

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

Цель работы

Цель работы – углубить практические сведения о термодинамических свойствах влажного атмосферного воздуха, экспериментально исследовать основные процессы в нем, для чего:

- 1) Опытным путем определить температуры мокрого и сухого термометров в сушильной камере экспериментальной установки и по полученным результатам найти термодинамические параметры влажного воздуха в процессах его нагрева и сушки материала в характерных точках типовых процессов;
- 2) Построить эти процессы на H-d диаграмме влажного воздуха;
- 3) Опытным путем определить расход влажного воздуха через установку;
- 4) Определить количество сухого воздуха, необходимого для испарения 1 кг влаги для двух различных режимов сушки;
- 5) Определить количество теплоты, затраченной в калорифере, требуемое для испарения 1 кг влаги;
- 6) Определить потери теплоты в окружающую среду в калорифере и сушильной камере в расчете на 1 кг испаренной влаги;
- 7) Провести анализ процессов, проходящих в установке, с точки зрения их термодинамической эффективности.

Краткое теоретическое введение.

Влажным воздухом называется смесь сухого воздуха и водяного пара. Влажный воздух представляет собой один из частных случаев газовой смеси. В соответствии с законом Дальтона каждый отдельный газ ведет себя в газовой смеси так, как будто он один занимает весь объем при температуре газовой смеси. В этом случае сумма парциальных давлений газов, входящих в газовую смесь, равна общему давлению газовой смеси.

Обозначив парциальное давление сухого воздуха $p_{возд}$, парциальное давление водяного пара p_n , и давление смеси, т.е. влажного воздуха, p , получим в соответствии с законом Дальтона:

$$p = p_{возд} + p_n \quad (1)$$

Так как обычно давление воздуха равно атмосферному давлению (B), то можно написать:

$$B = p_{возд} + p_n \quad (2)$$

При этом давление водяного пара не может быть больше давления насыщения p_s при данной температуре влажного воздуха. Максимальное парциальное давление водяного пара во влажном воздухе определяется только температурой смеси и не зависит от давления смеси. Оба компонента газовой смеси в исследуемой нами области температур и давлении ведут себя как идеальные газы. Однако при охлаждении смеси ниже температуры насыщения водяного пара, при данном его парциальном давлении, из нее выделяется влага, в виде капель жидкости. Это продолжается до тех пор пока влагосодержание не будет соответствовать тому парциальному давлению водяного пара, которое определяется давлением насыщения при данной температуре. Отношение парциального давления водяного пара к давлению насыщения при данной температуре смеси называется относительной влажностью:

$$\varphi = \frac{p_n}{p_s} \quad (3)$$

Для сухого воздуха $\varphi = 0$, для насыщенного воздуха $\varphi = 1$. Введем также понятие массового влагосодержания, которое равно отношению массы пара во влажном воздухе к массе сухого воздуха, в произвольно взятом объеме:

$$d = \frac{m_n}{m_{\text{возд}}} \quad (4)$$

Зная молярные массы воды и воздуха можно определить молярное влагосодержание.

$$x = \frac{\frac{m_n}{Mr_n}}{\frac{m_{\text{возд}}}{Mr_{\text{возд}}}} = d \cdot \frac{1/18,016}{1/28,96} = 1,61 \cdot d \quad (5)$$

Из уравнения Клапейрона – Менделеева следует, что в закрытом объеме при данной температуре число молей газа пропорционально давлению, тогда для массового влагосодержания можно записать следующее равенство:

$$d = 0,622 \cdot x = 0,622 \cdot \frac{p_n}{p_{\text{возд}}} = 0,622 \cdot \frac{p_n}{B - p_n} \quad (6)$$

Калорические свойства влажного воздуха будут определяться также как и для смеси идеальных газов. Следовательно, для энтальпии влажного воздуха запишем:

$$h = h_{\text{возд}} + h_n \cdot d \quad (7)$$

Однако следует заметить, что при определении энтальпии компонентов смеси для обоих веществ за ноль отсчета взята температура плавления льда. Тогда:

$$h_{\text{возд}} = Cp_{\text{возд}} \cdot t \approx t$$

$$h_n = r + Cp_n \cdot t = 2501 + 1,93 \cdot t$$

где Cp – теплоемкости воздуха и пара в соответствии с индексами. ($Cp_{\text{возд}} = 1,005$, то есть можно считать равной 1); r – теплота парообразования, взятая при 0 градусов Цельсия.

Таким образом, получается выражение для определения удельной энтальпии влажного воздуха по его температуре.

$$h = t + d \cdot (2501 + 1,93 \cdot t) \quad (8)$$

На основании приведенных выше уравнений построена специальная h - d диаграмма для влажного воздуха, на которой показания «мокрой» термопары это температура насыщения соответствующая давлению насыщения равному парциальному давлению пара, а «сухая» термопара это температура смеси.

В данной работе изучаются два процесса происходящих во влажном воздухе: 1 – процесс подогрева воздуха в калорифере, идущий при постоянном влагосодержании ($d = \text{const}$) и 2 – процесс сушки (испарения с влажной поверхности) в сушилке идущий при постоянстве удельной энтальпии смеси ($h = \text{const}$).

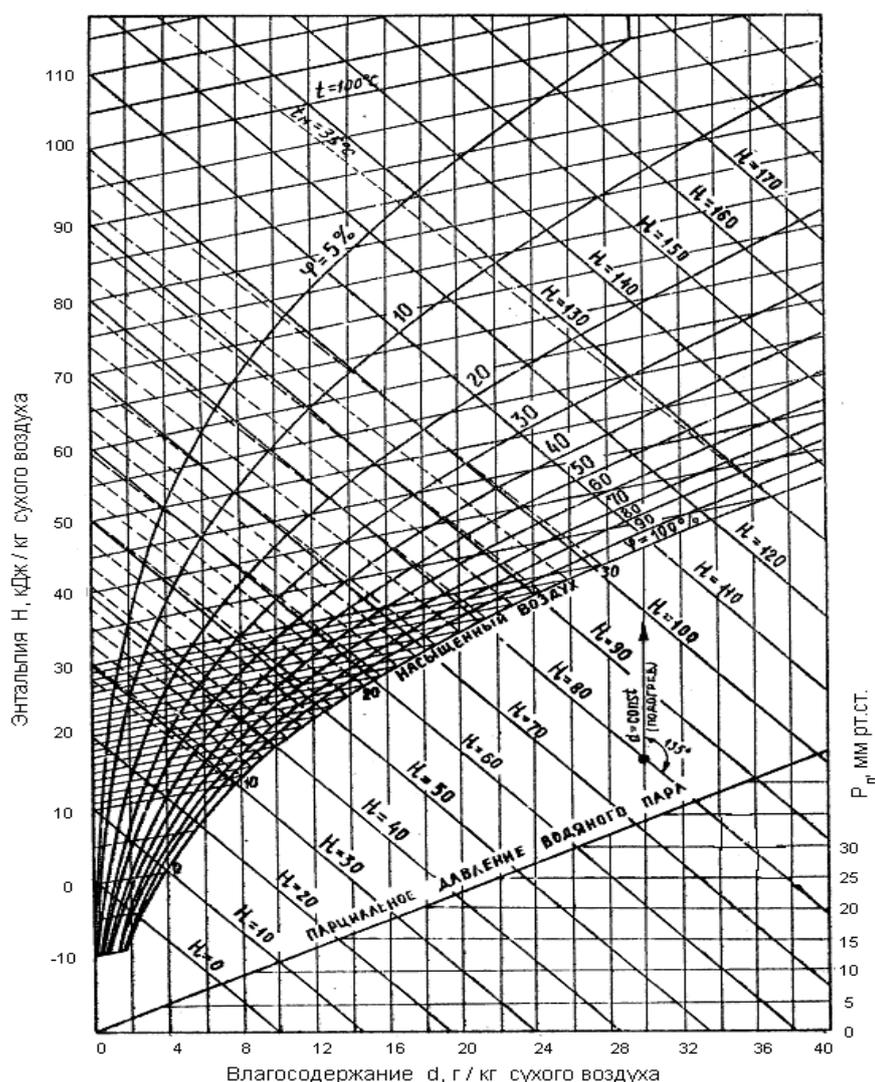


Схема экспериментальной установки и методика измерений.

Схема экспериментальной установки приведена на Рис. 1. На передней панели находится восьмиканальный измеритель температуры (1) УКТ38, подключённый к пяти хромель-копелевым термопарам t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 (рис. 2); U-манометр (2) для измерения перепада давления воздуха на дроссельной шайбе (16) (используется для расчёта массового расхода воздуха в сушильной камере); тумблёр электропитания "Сеть"; тумблёр включения насоса "Насос"; тумблёр включения нагревателя "Нагрев"; разъёмы (3) для подключения вольтметра (мультиметра) 5; переключатель (4) для измерения напряжения на нагревателе U_n калорифера и падения напряжения U_0 на образцовом сопротивлении, последовательно включённом в цепь нагревателя. На задней панели установки расположены розетки для подключения регулятора напряжения (6) на нагревателе калорифера и насоса (7).

На Рис.2 приведена схема рабочего участка. Комнатный воздух при температуре t_1 подаётся насосом (7) в калорифер (8), где он нагревается до температуры t_2 (сухая термопара) и затем поступает в сушильную камеру (9) по трубке (10). Влажность поступающего в воздух в сушильную камеру определяется по показаниям сухой t_2 и влажной t_3 термопарам. Из отверстий (11) трубки (10) горячий воздух протекает через смоченную водой хлопчато-бумажную ткань (12). Вода для смачивания ткани подаётся

порциями 20-30 мл капельницей (13) каждые 10-15 мин в течение опыта. На выходе из сушильной камеры находятся две ХК термопары (14) и (15): t_4 - сухая и t_5 - мокрая.

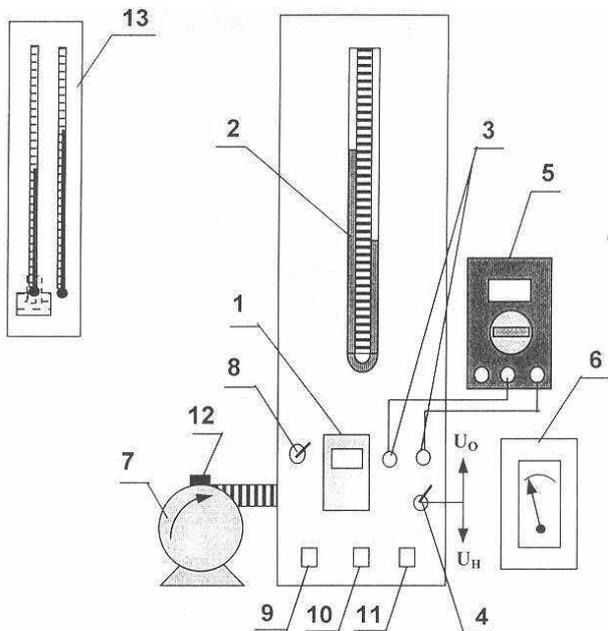


Рис.1. Схема экспериментальной установки:
 1 - восьмиканальный измеритель температуры,
 2 - U-образный манометр,
 3 - разъемы для подключения вольтметра,
 4 - тумблер переключения измерения напряжения U_H на нагревателе и U_o на образцовом сопротивлении,
 5 - вольтметр,
 6 - регулятор напряжения на нагревателе калорифера,
 7- компрессор,
 8 - тумблер включения прибора измерения температуры,
 9 - кнопка включения установки «сеть»,
 10 - кнопка включения компрессора,
 11 - кнопка включения нагревателя,
 12 - регулятор расхода компрессора,
 13 - лабораторный психрометр

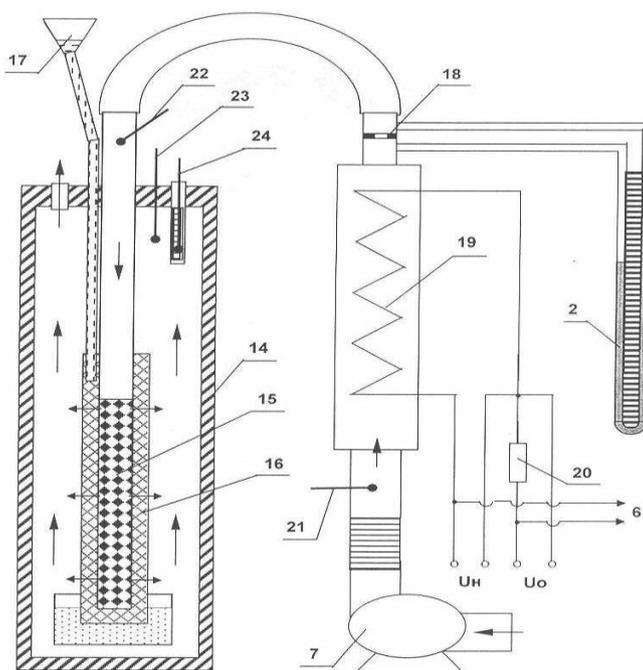


Рис.2. Схема рабочего участка установки:
 2 - U образный манометр,
 7 - компрессор,
 6 - подключение к регулятору напряжения,
 14 - сушильная камера,
 15 - трубка с отверстиями,
 16 - смоченная водой х/б ткань,
 17 - капельница воды,
 18 - расходомерная диафрагма,
 19 - калорифер,
 20 - образцовое сопротивление,
 термопары: 21 - на входе в калорифер, 22 - на выходе из калорифера

Порядок проведения эксперимента.

1. Подключить насос (7) и регулятор напряжения (6) к розеткам, расположенным на задней панели установки.
2. Соединить проводами гнезда мультиметра (5) и гнезда (3) на передней панели установки для измерения U_0 и U_n . (для определения подводимой к калориферу электрической мощности). Включить мультиметр в режим измерения напряжения.
3. Подключить установку к сети и включить тумблёр "Сеть" и тумблёр измерителя температуры (1) типа УКТ38. Проверить работу всех пяти термопар (см. инструкцию по эксплуатации прибора УКТ38).
4. Смочить хлопчатобумажную ткань (12) водой в количестве 50 млл через воронку (13).
5. Включить тумблёр "Насос" и установить регулятором требуемый расход воздуха по перепаду давления на U-манометре.
6. Включить тумблёр "Нагрев" и установить такое напряжение на нагревателе калорифера (примерно 150 В), при котором температура горячего воздуха на входе в сушильную камеру была равна $t_2 = 60-65$ ОС.
7. Смочить ткань в сушильной камере с помощью капельницы (13).
8. Смочить термопару t_3 на входе в сушильную камеру и термопару t_5 (15) на выходе из сушильной камеры.
9. Через 3-4 минуты записать значения t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 , зарегистрированные прибором УКТ.
10. Измерить мультиметром (5) величины U_0 и U_n , переключая тумблёр (4) в соответствующие положения.
11. Измерить перепад давления на дроссельной шайбе по U-манометру.

Данные установки и расчётные величины.

1. Величина образцового сопротивления в цепи нагревателя: $R_0 = 0,1 \text{ Ом}$.
2. Ток нагревателя: $I = U_0 / R_0$.
3. Количество тепла, подводимое к воздуху в калорифере (без учета потерь) $Q = U_n I$.
4. Так как дроссельная шайба ($D = 10 \text{ мм}$) не является стандартной, то необходима её калибровка.

Градуировочная таблица дроссельной шайбы.

$t = 22 \text{ ОС}, t = 45 \text{ ОС}, t = 60 \text{ ОС}$,

$\Delta h(\text{мм})$	$G(\text{м}^3/\text{сек})$	$\Delta h(\text{мм})$	$G(\text{м}^3/\text{сек})$	$\Delta h(\text{мм})$	$G(\text{м}^3/\text{сек})$
0	0,000875	55	0,00233635	110	0,0037977
5	0,00100785	60	0,0024692	115	0,00393055
10	0,0011407	65	0,00260205	120	0,0040634
15	0,00127355	70	0,0027349	125	0,00419625
20	0,0014064	75	0,00286775	130	0,0043291
25	0,00153925	80	0,0030006	135	0,00446195
30	0,0016721	85	0,00313345	140	0,0045948
35	0,00180495	90	0,0032663	145	0,00472765
40	0,0019378	95	0,00339915	150	0,0048605
45	0,00207065	100	0,003532		
50	0,0022035	105	0,00366485		

$$G = 2,657 \cdot 10^{-5} + 8,75 \cdot 10^{-4} \quad (\text{М}^3/\text{сек})$$

Дроссельная шайба отградуирована по ротаметру при трёх температурах Из таблицы (при построении графиков $\Delta h = f(Q_1)$) видно, что показания водяного манометра

и ротаметра практически совпадают для разных температур. Следовательно, эти методы измерения объёмного расхода воздуха имеют одинаковый температурный коэффициент пересчёта при изменении температуры. Пересчёт можно произвести по формуле:

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\rho_1 / \rho_2},$$

где

Q_1 – расход газа при градуировке эталонного прибора (ротаметра), м³/ч, произведённой при 19 °С;

Q_2 – измеряемый расход газа в рабочих условиях, м³/ч;

ρ_1 – плотность газа при 19 °С и давлении 748 мм. рт.ст.;

ρ_2 – плотность измеряемого газа при данной температуре и давлении.

Предел допустимой основной погрешности составляет ±3%, для температуры измеряемой среды находится в пределах от минус 30 до плюс 80 °С.

Методика обработки результатов эксперимента

1. Определение массового расхода сухого воздуха через установку. Определение массового расхода влажного воздуха через установку GBB в кг/с выполняется по формуле 1 для расходомерной диафрагмы:

$$G_{BB} = \varphi f \sqrt{2\rho_2 \Delta p}, \quad (1)$$

$$G_{BB} = 71 \cdot 10^6 \sqrt{\rho_2 \Delta p}. \quad (2)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{v_2} = \frac{p_2}{R_{BB} T_2}, \quad (3)$$

$$\mu_{BB} = 28,96 - 10,944 \frac{p_{п2}}{p_2}, \quad (4)$$

$$\Delta p = \rho_{H_2O} g \Delta h, \quad (4)$$

Где:

φ - коэффициент расхода диафрагмы, который определяется при ее тарировке,

f - площадь минимального сечения отверстия диафрагмы в м²,

ρ_2 - плотность воздуха на входе в диафрагму в кг/м³,

ΔP - перепад давлений на диафрагме в Па.

Для упрощения расчетов выражение (1) будет использовано в виде (2), где произведение первых трех сомножителей для диафрагмы данной установки будет представлено числом.

Определение плотности влажного воздуха выполняется по уравнению состояния идеального газа (2)

где p_2 - давление воздуха перед диафрагмой принимается равным давлению атмосферного воздуха В, определенному по лабораторному барометру и выраженному в Па,

T - температура воздуха перед диафрагмой в К,

R_{BB} - газовая постоянная влажного воздуха определяется по его молекулярной массе, $p_{п2}$ - парциальное давление водяных паров в воздухе за калорифером (определяется по H, d -

диаграмме).

Расчет перепада давления на диафрагме определяется по показаниям манометра при плотности воды в нем $\rho_{H_2O} = 1000 \text{ кг/м}^3$, Δh - разница уровней воды в U образном манометре в м, g - ускорение свободного падения $9,81 \text{ м/с}^2$.

Результаты определения этих величин записывают в сводную таблицу 1 характеристик точек процесса 1-2-3.

Расход сухого воздуха, проходящего через установку, определяется вычитанием из расхода влажного воздуха содержания водяного пара в нем, что соответствует выражению где d - влагосодержание водяных паров в воздухе за калорифером в г/(кг с. в.) определяется по H, d - диаграмме.

Построение процесса в H, d - диаграмме

Процесс нагрева воздуха в калорифере установки 1-2 (рис.3) строится по показаниям лабораторного психрометра t_0 и t_{0M} и показаниям термометра на входе t_1 и выходе t_2 из калорифера.

По показаниям лабораторного психрометра t_1 и t_{1M} по диаграмме H, d определяется влагосодержание воздуха на входе в установку d_1 . По этому влагосодержанию и показаниям термометра на входе t_1 и выходе t_2 из калорифера строится процесс нагрева воздуха в калорифере, он идет при $d_1 = \text{const}$, так как в калорифере воздух не контактирует с объектами содержащими воду.

По показаниям термометра сухой t_3 мокрой t_4 определяется точка 3 на H, d - диаграмме, соответствующая состоянию воздуха на выходе из калорифера.

Для всех трех точек процесса 1-2-3 по H, d - диаграмме определяются следующие величины: d - влагосодержание, p_0 - парциальное давление водяного пара в воздухе, t_p - температура точки росы, ψ - относительная влажность, H - энтальпия влажного воздуха.

Величину абсолютной влажности воздуха ρ в этих точках по диаграмме H, d определить нельзя, поэтому ее определяют по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара, как функцию от температуры и парциального давления водяного пара. Правильность определения абсолютной влажности воздуха проверяют, используя уравнение состояния идеального газа, применительно к водяному пару во влажном воздухе

$$\rho_{\text{ВВ}} = \frac{1}{v_{H_2O}} = \frac{p_{\text{П}}}{R_{H_2O} T} \quad (5)$$

$$G = \frac{G_{\text{ВВ}}}{1 + \frac{d_1}{1000}} \quad (5)$$

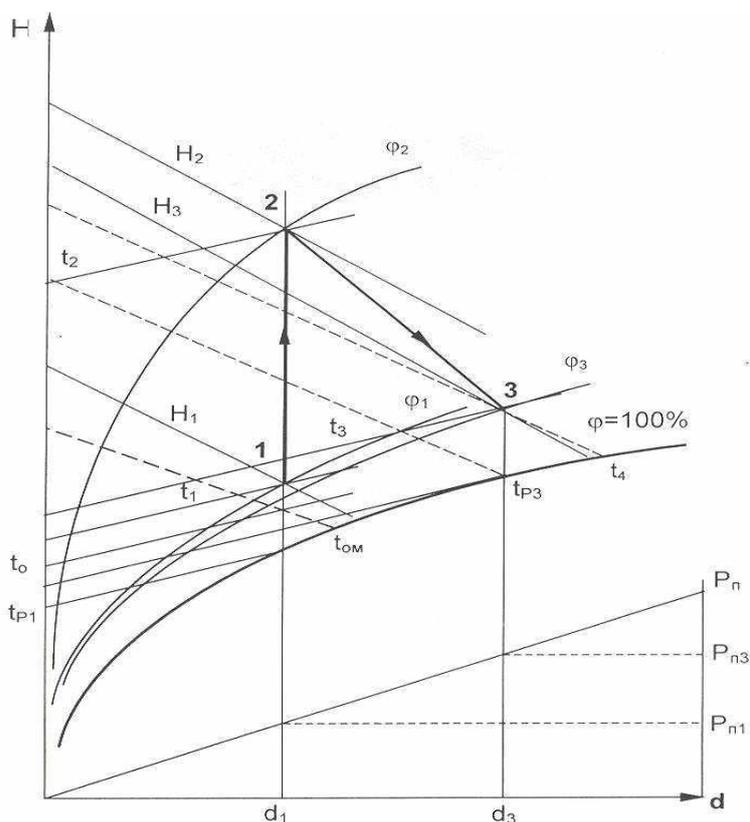


Рис.3 Процесс влажного воздуха в калорифере и сушильной камере лабораторной установки в диаграмме H,d

Определение потерь теплоты в калорифере ведется сравнением теплоты, выделенной электрическим нагревателем калорифера, и теплоты воспринятой воздухом в калорифере. Теплота, выделенная электрическим нагревателем калорифера, рассчитывается по формуле (6), где U_n - напряжение на электрическом нагревателе в В,

I - ток на электрическом нагревателе в А, который определяется по $R_o=0,1$ Ом - образцовому сопротивлению, последовательно включенному в цепь с нагревателем, как $I=U_n/R_o$.

Теплота, воспринятая воздухом в калорифере, рассчитывается по выражению (7), где H_2 и H_1 - энтальпии влажного воздуха на выходе и входе в калорифер в кДж/(кг с в).

Потери теплоты в калорифере во внешнюю среду определяются как разность (обратите внимание на размерность величин в формуле)

Потери теплоты в сушильной камере определяются путем сопоставления реального процесса сушки 2-3 с идеальным процессом сушки без потерь теплоты во внешнюю среду, который идет по постоянной энтальпии $H_2=const$.

Расчетное выражение потерь теплоты в сушильной камере во внешнюю среду выполняется по формуле (8), где H_2 и H_3 - энтальпии влажного воздуха на входе и выходе из сушильной камеры соответственно в кДж/(кг С в)

$$Q_K = U_n I, \text{ Вт} \tag{6}$$

$$Q_B = G(H_2 - H_1), \text{ кВт} \tag{7}$$

$$Q_{\text{ПОТ}}^K = Q_K - Q_B, \text{ кВт} \tag{8}$$

$$Q_{\text{ПОТ}}^{\text{СК}} = G(H_2 - H_3), \text{ кВт} \tag{9}$$

где (d_{td}) - количество водяного пара испаренное 1 кг сухого воздуха в г.

Количество теплоты, затраченной в калорифере на нагрев воздуха, для испарения 1 кг воды будет соответствовать выражению (9).

Определение количества теплоты необходимой в установке для испарения 1 кг воды из материи.

Для определения количества теплоты необходимого для испарения 1 кг влаги в данной установке сначала рассчитывается количество сухого воздуха необходимого для испарения 1 кг воды по формуле

$$G_{\text{св}} = \frac{1000}{d_2 - d_1}, \text{ кг/с} \quad (10)$$

$$Q = G_{\text{св}}(H_2 - H_1), \text{ кВт} \quad (11)$$