5. Первый закон термодинамики

Первый закон термодинамики представляет собой частный случай всеобщего закона сохранения и превращения энергии применительно к тепловым явлениям. В соответствии с уравнением Эйнштейна $E = mc^2$ надо рассматривать единый закон сохранения и превращения массы и энергии. Однако в технической термодинамике мы имеем дело со столь малыми скоростями объекта, что дефект массы равен нулю, и поэтому закон сохранения энергии можно рассматривать независимо.

Закон сохранения и превращения энергии является фундаментальным законом природы, который получен на основе обобщения огромного количества экспериментальных данных и применим ко всем явлениям природы. Он утверждает, **что энергия не исчезает и не возникает вновь, она лишь переходит из одной формы в другую, причем убыль энергии одного вида дает эквивалентное количество энергии другого вида**.

В числе первых ученых, утверждавших принцип сохранения материи и энергии, был наш соотечественник М. В. Ломоносов (1711 — 1765 гг.).

Пусть некоторому рабочему телу с объемом V и массой M, имеющему температуру T и давление p, сообщается извне бесконечно малое количество теплоты δQ. В результате подвода теплоты тело нагревается на dT и увеличивается в объеме на dV.

Повышение температуры тела свидетельствует об увеличении кинетической энергии его частиц. Увеличение объема тела приводит к изменению потенциальной энергии частиц. В результате внутренняя энергия тела увеличивается на dU. Поскольку рабочее тело окружено средой, которая оказывает на него давление, то при расширении оно производит механическую работу $\delta L_{\text{терм}}$ против сил внешнего давления. Такая работа получила название работы расширения или термодинамической работы. Так как никаких других изменений в системе не происходит, то по закону сохранения энергии

$$\delta Q = dU + \delta L_{\text{терм}} \tag{5.1}$$

т. е. теплота, сообщаемая системе, идет на приращение ее внутренней энергии и на совершение внешней работы.

Полученное уравнение является математическим выражением первого закона термодинамики. Каждый из трех членов этого соотношения может быть положительным, отрицательным или равным нулю. Рассмотрим некоторые частные случаи.

1. $\delta Q = 0$ — теплообмен системы с окружающей средой отсутствует, т. е. теплота к системе не подводится и от нее не отводится. Процесс без

теплообмена называется адиабатным. Для него уравнение (5.1) принимает вид:

$$\delta L_{\text{терм}} = -dU \tag{5.2}$$

Следовательно, работа расширения, совершаемая системой в адиабатном процессе, равна уменьшению внутренней энергии данной системы. При адиабатном сжатии рабочего тела затрачиваемая извне работа целиком идет на увеличение внутренней энергии системы.

2. $\delta L_{\text{терм}} = 0$ — при этом объем тела не изменяется, dV=0 . Такой процесс называется изохорным, для него

$$\delta Q = dU \tag{5.3}$$

т. е. количество теплоты, подведенное к системе при постоянном объеме, равно увеличению внутренней энергии данной системы.

3. dU=0 – внутренняя энергия системы не изменяется и

$$\delta Q = \delta L_{\text{терм}} \tag{5.4}$$

т.е. сообщаемая системе теплота превращается в эквивалентную ей внешнюю работу.

Для системы, содержащей 1 кг рабочего тела

$$\delta q = du + \delta l_{\text{терм}}\,. \tag{5.5}$$

Проинтегрировав уравнения (5.1) и (5.5) для некоторого процесса, получим выражение первого закона термодинамики в интегральной форме:

$$Q = \Delta U + L_{\text{терм}} \tag{5.6}$$

$$q = \Delta u + l_{\text{терм}} \quad \text{(в удельных величинах)} \tag{5.7}$$

Основное при решении задач на первое начало термодинамики - это правильно составить уравнение энергетического баланса. Надо посмотреть, какая энергия и в каком виде поступает в систему и как она расходуется, включая потери и остаток. Согласно первому закону термодинамики приход энергии должен быть равен ее расходу, включая потери и остаток. Это и есть уравнение энергетического баланса. И, уже исходя из уравнения энергетического баланса, можно определить требуемую величину.

Задачи

5.1 В железнодорожной цистерне, содержащей М т масла с теплоемкостью $c_м$ = 2,2 кДж/(кг·°С) при температуре t_1, помещен электронагреватель мощностью N МВт. Определить время разогрева масла до температуры t_2. Потери теплоты в окружающую среду составляют ΔQ.

Последняя цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Мощность нагревателя N, МВт	1,2	3,5	2,0	2,4	3,0	1,5	1,8	2,7	2,5	2,1
Масса масла М, т	20	100	80	150	50	60	90	120	40	200
Первая цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Температура, °С, t_1	-10	-5	0	-7	-15	3	5	-2	-4	-12
t_2	40	50	45	55	60	35	75	55	65	70
ΔQ, %	5	3	2	4	1	2	3	4	5	6

5.2 В газотурбинной установке (ГТУ) за сутки её работы на компрессорной станции сожжено V м^3 природного газа с теплотой сгорания $Q_н^р$ МДж/кг. Определить мощность ГТУ, если ее к.п.д равен η. Плотность газа ρ=0,7 кг/м^3.

Последняя цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Расход газа V, тыс.м^3	20	25	30	35	40	45	50	45	40	35
К.п.д. η	0,15	0,18	0,22	0,20	0,25	0,23	0,17	0,27	0,21	0,16
Первая цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
$Q_н^р$, МДж/кг	30	32	35	40	42	45	37	33	38	31

5.3 Металлический шар падает с высоты h м на твердую поверхность. В результате падения кинетическая энергия шара полностью превращается в теплоту. Часть образовавшейся теплоты ΔQ передается окружающей среде, а оставшаяся теплота расходуется на нагревание шара. Определить повышение температуры шара. Теплофизические характеристики металлов приведены в приложении 5.

Последняя цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Металл	Pb	Au	Ag	Al	Cu	Fe	Ni	Co	Pt	W
ΔQ, %	20	25	10	15	30	35	40	5	50	45

Первая цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
h, м	80	70	120	140	90	60	100	110	130	150

5.4 Мощность электростанции на выходных шинах составляет 15 МВт. Какое количество топлива в кг/ч сжигается в топках котлов электростанции, если все потери на станции составляют 30 %, а $Q_н^р$ = 33 МДж/кг.

5.5 Мощность турбогенератора 12 МВт, к.п.д. генератора η=0,97. Какое количество воздуха нужно пропустить через генератор для его охлаждения, если конечная температура не должна превышать 55°С? Температура воздуха в машинном отделении равна 20°С; среднюю теплоемкость воздуха c_{pm} принять равной 1,0 кДж/кг.

5.6 Какова должна быть скорость металлической пули, чтобы при ударе о стальную плиту она полностью расплавилась? Предполагается, что в момент удара температура пули равна 20°С. Теплофизические характеристики металлов приведены в приложении 5.

Металл	Вариант					
Алюминий Al	1	19	37	55	73	91
Висмут Bi	2	20	38	56	74	92
Вольфрам W	3	21	39	57	75	93
Железо Fe	4	22	40	58	76	94
Золото Au	5	23	41	59	77	95
Кобальт Co	6	24	42	60	78	96
Магний Mg	7	25	43	61	79	97
Марганец Mn	8	26	44	62	80	98
Медь Cu	9	27	45	63	81	99
Никель Ni	10	28	46	64	82	00
Олово Sn	11	29	47	65	83	
Платина Pt	12	30	48	66	84	
Свинец Pb	13	31	49	67	85	
Серебро Ag	14	32	50	68	86	
Титан Ti	15	33	51	69	87	
Уран U	16	34	52	70	88	
Хром Cr	17	35	53	71	89	
Цинк Zn	18	36	54	72	90	

5.7 Определить часовой расход воды на охлаждение гидротормоза при испытании двигателя, когда его работа при торможении превращается в теплоту, ΔQ% которой рассеивается в окружающей среде. Мощность двигателя равна N кВт, начальная температура воды t_1 °C, конечная - t_2 °C.

Последняя цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Мощность двигателя N, кВт	200	210	220	230	240	250	260	270	280	300
ΔQ, %	10	9	8	7	6	5	6	7	8	9
Первая цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Температура, °C, t_1	20	3	4	18	5	8	7	6	10	15
t_2	40	50	45	55	60	35	75	55	65	70

5.8 Удельный расход топлива в нефтяном двигателе в=250 г/кВт·ч. Определить кпд двигателя, если теплота сгорания топлива $Q_н^р$=42 МДж/кг.

5.9 Определить часовой расход топлива, который необходим для работы паровой турбины мощностью 25 МВт, если теплота сгорания топлива $Q_н^р$ = 33,85 МДж/кг и известно, что на превращение тепловой энергии в механическую используется только 35 % теплоты сожженного топлива.

5.10 В котельной электрической станции за 20 ч работы сожжено 62 т каменного угля, имеющего теплоту сгорания $Q_н^р$=28,9 МДж/кг. Определить среднюю мощность станции, если в электрическую энергию превращено 18 % теплоты, полученной при сгорании угля.

5.11 Определить теплоемкость воздуха при постоянном давлении методом проточного калориметрирования, если расход воздуха через трубопровод M = 690 кг/ч, мощность электронагревателя $N_{эл}$ = 0,5кВт, температура воздуха перед электронагревателем t_1 = 18°C, а температура воздуха за электронагревателем t_2 = 20,6°C.

5.12 Паросиловая установка мощностью 4200 кВт имеет к.п.д. η = 0,20. Определить часовой расход топлива, если его теплота сгорания $Q_н^р$ = 25 МДж/кг.

5.13 Электрочайник мощностью 2,1 кВт нагревает 1,7л воды от комнатной температуры до температуры кипения за 5мин 30с. определить тепловые потери и к.п.д. чайника.

5.14 Электрогенератор мощностью $N_{эл}$ МВт и с к.п.д. η % охлаждается воздухом. Температура воздуха на входе $t_{в1}$ °С, на выходе - $t_{в2}$ °С. Определить массовый расход воздуха. То же при охлаждении водородом.

Последняя цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
$N_{эл}$, МВт	12	10	15	11	16	14	13	18	20	19
η, %	92	98	96	91	94	93	95	97	89	90
Первая цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
$t_{в1}$, °С	14	20	10	16	11	15	21	19	5	8
$t_{в2}$, °С	45	55	52	48	50	43	60	62	58	65

5.15 В воздухоподогревателе производится нагрев воздуха от $t_{вх}^{возд}$ до $t_{вых}^{возд}$ °С. Температура уходящих газов на входе в ВЗП $t_{вх}^{ух.г}$ °С, на выходе - $t_{вых}^{ух.г}$ °С. В парогенераторе сжигается В т/ч мазута. Количество образующихся газов $V_г$ м^3/кг топлива. Определить расход воздуха через ВЗП в нм^3/ч.

Последняя цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Состав дымовых газов, об.%:										
CO_2	12	10	13	11	12	6,5	8,7	8	14	6
O_2	1	2,8	4,6	2	5,7	7	2	3,8	3	3
H_2O	6,5	6	10	2,9	2	5	4	12	5,9	8,6
SO_2	0,5	0,2	0,4	0,1	0,3	0,5	0,3	0,2	0,1	0,4
N_2	80	81	72	84	80	81	85	76	77	82
$V_г$, м^3/кг топлива	12	15	10	17	9	14	11	13	16	8
В, т/ч	9	16	12	15	10	17	14	18	13	11
Первая цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
$t_{вх}^{ух.г}$, °С	500	540	510	525	515	550	535	520	545	530
$t_{вых}^{ух.г}$, °С	150	125	140	135	130	145	120	155	180	160
$t_{вх}^{возд}$, °С	95	120	100	110	105	90	85	80	115	125
$t_{вых}^{возд}$, °С	300	250	335	320	350	340	315	330	280	290

6. Термодинамические процессы идеальных газов

Основными процессами, весьма важными и в теоретическом, и в прикладном отношениях, являются: изохорный, протекающий при постоянном объеме; изобарный, протекающий при постоянном давлении; изотермический, происходящий при постоянной температуре; адиабатный - процесс, при котором отсутствует теплообмен с окружающей средой, и политропный - процесс, в котором постоянна теплоемкость процесса c = const.

Метод исследования процессов, не зависящий от их особенностей и являющийся общим, состоит в следующем:

1. выводится уравнение процесса, устанавливающее связь между начальными и конечными параметрами рабочего тела в данном процессе;
2. определяются изменения калорических параметров состояния системы в процессе (внутренней энергии, энтальпии, энтропии);
3. вычисляются термодинамическая (работа расширения) и располагаемая (потенциальная) работы процесса;
4. определяется количество теплоты, подведенной (или отведенной) к газу в процессе.

Политропный процесс и его обобщающее значение. Уравнение политропного процесса получается из первого закона термодинамики:

$$\begin{aligned}&\delta q = du + pdv \text{ - для закрытой системы;}\\&\delta q = dh - vdp \text{ - для открытой системы.}\end{aligned} \qquad (6.1)$$

Учитывая, что $\delta q = cdT$, $du = c_v dT$, $dh = c_p dT$, из системы уравнений (6.1) получаем:

$$\begin{aligned}&(c - c_v)dT = pdv;\\&(c - c_p)dT = -vdp.\end{aligned} \qquad (6.2)$$

Поделив второе уравнение на первое, получаем:

$$\frac{c - c_p}{c - c_v} = -\frac{vdp}{pdv}. \qquad (6.3)$$

Обозначив $n = \dfrac{c - c_p}{c - c_v}$ и подставив в уравнение (6.3), получаем дифференциальное уравнение политропы:

$$n\frac{dv}{v} = -\frac{dp}{p}. \qquad (6.4)$$

Поскольку теплоемкость процесса является постоянной (по определению политропного процесса), следовательно величина n также является постоянной. Поэтому интегрирование уравнения (6.4) дает следующее уравнение политропы:

$$pv^n = \text{const}. \qquad (6.5)$$

Величина n получила название «показатель политропы». Теплоемкость политропного процесса, соответственно, равна:

$$c = c_v \frac{n-k}{n-1}. \qquad (6.6)$$

Любой произвольный процесс можно описать в pv-координатах (по крайней мере на небольшом участке) уравнением (6.5), подбирая соответствующее значение n. Отсюда следует, что все основные термодинамические процессы являются частными случаями политропного процесса при соответствующем значении показателя политропы n. Показатель политропы n может принимать любое численное значение в пределах от $-\infty$ до $+\infty$, но для данного процесса он является величиной постоянной.

Из уравнения Клапейрона нетрудно получить выражения, устанавливающие связь между p, v и T в любых двух точках на политропе,:

$$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^n; \quad T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1}; \quad T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{n-1/n}. \qquad (6.7)$$

Изменение внутренней энергии вычисляется по формулам:

– $\Delta u = \int_1^2 c_v dt$ - общая формула; (6.8)

– $\Delta u = c_v(t_2 - t_1)$ - если теплоемкость не зависит от температуры;

– $\Delta u = \bar{c}_v|_0^{t_2} t_2 - \bar{c}_v|_0^{t_1} t_1$ - если зависимость средней теплоемкости от температуры нелинейна.

Изменение энтальпии:

– $\Delta h = \int_1^2 c_p dt$ - общая формула; (6.9)

– $\Delta h = c_p(t_2 - t_1)$ - если теплоемкость не зависит от температуры;

– $\Delta h = \bar{c}_p|_0^{t_2} t_2 - \bar{c}_p|_0^{t_1} t_1$ - если зависимость средней теплоемкости от температуры нелинейна.

Изменение энтропии:

$$\Delta s = \int_1^2 \frac{\delta q}{T} = c \cdot \ln\frac{T_2}{T_1} = c_v \frac{n-k}{n-1} \ln\frac{T_2}{T_1}. \qquad (6.10)$$

Работа расширения газа (термодинамическая работа) в политропном процессе имеет вид:

$$l_{терм} = \int_{v_1}^{v_2} p dv.$$

Так как для политропы в соответствии с (6.5) $p = p_1 (v_1/v)^n$, то

$$l_{терм} = p_1 v_1^n \int_{v_1}^{v_2} dv/v^n = \frac{p_1 v_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}\right] = \frac{p_1 v_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] \quad (6.11)$$

Уравнение (6.11) можно преобразовать к виду:

$$\begin{cases} l_{терм} = \dfrac{R}{n-1}(T_1 - T_2); \\ l_{терм} = \dfrac{p_1 v_1}{n-1}\left(1 - \dfrac{T_2}{T_1}\right); \\ l_{терм} = \dfrac{1}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2). \end{cases}$$

Располагаемая работа $l_{расп} = -\int_{p_1}^{p_2} v dp$ политропного процесса в n раз больше термодинамической. Из уравнения (6.4) следует, что:

$$n \cdot pdv = -vdp \rightarrow n \cdot \delta l_{терм} = \delta l_{расп} \rightarrow n \cdot l_{терм} = l_{расп}, \quad (6.12)$$

Количество подведенной (или отведенной) в процессе теплоты можно определить с помощью формулы:

$$q = \int_1^2 c dt = c(t_2 - t_1) = c_v \frac{n-k}{n-1}(t_2 - t_1) \quad (6.13)$$

Политропный процесс имеет обобщающее значение, ибо охватывает всю совокупность основных термодинамических процессов. Ниже приведены характеристики термодинамических процессов.

Процесс	n	c
Изохорный	$\pm\infty$	c_v
Изобарный	0	c_p
Изотермический	1	∞
Адиабатный	k	0

На рисунке показано взаимное расположение на pv- и Ts-диаграммах политропных процессов с разными значениями показателя политропы. Все процессы начинаются в одной точке («в центре»).

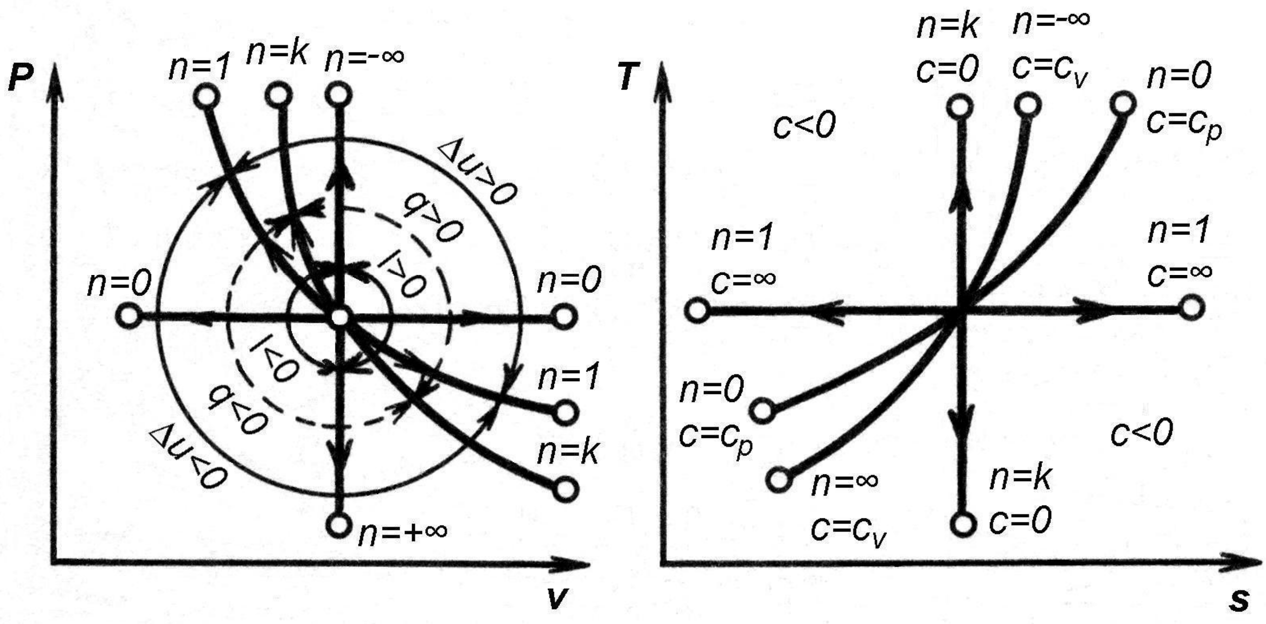

Рисунок 6.1 - Изображение основных термодинамических процессов идеального газа в pv- и Ts-координатах

Изохора (n = $\pm\infty$) делит поле диаграммы на две области: процессы, находящиеся правее изохоры, характеризуются положительной работой, так как сопровождаются расширением рабочего тела; для процессов, расположенных левее изохоры, характерна отрицательная работа.

Процессы, расположенные правее и выше адиабаты, идут с подводом теплоты к рабочему телу; процессы, лежащие левее и ниже адиабаты, протекают с отводом теплоты.

Для процессов, расположенных над изотермой (n = 1), характерно увеличение внутренней энергии газа; процессы, расположенные под изотермой, сопровождаются уменьшением внутренней энергии.

Процессы, расположенные между адиабатой и изотермой, имеют отрицательную теплоемкость, так как δq и du (а следовательно, и dT), имеют в этой области противоположные знаки. В таких процессах $|l| > |q|$, поэтому на производство работы при расширении тратится не только подводимая теплота, но и часть внутренней энергии рабочего тела.

Все расчетные формулы, необходимые для исследования политропных процессов, приведены в таблице 6.1.

Внимание! Формулы в таблице 6.1 приведены для <u>удельных</u> величин, т.е. на 1 кг газа. Чтобы получить полное значение величины необходимо соответствующую удельную величину умножить на массу газа.

Таблица 6.1 - Термодинамические процессы идеальных газов

Термодинамические характеристики	Политропный c=const	Изохорный v=const	Изобарный p=const	Изотермический T=const	Адиабатный q=0 (δq=0)
Уравнение процесса	$p \cdot v^n = \text{const}$	$\frac{p}{T}$ =const	$\frac{v}{T}$ =const	$p \cdot v = \text{const}$	$p \cdot v^k = \text{const}$
Показатель политропы	$n = \frac{c - c_p}{c - c_v}$	n=±∞ $p^{\frac{1}{\pm\infty}} \cdot v$ =const	n=0 $p \cdot v^0$ =const	n=1 $p \cdot v^1 = \text{const}$	$n = \frac{c_p}{c_v} = k$
Теплоемкость	$c = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1}$	c = c_v	c = c_p	c = ±∞ (dT = 0)	c = 0 (δq = 0)
Взаимосвязь между начальными и конечными параметрами (p_1,v_1,T_1) ↔ (p_2,v_2,T_2)	$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1}$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}$	$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$	$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$	$p_1 v_1 = p_2 v_2$	$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1}$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}$
Изменение внутренней энергии $\Delta u = \int_1^2 c_v dt$ $\Delta u = c_v (t_2 - t_1)$ $\Delta u = \bar{c}_v \|_0^{t_2} t_2 - \bar{c}_v \|_0^{t_1} t_1$	$\Delta u = c_v (t_2 - t_1)$	$\Delta u = \int_1^2 c_v dt$ $\Delta u = c_v (t_2 - t_1)$ $\Delta u = \bar{c}_v \|_0^{t_2} t_2 - \bar{c}_v \|_0^{t_1} t_1$ $\Delta u = q$	$\Delta u = \int_1^2 c_v dt$ $\Delta u = c_v (t_2 - t_1)$ $\Delta u = \bar{c}_v \|_0^{t_2} t_2 - \bar{c}_v \|_0^{t_1} t_1$	Δu = 0 (dT = 0)	$\Delta u = \int_1^2 c_v dt$ $\Delta u = c_v (t_2 - t_1)$ $\Delta u = \bar{c}_v \|_0^{t_2} t_2 - \bar{c}_v \|_0^{t_1} t_1$ $\Delta u = -l_{\text{терм}}$

Термодинамические характеристики	Политропный c=const	Изохорный v=const	Изобарный p=const	Изотермический T=const	Адиабатный q=0 ($\delta q=0$)
Изменение энтальпии $\Delta h = \int_1^2 c_p dt$ $\Delta h = c_p(t_2 - t_1)$ $\Delta h = \bar{c}_p\|_0^{t_2} t_2 - \bar{c}_p\|_0^{t_1} t_1$	$\Delta h = c_p(t_2 - t_1)$	$\Delta h = \int_1^2 c_p dt$ $\Delta h = c_p(t_2 - t_1)$ $\Delta h = \bar{c}_p\|_0^{t_2} t_2 - \bar{c}_p\|_0^{t_1} t_1$	$\Delta h = \int_1^2 c_p dt$ $\Delta h = c_p(t_2 - t_1)$ $\Delta h = \bar{c}_p\|_0^{t_2} t_2 - \bar{c}_p\|_0^{t_1} t_1$ $\Delta h = q$	$\Delta h = 0$ ($dT = 0$)	$\Delta h = \int_1^2 c_p dt$ $\Delta h = c_p(t_2 - t_1)$ $\Delta h = \bar{c}_p\|_0^{t_2} t_2 - \bar{c}_p\|_0^{t_1} t_1$ $\Delta h = -l_{расп}$
Изменение энтропии $\Delta s = c_v \ln\frac{T_2}{T_1} + R\ln\frac{v_2}{v_1}$ $\Delta s = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}$ $\Delta s = c_v \ln\frac{p_2}{p_1} + c_p\ln\frac{v_2}{v_1}$	$\Delta s = c \cdot \ln\frac{T_2}{T_1}$ $\Delta s = c_v \frac{n-k}{n-1}\ln\frac{T_2}{T_1}$	$\Delta s = c_v \ln\frac{T_2}{T_1}$ $\Delta s = c_v \ln\frac{p_2}{p_1}$	$\Delta s = c_p \ln\frac{T_2}{T_1}$ $\Delta s = c_p \ln\frac{v_2}{v_1}$	$\Delta s = R\ln\frac{v_2}{v_1}$ $\Delta s = -R\ln\frac{p_2}{p_1}$ $\Delta s = \frac{q}{T}$	$\Delta s = 0$ ($\delta q = 0$)
Термодинамическая работа $l_{терм} = \int_1^2 p dv$	$l_{терм} = \frac{1}{1-n}\cdot(p_2v_2 - p_1v_1)$ $l_{терм} = \frac{R}{1-n}\cdot(T_2 - T_1)$	$l_{терм} = 0$ ($dv = 0$)	$l_{терм} = p(v_2 - v_1)$	$l_{терм} = RT\ln\frac{v_2}{v_1}$ $l_{терм} = RT\ln\frac{p_1}{p_2}$ $l_{терм} = q$ $l_{терм} = l_{расп}$	$l_{терм} = \frac{1}{1-k}\cdot(p_2v_2 - p_1v_1)$ $l_{терм} = \frac{R}{1-k}\cdot(T_2 - T_1)$ $l_{терм} = -\Delta u$

Термодинамические характеристики	Политропный c=const	Изохорный v=const	Изобарный p=const	Изотермический T=const	Адиабатный q=0 ($\delta q=0$)
Располагаемая работа $l_{расп} = -\int_1^2 vdp$	$l_{расп}=\frac{n}{1-n}\cdot(p_2v_2-p_1v_1)$ $l_{расп}=\frac{n}{1-n}R\cdot(T_2-T_1)$	$l_{расп} = v(p_1-p_2)$	$l_{расп} = 0$ $(dp = 0)$	$l_{расп}=RT\ln\frac{v_2}{v_1}$ $l_{расп}=RT\ln\frac{p_1}{p_2}$ $l_{расп} = q$ $l_{расп} = l_{терм}$	$l_{расп}=\frac{k}{1-k}\cdot(p_2v_2-p_1v_1)$ $l_{расп}=\frac{k}{1-k}R\cdot(T_2-T_1)$ $l_{расп} = -\Delta h$
Количество теплоты $q = \int_1^2 cdt$	$q=c\cdot(t_2-t_1)$ $q=c_v\frac{n-k}{n-1}\cdot(t_2-t_1)$ $q = \Delta u + l_{терм}$ $q = \Delta h + l_{расп}$	$q=\int_1^2 c_v dt$ $q = \Delta u$	$q=\int_1^2 c_p dt$ $q = \Delta h$	$q = RT\ln\frac{v_2}{v_1}$ $q = RT\ln\frac{p_1}{p_2}$ $q = l_{терм}$ $q = l_{расп}$ $q = T\Delta s$	$q = 0$ $(c = 0)$
Коэффициент распределения энергии $\alpha = \frac{\Delta u}{q}$	$\alpha=\frac{c_v}{c}=\frac{n-1}{n-k}$ $\alpha=\frac{\Delta u}{q}=\frac{c_v\cdot\Delta T}{c\cdot\Delta T}$	$\alpha = 1$ $(\Delta u = q)$	$\alpha=\frac{c_v}{c_p}=\frac{1}{k}$ $\alpha=\frac{\Delta u}{q}=\frac{c_v\cdot\Delta T}{c_p\cdot\Delta T}$	$\alpha = 0$ $(\Delta u = 0)$	$\alpha=\pm\infty$ $(q = 0)$

Задачи

6.1 Воздух расширяется по политропе с показателем n=1,45. Как при этом будет изменяться температура воздуха?

6.2 Показатель политропы равен 1,2. Объем природного газа увеличился в два раза. Как изменились температура и давление газа.

6.3 При изотермическом расширении 1 кг воздуха объем его увеличивается в 1,5 раза. Найти работу и подведенное количество теплоты, если температура воздуха t = 40 °C.

6.4 У V_1 м^3 газа, находящегося при температуре t_1 и давлении p_1, изменяют температуру до t_2. Процесс проводят:

- изохорно;
- изобарно;
- адиабатно;
- политропно с показателем политропы n.

Для каждого из этих процессов рассчитать:

1. Конечные параметры p_2, V_2, t_2;
2. Изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии $\Delta U_{1\text{-}2}$, $\Delta H_{1\text{-}2}$, $\Delta S_{1\text{-}2}$;
3. Термодинамическую и располагаемую работы процесса $L_{\text{терм}} = \int pdV$, $L_{\text{расп}} = -\int Vdp$.
4. Количество теплоты, участвующее в процессе $Q_{1\text{-}2}$;
5. Коэффициент распределения энергии $\alpha = \dfrac{\Delta U}{Q}$.

Теплоемкость газа считать не зависящей от температуры. Результаты расчетов оформить в виде таблицы.

Параметр	**Процесс**			
	Изохорный V=const	**Изобарный P=const**	**Адиабатный ΔQ=0**	**Политропный c=const**
P_2, МПа				
V_2, м^3				
ΔU, кДж				
ΔH, кДж				
ΔS, кДж/К				
$L_{\text{терм}}$, кДж				
$L_{\text{расп}}$, кДж				
Q, кДж				
α				

Последняя цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Газ	воз-дух	CO	He	O_2	CO_2	CH_4	Ar	N_2	H_2S	H_2
Объем V_1, м^3	2	5	4	7	8	3	6	10	9	5
Температура t_1, °C	20	10	300	100	80	45	200	60	400	0
Первая цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Давление p_1, МПа	0,2	0,15	0,3	0,1	0,25	0,4	0,35	0,5	0,45	0,55
Температура t_2, °C	150	120	250	500	350	50	70	450	700	280
Показатель политропы n	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9

6.5 Сжатый воздух при давлении 500 кПа и температуре t=40 °C адиабатно расширяется до 153 кПа. Во сколько раз увеличивается его объем?

6.6 3 м^3 воздуха расширяются от P_1=0,54 МПа и t_1=45 °C до P_2=0,15 МПа по политропе с показателем n=1,36. Найти конечный объем и температуру воздуха.

6.7 В газгольдере объемом V м^3 находится метан при давлении P_1 и температуре t_1. Из-за солнечной радиации температура газа в течение дня повысилась на Δt градусов. Как возросло давление газа в газгольдере и какое количество теплоты воспринял газ? Теплоемкость газа считать не зависящей от температуры.

Последняя цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Объем резервуара V, м^3	10	15	14	20	26	12	30	22	11	25
Давление P_1, МПа	0,4	0,6	0,3	1,0	0,8	0,5	0,9	0,7	1,1	0,2
Первая цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Температура, °C, t_1	5	10	7	15	11	8	20	14	6	17
Δt, °C	10	15	11	20	24	17	26	12	25	22

6.8 Какое количество теплоты нужно затратить, чтобы температуру 3,5 кг азота, заключенного в баллоне, повысить на 10 °C.

6.9 V м^3 газа при давлении P_1 и температуре t_1 изотермически сжимаются до давления P_2. Найти конечный объем и работу по сжатию газа.

Последняя цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Газ	He	C_3H_8	CO	O_2	CO_2	N_2	C_2H_6	H_2	CH_4	H_2S
Давление P_1, кПа	50	60	70	80	90	55	65	75	85	95
P_2, кПа	720	800	750	300	350	480	690	500	540	350

Первая цифра варианта	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Объем V, м^3	5	10	7	15	11	8	20	14	6	17
Температура, ^oC, t	10	15	11	20	24	17	26	12	25	22

6.10 В закрытом сосуде емкостью V = 0,6 м^3 содержится воздух при давлении p_1 = 5 бар и температуре t_1 = 20^{o}C. В результате охлаждения сосуда воздух, содержащийся в нем, теряет 105 кДж. Принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить, какое давление и какая температура устанавливаются после этого в сосуде.

6.11 Сосуд емкостью 90 л содержит воздух при давлении 8 бар и температуре 30^{o}C. Определить количество теплоты, которое необходимо сообщить воздуху, чтобы повысить его давление при v = const до 16 бар. Принять зависимость *c=f(t)* нелинейной.

6.12 В резервуаре, имеющем объем V = 0.5 м^3, находится углекислый газ при давлении p_1 = 6 бар и температуре t_1 = 527^{o}C. Как изменится температура газа, если отнять от него при постоянном объеме 436 кДж? Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

6.13 На отходящих газах двигателя мощностью N=2500 кВт установлен подогреватель, через который проходит 60000 м^3/ч воздуха при температуре t_1 = 15^{o}C и давлении p = 1,01 бар. Температура воздуха после подогревателя равна 75^{o}C. Определить, какая часть тепла топлива использована в подогревателе? Коэффициент полезного действия двигателя принять равным 0,33. Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

6.14 В дизельном двигателе с воспламенением от сжатия воздух сжимается таким образом, что его температура поднимается выше температуры воспламенения топлива. Какое минимальное давление должен иметь воздух в конце процесса сжатия, если температура воспламенения топлива равна 800^{o}C? Во сколько раз при этом уменьшится объем воздуха? Начальное давление воздуха p_1 = 1 бар, начальная температура воздуха t_1 = 80^{o}C. Сжатие воздуха считать адиабатным.