

ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра общей и технической физики

ФИЗИКА

ТЕРМОДИНАМИКА. ЦИКЛЫ

*Методические указания к расчетно-графическим работам
и варианты заданий для студентов направления 21.03.01
«Нефтегазовое дело»*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2017

ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА. ЦИКЛЫ: Методические указания к расчетно-графическим работам и варианты заданий для студентов бакалавриата направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело». *С.С. Прошкин*. «Санкт-Петербургский горный университет». СПб, 2017, 36 с.

Расчетно-графические работы предназначены для студентов бакалавриата направления подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» Санкт-Петербургского горного университета. Задания выполняются индивидуально в соответствии с вариантом. Выполнение расчетно-графической работы позволит студенту сформировать следующие компетенции: ОПК-1; ОПК-2; ПК-1 и ПК-2.

Методические указания предназначены для студентов бакалавриата направления подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Табл. 3. Ил. 3. Библиогр. 8 назв.

Научный редактор проф. *А.С. Мустафеев*

© Санкт-Петербургский горный университет, 2017 г.

1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях значительного сокращения лекций и часов, отводимых на практические занятия по физике, единственным способом улучшить усвоение материала учебной программы является самостоятельная работа студента. В решении этой проблемы может помочь выполнение студентом индивидуального расчетно-графического задания (РГР). При выполнении РГР студенту приходится сочетать теоретические знания и практические навыки решения задач. Кроме того, у него формируется умение определить, описать и объяснить физические понятия, явления, процессы и величины.

При этом студент приобретает следующие навыки:

- проводить самостоятельный поиск необходимой информации с использованием учебных, справочных и научно-популярных изданий, ресурсов Интернета;
- применять математический аппарат для аналитического решения физических задач;
- анализировать, выполнять сравнительную оценку и делать выводы по результатам своей работы;
- использовать в решениях и представлении результатов (в виде рисунков, схем, таблиц и графиков) компьютерное программное обеспечение.

Перечень планируемых результатов после выполнения РГР:

- знать основные понятия, явления и фундаментальные физические законы, лежащие в основе изучаемого явления; уметь формулировать физико-математическую модель изучаемого явления; владеть методами выбора цели, постановки задач и поиска оптимальных путей их решения; (ОПК-1);
- знать основные методы исследования, методы расчета и численной оценки точности результатов измерений физических величин; уметь ставить и решать задачи для осуществления научно-исследовательской деятельности; владеть методами математического моделирования, компьютерной, аналитической и графической обработки результатов ОПК-2
- знать основные профессиональные проблемы, решаемые с помощью физических методов исследования; уметь: самостоятельно

решать конкретные задачи и выявлять новые закономерности; владеть способностью оценки достоверности полученных результатов (ПК-1);

- знать возможности применения современных компьютерных технологий; уметь эффективно использовать научно-техническую аппаратуру при решении конкретных профессиональных задач; владеть основами выполнения исследований с применением современных технологий и статистических методов (ПК-2).

Для повышения эффективности самостоятельной работы студентов в данном пособии приведены краткие теоретические сведения и разобраны примеры решения и оформления задач.

В приложении представлены справочные материалы, рекомендации к решению задач и содержанию отчета по РГР.

Студентам предлагается решить одно расчетно-графическое задание, которое фактически предполагает рассмотрение типовых задач по следующим разделам физики:

1. «Термодинамические законы идеального газа»;
2. «Первое и второе начала термодинамики»;
3. «Термодинамические циклы. Цикл Карно»;
4. «Энтропия».

2. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ОТЧЕТА И К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО РАСЧЕТНО – ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

При выполнении расчетно-графических работ по общей физике рекомендуется оформить отчет в печатном виде на листах формата А4 следующего содержания:

1. Титул в соответствии с требованиями вуза.
2. Формулировка задания в соответствии со своим вариантом.
3. Теоретические основы работы.

В краткое содержание теоретической части работы необходимо включить:

- явления или процессы, изучаемые в РГР.
- определения основных физических понятий, объектов, процессов и величин.
- законы и соотношения, описывающие изучаемые процессы.

- пояснение к физическим величинам, входящим в формулы, и единицы их измерения.

4. Решение задач РГР.

При решении задач необходимо:

- выполнить рисунок или начертить схему;
- сопровождать применяемые формулы и законы пояснениями, мотивирующими решение;
- представить результат в общем виде, т. е. преобразовать выражение для определяемой величины так, чтобы в него входили лишь буквенные обозначения величин, заданных в условии задачи, и необходимые физические константы;
- проверить размерность полученного результата;
- выполнить необходимые вычисления и представить результат в Международной системе единиц;
- сформулировать полный ответ в соответствии с вопросом задачи.

5. Графический материал:

- представить таблицы с данными для построения графиков;
- указать аналитическое выражение функциональной зависимости, которую необходимо построить;
- указать на осях координат физические величины и единицы их измерения.

6. Анализ и выводы по результатам работы.

3. УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ К РАЗДЕЛУ «Термодинамика. Циклы»¹

3.1. Введение

Согласно молекулярно – кинетическим представлениям все вещества состоят из большого числа молекул (атомов). Для изучения таких систем, которые называются *макроскопическими системами*, используют два метода: статистический и термодинамический. *Статистический метод* основан на законах теории вероятности и математической статистики. *Термодинамический метод* основан на законе сохранения и превращения энергии. Этот метод опи-

¹ В данном разделе приведены только те формулы и законы, которые могут оказаться полезными при решении данного РГР.

сывает равновесные состояния термодинамической системы. *Термодинамической системой* называется система, состоящая из большого числа микрочастиц. Для описания поведения термодинамической системы используют термодинамические параметры: давление – p , температура – T и объем V . Для *равновесных состояний* давление и температура постоянны и одинаковы по всему объему вещества.

Простейшей термодинамической системой является *идеальный газ*, т. е. газ, молекулы (атомы) которого рассматриваются как материальные точки, между которыми отсутствуют силы взаимодействия. Чем более разрежен газ, тем его свойства ближе к идеальному газу.

Термодинамика – это раздел физики, изучающий наиболее общие свойства макроскопических систем и способы передачи и превращения энергии в таких системах. В термодинамике изучаются состояния и процессы, для описания которых вводится понятие температуры. Термодинамика — это наука, опирающаяся на обобщении опытных фактов.

Законы термодинамики носят общий характер и не зависят от особенностей строения вещества на атомарном уровне. Поэтому термодинамика успешно применяется в широком круге вопросов науки и техники, таких как энергетика, теплотехника, химия и даже космология.

Термодинамика возникла как эмпирическая наука во второй половине XVIII в. Именно в это время были изобретены первые паровые машины, что ознаменовало наступление промышленной революции. Физики стали искать способы увеличить их эффективность, и в 1824 г. Сади Карно в сочинении «О движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» доказал теорему, определяющую максимальный коэффициент полезного действия (КПД) тепловых машин.

Работа С. Карно и книга Ш. Фурье «Аналитическая теория тепла» (1822 г.), посвященная вопросам теплопроводности, считаются классическими трудами, заложившими основы термодинамики.

В 40-х гг. XIX в. Р. Майер и Дж. Джоуль количественно определили связь между механической работой и теплотой и сформулировали универсальный закон сохранения и превращения энергии в

термодинамических процессах. В 50-е годы XIX в. Клаузиус и Кельвин систематизировали накопленные к тому времени знания и ввели понятия энтропии и абсолютной температуры.

В конце XIX в. равновесная термодинамика была развита в работах Гиббса, который создал метод термодинамических потенциалов.

В 1906 г. В. Нернст опубликовал работу, в которой была сформулирована теорема, впоследствии получившая его имя и известная как третье начало термодинамики.

3.2. Термодинамические законы идеального газа

Уравнение Менделеева–Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad pV = N k T,$$

где p – давление; V – объем; m – масса; μ – молярная масса; T – термодинамическая температура газа; $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; N – число молекул (атомов); $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Уравнение Клапейрона

$$\frac{pV}{T} = \text{const}$$

Уравнения квазистатических (равновесных) процессов:

1) изобарный процесс ($p = \text{const}$, $m = \text{const}$)

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \quad \text{или} \quad \frac{V}{T} = \text{const};$$

2) изохорный процесс ($V = \text{const}$, $m = \text{const}$)

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \quad \text{или} \quad \frac{p}{T} = \text{const};$$

3) изотермический процесс ($T = \text{const}$, $m = \text{const}$)

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \quad \text{или} \quad pV = \text{const};$$

4) *адиабатный процесс* – это термодинамический процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой. Этот процесс осуществляется при быстром расширении или сжатии ($Q = 0$, $m = \text{const}$):

– в координатах pV

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma, \quad \text{или} \quad pV^\gamma = \text{const};$$

– в координатах TV

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}, \quad \text{или} \quad TV^{\gamma-1} = \text{const}$$

– в координатах Tr

$$T_1^\gamma p_1^{1-\gamma} = T_2^\gamma p_2^{1-\gamma}, \quad \text{или} \quad T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const},$$

где γ – коэффициент Пуассона (показатель адиабаты).

5) политропный процесс ($c = \text{const}$, $m = \text{const}$):

– в координатах pV

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n, \quad \text{или} \quad pV^n = \text{const};$$

– в координатах TV

$$T_1 V_1^{n-1} = T_2 V_2^{n-1}, \quad \text{или} \quad TV^{n-1} = \text{const};$$

– в координатах Tr

$$T_1^n p_1^{1-n} = T_2^n p_2^{1-n}, \quad \text{или} \quad T^n p^{1-n} = \text{const},$$

где n – показатель политропы.

Закон Дальтона. Давление смеси $p_{\text{см}}$ идеальных газов равно сумме парциальных p_i давлений

$$p_{\text{см}} = \sum_{i=1}^N p_i,$$

где N – число компонентов смеси. *Парциальное давление* газа – это такое давление, которое имел бы данный газ, если бы он один занимал весь объем.

Молярная масса смеси химически невзаимодействующих газов

$$\mu_{\text{см}} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{\sum_{i=1}^N \nu_i} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{\sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\mu_i}},$$

где m_i – масса i -го компонента смеси; ν_i – число молей i -го компонента смеси; μ_i – молярная масса i -го компонента смеси; N – число компонентов смеси.

3.3. Термодинамическая работа, теплота, внутренняя энергия

Закон Больцмана равнораспределения энергии по степеням свободы молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} k T,$$

где $\langle \varepsilon \rangle$ – средняя кинетическая энергия молекулы идеального газа; i – сумма поступательного, вращательного и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы, $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} + 2i_{\text{кол}}$; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Числом степеней свободы i называется количество независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве.

Для всех молекул число степеней свободы поступательного движения $i_{\text{пост}} = 3$. Для линейных молекул число степеней свободы вращательного движения $i_{\text{вр}} = 2$, а для объемных – $i_{\text{вр}} = 3$. Число колебательных степеней свободы движения атомов в молекуле

$$i_{\text{кол}} = 3N - (i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}}),$$

где N – число атомов в молекуле; Таким образом, для атомов в линейной молекуле $i_{\text{кол}} = 3N - 5$, а в объемной – $i_{\text{кол}} = 3N - 6$.

Закон Джоуля. Внутренняя энергия определенной массы идеального газа не зависит от его объема, а зависит только от термодинамической температуры. Внутренняя энергия U системы является функцией состояния, и ее изменение $\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1$ определяется лишь начальным и конечным состоянием системы, т. е. не зависит от того, каким образом система перешла из одного состояния в другое.

Внутреннюю энергию идеального газа можно найти по любой из следующих формул:

$$U = N \langle \varepsilon \rangle = N \frac{i}{2} kT = \frac{m}{\mu} N_A \frac{i}{2} kT = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT = \frac{m}{\mu} c_{\mu V} T,$$

где N – число молекул; m – масса; μ – молярная масса газа; N_A – число Авогадро; $c_{\mu V}$ – молярная теплоемкость при постоянном объеме.

Изменение внутренней энергии идеального газа

$$dU = \frac{m}{\mu} c_{\mu V} dT, \quad \Delta U_{1-2} = U_2 - U_1 = \frac{m}{\mu} c_{\mu V} (T_2 - T_1),$$

где индексы 1 и 2 соответствуют начальному и конечному термодинамическим состояниям.

Работа газа A_{1-2} , совершаемая при переходе из одного состояния в другое, зависит не только от начального и конечного состояний системы, но и от вида процесса, в котором происходит изменение состояния.

Работа расширения идеального газа

$$A_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} p dV.$$

Работа расширения газа в изобарном процессе

$$A_{1-2} = p(V_2 - V_1).$$

Работа расширения газа в изохорном процессе

$$A_{1-2} = 0.$$

Работа расширения, совершаемая идеальным газом в изотермическом процессе,

$$A_{1-2} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Работа расширения, совершаемая идеальным газом в адиабатном процессе,

$$A_{1-2} = -\Delta U_{1-2};$$

$$A_{1-2} = -\frac{m}{\mu} c_{\mu V} (T_2 - T_1) = \frac{m}{\mu} c_{\mu V} (T_1 - T_2).$$

Работа расширения, совершаемая идеальным газом в политропном процессе,

$$A_{1-2} = \frac{p_1 V_1}{n-1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right),$$

где n – показатель политропы.

3.4. Первое начало термодинамики. Теплоемкость

Количество теплоты Q при переходе из одного состояния в другое так же, как и работа, зависит от вида процесса. Если к системе подводится тепло, то оно считается положительным ($Q > 0$), если тепло отводится от системы, то оно считается отрицательным ($Q < 0$).

Первое начало термодинамики является обобщением экспериментального материала и представляет собой одну из форм закона сохранения энергии применительно к тепловым процессам.

Первое начало термодинамики:

– в дифференциальном виде

$$\delta Q = dU + \delta A ;$$

– в интегральном виде

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + A_{1-2} ,$$

где Q_{1-2} – теплота, переданная системе, зависящая от процесса перехода системы из состояния 1 в состояние 2; ΔU_{1-2} – приращение внутренней энергии системы, не зависящее от процесса перехода системы из состояния 1 в состояние 2 (dU – полный дифференциал); A_{1-2} – работа системы против внешних сил, зависящая от процесса перехода системы из состояния 1 в состояние 2.

Элементарное количество теплоты δQ положительно, если оно сообщается системе, и отрицательно, если оно забирается от нее. Элементарная работа δA , производимая системой над внешними телами (против внешних сил), имеет положительный знак, а работа, производимая внешними телами над системой (внешними силами), имеет отрицательный знак.

Теплота испарения и теплота конденсации

$$Q = rm ,$$

где r – удельная теплота испарения (конденсации); m – масса испарившегося (сконденсировавшегося) вещества.

Теплота кристаллизации и теплота плавления

$$Q = \lambda m ,$$

где λ – удельная теплота плавления (кристаллизации); m – масса расплавленного (кристаллизовавшегося) вещества.

Теплота сгорания топлива

$$Q = qm ,$$

где q – удельная теплота сгорания топлива; m – масса сгоревшего топлива.

Теплоемкостью тела C называется отношение теплоты dQ , сообщаемой телу, к изменению температуры dT в рассматриваемом термодинамическом процессе

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

Удельная теплоемкость (теплоемкость единицы массы вещества)

$$c_{уд} = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT},$$

где m – масса вещества.

Молярная теплоемкость (теплоемкость одного моля вещества)

$$c_{\mu} = \frac{1}{\nu} \frac{\delta Q}{dT},$$

где ν – число молей.

Полная C , удельная $c_{уд}$ и молярная c_{μ} теплоемкости связаны между собой следующими соотношениями:

$$C = c_{уд} m = c_{\mu} \nu, \quad c_{\mu} = \mu c_{уд}.$$

Расчетное соотношение для молярной теплоемкости идеального газа при постоянном объеме

$$c_{\mu V} = \frac{i}{2} R.$$

Расчетное соотношение для молярной теплоемкости идеального газа при постоянном давлении

$$c_{\mu P} = \frac{i+2}{2} R.$$

Уравнение Майера для идеального газа

$$c_{\mu P} = c_{\mu V} + R.$$

Коэффициент Пуассона (показатель адиабаты) для идеального газа

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{c_{\mu p}}{c_{\mu V}} = \frac{c_{ydp}}{c_{ydv}}.$$

Связь коэффициента Пуассона с числом степеней свободы

$$\gamma = \frac{i+2}{i}.$$

Молярная теплоемкость идеального газа в политропном процессе

$$c_{\mu n} = \frac{n-\gamma}{(\gamma-1)(n-1)} R,$$

где n – показатель политропы; γ – коэффициент Пуассона.

Показатель политропы для идеального газа

$$n = \frac{c_{\mu n} - c_{\mu p}}{c_{\mu n} - c_{\mu V}}.$$

3.5. Второе начало термодинамики. Термодинамический цикл

Второе начало (второй закон) *термодинамики* позволяет установить направление самопроизвольных термодинамических процессов. Оно также вместе с первым началом дает возможность определить количественные соотношения между макроскопическими параметрами тел в состоянии термодинамического равновесия.

Термодинамический процесс, совершаемый системой, называется *обратимым*, если после него можно вернуть систему и всю окружающую среду в первоначальное состояние без каких либо изменений. Если процесс не удовлетворяет этому условию, то он – *необратимый*. Необходимое условие обратимости процесса в термодинамике – его *равновесность* (квазистатичность), т. е. любой обратимый процесс является равновесным, но не любой равновесный процесс обратим. Все реальные процессы протекают с конечной

скоростью и сопровождаются трением и теплообменом при конечной разности температур контактирующих тел. Следовательно, все реальные процессы, строго говоря, необратимы. Но в некоторых условиях протекания процессов их можно приближенно считать обратимыми.

Круговым процессом (циклом) называется совокупность нескольких термодинамических процессов, в результате которых система возвращается в исходное состояние. На диаграммах состояния (в координатах $p-V$, $p-T$, $V-T$) круговые процессы изображаются в виде замкнутых кривых. Тело, совершающее круговой процесс и обменивающееся энергией с другими телами, называется рабочим телом. Обычно таким телом является газ. Круговые процессы лежат в основе работы всех тепловых машин.

Любая тепловая машина осуществляет *прямой* цикл, получая энергию в форме тепла от внешних источников и часть ее превращая в работу. *Обратным* циклом называется круговой процесс с отрицательной работой системы, осуществляемый в холодильных установках, где рабочее тело получает энергию в виде работы внешних сил и передает ее в форме теплоты от холодного тела к более горячему (при этом замкнутая кривая в координатах $p-V$ обходится против часовой стрелки). Для циклического процесса полное изменение внутренней энергии $\Delta U_{1-2} = 0$ (совпадают начальное и конечное состояния).

Работа, совершенная рабочим телом, в прямом цикле (тепловая машина)

$$A_{\text{ц}} = Q_{\text{н}} + Q_{\text{х}} = Q_{\text{н}} - |Q_{\text{х}}|,$$

где $Q_{\text{н}}$ – теплота, полученная рабочим телом от нагревателя; $Q_{\text{х}}$ – теплота, отданная рабочим телом холодильнику.

Термический КПД для прямого цикла (теплового двигателя)

$$\eta = \frac{A_{\text{ц}}}{Q_{\text{н}}} = \frac{Q_{\text{н}} - |Q_{\text{х}}|}{Q_{\text{н}}} = 1 - \frac{|Q_{\text{х}}|}{Q_{\text{н}}}.$$

Холодильный коэффициент для обратного цикла (холодильной машины)

$$\varepsilon = \frac{Q_x}{|A_{\text{ц}}|} = \frac{Q_x}{|Q_n| - Q_x},$$

где Q_x – теплота, отбираемая от охлаждаемого тела; Q_n – теплота, передаваемая окружающей среде (нагреваемому телу).

Идеальная машина Карно совершает обратимый круговой процесс (цикл Карно), состоящий из двух изотерм и двух адиабат, как показано на рис. 3.1. В прямом цикле Карно

1–1' – изотермическое расширение в контакте с нагревателем

$T_1 = T_n$ и $Q_1 > 0$;

1'–2 – адиабатическое расширение ($Q = 0$);

2–2' – изотермическое сжатие в контакте с холодильником

$T_2 = T_x$ и $Q_2 < 0$;

2'–1 – адиабатическое сжатие ($Q = 0$).

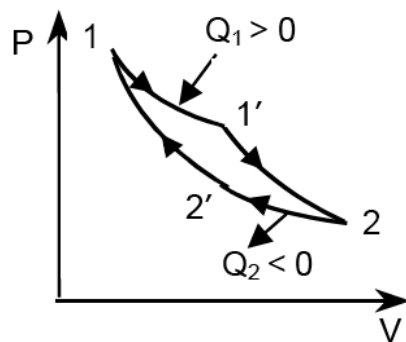


Рис. 3.1. Цикл идеальной тепловой машины (Цикл Карно)

Теорема Карно: КПД любой тепловой машины не может превосходить КПД идеальной машины Карно с теми же температурами нагревателя и холодильника.

Термический КПД для прямого цикла Карно

$$\eta_K = \frac{T_n - T_x}{T_n} = 1 - \frac{T_x}{T_n},$$

где T_n – температура нагревателя; T_x – температура холодильника.

Холодильный коэффициент для обратного цикла Карно

$$\varepsilon_k = \frac{T_x}{T_n - T_x},$$

где T_x – температура охлаждаемого тела; T_n – температура окружающей среды (нагреваемого тела).

Существует несколько эквивалентных *формулировок второго начала термодинамики*, которые указывают условия превращения теплоты в работу:

1) невозможен процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от холодного тела к горячему (Р. Клаузиус);

2) невозможен процесс, единственным результатом которого является совершение работы за счет охлаждения одного тела (У. Томсон – М. Планк).

3.6. Энтропия

Приведенное количество теплоты равно: $\left(\frac{\delta Q}{T}\right)$. Можно показать, что приведенное количество тепла не зависит от пути перехода, а определяется только начальным и конечным состояниями системы. Для обратимых процессов оно является полным дифференциалом функции состояния системы S , называемой *энтропией* системы:

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{\text{обр}}.$$

Энтропия системы определяется с точностью до произвольной постоянной. Физический смысл имеет не сама энтропия, а разность энтропий двух равновесных состояний:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

Если переход из начального состояния в конечное осуществляется несколькими последовательными процессами, то полное из-

менение энтропии равно алгебраической сумме изменений энтропии в каждом процессе.

Изменение энтропии идеального газа в произвольном обратимом (квазистатическом) процессе

$$\begin{aligned} S_2 - S_1 &= \frac{m}{\mu} c_{\mu V} \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1} = \\ &= \frac{m}{\mu} c_{\mu V} \ln \frac{p_2}{p_1} + \frac{m}{\mu} c_{\mu p} \ln \frac{V_2}{V_1} = \\ &= \frac{m}{\mu} c_{\mu p} \ln \frac{T_2}{T_1} - \frac{m}{\mu} R \ln \frac{p_2}{p_1}, \end{aligned}$$

где индексы 1 и 2 соответствуют начальному и конечному состояниям соответственно.

Изменение энтропии идеального газа в обратимом (квазистатическом) адиабатном процессе ($Q = 0$, $m = \text{const}$)

$$dS = 0 \quad \text{или} \quad \Delta S = 0, \quad \text{т. е.} \quad S = \text{const.}$$

а в необратимом процессе возрастает:

$$\Delta S = S_2 - S_1 > 0.$$

Следовательно, *энтропия изолированной системы не может убывать*. Максимально возможное значение энтропии системы достигается в состоянии равновесия.

Для обратимых процессов выполняется термодинамическое тождество

$$\delta Q = TdS = dU + \delta A,$$

поэтому элементарная работа

$$\delta A = TdS - dU = -(dU - TdS).$$

Значит, в природе невозможен процесс, в результате которого внутренняя энергия dU (тепловая энергия хаотического движения) перешла бы полностью в полезную работу (энергию направленного движения). Таким образом, энтропия является мерой беспорядка (хаоса) в системе. Чем больше энтропия системы, тем меньше вероятность совершения системой полезной работы, а в состоянии рав-

новесия система не может совершать полезную работу. Энтропия связана с термодинамической вероятностью (статистическим весом) Ω осуществления данного состояния системы. Количественное соотношение установлено Больцманом

$$S = k \ln \Omega,$$

где k - постоянная Больцмана. Последнее выражение иногда считают еще одной математической формулировкой II начала термодинамики, так же и как принцип возрастания энтропии.

В термодинамике для построения графиков циклов часто используются координаты S - T . Цикл Карно в таких координатах выглядит как на рис. 3.2.

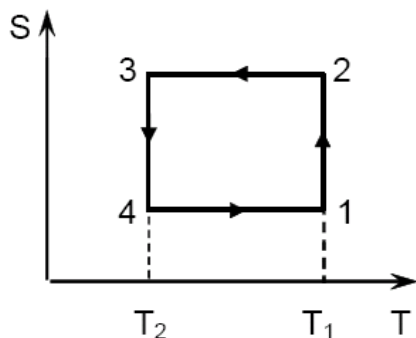


Рис. 3.2. Цикл Карно в координатах S - T

4. ЗАДАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

1. Цикл тепловой машины состоит из трех процессов: изотермы 1–2, изобары 2–3 и изохоры 3–1. Изотермический процесс происходит при максимальной температуре цикла, равной 400 К. Известно также, что в пределах цикла объем газа изменяется в 2 раза. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ в количестве 2 кмоль. Построить график цикла в координатах p - V и S - T . Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти

изменение энтропии в процессе 2-3. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

2. Цикл тепловой машины состоит из трех процессов: изобары 1–2, изохоры 2–3 и изотермы 3–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изохорный процесс протекает при максимальном объеме. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $p_1 = 100$ кПа, $V_1 = 10,0$ л, $T_1 = 450$ К, $V_2 = 20,0$ л. Найти: термический КПД цикла; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 2-3. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

3. Цикл тепловой машины состоит из трех процессов: изобары 1–2, изохоры 2–3, адиабаты 3–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изобарический процесс протекает при максимальном давлении цикла. Рабочее тело – идеальный одноатомный газ, $p_1 = 400$ кПа, $V_1 = 10,0$ л, $T_1 = 300$ К, $V_2 = 30,0$ л. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 1-2. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

4. Цикл тепловой машины состоит из трех процессов: адиабаты 1–2, изобары 2–3 и изохоры 3–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изобарический процесс протекает при минимальном давлении. Рабочее тело – идеальный одноатомный газ, $p_1 = 100$ кПа, $V_1 = 1,00$ л, $T_1 = 350$ К, $p_3 = 50,0$ кПа. Найти: термический КПД цикла; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 3-1. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

5. Цикл тепловой машины состоит из трех процессов: изобары 1–2, адиабаты 2–3 и изотермы 3–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изотермический процесс протекает при минимальной температуре цикла. Рабочее тело – идеальный одноатом-

ный газ, $p_1 = 100$ кПа, $T_1 = 400$ К, $p_3 = 10,0$ кПа, $V_3 = 2,00$ л. Найти: термический КПД цикла; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 3-1. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

6. Цикл тепловой машины состоит из трех процессов: изотермы 1–2, изобары 2–3 и адиабаты 3–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изотермический процесс протекает при максимальной температуре цикла. Рабочее тело – идеальный одноатомный газ, $p_1 = 100$ кПа, $V_1 = 2,00$ л, $T_1 = 300$ К, $p_3 = 10,0$ кПа. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 2-3. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

7. Цикл тепловой машины состоит из трех процессов: изотермы 1–2, изохоры 2–3 и адиабаты 3–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изотермический процесс протекает при максимальной температуре цикла. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $p_2 = 20,0$ кПа, $p_3 = 10,0$ кПа, $V_3 = 4,00$ л. Найти: термический КПД цикла; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 1-2. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

8. Цикл тепловой машины состоит из трех процессов: адиабаты 1–2, изотермы 2–3 и изохоры 3–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изохорный процесс протекает при минимальном объеме. Рабочее тело – идеальный трехатомный газ, $T_2 = 200$ К, $V_2 = 4,00$ л, $p_2 = 10,0$ кПа, $p_3 = 40,0$ кПа. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти

изменение энтропии в процессе 2-3. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

9. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: изобары 1–2, адиабаты 2–3, изобары 3–4 и изохоры 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изохорный процесс протекает при минимальном объеме. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $T_1 = 400$ К, $p_1 = 200$ кПа, $p_4 = 100$ кПа, $V_1 = 4,00$ л, $V_2 = 6,0$ л. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 1-2. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

10. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: изотермы 1–2, изобары 2–3, адиабаты 3–4 и изохоры 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изотермический процесс протекает при максимальной температуре цикла. Рабочее тело – идеальный одноатомный газ, $T_1 = 600$ К, $T_4 = 300$ К, $p_1 = 100$ кПа, $p_3 = 10,0$ кПа, $V_4 = 2,00$ л. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 1-2. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

11. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: изобары 1–2, двух изотерм 2–3 и 4–1 и изохоры 3–4. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изобарный процесс протекает при максимальном давлении. Рабочее тело – идеальный трехатомный газ, $p_1 = 100$ кПа, $V_1 = 2,00$ л, $V_2 = 4,00$ л, $p_4 = 10,0$ кПа. Найти: термический КПД цикла; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 1-2. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

12. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: двух изобар 1–2, 3–4 и двух адиабат 2–3, 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если в начальном состоянии рабочее тело занимает минимальный объем. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $p_1 = 300$ кПа, $p_4 = 100$ кПа, $T_1 = 300$ К, $T_2 = 700$ К, $V_1 = 1,00$ л. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 3–4. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

13. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: изобары 1–2, двух изохор 2–3, 4–1 и изотермы 3–4. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изотермический процесс протекает при минимальной температуре цикла. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $p_1 = 400$ кПа, $V_1 = 10,0$ л, $V_2 = 20,0$ л, $T_1 = 350$ К, $p_3 = 100,0$ кПа. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 4–1. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

14. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: изобары 1–2, двух изохор 2–3, 4–1 и адиабаты 3–4. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если в исходном состоянии рабочее тело занимает минимальный объем при максимальном давлении. Рабочее тело – идеальный одноатомный газ в количестве 2 моль, $p_1 = 800$ кПа, $p_3 = 100$ кПа, $V_1 = 1,00$ л, $V_3 = 3,00$ л. Найти: термический КПД цикла; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 2–3. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

15. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: изобары 1–2, изохоры 2–3, адиабаты 3–4 и изотермы 4–1. Построить

график цикла в координатах p - V и S - T , если изохорный процесс протекает при максимальном объеме. Рабочее тело – идеальный одноатомный газ, $T_1 = 400$ К, $p_1 = 1,00$ МПа, $V_1 = 3,00$ л, $V_3 = 7,00$ л, $V_4 = 5,00$ л. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 4-1. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

16. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: адиабаты 1–2, двух изохор 2–3, 4–1 и изотермы 3–4. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изотермический процесс протекает при минимальной для цикла температуре. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $T_2 = 700$ К, $T_3 = 600$ К, $p_1 = 10,0$ кПа, $V_3 = 2,00$ л, $V_4 = 1,00$ л. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 3–4. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

17. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: двух изобар 1–2, 3–4, изохоры 2–3 и изотермы 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изотермический процесс протекает при минимальной для цикла температуре. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $p_1 = 400$ кПа, $T_1 = 300$ К, $V_1 = 4,00$ л, $V_2 = 10,0$ л, $p_4 = 200$ кПа. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 4-1. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

18. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: двух изохор 4–1, 2–3, изотермы 1–2 и адиабаты 3–4. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изотермический процесс имеет максимальную для цикла температуру. Рабочее тело – иде-

альный двухатомный газ, $T_2 = 600 \text{ К}$, $T_3 = 300 \text{ К}$, $p_3 = 10,0 \text{ кПа}$, $V_3 = 2,00 \text{ л}$, $V_4 = 1,00 \text{ л}$. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 2-3. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

19. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: двух адиабат 1–2, 3–4 и двух изохор 2–3, 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T . Рабочее тело – идеальный одноатомный газ, $p_1 = 1 \text{ атм}$, $T_1 = 500 \text{ К}$, $V_1 = 10,0 \text{ л}$, $V_2 = 40,0 \text{ л}$, $p_4 = 50,0 \text{ кПа}$. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 2-3. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

20. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: двух адиабат 1–2, 3–4, изобары 2–3 и изохоры 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изобарический процесс протекает при минимальном давлении. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $T_1 = 600 \text{ К}$, $p_1 = 100 \text{ кПа}$, $p_3 = 10,0 \text{ кПа}$, $T_4 = 300 \text{ К}$, $V_2 = 2,00 \text{ л}$. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 4-1. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

21. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: изотермы 1–2, двух изохор 2–3, 4–1 и изобары 3–4. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изотермический процесс протекает при максимальной температуре цикла. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $T_1 = 650 \text{ К}$, $p_1 = 500 \text{ кПа}$, $V_1 = 10,0 \text{ л}$, $V_2 = 30,0 \text{ л}$, $p_3 = 100 \text{ кПа}$. Найти: температуры для характерных то-

чек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 2-3. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

22. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: адиабаты 1–2, двух изохор 2–3, 4–1 и изобары 3–4. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изобарический процесс протекает при минимальном давлении. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $p_1 = 600$ кПа, $V_1 = 1,00$ л, $V_2 = 2,00$ л, $p_3 = 100$ кПа, $T_1 = 650$ К. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 3-4. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

23. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: двух изотерм 1–2, 3–4, изобары 2–3 и изохоры 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изобарический процесс протекает при минимальном давлении. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $T_1 = 600$ К, $p_1 = 100$ кПа, $p_3 = 10,0$ кПа, $T_4 = 300$ К, $V_1 = 2,00$ л. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 3-4. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

24. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: двух изобар 1–2, 3–4, изотермы 2–3 и адиабаты 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изотермический процесс протекает при максимальной для цикла температуре. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $p_1 = 100$ кПа, $V_1 = 10,0$ л, $T_1 = 300$ К, $T_2 = 600$ К, $p_4 = 10,0$ кПа. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество

теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 1-2. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

25. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: двух изобар 1–2, 3–4, адиабаты 2–3 и изотермы 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изотермический процесс соответствует минимальной температуре цикла. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $p_1 = 100$ кПа, $V_1 = 10,0$ л, $T_1 = 300$ К, $T_2 = 600$ К, $p_4 = 40,0$ кПа. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 3-4. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

26. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: двух изобар 1–2, 3–4, изохоры 2–3 и адиабаты 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изохорный процесс протекает при максимальном объеме. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $p_1 = 400$ кПа, $T_1 = 300$ К, $V_1 = 4,00$ л, $V_2 = 12,0$ л, $p_4 = 100$ кПа. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 1-2. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

27. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: адиабаты 1–2, изобары 2–3, изотермы 3–4 и изохоры 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изотермический процесс протекает при минимальной температуре. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $V_1 = 10,0$ л, $T_1 = 400$ К, $p_1 = 100$ кПа, $p_2 = 20,0$ кПа, $T_4 = 200$ К. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в

процессе 2-3. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

28. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: изобары 1–2, адиабаты 2–3, изохоры 3–4 и изотермы 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если изобарный процесс протекает при максимальном давлении. Рабочее тело – идеальный двухатомный газ, $p_1 = 100$ кПа, $T_1 = 200$ К, $V_1 = 2,00$ л, $V_2 = 5,00$ л, $p_4 = 10,0$ кПа. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 1-2. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

29. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: изотермы 1–2, адиабаты 2–3, изобары 3–4 и изохоры 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T , если в начальном состоянии рабочее тело занимает минимальный объем, обладая при этом максимальным давлением. Рабочее тело – идеальный одноатомный газ, $T_1 = 400$ К, $p_1 = 2,00$ МПа, $V_2 = 10,0$ л, $p_4 = 3$ атм, $V_4 = 3,00$ л. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 1-2. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

30. Цикл тепловой машины состоит из четырех процессов: двух изобар 1–2, 3–4 и двух изохор 2–3, 4–1. Построить график цикла в координатах p - V и S - T . Рабочее тело – идеальный одноатомный газ, $p_1 = 1,00$ МПа, $T_1 = 400$ К, $V_1 = 300$ л, $V_2 = 600$ л, $p_4 = 300$ кПа. Найти: температуры для характерных точек цикла; его термический КПД; работу, совершенную рабочим телом; количество теплоты, полученное от нагревателя; количество теплоты, переданное холодильнику. Найти изменение энтропии в процессе 1-2. Определить КПД цикла Карно при максимальной и минимальной температурах данного цикла.

5. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Гелий (He) массой $m=10,0$ г в качестве рабочего тела используется в прямом цикле, состоящем из двух изобар, адиабаты и изохоры. В начальном состоянии гелий занимает объем $V_1=12,5$ л при давлении $p_1=500$ кПа. При изобарном нагревании объем газа увеличивается в два раза, а затем газ адиабатно расширяется, в результате чего его температура уменьшается на $\Delta T=100$ К. Затем газ изобарно охлаждают до первоначального объема и изохорно повышают давление до первоначального значения. Изобразить цикл в pV – координатах. Определить температуры характерных точек цикла и КПД цикла.

Решение.

Одноатомный газ гелий имеет три степени свободы $i=3$. Найдем изохорную и изобарную молярные теплоемкости гелия

$$c_{\mu V} = \frac{i}{2} R = \frac{3}{2} 8,31 = 12,5 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)};$$

$$c_{\mu p} = \frac{i+2}{2} = \frac{3+2}{2} 8,31 = 20,8 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

Коэффициент Пуассона (показатель адиабаты) гелия

$$\gamma = \frac{c_{\mu p}}{c_{\mu V}} = \frac{i+2}{i} = \frac{3+2}{3} = 1,67.$$

Количество вещества в рабочем теле

$$\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} = 2,5 \text{ моль}.$$

Графическое изображение цикла дано на рис. 5.1.

Температуру газа в начальном состоянии найдем из уравнения Клапейрона–Менделеева

$$p_1 V_1 = \nu R T_1;$$

$$T_1 = \frac{p_1 V_1}{\nu R} = \frac{500 \cdot 10^3 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 8,31} = 301 \text{ К.}$$

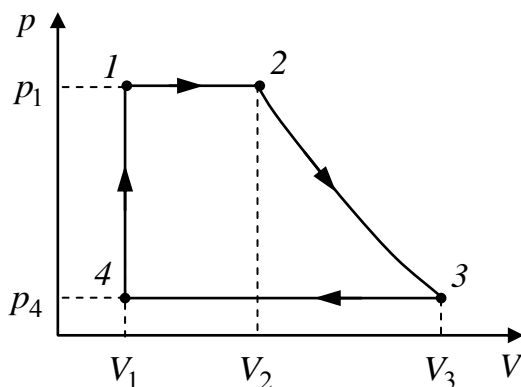


Рис. 5.1. График цикла

Температуры и объемы в изобарном процессе $1-2$ связаны следующим соотношением:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2},$$

откуда и находим температуру T_2

$$T_2 = T_1 \frac{V_2}{V_1} = 301 \cdot 2 = 602 \text{ К.}$$

Температура T_3 в точке 3

$$T_3 = T_2 - \Delta T_{2-3} = 602 - 100 = 502 \text{ К.}$$

Температуры и давления в адиабатном процессе $2-3$ связаны следующим соотношением:

$$T_2^\gamma p_2^{1-\gamma} = T_3^\gamma p_3^{1-\gamma}.$$

Давление p_3 в точке 3

$$p_3 = p_2 \left(\frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = 500 \cdot 10^3 \left(\frac{602}{502} \right)^{\frac{1,67}{1-1,67}} = 318 \cdot 10^3 \text{ Па} = 318 \text{ кПа}.$$

Давление p_4 и объем V_4 в точке 4

$$p_4 = p_3 = 318 \text{ кПа}, \quad V_4 = V_1 = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Температуру газа в точке 4 найдем из уравнения Клапейрона–Менделеева

$$p_4 V_4 = \nu R T_4;$$

$$T_4 = \frac{p_4 V_4}{\nu R} = \frac{318 \cdot 10^3 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 8,31} = 191 \text{ К}.$$

КПД цикла

$$\eta = 1 - \frac{|Q_x|}{Q_H},$$

где Q_x – теплота, отданная рабочим телом холодильнику; Q_H – теплота, переданная от нагревателя рабочему телу.

Теплота Q_{1-2} в изобарном процессе 1–2

$$Q_{1-2} = \nu c_{\mu p} (T_2 - T_1) = 2,5 \cdot 20,8 (602 - 301) = 15,6 \cdot 10^3 = 15,6 \text{ кДж}.$$

Теплота в адиабатном процессе 2–3

$$Q_{2-3} = 0.$$

Теплота Q_{3-4} в изобарном процессе 3–4

$$Q_{3-4} = \nu c_{\mu p} (T_4 - T_3) = 2,5 \cdot 20,8 \cdot (191 - 502) = -16,2 \cdot 10^3 = -16,2 \text{ кДж}.$$

Теплота Q_{4-1} в изохорном процессе 4–1

$$Q_{4-1} = \nu c_{\mu V} (T_1 - T_4) = 2,5 \cdot 12,5 \cdot (301 - 191) = 3,44 \cdot 10^3 = 3,44 \text{ кДж}.$$

Если теплота положительная, то она передается от нагревателя рабочему телу, следовательно,

$$Q_n = Q_{1-2} + Q_{4-1} = (15,6 + 3,44)10^3 = 19,0 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 19,0 \text{ кДж}.$$

Если теплота отрицательная, то она передается от рабочего тела холодильнику, следовательно,

$$Q_x = Q_{3-4} = -16,2 \text{ кДж}.$$

КПД цикла

$$\eta = 1 - \frac{|-16,2|}{19,0} = 0,147 = 14,7 \text{ \%}.$$

Ответ: $T_1 = 301 \text{ К}$, $T_2 = 602 \text{ К}$, $T_3 = 502 \text{ К}$, $T_4 = 191 \text{ К}$, $\eta = 14,7 \text{ \%}$.

Задача 2.

Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Температура холодильника ниже температуры нагревателя на 20 %. Какую работу совершает машина за один цикл, если при этом она получает $Q_n = 6000 \text{ Дж}$ теплоты ?

Решение.

Выразим соотношение между температурами нагревателя и холодильника в относительных единицах

$$\frac{T_n - T_x}{T_n} = k.$$

С другой стороны, КПД идеальной тепловой машины

$$\eta = \frac{T_n - T_x}{T_n}.$$

Сравнивая эти два выражения, получим

$$k = \eta = 0,2.$$

КПД, измеряемое в процентах, определяется формулой

$$\eta = \frac{A}{Q_n} \cdot 100 \text{ \%},$$

откуда

$$A = \frac{\eta Q_n}{100 \%} = \frac{20 \cdot 6000}{100} = 1200 \text{ Дж.}$$

Ответ: $A = 1200 \text{ Дж.}$

Задача 3.

Найти приращение энтропии 10,5 г водорода при переходе от объема 25,6 л при давлении 175 кПа к объему 78,6 л при давлении 101 кПа. Газ считать идеальным.

Решение.

Изменение энтропии при обратимом квазистатическом переходе из одного состояния в другое определяется только параметрами этих состояний и не зависит от процесса. Из условия задачи характер процесса неизвестен, поэтому переведем идеальный газ из первого состояния во второе с помощью обратимых квазистатических изопроцессов, например, выберем изобарное расширение от объема V_1 до V_2 при давлении p_1 и изохорное изменение давления от p_1 до p_2 в объеме V_2 .

Изменение энтропии при обратимом переходе из состояния 1 в состояние 2

$$\begin{aligned} S_2 - S_1 &= \frac{m}{\mu} c_{\mu p} \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{m}{\mu} c_{\mu V} \ln \frac{p_2}{p_1} = \\ &= \frac{m}{\mu} \frac{R}{2} \left[(i+2) \ln \frac{V_2}{V_1} + i \ln \frac{p_2}{p_1} \right], \end{aligned}$$

где $c_{\mu p} = \frac{i+2}{2} R$ – молярная теплоемкость при постоянном давлении;

$c_{\mu V} = \frac{i}{2} R$ – молярная теплоемкость при постоянном объеме; $i = 5$ – суммарное число степеней свободы поступательного и вращательного движений, у водорода.

Подставим числовые значения и получим

$$S_2 - S_1 = \frac{10,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \frac{8,31}{2} \left[(5 + 2) \ln \frac{78,6}{25,6} + 5 \ln \frac{175}{101} \right] = 231 \text{ Дж/К.}$$

Ответ: $S_2 - S_1 = 231 \text{ Дж/К.}$

6. РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Волькенштейн В.С.* Сборник задач по общему курсу физики. СПб., М.: Лань, 2010.
2. *Детлаф А.А.* Курс физики / Детлаф А.А., Яворский Б.М. М.: Высшая школа, 2009.
3. *Прошкин С.С., Ниженский Н.В., Самолетов В.А.* Механика, термодинамика и молекулярная физика. Сборник задач, М: Юрайт, 2017.
4. *Савельев И.В.* Курс физики, Т. 2. СПб., М.: Лань, 2010.
5. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики, Т. 3, М., Наука, 2009.
6. *Трофимова Т.И.* Курс физики. М.: Высшая школа, 2009.
7. *Чертов А.Г.* Задачник по физике. / Чертов А.Г., Воробьев А.А. М.: Высшая школа, 2008.
8. *Яворский Б.М.* Основы физики, Т. 2. / Яворский Б.М., Пинский А.А. М.: Наука, 2009

ПРИЛОЖЕНИЯ

Основные физические постоянные

Таблица 1

Физическая величина	Численное значение
Скорость света в вакууме	$c = 2,9979250(10) \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Гравитационная постоянная	$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,314 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}$
Элементарный заряд	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса электрона	$m_e = 0,911 \cdot 10^{-30} \text{ кг} = 0,511 \text{ МэВ}$
Масса протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
	$\hbar = h/2\pi = 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

Таблица 2

Атомные массы некоторых элементов

Элемент	Атомная масса	Элемент	Атомная масса
Азот	14	Олово	119
Аргон	40	Натрий	23
Водород	1	Неон	20
Гелий	4	Ртуть	201
Золото	197	Углерод	12
Кислород	16	Хлор	35,5

Таблица 3

Эффективные диаметры атомов и молекул

Название	Формула	Диаметр, нм
Азот	N ₂	0,35
Аммиак	NH ₃	0,30
Вода	H ₂ O	0,35
Водород	H ₂	0,27
	H	0,11
Гелий	He	0,22
Заись азота	N ₂ O	0,40
Кислород	O ₂	0,32
Криптон	Kr	0,40
Метан	CH ₄	0,37
Неон	Ne	0,32
Окись азота	NO	0,34
Угарный газ	CO	0,35
Углекислый газ	CO ₂	0,39

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Требования к содержанию отчета и к решению задач по расчетно – графической работе.....	4
2. Учебные материалы к разделу «Термодинамика».....	5
3. Задания для расчетно-графической работы.....	19
4. Примеры решения задач.....	29
Рекомендательный библиографический список.....	34
Приложения.....	34
Содержание	36