

Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина
Ю.А.»

Кафедра «Технология и оборудование химических, нефтегазовых и пищевых
производств»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по дисциплинам «Теплотехника», «Техническая термодинамика и
теплотехника»

для студентов направлений
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
18.03.01 «Химическая технология»
21.03.01 «Нефтегазовое» дело

очной, заочной, очно-заочной форм обучения

Энгельс 2024 г.

Цель работы: углубление знаний по разделу технической термодинамики «Влажный воздух», изучение методики расчета параметров влажного воздуха и получение навыков в работе с измерительными приборами.

В результате работы должно быть усвоено:

- 1) основные понятия о влажном воздухе;
- 2) методика определения параметров влажного воздуха по расчетным зависимостям;
- 3) методика определения параметров влажного воздуха по I-d-диаграмме.

Задание:

- 1) определить значение параметров влажного воздуха по расчетным зависимостям;
- 2) определить параметры влажного воздуха с помощью I-d-диаграммы;
- 3) составить отчет о выполненной лабораторной работе.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Воздух, не содержащий водяного пара, называется сухим воздухом. В природе сухой воздух не встречается, так как атмосферный воздух всегда содержит некоторое количество водяного пара.

Смесь сухого воздуха с водяным паром называется *влажным воздухом*. Влажный воздух широко используется в сушильных и вентиляционных установках, устройствах кондиционирования воздуха и т.д.

Характерная особенность процессов, протекающих во влажном воздухе, заключается в том, что количество водяного пара, содержащегося в воздухе, изменяется. Пар может частично конденсироваться и, наоборот, вода испаряется в воздух.

Смесь, состоящая из сухого воздуха и перегретого водяного пара, называется *ненасыщенным влажным воздухом*. Парциальное давление пара p_p в смеси меньше давления насыщения p_n , соответствующего температуре влажного воздуха ($p_p < p_n$). Температура пара выше температуры его насыщения при данном парциальном давлении.

Смесь, состоящая из сухого воздуха и сухого насыщенного водяного пара, называется *насыщенным влажным воздухом*. Парциальное давление водяного пара в смеси равно давлению насыщения, соответствующего температуре влажного воздуха. Температура пара равна температуре конденсации при данном парциальном давлении пара.

Смесь, состоящая из сухого воздуха и влажного насыщенного водяного пара (то есть в воздухе имеются частицы сконденсированного пара, находящиеся во взвешенном состоянии и выпадающие в виде росы), называется *перенасыщенным влажным воздухом*. Парциальное давление водяного пара равно давлению насыщения, соответствующего температуре влажного воздуха, которая равна в данном случае температуре конденсации

находящегося в нем пара. В этом случае температура влажного воздуха называется температурой точки росы t_p . Если парциальное давление водяного пара окажется по каким-либо причинам больше давления насыщения, то часть пара сконденсируется в виде росы.

Основными показателями, характеризующими состояние влажного воздуха, являются влагосодержание d , относительная влажность φ , энтальпия I и плотность ρ .

Расчет параметров влажного воздуха производится с использованием уравнения Менделеева-Клапейрона для идеального газа, которому с достаточным приближением подчиняется влажный воздух. Рассматриваем влажный воздух как газовую смесь, состоящую из сухого воздуха и водяного пара.

Согласно закону Дальтона, давление влажного воздуха p равно:

$$p = p_a + p_v, \quad (1)$$

где p_a – парциальное давление сухого воздуха, Па;

p_v – парциальное давление водяного пара, Па.

Максимальное значение парциального давления водяного пара равно давлению насыщенного водяного пара p_n , соответствующего температуре влажного воздуха.

Количество водяного пара в смеси, в кг, приходящееся на 1 кг сухого воздуха, называется влагосодержанием d , кг/кг:

$$d = \frac{M_v}{M_a}, \quad (2)$$

где M_v – масса водяного пара во влажном воздухе, кг;

M_a – масса сухого воздуха, кг.

Запишем уравнение Менделеева-Клапейрона отдельно для сухого воздуха и водяного пара. Решая полученные уравнения относительно массы сухого воздуха и водяного пара, получаем:

$$M_a = \frac{p_a \cdot V}{R_a \cdot T}, \quad \text{так как} \quad \frac{M_a}{V} = \rho_a, \quad \text{то} \quad \rho_a = \frac{p_a}{R_a \cdot T}; \quad (3)$$

$$M_v = \frac{p_v \cdot V}{R_v \cdot T}, \quad \text{так как} \quad \frac{M_v}{V} = \rho_v, \quad \text{то} \quad \rho_v = \frac{p_v}{R_v \cdot T}, \quad (4)$$

где V – объем газовой смеси, м³;

R_a, R_v – газовые постоянные воздуха и водяного пара, равные

$R_a=287$ Дж/(кг·К), $R_v=461$ Дж/(кг·К);

T – температура влажного воздуха, К.

Учитывая, что $p_a = p - p_v$, и, подставляя выражения (3) и (4) в формулу (2), окончательно получаем:

$$d = 0,622 \cdot \left(\frac{p_v}{p - p_v} \right). \quad (5)$$

Масса водяного пара, содержащаяся в 1 м³ влажного воздуха, называется абсолютной влажностью. Она численно равна плотности пара ρ_n , занимающего объем смеси.

Относительной влажностью φ называется отношение плотности пара (то есть абсолютной влажности ρ_n) к максимально возможной абсолютной влажности (плотности $\rho_{n \max}$) при данной температуре и давлении влажного воздуха:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_{n \max}}. \quad (6)$$

Так как ρ_n и $\rho_{n \max}$ определяются при той же температуре влажного воздуха, то

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_{n \max}} = \frac{p_n}{p_{n \max}} = \frac{p_n}{p_n}. \quad (7)$$

Из зависимости (7) следует, что при $\varphi < 1$ влажный воздух ненасыщенный, а при $\varphi = 1$ воздух насыщенный.

Плотность влажного воздуха равна сумме плотностей сухого воздуха ρ_s и водяного пара ρ_n , определяемых при их парциальных давлениях и температуре влажного воздуха:

$$\rho = \rho_s + \rho_n. \quad (8)$$

Плотность сухого воздуха и водяного пара определяется из уравнения Менделеева-Клапейрона, записанного для данных двух компонентов газовой смеси по (3) и (4).

Газовая постоянная влажного воздуха R находится по формуле:

$$R = \frac{R\mu}{\mu}, \quad (9)$$

где $R\mu$ – универсальная газовая постоянная, равная

$R\mu = 8314$ Дж/(кмоль·К);

μ – кажущаяся масса газовой смеси, кг/кмоль, рассчитывается по выражению:

$$\mu = \mu_s \cdot r_s + \mu_n \cdot r_n, \quad (10)$$

где μ_s и μ_n – соответственно, молекулярная масса сухого воздуха и водяного пара, равные $\mu_s = 28,96$ кг/кмоль; $\mu_n = 18,016$ кг/кмоль;

r_s и r_n – объемная доля сухого воздуха и водяного пара.

Объемную долю сухого воздуха r_s и водяного пара r_n определяют по уравнениям:

$$r_s = \frac{p_s}{p}; \quad r_n = \frac{p_n}{p}.$$

Энтальпия влажного воздуха I представляет собой сумму энтальпий 1 кг сухого воздуха и d кг водяного пара:

$$I = i_s + d \cdot i_n. \quad (11)$$

Энтальпия сухого воздуха и пара:

$$i_a = \tilde{n}_{\delta a} \cdot t; \quad i_i = 2500 + c_{pi} \cdot t, \quad (12)$$

где C_{pv} – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К);

C_{pn} – теплоемкость водяного пара, $C_{pn}=1,96$ кДж/(кг·К);

t – температура влажного воздуха, °С.

В интервале температур от 0 до 100°С изобарную теплоемкость сухого воздуха можно принять равной $C_{pv}=1,0$ кДж/(кг·К). Тогда формула (11) примет вид:

$$I = 1 \cdot t + d \cdot (2500 + 1,96 \cdot t).$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для определения относительной влажности влажного воздуха используют гигрометр психрометрический (психрометр).

Психрометр представляет собой прибор, собранный на основании из полимерного материала. К основанию крепятся два термометра со шкалой, психрометрическая таблица, стеклянный питатель, заполняемый дистиллированной водой. Резервуар термометра под надписью «Увлажн.» увлажняется водой из питателя с помощью фитиля из батиста или шифона.

Смачиваемый термометр называется мокрым термометром, а несмачиваемый – сухим. Сухой термометр показывает действительную температуру влажного воздуха. Мокрый термометр показывает так называемую температуру мокрого термометра. Различие в температурах мокрого и сухого термометров является следствием двух непрерывно протекающих процессов:

- 1) процесса теплообмена между воздухом и водой, зависящего от разности температур между ними;
- 2) процесса испарения воды в воздух (сопровождающегося охлаждением воды), зависящего от состояния насыщения окружающего воздуха влагой.

Метод измерения относительной влажности гигрометром психрометрическим основан на зависимости между влажностью воздуха и психрометрической разностью – разностью показаний сухого и мокрого термометров, находящихся в термодинамическом равновесии с окружающей средой. Сняв показания термометров и введя поправки в их показания, определяют разность показаний термометров. Затем по показанию сухого термометра и разности показаний сухого и мокрого термометров определяют относительную влажность воздуха по психрометрической таблице.

Для определения давления влажного воздуха используется барометр.

ТРЕБОВАНИЯ ОХРАНЫ ТРУДА

1. К выполнению работы допускаются студенты, прослушавшие инструктаж по технике безопасности и правилам проведения работ в учебной лаборатории теплотехники, ознакомившиеся с правилами безопасности и методикой проведения эксперимента.
2. Работа проводится только под контролем преподавателя или лаборанта.
3. При работе с гигрометром запрещается:
 - подвергать гигрометр резким ударам;
 - протирать шкалу термометров и психрометрическую таблицу растворителями, кислотами и другими аналогичными жидкостями;
 - перегревать термометры гигрометра больше 60°C. При перегреве происходит разрушение резервуара термометров.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Аспирация воздуха, или скорость воздушных потоков, в помещении при измерении относительной влажности гигрометром ВИТ, не должна превышать 1 м/с. Измерение относительной влажности гигрометром проводится только после установления показаний термометров гигрометра. Минимальное время выдержки гигрометра в измеряемой среде 30 мин.

Измерить температуру по сухому и мокрому термометрам с точностью до 0,2°C, введя к отсчитанным показаниям поправки к термометрам, приведенным в паспорте на гигрометр. Вычислить разность температур по сухому и мокрому термометрам.

Определить относительную влажность воздуха по психрометрической таблице. Искомая относительная влажность будет на пересечении строк температуры по сухому термометру и разности температур сухого и мокрого термометров. При отсутствии в таблице полученной разности температур сухого и мокрого термометров для определения влажности применить интерполирование.

Зная величину относительной влажности, из выражения (7) найти парциальное давление водяного пара.

Далее определяем парциальное давление сухого воздуха по формуле (1), величину влагосодержания – по (5), плотность – по (3), (4), (8), газовую постоянную – по (9), (10), энтальпию влажного воздуха – по (11), (12).

Удельный объем влажного воздуха находится по формуле:

$$v = \frac{1}{\rho} . \quad (13)$$

Массу влажного воздуха M , кг, в помещении лаборатории определяют по формуле:

$$M = \frac{p \cdot V}{R \cdot T}, \quad (14)$$

где V – объем помещения, м³;

p – давление влажного воздуха, Па.

Результаты расчетов и показания приборов занести в таблицу по нижеприведенной форме.

Протокол записи показаний измерительных приборов
и результатов вычислений

№	Наименование определяемой величины	Обозначение	Размерность	Численная величина
1	Давление влажного воздуха	p	Па	
2	Температура сухого термометра	t_c	°С	
3	Температура мокрого термометра	t_m	°С	
4	Относительная влажность воздуха	φ	%	
5	Давление насыщенного пара	p_n	Па	
6	Парциальное давление водяного пара	p_n	Па	
7	Парциальное давление сухого воздуха	p_e	Па	
8	Влагосодержание	d	кг/кг	
9	Плотность влажного воздуха	ρ	кг/м ³	
10	Абсолютная влажность	ρ_n	кг/м ³	
11	Газовая постоянная влажного воздуха	R	Дж/(кг·К)	
12	Энтальпия влажного воздуха	I	кДж/кг	
13	Масса влажного воздуха	M	кг	

Далее следует определить основные параметры влажного воздуха по замеренным t_c и t_m при помощи I-d-диаграммы. Точка пересечения на I-d-диаграмме изотерм, соответствующих температурам мокрого и сухого термометров, характеризует состояние влажного воздуха.

Сопоставить данные, полученные по I-d-диаграмме, с величинами, определенными с помощью математических зависимостей.

Максимальная возможная относительная погрешность определения парциального давления водяного пара и сухого воздуха определяется по формулам:

$$\delta p_n = \delta \varphi + \delta p_n = \left(\delta \varphi + \frac{1}{p_n} \cdot \frac{dp_n}{dT} \cdot \Delta T \right) \cdot 100, \% ; \quad (15)$$

$$\delta p_e = \delta B + \delta p_n, \quad (16)$$

$$\text{где } \delta \varphi = \frac{\Delta \varphi}{\varphi} \cdot 100, \% ; \quad \delta B = \frac{\Delta B}{B} \cdot 100, \%,$$

где через Δ обозначен предел абсолютной погрешности измерения величин.

Предел абсолютной погрешности гигрометра в данной лабораторной работе составляет $\pm 6\%$. Абсолютная допускаемая погрешность термометров психрометра составляет $\pm 0,2\%$. В работе установлен барометр с классом точности 1,0.

Рассчитать по формулам (15), (16) максимально возможные ошибки измерения в процентах.

ОТЧЕТ О РАБОТЕ

Отчет о выполненной лабораторной работе должен содержать следующее:

- 1) краткое описание работы;
- 2) протокол записи показаний измерительных приборов и результатов вычислений;
- 3) рисунок с I-d-диаграммой, где определено состояние влажного воздуха в данном эксперименте.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется влажным воздухом?
2. Что называется насыщенным и ненасыщенным влажным воздухом?
3. Закон Дальтона применительно к влажному воздуху.
4. Что называется температурой точки росы?
5. Что называется абсолютной влажностью?
6. Что называется влагосодержанием влажного воздуха?
7. В каких пределах может изменяться влагосодержание?
8. Что называется относительной влажностью воздуха?
9. В I-d-диаграмме покажите линии $\varphi = \text{const}$, $I = \text{const}$; $d = \text{const}$, $t_c = \text{const}$, $t_m = \text{const}$.
10. Чему равна максимально возможная плотность пара при данной температуре влажного воздуха?
11. Чем определяется максимально возможное парциальное давление водяного пара во влажном воздухе и чему оно равно?
12. От каких параметров влажного воздуха зависит температура мокрого термометра и как она изменяется при их изменении?
13. Как можно определить парциальное давление водяного пара в смеси, если известны относительная влажность и температура смеси?

14. Написать уравнение Менделеева-Клапейрона для сухого воздуха, водяного пара, влажного воздуха и объяснить все входящие в уравнение величины.
15. Как определить плотность сухого воздуха?
16. Как определить газовую постоянную и энтальпию влажного воздуха?