
№ ****



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И
НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет»

КАФЕДРА ФИЗИКИ

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ГАЗОВОГО ЦИКЛА**

Руководство
к лабораторной работе №203

Для студентов всех технических направлений
и всех форм обучения

ИНЭП

Таганрог
Издательство Южного федерального университета
Таганрог 2020

1. Термодинамические процессы идеального газа

Основные законы и соотношения

1. Основы термодинамики.

1.1. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона):

$$pV = (m/\mu)RT = \nu RT,$$

где p – давление; V – объём газа; m – масса газа; μ – его молярная масса; R – молярная газовая постоянная; T – термодинамическая температура; ν – количество вещества.

1.2. Элементарная работа и работа изменения объёма системы (работа расширения):

$$\delta A_p = pdV \text{ и } A_p = \int_{(1)}^{(2)} pdV,$$

где p – давление внутри системы; dV – приращение объёма системы; символами (1) и (2) обозначены начальные и конечные состояния термодинамической системы.

1.3. Графическая интерпретация работы расширения (рис. 1).

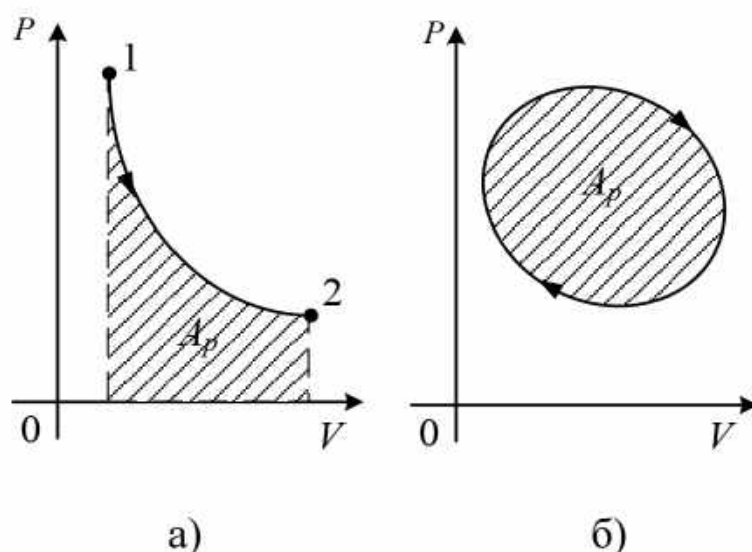


Рис. 1

1.4. Теплоёмкость термодинамической системы (тела):

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

где dT – элементарное приращение температуры термодинамической системы (тела) вследствие сообщения ей элементарного количества теплоты δQ .

1.5. Удельная теплоёмкость системы (тела) массой m :

$$c = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT} = \frac{C}{m}.$$

1.6. Молярная теплоёмкость системы (тела):

$$C_{\mu} = \frac{1}{\nu} \frac{\delta Q}{dT} = c\mu.$$

1.7. Количество теплоты, полученное термодинамической системой (телом):

$$Q = \int_{(1)}^{(2)} C dT = \int_{(1)}^{(2)} c m dT \text{ (интеграл берется по пути процесса).}$$

1.8. Изменение внутренней энергии идеального газа:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1) = \frac{i}{2} \nu R \Delta T,$$

где i – число степеней свободы молекулы газа.

1.9. Первое закон термодинамики в дифференциальной форме:

$$\delta Q = dU + \delta A_p; \quad dU = \delta A_{вн} + \delta Q,$$

где δQ – элементарное количество теплоты, полученное системой от внешних систем; dU – элементарное приращение внутренней энергии рассматриваемой системы; δA_p – элементарная работа расширения рассматриваемой системы; $\delta A_{вн} = -\delta A_p$ – работа внешних систем над рассматриваемой системой.

1.10. Первое закон термодинамики в интегральной форме:

$$Q = \Delta U + A_p, \quad \Delta U = A_{вн} + Q,$$

где Q – количество теплоты, сообщенное системе окружающими системами; ΔU – изменение внутренней системы; A_p – работа расширения.

Термодинамические процессы идеального газа

1.11. Изотермический процесс ($T = const, m = const, \mu = const$).

1.11.1. Уравнение изотермического процесса (закон Бойля – Мариотта):

$$pV = const,$$

где p и V – соответственно давление и объём газа.

1.11.2. Работа расширения газа:

$$A_p = \frac{m}{\mu} RT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = \nu RT \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) = p_1 V_1 \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right).$$

где p_1, V_1 и p_2, V_2 – соответственно начальные и конечные значения давления и объёма газа.

1.11.3. Изменение внутренней энергии: $\Delta U = 0$.

1.11.4. Первый закон термодинамики, количество теплоты:

$$Q = A_p = \frac{m}{\mu} RT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = \nu RT \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right).$$

1.11.5. Теплоёмкость: $C_T = \infty$.

1.12. Изобарический процесс ($p = const, m = const, \mu = const$).

1.12.1. Уравнение изобарического процесса (закон Гей-Люссака):

$$V_1/V_2 = T_1/T_2 = const,$$

где V_1, T_1 и V_2, T_2 – соответственно начальные и конечные значения объёма и температуры газа.

1.12.2. Работа расширения: $A_p = p(V_2 - V_1) = \nu R \Delta T$.

1.12.3. Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R (T_2 - T_1) = \frac{i}{2} p (V_2 - V_1) = \frac{i}{2} A_p.$$

1.12.4. Первый закон термодинамики, количество теплоты:

$$Q = \Delta U + A_p = \frac{i+2}{2} \frac{m}{\mu} R (T_2 - T_1) = \frac{i+2}{2} A_p.$$

1.12.5. Теплоёмкость (молярная и удельная):

$$C_{\mu p} = \frac{i+2}{2} R; \quad c_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{\mu},$$

где $C_{\mu p}$ – молярная теплоёмкость газа при постоянном давлении; c_p – удельная теплоёмкость газа при постоянном давлении.

1.13. Изохорический процесс ($V = const, m = const, \mu = const$).

1.13.1. Уравнение изохорического процесса (закон Шарля):

$$p_1/p_2 = T_1/T_2 = const,$$

где p_1, T_1 и p_2, T_2 – соответственно начальные и конечные значения давления и температуры газа.

1.13.2. Работа расширения: $A_p = 0$.

1.13.3. Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R (T_2 - T_1) = \frac{i}{2} \nu R \Delta T.$$

1.13.4. Первый закон термодинамики, количество теплоты:

$$Q = \Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1) = \frac{i}{2} \nu R(T_2 - T_1).$$

1.13.5. Теплоёмкость (молярная и удельная):

$$C_{\mu V} = \frac{i}{2} R, \quad c_V = \frac{i}{2} \frac{R}{\mu},$$

где $C_{\mu V}$ – молярная теплоёмкость газа при постоянном объёме; c_V – удельная теплоёмкость газа при постоянном объёме.

1.13.6. Уравнение Майера: $C_{\mu p} - C_{\mu V} = R$.

1.14. Адиабатический процесс ($Q = 0$).

1.14.1. Уравнение адиабатического процесса (уравнение Пуассона):

- в координатах (p, V) : $pV^\gamma = const$;
- в координатах (p, T) : $T^\gamma p^{(1-\gamma)} = const$;
- в координатах (T, V) : $TV^{(\gamma-1)} = const$,

где $\gamma = c_p/c_V = C_{\mu p}/C_{\mu V} = (i + 2)/i$ – показатель адиабаты, i – число степеней свободы молекулы.

1.14.2. Работа расширения:

$$A_p = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] = \frac{p_1 V_1}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \right] = \frac{m}{\mu} \frac{R}{\gamma-1} (T_1 - T_2).$$

1.14.3. Изменение внутренней энергии, первый закон термодинамики:

$$\Delta U = -A_p = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1) = \frac{i}{2} \nu R(T_2 - T_1).$$

1.14.4. Теплоёмкость: $C = 0$.

1.5. Политропический процесс ($C = const$).

1.5.1. Уравнение политропического процесса:

- в координатах (p, V) : $pV^n = const$;
- в координатах (p, T) : $T^n p^{(1-n)} = const$;
- в координатах (T, V) : $TV^{(n-1)} = const$,

где n – показатель политропы.

1.5.2. Работа расширения:

$$A_p = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right] = \frac{p_1 V_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right] = \frac{m}{\mu} \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2).$$

1.5.3. Изменение внутренней энергии системы:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1) = \frac{i}{2} \nu R(T_2 - T_1).$$

1.5.4. Первый закон термодинамики, количество теплоты:

$$Q = \Delta U + A_p.$$

1.5.5. Молярная теплоёмкость:

$$C_{\mu m} = \frac{n C_{\mu V} - C_{\mu p}}{n - 1} \Leftrightarrow n = \frac{C_{\mu m} - C_{\mu p}}{C_{\mu m} - C_{\mu V}},$$

где $C_{\mu V}$ и $C_{\mu p}$ – молярные теплоёмкости газа при постоянных объёме и давлении соответственно.

1.5.6. Значения показателя политропы n для различных изопроцессов:

$n = 0$ – изобарический процесс;

$n = 1$ – изотермический процесс;

$n = \gamma$ – адиабатический процесс;

$n = \infty$ – изохорический процесс.

2. Термодинамический анализ газового цикла

2.1. Цель работы

Освоение и закрепление знаний студентов по следующим разделам дисциплины Физика: термодинамические процессы в идеальном газе, первый и второй законы термодинамики, циклы тепловых машин, $p - V$ - и $S - T$ -диаграммы.

2.2. Разделы теории

Идеальный газ. Уравнение состояния идеального газа. Политропические процессы в идеальном газе. Первый и второй законы термодинамики. Применение первого закона термодинамики к изопроцессам в идеальном газе. Циклы тепловых машин.

[1. С. 227–211, 222–250; 2. С. 81–88, 99–108]

2.3. Приборы и принадлежности

Индивидуальный схематический термодинамический цикл тепловой машины для аналитического и графического расчёта, миллиметровая бумага, логарифмическая бумага.

2.4. Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и соответствующие разделы теории (см. п.2.2).

2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

3. Подготовить отчет по лабораторной работе в соответствии с требованиями, предъявляемыми к отчетам (см. далее разд. 3).

4. Выписать из прил. 1, в соответствии с индивидуальным номером варианта, вид теоретического цикла для аналитического и графического расчёта, известные параметры состояния газа в соответствующих точках цикла и параметры термодинамических процессов.

2.5. Задание на лабораторную работу

Вид термодинамического цикла и параметры состояния газа в его характерных точках определяются индивидуальным номером варианта (см. прил. 1). Во всех вариантах заданий рабочим телом термодинамических циклов, состоящих из четырех последовательных процессов, является сухой воздух массой 1 г. Универсальную газовую постоянную принять равной $8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$. Воздух считать идеальным двухатомным газом, а его теплофизические свойства не зависящими от температуры.

1. Рассчитать термодинамические параметры воздуха (давление (p), объём (V) и температуру (T)) во всех характерных точках термодинамического цикла.

2. Для *всех* термодинамических процессов, из которых состоит термодинамический цикл, определить значение показателя политропы (n) и удельной теплоемкости газа (c), вычислить изменение внутренней энергии (ΔU) и энтропии (ΔS) газа, количество теплоты, подведённое (отведённое) к газу (Q) и его работу расширения газа (A_p).

3. Определить суммарное за цикл количество подведённой к рабочему телу теплоты ($Q^{(+)}$) и отведённой от него теплоты ($Q^{(-)}$), работу газа за цикл ($A_{p\Sigma}$) и КПД рассматриваемого цикла (η), КПД идеальной тепловой машины (η_K), работающей между максимальной и минимальной температурами рассматриваемого цикла.

2.6. Порядок выполнения работы

Из условия задания следует, что оно состоит из двух частей. Первая часть работы над заданием заключается в аналитическом решении цикла, а вторая часть – выполнение графических построений цикла в соответствующих системах координат. При выполнении и оформлении задания рекомендуем придерживаться следующего порядка.

1. Используя уравнение состояния идеального газа и уравнения термодинамических процессов, рассчитать значения параметров состояния воздуха (p , V , T) во всех характерных точках цикла. Результаты расчётов представить в виде таблицы (см. Прил. 2, табл. П2).

2. Используя определения физических величин, первый закон термодинамики и результаты расчётов, полученных в п. 1, для всех процессов, из которых состоит рассматриваемый цикл, определить:

- значение показателя политропы (n) и удельной теплоемкости газа (c);
- изменение внутренней энергии (ΔU) и энтропии (ΔS) газа;
- количество теплоты, подведённое (отведённое) к газу за процесс (Q);
- работу расширения газа за процесс (A_p).

Результаты расчётов физических величин, полученные в этом пункте, следует представить в виде таблицы (см. Прил. 2, табл. ПЗ).

В этой таблице необходимо включить ещё и итоговую строчку, в которой необходимо записать суммарное значение за весь цикл величин ΔU , ΔS , Q , A_p . Для величин ΔU и ΔS суммарное значение за весь цикл должна быть равна нулю, так как эти величины являются функциями состояния системы. Суммарное значение за весь цикл величин Q и A_p должны быть равны между собой (следствие закона сохранения энергии) и быть положительными (так как цикл прямой).

4. Определить суммарное за весь цикл количество теплоты, подведённой ($Q^{(+)}$) и отведённой ($Q^{(-)}$) к газу, а также количество теплоты, полученное газом за весь цикл (Q_Σ). Вычислить КПД (η) цикла. Затем необходимо определить КПД идеальной тепловой машины (η_K), температура теплоотдатчика («нагревателя») которой равна максимальной температуре воздуха в рассматриваемом цикле, а температура теплоприёмника («холодильника») равна минимальной температуре воздуха за цикл.

Полученные данные представить в следующем виде:

– количество подведённой к воздуху теплоты:

$$Q^{(+)} = \dots \text{ (Дж);}$$

– количество отведённой от воздуха теплоты:

$$Q^{(-)} = \dots \text{ (Дж);}$$

– количество теплоты, полученное газом за цикл:

$$Q_\Sigma = \dots \text{ (Дж);}$$

– работа воздуха за цикл: $A_{p\Sigma} = \dots \text{ (Дж);}$

– КПД тепловой машины: $\eta = \dots$;

– КПД идеального цикла: $\eta_K = \dots$.

5. Построить $P - V$ диаграмму цикла.

p – V-диаграмма

Диаграмма цикла в координатах $p - V$ строится по результатам расчётов, полученных в п. 1 и 4. Для этого следует использовать обычную **линейную шкалу** и **миллиметровую бумагу**. Масштаб по оси объёма τ_V и оси давления τ_p необходимо выбрать таким образом, чтобы цикл на диаграмме получился размером не менее чем 150×150 мм.

2.7. Список ориентировочных контрольных вопросов для допуска к выполнению и защиты лабораторной работы

1. Какой газ называется идеальным? При каких условиях реальные газы можно считать идеальными газами?

2. Какими термодинамическими параметрами характеризуется состояние газа? Каков физический смысл этих величин и как измеряются эти величины?

3. Какое уравнение называется уравнением состояния идеального газа?

4. Какие процессы называются изопроцессами? Запишите уравнения изопроцессов в идеальных газах.

5. Изобразите графики изопроцессов в различных системах координат: (p, V) , (p, T) и (V, T) .

6. Выведите формулу для элементарной работы расширения газа.

7. Выведите формулы для расчета работы идеального газа при различных изопроцессах.

8. Что понимается под количеством теплоты? Какие существуют способы теплопередачи? Приведите примеры.

9. Что характеризует теплоёмкость системы? Удельная и молярная теплоёмкости системы?

10. Сформулируйте теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Как на основе этой теоремы определяется внутренняя энергия идеального газа?

11. Что понимается под внутренней энергией макроскопической системы? От каких параметров состояния зависит внутренняя энергия системы?

12. Сформулируйте первый закон термодинамики и запишите его математическое выражение для различных изопроцессов в идеальном газе.

13. Дайте определение адиабатического процесса и выведите его уравнение (уравнение Пуассона). Представьте это уравнение в параметрах (p, T) и (V, T) .

14. Почему теплоёмкость системы зависит от способа нагревания?

15. Дайте определение политропического процесса и запишите его уравнение в параметрах (p, V) , (p, T) и (V, T) .

16. Перечислите, согласно вашему варианту индивидуального задания, термодинамические процессы из которых состоит цикл тепловой машины? Объясните их по схематическому рисунку.