Занятие 12. Термодинамика. Первое начало термодинамики. Теплоемкость. Циклы

1. **Первое начало термодинамики**

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

2. **Количество полученной теплоты**:

2.1. ***при изменении температуры***

$Q = C_\mu \Delta T = cmT$ (2)

C_μ - молярная теплоемкость, c -удельная теплоемкость, m - масса материала.

Теплоемкость одноатомного идеального газа при постоянном давлении равна $C_{\mu V} = {}^3\!/_2 R$, $c_{\mu V} = {}^{3R}\!/_{2\mu}$

2.2. ***при плавлении твердого тела или испарения жидкости***

$Q = \lambda m, \quad Q = rm$ (3)

λ -удельная теплота плавления, r -удельная теплота парообразования. При кристаллизации жидкости или конденсации пара теплота отбирается (знак минус)

2.3. ***При сгорании массы*** m ***топлива выделяется теплота***

$Q = qm$ (4)

q удельная теплота сгорания топлива

3. **Уравнение теплового баланса**

$Q = Q_1 + Q_2 + \cdots$ (5)

Если между телами системы происходит теплообмен, то конечная температура всех тел одинакова. Эту температуру определяют из уравнения теплового баланса (6.5)

4. **Внутренняя энергия одноатомного идеального газа**

$\Delta U = \frac{3}{2} vRT$ (6)

5. **Внутренняя энергия газа**

5.1. При изотермическом процессе

$\Delta U = 0$ (7.1)

5.2. При изохорическом процессе работа равна нулю и

$\Delta U = Q$ (7.2)

5.3. **При изобарическом процессе работа равна** $A = p\Delta V$ и

$\Delta U = Q - p\Delta V$ (7.3)

5.4. ***При адиабатическом процессе*** $Q = 0$ и

$\Delta U = -A$ (7.4)

6. **Для любой тепловой машины (ТМ) за один цикл**

$\Delta U = 0$, $A = Q_1 - Q_2$ (7.5)

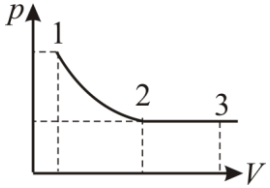
A - работа ТМ за цикл, Q_1 - теплота, полученная ТМ от нагревателя, Q_2 - теплота, отданная ТМ холодильнику

Примеры решения задач

1. В изотермическом процессе газ совершил работу 1 кДж. Затем газу сообщили еще 1 кДж теплоты, но уже изобарно. Насколько увеличилась внутренняя энергия этого газа, если газ одноатомный?

Решение

Построим график процесса 1-2 изотерма, 2-3 – изобара. Внутренняя энергия является функцией состояния $\Delta U_{13} = \frac{i}{2} vR\Delta T_{31}$,



где $\Delta T_{31} = T_3 - T_1$. На участке 12 температура постоянная, тогда $T_1 = T_2$. При изобарическом процессе закон сохранения энергии имеет вид $Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23}$ и $Q_{23} = \Delta U_{23} + p_2(V_3 - V_2)$, затем используем **уравнение Менделеева-Клапейрона (УМК)** и (2), получаем $Q_{23} = \Delta U_{23} + vR\Delta T_{23} = (i+2)vR\Delta T_{23}/2$. Найдем $vR\Delta T_{32}$, т.е. $vR\Delta T_{32} = 2Q_{23}/(i+2) = 400$ Дж. С другой стороны $\Delta U_{13} = i(vR\Delta T_{31})/2 = i(vR\Delta T_{32})/2 = 600$ Дж

Ответ: $\Delta U_{13} = 600$ Дж.

2. Воздух в комнате нагрели от 15^0С до 25^0С. При этом давление воздуха не изменилось и равно давлению вне комнаты, равному 1 атм. Изменилась ли внутренняя энергия воздуха внутри комнаты. Объем комнаты 40 м^3.

Решение

Согласно (2) найдем внутреннюю энергию в начальном $U_1 = iv_1RT_1/2$ и конечном состоянии $U_2 = iv_2RT_2/2$, здесь учли, что при нагревании часть воздуха удаляется из комнаты. Считая, что воздух подчиняется УМК запишем $p_1V = v_1RT_1$ и $p_2V = v_2RT_2$, тогда $\Delta U_{12} = U_2 - U_1 = iv_2RT_2/2 - iv_1RT_1/2$ и $i(v_2RT_2 - v_1RT_1)/2 = i(p_2V - p_1V)/2 = 0$ Дж. Для чего же топить печку? Вычислим внутреннюю энергию воздуха в комнате $U = ipV/2 = 10^7$ Дж.

Ответ: $\Delta U_{12} = 0$ Дж, $U = 10^7$ Дж.

3. В теплоизолированном сосуде при температуре $T_1 = 800$ К находится один моль углекислого газа и один моль молекулярного водорода. Происходит химическая реакция $CO_2 + H_2 = CO + H_2O + Q$. Во сколько раз возрастет давление? Число степеней свободы: углекислый газ $i_1 = 6$, водород $i_2 = 5$, углекислый газ $i_3 = 5$, водяной пар $i_4 = 6$.

Решение

В результате химической реакции водорода с углекислым газом образуется угарный газ и вода, при этом выделяется некоторое количество теплоты, что приводит к увеличению температуры и давления смеси газов. Поскольку сосуд хорошо теплоизолирован, то теплообмен с внешней средой отсутствует и так как $V = \text{const}$, то работа газа не производится $A_{12} = 0$ Дж, $Q = \Delta U_{12}$, $\Delta U_{12} = \left(\frac{i_3}{2}v_3 + \frac{i_4}{2}v_4\right)RT_2 - \left(\frac{i_1}{2}v_1 + \frac{i_2}{2}v_2\right)RT_1$ и $v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = 1$, с учетом этого $2Q/(i_3 + i_4)R = T_2 - T_1$ и $T_2 = T_1 + 2Q/(i_3 + i_4)R = 1677$ К. Процесс изохорический, тогда

искомое изменение давление равно $p_2 / p_1 = T_2 / T_1 = 2.07$.

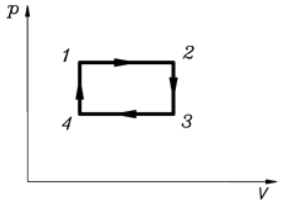
Ответ: $p_2 / p_1 \approx 2.1$.

Самостоятельная аудиторная работа.

1. Сколько теплоты выделится при конденсации 200 г водяного пара при температуре 100° С? Удельная теплота парообразования 2.3 МДж/кг.

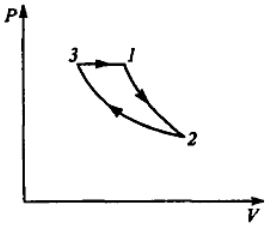
2. В пустой калориметр поместили очень холодный кусок льда и налили стакан кипятка ($T_к$ = 100 °С). При этом весь кипяток превратился в лёд с установившейся температурой T_0 = 0 °С. Когда в калориметр налили ещё 8 таких же стаканов кипятка, весь лёд превратился в воду с установившейся температурой T_0 = 0 °С. Найти начальную температуру льда. Теплоёмкость воды $c_в$ = 4,2 кДж/(кг·°С), теплоёмкость льда $c_л$ = 2,1 кДж/(кг·°С), теплота плавления льда λ = 336 кДж/кг.

3. На рисунке дан график изменения состояния идеального газа в координатах *p, V*. Представить этот круговой процесс (цикл) в координатах *p, T* и *V, T*, обозначив соответствующие точки.



4. Пять молей газа сначала нагревают при постоянном объеме так, что его давление возрастает в три раза, а затем сжимают при постоянном давлении, доведя температуру до прежнего значения 100 К. Какая работа была совершена над газом при его сжатии?

5. Моль гелия совершает работу величиной *A* в замкнутом цикле (см. рис.), состоящем из адиабаты 1 − 2, изотермы 2 − 3, изобары 3 − 1. Найти величину работы, совершенной в изотермическом процессе, если разность максимальной и минимальной температуры газа в цикле равна Δ*T* градусов.



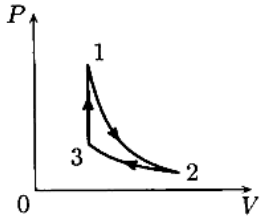
6. При изобарном расширении газ совершил работу 100 Дж, а его внутренняя энергия увеличилась при этом на 150 Дж. Затем газу в изохорном процессе сообщили такое же количество теплоты, как и в первом процессе. На сколько увеличилась внутренняя энергия газа в результате этих двух процессов?

7. Медное тело, нагретое до 100 °С, опущено в воду, масса которой равна массе медного тела. Тепловое равновесие наступило при температуре 30 °С. Определите начальную температуру (в °С) воды. Удельная теплоемкость воды 4200 Дж/(кг•К), меди 360Дж/(кг•К)

8. При какой скорости пуля из свинца полностью расплавится при ударе о стенку, если 80% её энергии будет затрачено на нагревание пули? Начальная температура пули 27 °С, температура плавления свинца 327 °С, удельная теплоёмкость 130 Дж/(кг • К), удельная теплота плавления 25 кДж/кг.

Задание на дом

1. Идеальный газ в количестве 2 моль находится при температуре 400 К. Объем газа увеличивают в два раза так, что конечная температура газа линейно зависит от объема. Найдите работу газа в этом процессе, если конечная температура газа равна начальной.
2. В изотермическом процессе газ получил 200 Дж теплоты. После этого в адиабатическом процессе газ совершил работу в два раза большую, чем в первом процессе. Насколько уменьшилась внутренняя энергия газа в результате этих двух процессов?
3. Тепловая машина работает по замкнутому циклу, состоящему из процесса адиабатического расширения 1 − 2, изотермического процесса 2 − 3 и изохорического процесса 3 − 1. Рабочее вещество − *ν* молей идеального одноатомного газа. В процессе, где тепло к газу подводится, давление газа увеличивается в 3 раза. В процессе сжатия от газа отводится количество теплоты *Q* (*Q* > 0). Во всём цикле 1 − 2 − 3 – 1 машина совершает работу А. Найдите максимальную температуру газа в цикле.



4. Идеальный газ, в количестве 1 моль, сначала изобарно нагревается, а затем при постоянном объеме переводится в состояние с температурой, равной начальной температуре T_0 = 300 К. Во сколько раз изменился объем, занимаемый газом, если газу передано количество теплоты *Q* = 5000 Дж?

Приложение

Размерности физических величин

$\dim(p) = MLT^{-2}$ $\dim(v) = LT^{-1}$ $\dim(E) = L^2MT^{-2}$ $\dim(V) = L^3$

Литература

[1]. Баранов А. В. Физика. Теория, задачи, тесты: учеб. пособие / Б. Б. Горлов, А. В. Баранов, Г. Е. Невская Г.Е. – : Издательство НГТУ, 2006. – 280 с.

[2]. Трофимова Т. И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 11-еизд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 560 с.

[3]. Трофимова Т. И. Физика в таблицах и формулах Учеб. пособие для студентов вузов / Т. И. Трофимова. – М.: Дрофа, 2002. – 432 с.