



Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Методические указания

**СБОРНИК ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО КУРСУ «ТЕРМОДИНАМИКА»**

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

СБОРНИК ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО КУРСУ «ТЕРМОДИНАМИКА»

Под редакцией *В.И. Хвостова, Ю.М. Гришина*

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2012

УДК 536.7
ББК 22.317
С23

Авторы: *В.Н. Афанасьев, Ю.М. Гришин,
А.В. Ковалев, А.Ю. Кулагин, И.Б. Павлова, Н.А. Россихин*

Рецензент *Н.П. Козлов*

Сборник лабораторных работ по курсу «Термодинамика» : метод. указания / В.Н. Афанасьев, Ю.М. Гришин, А.В. Ковалев и др. ; под ред. В.И. Хвостова, Ю.М. Гришина. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 67, [5] с. : ил.

Приведены краткие теоретические сведения, описания лабораторных установок, порядок выполнения лабораторных работ, контрольные вопросы, а также список рекомендуемой литературы.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих курс «Термодинамика».

Рекомендовано Учебно-методической комиссией НУК Э МГТУ им. Н.Э. Баумана.

УДК 536.7
ББК 22.317

РАБОТА ТД-01 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы – экспериментальное определение средней массовой теплоемкости воздуха при постоянном давлении в диапазоне значений температуры 20...60 °С калориметрическим методом.

Продолжительность работы – 4 ч.

Краткие теоретические сведения

Для вычисления количества теплоты, подводимой (или отводимой от тела) к телу, используется теплоемкость.

Истинной полной теплоемкостью тела (C , Дж/К) массой m (содержащего X моль вещества) называется отношение элементарного количества теплоты δQ , полученной телом в бесконечно малом процессе, к вызванному бесконечно малому изменению температуры dT :

$$C = \frac{\delta Q}{dT}.$$

Теплоемкость однородного вещества пропорциональна его массе m или X моль, содержащимся в данном теле. Поэтому наряду с истинной полной теплоемкостью тела вводят истинные удельные теплоемкости (далее – удельная теплоемкость):

- удельную массовую теплоемкость C_m (Дж/(кг · К)):

$$C_m = \frac{C}{m} = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{Q}{m} \right);$$

- удельную мольную теплоемкость μC (Дж/(кмоль · К)):

$$\mu C = \frac{C}{X} = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{Q}{X} \right).$$

Так как количество переданной телу теплоты, приводящей к соответствующему изменению температуры тела, зависит от характера процесса, то теплоемкость тела различна для разных процессов, т. е. является функцией процесса и может изменяться в диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$. Теплоемкость любого вещества в адиабатном процессе ($\delta Q = 0$) равна нулю, а теплоемкость в изотермическом процессе ($dT = 0$) формально равна $\pm\infty$.

Среди различных теплоемкостей особое место занимают теплоемкости при постоянных значениях давления $p = \text{const}$ или объема $V = \text{const}$:

$$\begin{cases} C_p = (\partial Q / \partial T)_p = (\partial H / \partial T)_p; \\ C_V = (\partial Q / \partial T)_V = (\partial U / \partial T)_V, \end{cases}$$

где H и U – соответственно энтальпия и внутренняя энергия вещества.

Теплоемкости C_p и C_V являются функциями состояния вещества и всегда положительны. При известных калорическом $U = U(V, T)$ и термическом $p = p(V, T)$ уравнениях состояния вещества соотношение

$$C_p = C_V + \left[p + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (1.1)$$

позволяет установить связь между теплоемкостями C_p и C_V . В частности, для идеального газа, для которого $U = U(T)$ и $pV = mRT$, формула (1.1) может быть записана в виде соотношения Майера:

для полных теплоемкостей –

$$C_p = C_V + mR,$$

для удельных теплоемкостей –

$$\begin{cases} C_{pm} = C_{Vm} + R; \\ \mu C_p = \mu C_V + R_0, \end{cases}$$

где $R = R_0 / \mu$ кДж/(кг · К) – индивидуальная газовая постоянная газа с молярной массой μ , кг/кмоль; $R_0 = 8,314$ кДж/(кмоль · К) – универсальная газовая постоянная.

Теплоемкости C_p и C_V зависят от термодинамических параметров, и прежде всего от температуры. Для идеальных газов в области температур $300 \text{ К} < T < 600 \text{ К}$ (когда можно пренебречь энергией электронного возбуждения и колебательного движения молекул газа) можно считать теплоемкости газов μC_p и μC_V постоянными и вычислять их по формулам, полученным методами статистической физики:

$$\begin{cases} \mu C_p = \frac{i+2}{2} R_0; \\ \mu C_V = \frac{i}{2} R_0, \end{cases} \quad (1.2)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа в поступательном и вращательном движениях ($i=3$ – для одноатомной молекулы, $i=5$ – для двухатомной).

В инженерной практике тепловых расчетов используют среднюю теплоемкость \bar{C} , равную отношению количества теплоты Q к изменению температуры $\Delta T = T_2 - T_1$ в данном процессе:

$$\bar{C} = \frac{Q}{T_2 - T_1}. \quad (1.3)$$

Связь между истинной и средней теплоемкостями выражается в виде

$$\bar{C} = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} C(T) dT. \quad (1.4)$$

Теплоемкость, определяемую формулами (1.3) и (1.4), называют среднеинтегральной теплоемкостью в интервале температур $T_1 \dots T_2$ (чтобы подчеркнуть это, иногда применяют обозначение $\bar{C}_{T_1}^{T_2}$).

Калориметрический метод определения теплоемкости газов и паров

Теплоемкость вещества, как правило, определяют калориметрическим методом, суть которого заключается в вычислении количества теплоты, подводимой к веществу (количество вещества должно быть известно), и в измерении его температуры. Во многих случаях при проведении калориметрических экспериментов подвод теплоты осуществляют с помощью электрического нагревателя, а количество выделяемой теплоты рассчитывают по закону Джоуля. Для определения теплоемкости газов и паров применяют так называемые проточные калориметры, через которые исследуемое вещество непрерывно прокачивают с постоянным расходом. При этом в силу малости гидравлических потерь давление текущего газа можно считать постоянным, а следовательно, подвод теплоты к газу в такой системе будет происходить при условии $p = \text{const}$.

При экспериментальном определении средней массовой изобарной теплоемкости воздуха в общем случае следует пользоваться формулой

$$\bar{C}_{pm} = \frac{P_{\text{эл}} \tau - Q_{\text{п}} - Q_{\text{кал}}}{m[(t_2 - t_1) - \Delta t_{\Gamma}]}, \quad (1.5)$$

где $P_{\text{эл}}$ – электрическая мощность нагревателя калориметра, Вт; τ – время, с; $Q_{\text{п}}$ – потери теплоты в окружающую среду, Дж; $Q_{\text{кал}}$ – теплота, идущая на нагрев деталей калориметра, Дж; m – масса исследуемого вещества, кг; t_1 – температура* на входе в калориметр, °С; t_2 – температура на выходе из калориметра, °С; Δt_{Γ} – изменение температуры газа в результате дросселирования, °С.

При работе с проточным калориметром измерения можно организовать так, что подведенная теплота не будет расходоваться на нагрев деталей калориметра и теплота $Q_{\text{кал}}$ будет равна нулю. Для

* Здесь и далее измерение температуры в градусах Цельсия связано с тем, что измерительные приборы на экспериментальных стендах градуированы в градусах Цельсия.

этого необходимо после включения нагревателя дождаться установления стационарного состояния, при котором становится неизменной температура t_2 на выходе из калориметра. Это будет означать, что детали калориметра полностью прогреты и подводимая теплота расходуется на нагрев поступающего в калориметр вещества и окружающей среды.

Потерями теплоты в окружающую среду $Q_{\text{п}}$ в данном экспериментальном исследовании можно пренебречь, так как конструкция используемого проточного калориметра выполнена по принципу самоулавливания потерь теплоты. В таком калориметре (рис. 1.1) только небольшая внутренняя часть калориметра имеет более высокую температуру, а температура его корпуса близка к температуре окружающей среды, что и является причиной значительного снижения потерь теплоты.

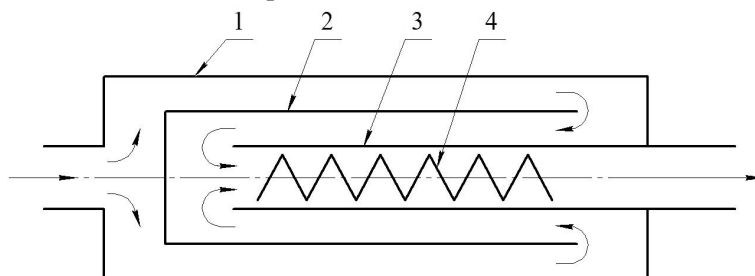


Рис. 1.1. Схема калориметра:

1 – корпус калориметра; 2 – стенки внутренних каналов многоходового теплообменника-калориметра; 3 – стеклянная трубка; 4 – электрический нагреватель

Значением Δt_r в формуле (1.5) можно также пренебречь, так как падение давления воздуха в пределах калориметра пренебрежимо мало. Кроме того, при атмосферном давлении воздух по своим свойствам близок к идеальному газу, для которого дроссель-эффект равен нулю.

Следовательно, для вычисления средней массовой теплоемкости воздуха при постоянном давлении формулу (1.5) упрощают и записывают в виде

$$\bar{C}_{pm} = \frac{P_{\text{эл}}}{G(t_2 - t_1)}, \quad (1.6)$$

где $G = m/\tau$ – расход воздуха, проходящего через калориметр, кг/с.

Описание экспериментальной установки

Рабочий участок экспериментальной установки представляет собой проточный калориметр (см. рис. 1.1), в котором используется принцип самоулавливания потерь теплоты. Электрический нагреватель размещен в центральной стеклянной трубке. Поток воздуха во внешних каналах многоходового теплообменника, которым является калориметр, служит для создания адиабатных условий. Напряжение электрического тока, подводимого к нагревателю, регулируется и измеряется блоком контроля мощности, состоящим из автотрансформатора и цифрового комбинированного прибора Ц4314.

Температура воздуха на входе в калориметр измеряется хромель-копелевой термопарой (ТХК). Разность значений температуры на выходе из калориметра и на его входе измеряется трехспайной дифференциальной термопарой ТХК. Температура регистрируется блоком контроля температуры, состоящим из переключателя и милливольтметра МВУ6-41А.

Движение воздуха через калориметр осуществляется за счет разрежения, создаваемого вакуум-насосом ВН-46М. Расход воздуха регулируется вентилем. Расход воздуха через проточный калориметр измеряется блоком контроля расхода, состоящим из электрического мембранного дифференциального манометра ДМ-Э2 РЗ, миллиамперметра постоянного тока М731А и нестандартной диафрагмы.

Порядок проведения эксперимента

1. Включить электропитание установки (загорится лампа «Сеть») на левой стойке стола экспериментальной установки, затем включить вакуум-насос, нажав красную кнопку на панели блока контроля расхода (загорится лампа «Обдув»). Открыть вентиль трубопровода, вывести ручку автотрансформатора на панели блока контроля мощности против хода часовой стрелки до упора и включить нагреватель (загорится лампа «Нагрев»).

2. Ручкой автотрансформатора установить напряжение электрического тока, подводимого к нагревателю, $U_{\text{наг}} \approx 45 \text{ В}$; вентилем установить расход воздуха, проходящего через калориметр, приближенно равным 70 делениям шкалы миллиамперметра блока контроля расхода воздуха. Дождаться установления стационарного

режима, характеризующегося неизменными показаниями приборов, регистрирующих расход, разность значений температуры и напряжение, подаваемое на нагреватель, и перейти к записи показаний приборов.

3. С помощью цифрового прибора блока контроля мощности измерить падение напряжения на нагревателе, по шкале милливольтметра блока контроля температуры определить температуру на входе в калориметр и зарегистрировать показания дифференциальной термопары, а также показания миллиамперметра блока контроля расхода.

4. Провести аналогичные измерения в соответствии с п. 3 для расхода воздуха, соответствующего 90 и 110 делениям шкалы миллиамперметра блока контроля расхода. Повторить серию измерений при $U_{\text{наг}} \approx 55$ В для трех значений расхода воздуха: 70; 90; 110. То есть эксперимент состоит из шести опытов (режимов).

5. Измерить барометром давление окружающей среды.

6. Результаты измерений записать в журнал наблюдений.

7. По окончании измерений, вращая против хода часовой стрелки ручку автотрансформатора блока контроля мощности, установить напряжение, подаваемое на нагреватель, равным нулю и выключить нагреватель. После того как нагреватель калориметра охладится до температуры окружающей среды, выключить вакуум-насос и закрыть вентиль трубопровода.

Обработка результатов измерений

1. Для каждого из шести режимов по градуировочной характеристике

$$G_{\text{гр}} = 2,40 \cdot 10^{-6} \cdot L + 2,52 \cdot 10^{-4} \quad (1.7)$$

определить массовый расход воздуха $G_{\text{гр}}$, кг/с, проходящего через калориметр, по показаниям миллиамперметра L блока контроля расхода. Определенный расход воздуха соответствует условиям градуировки: $p_{\text{гр}} = 101325$ Па, $t_{\text{гр}} = 20$ °С.

2. Вычислить действительный расход воздуха, соответствующий по условиям эксперимента давлению p и температуре t_1 :

$$G = G_{\text{гр}} \sqrt{\frac{293,15 \cdot p}{101325 \cdot (273,15 + t_1)}}. \quad (1.8)$$

3. Рассчитать электрическую мощность нагревателя калориметра (Вт):

$$P_{\text{эл}} = U_{\text{наг}}^2 / R_{\text{наг}}, \quad (1.9)$$

где $R_{\text{наг}} = (196 \pm 1)$ Ом – сопротивление нагревателя калориметра.

4. Определить разность значений температуры воздуха на выходе из калориметра и на входе в него $t_2 - t_1$. При этом учесть, что показания дифференциальной термопары Δt_2 , °С, соответствуют утроенной разности значений температуры плюс значение температуры окружающей среды. Поэтому $t_2 - t_1 = (\Delta t_2 - t_1) / 3$.

5. Вычислить среднюю изобарную теплоемкость воздуха \bar{C}_{pm} для каждого режима по формуле (1.6).

6. После того как измерена теплоемкость воздуха на всех шести режимах, оценить случайную погрешность измерения. Для этого вычислить среднее арифметическое значение теплоемкости:

$$\langle \bar{C}_{pm} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^6 (\bar{C}_{pm})_i}{6},$$

где i – номер режима. Далее рассчитать среднее квадратичное отклонение теплоемкости:

$$\Delta \bar{C}_{pm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 [(\bar{C}_{pm})_i - \langle \bar{C}_{pm} \rangle]^2}{5}}.$$

В рассматриваемом диапазоне значений температуры теплоемкость воздуха постоянна с точностью до четырех значащих цифр, и найденное среднее квадратичное отклонение теплоемкости можно считать случайной погрешностью измерения.

7. Оценить систематическую (методическую) погрешность измерения.

Максимально возможная относительная погрешность измерения изобарной теплоемкости воздуха при атмосферном давлении в соответствии с расчетной формулой (1.6) составляет

$$\delta \bar{C}_{pm} = \delta P_{эл} + \delta G + \delta(t_2 - t_1) + \frac{\partial \bar{C}_{pm}}{\partial t} \frac{\Delta t_1}{\bar{C}_{pm}}, \quad (1.10)$$

где Δt_1 – абсолютная погрешность измерения температуры.

Так как электрическую мощность нагревателя калориметра определяют по падению напряжения, предельную относительную погрешность измерения электрической мощности вычисляют по следующей формуле:

$$\delta P_{эл} = 2\delta U_{наг} + \delta R_{наг}, \quad (1.11)$$

где $\delta U_{наг}$ – относительная погрешность измерения напряжения (при измерении напряжения переменного тока используемым в работе прибором Щ4314 она составляет 1 %); $\delta R_{наг}$ – относительная погрешность измерения электрического сопротивления нагревателя.

Максимально допустимую относительную погрешность измерения расхода следует вычислять по формуле

$$\delta G = \delta G_{гр} + 0,5\delta_p + 0,5\delta t_1, \quad (1.12)$$

где $\delta G_{гр} = 1\%$ – относительная погрешность градуировки диафрагмы совместно с блоком расхода; δ_p – относительная погрешность определения барометрического давления, измеренного барометром с точностью ± 100 Па; δt_1 – относительная погрешность измерения температуры на входе в калориметр, обусловленная погрешностью градуировки термопары ($\Delta t_1 = \pm 0,2$ К) и погрешностью измерительного прибора.

Погрешность измерения разности значений температуры $t_2 - t_1$ обусловлена погрешностью градуировки трехспайной термопары, которая составляет $\pm 0,6$ °С, и максимально допустимой погрешностью измерительного прибора, которая может быть определена на основании его класса точности (класс точности милливольтметра МВУ6-41А – 1,0).

Ошибка отнесения изобарной теплоемкости воздуха по температуре в пределах ее изменения 0...100 °С составляет:

$$\left(\frac{\partial \bar{C}_{pm}}{\partial t}\right) / \bar{C}_{pm} = 0,000067 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (1.13)$$

Контрольные вопросы

1. Что такое средняя теплоемкость?
2. Что такое истинная полная теплоемкость?
3. Что такое мольная и массовая истинные удельные теплоемкости?
4. Учитываются ли в данной работе потери теплоты из калориметра в окружающую среду? Почему?
5. Как можно повысить точность определения теплоемкости без уменьшения потерь теплоты в окружающую среду?
6. Каким образом измеряется разность значений температуры на входе в калориметр и на выходе из него?
7. Каким образом можно установить, что нагреватель калориметра охладился до температуры окружающей среды?
8. Рассчитайте средние удельные массовую и мольную теплоемкости воздуха при постоянном объеме.
9. Сравните найденную в эксперименте теплоемкость воздуха с рассчитанной по формуле (1.2).

РАБОТА ТД-02
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА
СГОРАНИЯ ВЕЩЕСТВА

Цель работы – экспериментальное определение теплового эффекта сгорания вещества при условии постоянства температуры и объема и расчет теплового эффекта сгорания при условии постоянства температуры и давления.

Продолжительность работы – 4 ч.

Краткие теоретические сведения

Процесс изменения количества веществ в изолированной системе, представляющей смесь различных химических веществ, называют химическим превращением или химической реакцией и записывают в виде уравнения

$$\sum_i \nu_{in} B_{in} = \sum_i \nu_{ik} B_{ik}, \quad (2.1)$$

где B_{in} , B_{ik} – химические символы реагирующих веществ; ν_{in} , ν_{ik} – стехиометрические коэффициенты; индекс «н» относится к начальным (исходным) веществам, символы которых находятся в левой части уравнения (2.1), а индекс «к» – соответственно к конечным веществам (продуктам реакции), указанным в правой части уравнения.

Уравнение (2.1) записывают также в компактной форме:

$$\sum_i \nu_i B_i = 0, \quad (2.2)$$

где суммирование ведется по всем компонентам химически реагирующей системы, B_i – химический символ любого i -го компонента, стехиометрический коэффициент которого считается положи-

тельным ($\nu_i > 0$) для веществ, относящихся к продуктам реакции, и отрицательным ($\nu_i < 0$) для начальных компонентов уравнения химической реакции (2.1).

При химических реакциях изменение количества вещества каждого реагента строго регламентировано и в случае протекания в системе одной химической реакции определяется по формуле

$$\Delta X_i = \nu_i \Delta \xi, \quad (2.3)$$

где $\Delta \xi$ называется мерой химической реакции и указывает величину модуля изменения количества вещества реагента, имеющего единственный (по модулю) стехиометрический коэффициент.

Протекание любого химического процесса сопровождается выделением (экзотермические реакции) или поглощением (эндотермические реакции) теплоты, для определения количества которой используется понятие теплового эффекта.

Количество теплоты, отводимой ($Q < 0$, экзотермические реакции) от химически реагирующей системы или подводимой ($Q > 0$, эндотермические реакции) к ней в условиях неизменности температуры исходных и конечных реагирующих веществ при постоянстве объема ($V = \text{const}$) или давления ($p = \text{const}$) при необратимом протекании химической реакции с образованием определенного количества вещества продуктов называют полным тепловым эффектом.

Согласно первому началу термодинамики при постоянных температуре и объеме полный тепловой эффект Q_{TV} равняется изменению внутренней энергии системы ΔU , т. е.

$$Q_{TV} = \Delta U = \Delta \xi \sum_i \nu_i \tilde{U}_i(T, V), \quad (2.4)$$

при постоянных температуре и давлении полный тепловой эффект Q_{Tp} равняется изменению энтальпии системы ΔH :

$$Q_{Tp} = \Delta H = \Delta \xi \sum_i \nu_i \tilde{H}_i(T, p), \quad (2.5)$$

где $\tilde{U}_i(T, V)$ и $\tilde{H}_i(T, p)$ – соответственно удельные мольные значения внутренней энергии и энтальпии i -го компонента при задан-

ных температуре и объеме (давлении) системы. Соотношения (2.4) и (2.5) являются математическими выражениями закона Гесса, утверждающего, что значения полных тепловых эффектов химической реакции определяются как разности соответствующих функций состояния системы в конце и в начале процесса протекания химической реакции: $\Delta U = U_k - U_n$ и $\Delta H = H_k - H_n$.

Отношения значений полных тепловых эффектов к мере реакции называют удельными мольными тепловыми эффектами и вычисляют по формулам

$$\tilde{Q}_{TV} = Q_{TV} / \Delta \xi = \Delta \tilde{U} = \sum_i \nu_i \tilde{U}_i(T, V); \quad (2.6)$$

$$\tilde{Q}_{Tp} = Q_{Tp} / \Delta \xi = \Delta \tilde{H} = \sum_i \nu_i \tilde{H}_i(T, p). \quad (2.7)$$

В случае если одна часть компонентов находится в жидком или твердом агрегатном состоянии, а другая – в идеальном газе, связь между удельными тепловыми эффектами химической реакции $\Delta \tilde{U}$ и $\Delta \tilde{H}$ определяют по формуле

$$\Delta \tilde{H} = \Delta \tilde{U} + R_0 T \sum_i \nu_{ir}, \quad (2.8)$$

где $R_0 = 8,314$ кДж/(кмоль · К) – универсальная газовая постоянная; ν_{ir} – стехиометрические коэффициенты газообразных компонентов уравнения химической реакции (2.2).

Расчет тепловых эффектов произвольной химической реакции проводится с использованием данных о стандартных тепловых эффектах образования веществ $\Delta \tilde{H}_{298}^0$, которые определяются как тепловые эффекты реакции образования 1 кмоль вещества из его элементов при стандартных условиях: $T = T_0 = 298$ К, $p = p_0 = 0,1012$ МПа. При этом под элементом понимается элементарное вещество, агрегатное и молекулярное состояния которого соответствуют стабильному состоянию при стандартных условиях.

При выборе начала отсчета энтальпий в термодинамике принято считать энтальпии всех элементов равными нулю при стандартных условиях. Так как теплота образования вещества (соединения) представляет собой разность энтальпий вещества и элементов, из

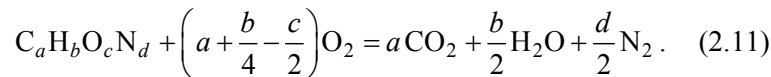
которых оно состоит, а энтальпия элементов равна нулю, то, следовательно, удельная теплота образования вещества $\Delta\tilde{H}_{298,i}^0$ равна энтальпии вещества $\tilde{H}_i(T_0, p_0)$. С учетом сказанного формула (2.7) для расчета удельного теплового эффекта химической реакции (2.2) при стандартных условиях имеет вид

$$\Delta\tilde{H}_{298} = \sum_i \nu_i \Delta\tilde{H}_{298,i}^0. \quad (2.9)$$

Удельный тепловой эффект $\Delta\tilde{U}_{298}$ при постоянных температуре T и объеме V при стандартных условиях может быть определен с учетом формулы (2.8) как

$$\Delta\tilde{U}_{298} = \Delta\tilde{H}_{298} - R_0 T_0 \sum_i \nu_{ir}. \quad (2.10)$$

Горение представляет собой процесс быстрого окисления вещества, сопровождающийся высвобождением значительного количества энергии. Горючими элементами топлив являются углерод, водород и сера. Конденсированные и газообразные органические топлива (углеводороды) представляют собой сложные вещества, состоящие из углерода, водорода, кислорода и азота и описываемые общей формулой $C_a H_b O_c N_d$. При полном сгорании углеводородов в кислороде образуются диоксид углерода и вода в соответствии с реакцией



Тепловые эффекты реакции полного сгорания 1 кмоль топлива при $T, p = \text{const}$ и $T, V = \text{const}$ называются тепловыми эффектами сгорания в кислороде. Удельный тепловой эффект сгорания, соответствующий условиям $T = T_0 = 298 \text{ K}$, $p = p_0 = 0,1012 \text{ МПа}$, называется стандартным тепловым эффектом сгорания $\Delta\tilde{H}_{298}^{\text{cr}}$. С помощью общей формулы (2.9) эффект $\Delta\tilde{H}_{298}^{\text{cr}}$ можно рассчитать, используя стандартные значения теплоты образования компонентов реакции (2.11):

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{H}_{298}^{\text{cr}} &= \sum_i \nu_i \Delta\tilde{H}_{298,i}^0 = \\ &= a \cdot \Delta\tilde{H}_{298,CO_2}^0 + \frac{b}{2} \cdot \Delta\tilde{H}_{298,H_2O}^0 - \Delta\tilde{H}_{298,C_a H_b O_c N_d}^0. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Выражение (2.12) записано с учетом того, что энтальпия образования молекулярного кислорода O_2 и молекулярного азота N_2 как элементов равна нулю. При использовании выражения (2.12) необходимо учитывать агрегатные состояния воды (жидкость в стандартных условиях) и органического топлива.

Калориметрический метод определения тепловых эффектов химических реакций

Для экспериментального определения тепловых эффектов химических реакций используют специальный прибор – калориметр. При выполнении данной лабораторной работы применяется жидкостный калориметр – интегратор переменной температуры, состоящий из калориметрического сосуда с жидкостью (в данном случае – с водой), в которую погружена специальная камера (калориметрическая «бомба»). Калориметрический сосуд теплоизолирован от окружающей среды. Теплота, выделившаяся в камере, распределяется между элементами калориметра, приводя к изменению их температуры на Δt .

При известном тепловом значении калориметра c (Дж/°С), т. е. количества теплоты, необходимой для нагревания всех частей калориметра на 1 °С в условиях эксперимента, расчет выделенного в калориметре количества теплоты Q (Дж) исследуемой реакции осуществляется по формуле

$$Q = c\Delta t. \quad (2.13)$$

Тепловое значение калориметра c находят экспериментальным путем, подводя к калориметру известное количество теплоты и измеряя соответствующее изменение температуры калориметра.

Так как конструкция калориметра предполагает проведение химической реакции в условиях постоянства объема камеры, найденное количество теплоты будет соответствовать полному тепловому эффекту химической реакции при постоянном объеме.

Описание экспериментальной установки

Калориметр (рис. 2.1) состоит из следующих основных частей: калориметрической «бомбы» 1, калориметрического сосуда 2, сосуда-оболочки 3, мешалки 4, термометра 5, блока электропитания и пульта управления 6.

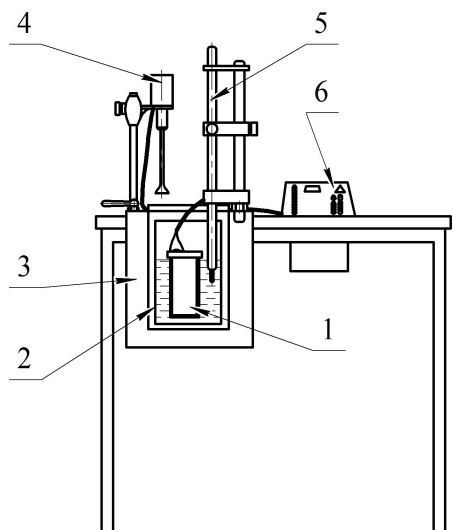


Рис. 2.1. Схема калориметра:

1 – калориметрическая «бомба»; 2 – калориметрический сосуд; 3 – сосуд-оболочка; 4 – мешалка; 5 – термометр; 6 – пульт управления

Калориметрический сосуд 2 (см. рис. 2.1) представляет собой цилиндрический тонкостенный тщательно отполированный (для уменьшения потерь теплоты на излучение) металлический сосуд объемом $2 \cdot 10^3 \text{ см}^3$. После заполнения сосуда дистиллированной водой и погружения «бомбы» калориметрический сосуд устанавливается внутри сосуда-оболочки 3 на специальной теплоизолирующей подставке из пробки. Подставка уменьшает потери теплоты, изолируя калориметрический сосуд от сосуда-оболочки 3.

Сосуд-оболочка 3 – это металлический двустенный цилиндрический сосуд, межстенное пространство которого заполнено водой. Внутренняя стенка сосуда-оболочки отполирована для уменьшения потерь теплоты на излучение. Сосуд-оболочка закрывается сверху пластмассовой крышкой.

Калориметрическая «бомба» (рис. 2.2) представляет собой толстостенный цилиндрический стакан 1 из коррозионно-стойкой кислотоупорной стали объемом около 300 см^3 , с герметически завинчивающейся крышкой 5. В крышке «бомбы» установлены два специальных штуцера и токоввод. Через штуцер 8, снабженный об-

ратным клапаном 9, осуществляется заполнение «бомбы» кислородом, после чего штуцер закручивается с внешней стороны винтовой пробкой 7. К штуцеру с внутренней стороны «бомбы» присоединена трубка 10 с металлической державкой, поддерживающей металлический тигель 2 с таблеткой 11 сжигаемого вещества. Через второй специальный штуцер (на рис. 2.2 не показан) с установленным в нем обратным клапаном осуществляется сброс газообразных продуктов сгорания из «бомбы» после завершения эксперимента.

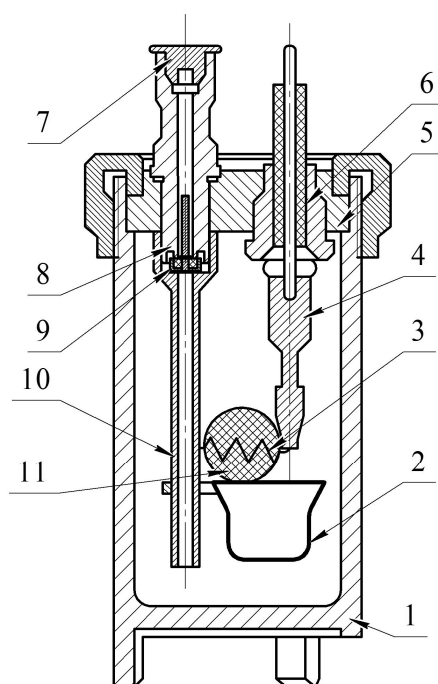


Рис. 2.2. Калориметрическая «бомба»:

1 – стакан; 2 – тигель; 3 – металлическая проволока; 4 – стержень-электрод; 5 – крышка; 6 – токоввод; 7 – винтовая пробка; 8 – штуцер; 9 – обратный клапан; 10 – трубка с металлической державкой; 11 – таблетка сжигаемого вещества

В крышке «бомбы» установлен токоввод 6, на внешней стороне которого имеется клемма для подвода напряжения, а на внутренней стороне закреплен стержень-электрод 4. Роль второго электрода играет трубка 10, находящаяся под потенциалом корпуса «бомбы», подводимым через клемму, установленную на втором

(на рис. 2.2 не показан) специальном штуцере. Таблетка сжигаемого вещества 11 закрепляется между стержнем-электродом 4 и трубкой 10, обеспечивающими подвод тока к запрессованной в таблетку металлической проволоке 3.

Блок электропитания установки включает в себя источник постоянного тока напряжением 12 В, которое и подводится к токовводу на крышке калориметрической «бомбы». При включении тока металлическая проволока, запрессованная в таблетку исследуемого вещества, накаляется и сгорает, инициируя реакцию горения таблетки сжигаемого вещества.

Мешалка 4 (см. рис. 2.1), приводящаяся в движение электромотором, служит для перемешивания воды в калориметрическом сосуде и для обеспечения интенсификации теплообмена между водой в калориметрическом сосуде и поверхностью калориметрической «бомбы».

Измерение температуры воды в калориметрическом сосуде в течение всего эксперимента осуществляется термометром 5 (см. рис. 2.1) с ценой деления 0,01 °С.

Пульт управления (рис. 2.3) позволяет осуществлять включение всех электрических цепей установки. На него выведены: кнопка 1 включения установки, кнопка 2 включения электромотора

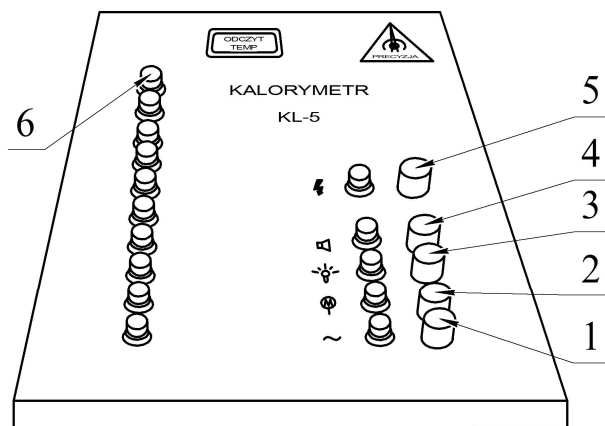


Рис. 2.3. Пульт управления установкой:

1 – кнопка включения установки; 2 – кнопка включения электромотора мешалки; 3 – кнопка включения лампы подсветки шкалы термометра; 4 – кнопка включения звуковой сигнализации; 5 – кнопка «поджига» таблетки исследуемого вещества; 6 – лампы световой индикации интервала между замерами температуры

мешалки, кнопка 3 включения лампы подсветки шкалы термометра, кнопка 4 включения звуковой сигнализации и кнопка 5 «поджига» таблетки сжигаемого вещества.

Слева на пульте находятся лампы 6 световой индикации интервала между замерами температуры, равного 1 мин. Индикация начинает работать при нажатии кнопки 2. Если включена кнопка 4, то при зажигании последней верхней лампы (начало замера) звучит звуковой сигнал.

Заполнение «бомбы» кислородом до давления 2,5...3,0 МПа производится на специальном стенде.

Порядок проведения эксперимента

Таблетку сжигаемого вещества с запрессованной в нее проволокой укладывают в тигель, соединяют электрические контакты, завинчивают крышку «бомбы» и заполняют «бомбу» кислородом. Массу таблетки с проволокой определяют предварительным взвешиванием на аналитических весах.

Собранную «бомбу» осторожно погружают в калориметрический сосуд, заполненный дистиллированной водой. Присоединив провода для запала к клемме «бомбы», сосуд-оболочку закрывают крышкой. Включают электропитание мешалки и ведут наблюдение за изменением температуры воды в калориметрическом сосуде. При этом выделяют три основных временных периода наблюдения: начальный, главный и конечный. В течение этих периодов в журнал наблюдений записывают показания термометра через одинаковые промежутки времени, равные 1 мин. Полученные данные позволяют вычислить поправку к формуле (2.13) на теплообмен калориметра с окружающей средой.

В начальном периоде (от момента времени запуска мешалки до момента воспламенения топлива) происходит выравнивание температур калориметрической «бомбы» и воды в калориметрическом сосуде. Воспламенение топлива осуществляют лишь после того, как показания термометра станут постоянными в течение нескольких минут.

После воспламенения и сгорания топлива с выделением соответствующего количества теплоты начинается главный период наблюдения за изменением температуры, в течение которого температура воды в калориметрическом сосуде повышается и к опре-

деленному моменту времени достигает максимума. Главный период наблюдения температуры характеризуется фазой быстрого роста, когда в течение 1 мин температура повышается более чем на 0,02 °С, и следующей за ней фазой относительно медленного роста температуры до ее максимального значения.

За главным следует конечный период наблюдения, в течение которого температура воды в калориметре начинает снижаться вследствие теплообмена калориметра с окружающей средой. Запись значений температуры в этом периоде выполняют в течение 5–6 мин для того, чтобы убедиться в равномерности изменения температуры.

Обработка результатов эксперимента

С учетом наличия теплообмена калориметра с окружающей средой и сгорания внутри калорической «бомбы» «запальной» проволоки формула (2.13) для расчета удельного массового теплового эффекта сгорания (по модулю) вещества q_V может быть записана в виде

$$|q_V| = \frac{c[(t_k - t_n) + \Delta t_{\text{тепл}}] - b_{\text{пр}}q_{\text{пр}}}{m}, \quad (2.14)$$

где c – тепловое значение калориметра, Дж/°С; t_k, t_n – конечная и начальная температуры воды в главном периоде наблюдения, °С; $\Delta t_{\text{тепл}}$ – поправка на теплообмен калориметра с окружающей средой; $b_{\text{пр}}$ – масса проволоки, кг; $q_{\text{пр}}$ – теплота сгорания проволоки, кДж/кг; m – масса сжигаемого вещества, кг.

Поправку $\Delta t_{\text{тепл}}$ на теплообмен калориметра с окружающей средой вычисляют по эмпирической формуле

$$\Delta t_{\text{тепл}} = \frac{\Delta t_{\text{н.п}} + \Delta t_{\text{к.п}}}{2}n + \Delta t_{\text{к.п}}r, \quad (2.15)$$

где $\Delta t_{\text{н.п}}$ – среднее изменение температуры за минутный промежуток в начальном периоде наблюдения; $\Delta t_{\text{к.п}}$ – среднее изменение температуры за минутный промежуток в конечном периоде наблюдения; n – число минутных промежутков в главном периоде наблюдения на фазе быстрого роста температуры; r – число минутных промежутков в главном периоде на фазе медленного роста температуры.

Найденное количество теплоты $Q_V = mq_V$ равно полному тепловому эффекту сгорания при постоянном объеме V в условиях изменения температуры от начального t_n до конечного значения t_k .

Чтобы получить значение полного теплового эффекта Q_{TV} в условиях постоянства температуры (равной температуре исходных веществ t_n), следует из количества теплоты, рассчитанной по формуле (2.14), вычесть количество теплоты, которую нужно отвести от конечных веществ реакции, имеющих температуру t_k для охлаждения их до температуры исходных веществ. Но, как показывают расчеты, этим количеством теплоты ввиду его незначительности можно пренебречь, а полученный экспериментально тепловой эффект Q_V можно считать равным полному тепловому эффекту Q_{TV} , отнесенному к температуре исходных веществ. Если пренебречь количеством теплоты, необходимой для изменения температуры исходных веществ от начального t_n до стандартного значения $t_0 = 25^\circ\text{C}$, то экспериментально определенный удельный мольный тепловой эффект $\Delta\tilde{U} = \mu q_V$ (где μ – молярная масса топлива $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$) можно считать равным удельному тепловому эффекту реакции $\Delta\tilde{U}_{298}$ при стандартных условиях.

Удельный тепловой эффект реакции сгорания при постоянном давлении $\Delta\tilde{H}_{298}^{\text{сг}}$ вычисляют по формуле (2.10). При этом следует помнить, что в сумму $\sum v_{it}$ входят лишь стехиометрические коэффициенты веществ, находящихся в газообразном состоянии.

Для сравнения результатов проведенного эксперимента со справочными данными по формуле (2.9) рассчитывается стандартное значение теплового эффекта по значениям стандартных энтальпий образования компонентов реакции сгорания исследуемого вещества, приведенным в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Стандартные энтальпии образования некоторых соединений

Соединение	Химическая формула	Агрегатное состояние*	$\Delta\tilde{H}_{298,i}^0$, кДж/моль
Метан	CH_4	г	-74,897

Окончание табл. 2.1

Соединение	Химическая формула	Агрегатное состояние*	$\Delta\tilde{H}_{298,i}^0$, кДж/моль
Этан	C_2H_6	г	-84,724
Пропан	C_3H_8	>>	-103,91
Бензол	C_6H_6	>>	82,982
Толуол	C_7H_8	>>	50,032
Бензойная кислота	$C_7H_6O_2$	т	-385,41
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	ж	-487,34
Оксид углерода	CO	г	-110,59
Двуоксид углерода	CO ₂	>>	-393,80
Вода	H ₂ O	>>	-242,02
		ж	-286,03

* г – газообразное; т – твердое; ж – жидкое.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте правило знаков для тепловых эффектов.
2. Напишите формулу, связывающую тепловые эффекты Q_V и Q_p .
3. Напишите стехиометрическое уравнение в общем виде и сформулируйте правило знаков для стехиометрических коэффициентов.
4. Как рассчитать изменение числа молей в гетерогенной реакции?
5. Напишите термохимическое уравнение в общем виде. Почему термохимическое уравнение должно содержать информацию об агрегатном состоянии компонентов реакции?
6. Напишите термохимическое уравнение для реакций сгорания исследуемого вещества.
7. Как подсчитать тепловой эффект реакции сгорания по энтальпиям образования компонентов?
8. Что называется энтальпией образования, стандартной энтальпией образования?
9. Что такое тепловое значение калориметра? Назовите единицу измерения этого параметра.
10. В чем заключается принцип калориметрирования?
11. К какой температуре (t_n или t_k) должен быть отнесен полученный в эксперименте тепловой эффект реакции?

РАБОТА ТД-03
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ
В ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Цель работы – ознакомление с методикой проведения и обработки результатов экспериментального исследования потерь теплоты в одном из типов тепловых двигателей – в поршневом двигателе внутреннего сгорания.

Продолжительность работы – 4 ч.

Краткие теоретические сведения

Тепловым двигателем называется машина, непрерывно (циклически) производящая работу за счет потребляемой теплоты. Уравнение первого закона термодинамики $\Delta U = Q - L$ для цикла ($\oint dU = 0$) имеет вид

$$L_{\text{ц}} = Q_{\text{ц}}.$$

Здесь $Q_{\text{ц}} = Q_{\text{подв}} - |Q_{\text{отв}}|$ – количество теплоты, преобразованной в работу; $Q_{\text{подв}}$ – количество теплоты, подведенной к рабочему телу от источника с высокой температурой (от «горячего» источника); $Q_{\text{отв}}$ – количество теплоты, отведенной от рабочего тела к источнику с низкой температурой (к «холодному» источнику). Если все процессы цикла равновесны (т. е. цикл обратим), то $Q_{\text{отв}}^{\text{обр}}$ – единственная потеря теплоты и тогда КПД цикла записывается как

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{ц}}^{\text{обр}}}{Q_{\text{подв}}} = \frac{Q_{\text{подв}} - |Q_{\text{отв}}^{\text{обр}}|}{Q_{\text{подв}}}$$

и называется термическим КПД. Отдача теплоты «холодному» источнику является неизбежной, поскольку без этого невозможно осуществить преобразование теплоты в работу.

В необратимом (действительном) цикле к отдаче теплоты «холодному» источнику $Q_{\text{отв}}^{\text{обр}}$ добавляются потери теплоты, связанные с необратимостью процессов, поэтому действительная отдача теплоты «холодному» источнику больше, чем в обратимом цикле $|Q_{\text{отв}}^{\text{д}}| > |Q_{\text{отв}}^{\text{обр}}|$, а $Q_{\text{ц}}^{\text{д}} < Q_{\text{ц}}^{\text{обр}}$, и КПД цикла уменьшается:

$$\eta_i = \frac{Q_{\text{ц}}^{\text{д}}}{Q_{\text{подв}}} = \frac{Q_{\text{подв}} - |Q_{\text{отв}}^{\text{д}}|}{Q_{\text{подв}}} < \eta_t.$$

Коэффициент полезного действия η_i , учитывающий потери теплоты вследствие необратимости процессов цикла, называется внутренним (индикаторным) КПД.

Передача работы цикла на вал (к потребителю) сопровождается так называемыми механическими потерями (трение, привод вспомогательных механизмов и др.). Учитываются также потери теплоты от элементов конструкции, охлаждаемых наружным воздухом (так называемые потери теплоты на лучеиспускание). Разность $Q_{\text{ц}}^{\text{д}}$ и всех этих потерь равна количеству теплоты Q_e , преобразованной в эффективную работу, получаемую потребителем, а соответствующий КПД называется эффективным КПД. Формула для КПД имеет вид

$$\eta_e = \frac{Q_e}{Q_{\text{подв}}}.$$

Термический и внутренний КПД являются характеристиками обратимого η_t и необратимого η_i циклов, совершающихся в цилиндрах двигателя, а эффективный КПД η_e – характеристикой установки в целом, т. е. характеристикой двигателя со всеми обслуживающими его системами и вспомогательными механизмами.

Объект исследования

В данной лабораторной работе исследование потерь теплоты проводится на поршневом двигателе внутреннего сгорания, работающем на тяжелом жидком топливе. Такой двигатель в соответствии с принципом его действия называется двигателем с самовоспламенением топлива от сжатия или дизелем.

Действие дизеля происходит следующим образом: всасываемый из атмосферы воздух с помощью поршней сжимается в цилиндрах двигателя до достижения температуры самовоспламенения топлива, которое впрыскивается насосами-форсунками в нагретый сжатый воздух, находящийся в камерах сгорания. Продукты сгорания топлива, расширяясь в цилиндрах, сообщают поршням, соединенным шатунами с коленчатым валом, поступательное движение. Этим обеспечивается вращение коленчатого вала, передающего работу внешнему потребителю. Таким образом, в дизеле происходит преобразование химической энергии топлива в теплоту, а теплоты – в работу.

Отработавшие газы выпускаются в атмосферу. Стенки цилиндров охлаждаются водой, циркулирующей в системе охлаждения, или воздухом с помощью вентиляторов. С охлаждением стенок цилиндров связана внешняя необратимость процессов сжатия и расширения рабочего тела, а с трением внутри рабочего тела – внутренняя необратимость процессов.

Показатели рабочего цикла дизеля подразделяют на внутренние (индикаторные) и внешние (эффективные). Внутренние показатели – внутренний КПД η_i и среднее давление цикла p_i , измеряемое в килопаскалях (кПа), – характеризуют степень совершенства рабочего цикла дизеля с учетом необратимых потерь. К основным внешним показателям, характеризующим установку в целом, относят: эффективный КПД η_e , среднее эффективное давление p_e , измеряемое в килопаскалях, эффективную мощность N_e , измеряемую в киловаттах (кВт), часовой расход топлива $V_{\text{час}}$, измеряемый в килограммах в час (кг/ч), и эффективный расход топлива V_e , измеряемый в граммах на киловатт-час (г/(кВт·ч)). Для определения внешних показателей работы дизеля на установке проводятся теплосбалансовые испытания.

Уравнение теплового баланса

Уравнение теплового баланса устанавливает равенство между теплотой, выделяющейся при сгорании топлива, полезно используемой теплотой и различными видами потерь:

$$Q = Q_e + Q_{H_2O} + Q_{o.g} + Q_n + Q_l, \quad (3.1)$$

где Q – теплота расходуемого топлива, кДж/ч; Q_e – теплота, преобразованная в эффективную работу; Q_{H_2O} – потеря теплоты в охлаждающую воду; $Q_{o.g}$ – потеря теплоты при выпуске отработавших газов в атмосферу; Q_n – потеря теплоты вследствие неполноты сгорания топлива; Q_l – прочие потери теплоты (излучение с поверхностей двигателя в окружающую среду, механические потери, не перешедшие в охлаждающую воду, кинетическая энергия выпускных газов и др.).

При составлении теплового баланса в процентах уравнение (3.1) примет вид

$$q = q_e + q_{H_2O} + q_{o.g} + q_n + q_l,$$

где

$$\begin{aligned} q &= 100 \% ; \quad q_e = \frac{Q_e}{Q} \cdot 100 \% ; \quad q_{H_2O} = \frac{Q_{H_2O}}{Q} \cdot 100 \% ; \\ q_{o.g} &= \frac{Q_{o.g}}{Q} \cdot 100 \% ; \quad q_n = \frac{Q_n}{Q} \cdot 100 \% ; \quad q_l = \frac{Q_l}{Q} \cdot 100 \% . \end{aligned} \quad (3.2)$$

Составляющие теплового баланса рассчитываются по результатам эксперимента. Значения составляющих позволяют судить об использовании теплоты сгоревшего топлива; например, составляющая

$$q_e = \frac{Q_e}{Q} \cdot 100 \% = \frac{Q - \sum Q_y}{Q} \cdot 100 \% = \eta_e$$

характеризует эффективность преобразования затраченной теплоты в полезную работу (эффективный КПД). Здесь $\sum Q_y$ – сумма потерь теплоты в установке.

Топливо для дизелей и его сгорание

Жидкие топлива, на которых работают дизели, являются продуктами перегонки нефти и представляют собой смеси различных

углеводородов. В крупных дизелях применяется в основном соляровое масло, а в быстроходных дизелях автотракторного типа – дизельное топливо. Углеводородные топлива содержат углерод, водород, кислород, серу и воду в гигроскопической форме. Элементарный массовый состав топлива:

$$C + H + O + S + W = 100 \%,$$

где массовые доли (выраженные в процентах) составляющих обозначены символами соответствующих элементов, а W – массовая доля воды. Соответственно в продуктах сгорания присутствуют оксиды углерода и серы, а также водяной пар, причем водяной пар образуется и при сгорании водорода топлива, и в результате испарения имеющейся в топливе воды. В состав продуктов сгорания также входит азот и неиспользованный кислород воздуха, подаваемого для горения топлива.

Количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании 1 кг топлива при условии полной конденсации водяного пара, содержащегося в продуктах сгорания, называют высшей теплотой сгорания Q_v и измеряют в килоджоулях на килограмм (кДж/кг) (при конденсации происходит выделение такого же количества теплоты, какое поглощалось при парообразовании). Поскольку при сгорании топлива в дизеле водяной пар конденсируется уже после выпуска продуктов сгорания в атмосферу, то затрачиваемое в дизеле часовое количество теплоты определяют по низшей теплоте сгорания топлива $Q_{низ}$:

$$Q = B_{час} Q_{низ}, \quad (3.3)$$

где $B_{час}$ – часовой расход топлива, кг/ч.

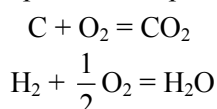
Низшая теплота сгорания $Q_{низ}$ кДж/кг углеводородного топлива может быть рассчитана по формуле Менделеева:

$$Q_{низ} = 4,187[81 C + 300 H - 26 (O - S) - 6(9H + W)]. \quad (3.4)$$

В формуле (3.4) массовые доли компонентов топлива C , H , O , S , W , выражаемые в процентах, соответствуют элементарному массовому составу топлива. Если не требуется особенно высокой точности определения теплоты сгорания, то можно использовать средний массовый состав топлива: $C = 86 \%$, $H = 13 \%$, $O = 1 \%$,

причем содержанием серы и влаги ввиду незначительности обычно пренебрегают, т. е. $S \approx 0$ и $W \approx 0$.

Количество кислорода, требующегося для сгорания топлива, определяют из соображений, приведенных ниже. Уравнения реакции полного сгорания углерода и водорода имеют вид



Поскольку молярная масса углерода равна 12 кг/кмоль, а молярная масса водорода – 2 кг/кмоль, для полного сгорания $C/100$ кг углерода, содержащегося в 1 кг топлива, необходимо иметь $C/(100 \cdot 12)$ кмоль кислорода, а для полного сгорания $H/100$ кг водорода требуется $H/(100 \cdot 4)$ кмоль кислорода. Учитывая, что в 1 кг топлива содержится $O/(100 \cdot 32)$ кмоль кислорода, получаем следующее выражение для определения теоретически необходимого количества кислорода L_O , обеспечивающего полное сгорание 1 кг топлива принятого состава:

$$L_O = \frac{1}{100} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right).$$

Окислителем при сгорании топлива в дизелях служит кислород атмосферного воздуха. Поскольку молярное содержание кислорода в воздухе $O_2 = 21\%$, то теоретически необходимое количество воздуха $L_{\text{воз}}$ для полного сгорания 1 кг топлива

$$L_{\text{воз}} = \frac{1}{21} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right). \quad (3.5)$$

Характеристика топлива β , которую удобно применять при расчетах, рассчитывается по формуле

$$\beta = \frac{2,37 \left(H - \frac{O}{8} \right)}{C} \quad (3.6)$$

и представляет собой отношение количества кислорода, затраченного при сгорании водорода, к количеству кислорода, расходуемому на сгорание углерода.

Качество сгорания топлива в цилиндрах дизеля зависит помимо прочих факторов от качества смесеобразования, так как только при хорошем перемешивании распыленного топлива с воздухом

обеспечивается полное сгорание. Но осуществить хорошее смешение (в течение тысячных долей секунды) затруднительно. Поэтому количество воздуха L_d , действительно подаваемого в цилиндры дизеля, значительно превышает теоретически необходимое, из чего следует, что $\alpha = L_d/L_{\text{воз}} > 1$, т. е. что коэффициент избытка воздуха больше единицы. Тем не менее даже при $\alpha > 1$ сгорание топлива может оказаться неполным. В этом случае в продуктах сгорания могут появляться свободный углерод (сажа), оксид углерода CO, водород H₂, метан CH₄ и другие углеводороды. Но, как показывает опыт эксплуатации дизелей при $\alpha > 1$, содержание водорода, метана и других углеводородов в отработавших газах дизелей нетипично, а содержание оксида углерода незначительно, поэтому неполнота сгорания топлива в дизелях определяется по наличию в продуктах сгорания свободного углерода в виде сажи.

Описание экспериментальной установки

Эксперимент проводится на установке, созданной на базе автомобильного дизеля ЯАЗ-204А. Функциональная схема установки изображена на рис. 3.1.

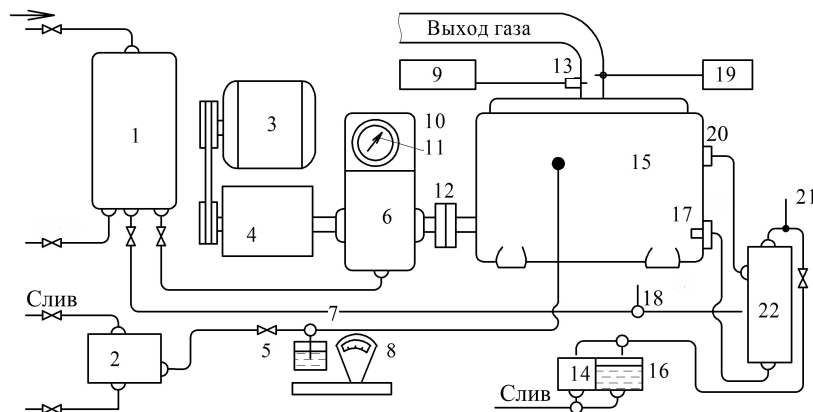


Рис. 3.1. Функциональная схема экспериментальной установки:

1 – бак постоянного уровня воды; 2 – топливный бак; 3 – электродвигатель; 4 – редуктор; 5 – мерная колба; 6 – гидравлический тормоз; 7 – распределительный трехходовой кран; 8 – весы; 9 – пирометр; 10 – приборный щиток; 11 – стрелка указателя нагрузки; 12 – муфта; 13 – термопара; 14, 16 – мерные баки; 15 – дизель; 17 – водомасляный холодильник; 18, 21 – термометры; 19 – газоанализатор; 20 – насос; 22 – водо-водяной холодильник

Основные характеристики дизеля ЯАЗ-204А:

модель (тип) двигателя	ЯАЗ-204А
число цилиндров.....	4
число тактов.....	2
номинальная мощность, кВт.....	81,2
номинальная частота вращения вала, об/мин.....	2 000
диаметр цилиндра, мм	108
ход поршня, мм	127
объем цилиндра, описываемый поршнем, л.....	1,162
объем пространства сжатия, л.....	0,0775
степень сжатия (отношение объемов ци- линдра в моменты нахождения поршня в нижней и верхней мертвых точках).....	16
завод-изготовитель	Ярославский моторный завод

В качестве нагружающего устройства дизеля 15 (см. рис. 3.1) на стенде использован гидравлический тормоз 6, соединенный с дизелем упругой муфтой 12. Момент сопротивления в гидротормозе создается за счет трения дисков ротора тормоза о заполняющую его корпус (статор) воду. Получаемый при этом реактивный момент передается через систему рычагов на маятниковые весы, помещенные внутри приборного щитка 10, и на стрелку 11 указателя нагрузки. Величина нагрузки определяется количеством воды, заполняющей внутреннюю полость гидротормоза. Питание гидротормоза производится из бака 1 постоянного уровня.

Система топливоподачи дизеля состоит из топливного бака 2 распределительного трехходового крана 7, мерной колбы 5, весов 8, трубопроводов и насосов-форсунок. Из бака топливо поступает самотеком к распределительному устройству, откуда в зависимости от положения трехходового крана оно может направляться следующими путями:

- а) из бака, минуя мерное устройство, непосредственно к насосам-форсункам дизеля;
- б) из бака к двигателю и одновременно в мерную колбу;
- в) из мерной колбы к насосам-форсункам при закрытой магистрали, идущей от бака.

Система охлаждения дизеля состоит из двух контуров: внутреннего и внешнего, причем внутренний контур замкнутого типа,

внешний – разомкнутого. Вода внутреннего контура после охлаждения стенок цилиндров и головки блока поступает к водяному 22 и водомасляному 17 холодильникам, откуда с помощью насоса 20 центробежного типа подается снова в рабочие полости дизеля. Внешний контур охлаждения используется для отвода теплоты от нагретой воды внутреннего контура. Для этого вода из бака 1 постоянного уровня, наполняемого водой из водопроводной сети, подается в водо-водяной холодильник 22, далее – в мерные баки 14 и 16 и оттуда сливается в канализацию. Система запуска дизеля – электрическая с помощью электродвигателя 3 переменного тока, который соединен с валом гидротормоза (следовательно, и с коленчатым валом двигателя) через редуктор 4.

Порядок проведения эксперимента

Тепловой баланс двигателя составляется в данной лабораторной работе для одного установившегося режима, задаваемого значением внешней нагрузки P , измеряемой в килограмм-силах*, и частотой вращения вала n , измеряемой в оборотах в минуту.

Перед началом испытаний двигатель прогревается в течение 10...15 мин на оборотах холостого хода, а затем постепенно загружается до рабочей нагрузки. Тепловой режим двигателя при проведении опыта должен быть постоянным, что достигается поддержанием температуры охлаждающей воды и масла в системах дизеля в диапазоне значений 90...95 °С. Внешним признаком того, что рабочий режим стал установившимся, является неизменность во времени температуры отработавших газов.

При эксперименте измеряются следующие параметры:

- частота вращения вала n , об/мин;
- нагрузка P , кгс;
- часовой расход топлива $V_{\text{час}}$, кг/ч;
- температура отработавших газов $t_{\text{о.г}}$, °С;
- температура воды внешнего контура на входе в водо-водяной холодильник t_1 , °С;

* Измерение нагрузки в килограмм-силах связано с тем, что измерительные приборы на экспериментальном стенде градуированы в килограмм-силах; 1 кгс = 9,807 Н.

- температура воды внешнего контура на выходе из холодильника t_2 , °С;
- часовой расход охлаждающей воды внешнего контура $G_{\text{час}}$, кг/ч;
- средняя температура машинного зала (температура всасываемого воздуха) t_0 , °С;
- состав отработавших газов, %.

Полноту сгорания топлива и коэффициент избытка воздуха α определяют по результатам анализа состава отработавших газов, частоту вращения вала – по дистанционному двухстрелочному электротахометру, приемник которого установлен в щитке приборов 10 (см. рис. 3.1), нагрузку P – по шкале указателя нагрузки 11 маятниковых весов гидравлического тормоза 6. Часовой расход топлива измеряют по времени расходования дизелем контрольной порции топлива. Для этого используют настольные весы 8 с мерной колбой 5 и разновесами и распределительное устройство в виде трехходового крана 7. Температуру отработавших газов $t_{o.g}$ измеряют с помощью термпары 13, установленной в выхлопном тракте дизеля, и пирометра 9, закрепленного в щитке приборов. Температуру воды внешнего контура на входе в холодильник 22 и на выходе из него фиксируют по показаниям стеклянных ртутных термометров 18 и 21. Часовой расход воды, проходящей через холодильник по внешнему контуру, рассчитывают по времени заполнения мерных баков 16.

Состав продуктов сгорания топлива определяют с помощью газоанализатора 19. Газовый анализ в двигателях внутреннего сгорания проводится путем выборочного поглощения газов жидкими реактивами. Для этого из выпускной трубы отбирают пробу газа и пропускают ее последовательно через ряд реактивов, каждый из которых поглощает только один газ из смеси анализируемых газов. По изменению конечных объемов по отношению к начальным судят об объеме отдельных составляющих. Простейшими являются газоанализаторы непосредственного поглощения типа Орса. Они позволяют определить содержание диоксида углерода и кислорода в продуктах сгорания. Содержание азота (азот воздуха) выявляют по остатку пробы газа.

На основании данных, полученных при теплобалансовом испытании дизеля, подсчитывают его важнейшие эффективные показатели и

составляющие теплового баланса. Эти результаты требуются как при конструировании систем двигателя (охлаждения, воздухо-снабжения и т. п.), так и при его доводке.

Обработка результатов эксперимента

Эффективную мощность N_e (кВт), развиваемую дизелем, рассчитывают по формуле

$$N_e = \frac{0,735M_{кр}n}{716,2}, \quad (3.7)$$

где n – частота вращения вала, об/мин; $M_{кр}$ – крутящий момент, кгс·м, определяемый по формуле

$$M_{кр} = PR = 0,716P, \quad (3.8)$$

где P – нагрузка по шкале гидротормоза, кгс; $R = 0,716$ м – плечо гидротормоза.

Подстановка формулы (3.8) в формулу (3.7) позволяет представить последнюю в виде

$$N_e = \frac{0,735Pn}{1000}.$$

Среднее эффективное давление P_e (бар*) для двухтактных двигателей (рабочий цикл осуществляется за один оборот коленчатого вала) рассчитывают по формуле

$$P_e = \frac{600N_e}{V_hni},$$

где V_h – объем цилиндра, описываемый поршнем, л; i – число цилиндров.

Эффективный расход топлива (г/(кВт·ч)), вычисляют по выражению

* 1 бар = 10^5 Па.

$$B_e = 1000 \frac{B_{\text{час}}}{N_e},$$

где N_e – эффективная мощность двигателя, кВт; $B_{\text{час}}$ – расход топлива, кг/ч.

Эффективный КПД дизеля

$$\eta_e = \frac{3600}{B_e Q_{\text{низ}}} \cdot 10^3,$$

где $Q_{\text{низ}}$ – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг, которую рассчитывают по формуле (3.4).

Полноту сгорания топлива определяют по контрольному соотношению

$$\text{CO}_2 + \text{O}_2 \leq 21 - \beta \text{CO}_2$$

где CO_2 и O_2 – содержание диоксида углерода и кислорода в отработавших газах, %, установленное по результатам газового анализа; β – характеристика топлива, вычисленная по формуле (3.6). Равенство левой и правой частей этого соотношения возможно только в случае полного сгорания топлива. Если левая часть меньше правой, сгорание топлива будет несовершенным (неполным). Если левая часть больше правой, то результаты газового анализа неточны или у газоанализатора имеются дефекты.

Долю φ несгоревшего углерода (сажи) определяют по выражению

$$\varphi = \frac{21 - (1 + \beta)\text{CO}_2 - \text{O}_2}{21 - (\text{CO}_2 + \text{O}_2)}. \quad (3.9)$$

Коэффициент избытка воздуха α для случаев полного сгорания и неполного сгорания топлива с образованием сажи рассчитывают по формуле

$$\alpha = \frac{0,21\beta N_2}{(0,79 + \beta)(N_2 - 79)}, \quad (3.10)$$

где N_2 – содержание азота в отработавших газах, %.

Количество отдельных компонентов в сухих продуктах полного сгорания, полученных за 1 ч работы двигателя, выражают следующим образом:

количество диоксида углерода (кмоль/ч):

$$M_{\text{CO}_2} = \frac{C}{100 \cdot 12} B_{\text{час}}; \quad (3.11)$$

количество водяного пара (при $W = 0$) (кмоль/ч):

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{H}{100 \cdot 2} B_{\text{час}}; \quad (3.12)$$

количество азота и неиспользованного кислорода (кмоль/ч):

$$M_{\text{O}_2+\text{N}_2} = L_{\text{воз}}(\alpha - 0,21)B_{\text{час}}, \quad (3.13)$$

где α – коэффициент избытка воздуха, рассчитанный по формуле (3.10).

В формулах (3.11) и (3.12) C и H – массовые доли углерода и водорода в топливе, выраженные в процентах.

Часовое количество теплоты расходуемого топлива Q определяют по низшей теплоте сгорания и часовому расходу топлива по формуле (3.3).

Количество теплоты Q_e (кДж/ч), преобразованной в эффективную работу, равно

$$Q_e = 3600N_e,$$

где N_e – эффективная мощность дизеля в исследуемом режиме, кВт.

Потерю теплоты в охлаждающую воду рассчитывают по формуле

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = C_{\text{H}_2\text{O}}G_{\text{час}}(t_2 - t_1),$$

где $C_{\text{H}_2\text{O}} = 4,187$ – теплоемкость воды, кДж/(кг·К); $G_{\text{час}}$ – часовой расход охлаждающей воды, кг/ч; t_1 – температура охлаждающей воды на входе в систему охлаждения, °С; t_2 – температура охлаждающей воды на выходе из системы охлаждения, °С.

Количество теплоты, уносимой с отработавшими газами, может быть найдено из выражения

$$Q_{0,г} = (M_{CO_2} \mu C_p^{CO_2} + M_{O_2+N_2} \mu C_p^{N_2} + M_{H_2O} \mu C_p^{H_2O}) t_{0,г} - L_{\text{час}} \mu C_p^{\text{воз}} t_0,$$

где $t_{0,г}$ – температура отработавших газов, °С; t_0 – температура всасываемого воздуха (температура машинного отделения), °С; $\mu C_p^{H_2O}$, $\mu C_p^{N_2}$, $\mu C_p^{CO_2}$ и $\mu C_p^{\text{воз}}$ – средние молярные теплоемкости газов и воздуха (определяются по табл. 3.1); $L_{\text{час}} = \alpha L_{\text{воз}} B_{\text{час}}$ – действительный часовой расход воздуха, кмоль на 1 кг топлива; α – коэффициент избытка воздуха, $L_{\text{воз}}$ – теоретически необходимое количество воздуха, кмоль на 1 кг топлива, рассчитываемое по выражению (3.5). Значения M_{CO_2} , M_{H_2O} , $M_{O_2+N_2}$ определяют по формулам (3.11)– (3.13).

Таблица 3.1

**Средняя молярная теплоемкость $\mu C_p \Big|_0^t$, кДж/(кмоль · °С),
различных газов при $p = \text{const}$**

$t, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	Воздух
0	29,28	28,02	28,62	29,13	35,87	38,84	35,50	29,08
100	29,54	29,05	28,94	29,18	38,12	40,66	33,75	29,16
200	29,94	29,14	29,08	29,31	40,07	42,33	34,12	29,30
300	30,40	29,29	29,13	29,52	41,76	43,88	34,58	29,53
400	30,88	29,50	29,19	29,79	43,26	45,22	35,09	29,79
500	31,34	29,77	29,25	30,10	44,58	46,40	35,63	30,10
600	31,77	30,05	29,32	30,43	45,76	47,36	36,20	30,41
700	32,16	30,35	29,41	30,76	46,82	48,24	36,79	30,73
800	32,51	30,64	29,52	31,07	47,77	48,95	37,40	31,03
900	32,83	30,93	29,65	31,38	48,62	49,62	38,01	31,33
1000	33,12	31,20	29,79	31,67	49,40	50,17	38,62	31,60
1100	33,39	31,46	29,95	31,94	50,11	50,67	39,23	31,87
1200	33,64	31,71	30,11	32,20	50,75	51,09	39,83	32,11

Окончание табл. 3.1

$t, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	Воздух
1300	33,87	31,95	30,29	32,43	51,33	–	40,41	32,35
1400	34,08	32,17	30,47	32,66	51,87	–	40,48	32,57
1500	34,29	32,38	30,65	32,86	52,36	–	41,53	32,78
1600	34,48	32,57	30,84	33,06	52,81	–	42,06	32,97
1700	34,66	32,75	31,01	33,24	53,23	–	42,58	33,18
1800	34,84	32,92	31,20	33,41	53,61	–	43,08	33,32
1900	35,01	33,08	31,38	33,57	53,97	–	43,54	33,49
2000	35,17	33,24	31,55	33,71	54,30	–	44,00	33,65
2100	35,33	33,38	31,73	33,86	54,60	–	44,40	33,79
2200	35,49	33,52	31,90	33,98	54,89	–	44,86	33,93
2300	35,64	33,65	32,06	34,11	55,15	–	45,26	34,06
2400	35,79	33,68	32,23	34,23	55,40	–	45,65	34,19
2500	35,93	33,88	32,39	34,34	55,63	–	46,02	34,31
2600	36,07	–	32,54	–	–	–	46,39	–
2700	36,21	–	32,70	–	–	–	46,74	–
2800	–	–	–	–	–	–	47,07	–
2900	–	–	–	–	–	–	47,38	–

Потери теплоты вследствие неполноты сгорания топлива (образование сажи) рассчитывают по формуле

$$Q_n = 34080 \frac{C}{100} \varphi B_{\text{час}},$$

где φ – доля несгоревшего углерода, вычисленная по формуле (3.9).

Остаточный член баланса $Q_{\text{л}}$ (кДж/ч), включает в себя все неучтенные потери теплоты и погрешности измерений и вычисляется по уравнению баланса (3.1):

$$Q_{\text{л}} = Q - (Q_e + Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{о.г}} + Q_n).$$

Значение $Q_{\text{л}}$ обычно составляет 2,5...8,0 % теплоты расходуемого топлива Q .

Тепловой баланс в процентах теплоты сгоревшего топлива представлен в виде диаграммы на рис. 3.2. Отдельные составляющие рассчитывают по формулам (3.2).

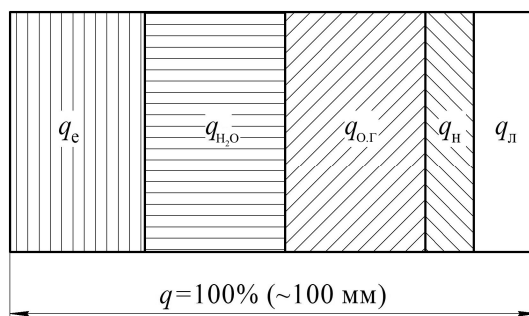


Рис. 3.2. Диаграмма теплового баланса (в процентах):

q_e – доля теплоты, превращенной в эффективную работу; q_{H_2O} – доля потерь теплоты в охлаждающую воду; $q_{o.r.}$ – доля потерь теплоты при выпуске отработавших газов в атмосферу; q_n – доля потерь теплоты за счет неполноты сгорания топлива; $q_{л.}$ – доля прочих потерь теплоты

Контрольные вопросы

1. Опишите принцип действия двигателя с самовоспламенением топлива от сжатия (дизеля).
2. Каков смысл КПД: термического η_t , внутреннего η_i и эффективного η_e ?
3. Напишите уравнение теплового баланса дизеля и дайте характеристику каждой его составляющей.
4. Что называется высшей теплотой сгорания топлива? Почему при расчетах, связанных со сгоранием топлива в дизеле, следует использовать низшую теплоту сгорания?
5. Напишите формулу для определения теоретически необходимого количества воздуха для полного сгорания топлива.
6. Что понимают под коэффициентом избытка воздуха? Почему при сжигании топлива в дизелях требуется избыток воздуха?
7. Какой показатель характеризует неполноту сгорания топлива в дизелях?
8. Опишите экспериментальную установку.
9. Перечислите важнейшие внешние показатели работы дизеля. Как они определяются в данной лабораторной работе?
10. По результатам расчета теплового баланса определите, какие виды внешних потерь теплоты в дизеле являются преобладающими.

РАБОТА ТД-04
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

Цель работы – ознакомление с основными параметрами влажного воздуха; проведение экспериментального исследования по определению изменения параметров влажного воздуха в различных термодинамических процессах.

Продолжительность работы – 4 ч.

Основы теории

Такие широко используемые в технике газы, как атмосферный воздух или продукты сгорания топлива, всегда содержат водяной пар. Даже небольшое содержание водяного пара при определенных условиях может оказать существенное влияние на термодинамические свойства парогазовых смесей. Если же доля пара оказывается значительной или возможно протекание процесса конденсации пара, то парогазовую смесь следует рассматривать как особое рабочее тело с необычными для пара или газа термодинамическими свойствами. Такие процессы изменения состояния парогазовой смеси используются в технике. Примерами могут служить процессы сушки материалов, сжатия воздуха в компрессорах, кондиционирования воздуха и т. д.

Влажным воздухом называют смесь сухого воздуха и водяного пара. В общем случае воздух может содержать пары и других веществ (спирта, аммиака и т. п.). Содержание водяного пара в атмосферном воздухе зависит от метеорологических условий, а также от наличия источников испарения воды.

Практический интерес представляет применение влажного воздуха при ограниченных диапазонах значений температуры и давления (значения температуры не ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и значения давления, близкие к значению атмосферного давления). В этих условиях воз-

дух находится в газообразном состоянии, а вода может находиться в газообразном, жидком или твердом состоянии. Поэтому количество водяного пара в парогазовой смеси не может быть произвольным. Предельное содержание водяного пара во влажном воздухе определяется полным давлением и температурой парогазовой смеси.

Если при заданных давлении и температуре воздух содержит максимально возможное количество водяного пара, то в этом состоянии воздух принято называть насыщенным; если же возможно поглощение воздухом дополнительного количества водяного пара, то влажный воздух называют ненасыщенным. В насыщенном воздухе водяной пар находится в насыщенном состоянии, а в ненасыщенном воздухе – в перегретом состоянии.

Основные параметры влажного воздуха

Максимальное давление пара в насыщенном воздухе равно давлению насыщенного водяного пара при температуре воздуха и зависит только от этой температуры (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Давление пара в зависимости от температуры воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$
-20	0,104	+20	2,333
0	0,611	+40	7,332

Для иллюстрации различных состояний влажного воздуха на рис. 4.1 представлена диаграмма v - p состояния воды и водяного пара. Сплошная линия k - c - b - d называется верхней пограничной кривой (ВПК) и представляет собой геометрическое место точек, соответствующих состоянию насыщенного пара. Слева от ВПК расположена область двухфазного состояния смеси жидкости и насыщенного пара, справа – область состояния перегретого пара. Пунктирными линиями изображены изотермы ($t_1 > t_2$). В области двухфазного состояния смеси воды и водяного пара изотермы совпадают с соответствующими изобарами. Если состоянию пара во влажном воздухе соответствует точка a , это означает, что влажный воздух является ненасыщенным, парциальное давление перегре-

того пара в смеси жидкости и пара равно $p_{\text{п}}$, оно меньше давления насыщения $p_{\text{н}}$, соответствующего температуре t_1 (точке c). Если охладить такой ненасыщенный влажный воздух до температуры t_2 при постоянном давлении $p_{\text{п}}$, то водяной пар станет насыщенным (точка b). Температура t_2 называется температурой точки росы. Дальнейшее охлаждение влажного воздуха приведет к конденсации части паров воды и образованию тумана.

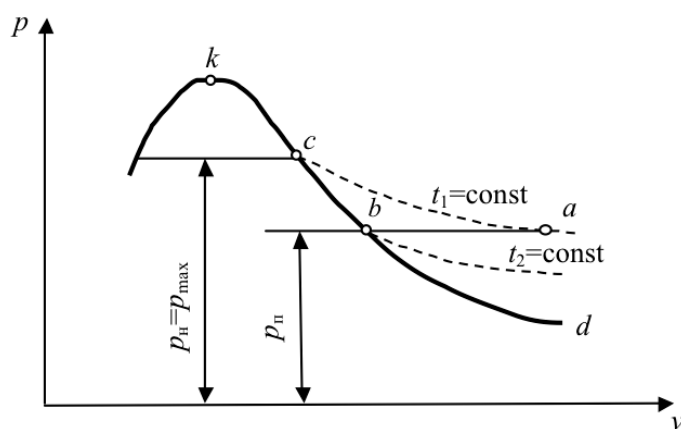


Рис. 4.1. Диаграмма v - p состояния воды и водяного пара

Влажный воздух с достаточной степенью точности можно считать смесью идеальных газов и применять к нему уравнение Клапейрона

$$pV = mRT, \quad (4.1)$$

где p – давление смеси, Па; V – объем, занимаемый смесью, м^3 ; m – масса парогазовой смеси, кг; R – газовая постоянная смеси, Дж/(кг · К); T – температура смеси, К.

Согласно закону Дальтона

$$p_{\text{в.в}} = p_{\text{с.в}} + p_{\text{п}}, \quad (4.2)$$

где $p_{\text{в.в}}$ – давление влажного воздуха; $p_{\text{с.в}}$ – парциальное давление сухого воздуха; $p_{\text{п}}$ – парциальное давление паров воды.

Абсолютная влажность воздуха равна массе водяного пара, содержащегося в 1 м^3 влажного воздуха. Так как влажный воздух представляет собой парогазовую смесь, то объем пара в этой смеси равен объему всей смеси. Отсюда абсолютная влажность воздуха

может быть выражена как плотность пара $\rho_{\text{п}}$ при парциальном давлении пара $p_{\text{п}}$ и температуре смеси. Согласно данному определению выражение для абсолютной влажности будет иметь вид

$$\rho_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}}}{V}, \quad (4.3)$$

где $m_{\text{п}}$ – масса пара, кг; V – объем влажного воздуха, м³.

Относительная влажность воздуха φ представляет собой отношение абсолютной влажности воздуха $\rho_{\text{п}}$ к максимально возможной плотности пара при данной температуре $\rho_{\text{н}}$:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \cdot 100 \%. \quad (4.4)$$

Для идеальных газов отношение плотностей компонентов парогазовой смеси можно заменить отношением парциальных давлений:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} \cdot 100 \%, \quad (4.5)$$

где $p_{\text{п}}$ – давление водяного пара во влажном воздухе; $p_{\text{н}}$ – давление насыщенного пара при температуре влажного воздуха.

Влагосодержание d влажного воздуха представляет собой отношение массы водяного пара во влажном воздухе к массе сухого воздуха $m_{\text{с.в.}}$:

$$d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{с.в.}}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{с.в.}}}. \quad (4.6)$$

Определив массы сухого воздуха и водяного пара из уравнения (4.1) и подставив их в уравнение (4.6) с учетом (4.2), получим формулу для расчета влагосодержания d :

$$d = \frac{p_{\text{п}} V / (R_{\text{п}} T)}{R_{\text{с.в.}} V / (R_{\text{с.в.}} T)} = \frac{\mu_{\text{п}} p_{\text{п}}}{\mu_{\text{с.в.}} (p_{\text{в.в.}} - p_{\text{п}})} = 0,622 \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{в.в.}} - p_{\text{п}}}, \quad (4.7)$$

где $R_{\text{п}} = R_0 / \mu_{\text{п}}$, $R_{\text{с.в.}} = R_0 / \mu_{\text{с.в.}}$ – газовые постоянные водяного пара и сухого воздуха; $\mu_{\text{п}} = 18,06$ кг/кмоль и $\mu_{\text{с.в.}} = 28,95$ кг/кмоль – молярные массы водяного пара и сухого воздуха соответственно.

Парциальное давление водяного пара $p_{\text{п}}$ при данном давлении влажного воздуха $p_{\text{в.в.}}$ является функцией влагосодержания d :

$$p_{\text{п}} = p_{\text{в.в}} \frac{d}{0,622 + d}. \quad (4.8)$$

Используя уравнения (4.7) и (4.8), можно записать формулы для расчета максимально возможного влагосодержания $d_{\text{н}}$ в насыщенном влажном воздухе и давления насыщения $p_{\text{н}}$:

$$d_{\text{н}} = 0,622 \frac{p_{\text{н}}}{p_{\text{в.в}} - p_{\text{н}}}, \quad (4.9)$$

$$p_{\text{н}} = p_{\text{в.в}} \frac{d_{\text{н}}}{0,622 + d_{\text{н}}}. \quad (4.10)$$

Для решения многих технических задач необходимо знать плотность влажного воздуха $\rho_{\text{в.в}}$. Ее можно определить, если известны абсолютная влажность $\rho_{\text{п}}$ и влагосодержание d , по формуле

$$\rho_{\text{в.в}} = \rho_{\text{п}} \frac{d + 1}{d}. \quad (4.11)$$

Относительная влажность воздуха экспериментально определяется прибором, называемым психрометром. Психрометр имеет два поставленных рядом термометра: один называют «сухим», другой – «мокрым». Шарик «мокрого» термометра обернут влажной тканью, которая постоянно смачивается водой. Термометры с достаточно большой скоростью продуваются воздухом, относительную влажность которого требуется определить.

С поверхности влажной ткани вода испаряется, и температура «мокрого» термометра понижается. В процессе теплообмена воздуха с влажной тканью через некоторое время устанавливается состояние равновесия, которому соответствует постоянная температура $t_{\text{м}}$, показываемая «мокрым» термометром. Температура $t_{\text{м}}$ будет меньше температуры $t_{\text{с}}$ «сухого» термометра, который фиксирует действительную температуру влажного воздуха. Разность температур $t_{\text{с}} - t_{\text{м}}$ пропорциональна влажности воздуха. Чем суше воздух, тем больше разность температур $t_{\text{с}} - t_{\text{м}}$.

Для определения параметров состояния влажного воздуха предназначена диаграмма $h-d$ (энтальпия – влагосодержание), предложенная в 1918 г. профессором Л.К. Рамзиным. На диаграм-

ме $h-d$ (рис. 4.2) по оси абсцисс отложено влагосодержание влажного воздуха, а по оси ординат – энтальпия сухого воздуха. При построении диаграммы барометрическое давление принято равным $p = 99,325$ кПа, что соответствует среднегодовому давлению для центральной полосы России. Для удобства пользования диаграммой координатные оси в ней проведены под углом 135° . Значения влагосодержания воздуха спроецированы на вспомогательную горизонтальную ось.

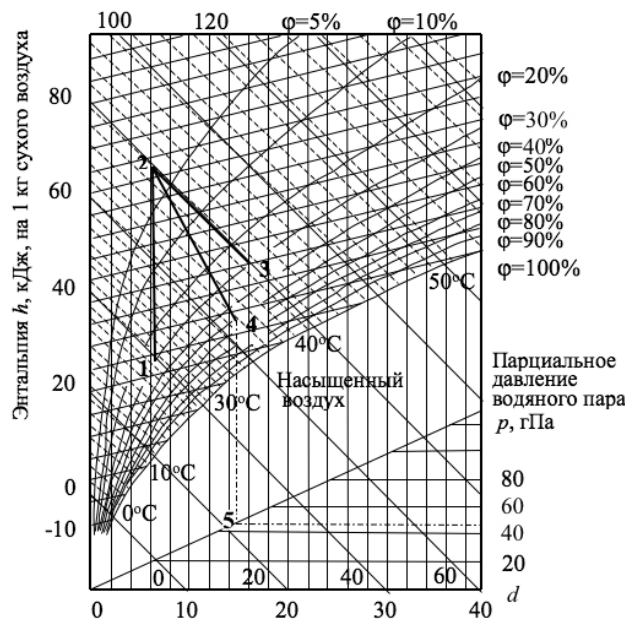


Рис. 4.2. Диаграмма $h-d$ влажного воздуха

На диаграмме $h-d$ линии постоянных значений влагосодержания d представляют собой вертикали к оси абсцисс, линии $h = \text{const}$ проведены под углом 135° к оси ординат.

На диаграмме $h-d$ представлены также кривые $\phi = \text{const}$.

Кривая $\phi = 100\%$ определяет параметры состояния насыщенного влажного воздуха. Область диаграммы $h-d$, расположенная выше линии $\phi = 100\%$, является областью, соответствующей параметрам ненасыщенного влажного воздуха, в котором водяной пар находится в перегретом состоянии. Ниже линии $\phi = 100\%$

расположена область тумана, в которой вода находится в парожидкостном состоянии. Выше линии $\varphi = 100\%$ нанесены пунктирные линии постоянных температур «мокрого» термометра, а также сплошные линии – изотермы «сухого» термометра. Эти линии идут более полого, чем линии $h = \text{const}$. При $\varphi = 100\%$ показания «сухого» и «мокрого» термометров одинаковы, поэтому одноименные изотермы на кривой насыщения $\varphi = 100\%$ пересекаются.

В нижней части диаграммы $h-d$ с учетом уравнения (4.6) проведена линия $p = f(d)$ парциальных давлений водяного пара. Значения парциальных давлений нанесены на правой стороне диаграммы.

Относительную влажность воздуха φ по диаграмме $h-d$ находят следующим образом. По психрометру определяют температуру «сухого» t_c и «мокрого» t_m термометров, а по этим значениям – точку на пересечении изотерм t_c и t_m , соответствующую состоянию влажного воздуха. По найденной точке определяют искомую величину φ .

Для определения температуры точки росы через точку, характеризующую состояние влажного воздуха, необходимо провести вертикальную прямую $d = \text{const}$ до пересечения с кривой насыщения $\varphi = 100\%$. Изотерма, проходящая через указанную точку пересечения, соответствует искомой температуре точки росы.

Парциальное давление p_n водяного пара, находящегося во влажном воздухе, состояние которого на диаграмме $h-d$ характеризуется найденной точкой (например, точка 4 на рис. 4.2), определяется следующим образом. Из точки 4 проводится вертикальная прямая $d = \text{const}$ до пересечения с линией парциального давления (точка 5) и далее из точки 5 – горизонтальная линия до крайней правой ординаты, где отмечены значения искомой величины $p_{п4}$.

Изображение процессов нагревания и охлаждения влажного воздуха

В процессе нагревания влажного воздуха его влагосодержание не изменяется, т. е. $d = \text{const}$. Если, например, состояние влажного воздуха до нагревания на диаграмме $h-d$ (см. рис. 4.2) соответствует точке 1, то для определения состояния влажного воздуха после нагревания необходимо из точки 1 провести вверх верти-

кальную прямую $d = \text{const}$ до пересечения ее в точке 2 с изотермой t_2 соответствующей температуре влажного воздуха после нагревания. Прямая 1-2 отражает процесс нагревания влажного воздуха. Нетрудно заметить, что энтальпия парогазовой смеси в процессе, изображаемая линией 1-2, увеличивается, а относительная влажность влажного воздуха уменьшается.

Очевидно, что процесс охлаждения влажного воздуха также будет изображаться прямой $d = \text{const}$, которую проводят от начальной точки по вертикали вниз.

Изображение процессов сушки

В инженерной практике весьма часто приходится решать задачи, связанные с сушкой влажных материалов ненасыщенным воздухом. В сушильной камере за счет теплоты предварительно нагретого воздуха происходит испарение влаги из высушиваемого материала, вследствие чего увеличивается влагосодержание воздуха.

На диаграмме $h-d$ (см. рис. 4.2) линией 2-3 изображен процесс сушки в идеальной камере, в которой отсутствуют потери теплоты в окружающую среду. Энтальпия воздуха в таком процессе сушки не изменяется, так как теплота от нагретого воздуха, затраченная на процесс испарения влаги, возвращается в воздух с паром. Разность $d_3 - d_2$ показывает количество испаренной влаги в граммах на 1 кг сухого воздуха, проходящего через сушильную камеру.

Процесс сушки материала в реальной сушильной камере всегда происходит с потерей теплоты в окружающую среду, поэтому он протекает с уменьшением энтальпии влажного воздуха (линия 2-4 на рис. 4.2).

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка является моделью сушильной камеры. Сушильным агентом в ней служит воздух, а материалом, подвергающимся сушке – хлопчатобумажная материя, смачиваемая перед опытом водой.

Схема установки показана на рис. 4.3. Основными ее элементами являются калорифер 8 и сушильная камера 11. Корпус калорифера состоит из двух вставленных друг в друга стальных труб. Наружная труба играет роль тепловой изоляции, а во внутренней находятся нагревательные элементы 7. Вентилятор 5 забирает воз-

дух из атмосферы и подает его по воздухопроводу 3 во входной патрубке калорифера 8. По зазору между трубами калорифера воздух направляется к нагревательным элементам, нагревается и далее через соединительную трубу 9 попадает в сушильную камеру. Сушильная камера представляет собой конструкцию, выполненную по принципу труба в трубе. В центр камеры помещена хлопчатобумажная ткань 10, подвергаемая сушке. Нижний конец ткани опущен в поддон 13 с водой. Во время опыта происходит постоянное увлажнение высушиваемого материала, что обеспечивает стационарность процесса. Горячий воздух проходит через сушильную камеру, затем выбрасывается через выхлопную трубу в атмосферу.

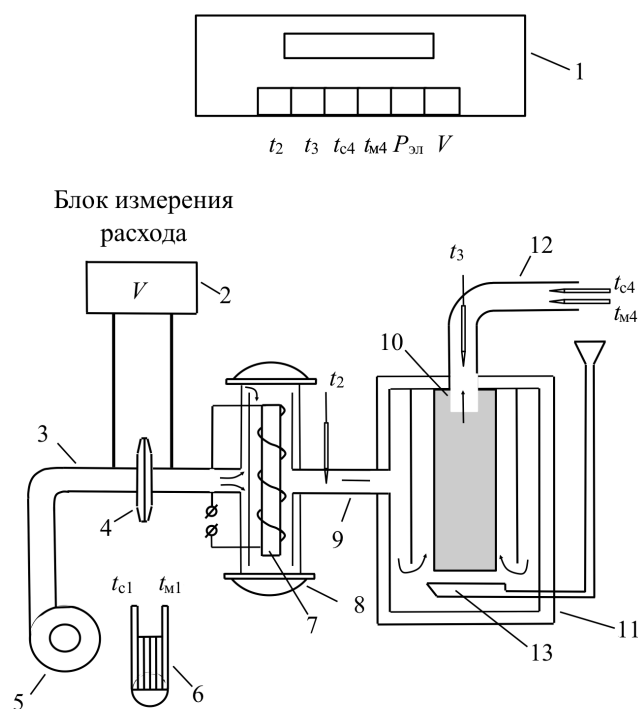


Рис. 4.3. Схема экспериментальной установки:

1 – цифровой вольтметр; 2 – блок измерения расхода; 3 – воздухопровод во входной патрубке калорифера; 4 – диафрагма блока измерения расхода; 5 – вентилятор; 6 – психрометр; 7 – нагревательные элементы; 8 – калорифер; 9 – соединительная труба; 10 – хлопчатобумажная ткань; 11 – сушильная камера; 12 – выхлопная труба; 13 – поддон с водой

При проведении лабораторной работы измеряют (см. рис. 4.3):

1) расход влажного воздуха с помощью диафрагмы 4 блока измерения расхода 2 и цифрового вольтметра 1 (расход воздуха через установку регулируют регулятором электрической мощности);

2) мощность нагревателя (для измерения используют цифровой ваттметр 1);

3) давление (для измерения применяют барометр, имеющийся в лаборатории);

4) состояние атмосферного воздуха на входе в калорифер (определяют психрометром 6 по показаниям «сухого» и «мокрого» термометров).

Температуру воздуха после калорифера измеряют с помощью термопары t_2 , температуру воздуха после сушилки – с помощью термопары t_3 , а состояние воздуха в выходной трубе 12 определяют по показаниям «сухой» и «мокрой» термопар: $t_{м4}$ и $t_{с4}$. Все термопары хромель-алюмелевые. Их термоЭДС измеряют цифровым вольтметром 1, к которому термопары подключают поочередно.

Порядок проведения эксперимента

Перед началом эксперимента поддон сушильной камеры заполняют водой и увлажняют хлопчатобумажную ткань. После этого включают вентилятор и электронагреватель в калорифере. С помощью психрометра проводят измерение относительной влажности воздуха, подаваемого в установку, измерение температур по психрометру продолжают до тех пор, пока температура, показываемая «мокрой» термопарой, не достигает минимума. По минимальному значению $t_{м1}$, соответствующему ему значению $t_{с1}$, определяют положение точки 1 на диаграмме $h-d$ и относительную влажность воздуха ϕ_1 , поступающего в калорифер (рис. 4.4).

Далее устанавливают стационарный режим работы установки. С этой целью мощность нагревателя регулируют таким образом, чтобы температура воздуха t_2 на выходе из калорифера составляла 60...70 °С.

Стационарный режим работы установки характеризуется постоянством показаний «сухой» и «мокрой» термопар, расположенных в выходной трубе сушильной камеры. При установлении стационарного режима работы установки все показания приборов записывают в протоколе опыта в течение 15 мин через каждые три минуты.

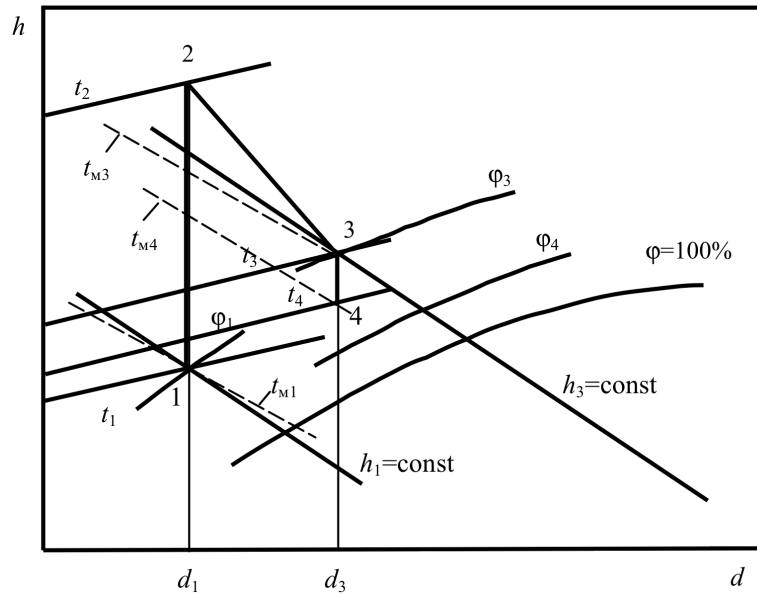


Рис. 4.4. Линии процессов на диаграмме $h-d$ влажного воздуха

Обработка результатов эксперимента

После окончания эксперимента необходимо найти средние значения температур t_2, t_3, t_{c4}, t_{m4} , затем построить на диаграмме $h-d$ линии процессов, происходящих с влажным воздухом. Точка 2 (см. рис. 4.4) определяет состояние воздуха после подогрева на выходе из калорифера. Подогрев воздуха в калорифере (линия 1-2) идет при $d = \text{const}$ ($d_1 = d_2$), поэтому, чтобы найти точку 2, следует провести вертикальную прямую из точки 1 до пересечения с изотермой t_2 (t_2 – температура воздуха на выходе из калорифера). Затем по показаниям «сухой» t_{c4} и «мокрой» t_{m4} термопар, расположенных в выходной трубе сушилки, находят точку 4, характеризующую состояние воздуха на выходе из установки. Чтобы найти точку 3, характеризующую состояние влажного воздуха на выходе из сушилки, проводят вертикальную прямую из точки 4 вверх до пересечения с изотермой t_3 (t_3 – температура влажного воздуха, измеренная на выходе из сушильной камеры), поскольку процесс 3-4 в выходной трубе идет при $d = \text{const}$ ($d_3 = d_4$).

Процесс сушки влажного материала протекает с увеличением влагосодержания воздуха, проходящего через сушильную камеру и с уменьшением его температуры. На диаграмме $h-d$ этот процесс изображают условной прямой линией 2-3 (см. рис. 4.4).

По точкам 1, 3 определяют влагосодержание d_1 и d_3 , относительную влажность воздуха (φ_1, φ_3), энтальпии (h_1, h_3) до и после сушки материала, а по разности $d_3 - d_1$ – количество испаренной из высушиваемого материала влаги, по разности энтальпий $h_3 - h_1$ – количество теплоты, затрачиваемой на испарение влаги и на нагрев уходящего из установки влажного воздуха.

Ниже приведен порядок расчета.

1. Рассчитать среднюю скорость испарения влаги $G_{\text{H}_2\text{O}}$ (кг/ч) из высушиваемого материала по формуле

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{d_3 - d_1}{1000} G_{\text{с.в}},$$

где $G_{\text{с.в}}$ – расход сухого воздуха, кг/ч, определяемый из уравнения состояния

$$G_{\text{с.в}} = \frac{133,3 p_{\text{с.в}} V_{\text{в.в}}}{R_{\text{с.в}} (t_{\text{с1}} + 273)};$$

$p_{\text{с.в}}$ – парциальное давление* сухого воздуха во влажном воздухе, мм рт. ст., $p_{\text{с.в}} = p_{\text{в.в}} - p_{\text{п}} = B - p_{\text{п}}$; $p_{\text{в.в}}$ – давление влажного воздуха, равное барометрическому давлению, мм рт. ст.; $p_{\text{п}}$ – парциальное давление водяного пара во влажном воздухе, мм рт. ст.; $V_{\text{в.в}}$ – объемный расход влажного воздуха, м³/ч (по расходомеру); $R_{\text{с.в}}$ – газовая постоянная сухого воздуха ($R_{\text{с.в}} = 287$ Дж/(кг·с)); $t_{\text{с1}}$ – температура воздуха на входе в калорифер, определяемая по показаниям «сухого» термометра переносного психрометра, °С.

2. Вычислить количество теплоты, затраченной (за 1 ч) на подогрев влажного воздуха в калорифере и испарение влаги из высушиваемого материала в сушильной камере, по формуле

* Измерение давления в миллиметрах ртутного столба связано с тем, что измерительные приборы экспериментальной установки градуированы в мм рт. ст.

$$Q = (h_3 - h_1)G_{c.v.}$$

3. Определить изобарную удельную массовую (на 1 кг сухого воздуха) теплоемкость воздуха в калорифере (при влагосодержании $d = d_1$):

$$C_{pm}^{c.v.} = C_{pm}^{c.v.} + \frac{C_{pm}^n d_1}{1000},$$

где $C_{pm}^{c.v.}$ – удельная массовая теплоемкость сухого воздуха (1,0 кДж/(кг·°C)); C_{pm}^n – удельная массовая теплоемкость водяного пара (1,97 кДж/(кг·°C)).

4. Рассчитать теплоту, затраченную (за 1 ч) на нагрев влажного воздуха в калорифере $Q_{v.v.}$, кДж/ч:

$$Q_{v.v.} = C_{pm}^{c.v.} G_{c.v.} (t_3 - t_1).$$

5. Рассчитать теплоту, затраченную на испарение влаги из сушиваемого материала:

$$Q_{исп} = Q - Q_{v.v.}$$

6. Определить теплоту, затраченную на 1 кг испаренной влаги, кДж/кг:

$$q_{исп} = \frac{Q_{исп}}{P_{эл}},$$

где $P_{эл}$ – мощность калорифера, Вт (по показанию ваттметра).

7. Найти суммарные потери теплоты установки:

$$Q_{пот} = 3,6P_{эл} - Q_{исп}.$$

8. Рассчитать суммарные потери теплоты установки на 1 кг испаренной влаги:

$$q_{пот} = \frac{Q_{пот}}{G_{H_2O}}.$$

9. Определить относительные суммарные тепловые потери, %:

$$\gamma = \frac{q_{пот}}{q_{пот} + q_{исп}} \cdot 100 \text{ \%}.$$

10. Вычислить полезно использованную в установке теплоту:

$$n = 100 - \gamma.$$

Контрольные вопросы

1. Как устроен психрометр?
2. Что такое абсолютная и относительная влажность?
3. Что называется влагосодержанием влажного воздуха?
4. Что называется парциальным давлением?
5. Объясните значение линий диаграммы $h-d$?
6. Как определить температуру точки росы по диаграмме $h-d$?
7. Как определить парциальное давление водяного пара по заданному состоянию влажного воздуха на диаграмме $h-d$?
8. Изобразите процессы нагрева, сушки и охлаждения влажного воздуха на диаграмме $h-d$.
9. От чего зависит теплоемкость влажного воздуха?

РАБОТА ТД-05
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
АДИАБАТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА
ЧЕРЕЗ СУЖАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

Цель работы – изучение закономерностей процесса течения воздуха через сужающееся сопло при различных перепадах давления, ознакомление с экспериментальными методами измерения основных параметров потока воздуха и критического отношения давлений.

Продолжительность работы – 4 ч.

Краткие теоретические сведения

В современной технике широко используется процесс стационарного течения воздуха и других газов в каналах различной формы. В термодинамике этот процесс рассматривают как локально равновесный, при котором каждая частица движущегося газа находится в термодинамическом равновесии и имеет вполне определенные значения параметров состояния (давление, температура, плотность и т. д.). При этом полагают, что движение газа является установившимся и одномерным, при котором параметры газа изменяются только вдоль одной координаты (по направлению движения).

Сужающееся сопло – частный случай проточной термодинамической системы, для которой уравнение первого начала термодинамики имеет вид

$$dh = dq - dl_{\text{техн}} - d\frac{w^2}{2} - d(gz) - dl_{\text{тр}} + dq_{\text{тр}}, \quad (5.1)$$

где dh – изменение энтальпии элементарного объема движущейся среды; dq – количество теплоты, подведенной извне через стенки канала или выделившейся в самом потоке (например, при наличии

химических реакций горения); $dl_{\text{техн}}$ – техническая работа; $d\frac{w^2}{2}$ – изменение кинетической энергии; $d(gz)$ – изменение потенциальной энергии в поле силы тяжести; $dl_{\text{тр}}$ – работа сил трения; $dq_{\text{тр}}$ – теплота трения.

Зависимость скорости потока от изменения энтальпии и температуры

При течении газа по каналам с неподвижными стенками техническая работа потока отсутствует: $dl_{\text{техн}} = 0$. Изменение потенциальной энергии пренебрежимо мало: $d(gz) = 0$. Количество теплоты dq , передаваемой через стенки канала, в большинстве случаев пренебрежимо мало по сравнению с изменением dh энтальпии элементарного объема движущейся среды, изменением кинетической $d(w^2/2)$ и потенциальной $d(gz)$ энергий, работой сил трения $dl_{\text{тр}}$ и теплотой трения $dq_{\text{тр}}$ (см. уравнение (5.1)). Если при этом нет внутреннего тепловыделения, то $dq = 0$ (адиабатическое течение). Тогда

$$dh = -d\frac{w^2}{2} - dl_{\text{тр}} + dq_{\text{тр}}. \quad (5.2)$$

В установившемся потоке вся работа сил трения преобразуется в энергию теплового движения частиц газа, т. е. в теплоту, так что

$$dl_{\text{тр}} = dq_{\text{тр}}. \quad (5.3)$$

Таким образом, термическое уравнение энергии адиабатического течения по каналу с неподвижными стенками имеет вид

$$dh = -d\frac{w^2}{2}. \quad (5.4)$$

Это уравнение справедливо как при отсутствии, так и при наличии сил трения.

Интегрирование уравнения (5.4) дает связь между скоростью и энтальпией в двух произвольных сечениях 1 и 2 потока:

$$w_2 = \sqrt{w_1^2 + 2(h_1 - h_2)}. \quad (5.5)$$

Если начальная скорость w_1 очень мала (площадь поперечного сечения 1 потока намного больше площади сечения 2 (истечение газа из сосуда большого объема), то скорость в произвольном сечении канала рассчитывается по формуле

$$w = \sqrt{2(h_1 - h_2)}. \quad (5.6)$$

В случае течения идеального газа $dh = C_{pm}dT$, и если пренебречь зависимостью теплоемкости от температуры, то скорость течения можно найти по изменению температуры:

$$w_2 = \sqrt{2C_{pm}(T_1 - T_2)}. \quad (5.7)$$

В реальных условиях часть работы сил давления вследствие внутреннего трения превращается в теплоту, т. е. процесс течения газа не является изэнтропийным (энтропия возрастает). На рис. 5.1 линией 1-2 изображен обратимый изэнтропийный процесс, а линией 1-2' – необратимый процесс течения газа (с трением) при одинаковом перепаде давления и увеличении энтропии от значения s_1 до значения s'_2 . Так как $(h_1 - h'_2) \ll (h_1 - h_2)$, то и скорость течения газа при наличии трения $w'_2 = \sqrt{2(h_1 - h'_2)} = \sqrt{2C_{pm}(T_1 - T'_2)}$ меньше теоретической: $w'_2 < w_2$. Для оценки потерь скорости вводят коэффициент скорости

$$\varphi = w'_2 / w_2 < 1, \quad (5.8)$$

значение которого определяют опытным путем. Уменьшение расхода газа, вызванное наличием трения, учитывают введением коэффициента расхода

$$\Psi = G_d / G_T, \quad (5.9)$$

где G_d – действительный расход; G_T – теоретический расход.

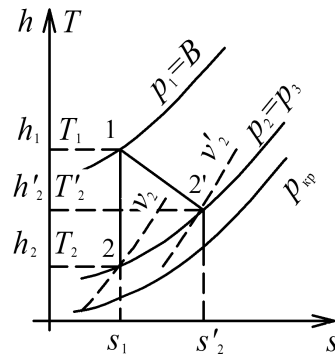


Рис. 5.1. Процесс течения газа в диаграмме $h-s$

Для различных сопел экспериментально полученные значения коэффициентов φ и Ψ лежат в диапазоне 0,93...0,98 и зависят от конструкции сопел и шероховатости внутренней поверхности.

Зависимость скорости потока от изменения давления

Согласно первому закону термодинамики

$$dh = dq_{\text{общ}} + dp/\rho, \quad (5.10)$$

где $dq_{\text{общ}} = dq + dq_{\text{тр}}$.

Объединив формулы (5.2) и (5.10) для адиабатического течения газа, уравнение первого закона термодинамики можно представить в механической форме:

$$d \frac{w^2}{2} = -\frac{dp}{\rho} - dl_{\text{тр}}. \quad (5.11)$$

Если пренебречь влиянием трения, то зависимость изменения скорости потока от изменения давления по направлению течения газа выразится как

$$d \frac{w^2}{2} = wdw = -\frac{dp}{\rho}. \quad (5.12)$$

Адиабатическое течение идеального газа без трения является изэнтропийным процессом, в котором зависимость плотности от давления выражается так:

$$\rho = \rho_1 \left(\frac{p}{p_1} \right)^{1/k}, \quad (5.13)$$

где $k = C_p/C_v$ – показатель адиабаты.

В результате интегрирования уравнения (5.12) с учетом (5.13) устанавливается связь между скоростью и давлением в двух произвольных сечениях 1 и 2 потока:

$$w_2 = \sqrt{w_1^2 + 2 \frac{k-1}{k} \frac{p_1}{\rho_1} \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right)}, \quad (5.14)$$

где $\beta = p_2/p_1 = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^k$, а w_1, p_1, ρ_1 и w_2, p_2, ρ_2 – соответственно скорость, давление и плотность газа в сечениях 1 и 2 потока.

Если $w_1 \cong 0$, то скорость газа в произвольном сечении канала выражается через отношение давлений:

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{k-1}{k} \frac{p_1}{\rho_1} \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)}. \quad (5.15)$$

Зависимость скорости потока от площади поперечного сечения канала сопла

Изменение площади поперечного сечения канала влияет на изменение скорости потока по-разному, в зависимости от фактической скорости газа в данном сечении.

Скорость потока связана с площадью поперечного сечения канала и плотностью газа уравнением расхода:

$$G = \rho w f = \text{const}, \quad (5.16)$$

где G – секундный расход газа (не изменяется по длине канала), кг/с; ρ – плотность, кг/м³; f – площадь поперечного сечения канала, м².

После дифференцирования уравнения (5.16) получим

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dw}{w} + \frac{df}{f} = 0. \quad (5.17)$$

Результатом совместного решения уравнений (5.12) и (5.17) для изоэнтропийного потока является соотношение между изменением скорости потока и изменением площади сечения канала:

$$\frac{dw}{w} = \frac{-df/f}{1 - (w/a)^2} = \frac{-df/f}{1 - M^2}, \quad (5.18)$$

где $a = (\partial p / \partial \rho)_s = \sqrt{kRT}$ – скорость распространения звука в газе; $M = w/a$ – число Маха.

Из соотношения (5.18), в частности, следует, что ускорение дозвукового потока может быть осуществлено только в сужающемся канале ($dw > 0$ при $df < 0$). Скорость потока достигает максималь-

ного значения в выходном (самом узком) сечении сопла. При определенном значении перепада давления газа в выходном и входном сечениях сопла скорость потока в самом узком сечении сопла может достичь скорости звука. Такой режим течения газа в сопле называют критическим, а параметры потока в выходном сечении сопла – критическими параметрами.

В конкретных задачах, связанных с течением газа, известными параметрами являются давление p_1 перед соплом и давление p_3 за соплом. Уменьшение давления p_3 при неизменном давлении p_1 приводит к перераспределению давления вдоль сопла, при этом в выходном сечении устанавливается давление p_2 . Оно равно давлению p_3 до тех пор, пока скорость потока газа в выходном сечении сопла не станет равна скорости звука в этом же сечении (местной скорости звука). Дальнейшее уменьшение давления p_3 уже не будет сказываться на перераспределении давления в сопле, так как изменения давления p_3 , происходящие со скоростью звука, не могут проникнуть внутрь сопла. Таким образом, давление газа в выходном сечении сопла остается неизменным, равным критическому ($p_2 = p_{кр}$). Отношение давлений $\beta_{кр} = p_{кр}/p_1$, при котором устанавливается критический режим течения газа, называют критическим. Его значение зависит только от свойств газа и вычисляется по формуле $\beta_{кр} = (2/(k+1))^{k/(k-1)}$. Для воздуха $k = 1,41$ и $\beta_{кр} = 0,528$.

Зависимости скорости течения из сужающегося сопла и расхода газа от $\beta = p_3/p_1$ представлены на рис. 5.2.

Таким образом, можно выделить три режима течения газа в сужающемся сопле:

1) докритический режим (линии $b - 1$ и $m - 1$) –

$$\beta > \beta_{кр},$$

при котором

$$p_2 = p_3; \quad w < a; \quad M = w/a < 1;$$

2) критический режим (точки m и b) –

$$\beta = \beta_{кр},$$

при котором

$$p_2 = p_3 = p_{кр}; \quad w = a; \quad M = 1;$$

3) сверхкритический режим (линии $c - b$ и $n - m$) –

$$\beta < \beta_{кр},$$

при котором

$$p_3 < p_{кр}; \quad w = a; \quad M = 1.$$

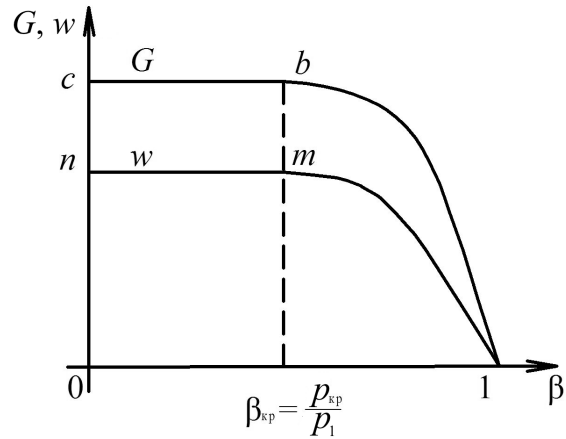


Рис. 5.2. Зависимости расхода газа и скорости потока от перепада давления

Непрерывное ускорение потока до сверхзвуковых скоростей может быть осуществлено в сопле Лавалья, состоящем из участка сужения канала (где происходит ускорение дозвукового потока) и следующего за ним расширяющегося канала, на котором ускоряется сверхзвуковой поток. В узком сечении сопла Лавалья скорость потока равна местной скорости звука.

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 5.3.

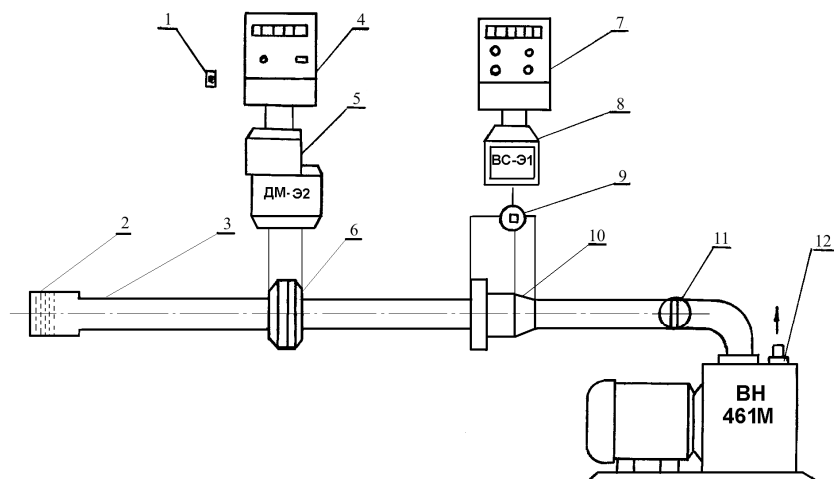


Рис. 5.3. Схема экспериментальной установки:

1 – тумблер электропитания; 2 – сетчатый фильтр; 3 – трубка из коррозионно-стойкой стали с рабочим элементом; 4 – блок контроля расхода; 5 – дифференциальный манометр ДМ-Э2; 6 – нестандартная расходная диафрагма; 7 – блок контроля давления; 8 – мановакуумметр; 9 – кран КВ-6; 10 – сужающееся сопло; 11 – вентиль; 12 – вакуумный насос

Установка включает: рабочий участок с сужающимся соплом, диаметр минимального сечения $d_{кр} = 1,68$ мм; вакуумный насос ВН 461М; приборы и блоки измерения, контроля и управления. Рабочий участок представляет собой трубку 3 из коррозионно-стойкой стали с рабочим элементом – сужающимся соплом 10.

Воздух из помещения поступает через сетчатый фильтр 2 и нестандартную расходную диафрагму 6 диаметром 3 мм к сужающемуся соплу 10. Перепад давления создается вакуумным насосом 12. Изменение перепада давления и, следовательно, регулирование расхода воздуха, проходящего через сопло, осуществляются изменением проходного сечения вентиля 11. Перепад давления на расходной диафрагме 6 измеряется дифференциальным манометром ДМ-Э2 5 и преобразуется в электрический сигнал, который через усилитель УП-20 поступает на блок контроля расхода 4 (миллиамперметр М17 30 А). Усилитель УП-20 и блок контроля расхода смонтированы в одном корпусе.

Для измерения давления газа перед соплом в минимальном сечении и за соплом имеются отверстия диаметром 0,5 мм. Измере-

ние проводится с помощью отводов (импульсных трубок), подсоединенных через кран 9 КП-6 к блоку контроля давления 7 и мановакуумметру 8.

Приборы, используемые при выполнении лабораторной работы, имеют класс точности 1,0.

Порядок проведения эксперимента

Экспериментальное исследование включает измерение действительного расхода воздуха G_d при различных значениях отношения давлений $\beta = p_3 / p_1$, начиная с $\beta = 1$ и кончая наименьшим значением, достигаемым в эксперименте. Все показания приборов необходимо записывать в журнал наблюдений и соблюдать порядок проведения эксперимента.

1. Перед началом работы измерить температуру T_1 и давление p_1 на входе в сопло. Давление можно принять равным барометрическому ($p_1 = B$), так как скорость газа и потери на трение перед соплом очень малы.

Измерения проводятся с помощью лабораторных барометра и термометра.

2. При полностью закрытом вентиле 11 (см. рис. 5.3) включить: электрическое питание тумблером электропитания 1 – кнопкой «Сеть», вакуумный насос 12 – кнопкой «Обдув» на блоке контроля расхода 4; мановакуумметр 8 – кнопкой «Вкл.». При этом загорятся лампочки индикации, указывающие на их включение.

В этом случае перепад давления в сопле отсутствует, т. е. $\beta = 1$ ($p_1 = p_2 = p_3 = B$), и, следовательно, расход воздуха равен нулю: $G_d = 0$.

3. Плавно открыть вентиль 11 и установить на блоке контроля давления 7 значение перепада давления за соплом $\Delta p_3 = 0,1$ атм (Δp_3 – показание мановакуумметра, равное разности барометрического и абсолютного давлений, $\Delta p_3 = B - p_3$)*.

Убедиться в стационарности режима, что характеризуется постоянством давления Δp_3 во времени.

* Измерение перепада давления в атмосферах связано с тем, что измерительные приборы экспериментальной установки градуированы в атмосферах.

Используя кран 9, измерить с помощью мановакуумметра 8 перепад давления Δp_2 в выходном сечении сопла, равное разности барометрического давления B и абсолютного давления p_2 .

По показаниям блока контроля расхода 4 измерить объемный расход воздуха в условных единицах шкалы L , мм.

4. Последовательно выполнить измерения на других режимах, при этом на каждом последующем режиме перепад давления Δp_3 за соплом увеличивать его вентилем 11 на 0,1 атм по шкале контроля давления. Последний режим провести при полностью открытом вентиле 11.

5. Результаты измерений записать в журнал наблюдений.

6. Выключить установку, отключив мановакуумметр 8, блок контроля расхода 4, электропитание тумблером 1 и приступить к обработке полученных результатов.

Обработка результатов эксперимента

1. Для каждого режима перевести показания мановакуумметра Δp_i из системы МКС (атм) в систему СИ (Па):

$$\Delta p'_2 = \Delta p_2 \cdot 0,981 \cdot 10^5;$$

$$\Delta p'_3 = \Delta p_3 \cdot 0,981 \cdot 10^5.$$

2. Найти значения абсолютных давлений, Па:

$$p_2 = p_1 - \Delta p'_2;$$

$$p_3 = p_1 - \Delta p'_3.$$

3. Рассчитать отношение давлений:

$$\beta = p_3 / p_1.$$

4. Используя график градуировки блока контроля расхода 4 (см. рис. 5.4), найти действительный объемный расход воздуха V'_d , м³/ч, и вычислить по формуле $V_d = V'_d / 3600$ м³/с.

5. Рассчитать действительный массовый расход воздуха, кг/с:

$$G_d = \frac{V_d p_1}{R T_1}, \quad (5.19)$$

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

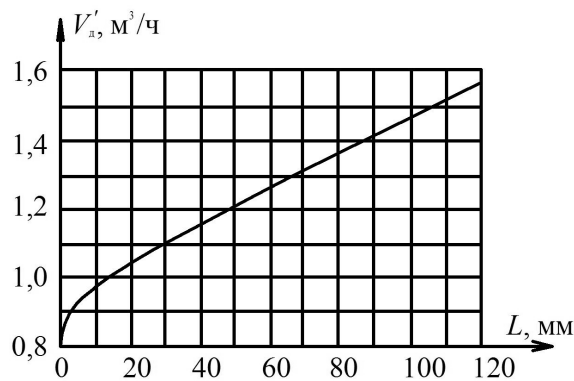


Рис. 5.4. График градуировки блока контроля расхода

6. Найти относительный действительный расход воздуха:

$$\bar{G}_d = \frac{G_d}{G_{d\max}}, \quad (5.20)$$

где $G_{d\max}$ — экспериментально определенный максимальный действительный расход воздуха.

7. Построить график зависимости относительного расхода воздуха \bar{G}_d от отношения давлений β .

8. Задать два расчетных режима течения газа: $\beta > \beta_{\text{кр}}$ — докритический и $\beta < \beta_{\text{кр}}$ — сверхкритический.

9. Теоретическое значение температуры воздуха на выходе из сопла T_2 найти по формуле для адиабатного процесса:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (5.21)$$

Рассчитать теоретическую скорость течения воздуха w_2 , используя формулу (5.7) и принимая теплоемкость воздуха $C_{pm} = 1006 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Определить теоретический удельный объем воздуха на выходе из сопла v_2 :

$$v_2 = RT_2 / p_2. \quad (5.22)$$

10. Для выбранного докритического режима течения газа ($\beta > \beta_{кр}$) вычислить теоретический расход воздуха, кг/с:

$$G_T = \frac{f_2 w_2}{v_2}, \quad (5.23)$$

где $f_2 = f_{кр} = 0,25\pi d_{кр}^2$ – площадь минимального сечения сопла, м²; w_2 – теоретическая скорость течения газа на выходе из сопла, м/с; v_2 – удельный объем воздуха в выходном сечении сопла, м³/кг.

11. Найти для выбранного докритического режима течения газа ($\beta > \beta_{кр}$) коэффициент расхода сопла

$$\Psi = G_d / G_T. \quad (5.24)$$

12. Определить действительную скорость течения воздуха. Точки 2 и 2' находятся на одной и той же изобаре p_2 (см. рис. 5.1), но точное положение точки 2' не известно, поэтому действительную скорость истечения w'_2 рассчитывают методом последовательных приближений с помощью следующих формул:

$$w'_2 = 44,85 \sqrt{(T_1 - T'_2)}; \quad (5.25)$$

$$w'_2 = \frac{G_d v'_2}{f_{кр}}, \quad (5.26)$$

где G_d – действительный (по результатам измерений) расход воздуха, кг/с; $f_{кр}$ – площадь минимального сечения сужающегося сопла, м²; v'_2 – действительный удельный объем воздуха на выходе из сопла при течении с трением, м³/кг, его рассчитывают по действительной температуре воздуха на выходе из сопла T'_2 , К:

$$v'_2 = RT'_2 / p_2. \quad (5.27)$$

Так как значение температуры T'_2 не известно, то в первом приближении задаются значением T'_2 на 2...3 К выше значения температуры T_2 , найденного в п. 9.

Значения скорости течения газа w'_2 , рассчитанные по формулам (5.25) и (5.26), должны быть одинаковыми. Если полученные таким способом значения скорости не равны, то задаются значения температуры T_2'' во втором приближении (на 2...3 К выше или ниже значения T_2' течения газа) и так до тех пор, пока не будут получены одинаковые значения скорости w_2'' по формулам (5.25) и (5.26).

13. Определить коэффициент скорости $\varphi = w_2'' / w_2$.

14. Найти коэффициент расхода Ψ и коэффициент скорости φ (для сверхкритического режима, $\beta < \beta_{кр}$).

15. Рассчитать теоретический расход воздуха. При этом необходимо помнить, что при сверхкритическом режиме течения газа ($\beta < \beta_{кр}$) давление воздуха на выходе из сужающегося сопла всегда равно критическому: $p_2 = p_{кр} = \beta_{кр} p_1$.

Теоретический расход воздуха (кг/с) определяют по формуле

$$G_{т.кр} = \frac{f_{кр} w_{кр}}{v_{кр}},$$

где $w_{кр}$ – скорость течения воздуха из сопла при критическом режиме $\beta = \beta_{кр}$, ее рассчитывают по формуле (5.5):

$$w_{кр} = 44,85 \sqrt{T_1 - T_{кр}}.$$

Теоретическое значение температуры в минимальном сечении сопла вычисляют по формуле

$$T_{кр} = T_1 \beta_{кр}^{\frac{k-1}{k}} = 0,528^{0,286} T_1 = 0,83 T_1.$$

Удельный объем воздуха в минимальном сечении сопла определяют из уравнения состояния идеального газа:

$$v_{кр} = \frac{R T_{кр}}{p_{кр}},$$

где $p_{кр} = 0,528 p_1$.

Расчет действительной скорости течения воздуха из сопла ведут так же, как в п. 12:

$$w'_{кр} = 44,85 \sqrt{T_1 - T'_{кр}};$$

$$w'_{кр} = \frac{G_d v'_{кр}}{f_{кр}}.$$

16. Определить коэффициент расхода сопла для сверхкритического режима течения по формуле

$$\Psi = G_d / G_{т.кр}.$$

17. Вычислить коэффициент скорости сопла для сверхкритического режима по формуле

$$\varphi = w''_{кр} / w'_{кр}.$$

Контрольные вопросы

1. Какое течение называется установившимся?
2. Что называется соплом?
3. Почему течение газа из сопла можно считать адиабатическим?
4. Чем создается перепад давления в экспериментальной установке?
5. Что такое отношение давлений β и от чего оно зависит?
6. Что такое критическое отношение давлений $\beta_{кр}$ и от чего оно зависит?
7. Как изменяются скорость и расход газа при уменьшении давления газа на выходе из сужающегося сопла (при $\beta < \beta_{кр}$ и $\beta > \beta_{кр}$)?
8. Как находится действительная скорость течения?
9. Как рассчитывается действительная температура воздуха на выходе из сопла?
10. Что такое φ и Ψ и от чего они зависят?

ЛИТЕРАТУРА

Исаев С.И. Курс химической термодинамики: Учеб. пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1975.

Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. К.П. Мищенко, А.А. Равделя. Л.: Химия, Ленингр. отд-ние, 1974.

Методические указания к лабораторным работам по курсу «Термодинамика» / В.Н. Афанасьев, А.А. Афонин, С.И. Исаев и др.; Под ред. А.И. Кожина. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988.

Термодинамические свойства газов / М.П. Вукалович, В.А. Кириллин, С.А. Ремизов и др. М.: Машгиз, 1953.

Техническая термодинамика: Учеб. для вузов / Под ред. В.И. Крутова. М.: Высш. шк., 1981.

СОДЕРЖАНИЕ

РАБОТА ТД-01. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА.....	3
РАБОТА ТД-02. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ЭФФЕКТА СГОРАНИЯ ВЕЩЕСТВА	13
РАБОТА ТД-03. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ В ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.....	25
РАБОТА ТД-04. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ.....	41
РАБОТА ТД-05. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДИАБАТИЧЕС- КОГО ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СУЖАЮЩЕЕСЯ СОПЛО	55
ЛИТЕРАТУРА.....	69

Учебное издание

Афанасьев Валерий Никанорович
Гришин Юрий Михайлович
Ковалев Андрей Валентинович
Кулагин Алексей Юрьевич
Павлова Ирина Борисовна
Россихин Николай Алексеевич

**Сборник лабораторных работ
по курсу «Термодинамика»**

Редактор *О.М. Королева*
Корректор *Е.В. Авалова*
Компьютерная верстка *О.В. Беляевой*

Подписано в печать 20.02.2012. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 4,19. Изд. № 79. Тираж 300 экз.
Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Для заметок