

ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Закон сохранения энергии в тепловых процессах выражается *первым законом термодинамики*:

$$Q = \Delta U + A,$$

где Q — количество теплоты, переданной системе, ΔU — изменение внутренней энергии системы, A — работа, выполненная системой против внешних сил.

Внутренняя энергия одноатомного газа равна:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

Работа, которую выполняет газ при изобарическом расширении от объема V_1 до объема V_2 , определяется формулой:

$$A = p(V_2 - V_1).$$

Количество теплоты Q , которое получает (отдает) твердое тело или жидкость массой m в процессе нагревания (охлаждения):

$$Q = cm\Delta T,$$

где c — удельная теплоемкость твердого тела (жидкости).

Количество теплоты, полученное кристаллическим твердым телом в процессе плавления, или отданное жидкостью в процессе кристаллизации:

$$Q = \lambda m,$$

где λ — удельная теплота плавления (кристаллизации).

Количество теплоты, необходимое для превращения жидкости в пар при постоянной температуре, или отданное паром в процессе конденсации:

$$Q = rm,$$

где r — удельная теплота парообразования (конденсации).

Количество теплоты, которое выделяется при сгорании топлива массой m :

$$Q = qm,$$

где q — удельная теплота сгорания топлива.

Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{A}{Q_1},$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное от нагревателя, Q_2 — количество теплоты, переданное холодильнику, A — механическая работа.

Коэффициент полезного действия теплового двигателя, действующего по циклу Карно:

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

где T_1 — температура нагревателя, T_2 — температура холодильника.

2.1. Первый закон термодинамики в применении к идеальному газу

Пример 2.1. Определите удельную теплоемкость атомарного кислорода при постоянном давлении.

Дано: $M = 16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль
 $c_p = ?$

Решение: По определению удельная теплоемкость вещества равна:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}.$$

Для определения количества теплоты, необходимого для изобарического нагревания кислорода на ΔT воспользуемся первым законом термодинамики, согласно которому $Q = \Delta U + A$.

По условию задачи, кислород — одноатомный газ, поэтому

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Работа, выполняемая идеальным газом при изобарическом расширении, $A = p \Delta V$. Поскольку состояние идеального газа описывается уравнением Клапейрона — Менделеева, то $p \Delta V = \frac{m}{M} R \Delta T$. Таким образом,

$$Q = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Следовательно, удельная теплоемкость атомарного кислорода при постоянном давлении равна:

$$c_p = \frac{5R}{2M}.$$

Числовое значение: $c_p = \frac{5 \cdot 8,31}{2 \cdot 16 \cdot 10^{-3}} \approx 1,3$ (кДж/(кг·К)).

Пример 2.2. В цилиндре с теплоизолированными стенками находится 0,2 кг гелия при температуре 293 К. В результате расширения газ выполняет работу 4,5 кДж. Определите изменение внутренней энергии гелия и его температуру после расширения.

Дано: $m = 0,2$ кг, $M = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль

$T_1 = 293$ К, $A = 4,5 \cdot 10^3$ Дж

ΔU — ? T_2 — ?

Решение: Поскольку цилиндр имеет теплоизолированные стенки, то процесс расширения гелия является адиабатическим: газ не может ни отдать теплоту окружающей среде, ни получить ее.

Согласно первому закону термодинамики, $Q = \Delta U + A$. Если учесть, что $Q = 0$, получим:

$$\Delta U + A = 0, \text{ или } \Delta U = -A.$$

Таким образом, $\Delta U = -4,5$ кДж, т. е. в процессе расширения внутренняя энергия гелия уменьшилась, поскольку часть внутренней энергии была затрачена на работу против внешних сил.

Изменение внутренней энергии идеального газа:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R (T_2 - T_1).$$

С учетом этого $T_2 = \frac{2M\Delta U}{3mR} + T_1$

или $T_2 - T_1 = \frac{2MA}{3mR}$.

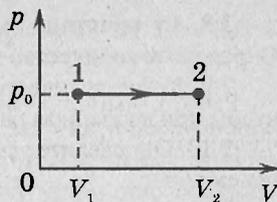


Рис. 2.1

Числовое значение: $T_2 = 293 - \frac{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 4,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 0,2 \cdot 8,31} = 286 \text{ (К)}$.

2.1. На что будет затрачиваться теплота, полученная идеальным газом при изотермическом, изохорном, изобарном процессах?

2.2. Может ли газ обмениваться энергией с окружающей средой без изменения объема?

2.3. В цилиндре под поршнем находится газ, состояние которого изменяется по схеме, приведенной на рис. 2.1. Как изменяется температура газа? Какую работу выполняет газ?

2.4. Определите работу, которую выполняет газ в процессе перехода из состояния 1 в состояние 3 (см. рис. 2.2).

2.5. Какую работу выполняет газ при переходе из состояния 1 в состояние 4 (рис. 2.3)?

2.6. Как изменяется внутренняя энергия идеального газа на каждом участке цикла, изображенного на рис. 2.4?

2.7. Рассчитайте изменение внутренней энергии 200 г гелия при повышении его температуры на 20 К?

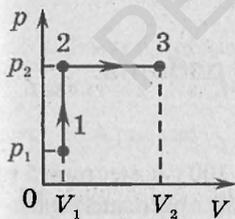


Рис. 2.2

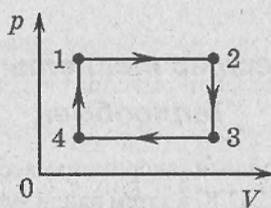


Рис. 2.3

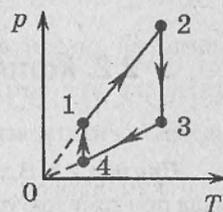


Рис. 2.4

2.8. 1 г криптона нагрели на 100 К при постоянном давлении. Определите количество теплоты, полученное газом.

2.9. Какое количество теплоты надо передать аргону для того, чтобы при изобарном расширении он выполнил работу 2 Дж?

2.10. Определите удельную теплоемкость гелия при постоянном объеме?

2.11. Какое количество теплоты было передано кислороду, если при изотермическом расширении им выполнена работа 5 кДж?

2.12. Внутренняя энергия одноатомного газа, занимающего объем 5 дм³, равняется 450 Дж. Определите давление газа.

2.13. Гелий находится в закрытом сосуде объемом 20 дм³. При нагревании газа на 80 К ему передано 997 Дж теплоты. Определите плотность газа.

2.14. Определите работу, которую надо выполнить, чтобы при адиабатическом сжатии 20 г аргона его температура повысилась на 610 К.

2.15. При адиабатном расширении 30 г одноатомного газа выполнена работа, равная 46,7 кДж. При этом температура газа уменьшилась на 500 К. Определите, какой это газ.

2.16. При адиабатическом сжатии ксенона, масса которого 2 кг, а температура 300 К, выполнена работа 150 кДж. Определите температуру газа в конце процесса.

2.17. 1 моль одноатомного газа изобарно нагрели на 70 К. При этом ему передано 1,5 кДж теплоты. Определите работу, выполненную газом.

2.18. В закрытом сосуде объемом 10 л находится неон при давлении 0,1 МПа. Какое количество теплоты надо передать газу, чтобы его давление увеличилось в 5 раз?

2.19. Объем одноатомного газа уменьшился от 30 л до 15 л, а давление увеличилось от 0,1 МПа до 0,3 МПа. Определите изменение внутренней энергии газа.

2.20. *Найдите отношение удельных теплоемкостей одноатомного газа при постоянном давлении и постоянном объеме.

2.2. Количество теплоты и работа.

Теплообмен

Пример 2.3. В латунный калориметр массой 100 г поместили 5 г льда при температуре 263 К, а затем влили туда 30 г расплавленного свинца при температуре плавления. Определите температуру, установившуюся в системе, и массу воды в калориметре.

Дано: $m_1 = 0,1$ кг, $m_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ кг, $m_3 = 0,03$ кг, $T_2 = 263$ К
 θ — ?, m — ?

Решение: Если не учитывать потери энергии в окружающую среду, то теплообмен в системе происходит только между свинцом, калориметром и льдом. Но записать сразу уравнение теплового баланса невозможно, так как неизвестна температура, установившаяся в системе.

Сначала определим количество теплоты, выделившееся при кристаллизации свинца и его охлаждении до температуры плавления льда $T_{02} = 273$ К:

$$Q_1 = \lambda_3 m_3 + c_3 m_3 (T_{03} - T_{02}),$$

где $\lambda_3 = 25$ кДж/кг — удельная теплота плавления свинца;
 $c_3 = 0,13$ кДж/(кг·К) — удельная теплоемкость свинца;
 $T_{03} = 600$ К — температура плавления свинца.

$$Q_1 = 3 \cdot 10^2 [25 \cdot 10^3 + 0,13 \cdot 10^3 (600 - 273)] = 2 \text{ (кДж)}.$$

Количество теплоты Q_2 , которое потребуется, чтобы нагреть калориметр и лед до температуры T_{02} , равно:

$$Q_2 = c_1 m_1 (T_{02} - T_2) + c_2 m_2 (T_{02} - T_2),$$

где $c_1 = 0,38$ кДж/(кг·К) — удельная теплоемкость латуни;
 $c_2 = 2,10$ кДж/(кг·К) — удельная теплоемкость льда.

Числовое значение:

$$Q_2 = (0,38 \cdot 10^3 \cdot 0,1 + 2,10 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3}) (273 - 263) = 480 \text{ (Дж)}.$$

Расчеты показывают, что $Q_1 > Q_2$, следовательно, лед начнет плавиться. Количество теплоты, необходимое для плавления льда, $Q_3 = \lambda_2 m_2$, где $\lambda_2 = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг — удельная теплота плавления льда.

Числовое значение:

$$Q_3 = 3,35 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 16,75 \cdot 10^2 \text{ (Дж)}.$$

Поскольку $Q_1 < Q_2 + Q_3$, расплавится только часть льда и температура, установившаяся в калориметре, $T_{\text{уз}} = 273 \text{ К} = \Theta$.

Масса воды в калориметре:

$$m = \frac{Q_1 - Q_2}{\lambda}.$$

Числовое значение: $m = \frac{2000 - 480}{3,35 \cdot 10^9} = 4,5 \text{ (г)}.$

Пример 2.4. Два свинцовых шара одинаковой массы движутся навстречу друг другу со скоростями v и $2v$. Определите повышение температуры шаров в результате неупругого удара.

Дано: $m_1 = m_2 = m, \quad v_1 = v, \quad v_2 = 2v$

$\Delta T \text{ — ?}$

Решение: Количество теплоты, полученное шарами при ударе, согласно закону сохранения энергии, будет равно изменению их кинетической энергии (считаем, что их потенциальная энергия не изменилась).

$$Q = E_1 + E_2 - E, \text{ где } E_1 = \frac{mv^2}{2} \text{ и } E_2 = \frac{m(2v)^2}{2} = 2mv^2 \text{ —}$$

кинетическая энергия первого и второго шаров до удара,

$$E = \frac{2mu^2}{2} = mu^2 \text{ — общая кинетическая энергия шаров после удара}$$

(учтено, что после удара шары стали двигаться как единое целое со

скоростью u). Таким образом, $Q = \frac{mv^2}{2} + 2mv^2 - mu^2$, или

$$Q = m(2,5v^2 - u^2).$$

Для нахождения общей скорости шаров после удара используем закон сохранения импульса:

$$mv - 2mv = -2mu.$$

Отсюда $u = 0,5v$.

С учетом этого $Q = m(2,5v^2 - 0,25v^2) = 2,25mv^2$.

С другой стороны, количество теплоты, полученное шарами в результате удара, определяется равенством $Q = 2mc\Delta T$, где $2m$ — общая масса шаров, c — удельная теплоемкость свинца.

В результате получим $2mc\Delta T = 2,25mv^2$.

Отсюда $\Delta T = 1,125 \frac{v^2}{c}$.

2.21. На рис. 2.5 приведены графики зависимости температуры двух тел одинаковой массы от количества теплоты, переданной им. У какого тела удельная теплоемкость больше?

2.22. Три тела, изготовленные из железа, свинца и алюминия, имеют одинаковые объемы. Какое из них имеет наибольшую теплоемкость, а какое — наименьшую?

2.23. В латунный калориметр массой 128 г, в котором находилось 240 г воды при температуре $8,4^\circ\text{C}$, опустили металлическое тело массой 192 г, нагретое до 100°C . В результате теплообмена в калориметре установилась температура $21,5^\circ\text{C}$. Определите удельную теплоемкость металла.

2.24. Алюминиевый сосуд массой 500 г содержит 100 г воды при температуре 20°C . Определите температуру системы после того, как в сосуд опустили кусок железа массой 200 г, нагретый до 75°C .

2.25. Для ванны надо смешать холодную воду при 11°C с горячей водой при 66°C . Сколько той и другой воды надо взять для получения 110 л воды при 36°C ?

2.26. При закалке стальной резец массой 0,15 кг опустили в алюминиевый сосуд массой 0,1 кг, в котором находилось 0,6 кг машинного масла при температуре 288 К. Определите температуру резца до закалки, если температура системы стала равной 321 К.

2.27. В сосуд с водой общей теплоемкостью 1,5 кДж/К при температуре 293 К поместили 56 г льда при 265 К. Какая температура установится в системе?

2.28. В теплоизолированном сосуде содержится смесь воды массой 0,5 кг и льда массой 544 г. В сосуд ввели сухой насыщенный

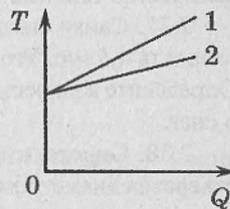


Рис. 2.5

водяной пар массой 6,6 г при температуре 373 К. Определите температуру смеси после установления теплового равновесия.

2.29. В сосуд, содержащий 2,8 л воды при температуре 293 К, бросили кусок стали массой 3 кг, нагретый до 733 К. Вода нагрелась до 333 К и часть ее превратилась в пар. Найдите массу воды, превратившейся в пар. Теплоемкость сосуда не учитывать.

2.30. С одинаковой высоты упали два тела равной массы — медное и железное. Какое из них при ударе о Землю нагреется до более высокой температуры?

2.31. Свинцовая пуля при температуре 373 К попала в преграду и расплавилась. При этом 60% ее энергии превращается во внутреннюю энергию. Определите скорость пули в момент столкновения с преградой.

2.32. Молот массой 1 т упал на кусок меди массой 25 г, в результате чего медь расплавилась. Определите высоту, с которой упал молот, если начальная температура меди 300 К и ей передано 50% механической энергии молота.

2.33. Свинцовая дробь, летящая со скоростью 100 м/с, пробивает доску и вылетает со скоростью 60 м/с. На сколько нагреется дробь, если на увеличение внутренней энергии дроби идет 40% ее кинетической энергии?

2.34. Стальной осколок падает с высоты 500 м. У поверхности Земли его скорость равна 50 м/с. На сколько повысилась температура осколка за время движения, если считать, что вся работа сопротивления воздуха пошла на нагревание осколка?

2.35. С какой высоты упал свинцовый шар ($v_0 = 0$), если при столкновении с поверхностью Земли его температура повысилась на 10 К? При этом 80% энергии шара затрачено на его нагревание. Сопротивление воздуха не учитывать.

2.36. Поезд массой $2 \cdot 10^6$ кг движется со скоростью 54 км/ч. Какое количество теплоты выделится при его торможении?

2.37. Санки массой 6 кг соскальзывают с горы и приобретают скорость 4,5 м/с. Угол наклона горы к горизонту 30° , длина — 50 м. Определите количество теплоты, выделяющееся при трении полозьев о снег.

2.38. Определите шаг резьбы сверла, если при высверливании отверстия диаметром 50 мм в медном цилиндре диаметром 15 см его температура повысилась на 5 К. Вращательный момент, приложенный к воротку, — 24,4 Н·м. Коэффициент превращения энергии равен 70%.