

Seminar 9

Введение в классическую физику

Термодинамика

Victor Ivanov Yu.*

Аннотация

Physics and Mathematics

Содержание

1 Первый закон термодинамики	1
2 Основные формулы	1
3 Второй закон термодинамики	3
4 Упражнения	3

1 Первый закон термодинамики

Подведенная к системе теплота идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение работы против внешних сил:

$$Q = \Delta U + A \quad (1)$$

2 Основные формулы

1. Уравнение Менделеева — Клапейрона:

$$PV = \nu RT \quad (2)$$

2. Количество полученной теплоты

(а) при изменении температуры

$$Q = C\Delta T = cm\Delta T,$$

где C – теплоемкость тела (измеряется в Дж/К), а c – удельная теплоемкость материала (измеряется в Дж/(кг · К));

*VI

- (b) при плавлении (таянии) твердого тела или испарении (парообразовании) жидкости

$$Q = \lambda m,$$

$$Q = rm,$$

где λ – удельная теплота плавления, r – удельная теплота парообразования (измеряется в Дж/кг). При кристаллизации (замерзании) жидкости или конденсации пара теплота отбирается

$$Q = -\lambda m,$$

$$Q = -rm.$$

Плавление (кристаллизация) происходит при постоянной температуре, называемой температурой плавления (таяния). Таяние льда происходит при 0°C . Равновесное испарение (конденсация) происходит при температуре кипения (для воды при атмосферном давлении 100°C).

Работой твердого тела или жидкости можно пренебречь, т.е. приведенные формулы можно использовать для изменения внутренней энергии.

- (c) При сгорании массы m топлива выделяется теплота

$$Q = qm,$$

где q – удельная теплота сгорания топлива.

3. Уравнение теплового баланса. Если между телами системы происходит теплообмен, то конечная температура всех тел одинакова (состояние теплового равновесия), и ее можно найти из закона сохранения энергии:

$$Q_1 + Q_2 + \text{etc.} = 0$$

Другими словами, сумма полученных теплот равна сумме отданных.

4. Внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры. В изотермическом процессе $\Delta U = 0$, т.е. $Q = A$.

В изохорном процессе работа газа равна нулю, т.е. $Q = \Delta U$. Изменение внутренней энергии газа можно выразить через теплоемкость при постоянном объеме

$$\Delta U = c_V m \Delta T = C_{\mu V} \nu \Delta T,$$

где c_V – удельная теплоемкость, $C_{\mu V}$ – молярная теплоемкость.

В изобарном процессе газ совершает работу

$$A = p \Delta V = \frac{p_1 + p_2}{2} (V_2 - V_1)$$

В адиабатическом процессе отсутствует теплообмен ($Q = 0$)

$$0 = \Delta U + A$$

5. Внутренняя энергия одноатомного идеального газа

$$U = \frac{3}{2}\nu RT$$

Удельная теплоемкость при постоянном объеме: $c_V = \frac{3}{2}(\frac{R}{M})$, $C_{\mu V} = \frac{3}{2}R$

6. В циклическом процессе ΔU за цикл равно нулю. Для любой циклической тепловой машины

$$A = Q = Q_1 - Q_2,$$

где A – работа машины за цикл, Q_1 – теплота, полученная машиной от нагревателя, Q_2 – теплота, отданная холодильнику. КПД машины равен

$$\nu = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

КПД идеальной (обратимой) тепловой машины, работающей по циклу Карно:

$$\nu = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1, T_2 – абсолютные температуры нагревателя и холодильника.

3 Второй закон термодинамики

Этот фундаментальный закон глубоко и неотделимо связан с природой сингулярностей в структуре пространства-времени.

В изолированной системе энтропия либо остаётся неизменной, либо возрастает (в неравновесных процессах), достигая максимума при установлении термодинамического равновесия (закон возрастания энтропии)

$$\Delta S \geq 0 \tag{3}$$

Энтропия определяется знаменитой формулой Больцмана

$$S = k \log V \tag{4}$$

или через связь с теплотой

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \tag{5}$$

4 Упражнения

Задача 4.1. Оболочка аэростата вместимостью $V = 1600 \text{ м}^3$, находящегося на поверхности Земли, на $k = 7/8$ наполнена водородом при давлении $p_1 = 100 \text{ кПа}$ и температуре $T_1 = 290 \text{ К}$. Аэростат подняли на некоторую высоту, где давление $p_2 = 80 \text{ кПа}$ и температура $T_2 = 280 \text{ К}$. Определить массу δm водорода, вышедшего из оболочки при его подъеме.

Решение. Elementary ■

Задача 4.2. С какой высоты (в км) должен падать оловянный шарик, чтобы при ударе о поверхность он полностью расплавился? Считать, что 50% энергии шарика идет на его нагревание и плавление. Начальная температура шарика 32°C . Температура плавления олова 232°C , его удельная теплоемкость $200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$, удельная теплота плавления $58 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Решение. Elementary ■

Задача 4.3. Для приготовления ванны емкостью 200 л смешали холодную воду при 10°C с горячей при 60°C . Сколько литров холодной воды нужно взять, чтобы в ванне установилась температура 40°C ?

Решение. Elementary ■

Задача 4.4. В сосуд, содержащий 9 кг воды при 20°C , вводится 1 кг пара при 100°C , который превращается в воду. Определите конечную температуру (в $^{\circ}\text{C}$) воды. Теплоемкость сосуда и потери теплоты не учитывать. Удельная теплоемкость воды $4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$, удельная теплота парообразования воды $2.1 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$.

Решение. Elementary ■

Задача 4.5. Идеальный одноатомный газ в количестве 1 моль нагрели сначала изохорно, а затем изобарно. В результате как давление, так и объем газа увеличились в два раза. какое количество теплоты получил газ в этих двух процессах, если его начальная температура была 100 K ? Универсальная газовая постоянная $8300 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K})$.

Решение. Elementary ■

Задача 4.6. В трубке, закрытой с одного конца, столбик воздуха заперт столбиком ртути длиной 19 см. Если трубку перевернуть открытым концом вниз, длина столбика воздуха будет 10 см, а если открытым концом вверх, то 6 см. Найдите атмосферное давление в мм.рт.ст.

Решение. Elementary ■

Задача 4.7. При повышении температуры азота, заключенного в закрытый сосуд, от 7°C до 1407°C третья часть молекул азота распалась на атомы. Во сколько раз при этом возросло давление газа?

Решение. Elementary ■

Задача 4.8. В сосуде вместимостью $V = 5 \text{ л}$ находится однородный газ количеством вещества $\nu = 0.2 \text{ моль}$. Определить, какой это газ, если его плотность $\rho = 1.12 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Решение. Elementary ■

Задача 4.9. Водород при нормальных условиях имел объем $V_1 = 100 \text{ м}^3$. Найдите изменение ΔU внутренней энергии газа при его адиабатном расширении до объема $V_2 = 150 \text{ м}^3$.

Решение. Elementary ■