\text{п}}$  – соответственно парциальные давления сухого воздуха и водяного пара.

Плотность влажного воздуха может быть определена по соотношению для идеально-газовой смеси

$$\rho_{\text{вв}} = \rho_{\text{ск}} + \rho_{\text{п}},$$

где плотности компонентов рассчитываются по уравнению состояния идеального газа

$$\begin{aligned}\rho_{\text{ск}} &= p_{\text{ск}} / (R_{\text{ск}} T_{\text{вв}}); \\ \rho_{\text{п}} &= p_{\text{п}} / (R_{\text{п}} T_{\text{вв}}).\end{aligned}\tag{1}$$

Газовые постоянные сухого воздуха и водяного пара определяются известными соотношениями для идеальных газов

$$\begin{aligned}R_{\text{ск}} &= R_{\mu} / \mu_{\text{ск}}; \\ R_{\text{п}} &= R_{\mu} / \mu_{\text{п}}.\end{aligned}$$

Молярные массы для воды  $\mu_{\text{п}} = 18,016$  кг/кмоль, для сухого воздуха  $\mu_{\text{ск}} \approx 28,95$  кг/кмоль.

Газовая постоянная влажного воздуха может быть рассчитана с помощью соотношений идеально-газовой смеси, если известен массовый или объемный состав

$$\begin{aligned}R_{\text{вв}} &= g_{\text{ск}} R_{\text{ск}} + g_{\text{п}} R_{\text{п}}. \\ R_{\text{вв}} &= R_{\mu} / (r_{\text{ск}} \mu_{\text{ск}} + r_{\text{п}} \mu_{\text{п}}).\end{aligned}\tag{2}$$

Однако, в отличие от обыкновенной смеси идеальных газов, во влажном воздухе возможны процессы, при которых

одна из его компонент (водяной пар) конденсируется, и вследствие чего изменяется масса паров воды в воздухе ( $m_{\text{п}}$ , кг). Другой компонент бинарной смеси (сухой воздух) при этом сохраняет постоянство своей массы ( $L$ , кг). Таким образом, процессы во влажном воздухе могут протекать с переменной массой водяных паров в нем и, следовательно, переменной массой самой компоненты воздуха ( $m_{\text{п}}$ ,  $m_{\text{вв}} = \text{var}$ ) при неизменной массе сухого воздуха во влажном воздухе ( $L = \text{const}$ ). Отмеченное обстоятельство объясняет отличия в способах задания состава влажного воздуха от смеси идеальных газов, а также определения его аддитивных параметров и в итоге появления специфических параметров, присущих влагосодержащим смесям. Их состав задают не к общей массе смеси, а к постоянной массе сухой компоненты ( $L$ ), а соответствующая массовая доля водяных паров в данной бинарной смеси «влажный воздух» называется влагосодержанием.

## **Основные понятия и характеристики влажного воздуха.**

### **Абсолютная и относительная влажности воздуха**

*Абсолютная влажность воздуха* ( $\rho_{\text{п}}$ , кг/м<sup>3</sup>) – масса водяного пара, содержащаяся в 1 м<sup>3</sup> смеси его с сухим воздухом.

Поскольку объем водяных паров во влажном воздухе равен объему всей смеси, абсолютная влажность оказывается равной плотности пара при его парциальном давлении и температуре воздуха

$$\rho_{\text{п}} = m_{\text{п}} / V_{\text{вв}} = m_{\text{п}} / V_{\text{п}}.$$

Если известны парциальное давление пара и температура воздуха, найти абсолютную влажность воздуха можно по таблицам свойств воды и водяного пара или соответствующим уравнениям состояния. Можно воспользоваться и соотношением (1).

**Относительной влажностью**  $\varphi$  называют отношение абсолютной влажности  $\rho_{\text{п}}$  к плотности насыщенного пара  $\rho_{\text{п}}''$  при той же температуре (а при температурах, больших температуры насыщения водяного пара при давлении влажного воздуха, – к плотности перегретого пара  $\rho_{\text{пп}}$  той же температуры и давления)

$$\varphi = \begin{cases} \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}''}, & \text{если } t \leq t_s(p_{\text{ВВ}}); \\ \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{пп}}}, & \text{если } t > t_s(p_{\text{ВВ}}). \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 1 даны примеры состояний паров воды во влажном воздухе, с помощью которых можно пояснить определение относительной влажности ( $v = 1 / \rho$ ):

$$\varphi_1 = v_1'' / v_{\text{п}1}, \quad \varphi_2 = v_{\text{пп}2} / v_{\text{п}2}, \quad \varphi_3 = v_{\text{пп}3} / v_{\text{п}3}.$$

Соотношение относительной влажности воздуха в состояниях т. 1–3 следующее:  $\varphi_1 > \varphi_2 = \varphi_3$ , что пока не очевидно. Для смеси идеальных газов отношение плотностей компонентов можно заменить отношением парциальных давлений, и тогда соотношение (3) можно преобразовать

$$\varphi = \begin{cases} \frac{p_{\text{п}}}{p_s}, & \text{если } t \leq t_s(p_{\text{ВВ}}); \\ \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{ВВ}}}, & \text{если } t > t_s(p_{\text{ВВ}}), \end{cases} \quad (4)$$

где  $p_{\text{п}}$ ,  $p_s$ ,  $p_{\text{ВВ}}$  – соответственно парциальное давление пара во влажном воздухе, давление насыщения воды при температуре влажного воздуха, давление влажного воздуха.

Используем рис. 1 еще раз для иллюстрации определения относительной влажности:

$$\varphi_1 = p_{\text{п}} / p_{s1}, \quad \varphi_2 = p_{\text{п}} / p_{\text{вв}}, \quad \varphi_3 = p_{\text{п}} / p_{\text{вв}}.$$

Теперь более очевидно соотношение  $\varphi_1 > \varphi_2 = \varphi_3$ .

Используя перечисленные параметры влажного воздуха, с учетом зависимости для идеально-газовых смесей  $p_j = r_j p_{\text{см}}$ , соотношение (2) преобразуется к виду

$$R_{\text{вв}} = \frac{R_{\mu}}{28,95 - 10,93 \frac{\varphi p_{s, \text{п}}}{p_{\text{вв}}}}.$$

Газовая постоянная влажного воздуха больше газовой постоянной сухого воздуха, поскольку кажущаяся молярная масса влажного воздуха уменьшается с увеличением влажности

$$\mu_{\text{вв}} = 28,95 - 10,93 \varphi \frac{p_{s, \text{п}}}{p_{\text{вв}}}.$$

**Влагосодержание воздуха.** *Влагосодержание воздуха*  $d$ , кг/кг, – масса водяного пара во влажном воздухе, приходящаяся на единицу (килограмм) массы сухой компоненты воздуха, содержащейся во влажном воздухе, то есть величина, определяемая соотношением  $m_n / L$ .

Иногда используется *молярное влагосодержание* ( $x$ , кмоль/кмоль)

$$x = N_{\text{п}} / N_{\text{ск}}, \quad (5)$$

где  $n_{\text{п}}$ ,  $n_{\text{св}}$  – соответственно число пара и сухого воздуха во влажном воздухе, моль.

Соотношение  $d$  и  $x$  получается весьма просто

$$x = \frac{m_{\Pi} / \mu_{\Pi}}{L / \mu_{\text{СК}}}.$$

Учитывая значения  $\mu_{\Pi}$  и  $\mu_{\text{СК}}$ , получаем

$$x \approx 1,61d;$$

$$d = 0,622x. \quad (6)$$

Поскольку для смеси идеальных газов отношение числа моль равно отношению парциальных давлений соответствующих компонентов, соотношение (5) можно переписать в виде

$$x = \frac{p_{\Pi}}{p_{\text{ВВ}} - p_{\Pi}}.$$

Тогда из (6) можно получить

$$d = \frac{0,622p_{\Pi}}{p_{\text{ВВ}} - p_{\Pi}} = \frac{0,622\varphi p_{s, \Pi}}{p_{\text{ВВ}} - \varphi p_{s, \Pi}}. \quad (7)$$

$$p_n = \frac{p_{\text{ВВ}} d}{0,622 + d}. \quad (8)$$

Очевидно, что влагосодержание воздуха определяется его давлением и температурой.

Соотношение между массовыми долями при задании бинарной смеси на общую массу и массовыми долями при определении той же смеси на массу сухой компоненты очевидно

$$g_{\text{СК}} = 1 / (1 + d);$$

$$g_{\Pi} = d / (1 + d).$$

Тогда (2) можно представить в виде

$$R = \frac{287 + 462d}{1 + d}. \quad (9)$$

*Изобарная теплоемкость и энтальпия влажного воздуха.* Удельная массовая теплоемкость влажного воздуха относится, как и влагосодержание, на килограмм сухого воздуха, содержащегося в нем. Изобарная теплоемкость определяется выражением, если известны изобарные теплоемкость сухого воздуха  $c_{p, \text{ск}}$  и теплоемкость пара  $c_{p, \text{п}}$

$$c_p = c_{p, \text{ск}} + c_{p, \text{п}} d.$$

В первом приближении можно принимать  $c_{p, \text{ск}} \approx 1$  кДж/(кг·К),  $c_{p, \text{п}} \approx 1,96$  кДж/(кг·К). Тогда для влажного воздуха при атмосферных условиях можно использовать

$$c_p \approx 1 + 1,96d. \quad (10)$$

Аналогично определяется энтальпия влажного воздуха

$$h_{\text{вв}} = h_{\text{св}} + h_{\text{п}} d. \quad (11)$$

Энтальпия перегретого пара определяется, как известно, тремя слагаемыми: энтальпией насыщенной жидкости, теплотой парообразования и теплотой перегрева пара

$$h_{\text{п}} \approx 4,187t_s + r + c_{p, \text{п}}(t - t_s). \quad (12)$$

В интервале температур 0–100 °С с точностью, приемлемой в инженерных расчетах, можно принимать

$$r \approx 2501 - 2,3t_s, \text{ кДж/кг}. \quad (13)$$

С учетом всех приведенных соотношений можно записать

$$h_{\text{п}} \approx 2501 + 1,96t; \quad (14)$$

$$h_{\text{вв}} \approx t + (2501 + 1,96t)d. \quad (15)$$

В итоге получаем выражение для расчета энтальпии влажного воздуха при давлениях, близких к атмосферному

$$h_{\text{вв}} = t + (1556 + 1,22t) \frac{\varphi p_{s, \text{п}}}{p_{\text{вв}} - \varphi p_{s, \text{п}}}.$$

### **Температуры точки росы, сухого и мокрого термометров влажного воздуха**

С влажным воздухом связаны, и это важно, три понятия температуры:

1. **Температура сухого термометра**  $t_c$  – собственно температура влажного воздуха, которую фиксирует термометр, имеющий сухую поверхность.

2. **Температура точки росы**  $t_p$  – температура ненасыщенного влажного воздуха, при которой он становится насыщенным влажным воздухом. Например, при изобарном охлаждении влажного воздуха с понижением температуры наступает момент, когда пар переходит в состояние насыщения (рис. 1, т. А). Температура воздуха, соответствующая данному состоянию, и есть  $t_p$ , то есть это температура насыщения воды  $t_s$  при давлении, равном парциальному давлению пара во влажном воздухе.

3. **Температура мокрого термометра**  $t_m$  – температура, регистрируемая термометром, датчик которого смочен водой.

Разница показаний термометров объясняется тем, что с поверхности датчика мокрого термометра, находящегося в ненасыщенном влажном воздухе, испаряется вода и образующиеся пары переносятся в воздух. Интенсивность процесса фазового перехода протекающего с водой, сопровождающего рассмат-

риваемый процесс переноса влаги с поверхности термометра в окружающую среду, пропорциональна разности  $p_s - p_n$ . Здесь  $p_s$  – парциальное давление водяного пара у влажной поверхности в тонком слое над поверхностью жидкости, равное давлению насыщения, соответствующего температуре жидкости;  $p_n$  – парциальное давление водяного пара в окружающем влажном воздухе. Если во влажном воздухе парциальное давление водяных паров  $p_n$  меньше  $p_s$ , что имеет место для ненасыщенного влажного воздуха, происходит испарение влаги, интенсивность которого определяется разностью, то есть влагосодержанием и температурой воздуха. В более сухом воздухе  $p_n$  ниже и испарение более сильное. В более нагретом воздухе  $p_s$  выше и испарение также более интенсивное.

Для процесса испарения, как для любого фазового перехода первого рода, требуется подвод энергии в форме теплоты, в данном случае теплоты парообразования, источником которой, в первую очередь, является жидкость, находящаяся на поверхности датчика температур. Очевидно, что указанный отвод теплоты на испарение приводит к снижению температуры источника энергии, которым в данном случае является вода и термометр, на датчике которого она находится, также снижает свою температуру до некоторого значения  $t_m$ , получившей название *температура мокрого термометра*. Понижение температуры жидкости  $t_m$  ниже температуры окружающей среды  $t_{вв}$  вызывает процесс подвода теплоты к жидкости извне, пропорциональный разности температур  $t_c - t_m$ , получившей название *психрометрической разности температур*. В итоге блокируется дальнейшее снижение температуры, связанное с затратами энергии на испарение, поскольку наступает динамическое равновесие между процессами испарения воды, сопровождающимся снижением температуры слоя воды и подводом теплоты к последнему от окружающей среды с более высокой температурой  $t_{вв}$ . Видно, что в ходе рассмотренного процесса тепло- и влагообмена энтальпия влажного воздуха остается неизменной, поскольку

отведенная от воздуха тепловая энергия возвращается обратно в воздух в виде внутренней энергии водяных паров. Рассматриваемый процесс испарения в этом случае условно называют адиабатическим. Если по каким-либо причинам к мокрому термометру извне не будет притока теплоты, то температура слоя воды на его поверхности снизится до температуры точки росы  $t_p$ , равной температуре насыщения воды при данном парциальном давлении водяных паров  $p_n$  во влажном воздухе.

Таким образом, в определенный момент наступает равновесие между приходом теплоты от воздуха и расходом теплоты на испарение влаги, в результате температура мокрой поверхности термометра устанавливается на постоянном значении. Эту температуру, более низкую, чем температура сухого термометра, и регистрирует прибор. Температура, соответствующая наступлению равновесия процессов тепло- и массообмена между влажным воздухом и смоченным термометром, называется температурой мокрого термометра. Ее можно рассчитать из уравнения баланса теплоты протекающих процессов, в котором поступление энергии в форме теплоты в количестве  $(t_{c,1} - t_{c,2})(c_{p,ск} + c_{p,п}d)$  обеспечивается процессом охлаждения воздуха от начальной температуры  $t_{c,1}$  до конечной, численно равной температуре мокрого термометра  $t_{c,2} = t_m$  при его увлажнении за счет поступающей влаги в количестве  $d_m - d$ , на испарение которой расходуется энергия в количестве  $(d_m - d)r$ , что и приводит к охлаждению воздуха. В итоге получаем искомое выражение

$$t_m = t_c - \frac{r_m(d_m - d)}{c_{p,ск} + c_{p,п}d}, \quad (16)$$

где  $r_m$ ,  $d_m$  – соответственно теплота парообразования воды и влагосодержание насыщенного влажного воздуха при температуре, равной температуре мокрого термометра.

В ненасыщенном влажном воздухе ( $\varphi < 100\%$ ) имеет место соотношение  $t_p < t_m < t_c$ , а в насыщенном ( $\varphi = 100\%$ ) —  $t_p = t_m = t_c$ .

Температура мокрого термометра близка к температуре адиабатного насыщения воздуха, которая используется при расчете систем оборотного водоснабжения, кондиционирования, вентиляции, сушки и пр., то есть там, где протекает тепло- и массоперенос между потоком воздуха и поверхностью воды.

Влагосодержание  $d_n$  в состоянии насыщения определяется соотношением (7) при  $\varphi = 1$

$$d_n = \frac{0,622p_{s,п}}{p_{вв} - p_{s,п}}$$

*hd*-диаграмма влажного воздуха приведена на рис. 2.

Вышеприведенные формулы достаточно громоздки в расчетах, что объясняет широкое распространение *hd*-диаграммы влажного воздуха в инженерной практике. Кроме того, она полезна при рассмотрении физической картины протекающих процессов. В 1918 г. *hd*-диаграмму предложил профессор МВТУ Л. К. Рамзин. Она построена для одного постоянного давления влажного воздуха, обычно 745 мм рт. ст., которое является среднегодовым для средневропейской части континента. По оси абсцисс откладывается влагосодержание  $d$  (см. рис. 2). Для лучшего использования площади листа диаграмма построена в косоугольных координатах и другая ось проведена под углом  $135^\circ$  к оси абсцисс. Эта ось и представляет энтальпию влажного воздуха  $h$  (отнесенную к килограмму сухой компоненты). Начало координат совпадает с точкой, соответствующей состоянию воздуха  $t_c = 0^\circ\text{C}$ ,  $d = 0$  кг/кг,  $h = 0$  кДж/кг. На координатной сетке изолиний  $d = \text{const}$ ,  $h = \text{const}$  наносятся изолинии относительной влажности  $\varphi = \text{const}$ , изотермы сухого термометра  $t_c = \text{const}$ , изотермы мокрого термометра  $t_m = \text{const}$ . Шкала  $t_m$ , как таковая, с целью разгрузки диаграммы,

отсутствует. Для отсчета значений  $t_M$  используется шкала  $t_c$ , поскольку на линии  $\varphi = 100\%$   $t_c = t_M$ . В ряде диаграмм изолинии  $t_M = \text{const}$  не нанесены, в этом случае можно считать, что они совпадают с изолиниями  $h = \text{const}$ .

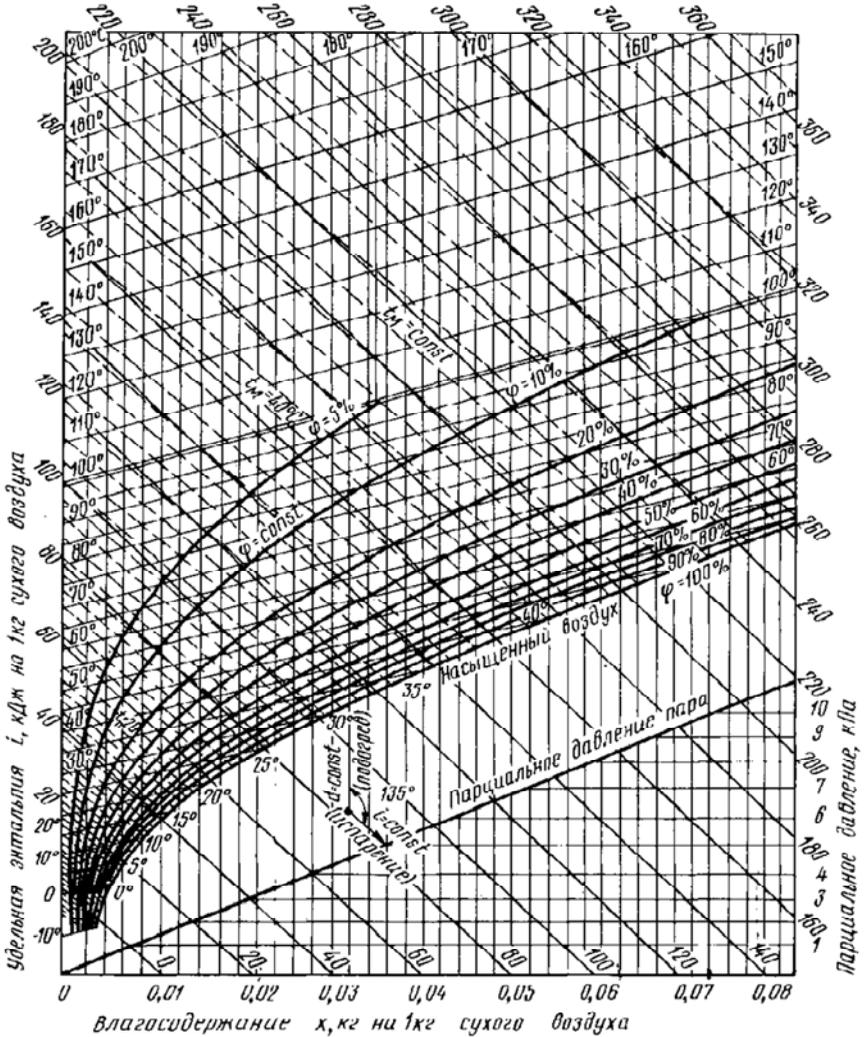


Рис. 2.  $hd$ -диаграмма влажного воздуха

Все перечисленные изолинии наносятся согласно расчетам по рассмотренным выше формулам состояний влажного воздуха, водяного пара. Кривая  $\varphi = 100\%$  является пограничной. Точки на ней соответствуют состояниям насыщенного влажного воздуха. Выше линии  $\varphi = 100\%$  лежит область ненасыщенного влажного воздуха, ниже – зона, которая нами не рассматривается.

Изобары парциального давления, как это следует из соотношения (8), совпадают с изолиниями  $d = \text{const}$ . Для удобства отсчета шкала изолиний  $d = \text{const}$  с помощью известного в черчении приема параллельно перенесена на правый обрыв диаграммы. Для этого из начала координат под углом, определяющим протяженность отрезка шкалы, проведена прямая, которую назовем «прямая парциального давления паров воды». Для нахождения  $p_{\text{п}}$  по вертикали необходимо опуститься до этой прямой, получить точку и затем напротив этой точки, справа на шкале, отсчитать соответствующее значение  $p_{\text{п}}$ .

Изолинии  $\varphi = \text{const}$  при температуре  $t_c > 99,4\text{ }^\circ\text{C}$ , что соответствует температуре насыщения воды при давлении 745 мм рт. ст., идут вертикально. При более низких температурах они являются восходящими, выпуклыми кривыми. Это следует из определения  $\varphi$  и соотношения (4).

Если давление влажного воздуха отличается от давления, для которого построена  $hd$ -диаграмма, и этим отличием нельзя пренебречь, описанную диаграмму можно использовать для расчетов и анализа. В этом случае необходимо пересчитать все значения изолиний  $\varphi = \text{const}$ . Из формулы (7) несложно убедиться

$$\varphi / p_{\text{вв}} = 0,617 d / p_s. \quad (17)$$

В каждом состоянии воздуха, соответствующем  $d = \text{const}$ ,  $p_s = \text{const}$ , из (17) следует  $\varphi / p_{\text{вв}} = \text{const}$ . Таким образом, изменение  $p_{\text{вв}}$  изменяет значение  $\varphi$ , определить новое значение изолиний можно, например, по уравнению

$$\varphi_H = \varphi_{745} p_{\text{вв},H} / 745, \quad (18)$$

где  $\varphi_{745}$  – значение изолинии относительной влажности в существующей стандартной диаграмме;

$p_{\text{вв},H}$  – новое давление влажного воздуха в мм рт. ст.

### Основные процессы изменения состояния влажного воздуха

В практической деятельности часто встречаются процессы изобарного нагрева и охлаждения, увлажнения и осушки, а также смешения. Рассмотрим их построение в  $hd$ -диаграмме и расчет с ее помощью (рис. 3).

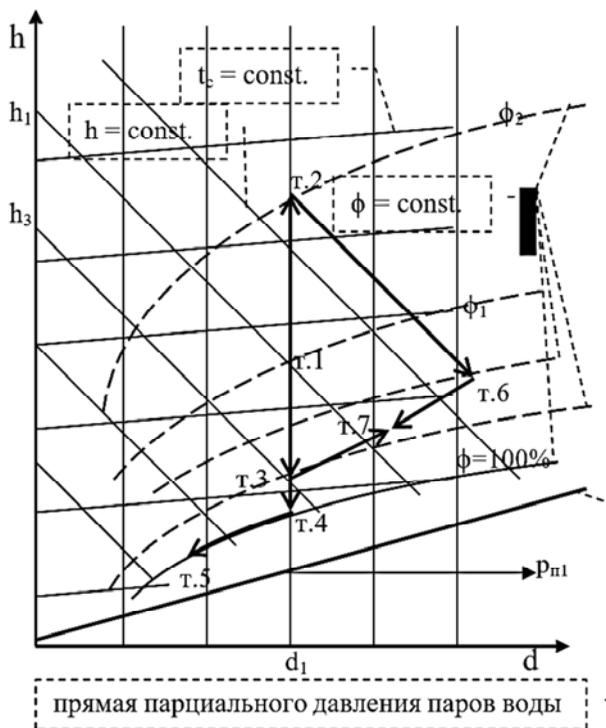


Рис. 3. Основные процессы изменения состояния влажного воздуха

Процессы изобарного нагревания и охлаждения влажного воздуха протекают при постоянном влагосодержании  $d = \text{const}$ , что определяет их построение в  $hd$ -диаграмме. Процесс 1–2 – процесс нагревания направлен вверх, 1–3 – процесс охлаждения воздуха направлен в низ диаграммы. Теплота процесса нагревания влажного воздуха 1–2, содержащего  $L$  кг сухого воздуха,

$$Q = L(h_2 - h_1).$$

Теплота процесса охлаждения влажного воздуха 1–3, содержащего  $L$  кг сухого воздуха,

$$Q = L(h_1 - h_3). \quad (19)$$

Постоянство влагосодержания в процессе охлаждения будет лишь при условии  $t_c > t_p$  (процесс 1–3), то есть при охлаждении ненасыщенного влажного воздуха. После достижения состояния т. 4 насыщенного влажного воздуха ( $t_c = t_p$ ) картина изменяется: дальнейшее охлаждение сопровождается конденсацией пара, влагосодержание воздуха уменьшается, процесс (на диаграмме процесс 4–5) протекает по линии  $\varphi = 100\%$  и является одновременно процессом осушки влажного воздуха. Количество отводимой теплоты

$$Q = L(h_4 - h_5). \quad (20)$$

Количество отводимой воды ее сконденсировавшихся паров

$$\Delta m_{\text{п}} = L(d_4 - d_5).$$

Общее количество теплоты процесса 1–5

$$Q = L(h_1 - h_5). \quad (21)$$

Увлажнение влажного воздуха можно провести, если воздух ненасыщенный. Механизм процесса адиабатного (без теплообмена с источниками теплоты) увлажнения воздуха рассматривался при ознакомлении с понятием температуры мокрого термометра. Изложенная картина процесса свидетельствует, что при его протекании температура поверхности воды не изменяется и равна температуре адиабатного насыщения воздуха  $t_a$ . Энергия, подведенная из воздуха на испарение воды, возвращается назад в воздух с образовавшимся водяным паром. Таким образом, процесс изобарного, адиабатного увлажнения воздуха одновременно и изоэнтальпический  $h = \text{const}$  (рис. 3, процесс 2–6). Количество испаренной влаги определяется соотношением

$$\Delta m_{\text{п}} = L(d_{\text{к}} - d_{\text{н}}) = L(d_6 - d_2). \quad (22)$$

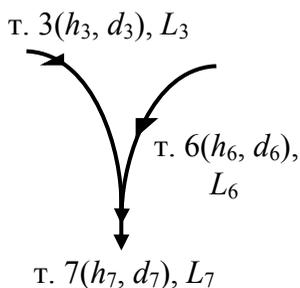


Рис. 4. Смешение потоков влажного воздуха

Смешение потоков влажного воздуха, для каждого из которых известно:  $t_6(L_6, h_6, d_6)$  и  $t_3(L_3, h_3, d_3)$ . Результирующий поток  $t_7(L_7, h_7, d_7)$ . Схема, поясняющая процесс, приведена на рис. 4.

Для процесса смешения двух потоков влажного воздуха запишем балансовые уравнения: баланса энергии (23), массовых балансов влаги (24) и сухой компоненты влажного воздуха (25)

$$L_3 h_3 + L_6 h_6 = L_7 h_7; \quad (23)$$

$$L_3 d_3 + L_6 d_6 = L_7 d_7; \quad (24)$$

$$L_3 + L_6 = L_7. \quad (25)$$

Решение системы уравнений (23)–(25) позволяет записать

$$\frac{L_3}{L_3 + L_6} = \frac{d_6 - d_7}{d_6 - d_3} = \frac{h_6 - h_7}{h_6 - h_3} = \frac{[3-7]}{[3-6]}, \quad (26)$$

или

$$\frac{L_6}{L_3 + L_6} = \frac{d_7 - d_3}{d_6 - d_3} = \frac{h_7 - h_3}{h_6 - h_3} = \frac{[6-7]}{[3-6]}. \quad (27)$$

На  $hd$ -диаграмме линия процесса смешения представляет собой прямую, соединяющую точки, соответствующие состояниям смешивающихся потоков. Точка, соответствующая состоянию результирующего потока, делит отрезок  $[3-6]$  на пропорциональные части  $[3-7]$  и  $[6-7]$

$$\frac{L_6}{L_3} = \frac{[3-7]}{[7-6]}.$$

## Лабораторная работа № 12

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

*Цель работы:* закрепление сведений об основных состояниях влажного воздуха, его термодинамических параметрах и уравнениях, измерениях и расчетах характеристик влажного воздуха.

*Задание:* ознакомиться с устройством экспериментальной установки, принципом действия средств измерения.

Провести эксперимент, в ходе которого определить:

– температуры сухого и мокрого термометров с помощью психрометров в различных точках: в лаборатории, например, на уровне пола, стола, а также в коридоре и на лестничной клетке;

– состояние влажного воздуха в соответствии с полученными экспериментальными данными с помощью *hd*-диаграммы, соответствующих компьютерных программ, полученных у преподавателя, и сравнить их между собой и с данными об относительной влажности согласно психрометрическим таблицам, прилагаемым к приборам;

– все недостающие параметры влажного воздуха для каждой из точек измерения, предварительно выбрав представительный результат.

Рассчитать параметры влажного воздуха, если его давление уменьшится (увеличится) в 1,1 раза.

### Описание установки

Для определения состояния влажного воздуха, находящегося при атмосферном давлении, кроме его давления, требуется знать дополнительно два параметра. В качестве последних может быть любая пара из набора  $d$ ,  $t_c$ ,  $t_m$ ,  $t_p$ ,  $h$ ,  $p_p$ ,  $\varphi$ , кроме любого сочетания из набора «влагосодержание, температура точки росы, парциальное давление паров воды». Данное огра-

нение вытекает из соотношения (8), на основании которого следует, что  $d$  и  $p_n$  связаны однозначно: то или иное значение одного из них однозначно определяет значение второго при различных состояниях влажного воздуха. Данная ситуация имеет место и при других сочетаниях аргументов.

После определения состояния влажного воздуха расчетным способом находят другие требуемые характеристики.

Наиболее распространенный метод определения состояния влажного воздуха базируется на использовании психрометра. Психрометрический метод определения состояния влажного воздуха основан на работах Рихмана – русского ученого XVIII в., который установил, что если датчик термометра, находящегося в ненасыщенном влажном воздухе смочить, то термометр (будем называть его «мокрый») покажет более низкую температуру, чем термометр, датчик которого не смочен какой-либо жидкостью (такой термометр будем называть «сухой»). Соответствующий материал изменен при рассмотрении понятий температур сухого, мокрого термометра и точки росы.

Для измерений температур сухого и мокрого термометра при проведении работы используются психрометры Августа и Ассмана (рис. 12.1). Последний еще называют аспирационным психрометром. У психрометров один из термометров сухой, другой – мокрый.

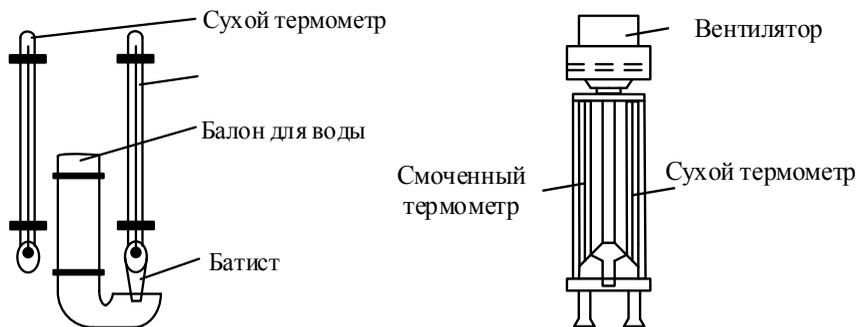


Рис. 12.1. Общий вид психрометров Августа (слева) и Ассмана (справа)

Психрометр Августа несовершенен, это связано с тем, что:

1. Термометры не защищены от теплового воздействия окружающих поверхностей, температура которых может отличаться от температуры сухого и, наверняка, от температуры мокрого термометра.

2. Температура термометрической жидкости в термометре по высоте неодинакова, и поэтому возникает теплообмен между различными частями самого термометра.

3. Скорость воздуха, омывающего смоченную поверхность термометра, влияет на величину  $t_c - t_m$ .

На процесс испарения влияет барометрическое давление, для учета которого следует вводить поправку  $B/B_0$ , где  $B_0 = 101325$  Па.

Психрометр Ассмана – более совершенный прибор. Оба его термометра заключены в металлические отполированные трубки, по которым проходит исследуемый воздух со скоростью 2,5–3,0 м/с, что делает пробу воздуха более представительной, поскольку исключает появление застойных локальных зон, характерных для психрометра Августа. Движение воздуха вдоль термометров в психрометре Ассмана обеспечивает вентилятор, который является неотъемлемой частью конструкции. Сами термометры имеют более высокий класс точности и более точную шкалу для отсчета показаний. Обратите внимание на двойные экраны, расположенные коаксиально вокруг датчиков термометров, предназначенные для снижения искажений измерений температуры воздуха, связанные с теплообменом излучением между датчиками температуры и окружающими предметами. Каждый из экранов примерно в два раза снижает тепловое излучение от окружающих предметов, имеющих температуру, отличную от температуры воздуха (например, наружная стена помещения и пр.). Наружный экран с той же целью снижения теплообмена отполирован излучением. Таким образом, показания психрометра Ассмана более

точные, чем у психрометра Августа. Для смачивания датчика мокрого термометра прилагается специальная пипетка.

### Порядок проведения работы

1. Все действия выполняются с разрешения преподавателя.
2. Измерьте барометрическое давление с помощью барометра, находящегося в лаборатории.
3. Наберите воду в пипетку и смочите датчик мокрого термометра Ассмана.
4. Заведите пружину привода вентилятора в случае механического привода или подключитесь к электросети в случае электропривода.
5. Проводя последовательно замеры показаний мокрого термометра, определите наличие установившегося режима и проведите измерения.
6. В каждой точке измерения проводятся разными наблюдателями самостоятельно. Полученные результаты заносятся в таблицу для дальнейшей обработки результатов. В качестве шаблона таблицы можно использовать табл. 12.1.

Таблица 12.1

### Результаты наблюдений

№ п/п	Место снятия показа- ний	Показания психрометров					
		Августа			Ассмана		
		$t_c$ , °C	$t_m$ , °C	$\varphi$ , %, из пси- хрометриче- ских таблиц	$t_c$ , °C	$t_m$ , °C	$\varphi$ , %, из пси- хрометриче- ских таблиц
1	2	3	4	5	6	7	8

## Обработка результатов с помощью $hd$ -диаграммы

По замеренным значениям температур сухого  $t_c$  и мокрого  $t_m$  термометров на  $hd$ -диаграмме находится точка, соответствующая состоянию влажного воздуха в месте замеров. Схема построений и определения параметров влажного воздуха приведена на рис. 12.2. Результаты заносятся в табл. 12.2. Парциальное давление сухой компоненты влажного воздуха  $p_{ск}$  определяется как разность давления влажного воздуха  $p_{вв}$  и парциального давления водяных паров  $p_{п}$ .

$$p_{вв} = 745 \text{ мм рт.ст.}$$

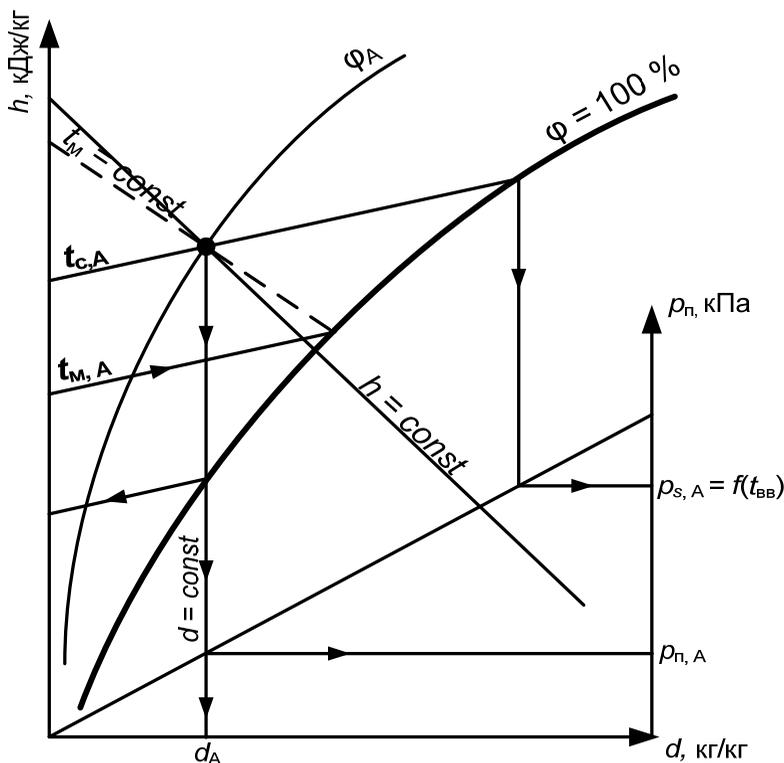


Рис. 12.2. Схема построений для нахождения состояния и параметров влажного воздуха по показаниям сухого  $t_c$  и мокрого  $t_m$  термометров

Если давление влажного воздуха значительно отличается от того, для которого построена  $hd$ -диаграмма (745 мм рт. ст.), для использования имеющейся диаграммы требуется по соотношению (18) пересчитать значения относительной влажности, которые будут соответствовать имеющимся изолиниям  $\varphi = \text{const}$ , а затем проделать все построения для изменившихся изолиний  $\varphi$  и  $t_m$ . Прочие изолинии сохраняют свои значения.

### Обработка с помощью программных комплексов

Подобные манипуляции с диаграммами трудоемки, поэтому целесообразно использовать соответствующие программы ПК для расчета свойств влажного воздуха. Результаты расчета свести в табл. 12.2.

Таблица 12.2

#### Результаты обработки экспериментов

№ п/п	Место снятия показаний	Температура, °С			Относительная влажность	Влагосодержание	Давление, кПа			
		воздуха	мокрого термометра	точки росы			парциальное пара	парциальное сухой компо- ненты	насыщения	влажного воздуха
		$t_c$	$t_m$	$t_p$			$\varphi$ , %	$d$ , г/кг	$p_p$	$p_{ск}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Данные расчетов из $hd$ -диаграммы										
Данные расчетов программного комплекса										
Данные расчетов по формулам										

Относительная влажность рассчитывается также по соотношению (4), влагосодержание – по соотношению (7), энтальпия влажного воздуха – по соотношениям (11)–(15), изобарная удельная массовая теплоемкость – по соотношению (10), температура мокрого термометра – по соотношению (16), давление насыщения воды при температуре влажного воздуха и температура точки росы, представляющая собой температуру насыщения воды при давлении, равном парциальному давлению водяного пара во влажном воздухе, находится по таблицам воды в состоянии насыщения или по соответствующему программному комплексу.

В заключение с помощью психрометрической таблицы требуется найти относительную влажность воздуха  $\phi$  для его состояний в экспериментах. Относительная влажность  $\phi$  является одной из основных характеристик влажного воздуха, для определения которой, кроме рассмотренного способа, используют различные методы: психрометрический, гигроскопический, точки росы, весовой и пр.

Гигроскопический метод основан на способности некоторых материалов изменять свою влажность и приводить ее в состояние равновесия с окружающим влажным воздухом. Изменение влажности гигроскопического материала сопровождается изменением его свойств, например, электропроводности. Обезжиренный человеческий волос, древесное волокно, капроновая нить и др. при изменении влажности воздуха деформируются, что отражает движение стрелки гигрометра. Его шкала градуирована в величинах  $\phi$ . Используются различные гигрометры, например, с использованием гигроскопической соли LiCl. Когда воздух сухой, то соль не проводит электрический ток. При повышении влажности воздуха соль насыщается влагой и становится проводником. Чем больше влаги абсорбируется солью, тем выше проводимость, которую нетрудно связать с влажностью воздуха. Для определения влажности воздуха методом точки росы применяют гигрометр, состоящий из термо-

метра, датчик которого заключен в металлический резервуар. Наружная поверхность резервуара отполирована, в связи с чем такой гигрометр называют зеркальным, свободное пространство резервуара заполнено эфиром. В его верхнюю крышку впаяны две трубки, одна из которых не достигает дна. В трубку нагнетается воздух. Пузырьки воздуха вызывают интенсивное испарение эфира и, следовательно, его охлаждение. Воздух, прошедший через слой эфира, и пары эфира выходят через другую трубку. Когда температура наружной поверхности резервуара понизится до значения температуры точки росы  $t_p$  воздуха, на поверхности образуются капли конденсата, выпавшего из воздуха, что приводит к помутнению отполированной поверхности цилиндра и визуально на зеркальной поверхности он легко фиксируется. Показания термометра в момент начала затуманивания отполированной поверхности соответствуют температуре точки росы  $t_p$ . Далее несложно определить состояние влажного воздуха, поскольку в распоряжении оказываются две температуры: сухого термометра и точки росы. Метод точки росы менее точен, чем психрометрический.

Весовой метод является наиболее точным, но трудоемким. Исследуемый воздух просасывается вентилятором через несколько последовательно соединенных U-образных трубок, заполненных гигроскопическим веществом (хлористым кальцием, фосфорным ангидридом). Трубки с наполнителем предварительно взвешивают. Затем после прохождения воздуха их снова взвешивают. Разность масс обоих взвешиваний и есть количество водяного пара, содержащегося в пропущенном через трубки объеме воздуха, который измеряется газовым счетчиком. Ограничение связано с выполнением условия, при котором исключается проскок неосушенного воздуха через гигроскопический слой. Абсолютная влажность воздуха определяется из отношения

$$\rho_{\text{п}} = (m_2 - m_1) / V, \text{ кг/ м}^3,$$

где  $m_2, m_1$  – соответственно результаты взвешиваний конечного и начального, кг;

$V$  – объем воздуха, прошедшего через трубки, м<sup>3</sup>.

Для анализа полученных результатов в ходе выполнения работы следует провести ряд вычислений, позволяющих установить связь между найденными характеристиками и сделать вывод о степени достоверности полученных результатов.

### Вопросы для самопроверки

1. Какой воздух называется влажным насыщенным, ненасыщенным?
2. В каком состоянии находятся водяные пары в насыщенном и ненасыщенном влажном воздухе?
3. Какой влажный воздух называется туманом, изморозью?
4. Что определяет влагосодержание и в чем его особенность?
5. Как по влагосодержанию определить массовый состав влажного воздуха на общую массу?
6. Как по влагосодержанию определить объемный состав влажного воздуха и абсолютную и относительную влажность?
7. Какие преимущества и как обеспечиваются в психрометре Ассмана перед психрометром Августа?
8. Какие методы измерения влажности воздуха существуют?
9. Как с помощью температуры точки росы определить относительную влажность воздуха?
10. Что представляет и от чего зависит психрометрическая разность температур?
11. Как построена  $hd$ -диаграмма? Дайте схему определения параметров влажного воздуха с помощью  $hd$ -диаграммы? Почему в  $hd$ -диаграмме изолинии  $\varphi = \text{const}$  изменяют ход при пересечении температуры 100 °С?
12. Как рассчитываются изобарная теплоемкость и энтальпия влажного воздуха? В чем особенности использования

удельных массовых энтальпии и изобарной теплоемкости, с чем они связаны?

13. Рассчитайте массу влажного воздуха, сухой компоненты и водяных паров в воздухе данной учебной лаборатории при параметрах влажного воздуха, полученных в опыте.

14. Определите предельное количество водяных паров, которое может быть во влажном воздухе данной лаборатории.

15. Как соотносятся температуры точки росы, мокрого и сухого термометров во влажном ненасыщенном и насыщенном воздухе?

16. Какие составляющие энтальпии влажного воздуха вы знаете?

17. Найдите энтальпию сухой компоненты влажного воздуха.

18. Из каких составляющих состоит энтальпия насыщенного пара и в каких состояниях влажного воздуха она встречается?

19. Из каких составляющих состоит энтальпия перегретого пара и в каких состояниях влажного воздуха есть данное состояние воды?

20. За счет каких конструктивных особенностей обеспечиваются более точные измерения с помощью психрометра Ассмана?

21. Как использовать  $hd$ -диаграмму при давлении влажного воздуха, отличном от того, для которого она построена?

22. Известна температура влажного насыщенного воздуха. Как с помощью таблиц воды и водяного пара найти парциальное давление водяных паров в указанном состоянии влажного воздуха?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

### ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

*Цель работы:* закрепление сведений об основных процессах влажного воздуха, изменениях его термодинамических параметров в ходе процессов, измерениях и расчетах характеристик влажного воздуха и процессов, протекающих с ним.

*Задание:*

1. Ознакомиться с устройством экспериментальной установки, принципом действия средств измерения.

2. Провести эксперимент, в ходе которого реализуются следующие процессы во влажном воздухе:

- нагрев влажного воздуха;
- увлажнение влажного воздуха:
  - адиабатное;
  - с отводом теплоты от влажного воздуха;
- смешение потоков влажного воздуха.

#### Описание установки

Установка (рис. 13.1) предназначена для изучения кинетики сушки капиллярно-пористых материалов при конвективном способе подвода теплоты и состоит из следующих узлов: рабочей сушильной камеры 1, трубопроводов 2, блока вентилятора 3, теплообменника 4, устройства для установки исследуемого образца 5, нагревателя 6 и стойки 7. В качестве сушильного агента в сушильной установке используется воздух, с которым в ходе сушки испытуемого образца можно наблюдать все указанные процессы влажного воздуха в соответствующих устройствах. Трубопроводы 2–7 для транспортировки влажного воздуха между составными устройствами установки выполнены из алюминиевых труб с внутренним диаметром 100 мм.

Для снижения рассеяния тепловой энергии в окружающей среде трубопроводы теплоизолированы. Побудителем перемещения потока влажного воздуха является вентилятор 8.

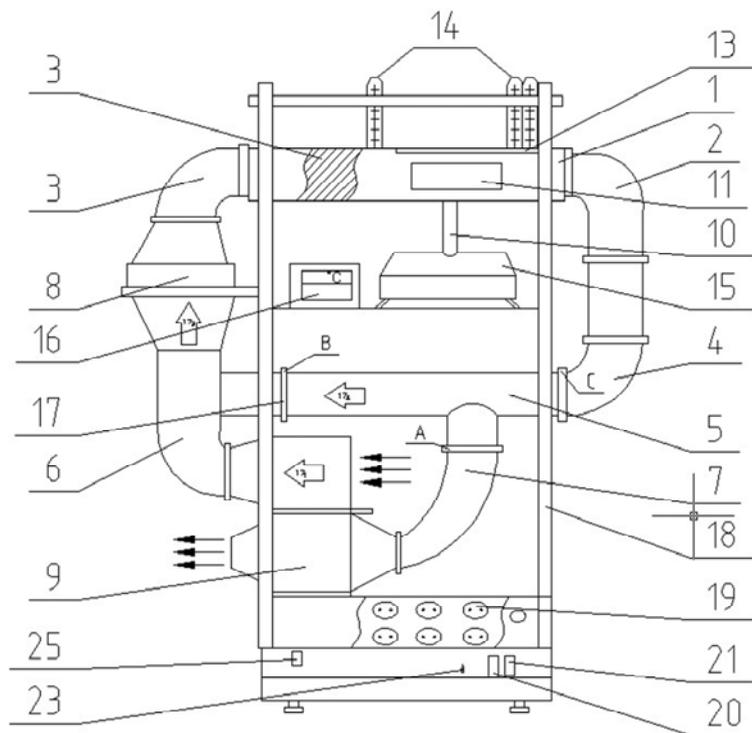


Рис. 13.1. Установка для исследования процессов влажного воздуха и кинетики сушки:

1 – камера увлажнения; 2–7 – трубопроводы; 8 – блок вентилятора; 9 – теплообменник охлаждения удаляемого из установки воздуха и первой ступени нагрева поступающего в установку воздуха; 10 – устройство для установки образца; 11 – окно для установки образца; 12 – нагреватель электрический; 13 – окно для установки термометров; 14 – термометры психрометров; 15 – весы; 16 – термоизмерительный прибор; 17 – заслонки; 18 – стойка; 19 – розетки; 20, 21 – автоматические выключатели; 23 – переключатель режима работы вентилятора; 24 – переключатель режима работы нагревателя; 25 – разъем силовой; A, B, C – заслонки

Все узлы установки смонтированы на стойке 16. В ее нижней части на панели размещены автоматические выключатели, розетки, переключатель режимов работы вентилятора. На полке установлены весы 15 и термоизмерительный прибор. Переключатели режимов работы нагревателя 24 смонтированы слева на боковой панели стойки.

**Увлажнение воздуха** протекает в сушильной камере 1, которая выполнена из нержавеющей стали в виде прямоугольного короба. Камера имеет окно для установки влажного образца 11, который в ходе сушки обеспечивает требуемое увлажнение воздуха, окно для нагревателя 12 и окно для термометров и бачка для увлажнения мокрого термометра 13. Устройство (рис. 13.2) для установки увлажнения воздуха (высушиваемого образца) состоит из металлического крестообразного каркаса 1, опорной трубки 2 и площадки 3 для установки формы 4 с источником испаряемой влаги (сушимым образцом) 5.

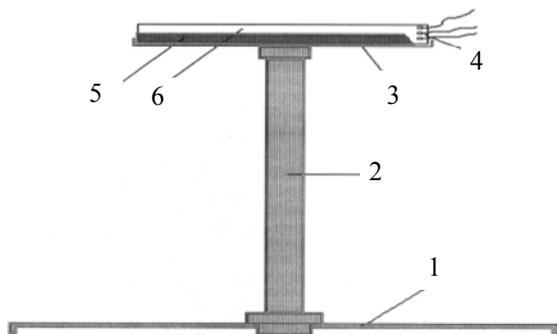


Рис. 13.2. Устройство для установки увлажнителя воздуха:  
1 – каркас; 2 – стойка; 3 – площадка; 4 – термометры; 5 – коробка;  
6 – сушимый материал, являющийся увлажнителем

**Нагрев и охлаждение воздуха.** Нагрев влажного воздуха происходит в двух теплообменниках, причем в одном из них протекает нагрев одного потока влажного воздуха за счет охлаждения другого потока влажного воздуха, то есть имеет место и нагрев, и охлаждение. Нагрев влажного воздуха на

этом не заканчивается, то есть имеет место двухступенчатый нагрев потока в установке.

*Первая ступень* нагрева представлена теплообменником 9, в котором происходит нагрев потока влажного воздуха, поступающего в установку за счет охлаждения потока воздуха, удаляемого из установки. Теплообменник включает в себя восемь алюминиевых тепловых труб (рис. 13.3), заполненных теплоносителем под давлением, которое обеспечивает фазовый переход «жидкость–пар» при температурах, имеющих место в потоках влажного воздуха в установке. С одного конца труб (испарительная часть) подводится энергия в форме теплоты к теплоносителю через стенку трубы от удаляемого из установки воздуха, происходит кипение теплоносителя и образование потока пара. С другого конца трубы (конденсационная часть) имеет место отвод тепловой энергии от теплоносителя через стенку трубы, что обеспечивает конденсацию поступающего сюда из испарительной части парового потока.

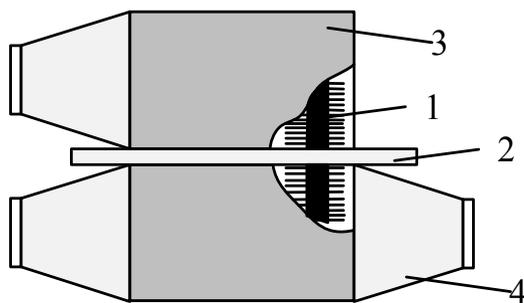


Рис. 13.3. Теплообменник регенерации теплоты: нагрев воздуха, поступающего в установку за счет охлаждения удаляемого воздуха из установки:

1 – тепловая труба; 2 – трубная доска; 3 – кожух теплообменника; 4 – раструбы входные и выходной

Температура теплоносителя в обеих частях тепловой трубы одинакова и определяется давлением в ее объеме, что сводит к нулю внутреннее термическое сопротивление данной тепло-

передающей системы и снижает требуемые размеры теплопередающего устройства. Для увеличения теплоотдачи от конденсационной части к поступающему воздуху и к испарительной части от удаляемого воздуха тепловые трубы имеют ребрение, что увеличивает поверхность, участвующую в процессе теплоотдачи. По длине тепловые трубы разделены трубной доской 2, отделяющей охлаждаемый и нагреваемый потоки воздуха, в соответствии с их испарительной и конденсационной частью. Испарительная и конденсаторная части тепловых труб заключены в металлический корпус.

*Вторая ступень* нагрева потока влажного воздуха в установке является электрической. Нагреватель (рис. 13.4) выполнен из нихромовой проволоки

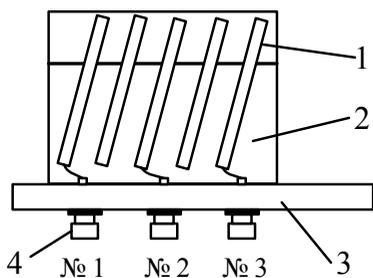


Рис. 13.4. Нагреватель второй ступени:

1 – спираль, 2 – каркас, 3 – крышка,  
4 – клемма

диаметром 0,6 мм в виде двух спиралей, сопротивление которых 75,32 и 17,87 Ом. Спираль соединены последовательно и намотаны на каркас 3 из диэлектрического материала (слюда). Концы спиралей выведены на клеммы, установленные на крышке. Клеммы 2 и 3 относятся к первой спирали, 1 и 3 – ко второй. Сопротивление обеих спиралей – 93,19 Ом. Крышка с нагревателем крепится к камере нагрева потока влажного воздуха с помощью винтов. Максимальная температура нагрева влажного воздуха в нагревателе – 95 °С.

**Смещение потоков воздуха** реализуется в устройстве, образованном тремя участками трубопроводов: подводящими смешивающиеся потоки поступающего в установку свежего воздуха –  $I_{71}$ , воздуха рециркуляции –  $I_{72}$ , отводящего поток образованной смеси –  $I_{73}$ . Соотношение расхода  $L_1$  потока свежего влажного воздуха и расхода  $L_2$  потока рециркуляции регулируется заслонкой  $I_7$ .

*Измерения.* Термоизмерительный прибор 16 предназначен для измерения температуры и оснащен восемью термопарами. Общий вид термометров 14 психрометра в сушилке приведен на рис. 13.5. Термопары 1*m*–3*m* измеряют температуру по толщине образца (см. рис. 13.1), термопары 4*m* и 5*m* установлены в камере увлажнения воздуха (камере сушки) соответственно перед источником испаряемой влаги (сушимого образца) и после него. Места установки термомпар 4*m* и 5*m* совмещены с расположением жидкостных термометров психрометров. Последние позволяют определить состояния влажного воздуха перед и после увлажнения. Термопара 6*m* измеряет температуру изоляции. Термопары 7*m* и 8*m* измеряют температуры входящего и выходящего воздуха.

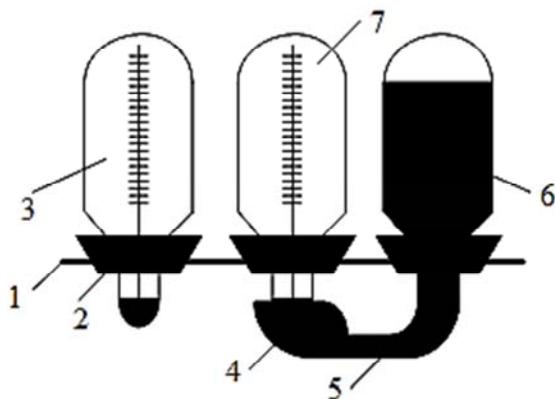


Рис. 13.5. Жидкостные термометры психрометра:

1 – пластина; 2 – резиновые пробки; 3 – «сухой» термометр; 4 – фитиль; 5 – бачок для воды; 6 – вода; 7 – «мокрый» термометр

Установка позволяет проводить процессы, в ходе которых воздух циркулирует по замкнутому контуру без забора свежей порции из окружающей среды либо воздух выбрасывается в окружающую среду с поступлением из последней его соответствующего количества. В последнем случае воздух входит и выходит через конденсаторную и испарительную часть теп-

лообменника соответственно, что обеспечивает дополнительный подогрев входящего воздуха, если последний нагревается в электрокалорифере в установке. Для изменения процесса циркуляции воздуха необходимо использовать задвижки *A*, *B* и *C* (см. рис. 13.1). Для движения воздуха по замкнутому контуру заслонки *B* и *C* открыты, *A* – закрыта. Для незамкнутого контура заслонки *A* и *C* – открыты, *B* – закрыта.

### Порядок проведения работы

Перед началом проведения лабораторных работ на установке, следует совместно с инженером лаборатории выполнить следующие действия:

1. Установить автоматические выключатели *K1* и *K2* (включение вентилятора и нагревателя) в положение «ВЫКЛ».

2. Установить переключатель *K3* и *K4* в положение *1* или *2* (в зависимости от выбора режима работы).

3. Подключить установку к сети переменного тока напряжением 220 В, при этом загорится сигнальная лампочка и на розетки *1–4* подастся напряжение сети.

4. Вставить вилки вентилятора и нагревателя в розетки *5* и *6*.

5. Открыть окна *11* и *13*, сняв теплоизолирующие и металлические пластины.

6. Подключить блок питания весов к розетке *1–4*. Проверить и настроить весы, для чего необходимо обеспечить их полную разгрузку, приподнимая платформу *3* за трубку *2*, включить весы и после появления нулей опустить платформу. В случае ошибки выключить весы и повторить заново.

7. Включить вилку термоизмерительного прибора в розетку *1–4* и выбрать циклический режим индикации измерений (см. инструкцию прибора).

8. При необходимости высушить и затем увлажнить сушимый материал, в ходе сушки которого происходит увлажнение воздуха. Разместить на его поверхности термомпару.

9. Поместить образец на платформу.

10. Проверить точность работы весов, положив на платформу груз (10–20 г), и, сняв его, весы должны показать прежнее значение веса. Если этого не происходит, необходимо откорректировать положение платформы в окне, чтобы она не касалась стенок сушильной камеры. Если весы работают правильно, необходимо сбросить вес тары и увлажнить шприцом образец до нужной влажности.

11. Залить в бачок «мокрого» термометра воду, для чего необходимо снять «сухой» и «мокрый» термометры психрометра вместе с пластиной.

12. Вернуть термометры психрометра на место и закрыть окна 11, 13.

13. Непосредственно перед началом работы установки необходимо еще раз проверить правильность показания весов, положив на их платформу груз (10–20 г), и, убрав его, показания должны вернуться на прежнее значение, в противном случае необходимо откорректировать положение платформы образца, поворачивая ее за трубку.

14. Для начала проведения работы на установке необходимо включить автоматические выключатели К1 и К2 в положение «ВКЛ».

15. В ходе экспериментов фиксируются температуры («сухого» и «мокрого» термометров) потока в упомянутых (при описании установки) сечениях. Фиксируется изменение влажности материала, используемого для увлажнения воздуха, и время, за которое определено это изменение. Измерения проводятся на режимах, заданных преподавателем из четырех возможных, реализуемых для данной установки:

а. Воздух поступает в установку из окружающей среды, проходит через нее без нагрева, увлажняется и удаляется из установки, заслонка *B* закрыта, *A* и *C* – открыты.

б. Воздух поступает в установку из окружающей среды, проходит через нее без нагрева, смешивается с частью потока воздуха, прошедшего установку, увлажняется, затем часть его

удаляется из установки, а оставшаяся часть (поток рециркуляции) смешивается со свежим потоком, поступающим из окружающей среды. Заслонка *B*, установленная на потоке рециркуляции, открыта. От положения заслонки зависит соотношение потока рециркуляции и свежего потока воздуха, поступающего в установку. Каждому из участников эксперимента необходимо выполнить измерения с величиной упомянутого соотношения расходов потоков, на 20 % отличной от соотношения у других членов бригады. В заключение результаты обработки всех вариантов обобщить.

с. Воздух поступает в установку из окружающей среды, нагревается (температура нагрева согласуется с преподавателем), увлажняется и удаляется из установки. Заслонка *B* закрыта.

d. Воздух поступает в установку из окружающей среды, нагревается в подогревателе регенеративном, смешивается с частью потока воздуха, прошедшего установку, нагревается в подогревателе второй ступени (температура нагрева согласуется с преподавателем), увлажняется, затем часть его удаляется из установки, а оставшаяся часть (поток рециркуляции) смешивается со свежим потоком из окружающей среды. Число вариантов смешения смотри в пункте 15-b.

16. Измерения необходимо провести в период постоянной или незначительно изменяющейся температуры поверхности образца, используемого для увлажнения воздуха.

17. С помощью психрометра Ассмана определяются содержания влажного воздуха, поступающего в установку (см. рис. 13.1, сечение установки термопары  $7m$ ) и удаляемого из нее (см. рис. 13.1, сечение установки термопары  $8m$ ).

18. После окончания измерений с помощью преподавателя выключите установку в обратном порядке запуска ее работы.

19. Таблица измерений температуры потоков влажного воздуха, результатов взвешивания материала, используемого для увлажнения воздуха в камере сушки и пр., составляется в произвольной форме самостоятельно.

## Обработка результатов

Рассмотрим каждый из режимов, о которых идет речь в п. 15 параграфа «Порядок проведения работы». Все состояния влажного воздуха в работе требуется определить как с помощью  $hd$ -диаграммы, так и с помощью программного пакета для расчета характеристик влажного воздуха.

**Режим 15-а.** Наиболее простой вариант эксперимента, в ходе которого имеют место незначительное охлаждение и нагрев потоков влажного воздуха и процесс адиабатного увлажнения (рис. 13.6).

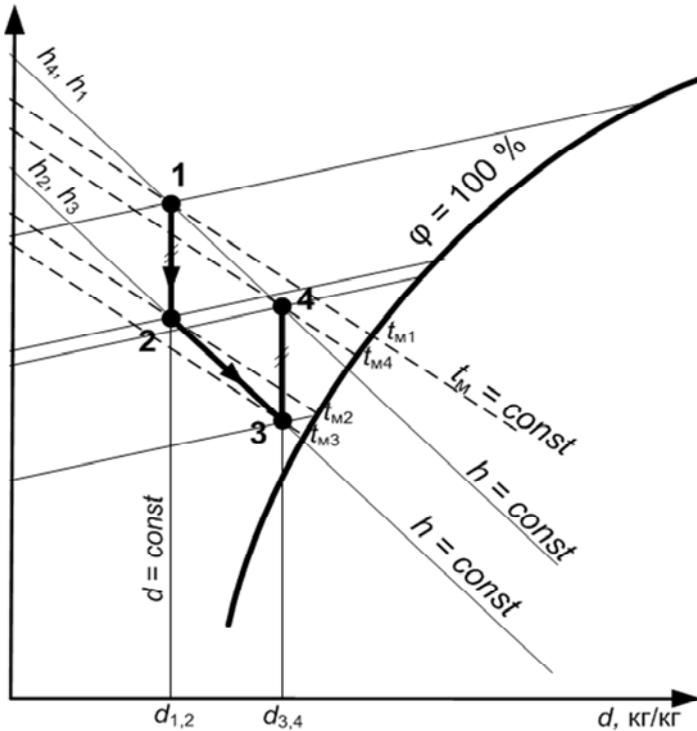


Рис. 13.6. Изменение состояния влажного воздуха при реализации режима 15-а

**1а.** Состояние воздуха, поступающего в установку из помещения, определяется с помощью психрометра Ассмана. По показаниям «сухого» и «мокрого» термометра по  $hd$ -диаграмме влажного воздуха, а также с помощью программного комплекса, определяются все его параметры во входном сечении установки (смотри предыдущую лабораторную работу).

**2а.** Показания термопары  $7m$ , измеряющей температуру потока непосредственно на входе в установку, могут незначительно отличаться от показаний «сухого» термометра аспирационного психрометра (п. 1а). Отличие связано с погрешностью используемых измерителей температуры.

**3а.** Показания термопары  $4m$  необходимы для расчета процесса охлаждения потока воздуха, поступающего в установку. После увлажнения воздух в установке имеет более низкую температуру, чем воздух, поступающий в нее. Процесс теплопередачи протекает в теплообменнике  $9$ , где поступающий поток воздуха незначительно охлаждается и за счет этого нагревается поток воздуха, покидающий установку. По показаниям термопары  $4m$ , известным состоянию воздуха на входе установки (п. 1а и 2а) и изображению процесса охлаждения в  $hd$ -диаграмме определяется состояние влажного воздуха в сечении за теплообменником, которое соответствует одновременно входу в камеру увлажнения. Удельная массовая теплота процесса на килограмм сухой компоненты влажного воздуха  $q_L$ , отводимая от влажного воздуха, рассчитывается из соотношения (19). Удельная массовая теплота процесса, отнесенная на килограмм влажного воздуха, рассчитывается по формуле

$$q_m = q_L / (1 + d), \text{ кДж/кг}, \quad (13.1)$$

где  $d$ , кг/кг – влагосодержание нагреваемого воздуха.

Удельная объемная теплота процесса, отнесенная на кубический метр физического расхода влажного воздуха в сечении

перед камерой увлажнения, рассчитывается с помощью соотношения

$$q' = q_m / v, \text{ кДж/м}^3, \quad (13.2)$$

где  $v$ , м<sup>3</sup>/кг – удельный массовый объем влажного воздуха. Рассчитывается по уравнению состояния идеального газа Менделеева–Клапейрона, в котором газовая постоянная влажного воздуха  $R_{\text{вв}}$  определяется из соотношения (9).

Наконец, удельная объемная теплота процесса, отнесенная к объемному расходу, приведенному к нормальным условиям, рассчитывается из соотношения

$$q' = q_m \mu_{\text{вв}} / 22,4, \text{ кДж/м}^3,$$

где  $\mu_{\text{вв}}$ , кг/кмоль – молярная масса влажного воздуха, рассчитанная, например, с помощью универсальной газовой постоянной  $R_{\mu} \approx 8314,1 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)}$  и известному соотношению

$$\mu_{\text{вв}} = R_{\mu} / R_{\text{вв}}, \text{ кг/кмоль},$$

где  $R_{\text{вв}}$ , Дж/(кг·К) – газовая постоянная влажного воздуха, рассчитана в п. 3 для того же состояния, для которого определена удельная массовая теплота процесса.

**4а.** Показания термометров в составе психрометров 14, расположенных на входе и выходе камеры увлажнения, позволяют определить состояние влажного воздуха до и после процесса увлажнения. Состояние воздуха перед камерой увлажнения несколько отличаются от того, что установлено с помощью психрометра Ассмана во входном потоке. Связано это, как показано в п. 3а, с процессом охлаждения входного потока воздуха в теплообменнике 9.

С помощью психрометра Ассмана, установленного в выходном сечении теплообменника 9, определяется состояние воздуха, покидающего установку. Также имеет место отличие по-

казаний последнего от данных психрометра 14 на выходе камеры увлажнения и связано это с протекающим процессом нагрева воздуха 3–4 в теплообменнике 9 (см. рис. 13.6).

**5а.** Процесс увлажнения влажного воздуха в данном случае протекает адиабатно, поскольку теплообменом с окружающей средой можно пренебречь (температура потока в установке близка к температуре окружающей среды, камера увлажнения, где температура несколько отлична от наружной, теплоизолирована и время нахождения потока в ней ничтожно мало). В  $hd$ -диаграмме линия процесса адиабатного увлажнения совпадает с линией  $h = \text{const}$ . На пересечении линии процесса, проходящей через т. 2, с изотермой сухого термометра  $t_3$  (психрометр 14), находится т. 3, которая в  $hd$ -диаграмме соответствует состоянию воздуха за камерой увлажнения. Количество влаги, полученное воздухом в камере увлажнения (процесс 2–3), может быть отнесено к килограмму сухой компоненты ( $L = 1$  кг) и рассчитано по формуле (22). Можно использовать и иной подход: относить эту характеристику к массе влажного воздуха перед увлажнением и после него, то есть к килограмму или, в случае удельной объемной характеристики, к метру кубическому влажного воздуха, используя для этого соответственно соотношения (13.3) и (13.4)

$$\Delta m_{\text{п, вв}} = \Delta m_{\text{п}} / (1 + d), \text{ кг/кг}; \quad (13.3)$$

$$\Delta m'_{\text{п, вв}} = \Delta m_{\text{п}} / v, \text{ кг/м}^3, \quad (13.4)$$

где  $d$  и  $v$  те же, что и в соотношениях (13.1), (13.2).

Отметим, что в случае применения последних удельных характеристик больше места для путаницы, чем в варианте с сухой компонентой.

**5а.** Процесс 3–4 нагрева влажного воздуха рассчитывается по соотношениям, аналогичным тем, что использовались в расчете процесса охлаждения 1–2. Точка 4, на  $hd$ -диаграмме соответствующая состоянию влажного воздуха, покидающего

установку, характеризуется тем же значением удельной массовой энтальпии, отнесенной к килограмму сухой компоненты, что и воздух, поступающий в установку. Это связано с тем, что в установке не подводится и не отводится энергия от каких-либо внешних источников. Теплота процесса трения потока при движении по тракту установки, необходимая энергия для которого затрачивается вентиляторной установкой, невелика и ее влияние на температуру потока не фиксируется имеющимися приборами. Неизменность энергии потока и постоянство расхода сухой компоненты обеспечивают отмеченное постоянство используемой на практике удельной массовой энтальпии. Удельная массовая энтальпия влажного воздуха на единицу всей его массы или удельные объемные энтальпии будут изменяться, в чем следует убедиться в ходе соответствующих расчетов и что искажает сущность протекающих процессов.

**ба.** В ходе выполнения работы определению подлежит также расход влажного воздуха через камеру увлажнения. Поскольку скоростью и размерами сечения потока влажного воздуха мы не располагаем, используем баланс влаги для процесса увлажнения, из которого рассчитывается искомый расход

$$\Delta m_{\text{прх}} = \Delta m_{\text{рех}}. \quad (13.5)$$

Приход влаги  $\Delta m_{\text{прх}}$  определяется ее количеством, испаренным из материала, и находится по известной массе сухого материала  $m_c$ , начальной  $w_n$  и конечной  $w_k$  влажности (заданы на сухую массу)

$$\Delta m_{\text{прх}} = m_c (w_n - w_k).$$

Расход влаги  $\Delta m_{\text{рех}}$  в уравнении (13.5), естественно, равен приходу, что вытекает из смысла уравнения баланса, то есть оказывается уже определен, и это позволяет из соотношения (22) считать искомый расход сухой компоненты влажного воздуха

$$L = \Delta m_{\text{рех}} / (d_3 - d_2).$$

Расход влажного воздуха массовый в сечениях до и после камеры увлажнения рассчитывается соответственно из соотношений (13.6) и (13.7)

$$G_{\text{ВВ}_2} = L (1 + d_2), \text{ кг/кг}, \quad (13.6)$$

$$G_{\text{ВВ}_3} = L (1 + d_3), \text{ кг/кг}. \quad (13.7)$$

Объемный физический расход влажного воздуха в тех же сечениях  $V_{\text{ВВ}_2}$ ,  $V_{\text{ВВ}_3}$  рассчитывается с помощью соотношения

$$V_{\text{ВВ}} = G_{\text{ВВ}} / \nu, \text{ кг/м}^3,$$

где  $\nu$  определяется в тех же сечениях, что и в соотношениях (13.6), (13.7), в зависимости от того, какой расход требуется использовать.

Наконец, объемные расходы, приведенные к нормальным условиям, рассчитываются по соотношению для идеального газа

$$V_{\text{ВВ}_H} = V_{\text{ВВ}} (p_{\text{ВВ}} / 760)(273 / T_{\text{ВВ}}), \text{ м}^3/\text{ч},$$

где  $p_{\text{ВВ}}$  – давление влажного воздуха, мм рт. ст.

Теперь можно найти и абсолютные значения теплоты для обоих процессов (охлаждения и нагрева), количества испаренной влаги (соотношения (20), (21), (22)).

В заключение обратим внимание на следующее. Из приведенного обилия вариантов использования в соответствующих процессах таких характеристик, как расход влажного воздуха, удельные количества теплоты и испаренной влаги, становится понятным, почему на практике наиболее удобно связывать все величины с сухой компонентой влажного воздуха. Очевидно, что именно в этом варианте рассмотрения указанных характеристик влажного воздуха через количество его сухой компо-



**1б.** Выполняются п. 1а, 2а, 3а, которые в обоих вариантах идентичны. В результате определяются состояния влажного воздуха в т. 1 и т. 2, рассчитывается процесс 1–2 охлаждения воздуха.

**2б.** Выполняется п. 4а с той разницей, что параметры воздуха на входе установки и на входе камеры увлажнения в данном режиме достаточно отличаются, это обусловлено и процессом охлаждения, и процессом смешения, протекающими с потоком влажного воздуха до входного сечения камеры увлажнения.

**3б.** Выполняется п. 4а, в ходе которого определяются состояния влажного воздуха перед и после процесса 3–4 увлажнения воздуха в камере сушки материала. Точки 2, 3, 4 находятся на одной линии  $h = \text{const}$ . Расчет процесса 3–4 осуществляется по описанию п. 4а и 6а.

**4б.** Процесс смешения потоков влажного воздуха 2–3–4 изображается на  $hd$ -диаграмме прямой, соединяющей точки, отображающие состояния смешиваемых потоков влажного воздуха. В данном случае это т. 2 и т. 4, состояние смеси соответствует т. 3. Требуемые температуры всех перечисленных состояний измерены в опыте, что позволяет построить процесс в  $hd$ -диаграмме. Вместе с тем современные технологии расчета неудобно совмещать с подобными построениями. В этой связи в расчетах используются системы уравнений, включающие балансовые уравнения процесса смешения, которые для данного примера имеют вид:

– уравнение баланса энергии процесса смешения

$$h_2 L_2 + h_4 L_4 = h_3 L_3;$$

– уравнение баланса сухой компоненты

$$L_2 + L_4 = L_3;$$

– уравнение баланса влаги

$$d_2 L_2 + d_4 L_4 = d_3 L_3,$$

где  $L_2, L_4, L_3$ , кг/ч (кг/с и т. д.) – соответственно расход сухой компоненты для смешивающихся потоков влажного воздуха и потока смеси.

Решение систем уравнений, включающих те или иные балансовые уравнения, дают искомые величины, в том числе состояния и расходы потоков, относящихся к процессу смешения. На данном этапе примера можно рассчитать лишь соотношения потоков смешения. И на диаграмме, и в расчетах с помощью ПК выполняются соотношения характеристик потоков (26), (27). Изменяется соотношение расходов смешивающихся потоков и соответственно положение т. 3 на линии смешения в  $hd$ -диаграмме в ходе лабораторных опытов с помощью изменения положения заслонки 17.

**5b.** П. 5а выполняется по расчету процесса нагрева влажного воздуха в теплообменнике 9. Воздуха, покидающего установку.

**6b.** П. 6а выполняется по расчету расхода воздуха через камеру увлажнения, что в итоге позволяет найти расходы потоков в процессе смешения, а не только их соотношения, что было сделано в п. 5b.

**Режим 15-с.** В ходе данного режима воздух в установке подвергается двухступенчатому нагреву (рис. 13.8). Нагрев осуществляется последовательно в первой ступени, представленной теплообменником 9 за счет охлаждения более горячего потока, покидающего установку, и во второй ступени – в электронагревателе 12 (соответственно процессы 1–2 и 2–3 в  $hd$ -диаграмме). Далее протекают процессы 3–4 увлажнения в камере сушки и охлаждения воздуха 4–5, реализуемой в регенеративном теплообменнике 9, включает изменения состояния влажного воздуха в установке.

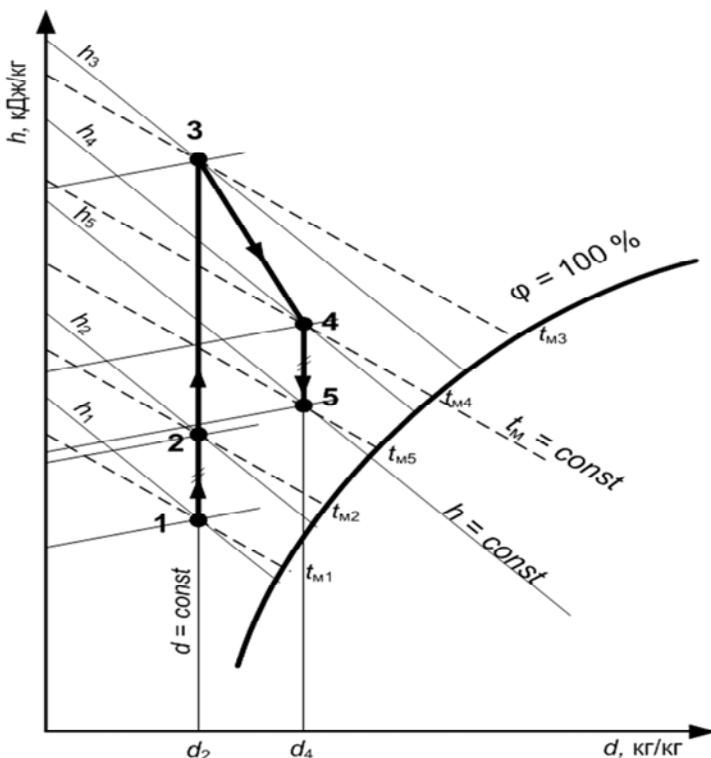


Рис. 13.8. Изменение состояния влажного воздуха при реализации режима 15-с

**1с.** Как и в режимах, рассмотренных выше, определяется состояние воздуха на входе в установку (пп. 1а, 2а).

**2с. П. 3а** выполняется, при этом вместо процесса охлаждения в теплообменнике 9 имеет место процесс нагрева поступающего воздуха. По показаниям термопары 4m состояния влажного воздуха перед теплообменником (т. 1), известной линии процесса нагрева влажного воздуха определяется его состояние в т. 2. Рассчитывается процесс 1–2, как и выше рассмотренные соответствующие процессы нагрева и охлаждения.

**3с.** Расчет процесса нагрева 2–3 и нахождение параметров влажного воздуха на выходе из электронагревателя 12 осуще-

ствляется подобно тому, как в п. 2с. Используются показания термопары  $4m$  и известное состояние воздуха перед нагревателем, определяемое окончанием процесса  $1-2$ .

**4с.** Перед камерой увлажнения воздух имеет температуру, достаточно отличающуюся от температуры окружающей среды (до  $95\text{ }^\circ\text{C}$ ). Это обуславливает рассеяние тепловой энергии через ограждающие конструкции камеры увлажнения  $Q_{\text{ос.к.с}}$ . В итоге процесс  $3-4$  увлажнения воздуха протекает неадиабатно, линия процесса в  $hd$ -диаграмме не совпадает с изоэнтальпой, а идет с отклонением к более низким значениям энтальпии влажного воздуха. При наличии нагревателей в камере увлажнения, тепловыделения которых превышают рассеяние энергии через стенки камеры, процесс идет с отклонением от изоэнтальпы в сторону больших значений энтальпии влажного воздуха. Величина изменения энтальпии влажного воздуха в ходе процесса его увлажнения определяется соотношением

$$\sum Q_j = L (h_4 - h_3),$$

где  $\sum Q_j$  – сумма всех потоков теплоты в камере увлажнения воздуха (сушки материала), кДж/ч;

$L$  – расход сухой компоненты влажного воздуха (сушильного агента), кг/ч;

$h_4, h_3$  – соответственно в конце и в начале процесса энтальпия влажного воздуха и удельная массовая на килограмм сухой компоненты, кДж/кг.

В данной работе состояние воздуха т. 4 определяется по показаниям психрометра  $14$ , что позволяет рассчитать все требуемые характеристики процесса: количество испаренной влаги (13.8) или расход сухой компоненты влажного воздуха; энергию, рассеиваемую в тепловой форме в окружающей среде (13.9)

$$\Delta m_{\text{п}} = L (d_4 - d_3); \quad (13.8)$$

$$Q_{\text{ос.к.с}} = L (h_4 - h_3). \quad (13.9)$$

**5с.** В данном случае п. 5а выполняется по расчету процесса охлаждения, а не нагрева влажного воздуха в теплообменнике 9. Воздуха, покидающего установку. Расчетные соотношения аналогичны.

**6с.** П. 6а выполняется по расчету расхода воздуха через камеру увлажнения, что в итоге по соотношениям (13.8) и (13.9) позволяет найти абсолютное количество влаги, уносимой воздухом из камеры сушки и рассеиваемого потока теплоты.

**Режим 15-d.** Наиболее информативный режим, использующий ранее полученные знания. Процессы, протекающие в  $h$ - $d$ -диаграмме, приведены на рис. 13.9.

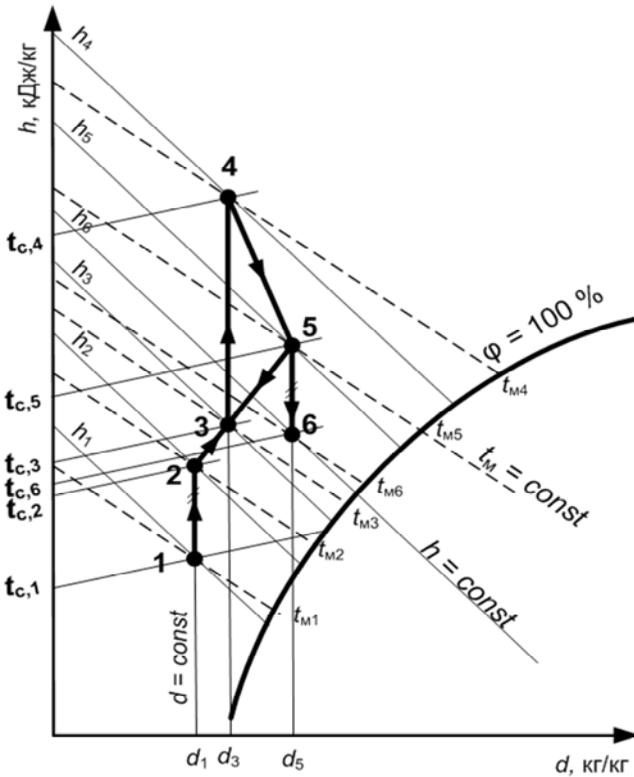


Рис. 13.9. Изменение состояния влажного воздуха при реализации режима 15-d

**1d.** Определение состояний влажного воздуха и расчет процесса его нагрева: в первой ступени – регенеративном нагревателе 9, см. п. 1с, 2с, а также процесс 3–4 нагрева во второй ступени, протекающий в электронагревателе 12 (см. п. 3с).

**2d.** Начало и окончание процессов 4–5, 5–6, их расчет (п. 4с, 5с, 6с).

**3d.** Процесс смешения потоков влажного воздуха, характеризующихся состояниями т. 2 и т. 3, регулируется заслонкой 17. Дальнейшие действия и расчеты рассмотрены в п. 4б.

### **Вопросы для самопроверки**

1. При каких условиях процесс охлаждения воздуха приводит к осушке воздуха?

2. За счет чего может изменяться изобарная теплоемкость влажного воздуха при его нагреве и охлаждении?

3. В каких случаях будет изменяться влагосодержание воздуха при его охлаждении?

4. Известна удельная объемная средняя теплоемкость влажного воздуха в заданном интервале температур и его расход по сухой компоненте. Определите количество теплоты, требуемое для нагрева воздуха в заданном интервале температур.

5. Определите состояние предельного увлажнения воздуха для данного состояния при адиабатном протекании процесса.

6. Как определить конечное состояние воздуха при его неадиабатном увлажнении по заданным конечной температуре и теплоте, которой он обменивается с моделью окружения?

7. Как на *hd*-диаграмме по отношению к изоэнтальпе расположится точка, отображающая конечное состояние влажного воздуха, выполняющего роль сушильного агента, при наличии теплопотерь в камере сушки материала? Как изменится это положение при наличии калорифера к камере сушки?

8. Определите изменение массы влажного воздуха в процессе его увлажнения, если известны начальное и конечное состояние, расход влажного воздуха в начальном состоянии.

9. При смешении двух потоков влажного воздуха состояние смеси в  $hd$ -диаграмме отображается точкой, лежащей на линии смешения, проходящей через точки, соответствующие состояниям потоков. На отрезки какой длины разделяется упомянутая линия, соответствующая процессу смешения в  $hd$ -диаграмме двух потоков влажного воздуха с известными состояниями и расходами, заданными через сухие компоненты  $L1$  и  $L2$ ?

10. Запишите балансовые уравнения процесса смешения трех потоков воздуха, если заданы их состояния и расходы. Определите состояние смеси для указанных начальных условий на  $hd$ -диаграмме влажного воздуха.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хрусталеv, Б. М. Техническая термодинамика : учебник : в 2 ч. Ч. 1 / Б. М. Хрусталеv, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск : УП «Технопринт», 2004. – 487 с.

2. Хрусталеv, Б. М. Техническая термодинамика : учебник : в 2 ч. Ч. 2 / Б. М. Хрусталеv, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск : УП «Технопринт», 2004. – 560 с.

3. Отопление и вентиляция : учебник : в 2 ч. / В. Я. Богословский [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1976. – Ч. 2: Вентиляция. – 439 с.

Учебное издание

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

Лабораторный практикум  
для студентов теплоэнергетических специальностей

В 4 частях

Часть 4

### **ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ**

Составители:

**РОМАНЮК** Владимир Никанорович

**БОБИЧ** Александр Александрович

**БУБЫРЬ** Татьяна Викторовна

**МУСЛИНА** Дарья Борисовна

Редактор *Е. С. Кочерго*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 15.12.2017. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 2,55. Тираж 100. Заказ 816.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.