**Циклы. Расчет работы, внутренней энергии, тепловых эффектов и КПД**

**Задача 3.1**. Каким путем теоретически эффективнее повысить КПД машины Карно: увеличивая температуру нагревателя на при фиксированном значении температуры холодильника или понижая температуру холодильника на такую же величину при фиксированном значении температуры нагревателя ?

**Решение**. Для идеальной машины Карно:

– температура нагревателя.

– температура холодильника

В первом случае

Во втором:

Видно, что . Значит, выгоднее уменьшить температуру холодильника.

**Задача.3.2**. Тепловая машина Карно, имеющая КПД , начинает использоваться при тех же тепловых резервуарах как холодильная машина. Сколько тепла эта машина может перевести от холодильника к нагревателю за один цикл, если к ней за каждый цикл подводится работа кДж?

Решение.

– тепло от нагревателя.

– тепло для холодильника.

Для обратного процесса в формуле меняются знаки . В итоге формула останется прежней. Получим

**Задача.3.3**. Один моль одноатомного идеального газа совершает в тепловой машине цикл Карно между тепловыми резервуарами с температурами и . Наименьший объем газа в ходе цикла , наибольший — . Какую работу совершает эта машина за один цикл? Сколько тепла берет она от высокотемпературного резервуара за один цикл? Сколько тепла поступает за цикл в низкотемпературный резервуар?

**Решение**.

Работа за цикл Карно:

Тепло поступает и отдается только при изотермических процессах, поэтому

Для идеальных газов внутренняя энергия не зависит от объема, а зависит только от температуры, поэтому в изотермических процессах .

Работу легко найти, исходя из уравнений состояний.

Изотерма :

Аналогично

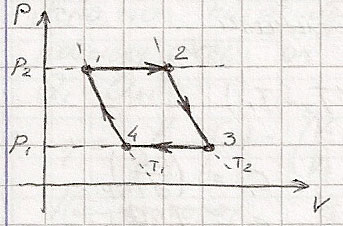
Для адиабат: , поэтому можем переписать

**Задача 3.4**. Тепловая машина Карно используется в качестве холодильной машины для поддержания некоторого резервуара при температуре . Температура окружающего воздуха . Какая механическая работа требуется для выполнения одного цикла машины, если при этом от оболочки отводится тепла?

**Решение**. Смотри решение задачи 3.2

**Задача 3.5**. Найти КПД цикла, состоящего из двух изотерм и двух изобар, предполагая, что рабочим веществом является идеальный газ.

**Решение**. Цикл замкнут, поэтому внутренняя энергия не изменилась, тогда полная работа:



– полученное тепло.

– отданное тепло.

Найдем полученное тепло . На участке 1-2 газ расширяется при постоянном давлении, значит, на этом участке он получает тепло (аналогично, на 3-4 отдает).

На изотерме 2-3 газ также получает тепло , причем внутренняя энергия не изменится, поскольку газ – идеальный . Здесь .

3.6. Найти КПД цикла, проводимого с идеальным газом и состоящего из двух изотерм с температурами Т{ и Т2 и двух изохор с объемами V{ и V2 (Тх > Т2, Vx > V2).

3.7. На рис. 325 изображена диаграмма обратимого цикла, выполняемого молем идеального газа в некоторой тепловой машине. Найти

работы Aitc, выполняемые машиной, и количества тепла Qlk, получаемые газом на каждом этапе цикла. Найти КПД цикла, выразив его как функции 71, и Т2. Процесс 3—1 — изотермический.

3.8. Тепловая машина с идеальным газом в качестве рабочего вещества совершает обратимый цикл, состоящий из изохоры 1—2, адиабаты 2—3 и изотермы 3—1 (рис. 326). Рассчитать количества тепла, получаемые рабочим веществом на каждом этапе цикла. Найти КПД машины как функцию максимальной Т2 и минимальной Т1 температур, достигаемых газом в этом цикле.

3.9. Найти КПД обратимого цикла, изображенного на рис. 327, как функцию максимальной Т| и минимальной Т2 температур вещества в этом цикле. Цикл совершает машина с идеальным газом в качестве рабочего тела. Найти также количества тепла, получаемые рабочим веществом на каждом этапе цикла.

3.10. Найти КПД обратимого теплового цикла Отто, состоящего из адиабат 1— 2, 3—4

и изохор 2—3, 4—1 (рис. 328), если в качестве рабочего тела используется идеальный газ. Выразить КПД цикла через температуры газа Г, и Т2 в состояниях 1 и 2.

3.4. Тепловая машина Карно используется в качестве холодильной машины для поддержания некоторого резервуара при температуре t2 — —3 °С. Температура окружающего воздуха t\ = 27 "С. Какая механическая работа требуется для выполнения одного цикла машины, если при этом от оболочки отводится Q2 — 900 кал тепла?

3.5. Найти КПД цикла, состоящего из двух изотерм и двух изобар, предполагая, что рабочим веществом является идеальный газ.

3.6. Найти КПД цикла, проводимого с идеальным газом и состоящего из двух изотерм с температурами Тх и Т2 и двух изохор с объемами V{ и V2 (7\*j > Т2> Vx > V2).

3.7. На рис. 325 изображена диаграмма обратимого цикла, выполняемого молем идеального газа в некоторой тепловой машине. Найти

Рис. 325

Рис. 326

\_ 1

Рис. 327

работы Лifa, выполняемые машиной, и количества тепла Qik, получаемые газом на каждом этапе цикла. Найти КПД цикла, выразив его как функции Ту и Т2. Процесс 3—1 — изотермический.

3.8. Тепловая машина с идеальным газом в качестве рабочего вещества совершает обратимый цикл, состоящий из изохоры 1—2, адиабаты 2—3 и изотермы 3—1 (рис. 326). Рассчитать количества тепла, получаемые рабочим веществом на каждом этапе цикла. Найти КПД машины как функцию максимальной Т2 и минимальной Т1 температур, достигаемых газом в этом цикле.

3.9. Найти КПД обратимого цикла, изображенного на рис. 327, как функцию максимальной Т| и минимальной Т2 температур вещества в этом цикле. Цикл совершает машина с идеальным газом в качестве рабочего тела. Найти также количества тепла, получаемые рабочим веществом на каждом этапе цикла.

3.10. Найти КПД обратимого теплового цикла Отто, состоящего из адиабат 1—2, 3—4

и изохор 2—3, 4—1 (рис. 328), если в качестве рабочего тела используется идеальный газ. Выразить КПД цикла через температуры газа Т\ и Т2 в состояниях 1 и 2.

3.18. Рабочий цикл двигателя внутреннего сгорания можно приближенно представить состоящим из адиабаты, изобары и изохоры. Определить расход горючего (в кг/ч) таким двигателем на киловатт

Р, атм ^ 2 1

адиабата

политропы <2

| изотерма i\*

| I

4 К л

Рис. 333

полезной мощности (рис.332). Известно, что VJVx— 8. Продукты горения можно считать идеальным газом с показателем адиабаты 7 = 4/3. Теплотворная способность горючего 4 107 Дж/кг.

3.19. Идеальный двухатомный газ совершает цикл, изображенный на рис. 333. Найти величину полной работы за цикл и вычислить КПД.

3.20. Холодильная машина с идеальным многоатомным газом в качестве рабочего вещества работает по циклу, состоящему из адиабатического расширения, изохорического нагрева и изотермического сжатия (рис. 334). Коэффициент сжатия 1 : 4. Определить, какое

Рис. 335

количество электроэнергии будет затрачено такой машиной для охлаждения одного литра воды от t\ = 25 "С до t2 = 5 °С. Машину считать идеальной, и потерями за счет теплоподвода к холодильной камере пренебречь.

3.21. Термодинамическая система, рабочим веществом которой является двухатомный идеальный газ, совершает обратимый круговой процесс, изображенный на рис. 335. Найти КПД этого цикла, если известно, что все процессы — политропические; в частности, 1—2 — изобара, 2—3 — изохора, а 4—1 — изотерма.

3.22. Моль идеального одноатомного газа из начального состояния У с температурой 100 К, расширяясь через турбину в пустой сосуд, переходит в состояние 2, совершая некоторую работу. Этот

переход происходит без подвода и отдачи тепла. Затем газ сжимают в двух процессах, возвращая его в состояние I. Сначала сжатие происходит в процессе 2—3, когда давление является линейной функцией объема, а затем в адиабатическом квазистатическом процессе 3—1. Найти работу, совершенную газом при расширении через турбину в процессе 1—2, если при сжатии в процессах 2—3—1 над газом была совершена работа 1091 Дж. Известно, что Т2 = Т3; У2 — 2У3.

3.23. Один моль идеального одноатомного газа, занимающего объем Vt при давлении Ри расширяется при постоянном давлении до объема 2У1} потом сжимается в политропическом процессе до объема VJ2 и давления PJ4, затем изотермически расширяется до исходного объема К,. Цикл завершается повышением давления при постоянном объеме. Найти КПД цикла.

3.24. Идеальная тепловая машина работает по холодильному циклу между резервуарами с кипящей водой (100 СС) и тающим льдом (0°С). Чему равна затраченная работа, если в результате в горячем резервуаре 1 кг воды превратился в пар? Какое количество льда образовалось при этом в холодном резервуаре? В условиях постоянного давления, при котором поддерживаются резервуары, теплота парообразования воды X = 2260 кДж/кг, теплота плавления льда q = 335 кДж/кг.

3.25. Какую максимальную работу можно получить от периодически действующей тепловой машины, нагревателем которой служит m\ = 1 кг воды при начальной температуре Т{ = 373 К, а холодильником m2 = 1 кг льда при температуре Т2 = 273 К, к моменту, когда растает весь лсд? Чему будет равна температура воды в этот момент? Удельная теплота плавления льда ? = 80 ккал/кг. Зависимостью теплоемкости воды от температуры пренебречь.

3.26. Какую максимальную температуру можно получить от периодически действующей тепловой машины, нагревателем которой служит mx = 1 кг насыщенного водяного пара при температуре Т\ = 373 К, а холодильником ш2 = 10 кг воды при начальной температуре Т2 — 21Ъ К к моменту, когда весь пар сконденсируется в воду. Чему будет равна в этот момент температура воды в холодильнике? Удельная теплота парообразования для воды (при 373 К) равна X = 539 ккал/кг. Зависимостью теплоемкости воды от температуры пренебречь.

3.27. В идеальном холодильнике замораживается вода в ванночке, а тепло отдается воде в банке, масса воды М = 10 кг, начальная температура tx = 20 "С. Какая масса льда образуется в ванночке из воды с начальной температурой /0 = 0 "С за то время, пока вода в банке нагревается до температуры /2= 100°С? Теплоемкостью банки пренебречь. Удельная теплота плавления льда <? = 80 ккал/кг. Зависимостью теплоемкости воды от температуры пренебречь.

3.28. Один моль воды охлаждается от 25 °С до 0 °С и замерзает. Все выделившееся при этом тепло получено холодильной машиной, работающей по обратимому циклу, и передано другому молю воды,

в результате чего его температура возросла от 25 °С до 100 °С. Определить, какое количество воды обратилось в пар и какую работу при этом совершила холодильная машина. Теплота испарения воды при 100 °С Л = 41 кДж/моль, а теплота плавления льда при 0 °С <7 = 6 кДж/моль. Теплоемкость воды считать не зависящей от температуры.

3.29. Постоянная температура 18 °С в комнате поддерживается электронагревателем мощности 500 Вт. Температура воздуха снаружи —21 °С. Для поддержания в комнате той же температуры можно использовать вместо электронагревателя тепловой насос (тепловая машина, работающая по холодильному циклу). Какую минимальную мощность будет потреблять от электросети тепловой насос, работающий с максимально возможной эффективностью?

3.30. Для поддержания в комнате постоянной температуры 21 °С используется кондиционер; температура наружного воздуха 42 °С. На сколько нужно увеличить мощность, потребляемую кондиционером из электросети, чтобы после включения в комнате электролампочки мощностью N = 150 Вт температура не изменилась? Считать, что кондиционер работает с максимально возможной эффективностью.

3.31. Идеальная холодильная машина работает в условиях, когда температура окружающего воздуха вдвое больше температуры холодильной камеры. Затем температура воздуха увеличилась на 10% при неизменной температуре холодильной камеры. На сколько процентов необходимо увеличить потребляемую холодильником мощность, чтобы скорость образования льда в ней осталась неизменной?

3.32. Воздух, находящийся в замкнутом теплоизолированном объеме V = 100 м3, является нагревателем идеальной холодильной машины, потребляющей мощность N = 100 Вт. Начальная температура воздуха Тв = 300 К, начальное давление Р = 1 атм, мемперату-ра холодильной камеры Гк = 273 К. Оценить, какое время должна проработать машина, чтобы температура воздуха в объеме V повысилась на AT = 1 К.

3.33. Имеются v молей льда при температуре /о = 0°С и окружающая среда при температуре Т. Найти максимальную работу, которую может при этом совершить идеальная тепловая машина.

3.34. Оценить, какую можно совершить работу, имея айсберг объема 1 км3 в качестве холодильника и океан в качестве нагревателя. Удельная теплота плавления льда q — 335 кДж/кг, а его плотность р = 0,9 г/см3.

3.35. Атмосфера Земли может рассматриваться как гигантская тепловая машина, в которой роль нагревателя и холодильника играют экваториальная зона и зоны полюсов, а источником энергии является солнечная радиация. Считая, что полный поток солнечной энергии, поступающей на Землю, равен 1,7-1017 Вт, а КПД рассматриваемой «машины» на порядок меньше максимально возможного, оценить среднюю мощность ветров в расчете на 1 км2 земной поверхности.

3.36. Оценить максимальную мощность, которую можно получить от циклической установки, использующей термальную

энергию океана в области, где скорость океанского течения ия? 0,1 м/с. Считать, что поверхностный слой толщиной h^z 1 км имеет избыточную температуру ДТ»20 К. Ширина установки в направлении, перпендикулярном скорости течения, L ^ 1 км.

3.37. Какую минимальную работу должен совершить двигатель идеального холодильника, чтобы, работая в среде, имеющей температуру 7\ v молей воды охладить до t0 = 0 "С и превратить в лсд?

3.38. Рабочее вещество тепловой машины совершает цикл Карно между изотермами с температурами Г и Г]. Теплообмен между нагревателем с температурой Тг = 1250 К и рабочим веществом при Т < осуществляется вследствие теплопроводности по закону а(Тг — Г), где а= 1 кВт/К. Теплообмен рабочего вещества с холодильником совершается при температуре холодильника Тj = 200 К. Полагая, что длительности изотермических процессов одинаковы, а адиабатических весьма малы, найти температуру Т% при которой мощность машины максимальна, и ее величину /Vmax.

3.39. Рабочее вещество тепловой машины совершает цикл Карно между изотермами с температурами Т пТ\. Теплообмен между рабочим веществом и холодильником при температуре Т2 — 200 К < Т осуществляется вследствие теплопроводности по закону а(Т — Г2), где а = 1 кВт/К. Теплообмен рабочего вещества с нагревателем происходит при температуре нагревателя Ту = 800 К. Полагая, что длительности изотермических процессов одинаковы, а адиабатических весьма малы, найти температуру 7", при которой мощность N машины максимальна, и се величину yVraax.

3.40. Оценить стоимость изготовления 1 кг льда в домашнем холодильнике с температурой испарителя фреона —12 °С и радиатора 4-40 °С. Стоимость 1 кВт-ч электроэнергии считать известной.

3.41 Г Рассмотрев бесконечно малый цикл Карно и воспользовавшись теоремой Карно, доказать, что внутренняя энергия и теплоемкость физически однородного и изотропного тела удовлетворяют соотношениям:

С помощью этих соотношений и уравнения состояния для идеальных газов доказать, что внутренняя энергия и теплоемкость идеального газа зависят только от температуры, но не от объема, занимаемого данной массой газа.

3.42Г Энтальпией или тепловой функцией физически однородного и изотропного вещества называется функция состояния, определяемая выражением I = U + PV. Рассмотрев бесконечно малый цикл Карно и применив к нему теорему Карно, показать, что энтальпия I и теплоемкость СР удовлетворяют соотношениям: