



Паспортный лист  
тех рекомендаций  
и, методических  
ий, методических  
указаний

Форма  
Ф СО ПГУ 7.18.3/40

Министерство образования и науки Республики Казахстан  
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова  
Кафедра механики и нефтегазового дела

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И УКАЗАНИЯ**

к лабораторным работам

по дисциплине «Термодинамика и теплотехника»

для студентов специальности 050708 – Нефтегазовое дело

Павлодар



тверждения  
х рекомендаций и  
методических  
ий, методическим  
указаний

Форма  
Ф СО ПГУ 7.18.3/41

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по УР

\_\_\_\_\_ Н. Э. Пфейфер

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Составитель: канд. техн. наук, профессор \_\_\_\_\_ В.В. Рындин

Кафедра механики и нефтегазового дела

## **Методические рекомендации и указания**

к лабораторным работам

по дисциплине «Термодинамика и теплотехника»

для студентов специальности 050708 – Нефтегазовое дело

Рекомендовано на заседании кафедры

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г., протокол № \_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ А.Х. Мустафин «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

**Одобрено** учебно-методическим советом факультета металлургии, машино-  
строения и транспорта

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г. Протокол № \_\_\_

Председатель УМС \_\_\_\_\_ Ж.Е. Ахметов «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

**ОДОБРЕНО:**

Начальник ОПиМОУП \_\_\_\_\_ А.А. Варакута «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Одобрены учебно-методическим советом университета

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г. Протокол № \_\_\_.

## Предварительные указания

Методические указания составлены в соответствии с программой курса "Техническая термодинамика и теплотехника" и включают в себя описание порядка выполнения трёх лабораторных работ по термодинамике и трёх лабораторных работ по теории теплообмена.

Перед каждой работой имеется вводная часть, помогающая, наряду с лекционным материалом, освоить уже имеющиеся теоретические и экспериментальные данные по вопросам предстоящей работы. Далее в описании каждой работы излагаются: задачи и цель работы, описание установки, порядок проведения и обработки результатов измерений, оценка погрешности измерений и контрольные вопросы.

Перед приходом на лабораторные занятия студент должен изучить основы теплотехнического эксперимента и вводную часть к очередной лабораторной работе, дополнив эти краткие сведения материалом соответствующей лекции или чтением раздела рекомендованной литературы. Далее студент должен ознакомиться с описанием лабораторной установки. Студент может приступить к проведению опыта только после опроса по теории и сущности данной лабораторной работы.

Перед началом работы студентам необходимо пройти инструктаж по технике безопасности и правилам внутреннего распорядка в лаборатории (приложение 1).

Вся экспериментальная часть выполняется небольшими группами студентов (4 – 5 человек) под руководством преподавателя или лаборанта. В целом для подгруппы в работу включаются одновременно 3 – 4 лабораторные установки.

Отчёт о проделанной работе оформляется каждым студентом согласно требованиям, указанным в конце работы, хранится у студента и предъявляется при сдаче зачёта или экзамена. Защита выполненной работы производится путём собеседования преподавателя со студентом и ответа последнего на контрольные вопросы, приведённые в конце работы.

## Лабораторная работа № 1

### Определение удельной газовой постоянной воздуха

**Цель работы.** Ознакомление с методикой экспериментального определения удельной газовой постоянной воздуха, изучение термических параметров и уравнения состояния идеального газа.

#### Вводная часть

**Термические параметры.** К термическим параметрам состояния относятся **удельный объём (плотность), давление и температура.**

**Удельным объёмом** называется *отношение объёма однородного вещества к его массе:*

$$v = V / m, \quad [v] = [V] / [m] = 1 \text{ м}^3 / 1 \text{ кг} = 1 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Удельный объём численно равен объёму, занимаемому веществом единичной массы. Кубический метр на килограмм равен удельному объёму однородного вещества, объём которого при массе 1 кг равен 1 м<sup>3</sup>.

Величину, равную отношению массы однородного вещества к его объёму, т. е. величину, обратную удельному объёму, называют **плотностью**:

$$\rho = m / V = 1 / v, \quad [\rho] = 1 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Плотность численно равна массе вещества, заключённого в единице объёма. Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого при объёме 1 м<sup>3</sup> равна 1 кг.

**Давление** – *величина, равная отношению элементарной силы, действующей на элемент поверхности нормально к ней, к элементарной площади этого элемента*<sup>1</sup>:

$$p = \delta F / \delta A.$$

При равномерном распределении силы  $F$  по поверхности площадью  $A$  давление выражается формулой:

$$p = F / A.$$

Единица давления СИ:  $[p] = [F] / [A] = 1 \text{ Н} / 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Па}.$

Единице давления СИ присвоено специальное наименование **паскаль (Па)** в честь французского математика Блеза Луи Паскаля (1623 – 1662).

Паскаль равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределённой по поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>, расположенной перпендикулярно силе.

Давление 1 Па по сравнению с атмосферным давлением очень маленькая величина и для практического пользования используется внесистемная единица бар: **1 бар = 10<sup>5</sup> Па = 0,1 МПа.**

В технической литературе прошлых лет издания, а также при проведении измерений использовались (и до сих пор используются, хотя не рекомендуются) в качестве единицы давления **техническая атмосфера** (единица системы

---

<sup>1</sup> Символом  $\delta$  принято обозначать **элементарность** величины, в отличие от символа дифференциала  $d$ , который означает малое приращение, **изменение** величины.

МКГСС) и внесистемные единицы: **бар, физическая атмосфера (атмосфера физическая), мм рт. ст и мм вод. ст** (с помощью последних измеренное давление сравнивают с давлением столба жидкости — воды, ртути, спирта).

Связь между различными единицами давления следующая:

**1 атмосфера техническая = 1 ат = 1 кгс/см<sup>2</sup> = 0,981·10<sup>5</sup> Па = 735,6 мм рт. ст = 10 м вод. ст; 1 ат ≈ 0,1 МПа;**

**1 атмосфера физическая = 1 атм = 760 мм рт. ст = 101325 Па = 1,033 ат = 10,33 м вод.ст;**

**1 мм вод. ст = 9,81 Па; 1 мм рт. ст = 133,322 Па.**

Различают **абсолютное давление  $p$**  (в дальнейшем – просто **давление**), **барометрическое** или **атмосферное давление  $p_b = p_a$** , измеряемое **барометром**, **избыточное давление  $p_n$** , измеряемое **манометром**, и **разрежение  $p_p$**  (не следует применять термин “**в а к у у м**” вместо **р а з р е ж е н и я**, т. к.. вакуум не является физической величиной), измеряемое **вакуумметром**.

**Избыточным давлением** называется **разность между давлением газа в сосуде и атмосферным давлением**:

$$p_n = p - p_a.$$

Если давление в сосуде меньше атмосферного, то разность между атмосферным давлением и давлением в сосуде называется **разрежением**

$$p_p = p_a - p.$$

Из этой формулы видно, что минимальное разрежение равно нулю (давление в сосуде равно атмосферному), а максимальное – атмосферному (давление в сосуде равно нулю). Поскольку атмосферное давление не постоянно, то и максимальное разрежение не является постоянной величиной. Возникает вопрос: *может ли вакуумметр показать разрежение больше 760 мм рт.ст?* Ответ: *может, если атмосферное давление в момент измерения превышает 760 мм рт.ст.*

На рисунке 1 представлена графическая связь между рассмотренными видами давления, а на рисунке 2 показаны способы их измерения.

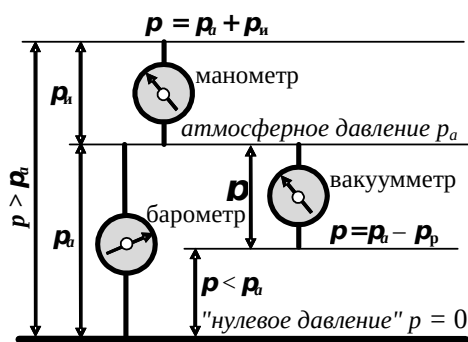


Рисунок 1

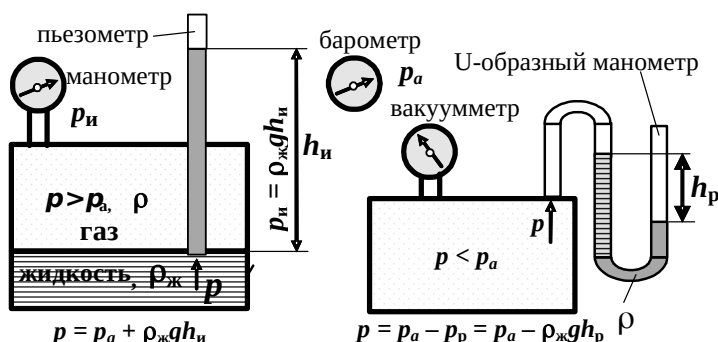


Рисунок 2

**Температура.** Температура характеризует степень нагретости тела (интенсивность хаотического, теплового движения микрочастиц тела). Непосредственно измерить температуру пока не удаётся. Однако с изменением температуры изменяются многие **свойства тел**, которые относительно легко **измерить**,

например, **объём, давление, электрическое сопротивление** и другие.<sup>1</sup> Изобретение термометра (первого измерительного теплового прибора) можно рассматривать как начало развития термодинамики, так как понятие температуры является основным в учении о тепловых процессах.

В 1592 году Галилей<sup>2</sup> во время лекции демонстрировал прообраз термометра (термоскопа). Термометр Галилея состоял из стеклянного шара, наполненного воздухом; от нижней части шара отходила трубка, частично заполненная водой, которая заканчивалась в сосуде с водой. Когда воздух в шаре нагревался или охлаждался, уровень воды в стеклянной трубке изменялся, что служило указанием на отклонение температуры от первоначального значения.

Первый современный термометр был описан в 1724 г. немецким физиком **Д. Фаренгейтом** (1686 – 1736). За начало шкалы (нуль температуры) он предложил принять температуру таяния смеси льда с нашатырём или поваренной солью (которая оказалась равной – 17,8 °С). Вторую точку он получил, погружая термометр в смесь льда и воды. Интервал между этими двумя точками он разделил на 32 части. В качестве третьей опорной точки он брал температуру человека, которую он округлил до 96 единиц (величины, кратной 32), что равняется 35,6 °С (одни исследователи считают, что это была температура здорового человека, которая постепенно приняла значение 36,6 °С в наши дни, а другие, — что в качестве “эталоны” был взят человек, которого знобило).

В качестве четвёртой опорной точки он брал температуру кипения воды, составившую 212 единиц (градусов). Таким образом, интервал от точки таяния льда до точки кипения воды по шкале Фаренгейта равен 180°. Применяют термометры со шкалой Фаренгейта (рисунок 3) в англоязычных странах (Великобритания, США, Канада и др.). Читая английские книги, не следует удивляться, что температура ребенка 98° не вызывает тревоги у матери.

Во Франции в употребление вошла шкала Р. Реомюра (1683 – 1757), предложенная им в 1730 году. В этой шкале в качестве реперных точек выбраны температура таяния льда и кипения воды при нормальном давлении в 1 атмосферу. Интервал между этими точками разбит на 80 частей и 1/80 часть представляет собой градус Реомюра. До революции в России была принята шкала Реомюра — термометры Реомюра висели на улицах и во всех домах. Лишь в тридцатых годах они были вытеснены термометрами Цельсия. В настоящее время шкала Реомюра не применяется.

В 1742 году шведский физик **А. Цельсий** (1701 – 1744) разделил интервал между температурами плавления льда и кипения воды на 100 частей. Точке кипения воды он присвоил при этом значение температуры, равное 0, точке плавления льда — 100. В 1750 г. Трёмер переменил местами числа градусов у температуры плавления и кипения воды. Эта шкала получила название стоградусной термодинамической температурной шкалы или шкалы **Цельсия** (см. рис. 3).

<sup>1</sup> Наименования физических величин – количественных характеристик свойств тел – могут совпадать с наименованиями самих свойств, которые и измеряются в опытах.

<sup>2</sup> **Галилео Галилей** (1564 – 1642) – великий итальянский учёный. С помощью сконструированного им телескопа с 32х увеличением разрушил догмат о совершенстве небесных тел: на Солнце оказались пятна, Луна – с кратерами, Млечный путь распался на отдельные звёзды. Всё видимое им стали считать оптическим обманом. Суд инквизиции принудил его отречься от своих “заблуждений”. Через пять лет после процесса Галилей издал свой основной труд “Беседы о двух новых науках”, где его научные взгляды остались непоколебимы.

Слова, произнесённые им согласно легенде сразу после отречения: **“И всё-таки она вертится!”** (Земля вокруг своей оси и Солнца, а не Солнце вокруг неподвижной Земли), – стали синонимом борьбы за научную истину.

Жидкостные термометры, заполненные ртутью или этиловым спиртом, а при низких температурах — пентаном, применяют и в настоящее время, несмотря на присутствие им недостатки, связанные с зависимостью их показаний от свойств термометрического вещества (с зависимостью температурного коэффици-

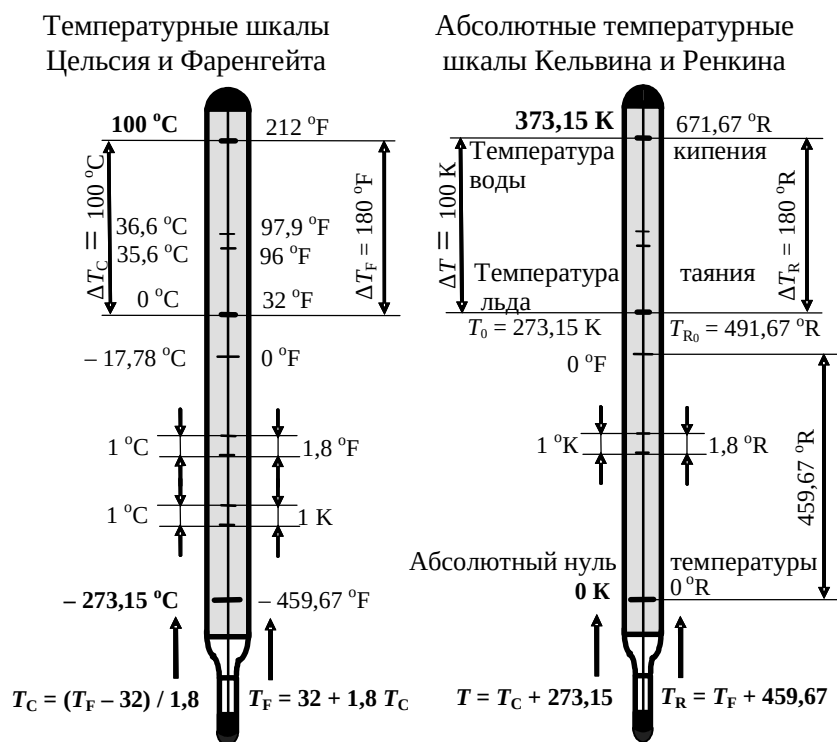


Рисунок 3

циента объёмного расширения от температуры).

Особое место занимают газовые термометры, в которых термометрическим веществом являются газы (азот, водород, гелий) при малых давлениях. Принцип действия газовых термометров основан на линейной зависимости объёма газа от температуры при постоянном давлении, устанавливаемой законом Гей-Люссака

$$V = V_0(1 + \beta T_C), \quad (1)$$

где  $V_0$  – объём при температуре Цельсия  $T_C = t = 0^\circ\text{C}$ ;

$\beta = 1 / 273,15 \text{ K}^{-1} = 0,003661 \text{ K}^{-1}$  — температурный коэффициент

объёмного расширения газа при постоянном давлении, остающийся практически постоянным в большом интервале температур при малом давлении для многих газов.

Процесс, протекающий при постоянном давлении, называется **изобарным**. Для газа такой процесс для различных давлений в соответствии с зависимостью (11) изобразится прямыми линиями в диаграмме  $T_C - V$  (рисунок 4). Все изобары пересекают ось  $T_C$  в одной и той же точке  $a$ , определяемой из условия  $V_a = 0$  или  $1 + \beta T_{Ca} = 0$ , откуда

$$T_{Ca} = -1/\beta = -273,15^\circ\text{C}.$$

Сместив начало отсчёта температур в эту точку, мы перейдём от шкалы

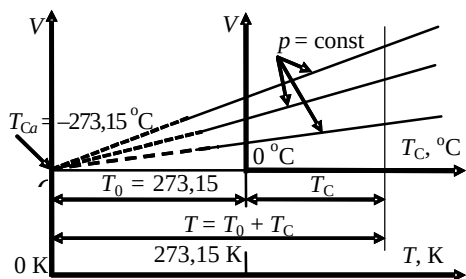


Рисунок 4

температур по Цельсию к другой температурной шкале, которая называется **абсолютной термодинамической шкалой**<sup>1</sup> или **шкалой Кельвина**; единица температуры в этой шкале получила наименование **кельвин (К)** в честь английского физика **В.Томсона (1824 – 1907)**, который первым в 1848 году предложил отсчитывать температуру от абсолютного нуля (**шкалу Кельвина**)<sup>2</sup>.

Связь между температурой по шкале Кельвина  $T$  (в дальнейшем **термодинамической температурой**, т. к. она имеет глубокий физический смысл, связанный с движением отдельных молекул) и температурой  $T_C$  по шкале Цельсия (в дальнейшем **температурой Цельсия**) устанавливается соотношением (см. рис. 4)

$$T = T_C + 1/□^B = T_C + 273,15 \text{ К} = T_C + T_0 \quad (2)$$

где  $T$  – термодинамическая температура (температура Кельвина), К;

$T_C = t$  – температура Цельсия, °С;

$T_0 = 273,15 \text{ К}$  – термодинамическая температура таяния льда.

Таким образом, шкалы Кельвина и Цельсия просто смещены друг относительно друга. **Единицы температур Цельсия и Кельвина равны по значению**, так как характеризуют одну и ту же порцию измеряемого свойства (как будет показано далее — интенсивность хаотического движения отдельных молекул газа):

$$[T_C] = 1 \text{ °С} = [T] = 1 \text{ К}, \quad (3)$$

следовательно, **термины “градус Цельсия” и “кельвин” являются синонимичными наименованиями одной и той же порции измеряемого свойства.**<sup>3</sup> Поэтому разность температур (температурный интервал) может выражаться как в кельвинах, так и в градусах Цельсия (см. рисунок 3):

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 115 \text{ °С} = T_2 - T_1 = 115 \text{ К} = \Delta T \quad (4)$$

**Количество вещества.** Количество (совокупность) частиц (структурных единиц, элементов — атомов, молекул, ионов и т. п.), содержащихся в теле, характеризуется **числом частиц  $N$** , которое не имеет собственной единицы. Число частиц  $N$  — величина, имеющая большое числовое значение даже для тел малой массы (например, водород массой 2 г содержит число молекул порядка  $10^{23}$ ) и поэтому она мало пригодна для практических расчетов изменения запаса вещества в системе.. Поэтому возникла необходимость задавать количество частиц системы не числом отдельных частиц  $N$ , а числом укрупнённых порций таких частиц  $\{\mu\}$ .

В качестве такой **укрупнённой порции частиц** принято брать число атомов, содержащихся в **порции** изотопа углерода  $^{12}\text{C}$  массой 0,012 кг (**12 г**). Это число частиц можно получить, если разделить массу  $m$  этой **порции** углерода на

<sup>1</sup>Если при нуле температурной шкалы термометрическая величина обращается в нуль (в данном случае объём газа  $V_0$ ), то такая шкала называется **абсолютной шкалой**, а температура, отсчитанная по такой шкале, называется **абсолютной температурой** (в настоящее время эту температуру принято называть **термодинамической температурой**).

<sup>2</sup> В 1892 году Вильяму Томсону был присвоен титул **лорда Кельвина** (по имени речки Кельвин, протекающей вблизи университета в г. Глазго, где он преподавал) за научные заслуги при разработке первого трансатлантического кабеля (1856 – 1865).

<sup>3</sup> Похожее положение раньше было с давлением, когда единица давления  $1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ ат}$  имела синонимичные наименования: **ата** – *атмосфера абсолютная*– для абсолютного давления, **ати** – *атмосфера избыточная* – для избыточного давления. После введения единой единицы давления паскаля (Па) вид давления стал определяться не по наименованию соответствующей единицы давления (5 **ати** – **избыточное** давление), а по наименованию данного вида давления, например, **избыточное** давление 5 МПа. Аналогичным образом следует выбрать единый термин для наименования единицы термодинамической температуры и температуры Цельсия, например, градус (град) или кельвин (применение кельвина в качестве наименования единицы отрицательной температуры Цельсия может вызвать затруднения), а виды температур различать по их наименованиям.



$$\begin{aligned}
 & \text{массу одного атома углерода } m(^{12}\text{C}) = 1,9926482 \cdot 10^{-26} \text{ кг,} \\
 & N_A = m/m(^{12}\text{C}) = \mathbf{0,012 \text{ кг}/1,9926482 \cdot 10^{-26} \text{ кг}} = 6,0221367 \cdot 10^{23}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Этому числу частиц было присвоено наименование “**число Авогадро**” в честь итальянского физика **Амедео Авогадро** (1776 – 1856), сформулировавшего в 1811 г. закон (**закон Авогадро**), согласно которому в равных объёмах различных газов при одинаковых условиях содержится одинаковое количество *молекул*<sup>1</sup>.

**Порция вещества**, характеризующаяся числом частиц  $N_A = 6,0221367 \cdot 10^{23}$ , названа **молем (моль)**, а физическая величина, характеризующая запас (количество) вещества в таких укрупнённых порциях, – **количеством вещества**  $\mu$ .

**Числовое значение количества вещества**  $\{\mu\}$  есть не что иное, как **число укрупнённых порций частиц (молей)**, содержащихся в данном теле:

$$\{\mu\} = N / N_A \tag{6}$$

Именно так и следует пояснять смысл этой величины.

Если в уравнении (6) числовое значение количества вещества представить в виде  $\{\mu\} = \square / [\mu]$ , то можно установить связь между числом частиц  $N$  и количеством вещества  $\mu$ :

$$N = N_A \{\mu\} = N_A \mu / [\mu] = k_A \mu, \tag{7}$$

где  $k_A = N_A / [\mu] = 6,0221367 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  – **постоянная Авогадро**<sup>2</sup>, равная отношению **числа Авогадро**  $N_A$  к единице количества вещества  $[\mu] = \mathbf{1 \text{ моль}}$ .

Исходя из (7), получаем следующее уравнение связи для **количества вещества**:

$$\mu = N / k_A; \quad [\mu] = \mathbf{1 \text{ моль}}. \tag{8}$$

Следовательно, **количество вещества** – физическая величина, характеризующая **количество частиц** (структурных единиц, элементов) системы **в укрупнённых порциях этих частиц – молях**.

**Единицей количества вещества** является **моль** — одна из основных единиц СИ, – определяемый как количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов (такую порцию частиц), **сколько содержится атомов в изотопе углерода  $^{12}\text{C}$  массой 0,012 кг**.

**Молярная масса. Отношение массы вещества к количеству вещества (молярности) называется молярной массой**

$$M = m / \mu, \quad [M] = \mathbf{1 \text{ кг/моль}}. \tag{9}$$

Рекомендуемые дольные единицы молярной массы — **г/моль** и **кг/кмоль**.

Значение молярной массы вещества, выраженной в г/моль или кг/кмоль, численно равно относительной молекулярной массе вещества, определяемой по таблице Д. И. Менделеева:  $\{M\} = M_r$ . Например,  $M_{\text{H}_2} = 2,0158 \text{ г/моль} = 2,0158 \text{ кг/кмоль}$ . В связи с этим молярную массу на прак-

<sup>1</sup> Несмотря на то, что Авогадро ввёл новое для науки понятие “**молекула**” (от греч. – массочка) в 1811 году, только на химическом конгрессе 1860 года была принята резолюция, закрепляющая различные понятия атома и молекулы.

<sup>2</sup> В настоящее время **постоянную Авогадро** обозначают символом  $N_A$ , в основу которого положен символ  $N$ , используемый для обозначения числа частиц, что даёт основание, как это иногда встречается, **постоянную Авогадро**, имеющую единицу  $\text{моль}^{-1}$ , называть **числом Авогадро**, не имеющим обозначения своей единицы. Чтобы избежать такой путаницы, **постоянную Авогадро** рекомендуется обозначать символом  $K_A$  (по аналогии с обозначением постоянной **Больцмана**  $K_B$ ), а **число Авогадро** –  $N_A$ .

тике чаще всего выражают в г/моль или кг/кмоль. Не следует отождествлять молярную массу и относительную молекулярную массу, так как последняя является величиной безразмерной, отличающейся по физическому смыслу от молярной массы.

Если в выражении (9) массу и количество вещества выразить через число частиц  $N$ , то получим

$$M = m_m N / (N/k_A) = m_m k_A = \{m_m N_A\} [m_m] [k_A] = \{M\} [M], \quad (10)$$

где  $m_m$  – масса одной молекулы.

Из этого выражения видно, что **молярная масса численно равна массе молекул, число которых равно числу Авогадро**,  $\{M\} = \{m_m N_A\}$ , если в качестве единицы молярной массы берётся 1 кг/кмоль или 1 г/моль. Например, если взять число молекул кислорода, соответствующее порции частиц в 1 моль ( $N_{O_2} = N_A$ ), то их масса будет равна 31,9988 г = 31,9988  $\cdot 10^{-3}$  кг. Если же взять порцию частиц в 1 кмоль ( $N_{O_2} = N_A \cdot 10^3$ ), то их масса будет равна 31,9988 кг.

**Молярный объём.** *Отношение объёма однородного вещества к количеству вещества (молярности) называется молярным объёмом*

$$V_\mu = V / \mu, \quad [V_\mu] = 1 \text{ м}^3/\text{моль}. \quad (11)$$

Кубический метр на моль равен молярному объёму вещества, занимающего при количестве вещества 1 моль объём 1 м<sup>3</sup>.

Молярный объём разрежённого газа при **нормальных физических условиях**:  $T_0 = 273,15 \text{ К}$  ( $0^\circ \text{ С}$ ) и  $p_0 = 101\,325 \text{ Па}$  равен (по данным на 1986 год)

$$V_{\mu 0} = 22,4141 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль} = \mathbf{22,4141 \text{ м}^3/\text{кмоль}}.$$

**Газовые постоянные.** Путём объединения (обобщения) газовых законов Гей-Люссака и Бойля–Мариотта можно получить следующее соотношение

$$pV / T = \text{const} = R_{\text{тела}}; \quad [R_{\text{тела}}] = 1 \text{ Дж/К}, \quad (12)$$

из которого следует, что для данного количества (данной массы) разрежённого газа отношение произведения давления на объём к термодинамической температуре есть величина постоянная. Эту постоянную величину, поскольку она относится ко всему телу (системе), назовём **газовой постоянной тела** (газообразного тела) и обозначим  $R_{\text{тела}}$ .

**Удельная газовая постоянная.** *Отношение газовой постоянной тела к массе газа называется удельной газовой постоянной*

$$R = R_{\text{тела}} / m, \quad [R] = 1 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}). \quad (13)$$

**Молярная (универсальная) газовая постоянная.** *Отношение газовой постоянной тела к количеству вещества (молярности) газа называется молярной газовой постоянной*

$$R_\mu = R_{\text{тела}} / \mu \quad [R_\mu] = 1 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К}). \quad (14)$$

Решая совместно уравнения (11), (12) и (14), можно выразить молярную газовую постоянную через параметры состояния и вычислить её значение по соответствующим значениям параметров состояния, например, для значений па-

раметров состояния при нормальных физических условиях (по данным на 1986 г)

$$R_{\mu} = p_0 V_{\mu 0} / T_0 = 101\,325 \cdot 22,4141 \cdot 10^{-3} / 273,15 = 8,314\,51 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) = \mathbf{8314,51} \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

Поскольку молярный объём  $V_{\mu 0}$  при нормальных физических условиях для всех разрежённых газов имеет одинаковое значение, то и **молярная газовая постоянная**  $R_{\mu}$  для всех газов также имеет одинаковое значение. Это дало основание называть эту газовую постоянную **универсальной газовой постоянной**. Однако этот термин не соответствует уравнению связи (14) для молярной газовой постоянной и поэтому считается устаревшим.

Решая совместно уравнения (13), (14) и (9), можно установить связь между удельной газовой постоянной и молярной газовой постоянной

$$R = R_{\text{уд}} / m = R_{\mu} \mu / m = R_{\mu} / M. \quad (15)$$

Используя это соотношение, определим в качестве примера удельную газовую постоянную водорода ( $M_{\text{H}_2} = 2,0158 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}$ )

$$R_{\text{H}_2} = 8,31451 / 2,0158 \cdot 10^{-3} = 4124,670 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

С учётом введённых газовых постоянных это уравнение можно записать в следующих видах:

□ через удельную газовую постоянную  $R$   
 для газа объёмом  $V$   $pV = mRT$  ;  
 (16)

□ для удельного объёма  $\nu$   $p\nu = RT$  (17)  
 и для плотности  $\rho$   $p = \rho RT$  ;  
 (18)

□□ через молярную газовую постоянную  $R_{\mu}$   
 для газа массой  $m$   $pV = m \frac{R_{\mu}}{M} T$  (19)

□ для количества вещества (молярности)  $\mu$   $pV = \mu R_{\mu} T$   
 (20)

□ для молярного объёма  $V_{\mu}$   $pV_{\mu} = R_{\mu} T$  ;  
 (21)

Удельная газовая постоянная для смеси газов находится по формуле

$$R_{\text{см}} = R_{\mu} / M_{\text{см}}, \quad (22)$$

где  $M_{\text{см}}$  – молярная масса смеси, равная

$$M_{\text{см}} = \sum x_i M_i = \sum r_i M_i \quad (23)$$

Здесь  $x_i = \mu_i / \mu_{\text{см}}$  — молярная доля  $i$ -го компонента смеси, равная в случае идеального газа объёмной доле  $r_i = V_i / V_{\text{см}}$ .

В таблице 1 приведён химический состав атмосфер Земли, Венеры и Марса.

Таблица 1

Газ	Молярная масса $M$ , кг/кмоль	Массовый состав $g_i$ сухого воздуха Земли	Объёмный состав $\Gamma_i$ , % атмосферы		
			Земли	Венеры	Марса
Азот $N_2$	28,0134	0,7553	78,03	3,5	2,5–2,7
Кислород $O_2$	31,9982	0,2314	20,99	$< 10^{-3}$	0,1–0,15
Аргон $Ar$	39,948	0,0128	0,94	0,0015	1,5–1,6
Диоксид углерода $CO_2$	44,0098	0,0005	0,03	96,5	95
Водород $H_2$	2,0158	$< 5 \cdot 10^{-5}$	$< 5 \cdot 10^{-5}$	$< 10^{-3}$	—

### Методика опытного определения удельной газовой постоянной воздуха

В основу определения удельной газовой постоянной воздуха положено выражение (16), из которого получаем

$$R = pV / (mT) \quad (24)$$

Масса воздуха в сосуде определяется двумя способами: путём вакууммирования с помощью насоса – прямой метод и путём нагнетания в сосуд избыточного воздуха массой  $m_n$  – косвенный (расчётный метод).

Рассмотрим второй способ определения массы воздуха в сосуде. Пусть в сосуде вместимостью  $V$  находится воздух массой  $m_a$  при комнатной температуре  $T$  и атмосферном давлении  $p_a$ . Уравнение состояния в этом случае имеет вид

$$p_a V = m_a RT \quad (25)$$

С помощью насоса добавим в сосуд некоторое количество воздуха  $m_n$ , в результате чего давление в сосуде повысится на величину  $p_n$  и станет равным

$$p_2 = p_a + p_n.$$

Температура воздуха в результате теплообмена через некоторое время станет прежней  $T$ . Уравнение состояния в этом случае запишется в виде

$$p_2 V = m_2 RT \quad (26)$$

Из уравнений (25) и (26) получим:

$$p_a / p_2 = m_a / m_2 \quad \text{или} \quad p_a / (p_a + p_n) = m_a / (m_a + m_n)$$

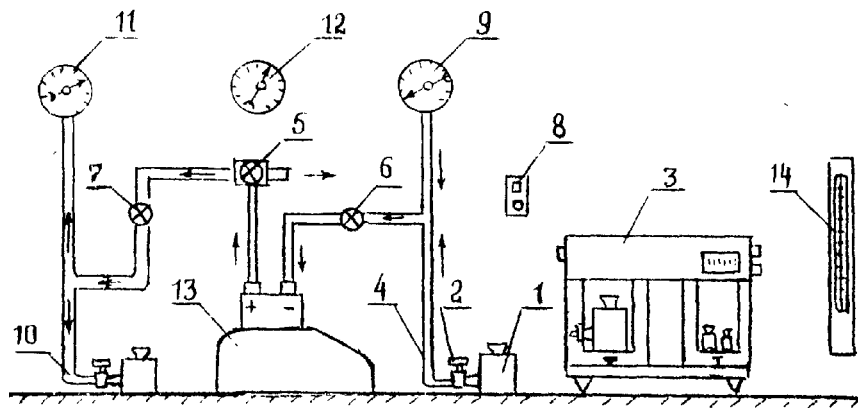
Откуда находим массу воздуха при атмосферном давлении

$$m_a = m_n p_a / p_n \quad (27)$$

## Описание лабораторной установки

Мерный сосуд 1 (рисунок 5) при открытом кране 2 поочерёдно подсоединяется к трубкам вакууммирования 4 и нагнетания 10. Включение линии нагнетания осуществляется с помощью трёхходового крана 5, а отсоединение мерного сосуда от насоса 13 осуществляется вентилями 6 и 7. Кран 2 на мерном сосуде служит для его отключения от атмосферы перед взвешиванием его на весах 3. Разрежение измеряется вакуумметром 9, избыточное давление манометром 11, атмосферное давление барометром 12, а температура воздуха термометром 14.

Рисунок 5



### Порядок выполнения работы

#### Опыт первый

1. Под руководством преподавателя или лаборанта определить массу сосуда  $m_{c1}$  при открытом кране 2 с помощью весов 3.

2. Подсоединить сосуд к трубке 4. Установить кран 5 в положение «атмосфера», вентили 6 и 7 открыть, включить насос пускателем 8.

3. При достижении полного вакууммирования (стрелка вакуумметра должна зайти за отметку 100, соответствующую разрежению 736 мм рт. ст.) закрыть кран 2 и плавно отсоединить сосуд от трубки. Выключить насос (во избежание попадания масла из насоса в трубки его следует выключать только после отсоединения сосуда, т. е. после снятия разрежения в системе)

4. Определить путём взвешивания массу сосуда без воздуха  $m_c$ .

5. Рассчитать массу воздуха в сосуде при атмосферном давлении

$$m'_a = m_{c1} - m_c$$

6. Рассчитать удельную газовую постоянную воздуха

$$R' = p_a V / (m'_a T),$$

здесь  $p_a$  – атмосферное давление, Па (1мм рт.ст. = 133,322 Па);

$V = 360 \text{ мл} = 360 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  – вместимость сосуда;

$T = T_c + T_0 = t + 273,15$  – температура воздуха, К

7. Опытные и расчётные значения величин занести в таблицу 2.

Таблица 2

$T_c = t,$ °C	T, К	$p_a$		$m_{c1},$ мг	$m_{c2},$ мг	$m'_a$		$R',$ Дж/(кг·К) $\varepsilon(R'), \%$	
		мм рт. ст	Па			мг	кг		

### Опыт второй

1. Подсоединить сосуд к трубке 10 . Кран 5 установить в положение «насос». Вентиль 6 открыть. Включить насос.

2. При показаниях манометра 120...160 делений (манометр на 1,6 ат) закрыть вентиль 6 и сразу же установить кран 5 в положение «атмосфера»). Выключить насос.

3. Дать выдержку полминуты и записать число делений манометра  $p_n$ . Перевести показания манометра вначале в атмосферы (с учётом того, что вся шкала на 1,6 ат), а затем в паскалях (1 ат =  $0,981 \cdot 10^5$  Па). Закрыть кран 2 и отсоединить сосуд.

4. Путём взвешивания определить массу сосуда  $m_{c2}$  при давлении воздуха

$$p_2 = p_a + p_n$$

5. При обработке результатов опыта вычислить:

а) массу избыточного воздуха в сосуде  $m_n = m_{c2} - m_{c1}$ ;

б) массу воздуха в сосуде при атмосферном давлении  $m''_a$  по (27);

в) удельную газовую постоянную воздуха

$$R'' = p_a V / (m''_a T).$$

6. При расчётном определении газовой постоянной воздуха вычислить:

а) молярную массу воздуха  $M_v$  по формуле (23), используя молярные массы и объёмные доли газов, приведённые в таблице 1;

б) расчётное значение удельной газовой постоянной воздуха  $R$  по формуле (22);

в) плотность воздуха при **нормальных физических условиях**  $\rho_0$  и плотность воздуха  $\rho_2$  при давлении  $p_2$ .

7. Результаты измерений и расчётов занести в таблицу 3.

Таблица 3

Вы-носитель-грешности определе-постоянной	$p_n$			$m_{c2}$ , мг	$m_n,$ мг	$m''_a$		$R''$ Дж/ (кг·К)	$R$ Па	$p_2,$ Па	$\rho_0$ кг / м <sup>3</sup>	$\rho_2$ кг / м <sup>3</sup>	$\varepsilon(R)$ %	числить от-ные по-опытного ния газовой
	Число делений	ат	Па			мг	кг							

$$\varepsilon(R') = \frac{R' - R}{R} 100\% \quad \text{и} \quad \varepsilon(R'') = \frac{R'' - R}{R} 100\%$$

и сравнить их с предельной относительной погрешностью

$$\varepsilon_n(R) = (\Delta V/V + \Delta p / p_n + \Delta T / T + \Delta m / m_n) 100\%,$$

где  $\Delta V = 5$  мл,  $\Delta T = 0,5$  К,  $\Delta m = 1$  мг — абсолютные предельные погрешности из-

мерения объёма, температуры, массы; предельную погрешность измерения давления  $\Delta P$  вычислить по формуле (1.2) с учётом класса точности манометра.

Используя значения газовой постоянной, определённые разными подгруппами студентов (3...4 подгруппы), рассчитать статистическую погрешность среднего арифметического значения результата измерения газовой постоянной по формуле (6). Используя выражение (9), записать истинное значение результата нескольких измерений удельной газовой постоянной.

Обычно статистическая погрешность при измерении неизменной величины меньше предельной, т. к. отклонения отдельных измерений от среднего не однозначны, как это принято для предельной погрешности. Если же измерения проводить небрежно, статистическая погрешность может быть больше предельной. Точность разовых измерений оценивают только по предельной погрешности.

### **Отчёт о работе**

Отчёт о работе должен содержать наименование и цель работы, краткое описание методики экспериментального определения удельной газовой постоянной воздуха, схему лабораторной установки, таблицы и расчёты.

### **Контрольные вопросы**

1. Написать уравнения состояния для полного и удельного объёмов.
2. Виды давлений и их определение.
3. Температурные шкалы.
4. Методика экспериментального и расчётного определения удельной газовой постоянной воздуха.
5. Как рассчитать плотность воздуха при нормальных условиях, плотность воздуха на улице, массу воздуха в комнате?
6. Выразить давление 5 ат в паскалях, барах, мм рт. ст и мм вод. ст.

## Лабораторная работа № 2

### Первый закон термодинамики

**Цель работы.** Изучение первого закона термодинамики путём практического применения его к изобарному процессу.

#### Вводная часть

**Первый закон термодинамики.** *Первый закон термодинамики (первое начало термодинамики) – аналитическое (математическое) выражение закона сохранения движения при изменении его формы, записываемое в виде балансового уравнения для изменения физической величины – энергии.*

В настоящее время под термином "**энергия**" понимают как **само движение** (свойство материи), так и **физическую величину** ( $E$ , Дж), являющуюся (наряду с импульсом и моментом импульса) количественной (числовой) характеристикой запаса движения в системе. Очевидно, что само движение и его числовая характеристика не одно и то же.

**Движение** – неотъемлемое **свойство** (атрибут) **материи**, способ существования материи: нет материи без движения и нет движения без материи; наиболее общее понятие, включающее в себя перемещение, изменение (развитие, регресс), взаимодействие и т. п.

В технической термодинамике различают две формы (вида) движения: **хаотическую** (тепловую) – **ХФ** и **упорядоченную** (направленную, механическую) – **УФ**; **два способа (процесса) передачи движения** – хаотический (**теплообмен**) и упорядоченный (**совершение работы**).

**Хаотическая** (тепловая) форма движения – носителями движения являются микрочастицы (атомы, молекулы и др.), совершающие хаотические микроскопические перемещения в пространстве вблизи их центра инерции.

**Упорядоченная** (механическая) форма движения – носителями движения являются макроскопические тела или микрочастицы (атомы, молекулы и др.), совершающие упорядоченное перемещение в пространстве.

Наиболее универсальной количественной характеристикой (мерой) движения, применимой для любых форм движения (хаотической и упорядоченной) является энергия (импульс – менее универсальная мера количества движения, т. к. для хаотического движения он равен нулю, однако и энергия учитывает не все свойства движения – она не учитывает направление движения).

**Энергия** – скалярная физическая величина (именованное число – предмет из мира идей), характеризующая количество (запас) движения как в самой системе (теле), так и количество движения, передаваемого через границы системы, и определяемая как произведение силы на перемещение:

$$E = \int (F' dr)_{\text{внеш}} = - \int (F dr)_{\text{внутр}}, \quad (1)$$

где  $F'$  – внешняя сила (например, сила действия поршня на газ);

$F$  – внутренняя сила (например, сила действия газа на поршень),  $F' = - F$ ;

$dr = c dt$  – перемещение, на котором действует сила.



Например, **кинетическая** энергия определяется интегралом от силы инерции  $F_{\text{ин}} = -m \vec{dc} / dt$  (внутренняя сила) или от результирующей внешних сил  $F_{\text{рез}} = m \vec{dc} / dt$

$$E_k = - \int F_{\text{ин}} d\vec{r} = \int F_{\text{рез}} d\vec{r} = \int m(d\vec{c} / dt) d\vec{r} = m \int_0^c \vec{c} d\vec{c} = mc^2/2,$$

а гравитационная **потенциальная** энергия – интегралом от внешней (результирующей) силы, равной и противоположной по знаку внутренней силы тяжести  $F_{\text{рез}} = -F_g = -mg = kmg$ , которую нужно приложить к телу извне, чтобы поднять его на высоту  $h$  от поверхности Земли,

$$E_p = \int F_{\text{рез}} d\vec{r} = - \int mg d\vec{r} = kmg \int_0^{\vec{z}=\vec{h}} k dz = mgh,$$

где  $k$  – единичный вектор, направленный вертикально вверх.

**Внутренняя энергия  $U$**  – энергия хаотического (теплового) движения собственных микрочастиц (атомов, молекул, электронов, а также так называемых частиц-связников, обеспечивающих взаимодействие атомов на расстоянии) системы относительно их центра инерции. В понятие внутренней энергии включаются кинетическая энергия хаотического движения молекул, потенциальная энергия взаимодействия между молекулами и внутримолекулярная энергия (химическая и ядерная). В технической термодинамике внутримолекулярная ("нулевая") энергия не рассматривается и внутренняя энергия отождествляется с кинетической и потенциальной энергиями молекул.

Следовательно, **внутренняя энергия** – это суммарная кинетическая и потенциальная энергия всех молекул рабочего тела

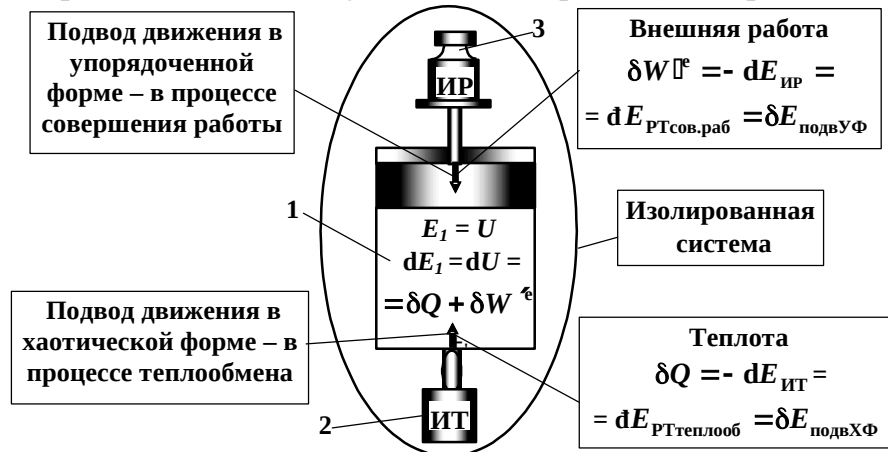
$$U = E_{\text{внутр}} = \sum (E_k + E_p)_{\text{молек } i} = U_k + U_p.$$

Кинетическая энергия беспорядочного теплового движения молекул пропорциональна температуре  $U_k = U(T)$ , потенциальная энергия взаимодействия зависит от расстояния между молекулами, т. е. от объёма тела  $U_p = U(V)$ . Поэтому внутренняя энергия реального газа является функцией макроскопических параметров, например, температуры и объёма:  $U = U(T, V)$ .

В идеальном газе пренебрегают силами межмолекулярного взаимодействия на расстоянии и внутреннюю энергию рассматривают как сумму кинетических энергий беспорядочного движения всех молекул, т. е. как функцию одной только температуры

$$U_{\text{ид.газ}} = \sum E_{k\text{молек } i} = U_k = U(T)$$

Для вывода уравнения изменения энергии какой-либо системы в самом общем виде рассмотрим изолированную систему, состоящую для простоты вывода только из трёх взаимодействующих тел (рис. 1) и применим к ней закон



сохранения энергии. Пусть рабочее тело (РТ) 1 (например, газ в цилиндре с подвижным поршнем и теплопроводными стенками) получает движение в процессе (путём) теплообмена (микроскопическим неупорядоченным путём) от источника тепла (ИТ) 2 и в процессе совершения работы (макроскопическим упорядоченным путём) от источника работы – тела 3 (например, от гири, пружины, штока или от жидкой среды, оказывающей давление на поршень с внешней стороны).

Рисунок 1

Согласно ЗСЭ для этих трёх тел, образующих изолированную систему, можно записать следующее равенство:

$$E_{ИС} = \sum E_i = E_1 + E_2 + E_3 = E + E_{ИТ} + E_{ИР} = \text{const} . \quad (2)$$

Продифференцируем это уравнение и перепишем его так

$$dE \equiv dE_1 = -dE_2 - dE_3 \equiv -dE_{ИТ} - dE_{ИР} = -dE_{ОС} . \quad (3)$$

Из соотношения (3), полученного из ЗСЭ, следует физическое утверждение: *приращение энергии системы (первого тела) равно убыли энергии окружающей среды, состоящей из источников тепла 2 и источников работы 3.*

Убыли энергий тел ( $-dE_2 = -dE_{ИТ}$ ) и ( $-dE_3 = -dE_{ИР}$ ) можно рассматривать как элементарные энергии  $\delta E$  движения, переданного через границы рабочего тела 1 соответственно в хаотической и упорядоченной формах

$$dE_1 = \delta E_{ХФ} + \delta E_{УФ} . \quad (4)$$

Здесь для обозначения элементарных энергий, характеризующих переданное движение через границы системы, используется символ элементарности  $\delta$ .

С другой стороны, полное изменение энергии первого тела можно разбить на два частичных (парциальных) приращения в процессах теплообмена и совершения работы

$$dE_1 = \mathring{d}E_{1теплооб} + \mathring{d}E_{1сов.раб} . \quad (5)$$

Здесь для обозначения частичных (парциальных) приращений используется символ  $\mathring{d}$ , который в отличие от символов полного  $d$  и частного  $\partial$  дифферен-

циалов, подчёркивает, что в общем случае данное приращение не может быть вычислено через параметры состояния системы.

Уравнения (4) и (5) можно записать в общем виде:

$$dE = \overset{\cdot}{d}E_{\text{теплооб}} + \overset{\cdot}{d}E_{\text{сов.раб}} = \delta E_{\text{передХФ}} + \delta E_{\text{передУФ}} . \quad (6)$$

Согласно этому балансовому уравнению энергии полное *приращение энергии* тела (системы) равно сумме *двух частичных приращений энергии*, характеризующих движение, переданное через границу системы в процессах теплообмена и совершения работы, или *равно сумме элементарных энергий*, характеризующих движение, переданное через границу системы в хаотической форме (ХФ) и в упорядоченной форме (УФ); при этом число взаимодействующих тел может быть любым.

Исходя из балансового соотношения (6) вводятся физические величины – теплота и работа. Процессы переноса движения в упорядоченной форме, которые можно охарактеризовать макроскопическими силами и перемещениями, принято называть *процессами совершения работы*, а *энергию движения, переданного* в упорядоченной макроскопической форме, или частичное изменение энергии системы в процессе совершения работы – *работой*

$$\delta W' \equiv \delta E_{\text{передУФ}} \equiv \overset{\cdot}{d}E_{\text{сов.раб}} = (F d\bar{s})_{\text{макро}} . \quad (7)$$

Процессы переноса движения в хаотической форме, которые можно охарактеризовать только микроскопическими силами и микроперемещениями, принято называть процессами теплообмена, а *энергию движения, переданного* в хаотической форме, или частичное приращение энергии системы в процессе теплообмена – *теплотой*

$$\delta Q \equiv \delta E_{\text{передХФ}} \equiv \overset{\cdot}{d}E_{\text{теплооб}} = \sum (F d\bar{s})_{\text{микро}} . \quad (8)$$

Теплоту как изменение энергии системы в соответствующем процессе принято рассчитывать через теплоёмкость или энтропию, а как переданную энергию в процессах теплообмена – через тепловые потоки, определяемые из соответствующих уравнений теории теплообмена (Фурье, Ньютона-Рихмана и др.).

Итак, **теплота и работа** – это энергии движения, переданного соответственно в процессах теплообмена и совершения работы (в связи с этим их иногда называют энергиями перехода, или энергиями в процессе перехода).

Как следует из (7) и (8), теплоту и работу можно также трактовать и как частичные приращения энергии системы в процессах теплообмена и совершения работы  $\delta Q = \overset{\cdot}{d}E_{\text{теплооб}}$ ,  $\delta W = \overset{\cdot}{d}E_{\text{сов.раб}}$ .

С учётом введённых величин – работы (7) и теплоты (8) – уравнение энергии (6) может быть записано для полной энергии в виде

$$dE = \delta Q + \delta W'$$

или только для внутренней энергии в виде

$$dU = \delta Q + \delta W' = \delta Q - \delta W , \quad (9)$$

где  $W'$  и  $W$  – внешняя и внутренняя работы, определяемые, как и энергия (1), через внешние и внутренние силы.

Уравнение первого закона термодинамики (9) принято записывать в диффе-

ренциальном и интегральном виде так:

$$\delta Q = dU + \delta W ; \quad (10)$$

$$Q = \Delta U + W , \quad (11)$$

где  $dU$  и  $\Delta U$  – соответственно элементарное и конечное изменение внутренней энергии системы;

$\delta Q$  и  $Q$  – элементарное и конечное количество тепла;

$\delta W$  и  $W$  – элементарная и конечная работа.

Уравнение (11) является аналитическим выражением **первого закона термодинамики**, который принято формулировать так: *теплота идёт на изменение внутренней энергии и на совершение работы.*

Единицей энергии, теплоты и работы СИ являются джоуль:

$$[E] = [Q] = [W] = [F] \cdot [r] = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Дж}.$$

Применительно к газу, заключённому в цилиндре, наибольшее значение имеет работа **изменения объёма** внутренних сил давления по перемещению поршня. Если давление газа в цилиндре  $p$ , то на поршень действует сила  $F = p \cdot A$ . При перемещении поршня на пути  $dx$  совершается работа

$$\delta W = p \cdot A dx = p dV .$$

Тогда уравнения первого закона термодинамики (10) и (11) с учётом только работы изменения объёма запишутся в таком виде:

$$\delta Q = dU + p dV , \quad (12)$$

$$Q = \Delta U + \int p dV . \quad (13)$$

Что касается теплоты, то её так просто не удаётся рассчитать через микроскопические силы и перемещения и она исторически определяется пропорционально изменению температуры рабочего тела

$$\delta Q = C dT = c m dT ,$$

$$Q = c m (T_2 - T_1) = c m (t_2 - t_1) \quad (14)$$

где  $C$  – теплоёмкость тела, Дж/К;

$c = C/m$  – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К).

Теплоёмкость зависит от процесса и имеет соответствующие обозначения. Так, в случае изобарного процесса она обозначается  $c_p$ , а изохорного –  $c_v$ .

В случае **изохорного** процесса ( $V = \text{const}$ ) работа изменения объёма  $p dV$  равна нулю ( $dV = 0$  – нет изменения объёма газа и поршень неподвижен) и изменение внутренней энергии равно теплоте

$$dU = \delta Q_v = c_v m dT ,$$

$$\Delta U = Q_v = c_v m \Delta T . \quad (15)$$

Выражение (15) справедливо только для идеального газ, т. к. в случае реального газа внутренняя энергия зависит ещё от объёма.

С учётом выражений для теплоты (14) и изменения внутренней энергии (15) уравнение первого закона термодинамики (11) примет вид

$$c m \Delta T = c_v m \Delta T + \int p dV . \quad (16)$$

Методика практического применения первого закона термодинамики к процессу изобарного нагрева воздуха в сосуде

Уравнение первого закона термодинамики (15) для изобарного процесса ( $p = \text{const}$ ), протекающего в конечном интервале изменения параметров, запишется в виде

$$c_p m (T_2 - T_1) = c_v m (T_2 - T_1) + p (V_2 - V_1). \quad (17)$$

В процессе опыта измеряются начальные и конечные температуры ( $T_1, T_2$ ) и объёмы ( $V_1, V_2$ ), давление газа  $p$  и рассчитывается масса газа  $m$ . Затем все величины подставляются в (17) и отдельно подсчитываются левая и правая части этого уравнения, а затем значения левой и правой частей сравниваются между собой. При тщательно проведённом опыте и расчётах левая часть получается близкой правой части, что указывает на справедливость записи первого закона термодинамики в виде (17).

Для уменьшения числа величин и, соответственно, погрешности расчёта левой и правой частей уравнения (17) оно приводится к виду

$$V_2/V_1 = T_2/T_1 \quad (18)$$

Справедливость уравнения (18) и, следовательно, уравнения (17) будет доказана, если погрешность опыта

$$\varepsilon = \frac{(T_2/T_1 - V_2/V_1)}{T_2/T_1} 100 \quad (19)$$

(при отсутствии заклинивания поршенька и наличия капелек воды в сосуде) будет меньше **предельной относительной погрешности**, вычисляемой по формуле

$$\varepsilon_{\text{п}} = (\Delta V/V_1 + \Delta V/V_2 + \Delta T/T_1 + \Delta T/T_2) 100, \quad (20)$$

где абсолютные **погрешности** изменения объёмов  $\Delta V$  и температур  $\Delta T$  берутся равными половине цены наименьшего деления шкалы приборов.

### Описание лабораторной установки

Установка состоит из цилиндра с подвижным поршнем (стеклянный шприц со стеклянным поршнем: металлический поршень будет заклиниваться при нагревании) 1, сосуда с водой 2, в нижней части которого установлен электронагреватель 3, отключающийся при замыкании контактного термометра 4 и срабатывании реле усилительного устройства 5, термометра 6 для измерения температуры воды и, следовательно, воздуха в шприце (рисунок 1).

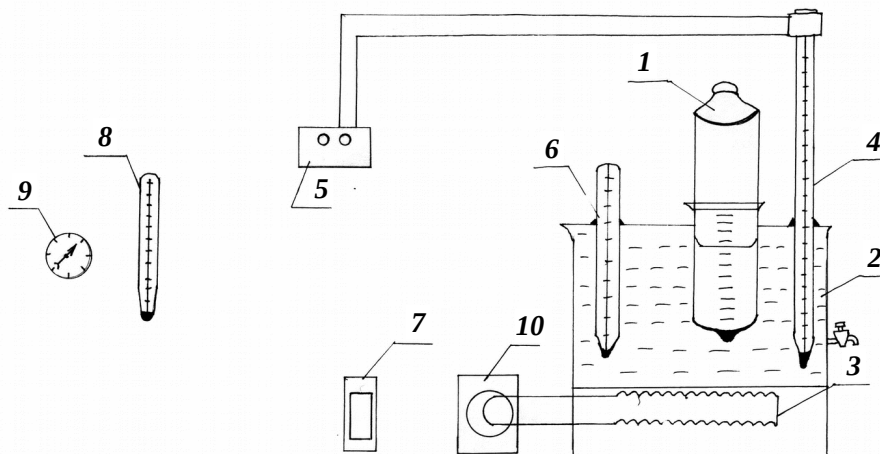


Рисунок 2

## Порядок выполнения работы

- 1 Проверить наличие воды в сосуде 2. При необходимости долить (уровень воды должен быть ниже крышки сосуда на 5–10 мм).
- 2 Вставить вилку электронагревателя в розетку 10 и включить выключатель 7. При включении загорается левая индикаторная лампочка усилительного устройства 5. Нагрев проводить до момента замыкания цепи в контактном термометре 4 и отключения нагревателя (загорается правая индикаторная лампочка усилителя).
- 3 Взять шприц при комнатной температуре и установить поршень так, чтобы начальный объём воздуха в шприце составлял 90% от максимального объёма шприца. Вращая поршень, добиться, чтобы усилие для его перемещения было минимальным (в случае тугого хода процесс уже будет не изобарным, либо давление воздуха в шприце будет превышать атмосферное). Закрывать шприц иглой с расплюснутым концом и установить его в сосуд с водой. В результате нагрева объём воздуха увеличивается и поршень переместится.
- 4 Во время опыта измерить:
  - а) начальный объём воздуха в цилиндре  $V_1$ , мл, по делениям шприца 1 при комнатной температуре;
  - б) начальную температуру воздуха в шприце  $t_1$ , °С (равна температуре комнатного воздуха) термометром 8;
  - в) давление воздуха в шприце  $p$ , мм рт.ст. (равно атмосферному давлению  $p_a$ ) барометром 9;
  - г) конечную температуру воздуха в шприце  $t_2$ , °С (равна температуре воды) термометром 6;
  - д) конечный объём воздуха  $V_2$ , мл, по делениям шприца, не вынимая его из воды.
- 5 При обработке результатов опыта вычислить:
  - а) массу воздуха (кг) в шприце из уравнения состояния
$$m = pV_1 / (RT_1),$$
где  $p$ , Па;  $V_1$ , м<sup>3</sup>;  $R = 287$  Дж/(кг·К);  $T_1 = t_1 + 273,15$  К;
  - б) теплоту изобарного процесса, Дж,
$$Q_p = c_p m (T_2 - T_1);$$
  - в) изменение внутренней энергии воздуха в шприце, Дж,
$$\Delta U = c_v m (T_2 - T_1),$$
(теплоёмкости воздуха принять:  $c_p = 1005$  Дж/(кг·К) и  $c_v = 718$  Дж/(кг·К);
  - г) работу изменения объёма, Дж,
$$W = p (V_2 - V_1), \text{ Дж};$$
  - д) относительную погрешность опыта по формуле (19);
  - е) предельную относительную погрешность  $\varepsilon_n$  по (20);
- 6 Данные измерений и расчётов занести в таблицу 1

Таблица 1– Данные измерений и расчётов

$t_1$	$t_2$	$p = p_a$		$T_1$	$T_2$	$V_1$		$V_2$		$\Delta U$	$Q_p$	$W$	$m$	$\varepsilon$	$\varepsilon_{\text{п}}$
°С	мм рт.ст	Па	К	мл	м <sup>3</sup>	мл	м <sup>3</sup>	Дж			кг	%			

7 Подставить все найденные величины в (17) и (18) и сравнить левые и правые части этих уравнений, сделать выводы о точности опыта.

### Отчёт о работе

Отчёт о работе должен содержать наименование и цель работы, схему установки, основные расчётные формулы, таблицу, расчёт погрешностей измерений.

### Контрольные вопросы

- 1 Аналитическое выражение первого закона термодинамики и его физический смысл.
- 2 Физический смысл теплоты и внутренней энергии и их расчётные формулы.
- 3 Как определяется работа изменения объёма?
- 4 Какая связь между температурами и объёмами в изобарном процессе?
- 5 Как записывается уравнение первого закона термодинамики для изобарного, изохорного, изотермического и адиабатного процессов?

## Лабораторная работа № 3

### Определение средней изобарной теплоемкости воздуха

**Цель работы.** Ознакомление с методикой экспериментального определения теплоемкости газа в проточном колориметре, изучение различных видов теплоемкостей

#### Вводная часть

**Виды теплоёмкостей.** Согласно первому закону термодинамики изменение внутренней энергии системы по способу подвода движения и расчета его энергии разбивается на две части (составляющие):

*работу* – энергию движения, подводимого (отводимого) к системе макроскопическим путем (та часть изменения внутренней энергии, которая рассчитывается через макроскопические силы и перемещения) и

*теплоту* – энергию движения, подведённого (отведенного) к системе микроскопическим путём (та часть изменения внутренней энергии, которая в общем случае не рассчитывается через силы и перемещения)

$$dU \equiv dE_{\text{внутр}} = \delta E_{\text{микро}} + \delta E_{\text{макро}} = \delta Q + \delta W' = \delta Q - p dV,$$

или для удельных величин

$$\delta q = du + p d v. \quad (1)$$

Возникает вопрос, как же рассчитать теплоту  $\delta Q$ , если её в общем случае не удастся рассчитать через силы и перемещения (в отдельных случаях теплоту можно рассчитать так же, как и работу через силы и перемещения, например при трении).

Из опыта известно, что при подводе тепла, как правило, растёт температура рабочего тела. Поэтому количество подведённого к телу тепла исторически определяли как величину, пропорциональную изменению температуры тела:  $\delta Q = C dT$ . Коэффициент пропорциональности  $C$ , позволяющий установить связь между теплотой и изменением температуры тела, называется теплоёмкостью тела. Таким образом, **теплоёмкость тела** определяется как физическая величина, равная отношению теплоты к изменению температуры тела:

$$C = \delta Q / dT \quad [C] = 1 \text{ Дж/К.}$$

Теплоемкость тела численно равна теплоте, вызывающей изменение температуры тела на один градус.

Следует заметить, что и при свершении работы изменяется температура тела. Поэтому и работу можно рассчитывать пропорционально изменению температуры:  $\delta W = C_w dT$ , где  $C_w$  можно назвать «работоемкостью», для которой создать специальные таблицы. Однако этого не требуется, т. к. работу гораздо проще рассчитать через силы и перемещения. Следовательно, введение двух физических величин – теплоты и работы – при рассмотрении первого закона термодинамики обусловлено, в первую очередь, различными методами их расчёта.

В теплотехнических расчётах вместо теплоёмкости тела широко используются удельная, объёмная и молярная теплоёмкости.



**Удельной теплоёмкостью** называется отношение теплоёмкости тела к его массе:

$$c = C / m = \delta Q / (m dT) = \delta q / dT; \quad [c] = 1 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$$

где  $\delta q = \delta Q / m$  – удельная теплота, Дж / кг (неправильно называть удельную теплоёмкость *массовой* теплоёмкостью).

**Молярной теплоёмкостью** называется отношение теплоёмкости тела к количеству вещества (молярности) этого тела:

$$C_\mu = C / \mu, \quad [C_\mu] = 1 \text{ Дж} / (\text{моль}\cdot\text{К}).$$

**Объёмной теплоёмкостью** называется отношение теплоёмкости тела к его объёму, приведённому к нормальным физическим условиям ( $p_0 = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст}$ ;  $T_0 = 273,15 \text{ К}$  ( $0^\circ \text{C}$ )):

$$c' = C / V_0, \quad [c'] = 1 \text{ Дж} / (\text{м}^3\cdot\text{К}).$$

В случае идеального газа его объём при нормальных физических условиях (НФУ) вычисляется из уравнения состояния

$$V_0 = mRT_0/p_0.$$

Связь между различными видами теплоёмкости

$$c = C_\mu / M; \quad c' = C_\mu / V_{\mu 0} = c\rho_0,$$

где  $\rho_0 = m / V_0$  – плотность газа при НФУ,

$V_{\mu 0} = V_0 / \mu = 22,4141 \text{ м}^3/\text{кмоль}$  – молярный объём, приведённый к НФУ.

Теплоёмкость идеального газа зависит от температуры  $c = c(T)$ . По этому признаку различают **истинную и среднюю** теплоёмкости.

**Истинная теплоёмкость** соответствует определённой температуре тела (*теплоёмкость в точке*), так как определяется при бесконечно малом изменении температуры тела  $dT$

$$c = \delta q / dT.$$

Значение теплоёмкости, которое принимается постоянным в заданном интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$ , называется **средней теплоёмкостью** в данном интервале температур. Она определяется как отношение теплоты к конечному интервалу температур

$$\bar{c}_{1-2} = q_{1-2} / \Delta T = \left( \int_1^2 c dT \right) / \Delta T = \left( \int_1^2 c dt \right) / \Delta t$$

Согласно первому закону термодинамики (1) одному и тому же изменению внутренней энергии соответствует бесчисленное множество сочетаний различных значений теплоты и работы, т. е. при одном и том же изменении температуры тела теплота, а значит и теплоёмкость, будут различными в различных термодинамических процессах.

В случае **изотермного процесса** ( $T = \text{const}$ ) температура тела не изменяется ( $dT = 0$  и  $C_T = \delta Q / 0 = \pm \infty$ ) и теплоту уже нельзя определить как величину, пропорциональную изменению температуры. В этом случае она определяется из первого закона термодинамики, как работа изменения объёма ( $dU = 0$ ):

$$\delta Q_T = pdV.$$

В случае **изобарного процесса** ( $p = \text{const}$ ) уравнение первого закона термодинамики (1) запишется в виде

$$c_p dT = c_v dT + p dv.$$

Откуда выводится известное уравнение Майера

$$c_p - c_v = R, \quad (2)$$

согласно которому разность удельной изобарной и изохорной теплоёмкостей для данного газа есть величина постоянная и равная удельной газовой постоянной.

В случае **адиабатного процесса** теплота равна нулю ( $\delta q = 0$ ), а значит и теплоёмкость равна нулю:  $c_{ад} = 0 / dT = 0$ .

Уравнение первого закона термодинамики в этом случае запишется в виде

$$c_v dT + p dv = 0.$$

Откуда выводится уравнение адиабатного процесса (адиабаты)

$$p v^k = \text{const}. \quad (3)$$

Показатель степени, входящий в это уравнение и равный отношению теплоёмкостей, называется показателем адиабаты  $k$ :

$$k = c_p / c_v \quad (4)$$

Решая совместно (2) и (4), можно выразить теплоёмкости через  $k$  и  $R$ :

$$c_v = \frac{R}{k-1}; \quad c_p = \frac{k}{k-1} R \quad (5)$$

Значения **истинных теплоёмкостей** и их отношения  $k$  некоторых газов в идеальном состоянии (при  $p \rightarrow 0$  и  $T_c = 0^\circ\text{C}$ ) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Некоторые характеристики идеальных газов

Газ	Химическая формула	$M$	$C_{\mu p}$	$C_{\mu v}$	$c_p$	$c_v$	$k = c_p / c_v$
		кг/кмоль	кДж/(кмоль·К)	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)		
Гелий	He	4,0026	20,93	12,60	5,229	3,148	1,661
Водород	H <sub>2</sub>	2,0158	28,58 20,270	14,180	10,056	1,410	
Метан	CH <sub>4</sub>	16,0426	34,74	26,42	2,165	1,647	1,315
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,0304	35,00	26,67	2,055	1,566	1,312
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18,016	33,504	25,190	1,8597	1,3982	1,330
Оксид углерода	CO	28,0104	29,099	20,785	1,0389	0,7421	1,400
Азот	N <sub>2</sub> 28,0134	29,103	20,789	1,0389	0,7421	1,400	
Воздух		28,9642	29,050	20,736	1,0030	0,7159	1,401
Кислород	O <sub>2</sub>	31,9988	29,224	20,910	0,9132	0,6534	1,398
Аргон	Ar	39,948	20,79	12,48	0,520	0,312	1,666
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	44,0098	35,989	27,675	0,8178	0,6288	1,301
Диоксид серы	SO <sub>2</sub>	64,0588	38,85	30,52	0,607	0,476	1,273
Пары ртути	Hg	200,59	20,83	12,52	0,104	0,062	1,664

В **среднем** по всем газам одинаковой атомарности принято считать, что для одноатомных газов  $k \approx 1,67$ , для двухатомных  $k \approx 1,40$ , для трёхатомных  $k \approx 1,29$

(для водяных паров часто берут точное значение  $k = 1,33$ ).

В случае произвольного процесса уравнение первого закона термодинамики запишется в виде

$$c_n dT = c_v dT + p dv.$$

Откуда по аналогии с уравнением адиабатного процесса (3), полученного исторически первым, выводится уравнение **политропного** процесса (политропы) в виде

$$p v^n = \text{const},$$

где показатель степени  $n$ , постоянный для данного процесса, называется показателем политропы:

$$n = \frac{c_n - c_p}{c_n - c_v} = \text{const}.$$

Таким образом, если процесс политропный и показатель политропы  $n$  известен, то *теплоёмкость политропного процесса*  $c_n$  этого процесса может быть определена расчётным путём, не прибегая к эксперименту, по формуле

$$c_n = c_v \frac{n - k}{n - 1}.$$

Расчёт теплоты через средние теплоёмкости осуществляется по формулам:

– для изохорного процесса  $Q_v = \bar{c}_v m (T_2 - T_1) = \bar{c}_v m (t_2 - t_1)$

– для изобарного процесса  $Q_p = \bar{c}_p m (T_2 - T_1) = \bar{c}_p m (t_2 - t_1)$ .

#### Методика опытного определения средней изобарной теплоёмкости воздуха в проточном калориметре

Определение изобарной теплоёмкости воздуха осуществляется методом нагрева воздуха, движущегося в канале постоянного сечения практически при постоянном давлении. Расчёт средней изобарной теплоёмкости ведётся по формуле

$$\bar{c}_p = \Phi / [m_t (t_2 - t_1)] \quad (6)$$

где  $\Phi$  – тепловой поток, отводимый от нагревателя к воздуху, Вт;

$m_t$  – массовый расход воздуха, кг/с;

$(t_2 - t_1)$  – изменение температуры воздуха в калориметре, К.

Принять, что электрическая мощность нагревателя  $P_{эл}$  равна тепловой мощности (тепловому потоку), т. е.  $\Phi = P_{эл}$ .

Массовый расход воздуха (кг/с) определяется по формуле

$$m_t = \rho c_{cp} A, \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха при входе в калориметр, кг/м<sup>3</sup>;

$c_{cp}$  – средняя по сечению скорость воздуха в трубе, м/с;

$A$  – площадь поперечного сечения трубы, м<sup>2</sup>.

Плотность воздуха на входе в трубу принимается равной плотности воздуха в помещении и определяется из уравнения состояния:

$$\rho = p_a / (RT_1), \quad (8)$$

где  $p_a$  – атмосферное давление, Па;

$T_1 = t_1 + 273,15$  К – температура воздуха при входе в калориметр (принима-

ется равной температуре воздуха в помещении);

$R = 287$  Дж/(кг·К) – удельная газовая постоянная воздуха.

Поскольку скорость изменяется по сечению трубы (рис. 1), а измерение скорости производится на оси трубы, то средняя по сечению скорость определяется по формуле

$$c_{cp} = \beta_o c_o, \quad (9)$$

где коэффициент осреднения скорости  $\beta_o$  определяется по графику (рис. 2) в зависимости от числа Рейнольдса

$$Re = c_o d / \nu, \quad (10)$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубы, м;

$\nu = 16 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – кинематическая вязкость воздуха.

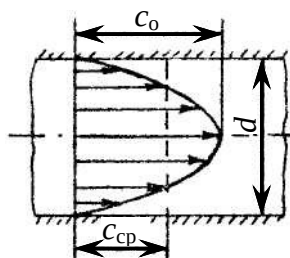


Рисунок 1

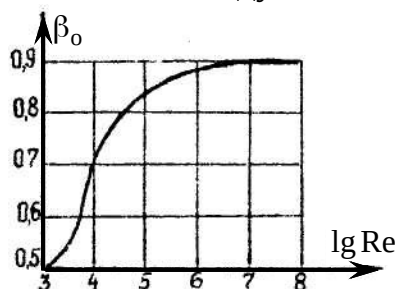


Рисунок 2

$$c_o = \sqrt{2 p_{дин} / \rho} \quad (11)$$

Динамическое давление определяется как разность полного и статического давлений с помощью двух трубок и определяется по показаниям микроманометра  $l_{дин}$  (рисунок 3):

$$p_{дин} = 9,81 \cdot K \cdot l_{дин} \quad (12)$$

где  $K$  – коэффициент микроманометра (учитывает угол наклона трубки и плотность спирта и служит для перевода показаний микроманометра  $l_{дин}$  в мм вод. ст.), значение  $K$  указано на дуге микроманометра; 9,81 – коэффициент перевода мм вод. ст в Па.

### Описание лабораторной установки

Рабочим участком установки (см. рисунок 3) является проточный калориметр с самоулавливанием тепловых потерь. Корпус 1 калориметра представляет собой двухходовой теплообменник, внутри которого в стеклянной трубке помещён электронагреватель 2. Поток воздуха во внешнем канале уменьшает тепловые потери от нагревателя.

Движение воздуха через калориметр осуществляется за счёт разрежения, создаваемого вакуум-насосом 3. Напряжение и сила электрического тока, проходящего по спирали нагревателя, измеряются вольтметром 4 и амперметром 5.

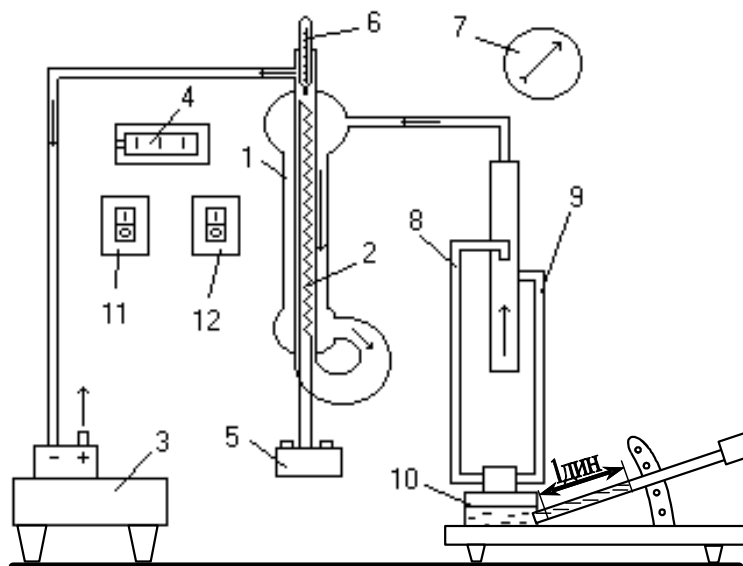


Рисунок 3

Температура воздуха измеряется термометром 6. Атмосферное давление определяется по барометру 7, динамическое давление измеряется с помощью трубки Пито (полного давления) 8 и пьезометра (трубки статического давления) 9, подсоединённых к микрометру 10.

#### Порядок выполнения работы

1 Записать начальную температуру воздуха  $t_1$ , °С, атмосферное давление  $p_a$ , мм рт. ст, диаметр трубки  $d$ , мм.

2 Включить вакуумный насос выключателем 11 и нагреватель выключателем 12 (при правильной работе столбик спирта микроманометре отклоняется на 5 – 6 мм, показания вольтметра не должны превышать 5 В, а амперметра 2 А). Нагрев проводить 15 – 20 минут. Стационарный процесс теплообмена можно считать достигнутым, если в течение 3-х минут показания манометра не изменяются.

3 Во время опыта зарегистрировать:

а) температуру воздуха  $t_2$  на выходе из калориметра;  
 б) показания микроманометра  $l_{\text{дин}}$  в мм вод. ст, и коэффициент микроманометра  $K$ ;

в) показания вольтметра  $U_{\text{эл}}$ , В, и амперметра  $I_{\text{эл}}$ , А.

4 При обработке результатов опыта вычислить:

а) динамическое давление  $p_{\text{дин}}$  по формуле (12);

б) плотность воздуха  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, по формуле (8);

в) осевую скорость  $c_o$ , м/с, по формуле (11);

г) число Рейнольдса по формуле (10);

д) среднюю по сечению скорость  $c_{\text{ср}}$ , м/с, по формуле (9)

е) массовый расход воздуха  $m_t$ , кг/с по формуле (7)

ж) тепловой поток  $\Phi = P_{\text{эл}} = U_{\text{эл}} \cdot I_{\text{эл}}$ , Вт;

з) среднюю удельную изобарную теплоёмкость воздуха  $\bar{c}_p$ , Дж/(кг·К), по

формуле (6) и изохорную теплоёмкость из формулы (2);

и) показатель адиабаты  $k$  по формуле (4)

к) удельную внутреннюю энергию воздуха  $U_2 = c_v T$ , Дж/кг.

5. Результаты измерений и расчётов занести в таблицу 2

Таблица 2 – Опытные и расчётные данные

$t_1$	$t_2$	$p = p_a$		$I_{эл}$	$U_{эл}$	$\Phi$	$l_{дин}$	$c_{ср}$	$m_t$	$\bar{c}_p$	$\bar{c}_v$	$k$	$U_2$	$\varepsilon_{п}$
°С		мм рт. ст	Па	А	В	Вт	мм сп. ст	м/с	кг/с	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$			Дж/кг	

6. Сравнить значение показателя адиабаты  $k$  с табличным значением (см. таблицу 1).

7. Вычислить предельную относительную погрешность измерения  $\bar{c}_p$ , по формуле

$$\varepsilon_{п}(\bar{c}_p) = [\Delta I_{эл} / I_{эл} + \Delta U_{эл} / U_{эл} + 0,5 \Delta l_{дин} / l_{дин} + 0,5 \Delta p_a / p_a + 0,5 \Delta T / T_1 + 2 \Delta d / d + 2 T / (t_2 - t_1)] 100 \%$$

Абсолютные предельные погрешности измерения напряжения  $U_{эл}$  и силы электрического тока  $I_{эл}$  а также атмосферного давления  $p_a$  определяются в соответствии с классом точности приборов по формуле  $\Delta_{п}(A) = K \cdot A_{ном} / 100$ , где  $K$  – класс точности прибора;

$A_{ном}$  – номинальное значение шкалы прибора.

Абсолютные погрешности измерения температуры  $\Delta T$ , диаметра трубы  $\Delta d$  и длины столбика спирта  $\Delta l_{дин}$  принять равным 0,5 цены наименьшего деления соответствующей шкалы прибора.

### Отчёт о работе

Отчёт о работе должен содержать наименование и цель работы, краткое описание методики экспериментального определения  $\bar{c}_p$ , схему установки, таблицу, расчёт погрешности измерения теплоёмкости.

### Контрольные вопросы

1. Виды теплоёмкостей. Уравнение Майера. Показатель адиабаты  $k$ .
2. Как в работе определяется массовый расход?
3. Методика экспериментального определения  $\bar{c}_p$ .
4. Истинная и средняя теплоёмкости.
5. Расчёт теплоты в изохорном и изобарном процессах через средние теплоёмкости.
6. Как рассчитывается внутренняя энергия идеального газа?

## Лабораторная работа № 4

### Исследование теплопроводности материалов методами шарового и цилиндрического слоя

**Цель работы.** Ознакомление с методикой экспериментального определения теплопроводности материалов шаровой и цилиндрической формы и углубление знаний по теплопроводности.

#### Вводная часть

**Теория теплообмена** – наука о законах распространения (переноса) тепла (хаотического движения – ХД) в пространстве. При этом следует различать три категории:

- свойство материи (**объективную реальность**) – *тепловое* (хаотическое) **движение**, или *тепло*, которое переносится в пространстве;
- **физическую величину** (предмет из мира идей), которая не может переноситься в пространстве, – **количество тепла** (количество переданного хаотического движения), или *теплоту*  $Q$ ;
- **процесс** переноса тепла (ХД) – *теплообмен*.

**Элементарные способы переноса тепла (ХД).** Обмен хаотическим движением между двумя телами может происходить как путём непосредственного соударения молекул этих тел при их соприкосновении, так и за счёт молекул теплоносителя, перемещающегося между телами, а также с помощью электронов и частиц электромагнитных полей, т. е. для передачи движения необходимо иметь частицы – материальные носители движения.

В зависимости от вида частиц – носителей движения – и особенностей их перемещения в пространстве различают **три элементарных способа переноса тепла (ХД): теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.**

**Теплопроводность** – способ переноса тепла (ХД) в однородной среде *частицами* этой среды *без результирующего переноса вещества в направлении переноса тепла*. Теплопроводность в подвижной среде обусловлена движением молекул этой среды, в электропроводных телах – электронами, в диэлектриках – фононами<sup>1</sup>.

В чистом виде теплопроводность имеет место в твёрдых телах и неподвижных слоях жидкости и газа.

**Конвекция**<sup>2</sup> – способ переноса тепла (ХД) в подвижной среде за счёт *макроскопического переноса* этой среды из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвекция имеет место в движущихся средах (жидкостях, газах, сыпучих средах, плазме).

**Тепловое излучение** – способ переноса тепла (ХД) с помощью *электромагнитных волн*, возбуждаемых молекулами горячего тела и поглощаемых молекулами холодного тела. В чистом виде теплообмен излучением имеет место в ваку-

<sup>1</sup> Фононы – виртуальные (возможные) частицы, ответственные за силы взаимодействия в неэлектропроводных телах.

<sup>2</sup> Конвекция, от лат *convection* – перенос, доставка.

уме (космосе).

**Совместные способы переноса тепла.** Разделение на элементарные способы переноса тепла (теплопроводность, конвекцию и излучение) производится в основном из методологических соображений. В действительности же перенос тепла зачастую осуществляется сразу несколькими способами

Совместный перенос тепла *конвекцией и теплопроводностью* называется **конвективным** способом переноса тепла (конвективным теплообменом).

Совместный перенос тепла *излучением и теплопроводностью* называется **радиационно-кондуктивным** способом переноса тепла (радиационно-кондуктивным теплообменом).

Совместный перенос тепла *всеми тремя способами* (теплопроводностью, конвекцией и излучением) называется **сложным**, или **радиационно-конвективным** способом переноса тепла (сложным теплообменом). Примером сложного теплообмена является теплообмен между движущимся многоатомным газом и стенкой, жидким металлом и стенкой.

**Тепловым потоком**, или **потоком теплоты** называется отношение элементарной теплоты  $\delta Q$ , характеризующей порцию движения переданного в ХФ через какую-либо поверхность системы, к элементарному промежутку времени  $dt$  (Вт)

$$\Phi = \delta Q / dt . \quad [\Phi] = [Q] / [t] = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}.$$

Тепловой поток численно равен количеству тепла, проходящего через нормально расположенную поверхность в единицу времени.

**Поверхностная плотность теплового потока**, или **плотность теплового потока** – отношение теплового потока  $\delta\Phi$  к площади  $\delta A_{\perp}$  поверхности, расположенной перпендикулярно направлению теплового потока, (Вт/м<sup>2</sup>)

$$\varphi = \delta\Phi / \delta A_{\perp} .$$

Поверхностная плотность теплового потока численно равна тепловому потоку, равномерно распределённому на поверхности единичной площади.

**Вектор**, указывающий направление наибольшего изменения температуры в пространстве и численно равный частной производной от температуры в направлении нормали, называется **градиентом температуры**<sup>1</sup>

$$\text{grad}T = n_o (\partial T / \partial n) = (\partial T / \partial x) i + (\partial T / \partial y) j + (\partial T / \partial z) k .$$

Согласно **закону Фурье** (1807) вектор плотности теплового потока пропорционален градиенту температуры и противоположно ему направлен

$$\varphi = - \lambda \text{ grad}T = - \lambda n_o \partial T / \partial n . \quad (1)$$

Таким образом, векторы  $\varphi$  и  $\text{grad}T$  лежат на одной прямой, но направлены в противоположные стороны. Это объясняет наличие знака минус в уравнении (1).

Плотность теплового потока (модуль вектора)

$$\varphi = \lambda \partial T / \partial n , \quad (2)$$

где  $\lambda$  – **теплопроводность** – физическая величина, характеризующая теплопро-

<sup>1</sup> Градиент (от латин. – *шагающий*), вектор, характеризующий наибольшее изменение некоторой величины на единицу длины и показывающий направление этого изменения в пространстве. Существует градиент давления, температуры, скорости, плотности морской воды и т. п.



водящие свойства вещества, Вт/(м<sup>2</sup>·К); зависит от агрегатного состояния вещества (таблица 1), его атомно-молекулярного строения, температуры и давления, состава (в случае смеси и раствора) и т. д.;

$n_o$  – единичный вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры;

$\partial T/\partial n$  – производная от температуры по направлению нормали  $n$ .

На основании закона Фурье (2) выводятся зависимости для расчёта тепловых потоков через:

– плоскую стенку 
$$\Phi = \frac{\lambda}{\delta}(T_1 - T_2)A; \quad (3)$$

– цилиндрическую стенку 
$$\Phi = 2\pi\lambda l(T_1 - T_2)/\ln(d_2/d_1); \quad (4)$$

– шаровую стенку 
$$\Phi = 2\pi\lambda(T_1 - T_2)/(1/d_1 - 1/d_2), \quad (5)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – температуры горячей и холодной поверхностей стенки, К;

$\delta$  – толщина стенки, м;

$A$  – площадь стенки, м<sup>2</sup>;

$d_1$  и  $d_2$  – внутренний и наружный диаметры цилиндрической и шаровой стенок, м;

$\lambda$  – теплопроводность материала стенки, Вт/(м·К).

Таблица 1 – Значения теплопроводности  $\lambda$  для некоторых газов, жидкостей и твёрдых тел при атмосферном давлении

Вещество	$t$ , °С	$\lambda$ , Вт/(м·К)	Вещество	$t$ , °С	$\lambda$ , Вт/(м·К)
<b>Газы</b>			<b>Жидкости</b>		
Водород	0	0,1655	Ртуть	0	7,82
Гелий	0	0,1411	Вода	20	0,599
Кислород	0	0,0239	Ацетон	16	0,190
Воздух	4	0,0266	Бензол	22,5	0,158
<b>Металлы</b>			<b>Минералы и материалы</b>		
Серебро	0	429	Хлорид натрия	0	6,9
Медь	0	403	Стекло	18	0,4...1,0
Золото	0	311	Дерево	18	0,16...0,25
Алюминий	0	202	Асбест	18	0,12
Железо	0	86,5	Песок	0...160	0,30...0,48
Олово	0	68,2	Текстолит	20	0,23...0,34
Свинец	0	35,6	Ламповая сажа	40	0,07...0,12

## Методика опытного определения теплопроводности материала

В работе определяется теплопроводность сыпучего материала методами шарового и цилиндрического слоя. Сущность метода состоит в том, что сыпучий материал засыпают в пространство между двумя соосными шарами или трубами. Во внутреннем шаре и цилиндрической трубе располагаются электронагреватели. Для уменьшения тепловых потерь через торцы трубы, они дополнительно теплоизолируются. Для создания одномерного теплового потока через слой исследуемого материала длина трубы должна в 30 раз превышать её диаметр.

Если пренебречь тепловыми потерями через торцы трубы, то тепловой поток  $\Phi$ , Вт, проходящий через слой исследуемого материала, может быть найден непосредственно путём измерения мощности  $P$ , потребляемой электронагревателем и замеряемой ваттметром:  $\Phi = P$ .

Теплопроводность исследуемых материалов находится из уравнений (4) и (5):

$$\text{– для трубы} \quad \lambda = \Phi \ln(d_2/d_1) / [2\pi l (t_I - t_{II})]; \quad (6)$$

$$\text{– для шара} \quad \lambda = \Phi(1/d_1 - 1/d_2) / [2\pi(t_I - t_{II})], \quad (7)$$

где  $t_I$  и  $t_{II}$  – средние арифметические температуры внутренней и наружной поверхностей шарового и цилиндрического слоёв, °С.

### Определение теплопроводности материала методом шарового слоя

**Описание лабораторной установки.** В экспериментальной установке для определения теплопроводности  $\lambda$  по методу шара (рисунок 1) исследуемый материал 1 в виде шарового слоя расположен между двумя шаровыми стенками 2 и 3 из стали. Внутренний диаметр шарового слоя  $d_1 = 70$  мм, а наружный диаметр  $d_2 = 100$  мм. Толщина слоя составляет 15 мм.

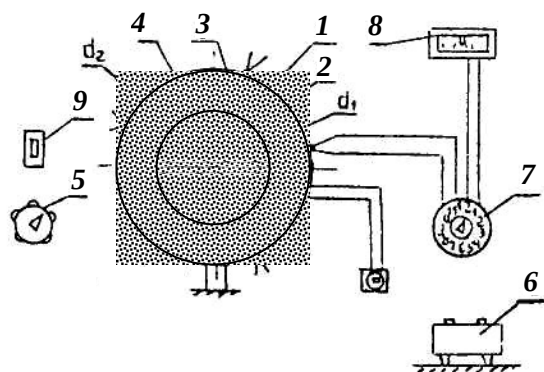


Рисунок 1

Метод шарового слоя позволяет получить одномерный тепловой поток без применения каких-либо охранных устройств. Однако шаровой прибор отличается сложностью монтажа, требует строгой центровки шаров; применение шарового прибора связано с трудностями равномерного заполнения исследуемым веществом шарового пространства между двумя полыми концентрическими шаровыми поверхностями.

При испытании сыпучих и волокнистых материалов неравномерность заполнения шарового слоя исследуемых материалов может привести к значительным ошибкам в определении теплопроводности материала.

Внутри меньшего шара находится электронагреватель 4 из нихромовой проволоки изолированной фарфоровыми бусами. Мощность нагревателя регулируется реостатом 6.

ется автотрансформатором 5 и измеряется ваттметром 6. Вся теплота, выделяемая нагревателем, передаётся теплопроводностью через шаровой слой исследуемого материала.

На внутренней и наружной поверхности шарового слоя материала установлено по пять термопар из хромель-копелевой термоэлектродной проволоки, подключённых к переключателю 7. Каждая термопара установлена в середине равных площадей, составляющих внутреннюю и наружную шаровые поверхности. Температура измеряется пирометрическим милливольтметром 8.

### Порядок выполнения работы

1. Вставить вилку электронагревателя в розетку и включить автоматический выключатель 9.

2. Вращая ручку автотрансформатора 5 установить по ваттметру мощность нагревателя  $P = 20$  Вт.

3. Подключить пирометрический милливольтметр к одной из термопар с помощью переключателя термопар 7 и дождаться наступления стационарного теплового режима, о чём будет свидетельствовать неизменность показаний милливольтметра во времени (25 – 30 минут после включения на соответствующий режим).

4. Во время опыта измерить:

а) мощность нагревателя  $P$ , Вт;

б) температуры участков стенки внутреннего шара  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ , °С;

в) температуры участков стенки внешнего шара  $t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}$ , °С.

5. Повторить пункты 2 – 4 для мощностей нагревателя 40 и 60 ватт.

6. При обработке результатов опыта вычислить:

а) среднюю температуру стенок внутреннего шара

$$t_I = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) / 5$$

и внешнего шара

$$t_{II} = (t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}) / 5;$$

б) среднюю температуру исследуемого материала

$$t_{\text{мат}} = (t_I + t_{II}) / 2;$$

в) теплопроводность материала  $\lambda$  для трёх исследованных режимов по формуле (7), где  $d_1 = 0,07$  м, а наружный диаметр  $d_2 = 0,10$  м.

7. Определить предельную относительную погрешность измерений теплопроводности материала

$$\varepsilon_{II}(\lambda) = \frac{\Delta\Phi/\Phi + (\Delta t_I + \Delta t_{II})/(t_I - t_{II}) + (\Delta d_1 + \Delta d_2)/(d_2 - d_1) + \Delta d_1/d_1 + \Delta d_2/d_2}{100\%}$$

8. Результаты опытов и расчётов занести в таблицу 2.

9. Построить график зависимости теплопроводности материала от его средней температуры  $\lambda = f(t_{\text{мат}})$ .

Таблица 2– К расчёту теплопроводности материала методом шарового слоя

$\Phi = P,$ Вт	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_1$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{II}$	$t_{\text{мат}}$	$\lambda,$ Вт/(м·К)	$\varepsilon_{II}$
	°С														
20	65	69	66	68	67		34	35	36	35	35				
40	104	105	104	108	109		44	46	48	49	43				
60	149	152	156	156	152		63	64	65	66	6				

### Определение теплопроводности материала методом цилиндрического слоя

**Описание лабораторной установки.** Опытная установка состоит из внешней металлической трубы 1 диаметром  $d_2$ , внутри которой концентрично установлена металлическая труба 2 диаметром  $d_1$ , а промежуток между этими трубами заполнен исследуемым сыпучим материалом 3 (рис. 2). В стенки труб заделаны горячие спаи термопар 4 (по три термопары на трубу). Внутри трубы 2 вставлена фарфоровая труба 5, в которой установлен электронагреватель 6. Мощность нагревателя измеряется ваттметром 7 и может регулироваться с помощью автотрансформатора 8.

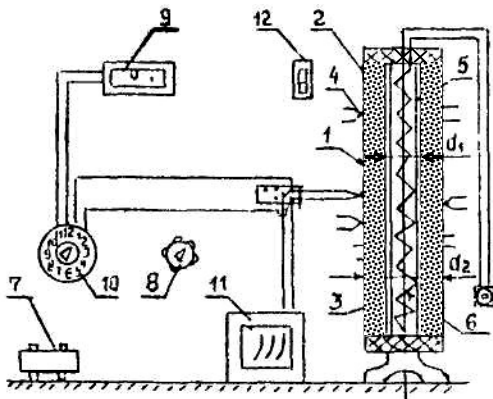


Рисунок 2

Температура измеряется милливольтметром 9, который поочередно подключается к каждой термопаре с помощью переключателя 10.

Выход установки на стационарный тепловой режим определяется по температурным кривым разгона, регистрируемых на ленте потенциометра 11 (КСП-4).

### Порядок выполнения работы

1. Вставить вилку электронагревателя в розетку и включить автоматический выключатель 12 и потенциометр 11.

2. Вращая ручку автотрансформатора 8, установить по ваттметру мощность электронагревателя  $P = 50$  Вт.

3. Дождаться наступления стационарного теплового режима, о наступлении которого можно судить по появлению вертикальных линий на диаграмме потенциометра (температура перестает изменяться).

4. Во время опыта измерить:

а) мощность нагревателя  $P$ , Вт;

б) температуры отдельных участков внутренней трубы  $t_1, t_2, t_3$ , °С, и внешней трубы  $t_4, t_5, t_6$ , °С с помощью милливольтметра 9 и переключателя термопар 10.

5. Повторить пункты 2 – 4 для мощностей нагревателя 100 и 150 Вт.

6. При обработке результатов опыта вычислить:

а) средние температуры стенок внутренней трубы

$$t_I = (t_1 + t_2 + t_3)/3$$

и внешней трубы  $t_{II} = (t_4 + t_5 + t_6)/3$ ;

б) среднюю температуру исследуемого материала

$$t_{\text{мат}} = (t_I + t_{II})/2;$$

в) теплопроводность материала  $\lambda$  для трёх исследованных режимов по формуле (6), где  $d_1 = 0,020$  м и  $d_2 = 0,036$  м – диаметры труб;  $l = 0,72$  м – длина рабочего участка трубы;

г) предельную относительную погрешность измерений теплопроводности материала по формуле

$$\varepsilon_{\pi}(\lambda) = \left| \Delta\Phi/\Phi + \Delta l/l + 2\Delta t(t_I - t_{II}) + 2\Delta d/(d_1 \ln d_2/d_1) \right| \cdot 100\%.$$

Абсолютные погрешности измерения диаметров принять  $\Delta d = 1$  мм, а длины  $\Delta l = 5$  мм. Абсолютные погрешности измерения температуры и мощности вычислить по формуле

$$\Delta_{\pi}(A) = K \cdot A_{\text{ном}} / 100$$

в соответствии с классом точности  $K$  приборов.

7. Результаты опытов и расчетов занести в таблицу 3

Таблица 3 – К расчёту теплопроводности материала методом цилиндрического слоя

$\Phi = P$ , Вт	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_{II}$	$t_{\text{мат}}$	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\varepsilon_{\pi}$
	°С									
50	55	56	60	43	47	45				
100	101	87	88	65	67	72				
150										

8. Построить зависимость теплопроводности материала от его средней температуры  $\lambda = f(t_{\text{мат}})$ .

### Отчет о работе

Отчет о работе должен содержать наименование и цель работы, схему лабораторных установок, таблицы и необходимые расчеты, графики зависимости

$\lambda = f(t_{\text{мат}})$  для материалов, исследованных по методу шарового и цилиндрического слоя.

### Контрольные вопросы

1. Сущность методов определения теплопроводности сыпучих материалов – шарового и цилиндрического.
2. Элементарные способы переноса теплового движения.
3. Закон Фурье.
4. Градиент температуры.
5. Формулы расчета теплового потока путем теплопроводности для плоской, цилиндрической и шаровой стенок.

## Лабораторная работа № 5

### Исследование теплоотдачи горизонтальной трубы при естественной конвекции воздуха в неограниченном объёме

**Цель работы.** Ознакомление с методикой опытного определения коэффициентов теплоотдачи на поверхности горизонтальной трубы в условиях естественной конвекции и обобщение результатов опыта.

#### Вводная часть

**Сложный теплообмен.** Совместный перенос тепла теплопроводностью, конвекцией и излучением называется **сложным**, или **радиационно-конвективным** способом переноса тепла (сложным теплообменом). Примером сложного теплообмена является теплообмен между движущимся многоатомным газом и стенкой, жидким металлом и стенкой. В данной работе исследуется сложный теплообмен между нагретым горизонтальным цилиндром и окружающей средой (воздухом), где в качестве основного явления рассматривается конвективный теплообмен.

**Конвективный теплообмен.** Конвективный теплообмен происходит при движении жидкости или газа, когда перенос теплового движения осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью.

**Конвекция**<sup>1</sup> – способ переноса тепла (ХД) в подвижной среде за счёт *макроскопического переноса* этой среды из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвекция имеет место в движущихся средах (жидкостях, газах, сыпучих средах, плазме).

Различают естественную (свободную) и вынужденную конвекцию. При *естественной конвекции* перемещение жидкости (газа) происходит без внешнего возбуждения в результате самого процесса теплообмена. При теплообмене температура жидкости переменна по её объёму, поэтому возникает разность плотностей и как следствие разность гравитационных сил, действующих на горячие и холодные слои жидкости. Например, при соприкосновении воздуха с нагретым телом воздух нагревается, становится легче и вытесняется вверх холодными слоями воздуха, которые опускаются вниз под действием силы тяжести.

При *вынужденной конвекции* перемещение жидкости происходит под действием посторонних возбудителей, например, насоса, вентилятора и пр. В общем случае наряду с вынужденной конвекцией одновременно может развиваться свободная конвекция. Относительное влияние последней тем больше, чем больше разность температур в отдельных точках жидкости и чем меньше скорость вынужденного движения.

Уже первые опыты по конвективному теплообмену показали, что плотность теплового потока пропорциональна разности температур между жидкостью и поверхностью тела (закон теплоотдачи Ньютона-Рихмана):

$$\varphi = \alpha (T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}) \quad \text{или} \quad \Phi = \int \varphi dA = \bar{\alpha} (\bar{T}_{\text{ж}} - \bar{T}_{\text{с}}) A, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Конвекция, от лат *convection* – перенос, доставка.

где  $\alpha$  – местный (локальный) коэффициент теплоотдачи;  
 $\bar{\alpha}$  – средний по поверхности теплообмена коэффициент теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность конвективного теплообмена и равен отношению плотности теплового потока  $\varphi$  к разности температур между жидкостью и стенкой

$$\alpha = \varphi / (T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}). \quad [\alpha] = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

В общем случае коэффициент теплоотдачи является сложной функцией формы канала, размеров  $l$ , например, диаметра  $d$ , температур стенки  $T_{\text{с}}$  и жидкости  $T_{\text{ж}}$ , скорости жидкости  $c$  и её физических свойств – теплопроводности  $\lambda$ , теплоёмкости  $c_p$ , плотности  $\rho$ , динамической  $\mu$  и кинематической  $\nu$  вязкости и других факторов:

$$\alpha = [c, d, \nu, \mu, c_p, \lambda, T_{\text{ж}}, T_{\text{с}}, \Delta T, \rho, l, \dots].$$

Эту зависимость можно существенно упростить, если представить её в виде критериального уравнения, записываемого через числа подобия в общем случае конвективного теплообмена при **свободно-вынужденном движении капельной жидкости**,

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Gr}, \text{Pr}, \text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с}}). \quad (2)$$

**Числа подобия** – безразмерные комплексы, составленные из величин, характеризующих данное явление. Числа подобия, равенство которых обеспечивает подобие процессов, называются **критериями подобия** или инвариантности (одинаковости числа). Согласно первой теореме подобия – *подобные процессы имеют одинаковые числа (критерии) подобия*.

Числа подобия принято обозначать первыми двумя буквами фамилий учёных, внёсших значительный вклад в исследования в области гидродинамики и теории теплообмена, например,  $\text{Re}$  (*Reynolds*),  $\text{Nu}$  (*Nusselt*) и др.

**Число Рейнольдса**  $\text{Re} = \frac{cd}{\nu} = \frac{\rho cl}{\mu}$  определяет гидродинамическое подобие течений теплоносителей, т. е. характеризует режим движения жидкости. Для процессов теплоотдачи режим движения жидкости имеет очень большое значение, т. к. им определяется механизм переноса тепла. При ламинарном режиме перенос движения в направлении нормали к стенке в основном осуществляется путем теплопроводности. При турбулентном режиме перенос теплового движения осуществляется путем теплопроводности лишь в вязком подслое, а внутри турбулентного ядра перенос осуществляется путём интенсивного перемешивания (конвекции) частиц жидкости. Интенсивность теплообмена при турбулентном режиме значительно выше, чем при ламинарном режиме. Число Рейнольдса является определяющим критерием при рассмотрении теплообмена при вынужденной конвекции.

**Число Нуссельта** является **определяемым** (зависимым) в критериальном уравнении (2) **числом подобия**, характеризующим интенсивностью теплоотдачи в пограничном слое потока у стенки (из этого числа определяется **коэффициент теплоотдачи**  $\alpha$ ):

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $d$  - диаметр трубы, м;  $\lambda$  – теплопроводность жидкости (воздуха), выбирает-



ся в зависимости от температуры, Вт/(м·К).

$$\text{Число Прандтля} \quad Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (4)$$

является теплофизической характеристикой теплоносителя.

**Число Грасгофа** характеризует относительную эффективность подъёмной силы, вызывающей свободно-конвективное движение среды

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T l^3}{\nu^2}, \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup> ;

$\beta$  – температурный коэффициент объёмного расширения среды, 1/К (для газов  $\beta = 1/T_{ж}$ ) ;

$\Delta T = T_c - T_{ж}$  – характерный температурный напор, К;

$d$  – диаметр трубы, м;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости (выбирается в зависимости от температуры жидкости по соответствующим таблицам, например, для воздуха по таблице 1), м<sup>2</sup>/с.

Таблица 1 – Физические параметры воздуха при  $p = 760$  мм рт.ст.

$t$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , Дж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
0	1,293	1005	0,0244	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1005	0,0259	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1005	0,0261	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1005	0,0267	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1005	0,0276	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1005	0,0283	19,6	17,95	0,698

При естественной (свободной) конвекции газа, исследуемой в данной лабораторной работе, определяющими числами (критериями) подобия являются числа Грасгофа и Прандтля и общее критериальное уравнение (2) принимает упрощённый вид:

$$Nu = f(Gr, Pr).$$

Для газов  $Pr \cong \text{const}$  и тогда эту зависимость можно представить в виде

$$Nu = C Gr^n. \quad (6)$$

Постоянные  $C$  и  $n$  являются искомыми величинами в этом уравнении при выполнении данной лабораторной работы.

**Тепловое излучение.** Тепловое излучение представляет собой процесс переноса тепла (хаотического движения) с помощью электромагнитных волн. Тепловое излучение свойственно всем телам, и каждое из них не только непрерывно излучает электромагнитные волны, но и непрерывно поглощает их.

Излучение, которое определяется природой данного тела и его температурой, называется *собственным излучением*. Согласно закону Стефана-Больцмана поверхностная плотность потока собственного излучения тела пропорциональна четвертой степени его температуры

$$\varphi_{л} = \varepsilon C_0 (T / 100)^4, \quad (7)$$

где  $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – излучательная способность чёрного тела, которое поглощает всю падающую на него лучистую энергию и воспринимается зрением как черное тело;

$\varepsilon = \varphi_{\text{л}} / \varphi_0$  - степень черноты – отношение плотности потока собственного излучения  $\varphi_{\text{л}}$  тела к плотности потока излучения черного тела  $\varphi_0$  при той же температуре ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ).

Поверхностная плотность теплового потока излучением тела с температурой  $T_1$ , в окружающую среду с температурой  $T_2$  определяется по формуле

$$\varphi_{\text{л}} = \varepsilon C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]. \quad (8)$$

Методика опытного определения коэффициента теплоотдачи и постоянных  $C$  и  $n$  критериального уравнения (6)

В условиях опыта тепловое движение, рассеиваемое нагревателем, передаётся боковой поверхности горизонтального цилиндра и далее в окружающее пространство путём теплового излучения, свободной конвекцией и теплопроводностью.

Суммарный тепловой поток равен мощности электронагревателя

$$\Phi = P_{\text{эл}}, \text{ Вт.}$$

Суммарная плотность теплового потока  $\varphi$  складывается из плотности теплового потока излучением  $\varphi_{\text{л}}$  и плотности теплового потока, характеризующего интенсивность конвективного теплообмена (конвекции совместно с теплопроводностью)  $\varphi_{\text{к}}$ :

$$\varphi = \Phi/A = \varphi_{\text{л}} + \varphi_{\text{к}}. \quad (9)$$

Плотность теплового потока излучением определяется по формуле (8), которая для нашего случая записывается так:

$$\varphi_{\text{л}} = \varepsilon C_0 (T_{\text{с}}^4 - T_{\text{в}}^4) \cdot 10^{-8}, \quad (10)$$

где  $T_{\text{с}}$  и  $T_{\text{в}}$  - температуры соответственно стенки трубы и комнатного воздуха на удалении от трубы.

Плотность теплового потока, характеризующего интенсивность конвективного теплообмена, определяется по формуле

$$\varphi_{\text{к}} = \varphi - \varphi_{\text{л}}. \quad (11)$$

Суммарный коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , коэффициенты теплоотдачи излучением  $\alpha_{\text{л}}$ , и конвективным теплообменом  $\alpha_{\text{к}}$  определяются по формулам:

$$\alpha = \varphi / (T_{\text{с}} - T_{\text{в}}); \quad (12)$$

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{\varphi_{\text{л}}}{(T_{\text{с}} - T_{\text{в}})}; \quad (13)$$

$$\alpha_{\text{к}} = \alpha - \alpha_{\text{л}}. \quad (14)$$

Для определения постоянных  $C$  и  $n$  в уравнении (6) вычисляются значения критериев Нуссельта и Грасгофа. Затем по найденным значениям этих критериев строится график в логарифмических координатах  $\ln \text{Nu} = f(\ln \text{Gr})$ . В этих координатах опытные данные описываются прямолинейной зависимостью вида  $\ln \text{Nu} = \ln C + n \ln \text{Gr}$ . Значение  $n$  в этом уравнении характеризует угловой коэффициент (тангенс наклона) прямой на графике. Взяв на этой прямой две какие-

либо произвольные точки с координатами  $\ln Nu_1$ ,  $\ln Gr_1$  и  $\ln Nu_2$ ,  $\ln Gr_2$ , можно вычислить угловой коэффициент (рисунок 1):

$$n = \frac{\ln Nu_2 - \ln Nu_1}{\ln Gr_2 - \ln Gr_1} \quad (15)$$

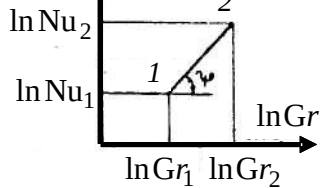


Рисунок 1

Используя уравнение (6), можно найти постоянную

$$C = Nu_1 / Gr_1^n \quad (16)$$

Подставляя найденные значения  $C$  и  $n$  в уравнение (6), получим конкретный вид критериального уравнения для горизонтальной трубы при свободной конвекции в неограниченном пространстве.

### Описание лабораторной установки

Установка состоит из горизонтального цилиндра 1 из фарфора с вмонтированным в него нагревателем 2. Мощность нагревателя измеряется ваттметром 3 и может регулироваться с помощью автотрансформатора 4. Для измерения средней температуры стенки трубы на ее поверхности установлены горячие спаи термопар 5. Значение температур измеряются с помощью милливольтметра 6, который поочередно подключается к каждой термопаре с помощью переключателя 7. Температура воздуха измеряется термометром 8, который должен быть расположен на расстоянии не менее одного метра от трубы.

Выход установки на стационарный тепловой режим определяется по температурным кривым разгона, регистрируемых потенциометром 9.

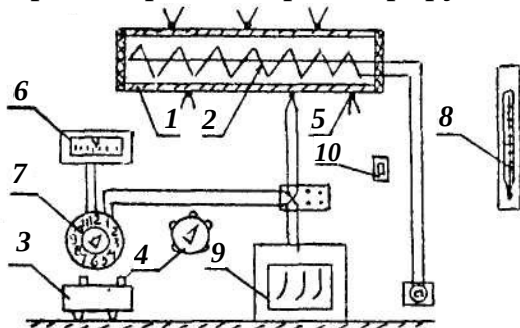


Рисунок 2

### Порядок выполнения работы

1 Вставить вилку электронагревателя в розетку, включить автоматический выключатель и потенциометр.

2 Вращая ручку автотрансформатора 4, установить по ваттметру 3 мощность нагревателя  $P_{эл} = 100$  Вт.

3 Дождаться наступления стационарного теплового режима, о наступлении которого можно судить по появлению вертикальных линий на диаграмме потенциометра (температура перестаёт изменяться через 15 – 20 минут).

4 Во время опыта измерить:

а) тепловой поток  $\Phi$ , равный мощности нагревателя  $P$ , Вт;

б) температуру воздуха  $t_b$ , °С;

в) температуры отдельных участков трубы  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ , °С, с помощью милливольтметра 6, подключаемого к соответствующим термопарам переключателем 7.

5 Повторить пункты 2–4 для мощностей нагревателя 200 и 300 Вт.

6 При обработке результатов опыта вычислить:

а) среднюю температуру стенки трубы:

$$t_c = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6) / 6 \text{ и } T_c = t_c + 273,15 \text{ К};$$

б) суммарный тепловой поток через единицу площади по формуле

$$\varphi = \Phi / A,$$

где  $A = \pi d l$  – площадь боковой поверхности цилиндра диаметром  $d = 0,022$  м и длиной  $l = 0,75$  м<sup>2</sup>.

в) плотность теплового потока излучением по формуле (10), приняв степень черноты фарфора  $\varepsilon = 0,92$ .

г) плотность теплового потока, характеризующего интенсивность конвективного теплообмена, по формуле (11);

д) коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$ ,  $\alpha_l$  и  $\alpha_k$  по формулам (12) – (14);

е) числа подобия Нуссельта и Грасгофа по формулам (3) и (5)

где  $T_{ж} = T_b$ ; температурный коэффициент объемного расширения воздуха,  $\beta = 1 / T_b$ ; кинематическая вязкость воздуха  $\nu$  берется из таблицы (1) по температуре воздуха;

ж) показатель степени  $n$  и коэффициент  $C$  по формулам (15) и (16);

з) получить критериальное уравнение для рассматриваемого случая теплообмена путём подстановки в уравнение (6) числовых значений  $C$  и  $n$ .

7 Результаты измерений и расчётов занести в таблицу 2.

Таблица 2 – К расчёту теплоотдачи горизонтальной трубы при естественной конвекции

$\Phi = P$ , Вт	$t_b$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_c$	$T_c$	$\alpha$	$\alpha_l$	$\alpha$	$\alpha_l$	$\alpha_k$	Nu	Gr	C	n	$\beta$ , %	
	°С								К	Вт/м <sup>2</sup>	Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )									
100																				
200																				
300																				

8 Построить график зависимости  $\ln Nu = f(\ln Gr)$

9 Определит погрешность измерений суммарного коэффициента теплоотдачи

$$\varepsilon_n(\alpha) = \left[ \frac{\Delta \Phi}{\Phi} + \frac{\Delta T_c + \Delta T_b}{T_c - T_b} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta l}{l} \right] \cdot 100\%.$$

Абсолютные погрешности измерения диаметра принять  $\Delta d = 1$  мм, а длины  $\Delta l = 5$  мм. Абсолютные погрешности измерения температуры и мощности вы-

числить по формуле

$$\Delta_{\text{п}}(A) = K \cdot A_{\text{ном}} / 100$$

в соответствии с классом точности  $K$  приборов.

### Отчет о работе

Отчет о работе должен содержать наименование и цель работы, краткое описание методики экспериментального определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , схему лабораторной установки, таблицу и необходимые расчеты, графики зависимости  $\ln \text{Nu} = f(\ln \text{Gr})$ .

### Контрольные вопросы

- 1 Что понимается под сложным теплообменом?
- 2 Конвективный теплообмен. Уравнение Ньютона-Рихмана.
- 3 Что такое коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и от каких факторов он зависит?
- 4 Критериальное уравнение для естественной конвекции в неограниченном пространстве.
- 5 Критерии Рейнольдса, Нуссельта, Грасгофа и Прандтля.
- 6 Теплообмен излучением. Уравнение Стефана-Больцмана.
- 7 Формула расчёта плотности теплового потока, излучаемого телом в окружающее пространство.
- 8 Как в работе определялись постоянные критериального уравнения  $C$  и  $n$ ?

## Лабораторная работа № 6

### Исследование теплообмена в рекуперативном теплообменнике

**Цель работы.** Изучение методики опытного определения коэффициента теплопередачи рекуперативного теплообменника и углубление знаний по теории теплообмена и теплообменным аппаратам.

#### Вводная часть

**Теплопередача.** Наиболее общим случаем теплообмена является перенос тепла (хаотического движения) от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку. В зависимости от того, где рассматривается процесс переноса движения (от способа расчета), различают *теплоотдачу*, *теплопроводность* и *теплопередачу*.

*Теплоотдачей* называется процесс переноса тепла от жидкости к стенке или от стенки к жидкости (процессы 1-2 и 3-4 на рисунке). Иначе, теплоотдачей называется процесс конвективного теплообмена между жидкой средой и стенкой.

При установившемся тепловом состоянии тепловые потоки от горячего теплоносителя к стенке  $\Phi_{1-2}$  и от стенки к холодному теплоносителю  $\Phi_{3-4}$  равны и определяются по формуле Ньютона-Рихмана:

$$\Phi = \Phi_{12} = \alpha_1(T_{ж1} - T_{c1})A, \quad (1)$$

$$\Phi = \Phi_{34} = \alpha_2(T_{c2} - T_{ж2})A, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно со стороны горячего и холодного теплоносителей;  $A$  – площадь поверхности теплообмена;  $T_{ж1}$  и  $T_{ж2}$  – температуры горячего и холодного теплоносителей;  $T_{c1}$  и  $T_{c2}$  – температуры стенки со стороны горячего и холодного теплоносителей.

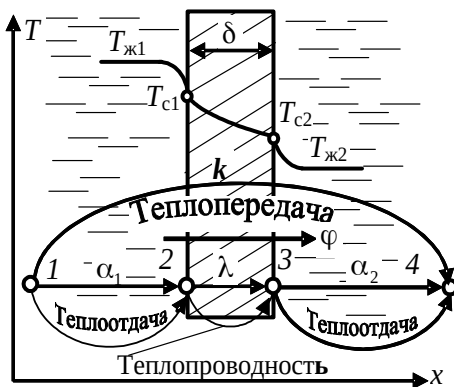


Рисунок 14.1 – К расчёту теплопередачи через плоскую стенку

Процесс передачи тепла по самой стенке (процесс 2-3) называется *теплопроводностью*. Уравнение теплопроводности для плоской стенки имеет вид

$$\Phi = \Phi_{23} = (\lambda/\delta)(T_{c1} - T_{c2})A, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность материала стенки;  $\delta$  – толщина стенки.

*Теплопередачей* называется процесс переноса тепла от горячего теплоносителя к холодному через стенку – процесс 1-4 на рисунке. Процесс теплопередачи включает в себя процессы теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке 1-2, теплопроводности по самой стенке 2-3 и теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю 3-4.

Тепловой поток при теплопередаче, Вт,

$$\Phi = k(T_{ж1} - T_{ж2})A, \quad (4)$$

где  $k = 1/(1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2)$  – коэффициент теплопередачи для плоской стенки, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коэффициент теплопередачи  $k$  является лишь количественной, чисто расчетной характеристикой процесса теплопередачи. Физическая сторона сложного процесса теплопередачи всецело определяется явлениями теплопроводности, конвекции и теплового излучения. Взаимная связь между коэффициентом теплопередачи и коэффициентами теплопроводности и теплоотдачи зависит от формы стенок (плоская, цилиндрическая, шаровая, ребристая), разделяющих горячую и холодную жидкости.

*Теплообменным аппаратом (теплообменником)* называется устройство, предназначенное для осуществления теплообмена между теплоносителями или между теплоносителями и твёрдыми телами (стенкой, насадкой). По принципу действия их делят на рекуперативные, регенеративные и смешительные, а также теплообменники с внутренними источниками тепла.

*Рекуперативными* называются такие аппараты, в которых тепло от горячего теплоносителя к холодному передается через разделяющую их стенку (радиаторы отопления, парогенераторы, подогреватели и т. д.).

*Регенеративными* называются такие аппараты, в которых одна и та же поверхность нагрева поочередно омывается то горячим, то холодным теплоносителями (регенераторы мартеновских и стеклоплавильных печей).

В смешительных аппаратах процесс теплообмена происходит путем непосредственного соприкосновения и смешения горячего и холодного теплоносителей (градирни, скрубберы и др.).

**Тепловой расчёт** теплообменных аппаратов сводится к совместному решению уравнений теплового баланса и теплопередачи. Согласно уравнению теплового баланса при отсутствии тепловых потерь тепловой поток, отдаваемый горячим теплоносителем  $\Phi_1$  равен тепловому потоку, воспринимаемому холодным теплоносителем  $\Phi_2$ :

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi. \quad (5)$$

Процесс течения жидкости в трубах теплообменников близок к изобарическому (падение давления из-за гидравлического сопротивления мало по сравнению с самим давлением), поэтому подведенную к малому элементу потока массой  $\delta m$  за время  $dt$  теплоту можно определить в соответствии с первым законом термодинамики (2.61) как изменение энтальпии:

$$\delta^2 Q = d^2 H = \delta m dh.$$

Разделив обе части этого уравнения на промежуток времени  $dt$ , найдем элементарный тепловой поток  $\delta\Phi$ :

$$\delta\Phi = \delta(\delta Q/dt) = (\delta m/dt) dh = \dot{m} dh, \quad (6)$$

где  $\dot{m} = \delta m/dt$  – массовый расход теплоносителя, кг/с.

Если теплоноситель не изменяет своего фазового состояния (не кипит и не конденсируется) в процессе теплообмена, то теплоту и тепловой поток можно определить по формуле (6), выразив  $dh = c_p dt$ ,

$$\delta\Phi = \dot{m} c_p dt.$$

Интегрируя это уравнение, получим формулы для расчета тепловых потоков от горячего теплоносителя

$$\Phi_1 = c_{p1} \dot{m}_1 (T_1^{\text{н}} - T_1^{\text{к}}) \quad (7)$$

и к холодному теплоносителю

$$\Phi_2 = c_{p2} \dot{m}_2 (T_2^{\text{III}} - T_2) \quad (8)$$

где  $\dot{m}_1 = \rho_1 c_1 A_1$  и  $\dot{m}_2 = \rho_2 c_2 A_2$  – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с;  $c_1$  и  $c_2$  – скорости течения теплоносителей в соответствующем сечении канала;  $A_1$  и  $A_2$  – площади поперечного сечения каналов.

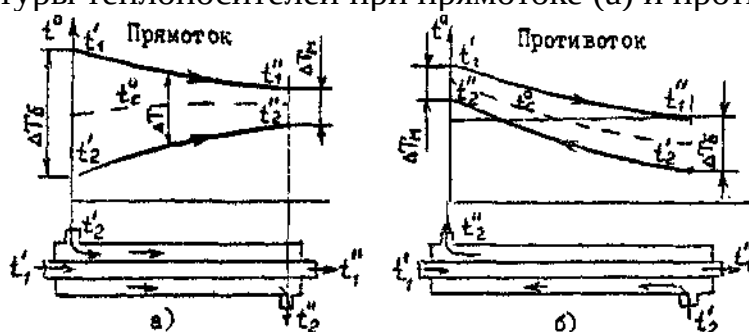
Здесь и в дальнейшем индекс "1" означает, что данная величина отнесена к горячей жидкости, а индекс "2" – к холодной. Величины с одним штрихом характеризуют состояние теплоносителя на входе в теплообменник, а величины с двумя штрихами – на выходе из теплообменника.

Вторым основным уравнением при расчете теплообменных аппаратов является уравнение теплопередачи

$$\Phi = k (T_1 - T_2) A = k \Delta \bar{T} A, \quad (9)$$

$k$  – коэффициент теплопередачи (обычно берётся для плоской стенки);  $\Delta \bar{T}$  – средний температурный напор между горячим и холодным теплоносителями.

Характер изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена определяется схемой движения их. В зависимости от схемы движения теплоносителей различают теплообменные аппараты прямого тока (прямоточные), противоточные, перекрестного тока и смешанного тока. На рисунке приведены схемы простейшего теплообменника типа "труба в трубе" и характер изменения температуры теплоносителей при прямотоке (а) и противотоке (б).



Из рассмотрения графиков следует, что при прямотоке конечная температура холодной жидкости  $T_2''$  всегда ниже конечной температуры горячей жидкости  $T_1''$ . При противотоке же конечная температура холодной жидкости  $T_2''$  может быть выше конечной температуры горячей  $T_1''$ . Следовательно, при одной и той же начальной температуре холодной жидкости при противотоке её можно нагреть до более высокой температуры, чем при прямотоке. Среднее значение температурного напора при противотоке больше, чем при прямотоке. За счет этого фактора при противотоке теплообменник получается компактнее. Однако, если изменение температуры  $\delta T$  одного из теплоносителей мало по сравнению с другим или температурный напор  $\Delta T$  велик по сравнению с изменением температуры теплоносителя, то прямоточная и противоточная схемы будут равноценны (при  $\delta T / \Delta T < 0,5$  при противотоке будет передаваться теплоты больше, чем при прямотоке, менее чем на 10 %).

Положительной стороной прямотока является то, что при прочих равных условиях максимальная температура стенки при прямотоке ниже, чем при противотоке (пунктирная линия на рисунке). Это позволяет применять рекуператор из обыкновенной стали даже при сравнительно высоких температурах дымовых газов (800 – 850 °С) и температуре нагретого воздуха 350 – 400 °С.



Как видно из рисунка, температурный напор  $\Delta\bar{T} = T_{ж1} - T_{ж2}$  непрерывно изменяется вдоль поверхности теплообмена. Для расчета теплопередачи надо знать среднее значение температурного напора  $\Delta\bar{T}$ . В общем случае температурный напор вдоль поверхности теплообмена изменяется по экспоненциальному закону. В этом случае средний температурный напор определяется по формуле

$$\Delta\bar{T} = \frac{\Delta T_6 - \Delta T_M}{\ln \frac{\Delta T_6}{\Delta T_M}} \quad (10)$$

и называется *среднелогарифмическим*.

Если предположить, что температура теплоносителей линейно изменяется вдоль поверхности теплообмена, то средний температурный напор можно определить как *среднеарифметическое* значение большего  $\Delta T_6$  и меньшего  $\Delta T_M$  температурных напоров

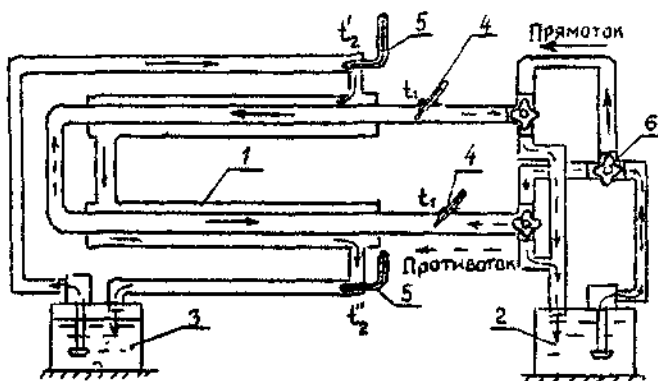
$$\Delta\bar{T} = (\Delta T_6 + \Delta T_M) / 2. \quad (11)$$

Среднеарифметическое значение температурного напора всегда больше среднелогарифмического. Но при  $\Delta T_M / \Delta T_6 < 0,6$  они отличаются друг от друга меньше чем на 3 %.

#### Описание лабораторной установки

Установка состоит из рекуперативного теплообменника типа "труба в трубе" (рис. 3.7). По внутренней трубе теплообменника движется горячая вода, подаваемая насосом термостата 2, а по внешней трубе – холодная вода, подаваемая насосом термостата 3.

Температуры теплоносителей на входе и выходе из теплообменника измеряются с помощью термометров 4 горячего и 5 холодного теплоносителей. Массовые расходы теплоносителей определяются объемным методом. Переключение схемы теплообменника о прямоточной на противоточную осуществляется трехходовыми кранами 6.



#### Порядок выполнения работы

- 1 С помощью кранов 6 включить теплообменник по прямоточной схеме.
- 2 Включить электронагреватель термостата 2 и циркуляционные насосы термостатов 2 и 3 (вода в термостатах должна быть налита до самого верха).
- 3 Дождаться наступления стационарного теплового режима о достижении которого можно судить по миганию лампочки термостата 2, отрегулированного

на предельную температуру 70 °С, и повышению температуры горячего теплоносителя при выходе его из теплообменника более 52 °С.

4 Во время опыта измерить:

а) время наполнения мерной емкости объемом 0,5 л (масса воды  $m = 0,5$  кг) горячим теплоносителем  $\tau_1$  и холодным теплоносителем  $\tau_2$ , с;

б) температуры горячего  $t_1'$ ,  $t_1''$  и холодного  $t_2'$ ,  $t_2''$  теплоносителей.

5 С помощью кранов включить теплообменник по противоточной схеме и дождаться наступления стационарного теплового режима. Повторить пункт 4.

6 При обработке результатов опыта вычислить:

а) массовые расходы теплоносителей  $\dot{m}_1 = m/\tau_1$ ,  $\dot{m}_2 = m/\tau_2$ ;

б) тепловой поток отдаваемый горячим теплоносителем  $\Phi_1 = c_{p1}\dot{m}_1(T_1'' - T_1')$  и получаемый холодным теплоносителем  $\Phi_2 = c_{p2}\dot{m}_2(T_2'' - T_2')$ , Вт,

(удельную теплоемкость воды принять  $c_p = 4187$  Дж/(кг·К));

в) в соответствии с температурными кривыми вычислить больший  $\Delta T_6$  и меньший  $\Delta T_M$  температурные напоры;

г) среднелогарифмический температурный напор по (3.32);

д) коэффициент теплопередачи  $k = \Phi/(A\Delta T)$ ,

где  $A = 0,045$  м<sup>2</sup> – площадь поверхности теплообмена.

7 Вычислить предельную относительную погрешность измерения  $k$

$$\varepsilon_{\Pi}(k) = \left\{ \frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta l}{l} + 2\frac{\delta T}{(T_1' - T_1'')} + \frac{4\delta T}{(\Delta T_6 - \Delta T_M)} + \frac{4\delta T}{[\Delta T_M \ln(\Delta T_6/\Delta T_M)]} \right\} 100'$$

где  $\Delta \dot{m}$ ,  $\Delta d$ ,  $\Delta l$  и  $\delta T$  – абсолютные погрешности при измерении расхода, диаметра, длины и температуры (см. раздел 1.2).

8. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 1.

Таблица 1

Схема движения теплоносителей	$t_1'$	$t_1''$	$t_2'$	$t_2''$	$\Delta T_6$	$\Delta T_M$	$\Delta T$	$\tau_1$	$\tau_2$	$\dot{m}_1$	$\dot{m}_2$	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\varepsilon$ , %
	°С							с		кг/с		Вт			
Прямоток															
Противоток															

9.

## Отчёт о работе

Отчет о работе должен содержать наименование и цель работы, схему установки, основные расчетные формулы, таблицу и графики изменения температуры теплоносителей при прямотоке и противотоке, сравнение прямотока и противотока.

### Контрольные вопросы

- 1 Из каких процессов состоит процесс теплообмена между двумя жидкостями, разделенными твердой стенкой?
- 2 Формула расчета коэффициента теплопередачи для плоской стенки.
- 3 Типы теплообменных аппаратов.
- 4 Как рассчитываются тепловые потоки при расчете теплообменных аппаратов.
- 5 Уравнение теплопередачи.
- 6 Что такое средний температурный напор  $\Delta T$ ?
- 7 Кривые изменения температуры теплоносителей при прямотоке и противотоке.
- 8 Сравнение прямотока и противотока.
- 9 Методика экспериментального определения коэффициента теплопередачи рекуперативного теплообменника.

### Литература

1. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов по специальности "Автоматизация теплоэнергетических процессов". – М.: Энергия, 1978. - 704 с; ил.
2. Общая теплотехника: Лабораторный практикум /Под ред. А.И. Вейника. – Минск: Вышш.школа, 1965. – 132 с: ил.
3. Зубарев В.Н. и др. Практикум по технической термодинамике: Учеб.пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 304 с; ил,
4. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче: Уче.пособие для энергомашиностроит. спец.вузов /Под ред. В.И. Крутова, Е.В.Шишова. – М.: Выст.шк., 1988. – 216 с: ил.
5. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена: Учеб.пособие для вузов. – М.: Энергия, 1979. – 320 с: ил.
6. Практикум по теплопередаче: Учеб. пособие для вузов /Под ред. А.П. Солодова. – М.: Энергоатомиздат, 1966. – 296 с: ил.
7. Техническая термодинамика: Учеб. для вузов /Под ред. В.И. Крутова. – М.: Вышш. шк., 1981. – 439 с: ил.
8. Исаченко В.П. и др. Теплопередача: Учеб. для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с: ил.