

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Мурманский арктический университет»

Кафедра ТХО

Методические указания к выполнению РГР по теме:

" Термодинамические газовые циклы "

по дисциплине **" Термодинамика и теплопередача "** для специальности
21.03.01 «Нефтегазовое дело»
направленности/специализации
«Эксплуатация и обслуживание объектов нефтегазового комплекса Арктического шельфа»
для студентов очной и очно-заочной формы обучения

Мурманск
2024 г.

Оглавление

Общие организационно-методические указания	Стр. 3
Задания для выполнения РГР «Термодинамические газовые циклы»	Стр. 4
Решение примерного варианта РГР	Стр. 6
Список литературы	Стр. 26

Общие организационно-методические указания

Методические указания к выполнению РГР содержат задания на выполнение РГР «Термодинамические газовые циклы» по дисциплине «Термодинамика и теплопередача», а также решение примерного варианта РГР.

Расчетно-графическая работа по дисциплине выполняется в соответствии с учебным планом по специальности.

Целью РГР являются систематизация, расширение и углубление знаний, полученных при теоретическом изучении дисциплины, с тем, чтобы студент мог использовать полученные знания на практике.

Приступая к выполнению расчетно-графической работы, необходимо ознакомиться с соответствующими разделами программы курса и методическими указаниями.

РГР должна быть выполнена и представлено в срок, установленный кафедрой.

При выполнении задания студенту необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. В работе должен быть указан номер варианта работы.
2. Вариант каждой задачи выбирается по последней цифре номера зачетной книжки студента. Самовольная замена одного варианта задания другим не разрешается.
3. Перед решением задания должно быть приведено его условие. Отделите решение задачи от ее условия некоторым интервалом.
4. Решение задания следует сопровождать развернутыми расчетами.
5. Выполненная работа должна быть оформлена в соответствии с требованиями по оформлению письменных работ.
6. После получения прорецензированной работы студент должен исправить все отмеченные рецензентом ошибки и недочеты, а также выполнить все рекомендации.
7. Студенты, не получившие зачета по предусмотренным учебным планом письменным работам, к экзамену не допускаются.
8. Работы, выполненные не по своему варианту, рецензированию не подлежат.

Задания для выполнения

1. Условия задачи.

Сухой воздух массой 1 кг совершает термодинамический цикл, состоящий из четырех последовательных термодинамических процессов.

Требуется:

1. Рассчитать давление P , удельный объем v , температуру T воздуха для основных точек цикла;
2. Определить значения показателей политропы n , удельное значение теплоемкости c , вычислить изменения удельной внутренней энергии Δu , удельной энтальпии Δi , удельной энтропии Δs , удельную теплоту процесса q , удельную работу процесса l , удельную располагаемую работу l' для каждого из процессов;
3. Определить суммарные количества теплоты подведенной q_1 и отведенной q_2 , работу цикла $l_{ц}$, располагаемую работу $l_{оц}$, термический КПД цикла η_t , среднее индикаторное давление P_i ;
4. Построить цикл в координатах:
 - а) $lgv - lgP$;
 - б) $v - P$, используя предыдущее построение для нахождения координат трех-четырех промежуточных точек в каждом из процессов цикла;
 - в) $s - T$, нанеся основные точки цикла и составляющие его процессы.
5. Используя $v - P$ и $s - T$ – диаграммы, графически определить Δu , Δi , Δs , q , l , l' и сопоставить результаты аналитического и графического расчетов.

При выполнении расчетов воздух считать идеальным газом, а его свойства – не зависящими от температуры. Принять газовую постоянную $R = 0,287 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$, теплоемкость при постоянном давлении $c_p = 1,025 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$, что соответствует свойствам сухого воздуха при $T = 473 \text{ K}$.

Результаты расчетов представить в виде таблицы, указав в числителе значения, полученные аналитически, а в знаменателе – графически.

Таблица 1. Варианты заданий

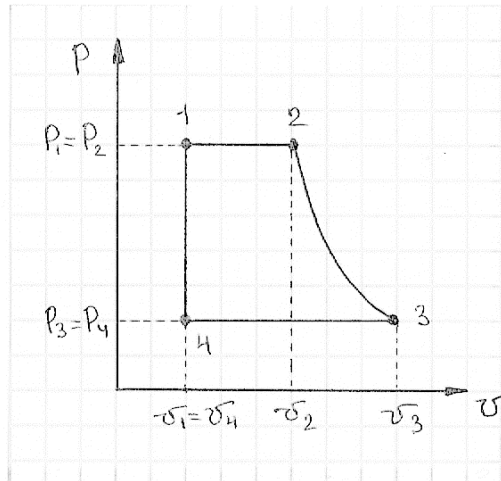
Номер варианта	Заданные параметры	Тип процесса и показатель политропы			
		1-2	2-3	3-4	4-1
1	$v_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_1 = 0,8 \text{ Мпа}$ $P_2 = 2,0 \text{ Мпа}$ $P_3 = 1,2 \text{ Мпа}$	S = C	T = C	S = C	v = C
2	$T_1 = 573 \text{ К}$ $P_1 = 1,3 \text{ Мпа}$ $T_3 = 290 \text{ К}$ $P_2 = 0,6 \text{ Мпа}$	T = C	S = C	T = C	S = C
3	$v_1 = 0,45 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_1 = 0,2 \text{ Мпа}$ $P_2 = 1,2 \text{ Мпа}$ $T_3 = 573 \text{ К}$	S = C	V = C	S = C	P = C
4	$T_1 = 483 \text{ К}$ $P_1 = 3,5 \text{ Мпа}$ $T_2 = 573 \text{ К}$ $P_3 = 2,5 \text{ Мпа}$	P = C	n=1,2	P = C	v = C
5	$T_1 = 273 \text{ К}$ $P_1 = 0,1 \text{ Мпа}$ $T_3 = 473 \text{ К}$ $P_2 = 0,5 \text{ Мпа}$	n=1,3	P = C	n=1,3	P = C
6	$T_1 = 303 \text{ К}$ $P_1 = 0,09 \text{ Мпа}$ $T_3 = 473 \text{ К}$ $P_2 = 0,4 \text{ Мпа}$	n=1,2	P = C	n=1,2	v = C
7	$v_1 = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_1 = 0,16 \text{ Мпа}$ $P_3 = 2,5 \text{ Мпа}$ $T_2 = 423 \text{ К}$	n=1,2	v = C	n=1,2	P = C
8	$V_2 = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_1 = 0,18 \text{ Мпа}$ $P_3 = 0,3 \text{ Мпа}$ $T_1 = 303 \text{ К}$	n=1,1	T = C	n=1,1	v = C
9	$V_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_1 = 0,3 \text{ Мпа}$ $P_2 = 2,0 \text{ Мпа}$ $T_3 = 573 \text{ К}$	n=1,3	P = C	n=1,3	P = C
10	$T_1 = 473 \text{ К}$ $P_1 = 2,0 \text{ Мпа}$ $T_2 = 623 \text{ К}$ $V_3 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}$	P = C	S = C	v = C	T = C
11	$T_1 = 323 \text{ К}$ $P_1 = 0,2 \text{ Мпа}$ $T_3 = 473 \text{ К}$ $P_2 = 2,0 \text{ Мпа}$	T = C	P = C	T = C	P = C

12	$T_1 = 373 \text{ K}$ $P_1 = 0,4 \text{ Мпа}$ $P_2 = 1,6 \text{ Мпа}$ $P_3 = 0,6 \text{ Мпа}$	S = C	T = C	S = C	P = C
13	$T_1 = 300 \text{ K}$ $P_1 = 0,3 \text{ Мпа}$ $T_3 = 473 \text{ K}$ $P_2 = 0,2 \text{ Мпа}$	T = C	$v = C$	T = C	$v = C$
14	$T_1 = 373 \text{ K}$ $P_1 = 1,2 \text{ Мпа}$ $T_3 = 473 \text{ K}$ $P_2 = 3,0 \text{ Мпа}$	T = C	P = C	T = C	P = C
15	$V_3 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_1 = 5,0 \text{ Мпа}$ $P_2 = 1,8 \text{ Мпа}$ $T_1 = 573 \text{ K}$	T = C	S = C	$v = C$	S = C
16	$V_1 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_1 = 0,7 \text{ Мпа}$ $P_2 = 2,0 \text{ Мпа}$ $T_3 = 473 \text{ K}$	S = C	P = C	S = C	T = C
17	$T_1 = 303 \text{ K}$ $P_1 = 0,3 \text{ Мпа}$ $T_3 = 523 \text{ K}$ $P_2 = 0,6 \text{ Мпа}$	S = C	$v = C$	S = C	T = C
18	$V_1 = 0,7 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_1 = 0,12 \text{ Мпа}$ $T_3 = 423 \text{ K}$ $V_2 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$	T = C	P = C	T = C	P = C
19	$V_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_1 = 0,4 \text{ Мпа}$ $P_2 = 1,0 \text{ Мпа}$ $T_3 = 573 \text{ K}$	T = C	P = C	S = C	P = C
20	$v_1 = 0,15 \text{ м}^3/\text{кг}$ $T_1 = 523 \text{ K}$ $T_2 = 573 \text{ K}$ $P_3 = 0,6 \text{ Мпа}$	P = C	S = C	P = C	$v = C$

Решение примерного варианта РГР

Схематичное изображение на $v - P$ - диаграмме заданного термодинамического цикла, состоящего из изобарного (1-2, $P = C$), адиабатного (2-3, $s = C$), изобарного (3-4, $P = C$) и изохорного (4-1, $v = C$) термодинамических процессов (Рис. 1).

Рис. 1.



1. Значения термодинамических параметров для основных точек цикла с учетом заданных исходных данных:

Процесс 1-2:

Для этого процесса известно: $v_1 = 0,15 \text{ м}^3/\text{кг}$, $T_1 = 523 \text{ К}$, $T_2 = 573 \text{ К}$.
 Определяем значения параметров: P_1 , P_2 , v_2 .

Из уравнения состояния идеального газа:

$$P \cdot v = R \cdot T.$$

где $R = 0,287 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – удельная газовая постоянная воздуха;

Определяем давление P_1 и P_2 :

$$P_1 = \frac{R \cdot T_1}{v_1} = \frac{287 \cdot 523}{0,15} = 1 \text{ МПа}.$$

Так как процесс 1-2 изобарный, т. е. протекает при постоянном давлении, то $P_2 = P_1 = 1 \text{ МПа}$.

Так как процесс изобарный, то справедливо соотношение:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Отсюда значение удельного объема:

$$v_2 = \frac{v_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{0,15 \cdot 573}{523} = 0,1643 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Процесс 2-3:

Для этого процесса известны: $P_2 = 1 \text{ МПа}$, $T_2 = 573 \text{ К}$, $v_2 = 0,1643 \text{ м}^3/\text{кг}$, $P_3 = 0,6 \text{ МПа}$.

Так как процесс 2-3 адиабатный, то для него справедливо уравнение:

$$P*v^k = const,$$

где k – показатель адиабаты.

Для определения значения теплоемкости в данном процессе при постоянном объеме используем уравнение Майера:

$$c_p - c_v = R.$$

Так как по условиям задания $c_p = 1,025 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, $R = 0,287 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, то:

$$c_v = c_p - R.$$
$$c_v = 1,025 - 0,287 = 0,738 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K}).$$

Показатель адиабаты равен отношению теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме, т. е.:

$$k = \frac{c_p}{c_v}.$$
$$k = \frac{1,025}{0,738} = 1,39.$$

Из уравнения адиабаты следует, что:

$$\frac{v_3}{v_2} = \left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{\frac{1}{k}}.$$

Откуда находим значение удельного объема в точке 3 цикла:

$$v_3 = v_2 * \left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{\frac{1}{k}}.$$
$$v_3 = 0,1643 * \left(\frac{1}{0,6}\right)^{\frac{1}{1,39}} = 0,2373 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Связь между температурой и удельным объемом в адиабатном процессе выражается соотношением:

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_2}\right)^{k-1}.$$

Откуда находим значение температуры в точке 3 цикла:

$$T_3 = \frac{T_2}{\left(\frac{v_3}{v_2}\right)^{k-1}}.$$
$$T_3 = \frac{573}{\left(\frac{0,2373}{0,1643}\right)^{1,39-1}} = 496 \text{ К}.$$

Процесс 3-4:

Для этого процесса известны: $P_3 = 0,6 \text{ МПа}$, $T_3 = 496 \text{ К}$, $v_3 = 0,2373 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Так как процесс 3-4 изобарный, т. е. протекает при постоянном давлении, то $P_4 = P_3 = 0,6 \text{ МПа}$.

Так как процесс 4-1 изохорный, т. е. протекает при постоянном удельном объеме, то $v_4 = v_1 = 0,15 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Из уравнения состояния идеального газа определим температуру в точке 4 цикла:

$$T_4 = \frac{v_4 * P_4}{R}$$

$$T_4 = \frac{0,15 * 0,6 * 10^6}{287} = 314 \text{ К.}$$

Процесс 4-1:

Для этого процесса известны: $v_4 = 0,15 \text{ м}^3/\text{кг}$, $P_4 = 0,6 \text{ МПа}$, $T_4 = 314 \text{ К}$, $P_1 = 1 \text{ МПа}$, $T_1 = 523 \text{ К}$.

Для изохорного процесса справедливо равенство:

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{T_4}{T_1}$$

Откуда находим значение температуры в точке 4 цикла:

$$T_4 = \frac{P_4 * T_1}{P_1}$$

$$T_4 = \frac{0,6 * 523}{1} = 314 \text{ К.}$$

Рассмотрение процесса 4-1 позволило в данном случае проконтролировать правильность ранее найденного значения T_4 .

Следовательно, параметры рассчитаны верно. Полученные результаты вносим в таблицу 1.1.

Таблица 1.1. Значения основных термодинамических параметров в основных точках цикла.

Точка	P , МПа	v , $\text{м}^3/\text{кг}$	T , К
1	1,0	0,1500	523,0
2	1,0	0,1643	573,0
3	0,6	0,2373	496,0
4	0,6	0,1500	314,0

2. Для каждого термодинамического процесса аналитическим путем определяем значения показателей политропы n , теплоемкости c , вычисляем изменения удельной внутренней энергии Δu , удельной энтальпии Δi , энтропии Δs , удельную теплоту процесса q , удельную работу изменения объема l , удельную располагаемую работу l' .

Процесс 1-2:

Значения показателя политропы в любом политропном процессе можно определить по координатам двух любых точек графика процесса:

$$n = \frac{\lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{\lg\left(\frac{v_1}{v_2}\right)}$$

$$n - 1 = \frac{\lg\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\lg\left(\frac{v_1}{v_2}\right)}$$

Отсюда:

$$\frac{n - 1}{n} = \frac{\lg\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\lg\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}$$

Так как процесс 1-2 – изобарный ($P_2 = P_1 = const$), то $\lg(P_2/P_1) = \lg 1 = 0$ и, следовательно, $n = 0$.

Удельное значение теплоемкости в политропном процессе можно определить из формулы:

$$n = \frac{c_n - c_p}{c_n - c_v}$$

Откуда:

$$c_n = c_v \left(\frac{n - k}{n - 1} \right)$$

Исходя из этой формулы, определяем значения удельной теплоемкости для частных случаев политропного процесса.

Для изобарного процесса $n = 0$, следовательно:

$$c_p = k * c_v$$

$$c_p = 1,025 \text{ кДж/кг * К}$$

Изменение удельной внутренней энергии в процессе 1-2:

$$\Delta u_{1-2} = u_2 - u_1 = c_v * (T_2 - T_1)$$

$$\Delta u_{1-2} = 0,738 * (573 - 523) = 36,9 \text{ кДж/кг * К}$$

Основное уравнение первого закона термодинамики для случая, когда $P = const$, ($dP = 0$):

$$dq = c_p * dT = di.$$

Следовательно, удельное количество теплоты, сообщаемое рабочему телу в изобарном процессе при постоянной теплоемкости:

$$q_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} c_p * dT = c_p * (T_2 - T_1) = \Delta i_{1-2} = i_2 - i_1.$$

$$q_{1-2} = 1,025 * (573 - 523) = 51,25 \text{ кДж/кг} * \text{К}$$

Для обратимого изобарного процесса при постоянной теплоемкости изменение удельной энтропии находим по уравнению:

$$s_2 - s_1 = \Delta s_{1-2} = c_p * \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R * \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right),$$

но при $P = const$, $\ln(P_2/P_1) = \ln 1 = 0$, поэтому:

$$\Delta s_{1-2} = c_p * \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = c_p * \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right).$$

$$\Delta s_{1-2} = 1,025 * \ln\left(\frac{573}{523}\right) = 1,025 * \ln\left(\frac{0,1643}{0,15}\right) = 0,0936 \text{ кДж/кг} * \text{К}$$

При расширении газа в изобарном процессе его температура возрастает, а при сжатии- уменьшается. Удельная работа изменения объема выражается следующим уравнением:

$$l = P * \int_{v_1}^{v_2} dv = P * (v_2 - v_1) = R * (T_2 - T_1).$$

$$l = 1 * 10^3 * (0,1643 - 0,15) = 14,3 \text{ кДж/кг}$$

Удельная располагаемая (внешняя) работа равна 0, так как $dP = 0$.

$$l' = - \int_1^2 v * dP = 0.$$

Процесс 2-3:

Для обратимого адиабатного процесса $s_2 = s_3 = const$, т. е. обратимый адиабатный процесс одновременно является изоэнтропным.

Для процесса 2-3 определяем показатели политропы:

$$n = \frac{\lg\left(\frac{P_2}{P_3}\right)}{\lg\left(\frac{v_3}{v_2}\right)}$$

$$n = \frac{\lg\left(\frac{1}{0,6}\right)}{\lg\left(\frac{0,2373}{0,1643}\right)} = 1,39.$$

В адиабатном процессе $n = k$, поэтому $c_n = 0$.

Согласно первому закону термодинамики удельная работа изменения объема в адиабатном процессе совершается за счет убыли удельной внутренней энергии рабочего тела:

$$dl = -dU, \text{ при } c_v = const.$$

$$\Delta u_{2-3} = u_3 - u_2 = c_v * (T_3 - T_2).$$

$$\Delta u_{2-3} = 0,738 * (496 - 573) = -56,826 \text{ кДж/кг}.$$

Следовательно:

$$l = -\Delta u.$$

$$l = 56,826 \text{ кДж/кг}.$$

Удельная располагаемая (внешняя) работа в адиабатном процессе 2-3:

$$l' = k * l.$$

$$l' = 1,39 * 56,826 = 78,988 \text{ кДж/кг}.$$

Изменение энтальпии в процессе 2-3 определяем по формуле, справедливой для всех термодинамических процессах при постоянной теплоемкости c_p :

$$\Delta i_{2-3} = i_3 - i_2 = c_p * (T_3 - T_2).$$

$$\Delta i_{2-3} = 1,025 * (496 - 573) = -78,925 \text{ кДж/кг} * \text{К}.$$

Процесс 3-4:

Значения показателя политропы в любом политропном процессе можно определить по координатам двух любых точек графика процесса:

$$n = \frac{\lg\left(\frac{P_3}{P_4}\right)}{\lg\left(\frac{v_3}{v_4}\right)}$$

$$n - 1 = \frac{\lg\left(\frac{T_4}{T_3}\right)}{\lg\left(\frac{v_3}{v_4}\right)}$$

Отсюда:

$$\frac{n - 1}{n} = \frac{\lg\left(\frac{T_4}{T_3}\right)}{\lg\left(\frac{P_4}{P_3}\right)}$$

Так как процесс 3-4 – изобарный ($P_4 = P_3 = const$), то $\lg(P_4/P_3) = \lg 1 = 0$ и, следовательно, $n = 0$.

Удельное значение теплоемкости в политропном процессе можно определить из формулы:

$$n = \frac{c_n - c_p}{c_n - c_v}$$

Откуда:

$$c_n = c_v \left(\frac{n - k}{n - 1} \right)$$

Исходя из этой формулы, определяем значения удельной теплоемкости для частных случаев политропного процесса.

Для изобарного процесса $n = 0$, следовательно:

$$c_p = k * c_v$$

$$c_p = 1,025 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

Изменение удельной внутренней энергии в процессе 3-4:

$$\Delta u_{3-4} = u_4 - u_3 = c_v * (T_4 - T_3).$$

$$\Delta u_{3-4} = 0,738 * (314 - 496) = -134,316 \text{ кДж/кг} * \text{К}$$

Основное уравнение первого закона термодинамики для случая, когда $P = const, (dP = 0)$:

$$dq = c_p * dT = di$$

Следовательно, удельное количество теплоты, сообщаемое рабочему телу в изобарном процессе при постоянной теплоемкости:

$$q_{3-4} = \int_{T_3}^{T_4} c_p * dT = c_p * (T_4 - T_3) = \Delta i_{3-4} = i_4 - i_3.$$

$$q_{3-4} = 1,025 * (314 - 496) = -186,55 \text{ кДж/кг} * \text{К}$$

Для обратимого изобарного процесса при постоянной теплоемкости изменение удельной энтропии находим по уравнению:

$$s_4 - s_3 = \Delta s_{3-4} = c_p * \ln\left(\frac{T_4}{T_3}\right) - R * \ln\left(\frac{P_4}{P_3}\right),$$

но при $P = const, \ln(P_4/P_3) = \ln 1 = 0$, поэтому:

$$\Delta s_{3-4} = c_p * \ln\left(\frac{T_4}{T_3}\right) = c_p * \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right).$$

$$\Delta s_{3-4} = 1,025 * \ln\left(\frac{314}{496}\right) = 1,025 * \ln\left(\frac{0,15}{0,2373}\right) = -0,4686 \text{ кДж/кг} * \text{К}$$

При расширении газа в изобарном процессе его температура возрастает, а при сжатии- уменьшается. Удельная работа изменения объема выражается следующим уравнением:

$$l = P * \int_{v_3}^{v_4} dv = P * (v_4 - v_3) = R * (T_4 - T_3).$$

$$l = 1 * 10^3 * (0,15 - 0,2373) = -87,3 \text{ кДж/кг}$$

Удельная располагаемая (внешняя) работа равна 0, так как $dP = 0$.

$$l' = - \int_3^4 v * dP = 0.$$

Процесс 4-1:

$$n = \pm\infty, \text{ так как } v_3 = v_4, \text{ а } c_v = c_n = 0,738 \text{ кДж}/(\text{кг} * \text{К}).$$

Количество теплоты, участвующей в процессе при постоянной теплоемкости, равно изменению внутренней энергии, т. е. в изохорном процессе вся внешняя теплота расходуется только на изменение внутренней энергии рабочего тела.

Так как в процессе 4-1 давление увеличивается, то удельное количество теплоты подводится, при этом увеличивается внутренняя энергия и температура газа:

$$q_{4-1} = \int_{T_4}^{T_1} c_v * dT = c_v * (T_1 - T_4) = \Delta u_{4-1}.$$

$$q_{4-1} = \Delta u_{4-1} = 0,738 * (523 - 314) = 154,242 \text{ кДж}/\text{кг} * \text{К}.$$

Изменение удельной энтропии в обратимом изохорном процессе определяется из уравнения:

$$s_1 - s_4 = \Delta s_{4-1} = c_v * \ln\left(\frac{T_1}{T_4}\right) - R * \ln\left(\frac{v_1}{v_4}\right),$$

но при $v = const$, $\ln(v_1/v_4) = \ln 1 = 0$, поэтому:

$$\Delta s_{4-1} = c_v * \ln\left(\frac{T_1}{T_4}\right) = c_v * \ln\left(\frac{P_1}{P_4}\right).$$

$$\Delta s_{4-1} = 0,738 * \ln\left(\frac{523}{314}\right) = 0,738 * \ln\left(\frac{1}{0,6}\right) = 0,3765 \text{ кДж}/\text{кг} * \text{К}.$$

Изменение энтальпии в процессе 4-1:

$$\Delta i_{4-1} = c_p * (T_1 - T_4).$$

$$\Delta i_{4-1} = 1,025 * (523 - 314) = 214,225 \text{ кДж}/\text{кг} * \text{К}.$$

Внешняя работа газа в процессе 4-1 при $v = const$ равна 0, так как $dv = 0$, следовательно:

$$l = P * \int_{v_4}^{v_1} dv = 0.$$

Удельная располагаемая (внешняя) работа определяется по формуле:

$$l' = - \int_{P_4}^{P_1} v * dP = -v * (P_1 - P_4).$$

$$l' = -0,15 * (0,6 * 10^3 - 1,0 * 10^3) = 60 \text{ кДж/кг}.$$

3. На основании выполненных расчетов определяем суммарные количества подведенной q_1 и отведенной q_2 теплоты в рассматриваемом термодинамическом цикле:

$$q_1 = |q_{1-2}| + |q_{4-1}|.$$

$$q_1 = 51,25 + 154,242 = 205,492 \text{ кДж/кг}.$$

$$q_2 = q_{3-4} = 186,55 \text{ кДж/кг}.$$

Работу цикла определяем по формуле:

$$l_{\text{ц}} = |q_1| - |q_2|.$$

$$l_{\text{ц}} = 205,492 - 186,55 = 18,942 \text{ кДж/кг}.$$

При известном количестве подведенной и отведенной теплоты определяется термический КПД цикла. Так как количество подведенной теплоты больше количества отведенной, то из этого следует, что в данном случае имеем прямой термодинамический цикл, т. е. цикл теплового двигателя, КПД которого:

$$\eta_t = \frac{|q_1| - |q_2|}{|q_1|}$$

$$\eta_t = \frac{18,942}{205,492} = 0,092 = 9.2\%.$$

Далее определяем среднее индикаторное давление, т. е. условное постоянное давление, под действием которого поршень в течение одного хода совершает работу, равную работе всего теоретического цикла:

$$P_i = \frac{l_{\text{ц}}}{v_{\text{max}} - v_{\text{min}}} = \frac{l_{\text{ц}}}{v_3 - v_1}.$$

$$P_i = \frac{18,942}{0,2373 - 0,15} = 216,9759 \text{ кПа}.$$

4. Построим термодинамический цикл в координатах:

а) $lgv - lgP$

Таблица 4.1. Данные для диаграммы $lgv - lgP$

Точка	v , м ³ /кг	P , МПа	lgv	lgP
1	0,1500	1,0	-0,8239	0
2	0,1643	1,0	-0,7844	0
3	0,2373	0,6	-0,6247	-0,2218
4	0,1500	0,6	-0,8239	-0,2218

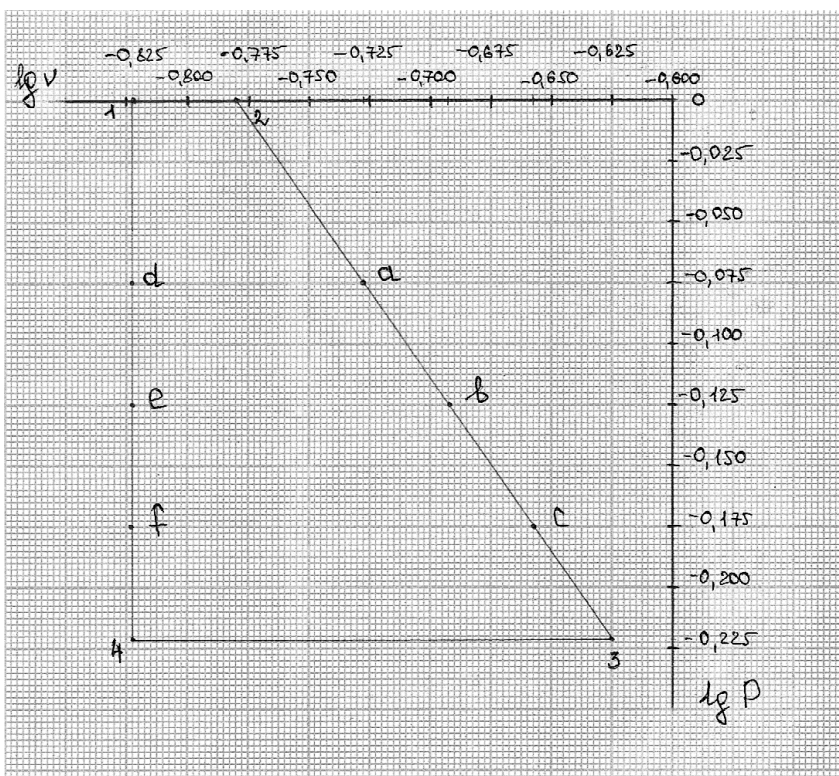


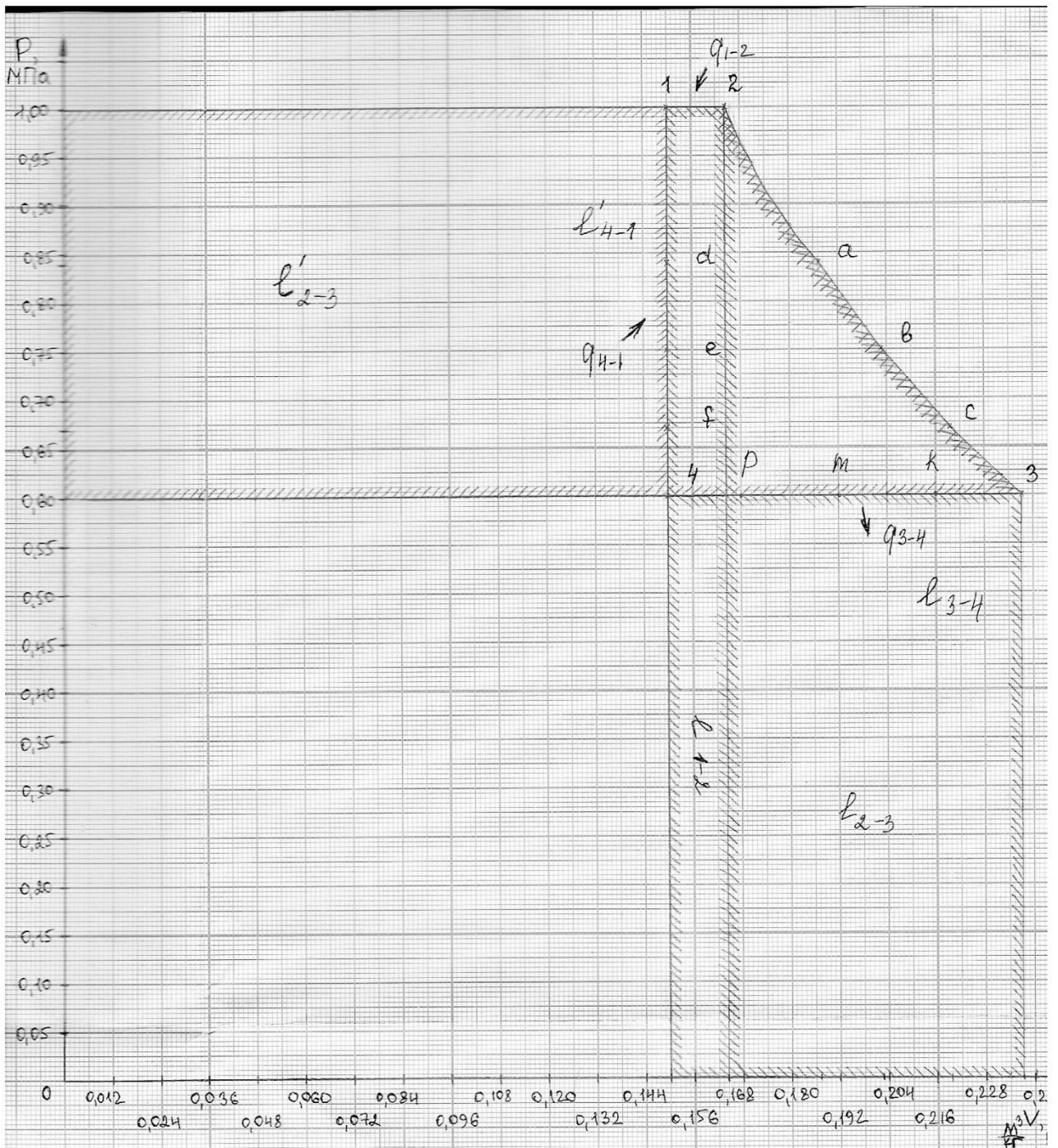
Рис. 2. Диаграмма цикла в координатах $lgv - lgP$.

б) $v - P$, используя предыдущее построение для нахождения координат трех-четырёх промежуточных точек в каждом из процессов цикла;

Таблица 4.2. Данные для диаграммы $v - P$

Точка	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$P, \text{МПа}$	$\lg v$	$\lg P$
1	0,1500	1,00	-0,8239	0
2	0,1643	1,00	-0,7844	0
3	0,2373	0,60	-0,6247	-0,2218
4	0,1500	0,60	-0,8239	-0,2218
a	0,1873	0,84	-0,7275	-0,0750
b	0,2030	0,75	-0,6925	-0,1250
c	0,2200	0,67	-0,6575	-0,1750
d	0,1500	0,84	-0,8239	-0,0750
e	0,1500	0,75	-0,8239	-0,1250
f	0,1500	0,67	-0,8239	-0,1750

Рис. 3. Диаграмма цикла в координатах $v - P$ и графическое определение удельной работы изменения объема и удельной располагаемой внешней работы.



в) $s - T$, нанеся основные и дополнительные точки цикла и составляющие его процессы, используя предыдущее построение.

Для каждой характерной точки цикла значение энтропии вычисляется по формуле:

$$\Delta s_i = c_p * \ln\left(\frac{T_i}{273}\right) - R * \ln\left(\frac{P_i}{101325}\right).$$

$$\Delta s_1 = c_p * \ln\left(\frac{T_1}{273}\right) - R * \ln\left(\frac{P_1}{101325}\right).$$

$$\Delta s_1 = 1,025 * \ln\left(\frac{523}{273}\right) - 0,287 * \ln\left(\frac{1,0 * 10^6}{101325}\right) = 0,009298 \text{ кДж/кг * К}$$

$$\Delta s_2 = c_p * \ln\left(\frac{T_2}{273}\right) - R * \ln\left(\frac{P_2}{101325}\right).$$

$$\Delta s_2 = 1,025 * \ln\left(\frac{573}{273}\right) - 0,287 * \ln\left(\frac{1,0 * 10^6}{101325}\right) = 0,102885 \text{ кДж/кг * К}$$

$$\Delta s_3 = c_p * \ln\left(\frac{T_3}{273}\right) - R * \ln\left(\frac{P_3}{101325}\right).$$

$$\Delta s_3 = 1,025 * \ln\left(\frac{496}{273}\right) - 0,287 * \ln\left(\frac{0,6 * 10^6}{101325}\right) = 0,101574 \text{ кДж/кг * К}$$

$$\Delta s_4 = c_p * \ln\left(\frac{T_4}{273}\right) - R * \ln\left(\frac{P_4}{101325}\right).$$

$$\Delta s_4 = 1,025 * \ln\left(\frac{314}{273}\right) - 0,287 * \ln\left(\frac{0,6 * 10^6}{101325}\right) = -0,367037 \text{ кДж/кг * К}$$

Отсюда вычисляем значения изменения энтропии в термодинамическом цикле:

$$s_i - s_j = \Delta s_{j-i}.$$

$$s_2 - s_1 = \Delta s_{1-2}.$$

$$\Delta s_{1-2} = 0,102885 - 0,009298 = 0,0936 \text{ кДж/кг * К}$$

$$s_3 - s_2 = \Delta s_{2-3}.$$

$$\Delta s_{2-3} = 0,101574 - 0,102885 \approx 0.$$

$$s_4 - s_3 = \Delta s_{3-4}.$$

$$\Delta s_{3-4} = -0,367037 - 0,101574 = -0,4686 \text{ кДж/кг * К}$$

$$s_1 - s_4 = \Delta s_{4-1}.$$

$$\Delta s_{4-1} = 0,009298 + 0,367037 = 0,3763 \text{ кДж/кг * К}$$

Вычисленные значения изменения энтропии совпадают со значениями энтропии, полученными для процессов цикла через основные термические параметры.

Чтобы построить диаграмму мне понадобится определить энтропию и температуру у дополнительных точек (k, m, p).

Значение температур дополнительных точек по формуле:

$$T_i = \frac{P_i \times v_i}{R}.$$

$$T_d = \frac{P_d * v_d}{287}.$$

$$T_d = \frac{0,84 * 10^6 * 0,150}{287} = 439 \text{ К.}$$

$$T_e = \frac{P_e * v_e}{287}.$$

$$T_e = \frac{0,75 * 10^6 * 0,150}{287} = 392 \text{ К.}$$

$$T_f = \frac{P_f * v_f}{287}.$$

$$T_f = \frac{0,67 * 10^6 * 0,150}{287} = 350 \text{ К.}$$

$$T_k = \frac{P_k * v_k}{287}.$$

$$T_k = \frac{0,6 * 10^6 * 0,216}{287} = 452 \text{ К.}$$

$$T_m = \frac{P_m * v_m}{287}.$$

$$T_m = \frac{0,6 * 10^6 * 0,192}{287} = 401 \text{ К.}$$

$$T_p = \frac{P_p * v_p}{287}.$$

$$T_p = \frac{0,6 * 10^6 * 0,0,168}{287} = 351 \text{ К.}$$

Значение энтропии для всех дополнительных точек по формуле:

$$\Delta s_i = c_p * \ln\left(\frac{T_i}{273}\right) - R * \ln\left(\frac{P_i}{101325}\right).$$

$$\Delta s_d = c_p * \ln\left(\frac{T_d}{273}\right) - R * \ln\left(\frac{P_d}{101325}\right).$$

$$\Delta s_d = 1,025 * \ln\left(\frac{439}{273}\right) - 0,287 * \ln\left(\frac{0,84 * 10^6}{101325}\right) = -0,120121 \text{ кДж/кг * К}$$

$$\Delta s_e = c_p * \ln\left(\frac{T_e}{273}\right) - R * \ln\left(\frac{P_e}{101325}\right).$$

$$\Delta s_e = 1,025 * \ln\left(\frac{392}{273}\right) - 0,287 * \ln\left(\frac{0,75 * 10^6}{101325}\right) = -0,203664 \text{ кДж/кг * К}$$

$$\Delta s_f = c_p * \ln\left(\frac{T_f}{273}\right) - R * \ln\left(\frac{P_f}{101325}\right).$$

$$\Delta s_f = 1,025 * \ln\left(\frac{350}{273}\right) - 0,287 * \ln\left(\frac{0,67 * 10^6}{101325}\right) = -0,287454 \text{ кДж/кг * К}$$

$$\Delta s_k = c_p * \ln\left(\frac{T_k}{273}\right) - R * \ln\left(\frac{P_k}{101325}\right).$$

$$\Delta s_k = 1,025 * \ln\left(\frac{452}{273}\right) - 0,287 * \ln\left(\frac{0,6 * 10^6}{101325}\right) = 0,006358 \text{ кДж/кг * К}$$

$$\Delta s_m = c_p * \ln\left(\frac{T_m}{273}\right) - R * \ln\left(\frac{P_m}{101325}\right).$$

$$\Delta s_m = 1,025 * \ln\left(\frac{401}{273}\right) - 0,287 * \ln\left(\frac{0,6 * 10^6}{101325}\right) = -0,116355 \text{ кДж/кг * К}$$

$$\Delta s_p = c_p * \ln\left(\frac{T_p}{273}\right) - R * \ln\left(\frac{P_p}{101325}\right).$$

$$\Delta s_p = 1,025 * \ln\left(\frac{351}{273}\right) - 0,287 * \ln\left(\frac{0,6 * 10^6}{101325}\right) = -0,252859 \text{ кДж/кг * К}$$

Таблица 4.3. Данные для диаграммы $s - T$.

Точка	T, K	$s,$ кДж/(кг*К)
1	523	0,009298
2	573	0,102885
3	496	0,101574
4	314	-0,367037
d	439	-0,120121
e	392	-0,203664
f	350	-0,287454
k	452	0,006358
m	401	-0,116355
p	351	-0,252859

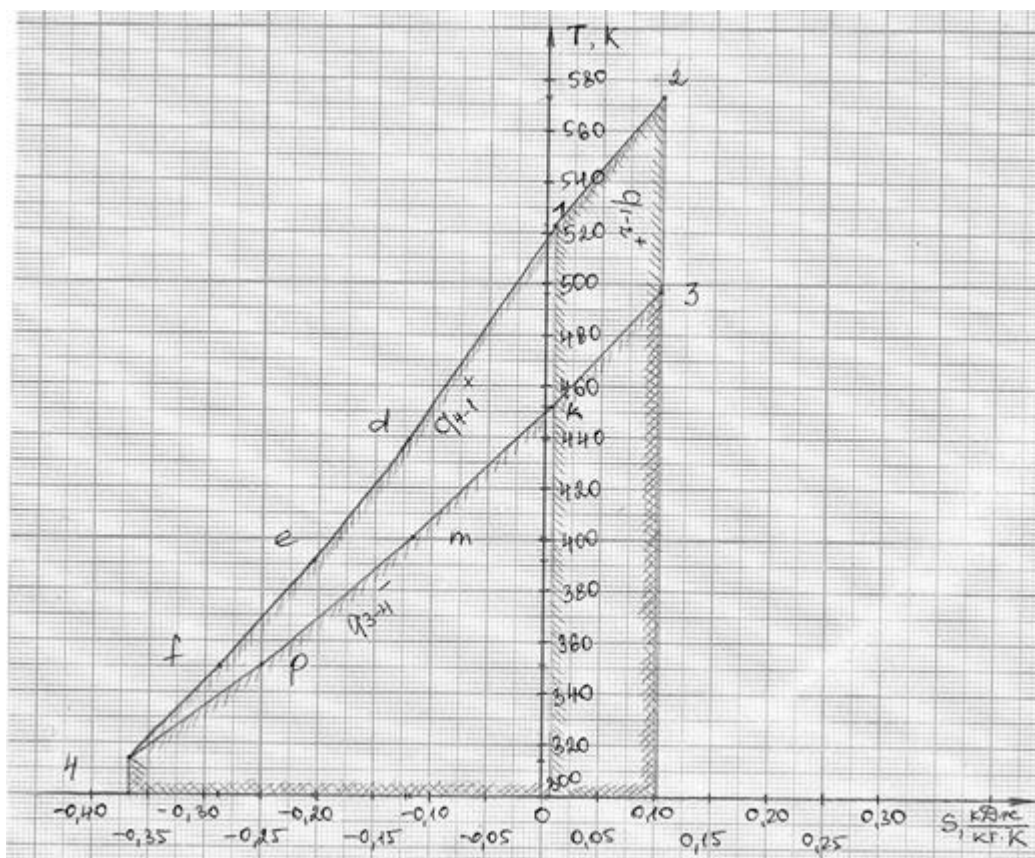


Рис. 4. Диаграмма цикла в координатах $s - T$ и графическое определение удельного количества теплоты

5. Используя $v - P$ и $s - T$ – диаграммы, графически определить Δu , Δi , Δs , q , l , l' и сопоставить результаты аналитического и графического расчетов.

Результаты аналитического (в числителе) и графического (в знаменателе) расчетов параметров термодинамического цикла представлены в таблице 5.1 и таблице 5.2.

Таблица 5. 1.

Процесс		n	Δs	Δu	Δi	q	l	l'
			кДж/(кг*К)	кДж/кг				
1–2	0	1,025	$\frac{0,0936}{0,1000}$	$\frac{36,9}{36,9}$	$\frac{51,25}{52,15}$	$\frac{51,25}{51,38}$	$\frac{14,3}{14,4}$	$\frac{0}{0}$
2–3	1,39	0	$\frac{0}{0}$	$\frac{-56,826}{-55,200}$	$\frac{-78,925}{-79,150}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{56,825}{55,740}$	$\frac{78,988}{77,75}$
3–4	0	1,025	$\frac{-0,4686}{-0,4580}$	$\frac{-134,316}{-135,530}$	$\frac{-185,55}{-186,15}$	$\frac{-185,55}{-186,25}$	$\frac{-87,3}{-87,5}$	$\frac{0}{0}$
4–1	$\pm\infty$	0,738	$\frac{0,3765}{0,3580}$	$\frac{154,242}{153,830}$	$\frac{214,225}{214,65}$	$\frac{154,242}{154,940}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{-60}{-60}$
Сумма	—	—	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{19,9}{21,1}$	$\frac{-16,2}{-17,4}$	$\frac{19,0}{17,8}$

Таблица 5.2.

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Значение
Подведенное количество теплоты	q_1	кДж/кг	$\frac{205,492}{205,490}$
Отведенное количество теплоты	q_2	кДж/кг	$\frac{186,55}{187,12}$
Работа цикла	$l_{ц}$	кДж/кг	$\frac{18,942}{16,86}$

Термический КПД	η_t	—	$\frac{0,092}{0,087}$
Среднее индикаторное давление	p_i	МПа	$\frac{0,217}{0,236}$

Из соотношения $dq = Tds = di = c_p dT$ следует, что площадь под изобарным процессом в $T - s$ координатах численно равна изменению энтальпии. Если учесть, что изменение энтальпии определяется только изменением температуры, то в любых термодинамических процессах, протекающих в одном и том же интервале температур, изменение энтальпии одинаково. Поэтому площадь под изобарным процессом в координатах в интервале температур $T_2 - T_1$ численно равна изменению энтальпии в любом другом термодинамическом процессе, протекающем в этом же интервале температур.

На малых участках процессов, когда разность $T_2 - T_1$ мала, можно пренебречь криволинейностью линии процесса и изменение энтальпии приближенно определить из соотношения

$$\Delta i = 0,5 \cdot (T_2 + T_1) \cdot \Delta s_p$$

Поскольку во всех термодинамических процессах идеальных газов, протекающих в одном и том же интервале температур, удельная внутренняя энергия изменяется также на одно и то же значение и площадь под изохорным процессом в $s - T$ – координатах численно равна удельной внутренней энергии любого другого термодинамического процесса, протекающего в том же интервале температур.

При возрастании температуры рабочего тела в термодинамическом процессе внутренняя энергия увеличивается, при понижении – уменьшается.

2. Список используемой литературы.

1. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие для вузов / В. В. Нащокин. - Изд. 4-е, стер. - [Москва] : Азбука, 2008. - 468, [1] с. : ил. - Библиогр.: с. 463.
2. Овсянников, М. К. Теплотехника : Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / М. К. Овсянников, И. И. Костылев. - Санкт-Петербург : Элмор, 1998. - 208 с.
3. Круглов, Г. А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. - 207 с.
4. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена : под ред. В. И. Крутова и Г. Б. Петражицкого. – М. : Высш. шк., 1986. – 145 с.