

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Определение скорости потока газа по замерам его динамического давления.

Цель работы: научиться определять скорость газа по замерам его динамического давления.

Теоретическая основа эксперимента

Согласно теореме Бернулли, при установившемся движении газа без учета трения, полное давление, равное сумме статического и динамического (скоростного) давлений, сохраняет свою величину вдоль траектории движения частицы газа:

$$p + \frac{\rho \cdot u^2}{2} = const \quad (1)$$

где p – статическое давление в движущемся потоке газа, Па;

$\frac{\rho \cdot u^2}{2}$ – называется скоростным или динамическим давлением, Па,

здесь ρ – плотность газа, кг/м³;

u – скорость потока газа, м/с.

Если уравнение (1) записать для каких-либо двух различных состояний частицы газа в виде:

$$p_1 + \frac{r \cdot u_1^2}{2} = p_2 + \frac{r \cdot u_2^2}{2}, \quad (2)$$

где индексами I и 2. обозначены эти состояния и преобразовав

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{r \cdot u_1^2}{2} - \frac{r \cdot u_2^2}{2}, \quad (3)$$

то становится очевидным, что при движении газа увеличение его кинетической энергии $\frac{r \cdot u^2}{2}$ происходит за счет уменьшения потенциальной энергии давления и наоборот.

Свойство неизменности суммы статического и динамического давлений используется для измерения скорости потока газа, принцип которого поясняется с помощью рис.1.

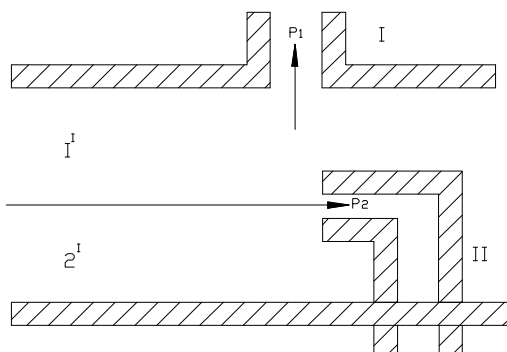


Рисунок 1.

В потоке газа помещаются две трубки, подсоединенные к микроманометру. Плоский открытый конец трубки 1 параллелен потоку газа и вделан заподлицо в стенку трубы, по которой течет газ. Плоский открытый конец трубки 2 – перпендикулярен потоку.

Концы обеих трубок имеют одинаковую координату вдоль потока газа. Кроме того, они находятся на таком расстоянии друг от друга, что возмущения, вносимые в поток трубкой 2, не искажают существенно течение у конца трубки 1.

Выделим малый объем газа и проследим, как изменяются его (газа) параметры при движении вдоль траектории. В некотором положении I состоянием газа I вдали от трубки 2 выполняется соотношение:

$$p_1 + \frac{r_1 \cdot u_1}{2} = const \quad (4)$$

По мере движения частицы газа к открытому концу трубки 2 скорость ее падает, а давление газа возрастает. В тот момент, когда частица газа находится у открытого конца трубки 2 (положение 2 с состоянием 2), скорость частицы равна нулю $u_2 = 0$, а давление при этом определится из уравнения (2),

$$p_2 = p_1 + \frac{r_1 \cdot u_1^2}{2} \quad (5)$$

Величина p_2 , представляет собой полное давление. Трубка 2, измеряющая давление в заторможенном потоке газа, называется трубкой полного напора.

В то же время открытый конец трубки I не чувствует возмущений, вносимых в поток трубкой 2 и сам не возмущает поток – поэтому с помощью трубки I измеряется статическое давление в потоке движущегося газа.

Из уравнения (5) следует, что по измеренной разности полного и статического давления легко определить и скорость потока газа, м/с:

$$u_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_2 - p_1)}{r_1}} \quad (6)$$

Описание установки

Основным элементом экспериментальной установки для измерения скорости потока воздуха является аэродинамическая труба 2 (см.стенд). Аэродинамическая труба представляет собой круглый канал переменного сечения, спрофилированный таким образом, что позволяет получить однородное поле скоростей в его наиболее узкой части. Движение потока воздуха через трубу обеспечивается вентилятором 5, приводимым в действие электродвигателем 3. Скорость вращения двигателя регулируется с помо-

щью лабораторного автотрансформатора 4 (ЛАТР), тем самым, давая возможность изменять скорость потока воздуха в трубе. Измерение скорости потока воздуха обеспечивается с помощью трубок а и в, подключенных к чашечному микроманометру I. Чашечный микроманометр измеряет разность полного и статического давления.

Выполнение работы

Установить ползунок автотрансформатора 4 на нулевое положение против часовой стрелки. Включить ЛАТР в сеть и установить вращением ползунка по часовой стрелке первое из указанных перед началом работы значений напряжения на электродвигателе. После выхода двигателя на установившейся режим (определяемый по прекращению подъема столбика жидкости в трубке микроманометра) записываются показания микроманометра.

Плавню вращая ползунок автотрансформатора, установить новый режим вращения двигателя и повторить измерения. Подобным образом повторить замеры на всех режимах. Полученные результаты заносятся в таблицу 1. Один раз во время проведения эксперимента определяются давление и температура воздуха в помещении, необходимые для обработки результатов. Давление определяют по показаниям барометра-анероида, установленного на стенке в помещении лаборатории.

Обработка результатов измерений

Скорость потока газа в трубе определяется по формуле (6), в нее входит разность полного и статического давлений, вычисляемая по показаниям микроманометра из выражения, Па:

$$p_2 - p_1 = r_{\text{ж}} \cdot g \cdot l \cdot k \quad (7)$$

где $r_{\text{ж}}$ — плотность заполняющей микроманометр жидкости, кг/м³ (см.табличку на микроманометре $r_{\text{воды}} = 1000 \text{ кг} / \text{м}^3$;

$g = 9,8 м / с^2$ — ускорение силы тяжести;

l — длина столбика жидкости в трубке микроманометра в метрах.

— 0.2 } коэффициент, указанный на дуге прибора, устанавли-
вающий связь между высотой столба жидкости и его
 $k = \sin \alpha = \begin{cases} 0.4 \\ 0.6 \\ 0.8 \end{cases}$ длиной в зависимости от угла наклона α трубки к
горизонту;

Плотность воздуха ρ вычисляется из уравнения состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона).

$$\rho = \frac{M \cdot P}{R_m \cdot T} \quad (8)$$

Здесь $M = 28,96$ кг/кмоль — молекулярный вес воздуха;

P — давление воздуха в помещении, Па, пересчитывается из показаний барометра-анероида с помощью соотношения $1 \cdot 10^5$ Па = 760 мм.рт.ст.

R_m — универсальная газовая постоянная;

$T = 273,5 + t$ — абсолютная температура воздуха в помещении.

Подставив значения (7), (в) в формулу (6) получаем окончательное выражение для вычисления скорости потока воздуха в трубе, м/с:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot r_{ж} \cdot g \cdot l \cdot k \cdot R_m \cdot T}{M \cdot P}} \quad (9)$$

По результатам вычислений построить график зависимости скорости потока воздуха в аэродинамической трубе от напряжения на электродвигателе вентилятора. Подробный пример расчета для одного из режимов должен быть приведен в отчете.

Таблица 1

Напряжение на электродвигателе, U, В	Длина столбика жидкости в микроманометре, l, м	Скорость воздуха, u, м/с
1	2	3

Лабораторная работа № 2.

Определение изобарной теплоемкости воздуха при атмосферном давлении

Цель работы – закрепление знаний по разделу «Теплоемкость системы в

различных процессах». Ознакомление с методикой проведения калориметрического эксперимента.

Содержание – измерение средней изобарной теплоемкости воздуха при атмосферном давлении и интервале температур от комнатной до 50 – 70 °С.

Теоретическая основа эксперимента

При расчете теплообменной аппаратуры наиболее важным моментом является определение количества тепла, передаваемого от одного теплоносителя другому. Точный расчет обеспечивает оптимальный режим работы теплообменника.

Сообщение телу тепла при изменении его состояния сопровождается изменением температуры тела, зависящим от характера процесса. Отношение количества тепла dq , подведенного к единицы массы вещества при бесконечно малом изменении его состояния, к изменению температуры dt называют удельной теплоемкостью вещества в данном процессе:

$$C_x = \left. \frac{dq}{dt} \right|_x, \text{ Дж/(кг } ^\circ\text{C)} \quad (1)$$

Другими словами, теплоемкость численно равна количеству тепла, которое нужно сообщить единице вещества в некотором процессе для того, чтобы изменить температуру на 1°С.

Теплоемкость C_x зависит от того, в каких условиях протекает процесс нагревания (охлаждения) тела. На эту зависимость указывает индекс x в уравнении (1) у частной производной $\left. \frac{dq}{dt} \right|_x$, означающей, что процесс

изменения температуры системы происходит вполне определенным образом, а именно, при постоянном значении некоторого параметра x , которым может быть, например, объем системы V , давление p и т.д.

Теплоемкость системы C_x является, таким образом, функцией процесса. Наиболее часто в различного типа теплообменниках происходит процесс передачи тепла при постоянном давлении. Характеристикой системы в таких случаях является удельная изобарная теплоемкость

$$C_p = \left. \frac{dq}{qt} \right|_{p=const} \quad (2).$$

Уравнение (2) определяет значение теплоемкости при фиксированных величинах параметров t и p , поэтому вычисленная по формуле (2) теплоемкость называется истинной. Истинная теплоемкость является калориметрической характеристикой бесконечно малых процессов, в которых параметры системы изменяются на бесконечно малые величины.

На практике в различных процессах параметры системы меняются на конечные величины. Для расчета конечных процессов применяют средние теплоемкости.

В частности, средней удельной изобарной теплоемкостью в интервале температур от t_1 до t_2 называют отношение количества тепла q_{1-2} , которое необходимо сообщить одному килограмму вещества в процессе при постоянном давлении, чтобы вызвать изменение температуры от t_1 до t_2 :

$$C_{pm} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \quad (3).$$

Средняя изобарная теплоемкость переходит в истинную, когда величина изменения температуры стремится к нулю $t_2 - t_1 \rightarrow 0$.

Для идеального газа истинная изобарная теплоемкость рассчитывается из следующего выражения:

$$C_p = \frac{d+2}{2} \cdot \frac{R_m}{m}, \quad (4)$$

где δ = число степеней свободы молекул газа (зависит от атомности молекул I

следующим образом: $i=1, \delta=3; i=2, \delta=5; i \geq 3, \delta=6$;

$R_m = 8314$ Дж/(кмоль·град) – универсальная газовая постоянная;

m – молекулярный вес газа (для воздуха $m=29, i=2, \delta=5$), кг/кмоль.

Описание установки

Экспериментальная установка для определения изобарной теплоемкости воздуха методом протока (проточный калориметр) изображена на стенде. В установке измеряется количество тепла Q , которое необходимо подвести к количеству воздуха G для того, чтобы повысить его температуру на измеряемую величину $t_2 - t_1$.

Основным элементом калориметра является электрический нагреватель 8, от которого отводится тепло к обтекающему его воздуху. Тепловыми потерями от нагретого воздуха в окружающую среду на участке от нагревателя до точки замера температуры воздуха t_2 можно пренебречь вследствие малости этого расстояния. Питание нагревателя переменным током осуществляется от лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа) 1, позволяющего регулировать количество тепла, выделяемого нагревателем. Контроль напряжения и силы тока в цепи нагревателя производится с помощью вольтметра 1 и амперметра 2.

Движение воздуха через калориметр создается вентилятором 6, приводимым во вращение электродвигателем. Реостат 3 дает возможность изменить скорость вращения электродвигателя и тем самым изменять расход воздуха через калориметр.

Температура t_1 воздуха, засасываемого вентилятором из помещения измеряется термометром 7, а температура t_2 нагретого воздуха на выходе из калориметра – термометром 5.

Расход воздуха через калориметр определяется по перепаду давления на трубках полного напора и статического давления, закрепленных у выходного конца трубы. Перепад давления на этих трубках измеряется чашечным микроманометром 4.

Во избежание перегара электродвигателя при отсутствии охлаждающего потока воздуха через трубку, создана такая схема включения нагревателя и электродвигателя в электросеть, при которой в первую очередь включается электродвигатель вентилятора.

Проведение эксперимента.

Автотрансформатор перед включением должен быть выведен в крайнее положение вращением ползунка против часовой стрелки, а ползунк реостата необходимо установить в первое положение, указанное перед началом работы. Положение ползунка реостата L определяется по делениям шкалы, отмеченной на корпусе реостата.

После включения электродвигателя установить вращением ползунка автотрансформатора заданную величину тока в цепи нагревателя. Температура воздуха на выходе из калориметра начинает повышаться. В установленном режиме, наступающем примерно через 4 минуты (когда температура воздуха на выходе перестает изменяться) производится запись показаний амперметра, вольтметра, термометров на входе и выходе калориметра, а также показание чашечного микроманометра.

Подобные измерения проводятся во всех заданных режимах. Режимы устанавливаются изменением положения ползунка реостата (расход воздуха) и изменением тока в цепи нагревателя (количество подводимого к воздуху тепла).

Один раз во время опыта определяется барометрическое давление по барометру – anerоиду, закрепленному на стене в помещении лаборатории.

Данные измерения заносятся в таблицу 1.

Обработка результатов измерений.

Средняя удельная изобарная теплоемкость воздуха в диапазоне температур $t_1 - t_2$ рассчитывается из соотношения:

$$C_{pm} \left|_{t_1}^{t_2} = \frac{Q}{G(t_2 - t_1)} = \frac{YU}{G(t_2 - t_1)} \quad (5)$$

где Y – показания амперметра;

U – показания вольтметра;

G – массовый расход воздуха через калориметр.

Массовый расход вычисляется следующим образом:

$$G = rJ \frac{\rho d^2}{4} \quad (6)$$

где $d = 0,037$ м – внутренний диаметр трубы сечения, где производится замер скорости;

J – средняя скорость потока воздуха в измеряемом сечении вблизи выхода из калориметра;

ρ – плотность воздуха на выходе, определяемая из уравнения состояния идеального газа Клайперона – Менделлева (формула 7)

$$r = \frac{mp}{R_m T_2} \quad (7)$$

здесь p – давление воздуха в помещении, выраженное в Н/м^2 , переведенное из показания барометра – anerоида с помощью соотношения: $760 \text{ мм.рт.ст.} = 10^5 \text{ Н/м}^2$;

$T_2 = t_2 + 273,15$ – абсолютная температура воздуха на выходе из калорифера;

m, R_m – смотри пояснение к формуле (4).

Скорость воздуха в трубе определяется по методике, изложенной в работе «Измерение скорости воздуха» и вычисляется по формуле:

Лабораторная работа № 3.

Исследование кривой насыщения водяного пара в диапазоне 1–6 бар.

Содержание работы: Определение зависимости между температурой и давлением насыщенного пара при давлениях в диапазоне 1–6 бар. Расчет теплоты парообразования.

Теоретическая основа эксперимента

Во всех областях промышленного производства большое распространение получил водяной пар, являющийся рабочим телом в паровых турбинах, в процессах химической технологии, в атомных установках, в различных теплообменниках и т.д. при этом очень часто встречается процесс перехода вещества из жидкого состояния в парообразное – парообразование.

Предположим, что в закрытом сосуде находится некоторое количество жидкости (воды), заполняющей его объем не полностью. Вылетающие из жидкости молекулы заполняют свободное пространство над поверхностью жидкости. Совокупность движущихся в этом пространстве молекул образует насыщенный пар. Часть этих молекул вследствие теплового движения попадает в область, заполненную жидкостью, т.е. возвращается обратно в жидкость, а некоторая доля молекул жидкости, наоборот, испаряется, пополняя убыль молекул в области пара. Между переходом молекул из жидкости в пар и обратным переходом молекул из пара в жидкость устанавливается равновесие, в результате которого плотность молекул над жидкостью, а следовательно, и давление насыщенного пара принимают при данной температуре вполне определенную величину.

Пар, соприкасающийся с жидкостью и находящийся в термическом равновесии с ней, называется насыщенным. Соответствующие этому состоянию давление и температура называются параметрами насыщения.

При подводе жидкости некоторого количества теплоты температура ее возрастает. Вследствие повышения энергии колебательного движения

молекул воды облегчается возможность их вылета в паровое пространство, количество молекул пара возрастает, тем самым, увеличивая его давление. Таким образом, с ростом температуры насыщения растет и давление насыщенных паров.

Кривая в плоскости $P-t$, устанавливающая соответствие между давлением и температурой, находящейся в термическом равновесии двухфазной системы при наличии плоской поверхности раздела фаз, называется кривой насыщения.

Между наклоном кривой насыщения $\frac{dp_n}{dT_n}$ и параметрами равновесия двухфазной системы уравнение Клайперона – Клаузиуса устанавливает следующую связь:

$$\frac{dp_n}{dT_n} = \frac{r}{T_n \cdot (J'' - J')}, \quad (1)$$

где r – полная теплота парообразования;

T_n – абсолютная температура насыщения;

p_n – давление насыщения;

J'' – удельный объем насыщенного пара;

J' – удельный объем жидкости в состоянии насыщения.

Уравнение Клайперона –Клаузиуса часто используется для определения термодинамических свойств различных веществ.

Описание экспериментальной установки.

Экспериментальная установка для исследования кривой насыщения водяного пара изображена на стенде. Основным элементом ее являются цилиндрический сосуд, изготовленный из нержавеющей стали, сосуд покрыт сверху тепловой изоляцией из асбеста 2 и помещен в кожух из листового алюминия 3.

Внутри цилиндра налита вода. Для ее нагрева применяется электронагреватель 4. Ток в нагревателе регулируется при помощи лабораторного автотрансформатора 5 и контролируется по показаниям амперметра 6. Во избежание перегрева спирали нагревателя величина тока не должна превышать 4 ампера. Уровень жидкости в цилиндре должен быть выше поверхности нагревателя во избежание прогара уже самого нагревателя. Контроль над уровнем жидкости обеспечивается водомерной трубкой 7, на которой краской обозначена верхняя граница нагревателя.

Давление водяного пара определяется по показаниям трубчатого манометра 8. Температуры воды и водяного пара измеряются термометром 9. Термометр помещен в металлическую гильзу 10, заполненную термостойкой кремнийорганической жидкостью, которая обеспечивает хороший тепловой контакт термометра с гильзой.

В верхней части цилиндра имеется вентиль 11 для выпуска пара и неконденсирующихся газов (воздуха).

Проведение эксперимента.

Включить в сеть автотрансформатор и установить указанную перед началом работы величину тока нагревателя. Температура воды начинает медленно повышаться. Когда в цилиндре температура воды достигнет 100°C , давление водяных паров равно 1 атмосфере. Но в цилиндре до начала нагревания давление было также атмосферным – оно оказывалось из давления воздуха и давления водяных паров. При комнатных температурах давление водяных паров мало, и следовательно, весь объем над жидкостью в начале опыта заполнен и воздухом. Для устранения ошибки эксперимента вследствие наличия воздуха в цилиндре его нужно выпустить вместе с паром, когда давление пара больше или равно атмосферному, т.е. при температуре больше 100°C . Показание манометра при выпуске воздуха упадет до нуля, т.к. трубчатый манометр измеряет избыточное давление – разность между абсолютным давлением в сосуде и давлением окружающей среды. После этого вентиль 11 закрыть.

При дальнейшем нагреве давление пара превышает атмосферное и только здесь начинает давать показание манометр. Начиная со 100°C производятся одновременная запись температуры пара и показаний манометра при изменении температуры через каждые 5°C . Данные измерения зано-

сятся в таблицу 1. Один раз во время проведения опыта замеряется барометрическое давление по барометру – анероиду.

Измерения прекращаются когда манометр станет показывать 4 бар. После этого уменьшить до нуля напряжение на нагревателе и выключить автотрансформатор из сети.

ВНИМАНИЕ! Не превышать давление в цилиндре сверх 4 бар и после работы не оставлять включенным нагреватель. Это вызовет дальнейшее повышение температуры и давления пара и может привести к взрыву.

Обработка результатов

Необходимо помнить, что трубчатый манометр показывает величину избыточного давления. Следовательно, абсолютное давление пара находится из выражения:

$$p_{абс} = p_{изб} + B \quad (2)$$

где $p_{изб}$ – показание манометра;

B – барометрическое давление, считываемое с барометра–анероида.

Перерасчет показаний с барометра с мм.рт.ст. в бары производится из соотношения: 760 мм.рт.ст = 1 бар.

На основании данных таблицы строится в координатах $t - p_{абс}$ кривая насыщения. Причем, линия через экспериментальные точки проводится плавно с помощью лекала. При этом возможно некоторое отклонение точек от линии – так называемый экспериментальный разброс. Но точки должны быть расположены по обе стороны от кривой. По оси ординат откладывается давление в единицах системы СИ, т.е. в Н/м^2 (1бар = 10^5 Н/м^2). По оси абсцисс откладывается температура в градусах Цельсия.

Полная теплота парообразования рассчитывается с помощью уравнения Клайперона – Клаузиуса, Дж/кг:

$$r = T_n \cdot \left(J'' - J' \right) \frac{dp_n}{dT_n} \quad (3)$$

необходимые для расчета значения удельных объемов жидкости и пара на линии насыщения J' и J'' берутся из таблицы термодинамических свойств водяного пара. Следует помнить, что здесь T_n – абсолютная температура насыщения, т.е. $T_n = t_n + 273$. Значение dp_n / dT_n можно получить графическим дифференцированием полученной экспериментальной зависимости давления насыщенного пара от температуры. Расчет производной dp_n / dT_n , а так же выбор величин J' и J'' из таблиц производится при некоторой температуре насыщения, величина которой задается преподавателем перед началом работы.

Для вычисления производной dp_n / dT_n по экспериментально построенной кривой насыщения при некоторой заданной температуре t_1 поступают следующим образом (см. рис. 1).

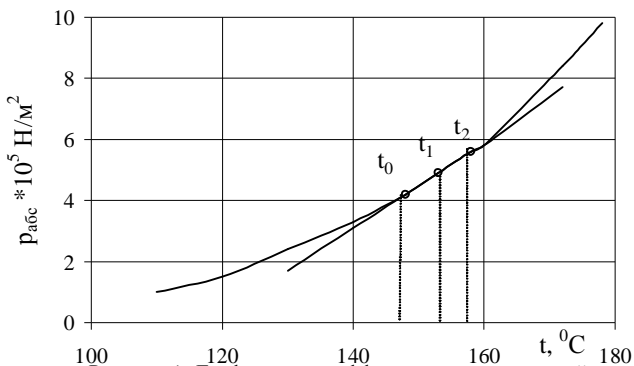


Рисунок 1- Графическое дифференцирование кривой насыщения воды

Выбирают точки 0 и 2 на равном расстоянии Dt от точки 1 (например, $Dt = 5^{\circ}\text{C}$) и считывают с кривой значения давления в этих точках p_0 и p_2 . Тогда производная в точке 1 вычисляется из соотношения:

$$\left. \frac{dp_n}{dT_n} \right|_{t=t_1} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} (p_2 - p_0) \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \text{град}}$$

Геометрическая интерпретация графического дифференцирования такова: производная от кривой в точке 1 равна наклону секущей, проходящей через равностоящие точки 0 и 2.

Таблица 1

№ №	t, °C	p _{изб.} , бар	p _{абс.} , бар
1	100		
2	105		

Лабораторная работа № 4.

Определение параметров влажного воздуха

Цель работы: закрепление знаний по разделу «Влажный воздух». Ознакомление с методами исследования свойств влажного воздуха.

С влажным воздухом – смесью сухого и водяного пара, приходится иметь дело в ряде теплотехнических процессов. Среди них наиболее важными являются процессы кондиционирования воздуха и процессы сушки различных материалов с использованием влажного воздуха в качестве теплоносителя. Расчет этих процессов требует знания свойств влажного воздуха.

Параметры влажного воздуха

Атмосферный воздух всегда содержит некоторое количество влаги, т.е. представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара.

Смесь сухого воздуха и водяного пара называют влажным воздухом.

В расчетах влажного воздуха применяют формулы, выведенные для идеальных газов, потому что процессы, происходящие с влажным воздухом в большинстве случаев происходят при давлениях, близких к атмосферному. При таких состояниях и воздух, и водяной пар подходят под определение идеального газа.

Водяной пар в воздухе может быть насыщенным или перегретым. Состояние пара определяется величиной его парциального давления p_n . Если обозначить p_v – парциальное давление воздуха, то по закону Дальтона давление влажного воздуха равно:

$$p = p_n + p_v \quad (1)$$

Если влажный воздух постепенно охладить, то в зависимости от содержания в нем водяного пара при достижении определенной температуры начинается конденсация водяного пара выпадение влаги. Температура, при которой происходит конденсация водяных паров, содержащихся в воздухе, называется точкой росы или температурой насыщения $t_{п}$.

При определении состояния влажного воздуха кроме давления и температуры, используются следующие параметры:

– *абсолютная влажность* воздуха характеризуется массой водяного пара, содержащегося в 1 м^3 воздуха, или это есть не что иное как плотность пара $\rho_{п}$.

– *относительная влажность* воздуха выражается отношением абсолютной влажности воздуха к его максимально возможной абсолютной влажности ρ_{\max} при некоторых давлении и температуре смеси:

$$j = \frac{r_n}{r_{\max}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

Иначе можно сказать, что относительная влажность воздуха есть отношение массы водяного пара в 1 м^3 влажного воздуха к массе водяного пара, необходимой для полного его насыщения при этих условиях.

Если температура влажного воздуха меньше или равна температуре насыщенного водяного пара при давлении всей смеси, то ρ_{\max} равна плотности насыщенного водяного пара при температуре смеси и значение ее определяется по таблицам насыщенного водяного пара.

– *влагосодержанием* называется отношение массы влаги (пара) во влажном воздухе к массе сухого воздуха в нем:

$$d = \frac{M_n}{M_{\text{с}}} = \frac{r_n}{r_{\text{с}}} \quad (3)$$

Величина влагосодержания измеряется в г/кг (в граммах влаги на 1 кг сухого воздуха, содержащегося во влажном воздухе).

– *энтальпия* влажного воздуха I – определяется как сумма энтальпий сухого воздуха и водяного пара. Энтальпия влажного воздуха, относят к $(1+d \cdot 10^{-3})$ кг влажного воздуха.

$$I = i_v + i_n \cdot d \cdot 10^{-3}, \text{Дж/кг (4)}$$

Диаграмма I – d влажного воздуха

Параметры влажного воздуха (температура, относительная влажность, энтальпия, влагосодержание, парциальное давление пара и температура насыщения) легко определяются с помощью I – d диаграммы, предложенной профессором Л.К.Рамзиным.

I – d диаграмма построена в косоугольных координатах с углом между ними 135° . По оси ординат отложена энтальпия влажного воздуха на 1 кг содержащегося в нем сухого воздуха, по оси абсцисс – влагосодержание влажного воздуха на 1 кг сухого воздуха. Для удобства пользования, значения d нанесены на горизонталь.

На диаграмме нанесены линии $t_c = \text{const}$, $t_m = \text{const}$, $I = \text{const}$, $\phi = \text{const}$, а так же представлены в графической форме зависимость парциального давления водяного пара в воздухе от его влагосодержания, причем значения парциального давления p_n в мм.рт.ст. приведены справа внизу по оси ординат.

Под температурой мокрого термометра t_m понимают температуру, показываемую термометром, шарик которого обернут влажной тканью, если тепло, необходимое для испарения влаги, берется только из окружающего воздуха. Вследствие охлаждения при испарении влаги мокрый термометр показывает температуру ниже температуры сухого термометра.

Диаграмма I – d построена для давления влажного воздуха 745 мм.рт.ст., что примерно соответствует среднегодовому барометрическому давления с достаточной для практических целей точностью. Указанной диаграммой можно пользоваться, когда процессы с влажным воздухом происходят при атмосферном давлении. I – d диаграмма дает возможность по двум каким-либо параметрам влажного воздуха определить все остальные.

Исходными данными для определения параметров состояния влажного воздуха служат показания сухого и влажного термометров аспирационного психрометра.

Назначение аспирационного психрометра.

Психрометр аспирационный предназначен для определения параметров влажного воздуха в стационарных и походных условиях.

Принцип действия психрометра основан на разности показаний сухого и смоченного термометров в зависимости от влажности окружающего воздуха.

Прибор работает следующим образом: Вращением вентилятора в прибор всасывается воздух, который, обтекая резервуары термометров, проходит по воздухопроводной трубке к вентилятору и выбрасывается им наружу через прорези в аспирационной головке. Благодаря протеканию воздуха вокруг ртутного резервуара термометров сухой термометр показывает температуру этого потока, а показания смоченного термометра меньше, т.к. он охлаждается вследствие испарения воды с поверхности батиста, облегающего его резервуар.

Порядок наблюдений по аспирационному психрометру следующий: за 5 минут до начала наблюдений смачивают батист на резервуаре правого термометра. Для этого берут резиновый баллон с пипеткой, заранее заполненный чистой водой, и легким нажимом доводят воду в пипетке не ближе, чем на 1 см до края и удерживают ее на этом уровне с помощью зажима. После этого пипетку вводят до отказа во внутреннюю трубку защиты 1 и смачивают батист на резервуаре термометра. Выждав некоторое время, не вынимая пипетки из трубы, зажимают зажим, вбирая лишнюю воду в баллон, после чего пипетку вынимают. Заводят вентилятор почти до отказа, но осторожно, чтобы не сорвать пружину.

Отсчет по термометрам проводится через 4 мин. после пуска вентилятора.

Психрометром можно пользоваться при отрицательных температурах не ниже -10°C , но при этом необходимо каждый раз отмечать состояние батиста: была ли на нем переохлажденная вода или лед.

Определение параметров влажного воздуха по показаниям аспирационного психрометра.

Как уже было указано ранее, с помощью $I - d$ диаграммы влажного воздуха можно определить по двум известным параметрам все остальные. Эти два известных параметра используются для нахождения точки на диаграмме, которой изображается данное состояние влажного воздуха.

Психрометр показывает значение температур мокрого t_m и сухого t_c термометров и искомая точка на диаграмме является точкой пересечения соответствующих прямых $t_c = \text{const}$ и $t_m = \text{const}$.

Значения температур сухого термометра для каждой прямой $t_c = \text{const}$ указаны в левой части диаграммы.

Значения температур мокрого термометра, соответствующих прямым $t_m = \text{const}$, указаны в точках пересечения этих прямых с линией насыщенного воздуха $\phi = 100\%$.

После того, как нашли точку на диаграмме, находим остальные параметры влажного воздуха в этом состоянии.

Влагосодержание d определим, проектируя полученную точку вертикально вниз до пересечения с горизонтальной осью влагосодержания.

Энтальпию влажного воздуха Y находим, проектируя исходную точку влево вверх под углом 45° параллельно линиям $Y = \text{const}$ до пересечения с осью энтальпий.

Относительная влажность рассчитывается интерполяцией между двумя соседними кривыми $\phi = 100\%$.

Температура точки росы определяется в результате проектирования исходной точки вертикально вниз до пересечения с кривой насыщенного воздуха $\phi = 100\%$.

Продолжая вертикаль до пересечения с кривой «Парциальное давление пара», можно найти его величину, отсчитывая значения по оси парциального давления пара, нанесенной в правой нижней части диаграммы.

Порядок выполнения работы.

С помощью аспирационного психрометра измеряются температуры влажного и сухого термометров в помещениях, указанных преподавателем. Полученные значения заносятся в таблицу 1. с помощью диаграммы $Y-d$ влажного воздуха по этим данным устанавливаются относительные его параметры и заносятся в таблицу 1.

Таблица 1.

Место измерений	Тем-ра сухого термом. t_c	Тем-ра мокрого терм. t_m	Точка росы t_m	Влаго-содержание d	Энталь-пия I	Относит. влаж-ность ϕ	Парциаль-ное дав-ление p_p
	С	С	С	г/кг	кДж/кг	%	кПа

Лабораторная работа № 5.

Определение показателя адиабаты воздуха.

Цель работы – экспериментальное определение показателя адиабаты воздуха. Закрепление раздела «Процессы идеального газа».

Теоретическая основа

Процесс изменения состояния идеального газа, протекающий без ввода и отвода тепла, т.е. при отсутствии теплообмена газа с окружающей средой, называется адиабатным.

При адиабатном процессе параметры газа изменяются таким образом, что произведение давления на удельный объем в степени K :

$$pJ^K = const \quad (1)$$

остаётся постоянной величиной. Здесь K называется показателем адиабаты системы, является ее физическим параметром и выражает отношение теплоемкости при постоянном давлении C_p и постоянном объеме C_J

$$K = \frac{C_p}{C_J} \quad (2)$$

Для идеального газа величина K является постоянной. Она зависит только от количества атомов в молекуле газа: одноатомный газ $K= 1,66$; двухатомный– $K= 1,4$; трехатомный $K= 1,33$.

Из уравнения (1) следует, что в адиабатическом процессе между параметрами газа в начале и в конце процесса выполняются соотношения:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{J_2}{J_1} \right)^\kappa \quad (3)$$

$$\text{или } \frac{J_2}{J_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (4)$$

Используя уравнение состояния идеального газа

$$pJ = \frac{R_m}{m} T, \quad (5)$$

соотношение (3) можно привести к виду:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{J_2}{J_1} \right)^{\kappa-1}, \quad (6)$$

$$\text{или } \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_1}{T_2} \quad (7)$$

Здесь p_1, J_1, T_1 – давление, удельный объем и температура газа в начале, а p_2, J_2, T_2 – те же параметры газа в конце адиабатического процесса.

Адиабатический процесс протекает при хорошей тепловой изоляции системы от окружающей среды или при большой скорости процесса, когда теплообменом с окружающей средой можно пренебречь.

Порядок выполнения работы.

Экспериментальная установка для определения показателя адиабаты воздуха изображена на стенде. Она состоит из сосуда 1 с системой кранов, насоса 2 и U-образного манометра 3.

При закрытой пробке В в сосуде 1 с помощью насоса 2 создается давление 180 – 200 мм.вод.ст. (отсчитывают по U-образному манометру,

заполненному подкрашенной водой). После этого наблюдают по манометру постоянство его показаний, что будет свидетельствовать о наступлении теплового равновесия воздуха в сосуде с окружающей средой. Процесс установления равновесия продолжается примерно 4 минуты. Достигнутое равновесие (первое), состояние воздуха в сосуде характеризуется параметрами p_1 и T_1 .

$$p_1 = p_0 + h_1, \text{ мм.вод.ст. (8)}$$

где p_0 – атмосферное давление;

h_1 – давление, отсчитываемое по манометру;

T_1 – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

Быстро открыв пробку В, выпускают воздух из сосуда до тех пор, пока давление в нем не станет равным атмосферному, что соответствует показанию «0» на U-образном манометре. Это (второе) состояние воздуха характеризуется параметрами p_2 и T_2 , где $p_2 = p_0$, а $T_2 < T_1$. Ввиду кратковременности процесс перехода воздуха в сосуде из первого состояния во второе можно считать адиабатическим.

Сразу после выравнивания давления в сосуде с атмосферным давлением пробку В следует закрыть. После этого наступает процесс установления теплового равновесия между воздухом в сосуде и окружающей средой. Оно характеризуется нагревом воздуха в сосуде от температуры T_2 до температуры окружающей среды T_1 . Этот процесс изохорический и сопровождается повышением давления. Окончание процесса фиксируется по прекращению изменения показаний U-образного манометра. Наступившее равновесное состояние (третье) характеризуется давлением:

$$p_3 = p_0 + h_3 \text{ (9)}$$

где h_3 – показание манометра и температуры ($T_3 = T_1$)

Таким образом, завершив измерения, получаем значения h_1 и h_3 , которые заносятся в таблицу.

Обработка результатов измерений.

Запишем уравнение (7) для процесса 1–2 выпуска воздуха из сосуда:

$$\left(\frac{p_0 + h_1}{p_0} \right)^{k-1} = \frac{T_1}{T_2} \quad (10)$$

Полученное соотношение приведем к виду:

$$\left(1 + \frac{h_1}{p_0} \right)^{k-1} = \left(1 + \frac{T_1 - T_2}{T_2} \right)^k \quad (11)$$

Поскольку $\frac{h_1}{p_0}$, $\frac{T_1 - T_2}{T_2}$ – величины малые по сравнению с единицей, разложив обе скобки в ряд, ограничившись лишь слагаемыми 1-го порядка малости:

$$1 + (k-1) \frac{h_1}{p_0} = 1 + k \frac{T_1 - T_2}{T_2} \quad (12)$$

или

$$p_0 \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{k-1}{k} h_1 \quad (13)$$

Переход от второго равновесного состояния к третьему осуществляется при постоянном объеме ($V = \text{const}$). Для этого процесса имеем:

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_1}{T_2}, \text{ т.к. } T_3 = T_1 \quad (14)$$

С учетом (9) и $p_2 = p_0$ получим:

$$\frac{p_0 + h_3}{p_0} = \frac{T_1}{T_2} \quad (15)$$

откуда следует, что

$$h_3 = p_0 \frac{T_1 - T_2}{T_2} \quad (16)$$

Объединив (13) и (16), в итоге получим:

$$h_3 = \frac{k-1}{k} h_1 \quad (17)$$

откуда и рассчитываем показатель адиабаты воздуха:

$$k = \frac{h_1}{h_1 - h_3} \quad (18)$$

Результаты расчета по формуле (18) занести в таблицу 1. Построить процессы изменения состояния воздуха в данном опыте в координатах $p - J, T - S$.

Таблица 1

№№	h_1 , мм.вод.ст.	h_3 , мм.вод.ст.	k
1			
2			
3			

Лабораторная работа №6

Исследование характеристик политропных процессов с использованием ПЭВМ

Цель работы: углубление знаний студентов по термодинамическим процессам путем исследования характеристик политропных процессов и приобретение навыков работы на ПЭВМ.

Постановка задачи

В конце процесса горения топлива в цилиндре ДВС продукты сгорания имеют температуру T_1 и давление p_1 . После этого продукты сгорания политропно расширяются, совершая полезную работу. При этом давление газов понижается до величины p_2 , а удельный объем газов становится равным V_2 .

1. Определить: n – показатель политропы; V_1 – удельный объем газа, находящегося в цилиндре под поршнем; T_2 – температуру газов в конце процесса расширения; Δu_{12} – изменение внутренней энергии; Δi_{12} – изменение энтальпии; q_{12} – количество теплоты; l_{12} – работу расширения; Δs_{12} – изменение энтропии.

2. Построить политропу в p - v и T - s – координатах, для чего определить для значений $p_1 \leq p_i \leq p_2$ с шагом Δp соответственно: $V_i \leq V_i \leq V_2$; $T_1 \leq T_i \leq T_2$; $\Delta s_i \leq \Delta s_i \leq \Delta s_2$. Число точек для построения политропы принять равным $N = 10$, т.е. ($1 \leq i \leq N$).

3. Решить задачу при исходных данных p_1 , T_1 , p_2 , V_2 (численные значения указывает преподаватель, ведущий лабораторные работы).

Принять, что:

- газовая постоянная продуктов сгорания $R = 280 \text{ Дж} / \text{кг}^\circ\text{C}$;

- изохорная и изобарная теплоемкости газов являются постоянными величинами и соответственно равны $C_v = 720 \text{ Дж} / \text{кг}^\circ\text{C}$ и $C_p = 1000 \text{ Дж} / \text{кг}^\circ\text{C}$;

- показатель адиабаты продуктов сгорания $k = 1,39$.

Алгоритм решения

1. Определение параметров продуктов сгорания в начале и в конце политропного процесса.

Удельный объем газов в начале процесса расширения

$$V_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1}$$

Температура в конце процесса политропного расширения

$$T_2 = \frac{p_2 \cdot V_2}{R}$$

2. Определение характеристик политропного процесса

Показатель политропы

$$n = \frac{\ln \frac{p_1}{p_2}}{\ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{\ln p_1 - \ln p_2}{\ln V_2 - \ln V_1}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U_{1-2} = C_v \cdot (T_2 \cdot T_1)$$

Изменение энтальпии

$$\Delta i_{1-2} = C_p \cdot (T_2 \cdot T_1)$$

Количество теплоты

$$q_{12} = C_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1)$$

Работа расширения

$$l_{12} = \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2)$$

Изменение энтропии в процессе

$$\Delta s_{12} = C_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

3. Построение политропы в pV и Ts – координатах.

Для построение политропы необходимо для значений $p_2 \leq p_i \leq p_1$ соответственно определить значения $V_1 \leq V_i \leq V_2$; $T_2 \leq T_i \leq T_1$; $\Delta s_i \leq \Delta s_j \leq \Delta s_2$; $i = 1, 2, \dots, N$; $N = 10$ - число расчетных точек.

Определяем шаг изменения давления между двумя соседними точками

$$\Delta p = \frac{p_1 - p_2}{N - 1}$$

Давление в любой i-ой точке политропы

$$p_i = p_{i+1} + \Delta p$$

Из уравнения политропы определяем значение удельного объема для i-той точки политропы

$$p_1 \cdot V_1 = p_i \cdot V_i^n, \text{ откуда } V_i = \sqrt[n]{\frac{p_1 \cdot V_1^n}{p_i}}$$

Из уравнения связи параметров политропного процесса определяем значение абсолютной температуры продуктов сгорания для i-той точки политропы

$$\frac{T_2}{T_i} = \left(\frac{p_1}{p_i} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \text{ откуда } T_i = \frac{T_1}{\left(\frac{p_1}{p_i} \right)^{\frac{n-1}{n}}}$$

Промежуточные значения изменения энтропии в политропном процессе определяются

$$\Delta s_i = C_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_i}{T_1}$$

По найденным значениям для p_i , T_i , V_i , ΔS_i для $i = 1, 2, \dots, N$ строим в PV и TS - координатах политропный процесс расширения газов в цилиндре ДВС.

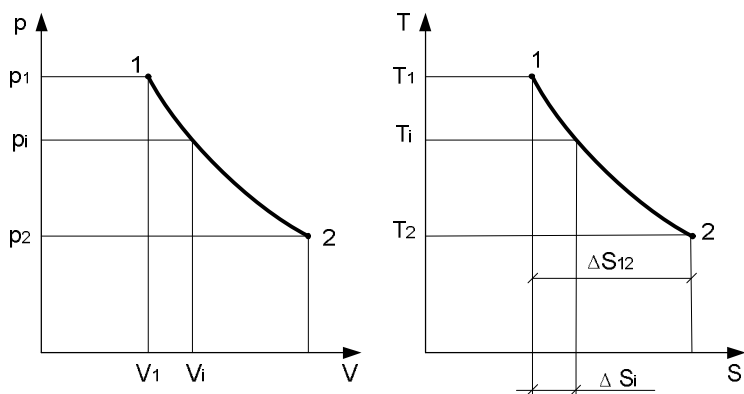


Рисунок 1 – Графическое изображение процесса в PV и TS – диаграммах.

Лабораторная работа № 7

Методы измерения температуры

Цель работы – закрепление знаний по разделу «Термодинамические параметры системы». Ознакомление с методами и приборами измерения температуры.

Теоретическая основа эксперимента. Понятие температуры.

Согласно молекулярно – кинетической теории все тела состоят из молекул, находящихся в беспорядочном тепловом движении. Нагревание усиливает беспорядочное движение молекул, увеличивает внутреннюю энергию тела, которая складывается из кинетической энергии давления молекул и их взаимной потенциальной энергии.

Температура есть мера интенсивности теплового движения молекул, мера нагретости тела: ее численная величина однозначно связана с величиной средней кинетической энергией молекул вещества. Для идеального газа при неслишком низких температурах эта зависимость известна в виде:

$$T = \frac{2}{3k} \cdot \frac{mJ^2}{2} \quad (1)$$

где T– абсолютная температура:

$\frac{mJ^2}{2}$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул;

k– постоянная Бльцмана.

Для реальных газов, жидкостей и твердых тел зависимость между температурой и внутренней энергией значительно более сложная.

Температура – статическая величина. Ее измерение имеет смысл только в телах, состоящих из огромного числа молекул. Определение тем-

пературы одной молекулы бессмысленно, т.к. кинетическая энергия отдельных молекул тела может значительно отличаться от его средней кинетической энергии.

Практически измерить кинетическую энергию составляющих тело молекул невозможно и нельзя создать прибор для измерения температуры, конструкция которого логически бы вытекала из определения температуры. Поэтому для измерения температуры используют различные косвенные методы. Во всех этих методах используют изменение каких – либо свойств вещества, изменяющихся с температурой и по величине изменения этих свойств судят об изменении температуры.

Свойства веществ, которые можно использовать для измерения температуры, называют термометрическими. К ним относят объем, плотность, длина, электрическое сопротивление, термоэлектродвижущая сила и т.д.

Температура представляет собой величину переменного уровня. Это значит, что при ее изменении происходит последовательное изменение уровня теплового состояния вещества. Поэтому при определении температуры необходимо знать непрерывный ряд значений термометрического свойства вещества, т.е. надо иметь температурную шкалу.

Для построения температурной шкалы выбирают две опорные точки, называемые реперами. В качестве репер t_1 и t_2 обычно выбирают температуры фазового равновесия однокомпонентных систем, т.к. эти температуры могут быть легко воспроизведены. Температурам t_1 и t_2 приписывают произвольные числовые значения.

Расстояния между реперами $t_2 - t_1$ носит название основного температурного интервала. Его разбивают на N частей. $\frac{1}{N}$ часть основного интервала была названа градусом, который таким образом, равен $\frac{t_2 - t_1}{N}$.

В настоящее время принята Международная практическая шкала температур (МШТ). В качестве реперных точек этой шкалы используют температуры затвердения и кипения некоторых чистых веществ при нормальном атмосферном давлении (за исключением тройной точки воды). Значения реперных точек, выраженные в градусах Цельсия $^{\circ}\text{C}$, приведены ниже:

точка кипения кислорода $-182,97^{\circ}\text{C}$

тройная точка воды (основная реперная точка) $0,01^{\circ}\text{C}$

точка кипения воды 100°C

точка кипения серы $444,6^{\circ}\text{C}$

точка затвердения серебра $960,8^{\circ}\text{C}$

точка затвердения золота $1063,0^{\circ}\text{C}$.

В термодинамике используется термодинамическая шкала температур – шкала Кельвина. Размер градуса в ней тот же, что и в МШТ. Соотношение числовых значений температур в абсолютной термодинамической шкале определяется по формуле:

$$T = t + 273,15 \text{ К (2)}$$

Экспериментальное измерение температуры. Описание экспериментальной установки.

Установка для измерения температуры нагреваемой воды с помощью ртутного термометра, термопары, термометра сопротивления изображена на стенде. Резервуар 1 с водой помещен на электроплитку 2. Резервуар закрыт крышкой, в которой закреплены ртутный термометр 3, хромель – копелевая термопара ХКТ в техническом исполнении 4 и медный термометр сопротивления 5 также в техническом исполнении. Чувствительные элементы всех измерительных устройств находятся вблизи друг от друга в объеме жидкости с одинаковой температурой. Кроме того, они погружены в воду на значительную глубину для уменьшения утечки тепла от чувствительных элементов по защитному корпусу датчиков.

Термопара подключена к автоматическому показывающему электронному потенциометру с вращающимся циферблатом – ЭПВ 2-0,1. шкала прибора проградуирована в диапазоне от -50 до 100°C именно для хромель – копелевой термопары.

Медный термометр сопротивления подключен к электронному показывающему уравновешенному мосту с вращающимся циферблатом ЭВМ 2– 201. шкала прибора в диапазоне от 0 до 150°C , причем его градуировка ГР 23 требует подключения к нему медного термометра сопротивления, сопротивление которого при 0°C равно 53 ом.

Конструктивно приборы ЭПВ 2– 01 и ЭВМ 2– 201 выполнены одинаково, поэтому для их отличия на корпусах сделаны соответственно надписи «Термопара», «Термометр сопротивления».

Проведение эксперимента.

Приборы включить только после разрешения преподавателя!

Включить в сеть приборы ЭПВ 2– 01 и ЭВМ 2– 201 с помощью общей вилки. Выждать 3 – 4 минуты, пока они прогреются. Во время прогрева, шкалы приборов сначала совершают переход из одного крайнего положения в другое, затем несколько колебаний около некоторого положения и останавливаются. В момент остановки они показывают температуру, которую имеют чувствительные элементы. После остановки шкалы приборов готовы к работе.

Включить электроплитку в сеть. Вода в резервуаре начинает медленно нагреваться.

Начиная с момента включения, производить через каждые 3 мин. одновременно отсчеты температур t_1 по ртутному термометру, t_2 по прибору «Термопара» и t_3 – по прибору «Термометр сопротивления». Данные занести в таблицу 1.

Измерения производить до тех пор, пока температура воды, показываемая ртутным термометром, не достигнет значения, указанного преподавателем перед началом работы. После этого электроплитку отключить, а затем запись показаний приборов продолжить в том же порядке и при охлаждении воды.

После окончания работы отключить все приборы и привести в порядок рабочее место.

Обработка результатов.

По данным эксперимента построить три зависимости температуры воды, измеряемой ртутным термометром t_1 , термопарой t_2 и термометром сопротивления t_3 от времени τ (мин.). Все три зависимости построить на одном рисунке.

Сравнить полученные результаты и попытаться объяснить их. Например, таким образом. Термометр сопротивления обладает значительной тепловой инерцией, поэтому при нагреве воды его показания отстают от показаний ртутного термометра и термопары, а при охлаждении – превышают их.

По результатам работы сделать выводы.

Таблица 1

Время τ , мин.	Показания ртутного термометра $t_1, ^\circ\text{C}$	Показания термопары $t_2, ^\circ\text{C}$	Показания термометра сопротивления $t_3, ^\circ\text{C}$
1	2	3	4

Лабораторная работа № 8

Исследование процесса истечения водяного пара из комбинированного сопла с использованием ПЭВМ

Цель работы: углубление знаний студентами процессов истечения газов и паров через сопла путем расчета параметров истечения водяного пара из комбинированного сопла и приобретение навыков работы на ПЭВМ.

Постановка задачи

Построить кривые изменения скорости ω , давления p и удельного объема v по длине сопла, начиная с критического сечения, если известны следующие параметры (численные значения указывает преподаватель, ведущий лабораторные работы): начальное давление пара $P_{1АБС}$; начальная температура t_1 ; давление в выходном сечении сопла $P_{2АБС}$; расход пара G ; угол между образующими конуса в расширяющейся части сопла φ .

Алгоритм решения

1. По значениям параметров начальной и конечной точек на диаграмме i - s нанести адиабатный процесс истечения пара.
2. Принимая для водяного пара $b_{кр} = 0,547$, определить давление в критическом сечении сопла $p_{кр.АБС} = b_{кр} \cdot P_{1АБС}$.
3. Построенный на диаграмме i - s процесс истечения произвольно разбить на интервалы по давлению $p_{кр.АБС} \leq p_{iАБС} \leq P_{2АБС}$, так, чтобы получить не менее пяти промежуточных значений $P_{iАБС}$.
4. По диаграмме i - s найти промежуточные значения энтальпий $h_i = i_1 - i_2$, где i_1 — энтальпия пара при начальных параметрах p_1, t_1 ; i_2 — энтальпия пара в промежуточных точках; а также значения удельных объемов пара v_i для выбранных $P_{iАБС}$. Полученные данные записать в таблицу.

5. Найти скорость истечения в критическом сечении сопла $w_{кр} = 44,7 \cdot \sqrt{i_1 - i_2}$, где i_2 — энтальпия пара при $P_{кр.АБС}$.

6. Подсчитать значения скорости потока пара для перепадов давлений от $p_{кр. до} p_i$ $w_i = 44,7 \cdot \sqrt{h_i}$.

7. Площадь поперечного сечения расширяющейся части сопла, где параметры пара p_i и v_i

$$f_i = \frac{G \cdot u_i}{w_i} \cdot 10^6 \text{ мм}$$

диаметр сопла в этом сечении $d_i = \sqrt{\frac{4f_i}{\pi}}$, мм.

Длина сопла от горловины d_{\min} до данного сечения равна

$$l_i = \frac{d_i - d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}$$

Полученные значения записываем в таблицу.

$P_{\text{АБС}}, \text{ бар}$						
$h_i, \text{ кДж / кг}$						
$w_i, \text{ м / с}$						
$u_i, \text{ м}^3 / \text{ кг}$						
$f_i, \text{ мм}$						
$d_i, \text{ мм}$						
$d_i \cdot d_{\min}, \text{ мм}$						
$l_i, \text{ мм}$						

По найденным значениям в масштабе строим кривые изменения ω , v и p по длине расширяющейся части сопла.

