

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания по выполнению курсовых работ
для студентов специальности
7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Витебск
2026

УДК 621.036.7 (075.8)

Составители:

В. И. Столяренко, С. В. Жерносек, А. К. Матвеев

Одобрено кафедрой «Теплоэнергетика»
УО «ВГТУ», протокол № 8 от 28.04.2026.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
УО «ВГТУ», протокол № 9 от 29.05.2026.

Техническая термодинамика : методические указания по выполнению курсовых работ / В. И. Столяренко, С. В. Жерносек, А. К. Матвеев. – Витебск : УО «ВГТУ», 2026. – 57 с.

Методические указания предназначены для выполнения курсовой работы по курсу «Техническая термодинамика» студентами специальности 7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.036.7 (075.8)

© УО «ВГТУ», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Цикл компрессора	5
1.1 Краткие теоретические сведения.....	5
1.2 Задача 1.....	7
1.3 Задача 2.....	11
2 Циклы газотурбинных установок.....	16
2.1 Краткие теоретические сведения.....	16
2.2 Задача 3.....	18
2.3 Задача 4.....	22
3 Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания.....	26
3.1 Краткие теоретические сведения.....	26
3.2 Задача 5.....	30
3.3 Задача 6.....	33
3.4 Задача 7.....	37
4 Цикл Ренкина.....	43
4.1 Краткие теоретические сведения.....	43
4.2 Задача 8.....	45
4.3 Задача 9.....	48
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	52
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Приставка для образования дольных и кратных единиц	53
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Физические свойства идеальных газов при нормальных условиях	54
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Параметры насыщенного водяного пара (по давлению).....	55
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Параметры насыщенного водяного пара (по температуре).....	56

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для выполнения курсовой работы по курсу «Техническая термодинамика» студентами специальности 7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника» дневной и заочной форм обучения.

Целью курсовой работы, является закрепление студентами знаний по основным разделам дисциплины «Техническая термодинамика», а также приобретение практического опыта применения теоретических знаний при решении задач, связанных с расчетом и анализом идеальных термодинамических циклов тепловых машин.

Пояснительная записка оформляется в соответствии с Положением о порядке организации курсового проектирования и защиты курсовых проектов (курсовых работ) утвержденного (Приказом №317 от 30.08.2018.) Объем пояснительной записки 15...20 страниц формата А4, набранного шрифтом Times New Roman, размер 14, одинарный интервал, поля обычные. При форматировании текста пользоваться правилами оформления, установленными ГОСТ 7.32. В методическом пособии приведены примеры решения задач, на которые необходимо ориентироваться при оформлении расчетной записки.

Графическая часть должна наглядно отражать результаты работы и состоит из двух листов формата А1 оформленными в соответствии с требованиями ЕСКД. Чертежи должны иметь основную надпись (штамп в правом нижнем углу) оформленную по ГОСТ 2.104-68. Первый лист должен содержать диаграммы циклов и сводные таблицы расчетов к задачам с первой по седьмую. Второй лист должен содержать чертеж рассчитанного цикла Ренкина в $i-s$ диаграмме и сводные таблицы расчетов для задач номер восемь и девять.

Методика построения диаграмм: в целях автоматизации рутинных операций диаграммы рекомендуется строить с использованием средств автоматизации расчетов таких как «Excel» либо диалогового программного комплекса «СУKLS v.3.0» (ДПК) имеющегося на кафедре «Теплоэнергетика».

Работа с (ДПК) «СУKLS v.3.0» заключается в выборе типа цикла и задания категории цикла; после чего откроется соответствующий набор параметров, которые потребуется ввести для построения диаграммы цикла. Процедура построения запускается кнопкой «Счет» или клавиши «Enter». После выполнения расчета происходит автоматический переход на страницу «Результаты». Кнопка «Распахнуть» позволяет увеличить масштаб изображения, которое командами, используемыми для копирования и вставки в Windows «Ctrl + C и Ctrl + V» необходимо вставить в пояснительную записку после сводной таблицы результатов расчета.

1 Цикл компрессора

1.1 Краткие теоретические сведения

Процесс сжатия газа в компрессоре в зависимости от условий протекания теплообмена между рабочим телом и стенками цилиндра может осуществляться по изотерме, адиабате и политропе. Основной целью термодинамического расчета компрессора является определение величины работы, затрачиваемой на получение 1 кг сжатого газа и, в конечном итоге, определение мощности приводного двигателя. При изотермическом процессе сжатия работа в процессе определяется по уравнению:

$$l_{из.} = RT_1 \ln \frac{p_2}{p_1}, \quad \frac{Дж}{кг}, \quad (1.1)$$

где p – давление газа (Па); T – абсолютная температура газа (К); R – удельная газовая постоянная ($Дж/(кг \cdot K)$).

Работа привода компрессора равна работе изотермического сжатия:

$$l_{пр.из.} = l_{из.}, \quad \frac{Дж}{кг}. \quad (1.2)$$

Количество отводимого тепла:

$$q_{из.} = l_{из.}, \quad \frac{Дж}{кг}. \quad (1.3)$$

При адиабатном процессе сжатия работа определяется по уравнению:

$$l = \frac{1}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \quad \frac{Дж}{кг}, \quad (1.4)$$

где k – показатель адиабаты.

Работа привода компрессора в k раз больше работы адиабатного сжатия:

$$l_{пр.ад.} = l_{ад.} \cdot k, \quad \frac{Дж}{кг}. \quad (1.5)$$

Количество отводимого тепла:

$$q_{ад.} = 0, \quad \frac{Дж}{кг}. \quad (1.6)$$

При политропном процессе сжатия работа в процессе определяется по уравнению:

$$l = \frac{1}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, \quad (1.7)$$

где n – показатель политропы.

Работа привода компрессора в n раз больше работы политропного сжатия:

$$l_{\text{пр.пол.}} = l_{\text{пол.}} \cdot n, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (1.8)$$

Количество отводимого тепла:

$$q_{\text{пр.ад.}} = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1), \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (1.9)$$

Конечная температура газа при изотермическом процессе сжатия равна начальной температуре:

$$T_{2(\text{из.})} = T_1, \quad \text{К}. \quad (1.10)$$

При адиабатном и политропном сжатии конечную температуру можно определить исходя из соотношения начальных и конечных параметров соответственно, как:

$$T_{2(\text{ад.})} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad \text{К}. \quad (1.11)$$

$$T_{2(\text{пол.})} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad \text{К}. \quad (1.12)$$

Объемный расход полученного сжатого газа будет равен:

$$V_{2(\text{пол.})} = \frac{mRT_2}{p_2}, \quad \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, \quad (1.13)$$

где m – массовый расход, кг/с.

Теплоту, отводимую от газа при изобарном охлаждении, можно найти по формуле:

$$q = c_p (T_2 - T_1), \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, \quad (1.14)$$

где c_p – изобарная теплоёмкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Теоретическая мощность привода компрессора рассчитывается по формуле:

$$N_m = l_{np} \cdot m, \quad \text{Вт}. \quad (1.15)$$

где m – массовый расход газа, кг/с.

1.2 Задача 1

Поршневой компрессор всасывает V_1 воздуха при начальном давлении p_1 и температуре t_1 . Воздух сжимается до конечного давления p_2 . Определить конечную температуру в конце процесса сжатия, объем полученного сжатого воздуха, теоретическую мощность двигателя привода компрессора и расход охлаждающей воды, если ее температура повышается на Δt_b . Расчет произвести для трех процессов сжатия: изотермического, адиабатного и политропного с показателем политропы $n = 1,2$.

Теплоемкость воды принять $c_{p(в)} = 4198$ Дж/кг·град. Результаты расчетов представить в виде таблицы. Изобразить процессы в p - v - и T - s -диаграммах. Исходные данные для расчета представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные к задаче 1 для самостоятельного решения

Предпоследняя цифра шифра	t_1 , °С	p_2 , бар	Последняя цифра шифра	p_1 , мм рт. ст.	V_1 , м ³ /ч	Δt_b , °С
0	29	5,2	0	745	55	9
1	28	5,5	1	741	60	11
2	26	6,0	2	744	70	12
3	24	6,5	3	747	80	13
4	22	7,0	4	750	90	14
5	20	7,5	5	753	100	15
6	18	8,0	6	756	110	16
7	16	8,5	7	759	120	17
8	14	9,0	8	762	130	18
9	12	9,5	9	765	140	19

Пример решения:

Исходные данные: $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_2 = 5 \text{ бар}$; $p_1 = 738 \text{ мм рт. ст.}$; $V_1 = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$; $\Delta t_b = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Подготовка исходных данных. Для решения задачи переведем исходные данные в систему СИ.

Начальное давление: $p_1 = 738 \cdot 133,2 = 98301,6 \text{ Па}$.

Конечное давление: $p_2 = 5 \cdot 10^5 = 500000 \text{ Па}$.

Начальная температура: $T_1 = 30 + 273,15 = 303,15 \text{ К}$.

Объемный расход: $V_1 = \frac{50}{3600} \approx 0,01389 \text{ м}^3 / \text{сек}$.

Постоянные для воздуха:

$$R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), k = 1,4, c_p = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Показатель политропы: ($n = 1,2$.)

Параметры воды: $\Delta t_e = 10 \text{ К}$, $c_{p(e)} = 4198 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Массовый расход газа:

Из уравнения:

$$m = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{98301 \cdot 0,01389}{287 \cdot 303,15} \approx 0,01569 \text{ кг} / \text{с}.$$

Расчет процессов.

Изотермическое сжатие.

Конечная температура:

$$T_2 = T_1 = 303,15 \text{ К}.$$

Объемный расход сжатого газа:

$$V_2 = \frac{mRT_1}{p_2} = \frac{0,01569 \cdot 287 \cdot 303,15}{500000} \approx 0,00273 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Работа привода:

$$l_{np} = RT_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = 287 \cdot 303,15 \cdot \ln\left(\frac{500000}{98301,6}\right) \approx 141518 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

Работа привода компрессора:

$$L_{np} = l = 141518 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

Количество отводимого тепла:

$$q = L_{np} = 141518 \text{ Дж / кг.}$$

Теоретическая мощность привода:

$$N = m \cdot L_{np} = 0,01569 \cdot 141518 = 2220,75 \text{ Вт.}$$

Расход воды (по 1.14 через q):

$$m_g = \frac{m \cdot q}{c_{p(g)} \cdot \Delta t_g} = \frac{0,01569 \cdot 141518}{4198 \cdot 10} = 0,0529 \text{ кг / с.}$$

Адиабатное сжатие. Конечная температура:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 303,15 \cdot \left(\frac{500000}{98301,6} \right)^{0,286} = 482,49 \text{ К.}$$

Работа адиабатного сжатия:

$$l = \frac{R \cdot T_1}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{287 \cdot 303,15}{0,4} [0,5906] \approx 128677 \text{ Дж / кг.}$$

Работа привода компрессора:

$$L_{np} = k \cdot l = 1,4 \cdot 128677 = 180148 \text{ Дж / кг.}$$

Количество отводимого тепла:

$$q = 0 \text{ Дж / кг.}$$

Теоретическая мощность привода:

$$N = m \cdot L_{np} = 0,01569 \cdot 180148 = 2826,94 \text{ Вт.}$$

Охлаждение газа в охладителе:

$$Q_{охл} = m \cdot c_p (T_2 - T_1) = 0,01569 \cdot 1005 \cdot (482,49 - 303,15) = 2828,35 \text{ Вт.}$$

Расход воды:

$$m_g = \frac{Q}{c_{p(g)} \cdot \Delta t_g} = \frac{2828,35}{4198 \cdot 10} = 0,06737 \text{ кг / с.}$$

Политропный процесс сжатия ($n = 1,2$).

Конечная температура газа:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 303,15 \cdot \left(\frac{500000}{98301,6} \right)^{0,167} = 397,55 \text{ К.}$$

Работа политропного сжатия:

$$l = \frac{R \cdot T_1}{n-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{287 \cdot 303,15}{0,2} [0,3107] \approx 135465 \text{ Дж/кг.}$$

Работа привода компрессора:

$$L_{np} = n \cdot l = 1,2 \cdot 135465 = 162558 \text{ Дж/кг.}$$

Количество отводимого тепла:

$$q = \frac{n-k}{k-1} \cdot l = \frac{1,2-1,4}{0,4} \cdot 135465 = -67732 \text{ Дж/кг.}$$

Теоретическая мощность привода:

$$N = m \cdot L_{np} = 0,01569 \cdot 162558 = 2550,9 \text{ Вт.}$$

Охлаждение газа в охладителе по:

$$Q_{охл} = m \cdot c_p (T_2 - T_1) = 0,01569 \cdot 1005 \cdot (397,55 - 303,15) = 1488,78 \text{ Вт.}$$

Расход воды:

$$m_g = \frac{Q}{c_{p(g)} \cdot \Delta t_g} = \frac{1488,78}{4198 \cdot 10} = 0,03546 \text{ кг/с.}$$

Таблица 1.2 – Результаты расчетов (Сводная таблица)

Параметр	Ед. изм.	Изотерм. ($T = \text{const}$)	Адиабат. ($k = 1,4$)	Политр. ($n = 1,2$)
Конечная температура	К	303,15	482,49	397,55
Удельная работа процесса	Дж/кг	141518	128677	135465
Работа привода	Дж/кг	141518	180148	162558
Мощность привода	Вт	2220,75	2826,94	2550,92
Расход воды	кг/с	0,0529	0,06737	0,03546

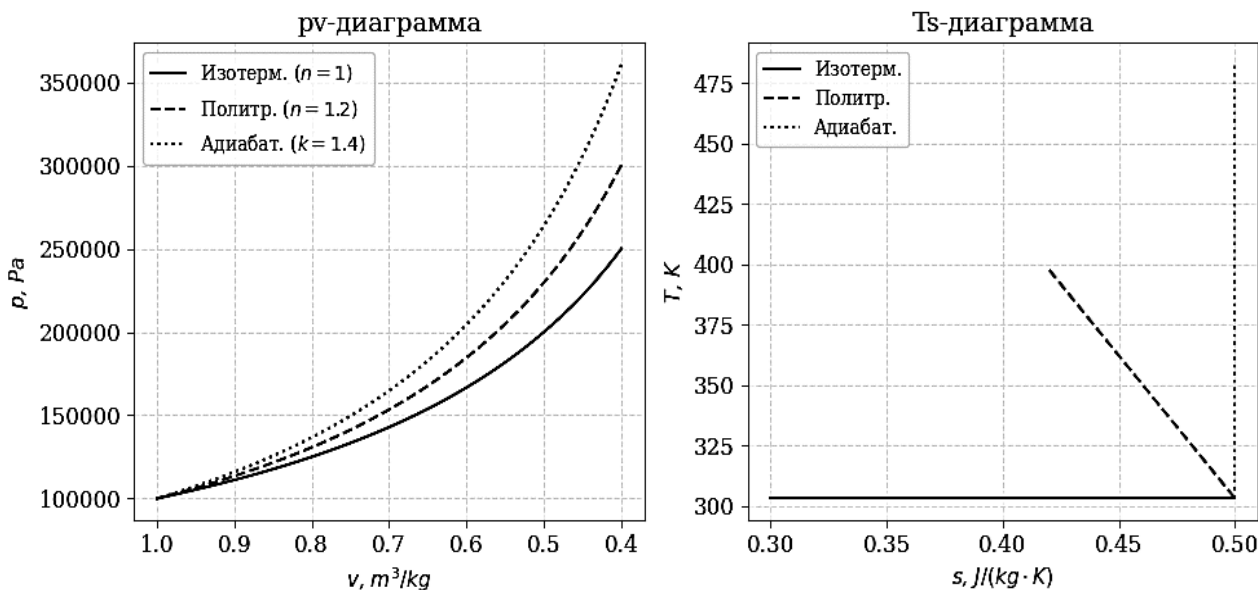


Рисунок 1.1 – изображение цикла работы компрессора на p - v и T - s диаграммах

Анализ диаграмм.

P - v -диаграмма. Изотерма ($n = 1$) – самая пологая кривая. Площадь под ней (работа) минимальна для данного процесса сжатия. Адиабата ($k = 1,4$) – самая крутая кривая. Сжатие происходит быстрее, чем успевает отводиться тепло, поэтому давление растет интенсивнее. Политропа ($n = 1,2$) – располагается между изотермой и адиабатой, что соответствует реальному процессу с частичным теплоотводом.

T - s -диаграмма. Изотерма – горизонтальная прямая ($T = 303,15$ К). При сжатии энтропия уменьшается за счет отвода теплоты. Адиабата – вертикальная прямая ($s = \text{const}$). В идеальном (адиабатном) процессе без трения энтропия не меняется, а температура растет до максимального значения (482,58 К). Политропа – наклонная линия. Температура растет умеренно (397,55 К), энтропия уменьшается, так как часть тепла отводится.

1.3 Задача 2

Газ с начальной температурой t_1 сжимается в одноступенчатом поршневом компрессоре от начального давления $p_1 = 1$ бар до конечного давления p_2 . Сжатие может происходить по изотерме, по адиабате и политропе с показателем политропы n . Определить для каждого из трех процессов сжатия конечную температуру газа t_2 , количество отведенного тепла Q и теоретическую мощность привода компрессора N_m , если его производительность m . Результаты расчетов представить в виде таблицы.

Изобразить процессы в p - v - и T - s -диаграммах.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Исходные данные к задаче 2 для самостоятельного решения

Предпоследняя цифра шифра	Газ	n	Последняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	p_2 , бар	m, кг/ч
0	He	1,18	0	13	5,7	730
1	воздух	1,28	1	11	5,3	550
2	Ar	1,34	2	15	4,9	586
3	N ₂	1,20	3	17	6,1	622
4	CO ₂	1,17	4	19	6,5	658
5	воздух	1,21	5	21	6,9	694
6	He	1,32	6	23	7,3	514
7	Ar	1,27	7	25	7,7	766
8	N ₂	1,19	8	27	8,1	802
9	CO ₂	1,15	9	29	8,5	838

Пример решения:

Газ воздух; $N = 1,19$; $t_1 = 11^\circ\text{C}$; $p_2 = 4,9$ бар; $m = 514$ кг/ч

Прежде всего, переведем исходные данные в систему СИ и определим физические константы для воздуха.

Воздух (газовая постоянная $R = 287$ Дж/(кгК) показатель адиабаты $k = 1,4$).

Начальное давление: $p_1 = 1$ бар = $1 \cdot 10^5$ Па .

Конечное давление: $p_2 = 4,9$ бар = $4,9 \cdot 10^5$ Па .

Начальная температура: $T_1 = t_1 + 273,15 = 11 + 273,15 = 284,15$ К.

Массовый расход: $m = 514$ кг/ч = $\frac{514}{3600} = 0,1428$ кг/с..

Показатель политропы: $n = 1,19$

Изотермический процесс ($T = const$).

Конечная температура:

$$T_2 = T_1 = 284,15 \text{ К.}$$

Работа привода:

$$L_{пр.из} = mRT_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = 0,1428 \cdot 287 \cdot 284,15 \cdot \ln\left(\frac{4,9}{1}\right) \approx 18504,5 \text{ Дж/с (Вт).}$$

Количество тепла:

$$Q_{из} = -L_{пр.из} = -18504,5 \text{ Вт.}$$

Мощность:

$$N_{m.из} = L_{np.из} = 18,5 \text{ кВт.}$$

Адиабатный процесс ($dq = 0$).

Конечная температура:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 284,15 \cdot (4,9)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \approx 447,45 \text{ K} \quad (t_2 = 174,3^\circ \text{C})$$

Работа привода:

$$L_{np.ад} = \frac{k}{k-1} mRT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{1,4}{0,4} \cdot 0,1428 \cdot 287 \cdot 284,15 \cdot (1,547 - 1) \approx 23420,8 \text{ Вт.}$$

Количество тепла:

$$Q_{ад} = 0 \text{ Вт.}$$

Мощность:

$$N_{m.ад} = L_{np.ад} = 23,42 \text{ кВт.}$$

Политропный процесс ($n = 1,19$).

Конечная температура:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 284,15 \cdot (4,9)^{\frac{1,19-1}{1,19}} \approx 366,22 \text{ K} \quad (t_2 = 93,1^\circ \text{C})$$

Работа привода:

$$L_{np.пол} = \frac{n}{n-1} mRT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \\ = \frac{1,19}{0,19} \cdot 0,1428 \cdot 287 \cdot 284,15 \cdot (1,29 - 1) \approx 21064,08 \text{ Вт.}$$

Количество тепла:

$$c_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287}{1,4-1} = 717,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$Q_{\text{пол}} = m \cdot c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) =$$

$$= 0,1428 \cdot 717,5 \frac{1,19-1,4}{1,19-1} (366,55 - 284,15) \approx -9293 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Мощность:

$$N_{\text{т.пол}} = L_{\text{пр.пол}} = 21,06 \text{ кВт}.$$

Таблица 1.4 – Сводная таблица результатов

Параметр	Изотермический	Адиабатный	Политропный
Конечная температура t_2 , °C	11,0	174,1	93,4
Отведенное тепло Q, кВт	-18,5	0	-9,29
Мощность привода Nт, кВт	18,5	23,42	21,06

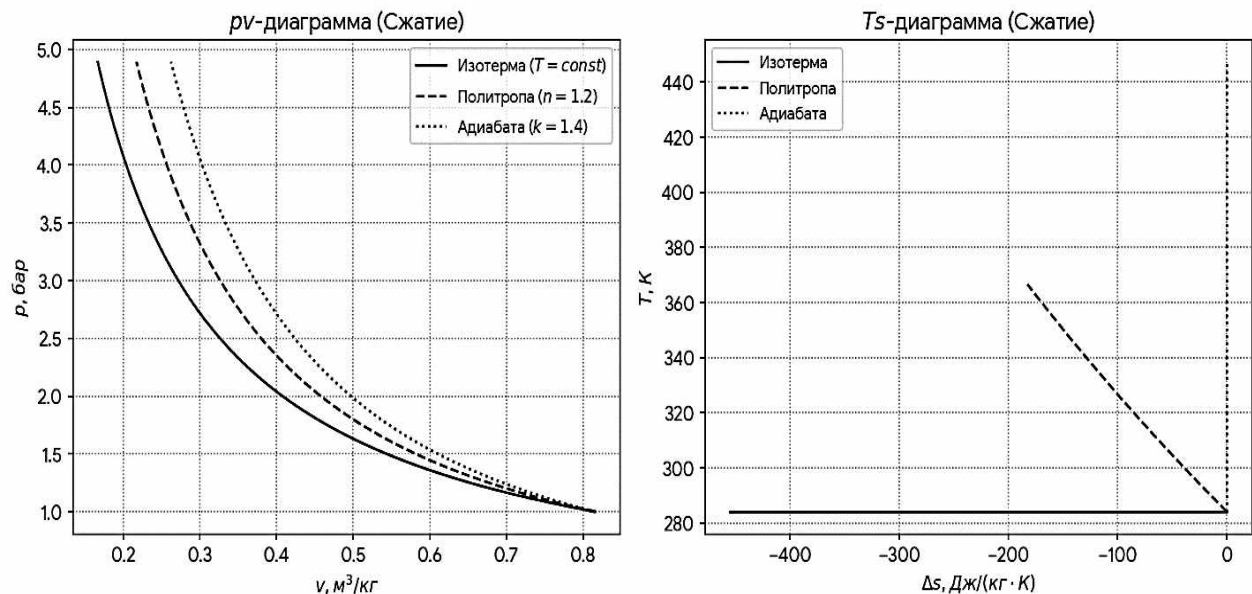


Рисунок 1.2 – Изображение цикла работы компрессора на $p-v$ и $T-s$ диаграмме

Анализ диаграмм.

$p-v$ -диаграмма (Механика процесса).

Затраты работы: Площадь под кривыми наглядно показывает, что изотермическое сжатие – самое экономичное.

В адиабатном процессе давление растет быстрее всего, так как газ дополнительно расширяется от сильного нагрева.

Политропа: Занимает промежуточное положение, отражая реальное сжатие с частичным охлаждением.

T-s-диаграмма (Теплообмен и энтропия).

Изотерма ($T = const$): Показывает, что вся работа сжатия превращается в тепло и полностью отводится ($Q = -18,5$ кВт), из-за чего энтропия падает.

Адиабата ($s = const$): Теплообмена нет ($Q = 0$), энтропия идеальна и неизменна, а вся энергия уходит в рост температуры (до $174,1$ °С).

Политропа: Показывает реальный баланс: температура растет (до $94,5$ °С), но медленнее, чем в адиабате, так как часть тепла ($9,29$ кВт) всё же отводится.

Чем интенсивнее охлаждение (отвод тепла), тем ниже кривая на p-v диаграмме и тем меньше мощность (N_T), необходимая для привода компрессора.

2 Циклы газотурбинных установок

2.1 Краткие теоретические сведения

Газотурбинные установки (ГТУ) являются одним из видов двигателей внутреннего сгорания. ГТУ могут работать со сгоранием топлива (процессом подвода теплоты) при постоянном давлении (цикл Брайтона) и при постоянном объеме (цикл Гемфри). Цикл Брайтона – цикл газотурбинной установки с подводом теплоты при $p = \text{const.}$, состоит из адиабатного сжатия воздуха в компрессоре. По изобаре к рабочему телу подводится тепло (сгорание топлива). Далее рабочее тело (воздух и продукты сгорания) адиабатно расширяется в сопловом аппарате турбины и отдает работу турбинному колесу. Выходу отработавших газов из турбины соответствует изобарный процесс.

Характеристиками цикла являются:

– степень повышения давления в компрессоре:

$$\beta = \frac{p_2}{p_1}. \quad (2.1)$$

где p – давление, Па;

– и степень изобарного расширения:

$$\rho = \frac{v_3}{v_2}, \quad (2.2)$$

где v – удельный объём, м³/кг.

Количество подводимой теплоты определяется по формуле:

$$q_{\text{под.}} = c_p (T_3 - T_2), \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, \quad (2.3)$$

где T – термодинамическая температура, К; c_p – изобарная теплоёмкость, Дж/(кг·К);

а количество отводимой теплоты по формуле:

$$q_{\text{отв.}} = c_p (T_4 - T_1), \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, \quad (2.4)$$

Термический КПД цикла равен:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{\text{отв.}}}{q_{\text{под.}}}. \quad (2.5)$$

Температуры T : для адиабаты 1–2:

$$T_2 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}}, \quad K. \quad (2.6)$$

где β – степень повышения давления в компрессоре.

Для изобары 2–3:

$$T_3 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} \cdot \rho, \quad K. \quad (2.7)$$

где ρ – степень изобарного расширения

Для адиабаты 3–4:

$$T_4 = T_1 \cdot \rho, \quad K. \quad (2.8)$$

Уравнение для определения термического КПД:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (2.9)$$

Цикл Гемфри – идеализированный цикл газотурбинной установки с подводом теплоты при $V = \text{const}$. Цикл состоит из адиабатного сжатия воздуха в компрессоре. По изохоре подводится тепло (сгорание топлива). Далее рабочее тело (воздух и продукты сгорания) адиабатно расширяется в сопловом аппарате турбины и отдает работу турбинному колесу. Изобарный процесс соответствует выходу отработавших газов из турбины.

Характеристиками цикла являются: степень повышения давления в компрессоре:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (2.10)$$

и степень дополнительного повышения давления:

$$\lambda = \frac{P_3}{P_2}. \quad (2.11)$$

Количество подводимой и отводимой теплоты определяется по формулам:

$$q_{\text{под.}} = c_v (T_3 - T_2), \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, \quad (2.12)$$

где c_v – изохорная теплоёмкость, Дж/(кг·К)

$$q_{\text{отв.}} = c_p (T_4 - T_1), \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, \quad (2.13)$$

Термический КПД цикла равен:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{омв.}}{q_{под.}} \quad (2.14)$$

Температура T для адиабаты 1–2:

$$T_2 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}}, \quad K. \quad (2.15)$$

Для изохоры 2–3:

$$T_3 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} \cdot \lambda, \quad K. \quad (2.16)$$

Для адиабаты 3–4:

$$T_4 = T_1 \cdot \lambda^{\frac{1}{k}}, \quad K. \quad (2.17)$$

Уравнение для определения термического КПД:

$$\eta_t = 1 - \frac{k \left(\lambda^{\frac{1}{k}} - 1 \right)}{\beta^{\frac{k-1}{k}} \cdot (\lambda - 1)}. \quad (2.18)$$

В качестве рабочего тела при расчете циклов работы газотурбинных установок принимается воздух, параметры его определяются по приложению Б. Полезная работа цикла определяется как:

$$l_y = q_{под.} - q_{омв.} \quad (2.19)$$

Теоретическая мощность установки может быть рассчитана по формуле:

$$N_m = l_y \cdot m, \quad Вт. \quad (2.20)$$

где m – массовый расход газа, кг/с.

2.2 Задача 3

Газотурбинная установка работает с подводом тепла при постоянном давлении. Начальное давление p_1 , начальная температура t_1 , степень повышения давления β , температура перед турбиной t_3 . Определить параметры

рабочего тела, в качестве которого используется воздух, в характерных точках цикла, количество подведенного и отведенного тепла, работу и термический КПД цикла, а также теоретическую мощность установки при расходе воздуха m кг/с. Изобразить схему ГТУ и цикл в $p-v$ и $T-s$ -диаграммах. Данные для расчета приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные к задаче 3

Предпоследняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	β	Последняя цифра шифра	$p_1, \text{гПа}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$m, \text{кг/с}$
0	25	12,5	0	990	1350	60
1	13	14,1	1	980	1100	55
2	15	13,7	2	985	1150	50
3	17	13,3	3	975	1200	65
4	19	12,9	4	995	1250	70
5	21	14,5	5	1000	1300	75
6	23	12,1	6	1005	1050	80
7	11	11,7	7	1010	1400	85
8	27	11,3	8	1015	1450	90
9	29	10,9	9	1020	1500	95

Пример решения. Исходные данные: $t_1 = 11^\circ\text{C}$; $\beta = 14,5$; $p_1 = 975 \text{ гПа}$; $t_3 = 1050^\circ\text{C}$; $m = 50 \text{ кг/с}$.

Переведем исходные данные в систему СИ:

$$T_1 = 11 + 273,15 = 284,15 \text{ К}, \quad T_3 = 1050 + 273,15 = 1323,15 \text{ К},$$

$$p_1 = 975 \text{ гПа} = 97500 \text{ Па}, \quad \beta = 14,5, \quad m = 50 \text{ кг/с},$$

$$\text{Для воздуха: } k = 1,4; \quad c_p = 1,005 \text{ кДж/(кгК)}; \quad R = 287,3 \text{ Дж/(кгК)}.$$

Определение температур в узловых точках цикла. Точка 2 (после компрессора):

$$T_2 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} = 284,15 \cdot 14,5^{\frac{0,4}{1,4}} \approx 610,05 \text{ К}.$$

Точка 3 (перед турбиной):

По условию:

$$T_3 = 1323,15 \text{ К}.$$

Точка 4 (после турбины):

$$T_4 = \frac{T_3}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{1323,15}{14,5^{\frac{1,4-1}{1,4}}} \approx 616,3 \text{ К}.$$

Степень изобарного расширения (ρ):

$$\rho = \frac{T_3}{T_2} = \frac{1323,15}{610,9} = 2,17$$

Параметры давления и объема

$$p_2 = p_3 = p_1 \cdot \beta = 97500 \cdot 14,5 = 1413750 \text{ Па},$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 284,15}{97500} = 0,836 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 610,9}{1413750} = 0,124 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

$$v_3 = v_2 \cdot \rho = 0,124 \cdot 2,166 = 0,269 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

$$v_4 = \frac{RT_4}{p_4} = \frac{287 \cdot 616,3}{97500} = 1,814 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Подведенная теплота (q_1):

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) = 1,005 \cdot (1323,15 - 610,05) = 716,7 \text{ кДж} / \text{кг},$$

Отведенная теплота (q_2):

$$q_2 = c_p (T_4 - T_1) = 1,005 \cdot (617,4 - 284,15) = 333,8 \text{ кДж} / \text{кг},$$

Работа цикла (l):

$$l = q_1 - q_2 = 716,7 - 333,8 = 382,9 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Термический КПД (η_t):

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \frac{1}{14,5^{\frac{1,4-1}{1,4}}} = 0,53 \text{ (или } 53,3 \%)$$

Теоретическая мощность (N):

$$N = m \cdot l = 50 \cdot 382,9 = 19142,8 \text{ кВт}$$

Таблица 2.2 – Сводная таблица результатов термодинамического расчета

Параметр	Единица измерения	Значение
Температура в т. 1 (начало)	К	284,15
Температура в т. 2 (после компр.)	К	610
Температура в т. 3 (перед турб.)	К	1323
Температура в т. 4 (после турб.)	К	616
Давление в цикле (min/max)	Па	9750/1413450
Удельный объем в т. 1	м ³ /кг	0,84
Удельный объем в т. 2	м ³ /кг	0,124

Окончание таблицы 2.2

Параметр	Единица измерения	Значение
Удельный объем в т. 3	м ³ /кг	0,269
Удельный объем в т. 4	м ³ /кг	1,814
Степень изобарного расширения	–	2,17
Подведенная теплота	кДж/кг	716,7
Отведенная теплота	кДж/кг	333,8
Удельная работа цикла	кДж/кг	382,9
Термический КПД	–	0,533 (53,3 %)
Теоретическая мощность	кВт	19142,8 (19,14 МВт)

Схема ГТУ: Компрессор – Камера сгорания – Газовая турбина (все на одном валу).

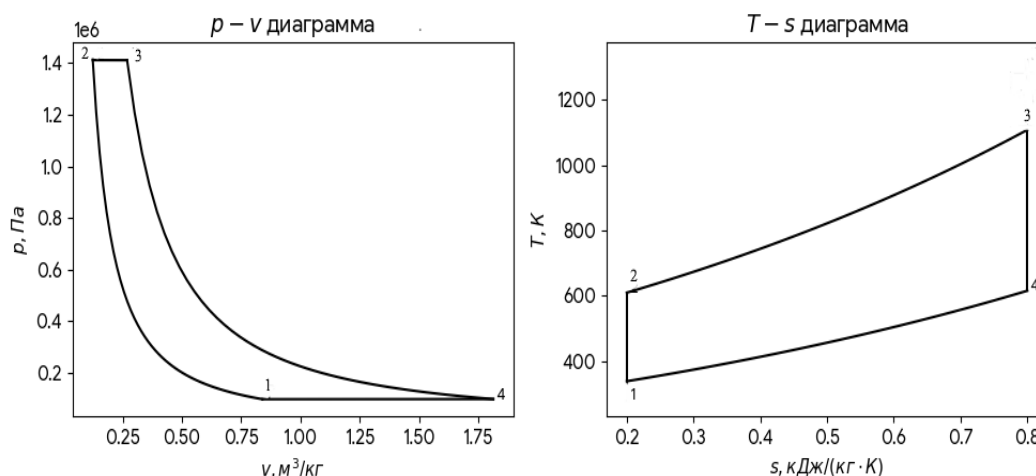


Рисунок 2.1 – Изображение цикла работы ГТУ на $p-v$ и $T-s$ диаграмме

Анализ диаграмм:

Цикл соответствует циклу ГТУ (Брайтона) с изобарным подводом (2–3) и отводом (4–1) теплоты.

Описание процессов цикла:

1–2: Адиабатное сжатие рабочего тела в компрессоре ($s = \text{const}$). Температура растет с 284,15 К до 610 К. 2–3: Изобарный подвод теплоты ($p = \text{const}$). Объем увеличивается с 0,124 до 0,269 м³/кг, температура достигает максимума в 1323 К. 3–4: Адиабатное расширение в турбине ($s = \text{const}$). Сопровождается совершением полезной работы. 4–1: Изобарный отвод теплоты в окружающую среду ($p = \text{const}$). Цикл замыкается при исходной температуре 284,15 К.

Основные выводы по диаграммам:

В $p-v$ -диаграмме площадь внутри контура численно равна полезной работе цикла (l). В $T-s$ -диаграмме площадь под кривой 2–3 соответствует подведенной теплоте (q_1), а площадь под кривой 4–1 – отведенной теплоте (q_2).

2.3 Задача 4

Газотурбинная установка работает с подводом тепла при постоянном объеме. Начальное давление $p_1 = 1,01$ бар, начальная температура t_1 , степень повышения давления β , степень дополнительного повышения давления λ . Определить параметры рабочего тела, в качестве которого используется воздух, в характерных точках цикла, количество подведенного и отведенного тепла, работу и термический КПД цикла, а также теоретическую мощность установки при расходе воздуха m кг/с. Изобразить схему ГТУ и цикл в p - v и T - s диаграммах. Данные для расчета приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Исходные данные к задаче 4

Предпоследняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	β	Последняя цифра шифра	$m, \text{кг/с}$	λ
0	12	4,5	0	190	1,3
1	14	5,0	1	180	1,5
2	16	5,5	2	170	1,7
3	18	6,0	3	160	1,9
4	20	6,5	4	150	2,1
5	22	7,0	5	140	2,3
6	24	7,5	6	130	2,5
7	26	8,0	7	120	2,7
8	28	8,5	8	110	2,9
9	30	9,0	9	100	3,1

Пример решения.

Решим задачу по шагам для газотурбинной установки с подводом тепла при постоянном объёме (цикл Гемфри).

Исходные данные:

$$p_1 = 1,01 \text{ бар} = 101\,000 \text{ Па};$$

$$t_1 = 12 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow T_1 = 285,15 \text{ К};$$

$$\beta = 4,5 \text{ (степень повышения давления в компрессоре);}$$

$$\lambda = 1,3 \text{ (степень дополнительного повышения давления);}$$

$$m = 190 \text{ кг/с (массовый расход воздуха);}$$

рабочее тело – воздух.

Физические константы для воздуха:

$$\text{показатель адиабаты } k = 1,4;$$

$$\text{удельная газовая постоянная } R = 287,3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К);}$$

$$\text{изобарная теплоёмкость } c_p = 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К);}$$

$$\text{изохорная теплоёмкость } c_v = 718 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К).}$$

Шаг 1. Определение параметров в характерных точках цикла.

Точка 1:

$$T_1 = 285,15 \text{ К},$$
$$p_1 = 101000 \text{ Па}.$$

Удельный объём найдём из уравнения состояния идеального газа:

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{287,3 \cdot 285,15}{101000} \approx 0,81 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Точка 2 (адиабатное сжатие 1–2):

$$T_2 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} = 285,15 \cdot 4,5^{\frac{1,4-1}{1,4}} \approx 438,23 \text{ К};$$
$$p_2 = p_1 \cdot \beta = 101000 \cdot 4,5 = 454500 \text{ Па}.$$

Удельный объём:

$$v_2 = \frac{R \cdot T_2}{p_2} = \frac{287,3 \cdot 438,23}{454500} \approx 0,277 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Точка 3 (изохорный подвод тепла 2–3):

$$p_3 = p_2 \cdot \lambda = 454500 \cdot 1,3 = 590850 \text{ Па};$$
$$T_3 = T_2 \cdot \lambda = 438,23 \cdot 1,3 \approx 569,7 \text{ К}.$$
$$v_3 = v_2 = 0,277 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Точка 4 (адиабатное расширение 3–4):

$$p_4 = p_1 = 101000 \text{ Па};$$
$$T_4 = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 569,7 \cdot \left(\frac{101000}{590850} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \approx 343,9 \text{ К}.$$

Удельный объём:

$$v_4 = \frac{R \cdot T_4}{p_4} = \frac{287,3 \cdot 343,9}{101000} \approx 0,98 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Шаг 2. Расчёт количества подведённого и отведённого тепла

Подведённое тепло (изохора 2–3):

$$q_1 = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 718 \cdot (569,7 - 438,2) \approx 132127 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

Отведённое тепло (изобара 4–1):

$$q_2 = c_p(T_4 - T_1) = 1005 \cdot (343,9 - 285,15) \approx 59067 \text{ Дж/кг.}$$

Шаг 3. Расчёт работы цикла:

Полезная работа цикла:

$$l = q_1 - q_2 = 132127 - 59061 = 73060 \text{ Дж/кг.}$$

Шаг 4. Расчёт термического КПД цикла:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{59061}{132127} \approx 0,349 \text{ (0,35\%)}$$

Шаг 5. Расчёт теоретической мощности установки

$$N = ml = 190 \cdot 73060 \approx 13881,46 \text{ Вт} \approx 13,88 \text{ МВт.}$$

Таблица 2.4 – Параметры в характерных точках:

Точка	p , Па	T , К	v , м ³ /кг
1	101 000	285,15	0,81
2	438233	438,23	0,277
3	569703	569,7	0,277
4	101 000	343,92	0,97

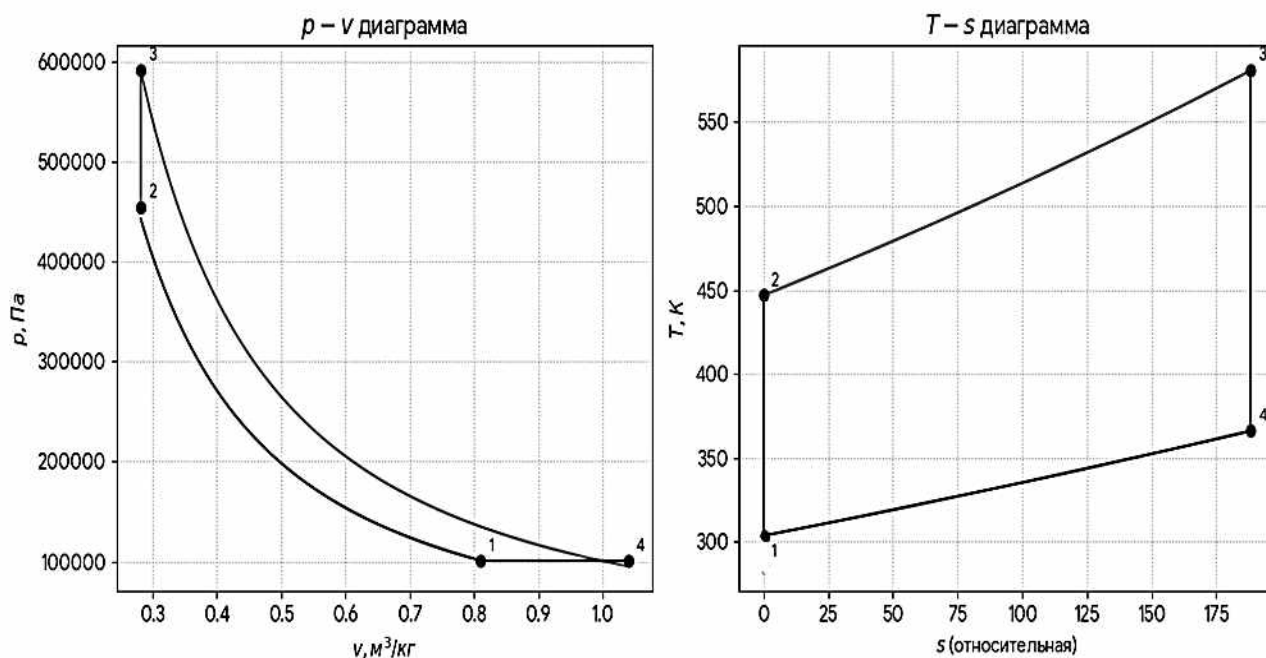


Рисунок 2.2 – Изображение цикла работы ГТУ на $p-v$ и $T-s$ диаграмме

Схема ГТУ с подводом теплоты при $V = \text{const}$: Компрессор (адиабатное сжатие 1–2). Ресивер (для стабилизации давления). Камера сгорания

(изохорный подвод теплоты 2–3). Турбина (адиабатное расширение 3–4). Выход отработавших газов (изобарный процесс 4–1).

Энергетические характеристики: подведённое тепло: $q_1 \approx 132,13$ кДж/кг, отведённое тепло: $q_2 \approx 59,07$ кДж/кг, работа цикла: $l \approx 73,06$ кДж/кг, термический КПД: $\eta_t \approx 0,35$ %, теоретическая мощность: $N \approx 13,88$ МВт.

Анализ диаграмм.

Описание процессов на диаграмме p - V :

Процесс 1–2 (сжатие). Давление растёт от 101 000 до 438 233 Па. Удельный объём уменьшается от 0,81 до 0,277 м³/кг. Характер процесса: адиабатный. Линия на диаграмме: кривая, направленная вверх и влево. Процесс 2–3 (нагрев при постоянном объёме): давление увеличивается от 438 233 до 569 703 Па. Объём остаётся постоянным: $v = 0,277$ м³/кг (изохора). Линия на диаграмме: вертикальная линия вверх. Процесс 3–4 (расширение): Давление падает от 569 703 до 101 000 Па. Удельный объём увеличивается от 0,277 до 0,97 м³/кг. Характер процесса: адиабатный. Линия на диаграмме: кривая, направленная вниз и вправо. Процесс 4–1 (завершение цикла): Давление остаётся постоянным: $p = 101 000$ Па (изобара). Объём уменьшается от 0,97 до 0,81 м³/кг. Линия на диаграмме: горизонтальная линия влево. Площадь внутри цикла на pV -диаграмме соответствует работе цикла $L_{ц}$.

Описание процессов на диаграмме T - S :

Процесс 1–2: Температура растёт от 285,15 до 438,23 К. Изменение энтропии: небольшое (процесс адиабатный, $\Delta s \approx 0$). Линия на диаграмме: почти вертикальная линия вверх. Процесс 2–3: Температура увеличивается от 438,23 до 569,7 К. Изохорный нагрев: энтропия растёт, так как тепло подводится. Линия на диаграмме: кривая с наклоном вправо и вверх. Процесс 3–4: Температура падает от 569,7 до 343,92 К. Энтропия уменьшается (процесс адиабатный). Линия на диаграмме: кривая вниз и влево. Процесс 4–1: Температура снижается от 343,92 до 285,15 К. Изобарное охлаждение: энтропия уменьшается. Линия на диаграмме: кривая вниз и влево, замыкающая цикл. Площадь внутри цикла на TS -диаграмме соответствует разности подведённой и отведённой теплоты.

3 Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания

3.1 Краткие теоретические сведения

Цикл Отто – идеальный термодинамический цикл ДВС с изохорным подводом тепла состоит из двух изохор и двух адиабат, осуществляется следующим образом. Газ с начальными параметрами сжимается по адиабате. В изохорном процессе рабочему телу сообщается некоторое количество тепла (этот процесс соответствует сгоранию топлива в цилиндре двигателя). Далее рабочее тело расширяется по адиабате. Затем по изохоре рабочее тело возвращается в первоначальное состояние, при этом от него отводится теплота в теплоприемник.

Характеристиками цикла являются:

– степень сжатия:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}; \quad (3.1)$$

– и степень повышения давления:

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}. \quad (3.2)$$

Количество подводимой и отводимой теплоты определяется по формуле:

$$q_{под.} = c_v (T_3 - T_2); \quad q_{от.} = c_v (T_4 - T_1). \quad (3.3)$$

Термический КПД цикла равен:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{от.}}{q_{под.}}. \quad (3.4)$$

Параметры рабочего тела во всех характерных точках цикла:

В точке 2:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}; \quad p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k; \quad T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}. \quad (3.5)$$

В точке 3

$$v_3 = v_2; \quad p_3 = p_1 \cdot \lambda \cdot \varepsilon^k; \quad T_3 = T_1 \cdot \lambda \cdot \varepsilon^{k-1}. \quad (3.6)$$

В точке 4

$$v_4 = v_1; \quad p_4 = p_1 \cdot \lambda; \quad T_4 = T_1 \cdot \lambda. \quad (3.7)$$

Уравнение для определения термического КПД:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (3.8)$$

Цикл Дизеля – идеальный термодинамический цикла ДВС с изохорным подводом тепла. Цикл с постепенным сгоранием топлива при постоянном давлении осуществляется следующим образом. Газ с начальными параметрами сжимается по адиабате. В изобарном процессе рабочему телу сообщается некоторое количество тепла. Далее рабочее тело расширяется по адиабате и затем по изохоре и возвращается в первоначальное состояние, при этом от него отводится теплота в теплоприемник.

Характеристиками цикла являются:

– степень сжатия

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}. \quad (3.9)$$

– и степень предварительного расширения

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} \quad (3.10)$$

Количество подводимой и отводимой теплоты определяется по формуле:

$$q_{под.} = c_p (T_3 - T_2); \quad q_{от.} = c_v (T_4 - T_1). \quad (3.11)$$

Термический КПД цикла равен

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{от.}}{q_{под.}}. \quad (3.12)$$

Параметры рабочего тела во всех характерных точках цикла.

В точке 2

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}; \quad p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k; \quad T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}. \quad (3.13)$$

В точке 3

$$v_3 = v_1 \frac{\rho}{\varepsilon}; \quad p_3 = p_1 \cdot \varepsilon^k; \quad T_3 = T_1 \cdot \rho \cdot \varepsilon^{k-1}. \quad (3.14)$$

В точке 4

$$v_4 = v_1; \quad p_4 = p_1 \cdot \rho^k; \quad T_4 = T_1 \cdot \rho^k. \quad (3.15)$$

Уравнение для определения термического КПД:

$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot (\rho - 1)} \quad (3.16)$$

Цикл Тринклера – идеальный термодинамический цикл ДВС со смешанным подводом тепла (при постоянном объеме и при постоянном давлении) осуществляется следующим образом. Газ с начальными параметрами сжимается по адиабате. Некоторая часть тепла подводится к рабочему телу в изохорном процессе, другая часть – в изобарном процессе. Далее рабочее тело расширяется по адиабате и затем по изохоре возвращается в первоначальное состояние, при этом теплота от него отводится в теплоприемник.

Характеристиками цикла являются:

– степень сжатия:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}. \quad (3.17)$$

– степень повышения давления:

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2} \quad (3.18)$$

– и степень предварительного расширения:

$$\rho = \frac{v_4}{v_3}. \quad (3.19)$$

Количество подводимой теплоты

$$q_{подв.} = q_{подв.1} + q_{подв.2}, \quad (3.20)$$

где первая доля подведенной теплоты определяется по формуле:

$$q_{подв.1} = c_v \cdot (T_3 - T_2). \quad (3.21)$$

а вторая доля подведенной теплоты – по формуле:

$$q_{подв.2} = c_p \cdot (T_4 - T_3). \quad (3.22)$$

Количество отводимой теплоты:

$$q_{отв.} = c_v \cdot (T_5 - T_1). \quad (3.23)$$

Термический КПД цикла равен:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{отв.}}{q_{подв.}}. \quad (3.24)$$

Параметры рабочего тела во всех характерных точках цикла.
В точке 2

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}; \quad p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k; \quad T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}. \quad (3.25)$$

В точке 3

$$v_3 = \frac{v_1}{\varepsilon}; \quad p_3 = p_1 \cdot \lambda \cdot \varepsilon^k; \quad T_3 = T_1 \cdot \lambda \cdot \varepsilon^{k-1}. \quad (3.26)$$

В точке 4

$$v_4 = v_1 \frac{\rho}{\varepsilon}; \quad p_4 = p_1 \cdot \lambda \cdot \varepsilon^k; \quad T_4 = T_1 \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \varepsilon^{k-1}. \quad (3.27)$$

В точке 5

$$v_5 = v_1; \quad p_5 = p_1 \cdot \lambda \cdot \rho^k; \quad T_5 = T_1 \cdot \rho^k \cdot \lambda. \quad (3.28)$$

Уравнение для определения термического КПД:

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} \cdot ((\lambda - 1) + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1))}. \quad (3.29)$$

В качестве рабочего тела при расчете циклов работы поршневых двигателей внутреннего сгорания принимается воздух, параметры его определяются по приложению Б. Полезная работа цикла определяется как:

$$l_{ц} = q_{подв.} - q_{отв.} \quad (3.30)$$

Теоретическая мощность установки может быть рассчитана по формуле:

$$N_m = l_{ц} \cdot m, (Вт), \quad (3.31)$$

где m – массовый расход рабочего тела, кг/с.

Традиционно мощность ДВС указывается в лошадиных силах, 1 л. с. = 735 Вт.

3.2 Задача 5

Поршневой двигатель внутреннего сгорания работает с подводом тепла при постоянном объеме. Определить параметры рабочего тела, в качестве которого используется воздух, в характерных точках цикла, количество подведенного и отведенного тепла, работу и термический КПД цикла при начальном давлении p_1 и температуре t_1 , если степень сжатия ε , степень повышения давления λ . Изобразить цикл работы такого ДВС в $p-v$ и $T-s$ диаграммах. Данные для расчета приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные к задаче 5

Предпоследняя цифра шифра	p_1 , мм рт. ст.	λ	Последняя цифра шифра	t_1 , °С	ε
0	755	3,1	0	34	7,1
1	767	3,3	1	37	6,7
2	763	3,5	2	31	6,9
3	759	2,9	3	28	6,5
4	771	2,7	4	25	7,3
5	751	2,5	5	22	7,5
6	747	2,3	6	19	7,7
7	743	2,1	7	16	7,9
8	739	1,9	8	13	8,1
9	735	1,7	9	10	8,3

Пример решения:

Исходные данные: $p_1 = 771$ мм рт. ст.; $\lambda = 3,5$; $t_1 = 37$ °С; $\varepsilon = 6,5$.

Решим задачу для цикла Отто с подводом тепла при постоянном объеме.

Дано: $p_1 = 771$ мм рт. ст.; $t_1 = 37$ °С; $\varepsilon = 6,5$ (степень сжатия); $\lambda = 3,5$ (степень повышения давления). Рабочее тело – воздух ($k = 1,4$ – показатель адиабаты,) $c_v = 0,718$ кДж/(кг·К) – удельная теплоёмкость при постоянном объеме, ($R = 287,3$ Дж/(кг·К) – газовая постоянная).

Шаг 1. Переведём исходные данные в систему СИ

Давление:

$$p_1 = 771 \cdot 133,322 = 102791 \text{ Па.}$$

Температура:

$$T_1 = 37 + 273,15 = 310,15 \text{ K.}$$

Шаг 2. Определим параметры в точке 1.

Удельный объём:

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 310,15}{102791,262} \approx 0,866 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Шаг 3. Определим параметры в точке 2 (адиабатное сжатие 1–2)

Удельный объём:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,866}{6,5} \approx 0,133 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Температура:

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 310,15 \cdot 6,5^{1,4-1} \approx 655,8 \text{ K.}$$

Давление:

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k = 0,103 \cdot 6,5^{1,4} \approx 1,41 \text{ МПа.}$$

Шаг 4. Определим параметры в точке 3 (изохорный подвод тепла 2–3)

Удельный объём:

$$v_3 = v_2 \approx 0,133 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Давление:

$$p_3 = \lambda \cdot p_2 = 3,5 \cdot 1,41 \approx 4,94 \text{ МПа.}$$

Температура:

$$T_3 = T_2 \cdot \lambda = 655,75 \cdot 3,5 \approx 2295,12 \text{ K.}$$

Шаг 5. Определим параметры в точке 4 (адиабатное расширение 3–4)

Удельный объём:

$$v_4 = v_3 \approx 0,867 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Температура:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = 2295,12 \cdot \left(\frac{0,133}{0,867} \right)^{1,4-1} \approx 1085,53 \text{ К.}$$

Давление:

$$p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^k = 4,94 \cdot \left(\frac{0,13}{0,86} \right)^{1,4} \approx 0,36 \text{ МПа.}$$

Шаг 6. Рассчитаем количество подведённого и отведённого тепла

Подведённое тепло (q_1):

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2) = 0,718 \cdot (2295,12 - 655,74) \approx 1177,07 \text{ кДж/кг.}$$

Отведённое тепло (q_2):

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1) = 0,718 \cdot (1086 - 310,15) \approx 556,72 \text{ кДж/кг.}$$

Шаг 7. Рассчитаем работу цикла и термический КПД

Полезная работа (l):

$$l = q_1 - q_2 = 1177,07 - 556,72 = 620,35 \text{ кДж/кг.}$$

Термический КПД (η_t):

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{6,5^{1,4-1}} \approx 0,527 (52,7 \%)$$

Проверим через теплоту:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{1177,07 - 556,72}{1177,07} \approx 0,527 (52,7 \%)$$

Таблица 3.2 – Параметры в характерных точках:

Точка	p , МПа	v , м ³ /кг	T , К
1	0,103	0,866	310,15
2	1,41	0,133	655,74
3	4,94	0,133	2259,12
4	0,36	0,866	1085,53

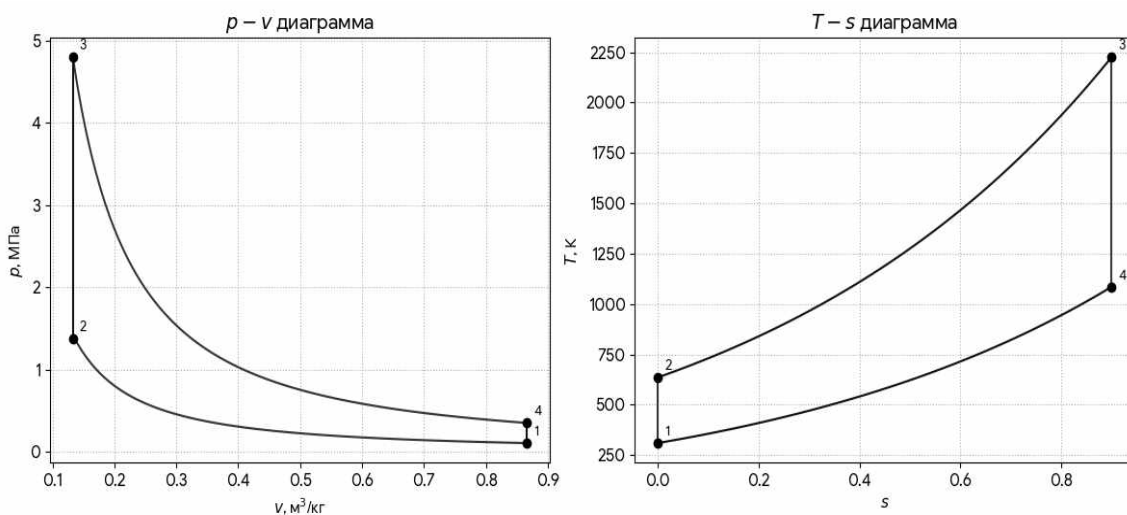


Рисунок 3.1 – Изображение цикла Отто на $p-v$ и $T-s$ диаграмме

Тепловые характеристики: подведённое тепло: $q_1 \approx 1177,07$ кДж/кг; отведённое тепло: $q_2 \approx 556,72$ кДж/кг; работа цикла: $l \approx 620,35$ кДж/кг; термический КПД: $\eta_t \approx 53$ %.

Анализ графиков:

1. $p-v$ диаграмма (Давление – Удельный объем).

На этом графике наглядно видны процессы изменения давления: 1–2 (Адиабата): Сжатие воздуха, объем уменьшается в ϵ раз (с 0,866 до 0,133 м³/кг), давление растет.

2–3 (Изохора): Мгновенный подвод тепла при закрытых клапанах ($v = \text{const}$). Давление подскакивает до максимума (4,9 МПа).

3–4 (Адиабата): Рабочий ход (расширение).

4–1 (Изохора): Отвод тепла (выхлоп), возвращение к исходному давлению.

2. $T-s$ диаграмма (Температура – Энтропия)

Этот график лучше всего иллюстрирует теплообмен и эффективность:

1–2 и 3–4: Вертикальные линии (изоэнтропы), так как при идеальном адиабатном процессе энтропия не меняется.

2–3: Рост температуры до 2295К. Площадь под этой кривой соответствует подведенному теплу q_1 .

4–1: Снижение температуры. Площадь под этой кривой – отведенное тепло q_2 . Площадь внутри контура – полезная работа цикла l .

3.3 Задача 6

Поршневой двигатель внутреннего сгорания работает с подводом тепла при постоянном давлении. Определить параметры рабочего тела, в качестве которого используется воздух, в характерных точках цикла, количество

подведенного и отведенного тепла, работу и термический КПД цикла при начальном давлении p_1 и температуре t_1 , если степень сжатия ε , степень предварительного расширения ρ . Изобразить цикл работы такого ДВС в $p-v$ и $T-s$ диаграммах. Данные для расчета приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Исходные данные к задаче 6

Предпоследняя цифра шифра	p_1 , бар	ρ	Последняя цифра шифра	t_1 , °С.	ε
0	0,975	1,69	0	10	16,5
1	0,977	1,63	1	14	17,0
2	0,984	1,59	2	17	17,5
3	0,991	1,55	3	20	18,0
4	0,998	1,51	4	23	18,5
5	1,005	1,47	5	26	19,0
6	1,012	1,43	6	29	19,5
7	1,019	1,39	7	32	20,0
8	1,026	1,35	8	35	20,5
9	1,033	1,31	9	38	21,0

Пример решения. Решим задачу для цикла Дизеля (подвод тепла при постоянном давлении) с заданными параметрами: $p_1 = 0,97$ бар; $\rho = 1,67$; $t_1 = 11$ °С.; $\varepsilon = 16,5$

Переведем исходные данные в систему СИ: начальное давление $p_1 = 0,97$ бар = 0,097 МПа; начальная температура $t_1 = 11$ °С, значит $T_1 = 284,15$ К; степень сжатия $\varepsilon = 16,5$; степень предварительного расширения $\rho = 1,67$.

Принятые константы для воздуха: показатель адиабаты $k = 1,4$; газовая постоянная $R = 287$ Дж/(кг·К); изобарная теплоёмкость $c_p = 1005$ Дж/(кг·К); изохорная теплоёмкость $c_v = 718$ Дж/(кг·К).

Шаг 1. Расчёт параметров в характерных точках цикла

Точка 1 (начало сжатия):

$$p_1 = 0,097 \text{ МПа},$$

$$T_1 = 284 \text{ К}.$$

удельный объём (используем уравнение состояния идеального газа):

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 284,15}{97000} \approx 0,84 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Точка 2 (конец сжатия, начало подвода тепла):

Удельный объём:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,84}{16,5} \approx 0,051 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Давление:

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k = 0,097 \cdot 16,5^{1,4} = 4,91 \text{ МПа.}$$

Температура:

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 284,15 \cdot 16,5^{1,4-1} = 872,05 \text{ К.}$$

Точка 3 (конец подвода тепла, начало расширения):

Давление (изобарный подвод тепла, соответствует процессу 2–3);

$$p_3 = p_2 = 4,91 \text{ МПа.}$$

Удельный объём (формула 3.30):

$$v_3 = v_2 \cdot \rho = 0,051 \cdot 1,67 \approx 0,085 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Температура:

$$T_3 = T_2 \cdot \rho = 872 \cdot 1,67 = 1456 \text{ К.}$$

Точка 4 (конец расширения, начало отвода тепла):

Удельный объём (изохорный процесс 4–1);

$$v_4 = v_1 = 0,841 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Температура:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{\rho}{\varepsilon} \right)^{k-1} = 1456 \cdot \left(\frac{1,67}{16,5} \right)^{1,4-1} = 582,57 \text{ К.}$$

Давление:

$$p_4 = p_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^k = 4,91 \cdot \left(\frac{0,085}{0,84} \right)^{1,4} = 0,2 \text{ МПа.}$$

Шаг 2. Расчёт количеств подведённой и отведённой теплоты

Подведённая теплота:

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) = 1005 \cdot (1456 - 872) = 587 \text{ кДж / кг.}$$

Отведённая теплота:

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1) = 718 \cdot (582 - 284,15) = 214 \text{ кДж / кг.}$$

Шаг 3. Расчёт работы цикла

Полезная работа цикла:

$$l_0 = q_1 - q_2 = 587 - 214 = 373 \text{ кДж/кг.}$$

Шаг 4. Расчёт термического КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{отв}}{q_{подв}} = 1 - \frac{214}{587} = 0,63 \text{ (63\%)}$$

Проверка через теплоту (формула 3.23 в альтернативной форме):

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = \frac{373}{587} = 0,63 \text{ (63\%)}$$

Таблица 3.4 – Сводная таблица результатов

Параметр	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4
p , МПа	0,097	4,9	4,77	0,24
v , м ³ /кг	0,84	0,051	0,0848	0,838
T , К	284,15	872	1490	602

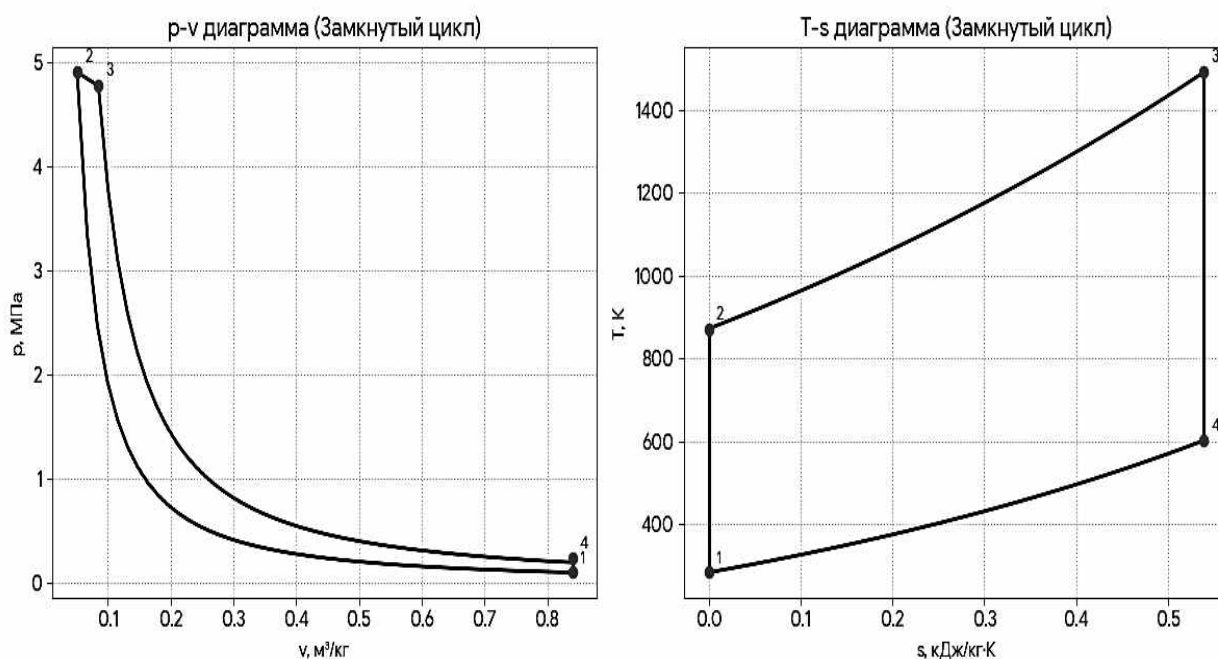


Рисунок 3.2 – Изображение цикла Дизеля на $p-v$ и $T-s$ диаграмме

Итоговые результаты: подведённая теплота: $q_1 = 587$ кДж/кг; отведённая теплота: $q_2 = 214$ кДж/кг; работа цикла: $l_0 = 373$ кДж/кг; термический КПД: $\eta_t = 63\%$.

Анализ диаграмм.

На представленных диаграммах изображен идеальный цикл Дизеля, который состоит из четырех последовательных процессов:

1. p - v диаграмма (Давление – Удельный объем). Эта диаграмма показывает, как меняется давление и объем газа внутри цилиндра.

Процесс 1–2: Адиабатное (изоэнтропное) сжатие. Поршень движется вверх, объем уменьшается с v_1 до v_2 , а давление резко растет. Теплообмена с окружающей средой нет.

Процесс 2–3: Изобарный подвод теплоты. В этот момент в цилиндр впрыскивается топливо, которое сгорает при постоянном давлении $p_2 = p_3$. Объем увеличивается до v_3 .

Процесс 3–4: Адиабатное расширение (рабочий ход). Газ толкает поршень вниз, совершая полезную работу. Давление и температура падают.

Процесс 4–1: Изохорный отвод теплоты. Условно соответствует моменту выпуска выхлопных газов, когда давление падает до начального при постоянном объеме v_1 .

2. T - s диаграмма (Температура – Энтропия). Эта диаграмма наглядно показывает процессы подвода и отвода энергии.

Процесс 1–2 (вертикаль вверх): поскольку сжатие адиабатное (без теплообмена), энтропия остается постоянной ($s = \text{const}$), а температура растет за счет сжатия.

Процесс 2–3 (кривая вправо-вверх): температура растет до максимума (T_3) при подводе тепла q_1 . Рост энтропии указывает на то, что в систему поступает энергия.

Процесс 3–4 (вертикаль вниз): расширение происходит без теплообмена, поэтому энтропия снова постоянна, а температура падает, так как внутренняя энергия превращается в механическую работу.

Процесс 4–1 (кривая влево-вниз): температура падает до начальной (T_1), теплота сбрасывается в атмосферу, энтропия уменьшается. Площадь внутри контура на обеих диаграммах численно равна полезной работе цикла (l). Чем «шире» петля, тем больше работы совершает двигатель за один цикл.

3.4 Задача 7

Поршневой двигатель внутреннего сгорания работает со смешанным подводом тепла. Определить параметры рабочего тела, в качестве которого используется воздух, в характерных точках цикла, количество подведенного и отведенного тепла, работу и термический КПД цикла при начальном давлении p_1 и температуре t_1 , если давление в конце процесса сжатия p_2 , степень повышения давления λ , степень предварительного расширения ρ , а также теоретическую мощность двигателя N_T (в л. с.) при расходе воздуха m . Изобразить цикл работы такого ДВС в p - v и T - s диаграммах.

Данные для расчета приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Исходные данные к задаче 7

Предпоследняя цифра шифра	t_1 , °C	λ	m , кг/с	Последняя цифра шифра	p_1 , гПа	p_2 , МПа	ρ
0	29	1,71	0,18	0	1031	4,105	1,46
1	26	1,66	0,21	1	1021	4,52	1,46
2	24	1,63	0,23	2	1015	4,92	1,43
3	22	1,60	0,25	3	1009	5,33	1,40
4	20	1,57	0,27	4	1003	5,74	1,37
5	18	1,54	0,29	5	997	6,15	1,34
6	16	1,51	0,31	6	991	6,57	1,31
7	14	1,48	0,33	7	985	6,99	1,28
8	12	1,45	0,35	8	979	7,42	1,25
9	10	1,42	0,37	9	973	7,84	1,22

Пример решения:

Решим задачу для цикла Тринклера пошагово, используя приведённые формулы и исходные данные: $t_1 = 28$ °C; $\lambda = 1,69$; $m = 0,19$ кг/с; $p_1 = 1027$ гПа; $p_2 = 4,13$ МПа; $\rho = 1,49$.

Переведем исходные данные в систему СИ: $t_1 = 28$ °C $\Rightarrow T_1 = 301$ К; $\lambda = 1,69$; $m = 0,19$ кг/с; $p_1 = 1027$ гПа = 102,7 кПа; $p_2 = 4,13$ Мпа = 4130 кПа; $\rho = 1,49$. Для воздуха: показатель адиабаты $k = 1,4$; изохорная теплоёмкость $c_v = 0,718$ кДж/(кг·К); изобарная теплоёмкость $c_p = 1,005$ кДж/(кг·К).

Шаг 1. Определение степени сжатия ε

Для точки 2:

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k; \rightarrow \varepsilon = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = \left(\frac{4130}{102,7} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 14$$

Шаг 2. Расчёт параметров в характерных точках цикла

Точка 2 (конец адиабатного сжатия):

Из уравнения состояния идеального газа для точки 1:

$$p_1 v_1 = RT_1$$

где $R = 0,287$ кДж/(кг·К) – газовая постоянная для воздуха.

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{0,287 \cdot 301,15}{102,7} \approx 0,842 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,842}{14,2} = 0,06 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Температура в точке 2:

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 301,15 \cdot 14^{1,4-1} = 865 \text{ K}.$$

Точка 3 (конец изохорного подвода теплоты):

Давление:

$$p_3 = \lambda \cdot p_2 = 1,69 \cdot 4130 = 6980 \text{ кПа}.$$

Объём:

$$v_3 = v_2 = 0,06 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Температура:

$$T_3 = \lambda \cdot T_2 = 1,69 \cdot 866 = 1462 \text{ K}.$$

Точка 4 (конец изобарного подвода теплоты):

Давление:

$$p_3 = p_4 = 6980 \text{ кПа}.$$

Объём:

$$v_4 = \rho \cdot v_3 = 1,49 \cdot 0,06 = 0,089 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Температура:

$$T_4 = \rho \cdot T_3 = 1,49 \cdot 1462 = 2179 \text{ K}.$$

Точка 5 (конец адиабатного расширения):

Объём:

$$v_5 = v_1 = 0,842 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Степень последующего расширения:

$$\delta = \frac{v_5}{v_4} = \frac{0,841}{0,0882} = 9,39$$

Температура:

$$T_5 = T_4 \cdot \delta^{1-k} = 2179 \cdot 9,39^{1-1,4} = 889 \text{ K}.$$

Давление из уравнения состояния:

$$p_5 = \frac{RT^5}{v_5} = \frac{0,287 \cdot 889}{0,842} = 303 \text{ кПа.}$$

Шаг 3. Расчёт количеств теплоты

Подводимая теплота:

$$\begin{aligned}q_1' &= c_v \cdot (T_3 - T_2) = 0,718 \cdot (1462 - 865) = 429 \text{ кДж/кг,} \\q_1'' &= c_p \cdot (T_4 - T_3) = 1,005 \cdot (2179 - 1462) = 720 \text{ кДж/кг,} \\q_1 &= q_1' + q_1'' = 429 + 720 = 1149 \text{ кДж/кг.}\end{aligned}$$

Отводимая теплота:

$$q_2 = c_v \cdot (T_5 - T_1) = 0,718 \cdot (889 - 301,15) = 422 \text{ кДж/кг.}$$

Шаг 4. Расчёт термического КПД

$$\begin{aligned}\eta_t &= 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}, \\ \eta_t &= 1 - \frac{1}{14,2^{0,4}} \cdot \frac{1,69 \cdot 1,49^{1,4} - 1}{1,69 - 1 + 1,4 \cdot 1,69 \cdot (1,49 - 1)} = 0,63 \text{ (63\%)}\end{aligned}$$

Шаг 5. Расчёт работы и мощности

Полезная работа цикла:

$$l = q_1 - q_2 = 1149 - 422 = 726 \text{ Дж/кг.}$$

Теоретическая мощность:

$$N_t = ml = 0,19 \cdot 716 = 138,02 \text{ кВт.}$$

Перевод в лошадиные силы:

$$N_{t(л.с.)} = \frac{138,02}{0,735} = 188 \text{ л.с.}$$

Шаг 6. Сводка результатов

Точка 1: $p_1 = 102,7$ кПа, $v_1 = 0,842$ м³/кг, $T_1 = 301,15$ К.

Точка 2: $p_2 = 4130$ кПа, $v_2 = 0,06$ м³/кг, $T_2 = 865$ К.

Точка 3: $p_3 = 6980$ кПа, $v_3 = 0,06$ м³/кг, $T_3 = 1462$ К.

Точка 4: $p_4 = 6980$ кПа, $v_4 = 0,0896$ м³/кг, $T_4 = 2179$ К.

Точка 5: $p_5 = 303$ кПа, $v_5 = 0,842$ м³/кг, $T_5 = 889$ К.

Таблица 3.6 – Параметры в характерных точках (сводная таблица)

Точка	p , кПа	v , м ³ /кг	T , К
1	102,7	0,842	301,15
2	4130	0,06	865
3	6980	0,06	1462
4	6980	0,0896	2179
5	303	0,842	889

2. Характеристики цикла:

Степень сжатия: $\varepsilon \approx 14$. Степень повышения давления: $\lambda = 1,69$. Степень предварительного расширения: $\rho = 1,49$.

3. Тепловые потоки:

Подводимая теплота: $q_1 = 1148$ кДж/кг. Отводимая теплота: $q_2 = 422$ кДж/кг.

4. Работа и КПД:

Полезная работа цикла: $l = 726$ кДж/кг. Термический КПД: $\eta_i \approx 63\%$.

5. Мощность установки:

Теоретическая мощность: $N_T = 138$ кВт. В лошадиных силах: $N_T \approx 187$ л. с.

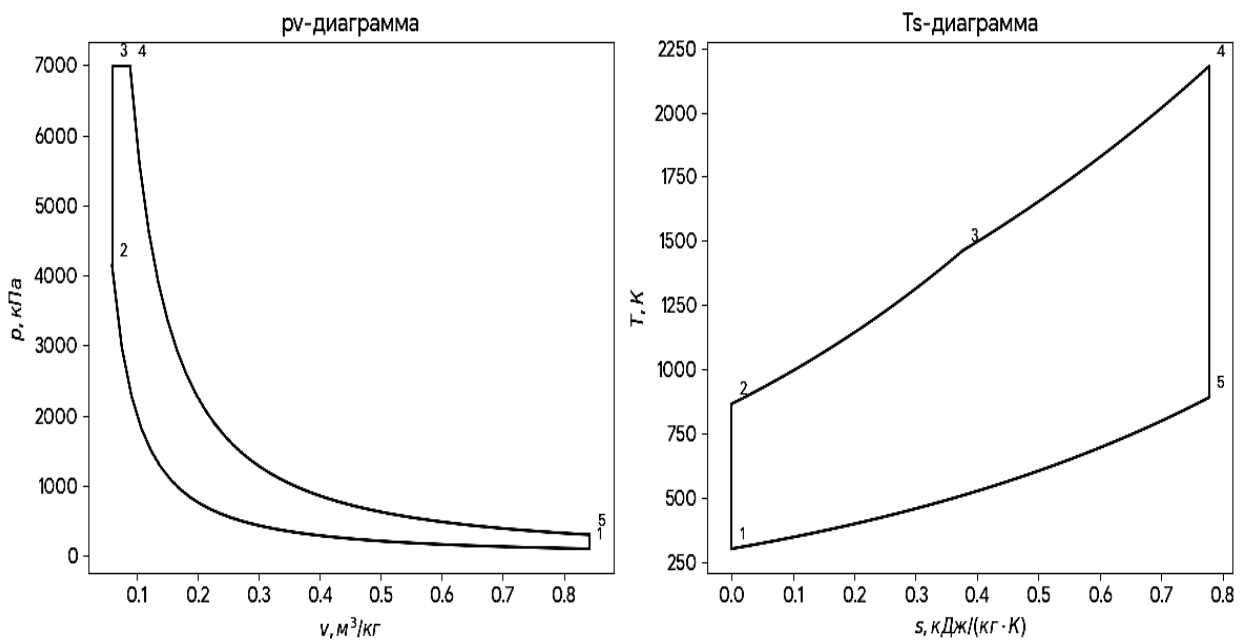


Рисунок 3.3 – Изображение цикла Тринклера на $p-v$ и $T-s$ диаграмме

Анализ диаграмм.

$p-v$ диаграмма (давление–объём):

1–2 (адиабата сжатия): кривая, идущая из точки 1 в точку 2 с резким ростом давления и уменьшением объёма.

2–3 (изохора подвода тепла): вертикальная линия вверх от точки 2 до точки 3 (давление растёт, объём не меняется).

3–4 (изобара подвода тепла): горизонтальная линия вправо от точки 3 до точки 4 (давление постоянно, объём растёт).

4–5 (адиабата расширения): кривая, идущая вниз и вправо от точки 4 до точки 5 (давление падает, объём растёт).

5–1 (изохора отвода тепла): вертикальная линия вниз от точки 5 до точки 1 (давление падает, объём не меняется).

Ts-диаграмма (температура–энтропия):

1–2 (адиабата): вертикальная линия вверх (энтропия не меняется, температура растёт).

2–3 (изохора): кривая с положительным наклоном вверх (температура и энтропия растут).

3–4 (изобара): кривая с меньшим наклоном вверх (температура и энтропия растут, но медленнее, чем на изохоре).

4–5 (адиабата): вертикальная линия вниз (энтропия не меняется, температура падает).

5–1 (изохора): кривая вниз и влево (температура и энтропия падают).

4 Цикл Ренкина

4.1 Краткие теоретические сведения

Цикл Ренкина – основной цикл работы паросиловых установок. Особенностью цикла Ренкина является то, что в качестве рабочего тела в нем используется водяной пар. Изображение цикла Ренкина в i - s диаграмме дано на рисунке 4.1.

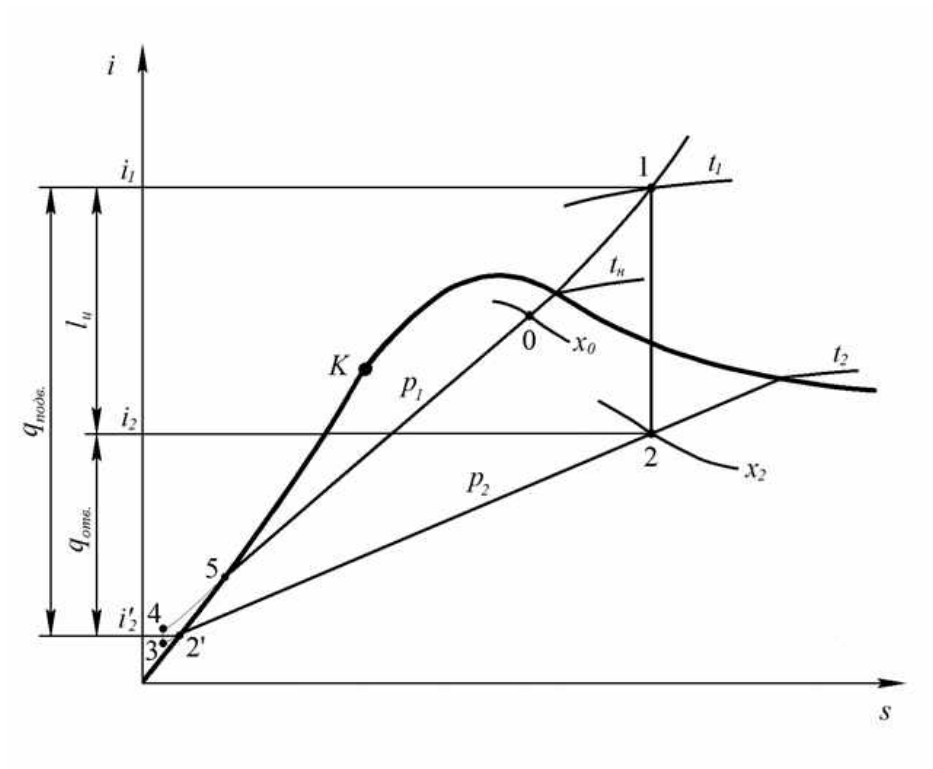


Рисунок 4.1 – Изображение цикла Ренкина в i - s диаграмме

За начальную точку цикла принимается точка, соответствующая состоянию перегретого пара, поступающего из пароперегревателя в турбину (точка 1). Процесс расширения пара в турбине 1–2 протекает адиабатно. Точка 2 соответствует состоянию расширившегося в турбине отработанного пара. В конденсаторе при отводе тепла пар конденсируется, 2–3 при постоянном давлении p_2 . В результате на выходе получается конденсат (точка 3). Полученный конденсат закачивается в парогенератор парового котла (адиабатный процесс 3–4). При подведении тепла в парогенераторе вода нагревается до температуры кипения (точка 5) и затем, превращается в насыщенный пар. На выходе из парогенератора в пароперегреватель (точка 0) пар имеет некоторую остаточную влажность: $x_0 < 1$. В пароперегревателе пар подсушивается до состояния, сухого насыщенного ($x = 1$), а затем

перегревается до исходного состояния точки 1. Цикл замыкается. Процесс подвода тепла 4–5–0–1 протекает при постоянном давлении p_1 .

Для упрощения реально протекающий процесс 2–3–4–5 заменяется условным процессом 2–2'–5. Тогда процесс подвода тепла будет протекать по пути 2'–5–0–1, а процесс отвода тепла – по пути 2–2'.

Термический КПД цикла Ренкина:

$$\eta_t = \frac{l_y}{q_{\text{подв.}}} \quad (4.1)$$

Полезная работа цикла может быть определена как разность подведенного и отведенного тепла:

$$l_y = q_{\text{подв.}} - q_{\text{отв.}} \quad (4.2)$$

Количество подводимого тепла:

$$q_{\text{подв.}} = i_1 - i'_2 \quad (4.3)$$

Количество отводимого тепла:

$$q_{\text{отв.}} = i_2 - i'_2 \quad (4.4)$$

Работа цикла:

$$l_y = i_1 - i'_2 - i_2 + i'_2 = i_1 - i_2 \quad (4.5)$$

Термический КПД цикла Ренкина:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2} \quad (4.6)$$

Теоретический удельный расход пара d_0 (на получение единицы полезной работы) определяется по формуле:

$$d_0 = \frac{1}{l_y} = \frac{1}{i_1 - i_2}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{кДж}} \quad (4.7)$$

Расчет цикла Ренкина сводится к определению энтальпии в точках 1, 2 и 2'. Параметры точек 1 и 2 определяются графически при помощи i s-диаграммы. В случае, если указана температура перегрева Δt , температура перегретого пара определяется как:

$$t_1 = t_n + \Delta t, \quad (4.8)$$

где t_n – температура насыщенного пара при данном давлении.

Энтальпия точки 2' находится по таблицам насыщенного водяного пара (прил. В, Г) как энтальпия кипящей воды i' при давлении p_2 . Величина степени сухости x_2 определяется графически по i - s диаграмме водяного пара.

4.2 Задача 8

Водяной пар с начальным давлением p_1 и степенью сухости x_0 поступает в пароперегреватель парового котла, где его температура повышается на Δt . Из пароперегревателя пар поступает в паровую турбину, где адиабатно расширяется до давления p_2 . Определить при помощи i - s диаграммы конечную степень сухости пара x_2 в конце процесса расширения, количество тепла $q_{\text{пар}}$, подведенное в пароперегревателе, работу и термический КПД цикла Ренкина, а также теоретический удельный расход пара. Изобразить процессы в i - s диаграмме. Ответить на вопрос: как влияет начальное давление и температура перегретого пара на термический КПД цикла Ренкина и на величину конечной степени сухости отработанного пара.

Данные для расчета приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные к задаче 8

Предпоследняя цифра шифра	p_1 , МПа	p_2 , кПа	Последняя цифра шифра	x_0	Δt , °С
0	6	3,0	0	0,93	205
1	7	3,5	1	0,94	215
2	8	4,0	2	0,95	225
3	6	4,5	3	0,96	235
4	7	5,0	4	0,97	245
5	8	3,0	5	0,93	255
6	6	3,5	6	0,94	265
7	7	4,0	7	0,95	275
8	8	4,5	8	0,96	285
9	6	5,0	9	0,97	295

Пример решения:

Исходные данные: $p_1 = 6 \text{ МПа}$; $p_2 = 3 \text{ кПа}$; $x_0 = 0,93$; $\Delta t = 205 \text{ °С}$.

Для решения задачи воспользуемся формулами и данными i - s диаграммы для водяного пара.

1. Определение параметров в характерных точках:

Точка 0 (вход в пароперегреватель): при $p_1 = 6 \text{ МПа}$ и $x_0 = 0,93$ по диаграмме находим: энтальпия: $h_0 = 2640 \text{ кДж/кг}$. Температура насыщения при 6 МПа: $t_n = 275,6^\circ \text{C}$.

Точка 1 (вход в турбину после перегрева):

$$t_1 = t_n + \Delta t = 275,6 + 205 = 480,6^\circ \text{C}.$$

Находим на пересечении $p_1 = 6 \text{ МПа}$ и $t_1 = 480^\circ \text{C}$; энтальпия: $h_1 = 3375 \text{ кДж/кг}$, энтропия: $s_1 = 6,83 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Точка 2 (выход из турбины): процесс расширения адиабатный ($s = \text{const}$), ведем вертикаль от точки 1 до давления $p_2 = 3 \text{ кПа}$ (0,003 МПа); энтальпия: $h_2 = 2060 \text{ кДж/кг}$, конечная степень сухости: $x_2 = 0,79$.

Точка 2' (конденсат): при $p_2 = 3 \text{ кПа}$ по таблицам: энтальпия кипящей воды: $h'_2 = 101 \text{ кДж/кг}$.

2. Расчет основных показателей:

Количество тепла, подведенное в пароперегревателе:

$$q_{\text{пер}} = i_1 - i_0 = 3375 - 2640 = 735 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Полезная работа цикла:

$$l = i_1 - i_2 = 3375 - 2060 = 1315 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Количество подведенного тепла:

$$q_{\text{подв}} = i_1 - i_{2'} = 3375 - 101 = 3274 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Термический КПД цикла Ренкина:

$$\eta_1 = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2'}} = \frac{1315}{3274} = 0,401$$

(или 40,1 %).

Теоретический удельный расход пара:

$$d_0 = \frac{1}{l} = \frac{1}{1315} = 0,00076 \frac{\text{кг}}{\text{кДж}}$$

(или 2,71 кг/(кВт·ч)).

3. Изображение процессов в i - s диаграмме. Точка 0: Пересечение изобары $p_1 = 6$ МПа и линии сухости $x = 0,93$. Процесс 0–1: Движение вправо-вверх вдоль изобары p_1 до изотермы $t_1 = 480$ °С (подвод тепла в перегревателе). Процесс 1–2: Вертикальная линия вниз ($s = const$) до изобары $p_2 = 3$ кПа (работа в турбине). Точка 2: Пересечение вертикали с изобарой p_2 , здесь считывается значение x_2 .

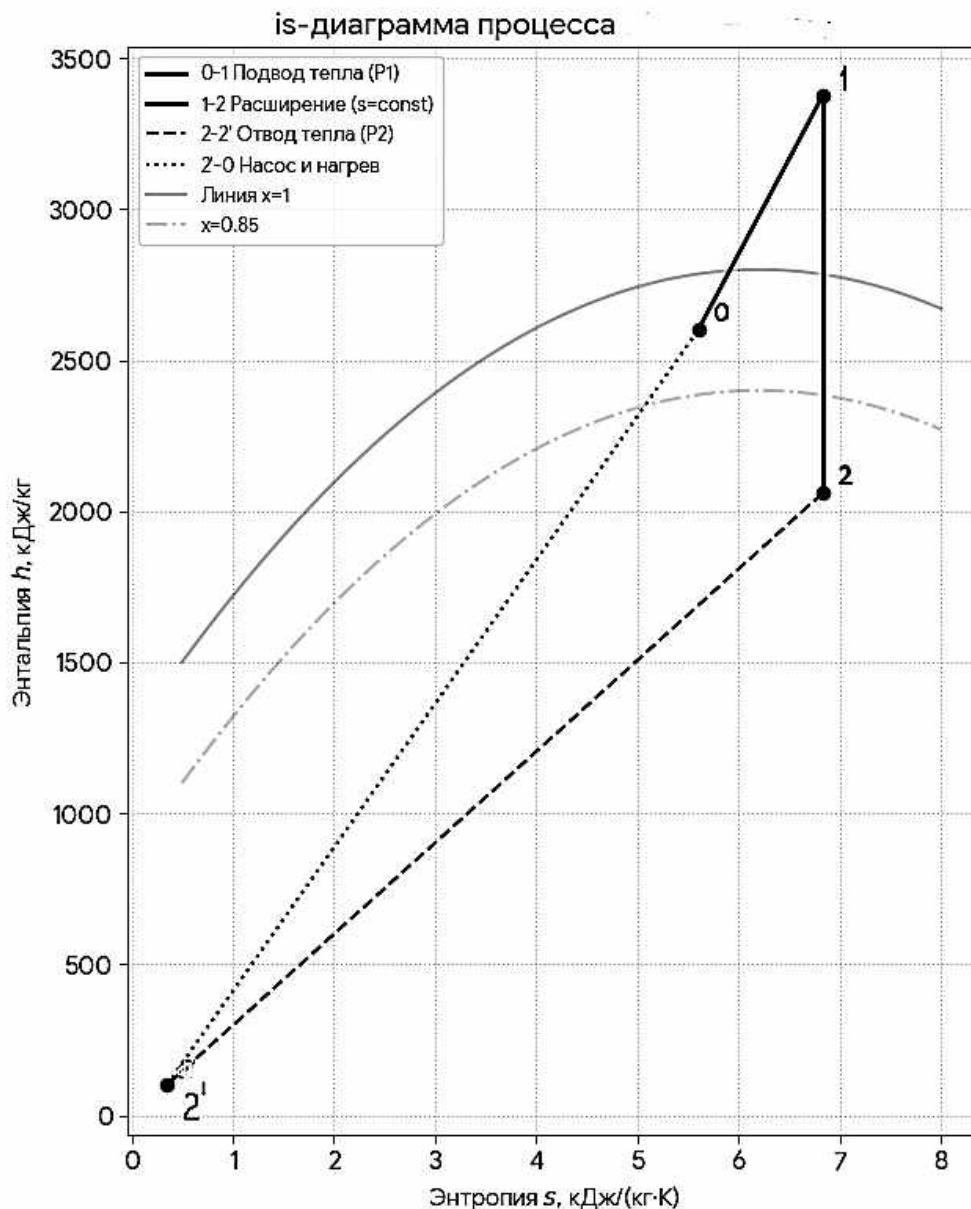


Рисунок 4.2 – Изображение полученного цикла Ренкина в i - s диаграмме

Изображение процессов в i - s диаграмме: 0–1 – изобарный процесс перегрева пара в пароперегревателе. 1–2 – адиабатное расширение пара в турбине. 2–2' – отвод тепла в конденсаторе (изобарно-изотермический процесс). 2'–0 – подвод тепла в парогенераторе (нагрев воды до температуры кипения, испарение).

Рекомендации для построения.

Шаг 1: Подготовка диаграммы. Используйте распечатанную копию i - s диаграммы. Шаг 2: Нанесение точек. Отметьте следующие точки на диаграмме по указанным координатам.

Точка 0: Найдите пересечение изобары $p_1 = 6$ МПа и линии сухости $x = 0,93$. Эта точка находится внутри области влажного пара.

Точка 1: Найдите пересечение $p_1 = 6$ МПа и $t_1 = 480,6$ °С. Эта точка находится в области перегретого пара, выше верхней кривой насыщения.

Точка 2: Найдите ведем вертикаль от точки 1 до давления $p_2 = 3$ кПа. Эта точка находится между пограничными кривыми.

Точка 2': Найдите пересечение $s = 0,35$ кДж / (кгК) и $i = 101$ кДж / кг. Эта точка будет лежать на левой пограничной кривой (линия насыщения жидкости), ближе к нижней части диаграммы.

Шаг 3: Соединение точек линиями. Соедините отмеченные точки, соблюдая тип процесса и используя стрелки для указания направления: 0 → 1 (Изобарный перегрев): Проведите плавную кривую при постоянном давлении $p = 6$ МПа, которая идет вверх и вправо от точки 0 до точки 1. 1 → 2 (Адиабатное расширение): Проведите вертикальную линию (изоэнтропа) от точки 1 вниз до точки 2. 2 → 2' (Конденсация): Проведите линию от точки 2 к точке 2' на левой пограничной кривой. В данной области – это будет линия примерно постоянного давления (изобара $p = 3$ кПа). 2' → 0 (Нагрев и испарение): Проведите линию от точки 2' обратно к точке 0, следуя изобаре $p = 6$ кПа.

Влияние начального давления p_1 . При повышении p_1 : термический КПД η_t сначала увеличивается, достигает максимума при $p_1 \approx 16$ – 18 МПа, затем снижается; степень сухости x_2 уменьшается, что нежелательно (при $x_2 < 0,85$ возрастает эрозия лопаток турбины каплями влаги). При понижении p_1 : η_t снижается; x_2 увеличивается.

Влияние температуры перегрева t_1 . При повышении t_1 : η_t увеличивается (рост средней температуры подвода тепла); x_2 увеличивается (перегретый пар дольше остаётся сухим при расширении). При понижении t_1 : η_t снижается; x_2 снижается.

Вывод: для повышения КПД и обеспечения безопасной степени сухости пара стремятся к максимально возможным значениям t_1 (до пределов жаропрочности материалов) и оптимальному p_1 (16–18 МПа).

4.3 Задача 9

Из парового котла поступает перегретый пар с начальным давлением p_1 и температурой t_1 . В турбине пар адиабатно расширяется до давления p_2 . Определить при помощи i - s диаграммы теоретический удельный расход пара,

работу и термический КПД цикла Ренкина, если конечная степень сухости отработанного пара на выходе из турбины x_2 . Изобразить процессы в i - s диаграмме и принципиальную схему паросиловой установки. Данные для расчета приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Исходные данные к задаче 9

Предпоследняя цифра шифра	t_1 , °C	Последняя цифра шифра	p_1 , бар	x_2
0	400	0	38	0,9
1	430	1	45	0,88
2	450	2	50	0,87
3	470	3	60	0,86
4	490	4	70	0,85
5	510	5	80	0,84
6	530	6	90	0,83
7	550	7	100	0,82
8	570	8	110	0,81
9	590	9	120	0,80

Пример решения:

Исходные данные Дано: $t_1 = 410$ °C; $p_1 = 40$ бар; $x_2 = 0,89$.

1. Определение параметров в характерных точках

Точка 1 (Вход в турбину): Параметры $p_1 = 40$ бар (4 МПа), $t_1 = 410$ °C.

По i – s диаграмме на пересечении изобары $p_1 = 40$ бар и изотермы $t_1 = 410$ °C находим энтальпию: $i_1 = 3240$ кДж/кг. Также фиксируем значение энтропии $s_1 = 6,69$ кДж/(кг · K).

Точка 2 (Выход из турбины): Процесс расширения в турбине адиабатный (изоэнтропный), следовательно: $s_2 = s_1 = 6,69$ кДж/(кг · K). Степень сухости $x_2 = 0,89$. На пересечении вертикали $s = const$ и линии сухости $x_2 = 0,89$ находим энтальпию: $i_2 = 2310$ кДж/(кг · K). В этой же точке находим давление в конденсаторе: $p_2 = 0,08$ бар.

Точка 2' (Конденсат): это состояние кипящей воды при давлении $p_2 = 0,08$ бар. По таблицам насыщенного пара (или по нижней пограничной кривой на i - s диаграмме при $p_2 = 0,08$ бар) энтальпия: $i_2 = i' = 174$ кДж/кг.

2. Расчет основных показателей

Полезная работа цикла ($l_{цикл}$):

$$l_{цикл} = i_1 - i_2 = 3240 - 2310 = 930 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Подведенное тепло ($q_{подв}$):

$$q_{подв} = i_1 - i_{2'} = 3240 - 174 = 3066 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Термический КПД (η_t):

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} = \frac{930}{3066} \approx 0,303 \quad (\text{или } 30,3 \%).$$

Теоретический удельный расход пара (d_0):

$$d_0 = \frac{3600}{i_1 - i_2} = \frac{3600}{930} \approx 3,87 \frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}, \quad \left(\frac{\text{кг}}{\text{кДж}} \right).$$

3. Ответ. Работа цикла: 930 кДж/кг. Термический КПД: 30,3 %. Удельный расход пара: 3,87 кг/кВт·ч.

Изображение в i - s диаграмме:

Процесс 1–2: Адиабатное расширение в турбине (вертикальная линия вниз, $s = \text{const}$).

Процесс 2–2': Изобарно-изотермическая конденсация (линия идет влево к нижней пограничной кривой $x = 0$).

Процесс 2'–1: Подвод тепла в котле при постоянном давлении p_1 (включает подогрев воды, парообразование и перегрев).

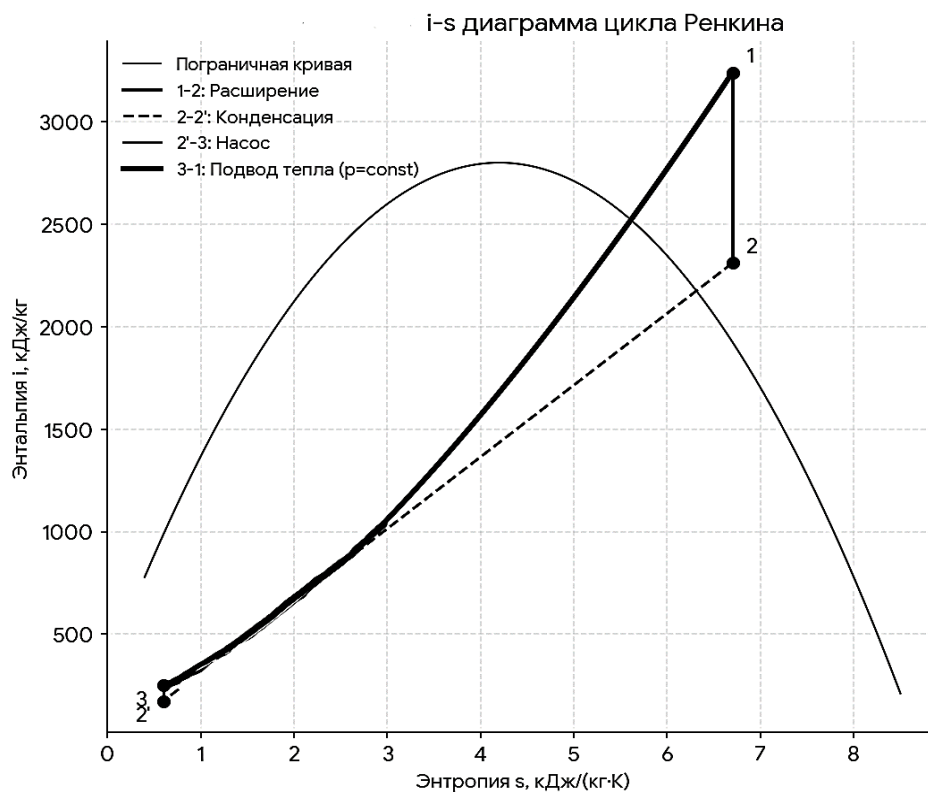


Рисунок 4.3 – Изображение полученного цикла Ренкина в i - s диаграмме

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кириллин, В. А. Техническая термодинамика : учебник для вузов / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2017. – 502 с.
2. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учебное пособие для вузов / В. В. Нащокин ; под ред. В. С. Силецкого. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1975. – 495 с.
3. Дрыжаков, Е. В. Техническая термодинамика : учебник для вузов / Е. В. Дрыжаков, С. И. Исаев, И. А. Кожин [и др.] ; под ред. В. И. Крутова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1981. – 439 с.
4. Хрусталеv, Б. М. Техническая термодинамика : учебник для студентов строительных и энергетических специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего образования: в 2 ч. Ч. 1 / Б. М. Хрусталеv, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск : УП Технопринт, 2004. – 486 с.
5. Цирельман, Н. М. Техническая термодинамика : учебное пособие / Н. М. Цирельман. – Изд. 2-е, доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 352 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Приставки для образования дольных и кратных единиц

Наименование приставки	Обозначение	Отношение к основной единице
пико	п	10^{-12}
нано	н	10^{-9}
микро	мк	10^{-6}
милли	м	10^{-3}
санти	с	10^{-2}
деци	д	10^{-1}
дека	да	10^1
гекто	г	10^2
кило	к	10^3
мега	М	10^6
гига	Г	10^9
тера	Т	10^{12}

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Физические свойства идеальных газов при нормальных условиях

Газ	Формула	μ , кг/кмоль	c_p , Дж/кг·град	R , Дж/кг·град	k
азот	N_2	28,026	1027	296,8	1,4
аммиак	NH_3	17,032	2056	488,3	1,33
аргон	Ar	39,994	521	208,2	1,67
воздух	–	28,96	1005	287,0	1,4
водород	H_2	2,016	14244	4124,0	1,4
водяной пар	H_2O	18,016	1833	461,0	1,33
гелий	He	4,003	5237	2078,0	1,67
кислород	O_2	32,00	920	259,8	1,4
метан	CH_4	16,032	2165	518,8	1,33
сернистый газ	SO_2	64,06	630	129,8	1,33
угарный газ	CO	28,01	1030	296,8	1,4
углекислый газ	CO_2	44,01	873	188,9	1,33
хлор	Cl_2	70,914	471	117,2	1,4
этилен	C_2H_4	28,052	1528	296,6	1,33

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Параметры насыщенного водяного пара (по давлению)

p, бар	t _н , °C	v', м ³ /кг	v'', м ³ /кг	i', кДж/к	i'', кДж/кг	r, кДж/кг	s', кДж/кг·град	s'', кДж/кг·град
0.01	6.94	0.0010001	130.04	29.18	2513.4	2484.2	0.1053	8.9749
0.02	17.49	0.0010014	67.24	73.40	2533.1	2459.7	0.2603	8.7227
0.03	24.08	0.0010028	45.77	100.93	2545.3	2444.4	0.3547	8.5784
0.04	29.95	0.0010042	34.93	121.33	2553.7	2432.3	0.4225	8.4737
0.05	32.89	0.0010054	28.24	137.79	2560.9	2423.1	0.4764	8.3943
0.06	36.17	0.0010065	23.77	151.49	2567.1	2415.6	0.5209	8.3297
0.08	41.53	0.0010085	18.13	173.89	2576.4	2402.5	0.5919	8.2273
0.10	45.82	0.0010102	14.70	191.84	2583.9	2392.1	0.6496	8.1494
0.14	52.57	0.0010132	10.69	220.05	2596.1	2376.0	0.7368	8.0305
0.18	57.82	0.0010159	8.448	242.03	2605.4	2363.3	0.8040	7.9445
0.2	60.08	0.0010171	7.652	251.48	2609.2	2357.7	0.8324	7.9075
0.3	69.12	0.0010223	5.232	289.30	2624.6	2335.3	0.9441	7.7673
0.4	75.87	0.0010264	3.999	317.62	2636.3	2318.7	1.0261	7.6710
0.5	81.33	0.0010299	3.243	340.53	2645.2	2304.7	1.0912	7.5923
0.6	85.94	0.0010330	2.734	359.90	2653.1	2293.2	1.1453	7.5313
0.8	93.50	0.0010385	2.089	391.75	2665.3	2273.5	1.2331	7.4342
1.0	99.62	0.0010432	1.696	417.47	2674.9	2257.5	1.3026	7.3579
1.2	104.80	0.0010472	1.430	439.34	2683.0	2243.6	1.3610	7.2972
1.6	113.31	0.0010543	1.092	475.41	2696.3	2220.8	1.4550	7.2017
2.0	120.23	0.0010606	0.8860	504.74	2706.8	2202.0	1.5306	7.1279
3.0	133.54	0.0010733	0.6055	561.7	2725.5	2163.8	1.6716	6.9922
4.0	143.62	0.0010836	0.4623	604.3	2738.7	2134.1	1.7766	6.8969
5.0	151.84	0.0010927	0.3749	640.1	2748.9	2108.7	1.8605	6.8221
6.0	158.84	0.0011009	0.3156	670.6	2756.9	2086.3	1.9311	6.7609
8.0	170.41	0.0011149	0.2403	720.9	2769.0	2048.1	2.0461	6.6630
10	179.88	0.0011273	0.1945	762.4	2777.8	2015.3	2.1383	6.5867
12	187.95	0.0011385	0.1633	798.4	2784.6	1986.2	2.2156	6.5224
14	195.04	0.0011488	0.1408	830.0	2789.7	1959.7	2.2841	6.4699
16	201.36	0.0011587	0.1238	858.3	2793.5	1935.2	2.3437	6.4221
18	207.10	0.0011678	0.1104	884.2	2796.5	1912.3	2.3975	6.3794
20	212.36	0.0011768	0.09961	908.6	2799.2	1890.7	2.4471	6.3411
24	221.77	0.0011932	0.08324	951.8	2801.8	1850.0	2.5346	6.2727
28	230.04	0.0012088	0.07742	990.2	2803.1	1812.8	2.6101	6.2129
30	233.83	0.0012164	0.06663	1009.4	2803.1	1794.7	2.6455	6.1859
35	242.54	0.0012344	0.05706	1049.8	2802.8	1753.0	2.7251	6.1249
40	250.33	0.0012520	0.04977	1087.5	2800.6	1713.2	2.7965	6.0689
50	263.91	0.0012858	0.03943	1154.2	2793.9	1639.6	2.9210	5.9739
60	275.56	0.0013185	0.03243	1213.9	2784.3	1570.5	3.0276	5.8894
70	285.80	0.0013510	0.02738	1267.6	2772.3	1504.7	3.1221	5.8143
80	294.98	0.0013838	0.02352	1317.3	2758.6	1441.2	3.2079	5.7448
90	303.31	0.0014174	0.02049	1363.9	2742.6	1378.8	3.2866	5.6783
100	310.96	0.0014522	0.01803	1407.9	2724.8	1316.9	3.3601	5.6147
110	318.04	0.0014886	0.01597	1450.2	2705.2	1255.0	3.4297	5.5528
120	324.64	0.001527	0.01426	1491.1	2684.6	1193.5	3.4966	5.4930
130	330.81	0.001568	0.01278	1531.3	2662.3	1131.1	3.5606	5.4333
140	330.63	0.001611	0.01149	1570.8	2637.9	1067.0	3.6233	5.3731
160	347.32	0.001710	0.00932	1649.6	2581.7	932.1	3.7456	5.2478
180	356.96	0.001839	0.00751	1732.2	2510.6	778.4	3.8708	5.1054
200	365.71	0.00203	0.00586	1826.8	2410.3	583.4	4.0147	4.9280

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Параметры насыщенного водяного пара (по температуре)

t, °C	pн, бар	v', м ³ /кг	v'', м ³ /кг	i', кДж/кг	i'', кДж/кг	г, кДж/кг	s', кДж/кг·град	s'', кДж/кг·град
0	0,00610	0,0010002	206,3	0,00	2500,8	2500,8	0,00	9,1644
5	0,00871	0,0010001	147,2	21,06	2510,0	2489,0	0,0762	9,0242
10	0,01227	0,0010004	106,42	42,04	2519,2	2477,3	0,1511	8,8995
15	0,01704	0,0010010	77,97	62,97	2528,4	2465,4	0,2244	8,7806
20	0,02337	0,0010018	57,84	83,90	2537,2	2453,4	0,2964	8,6663
25	0,03167	0,0010030	43,40	104,8	2546,4	2441,7	0,3672	8,5570
30	0,04241	0,0010044	32,93	125,7	2555,6	2430,0	0,4367	8,4523
35	0,05622	0,0010060	25,25	146,6	2564,8	2418,3	0,5049	8,3518
40	0,07375	0,0010079	19,55	167,5	2573,6	2406,1	0,5723	8,2560
45	0,09582	0,0010099	15,28	188,4	2582,4	2394,0	0,6385	8,1638
50	0,12335	0,0010121	12,05	209,3	2591,6	2382,3	0,7038	8,0751
55	0,15741	0,0010145	9,578	230,2	2600,4	2370,1	0,7679	7,9901
60	0,1992	0,0010171	7,678	251,1	2609,2	2358,0	0,8311	7,9084
65	0,2501	0,0010199	6,201	272,1	2617,6	2345,4	0,8935	7,8297
70	0,3116	0,0010228	5,045	293,0	2626,4	2333,3	0,9550	7,7544
80	0,4736	0,0010290	3,409	334,9	2643,1	2308,2	1,0752	7,6116
90	0,7011	0,0010359	2,361	377,0	2659,5	2282,5	1,1924	7,4785
10	1,0132	0,0010435	1,673	419,1	2675,8	2256,7	1,3071	7,3545
11	1,4327	0,0010515	1,210	461,3	2691,3	2230,0	1,4185	7,2386
12	1,9854	0,0010603	0,8917	503,7	2706,3	2202,7	1,5278	7,1289
13	2,7011	0,0010697	0,6683	546,4	2720,6	2174,2	1,6345	7,0271
14	3,614	0,0010798	0,5087	589,1	2734,0	2144,9	1,7392	6,9304
15	4,760	0,0010906	0,3926	632,2	2746,5	2114,3	1,8418	6,8383
16	6,180	0,0011021	0,3068	675,3	2757,8	2082,5	1,9427	6,7508
17	7,920	0,0011144	0,2426	719,3	2768,7	2049,4	2,0419	6,6666
18	10,027	0,0011275	0,1939	763,3	2778,4	2015,1	2,1395	6,5858
19	12,553	0,0011415	0,1564	807,6	2786,3	1978,7	2,2358	6,5075
20	15,550	0,0011565	0,1272	852,4	2793,0	1940,6	2,3308	6,4318
21	19,080	0,0011726	0,1044	897,6	2797,0	1900,4	2,4246	6,3577
22	23,202	0,0011900	0,08606	943,7	2801,4	1857,7	2,5179	6,2848
23	27,979	0,0012087	0,07147	990,2	2803,1	1812,7	2,6101	6,2132
24	33,480	0,0012291	0,05967	1037,5	2803,1	1765,6	2,7022	6,1425
25	39,78	0,0012512	0,05005	1086,1	2801,0	1714,9	2,7934	6,0721
26	46,94	0,0012755	0,04215	1135,0	2796,4	1661,3	2,8851	6,0014
27	55,05	0,0013023	0,03560	1185,3	2789,7	1604,4	2,9764	5,9298
28	64,19	0,0013321	0,03013	1236,8	2779,6	1542,8	3,0685	5,8573
29	74,45	0,0013655	0,02553	1290,0	2766,2	1476,3	3,1610	5,7824
30	85,92	0,0014036	0,02164	1344,8	2749,1	1404,3	3,2548	5,7049
31	98,69	0,001447	0,01831	1402,2	2727,3	1325,1	3,3507	5,6233
32	112,80	0,001499	0,01545	1462,0	2699,6	1237,6	3,4495	5,5354
33	128,64	0,001562	0,01297	1526,1	2665,7	1139,6	3,5521	5,4412
34	146,08	0,001639	0,01078	1594,8	2621,8	1027,0	3,6605	5,3361
35	165,37	0,001741	0,00881	1671,4	2564,4	893,0	3,7786	5,2117
36	186,74	0,001894	0,00694	1761,4	2481,1	719,7	3,9163	5,0530
37	210,53	0,00222	0,00493	1892,4	2330,8	438,4	4,1135	4,7951

Учебное издание

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания по выполнению курсовых работ

Составители:

Столяренко Владимир Ильич
Жерносек Сергей Ваильевич
Матвеев Андрей Константинович

Редактор *Р.А. Никифорова*
Корректор *А.С. Прокопюк*
Компьютерная верстка *В.И. Столяренко*

Подписано к печати 09.06.2026. Формат 60x90¹/₁₆. Усл. печ. листов 3,6.
Уч.-изд. листов 4,3. Тираж 30 экз. Заказ № 149.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.