МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ-ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

И.В. Юдаев, А.Н. Токарева, М.С. Демченко

РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

Учебное пособие

Зерноград – 2025

© Юдаев И.В., Токарева А.Н.,
Демченко М.С., 2025
© Азово-Черноморский инженерный
институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025

Об издании – 1, 2
Содержание

УДК 621.311.22.

Издается по решению методического совета энергетического факультета Азово-Черноморского инженерного института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде

Рецензент:
кандидат технических наук, доцент ***Гуриненко Л.А.***
кандидат технических наук, доцент ***Сергеев Н.В.***

Юдаев, И.В. Расчет термодинамических циклов тепловых машин. [Электронный ресурс]: Учебное пособие/ И.В. Юдаев, А.Н. Токарева, М.С. Демченко. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025. – 100 с. – Режим доступа: локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

В пособии приведены схемы и методика расчета произвольных термодинамических циклов, циклов двигателей внутреннего сгорания, циклов газотурбинных и паротурбинных установок, указаны их достоинства, недостатки и области применения.

Учебное пособие предназначено для выполнения курсовой работы по дисциплине «Техническая термодинамика» для студентов, обучающихся по направлениям 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 35.03.06 «Агроинженерия» и 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры электроэнергетики и теплотехники
Протокол № 5 от 26.12.2024г.

Рассмотрено и одобрено методической комиссией энергетической факультета
Протокол № 3 от 25.02.2025г.

© Юдаев И.В., Токарева А.Н., Демченко М.С., 2025
© Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения…… 4
Цель выполнения курсовой работы……. 5
1. Расчет и построение цикла газотурбинной установки и термодинамических циклов тепловых машин…..…… 5
1.1. Краткие теоретические сведения…… 5
1.2. Методика расчета цикла газотурбинной установки……. 24
1.3 Методика расчета цикла двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты……. 31
1.4. Методика расчета произвольного термодинамического цикла… 39
1.5. Пример решения задачи №1(цикл газотурбинной установки)……. 40
1.6. Пример решения задачи №1 (произвольный термодинамический цикл)…….. 48
1.7 Пример решения задачи – цикл ДВС со смешанным подводом теплоты…… 56
1.8 Пример расчета цикла Отто……..….. 62
1.9 Пример расчета цикла Карно……...……. 64
1.10. Примеры расчета задач по теме «Политропные процессы»…… 67
1.11. Контрольные вопросы для усвоения изложенного материала…… 70
2. Расчет цикла паротурбинной установки…….. 71
2.1. Краткие теоретические сведения…… 71
2.2. Методика расчета цикла паротурбинной установки…… 81
2.3. Пример решения задачи №2…… 82
2.4. Контрольные вопросы для усвоения изложенного материала….. 88
Рекомендуемая литература…….. 89
Приложения…… 90

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Наименование величины	Условное обозначение	Единица измерения
Газовая постоянная	R	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$
Давление	P	$Па$
Коэффициент Пуассона	k	-
Масса рабочего тела	m	$кг$
Объем	V	$м^3$
Объем удельный	v	$\frac{м^3}{кг}$
Показатель политропы	n	-
Работа	L	$Дж$
Работа удельная	l	$\frac{Дж}{кг}$
Степень сухости	x	-
Теплоемкость массовая изобарная	C_p	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$
Теплоемкость массовая изохорная	C_v	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$
Температура	t	^{0}C
Температура абсолютная	T	$К$
Теплота	Q	$Дж$
Теплота удельная	q	$\frac{Дж}{кг}$
Термический кпд	η_t	-
Энтальпия удельная	h	$\frac{Дж}{кг}$
Энтальпия	H	$Дж$
Энтропия удельная	s	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$
Энтропия	S	$\frac{Дж}{К}$
Удельный расход пара	d_0	$\frac{кг}{кДж}$

ЦЕЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Целью выполнения расчетной работы является:

1.Изучить циклы газотурбинных двигателей, произвольные термодинамические циклы и цикл работы паротурбинной установки.

2. Произвести расчет произвольного термодинамического цикла и построить рассчитанный цикл в PV и TS – координатах.

3.Произвести расчет цикла паротурбинной установки. Определить способ повышения кпд цикла и указать его достоинства и недостатки.

1. РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ЦИКЛА ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

1.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1.1. Основные законы идеальных газов.

Идеальными газами называют такие газы, в которых отсутствуют силы взаимного притяжения и отталкивания между молекулами, а объем самих молекул пренебрежимо мал по сравнению с объемом газа.

Все реальные газы при высоких температурах и малых давлениях почти полностью подходят под понятие «идеальный газ» и практически по свойствам не отличаются от него. Состояние идеального газа — это предельное состояние реального газа, когда давление стремится к нулю. Таким образом, рабочие тела газотурбинных установок можно считать идеальным газом.

Введение понятия об идеальном газе позволило составить простые математические зависимости между величинами, характеризующими состояние тела, и на основе законов для идеальных газов создать теорию термодинамических процессов. Существует 3 закона для идеальных газов/1/

Закон Бойля-Мариотта гласит: *при постоянной температуре произведение удельного объема на давление есть величина постоянная*

$$P_1\upsilon_1 = P_2\upsilon_2$$

Закон Гей-Люссака гласит: *при постоянном давлении объемы одного и того же количества идеального газа изменяются прямо пропорционально абсолютным температурам:*

$$\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Закон Шарля гласит: *при постоянном объеме абсолютное давление одного и того же количества идеального газа изменяется прямо пропорционально абсолютным температурам*

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Уравнение состояния идеального газа имеет вид:

для 1кг рабочего тела

$$P_1\upsilon_1 = RT_1$$

для произвольного количества рабочего тела с массой m

$$P_1V_1 = mRT_1$$

Параметрами состояния идеального газа являются:

-удельный объем υ $\left[\frac{м^3}{кг}\right]$;

-абсолютное давление $[Па]$, $[бар = 10^5\, Па]$;

-абсолютная температура Т , $[K]$;

-энтальпия h $\left[\frac{Дж}{кг}\right]$ -это параметр состояния термодинамической системы, численно равный количеству теплоты, участвующей в изобарном процессе; -

энтропия s $\left[\frac{Дж}{кг \cdot K}\right]$-это параметр состояния термодинамической системы, дифференциал которой представляет собой функцию вида $ds = \frac{dq}{T}$

1.1.2. Политропные процессы

Любой процесс идеального газа, в котором теплоемкость является постоянной величиной, называется *политропным процессом,* а линия процесса — *политропой.*

Существует 4 частных случая политропных процессов:

-изотермный (*T*=const);

-изохорный (*V*=const);

-изобарный (*P*=const);

-адиабатный (*S*=const, *Q*=0)

Методика расчета характеристик политропных процессов представлена в таблице 1.

Графическое изображение частных случаев политропных процессов показано на рис.1 и рис.2

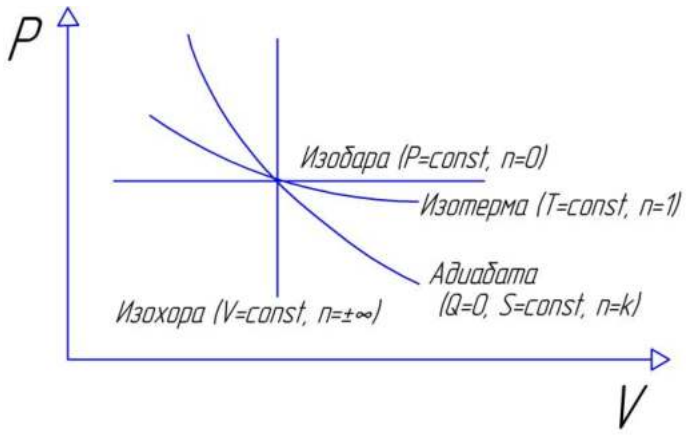


Рисунок 1– Изображение частных случаев политропных процессов в PV координатах

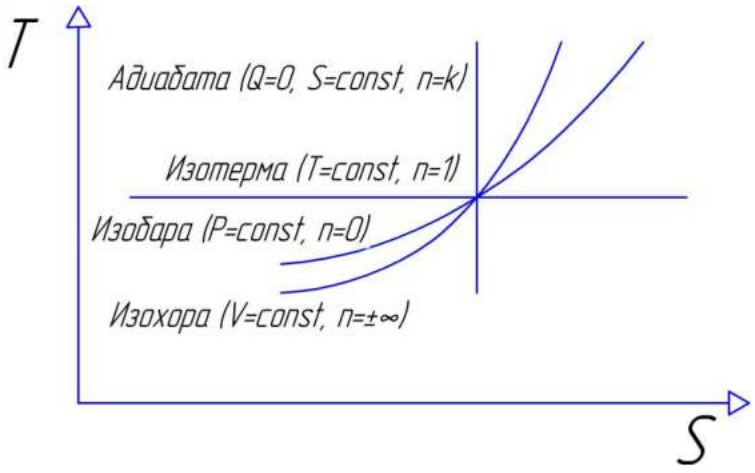


Рисунок 2– Изображение частных случаев политропных процессов в TS координатах

Таблица 1. Методика определения характеристик политропного процесса

Процесс	**Политропный**	**Изотермический**	**Изобарный**	**Изохорический**	**Адиабатный**
1	2	3	4	5	6
Показатель политропы	$n=\frac{C-C_P}{C-C_V}$	n=1	$n=0$	$n=\infty$	n=k
Теплоемкость	$C=C_V\frac{n-k}{n-1}$	*C - не имеет смысла*	$C=C_P$	$C=C_V$	$C=0$
Удельная работа	$l=\frac{P_1\upsilon_1-P_2\upsilon_2}{n-1}$; $l=\frac{R(T_1-T_2)}{n-1}$	$l=RT\ln\frac{P_1}{P_2}$; $l=P_1\upsilon_1\ln\frac{P_1}{P_2}$	$l=P(\upsilon_2-\upsilon_1)$: $l=R(T_2-T_1)$	$l=0$	$l=\frac{P_1\upsilon_1-P_2\upsilon_2}{k-1}$; $l=\frac{R(T_1-T_2)}{k-1}$
Работа	$L=\frac{P_1V_1-P_2V_2}{n-1}$; $L=\frac{mR(T_1-T_2)}{n-1}$	$L=mRT\ln\frac{P_1}{P_2}$; $L=P_1V_1\ln\frac{P_1}{P_2}$	$L=P(V_2-V_1)$: $L=mR(T_2-T_1)$	$L=0$	$L=\frac{P_1V_1-P_2V_2}{k-1}$; $L=\frac{mR(T_1-T_2)}{k-1}$
Удельная теплота	$q=C(T_2-T_1)$	$q=l$	$q=C_P(T_2-T_1)$	$q=C_V(T_2-T_1)$	$q=0$
Теплота	$Q=mC(T_2-T_1)$	$Q=L$	$Q=mC_p(T_2-T_1)$	$Q=mC_v(T_2-T_1)$	$Q=0$
Изменение удельной внутренней энергии	$\Delta u=C_v(T_2-T_1)$	$\Delta u=0$	$\Delta u=C_v(T_2-T_1)$	$\Delta u=C_v(T_2-T_1)$	$\Delta u=C_v(T_2-T_1)$
Изменение внутренней энергии	$\Delta U=mC_v(T_2-T_1)$	$\Delta U=0$	$\Delta U=mC_v(T_2-T_1)$	$\Delta U=mC_v(T_2-T_1)$	$\Delta U=mC_v(T_2-T_1)$
Изменение удельной энтальпии	$\Delta h=C_P(T_2-T_1)$	$\Delta h=0$	$\Delta h=C_P(T_2-T_1)$	$\Delta h=C_P(T_2-T_1)$	$\Delta h=C_P(T_2-T_1)$

Продолжение табл.1

1	2	3	4	5	6
Изменение энтальпии	$\Delta H = mC_p(T_2 - T_1)$	$\Delta H = 0$	$\Delta H = mC_p(T_2 - T_1)$	$\Delta H = mC_p(T_2 - T_1)$	$\Delta H = mC_p(T_2 - T_1)$
Приращение удельной энтропии	$\Delta s = C \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta s = R \ln \frac{P_1}{P_2}$; $\Delta s = R \ln \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}$	$\Delta s = C_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta s = C_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta s = 0$
Приращение энтропии	$\Delta S = mC \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta S = mR \ln \frac{P_1}{P_2}$; $\Delta S = mR \ln \frac{V_2}{V_1}$	$\Delta S = mC_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta S = mC_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta S = 0$
Коэффициент распределения энергии	$\alpha = \frac{n-1}{n-k}$	$\alpha = 0$	$\alpha = \frac{1}{k} \approx 0.7$	$\alpha = 1$	*не имеет смысла*
Характеристическое уравнение процесса	$PV^n = const$; $TV^{n-1} = const$; $\frac{T^n}{P^{n-1}} = const$	$T = const$; $PV = const$	$P = const$; $\frac{V}{T} = const$	$V = const$; $\frac{P}{T} = const$	$PV^k = const$; $TV^{k-1} = const$; $\frac{T^k}{P^{k-1}} = const$

Принцип соответствия для политропных процессов гласит: если две политропы с одинаковым показателем пересекаются с двумя политропами с другим одинаковым показателем, то произведения накрест лежащих параметров равны между собой (рис.3).

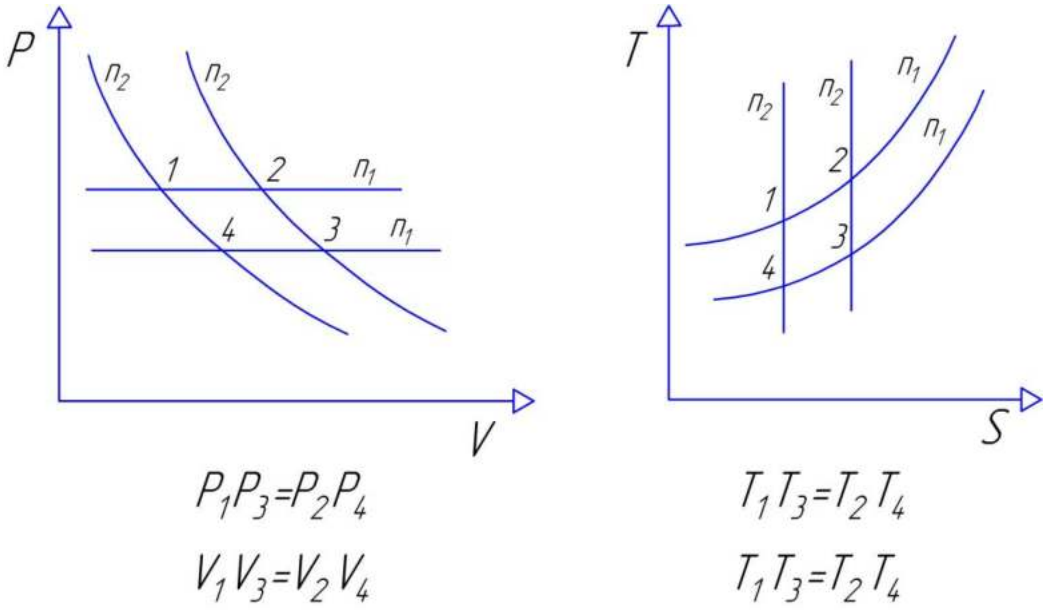


Рисунок 3 – Графическое изображение принципа соответствия

1.1.3. Схемы и принцип работы газотурбинных установок

Газотурбинные установки отличаются чрезвычайно большим разнообразием, пожалуй, даже большим, чем паротурбинные. Ниже рассмотрим наиболее перспективные и наиболее используемые в энергетике ГТУ *простого цикла*/2/.

ГТУ могут работать со сгоранием топлива при *постоянном давлении* и при *постоянном объеме*. Соответствующие им идеальные циклы делятся на циклы с подводом теплоты в процессе при *постоянном давлении* и *постоянном объеме*/1/.

На рис. 4 дана схема ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении

В камеру сгорания 5 через форсунки 3 и 4 непрерывно поступает воздух из турбокомпрессора 1 и топливо из топливного насоса 2. Из камеры продукты сгорания направляются в комбинированные сопла 6, в которых рабочее тело расширяется до давления, близкого к атмосферному давлению.

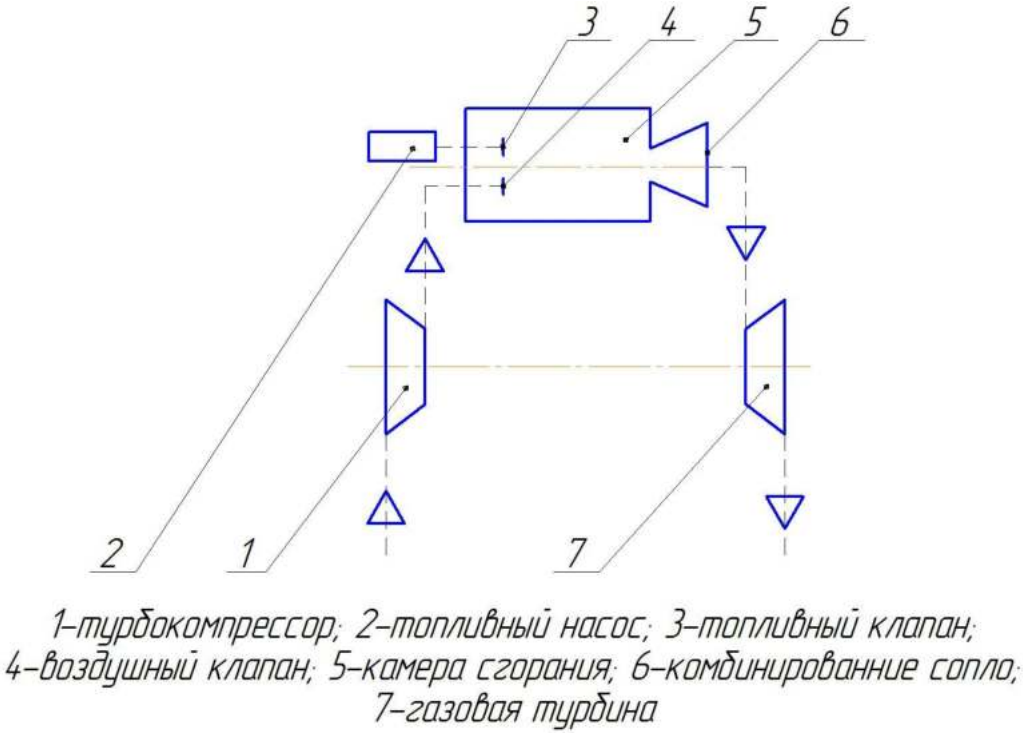


Рисунок 4 - Схема газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении

Из сопл продукты сгорания поступают на лопатки газовой турбины 7, а затем выбрасываются в атмосферу через выхлопной патрубок.

На рис.5 представлен идеальный цикл газотурбинной установки на PV- и TS-диаграммах с подводом теплоты при P = const.

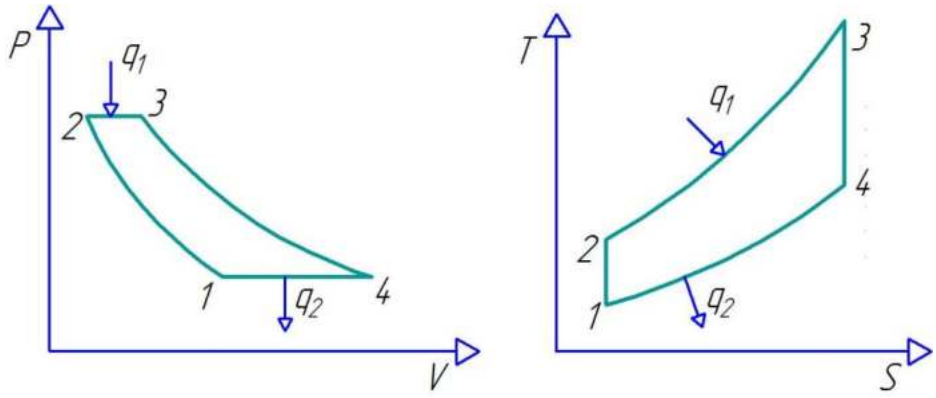


Рисунок 5- Изображение цикла газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении в PV- и TS- координатах

В этом цикле отвод теплоты от рабочего тела производится не по изохоре, как это имеет место в двигателях внутреннего сгорания, а по

изобаре. В поршневых двигателях объем газов при расширении ограничен объемом цилиндра. В газовых турбинах такого ограничения нет и газы могут расширяться до атмосферного давления. Рабочее тело с начальными параметрами P_1, v_1, T_1 сжимается по адиабате 1-2 до точки 2. От точки 2 к рабочему телу подводится некоторое количество теплоты q_1 по изобаре 2-3. Затем рабочее тело расширяется по адиабате 3-4 до начального давления и возвращается по изобаре 4-1 в первоначальное состояние, при этом отводится теплота q_2.

Характеристиками цикла являются:

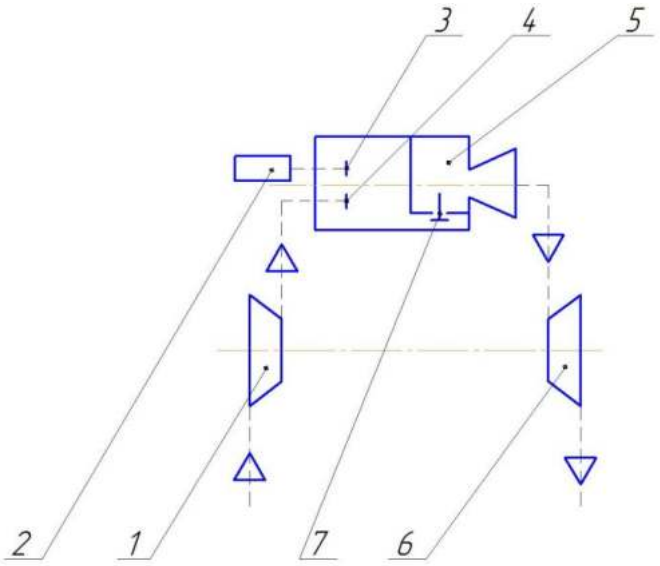
степень повышения давления в компрессоре

$$\beta = \frac{P_2}{P_1}$$

степень изобарного расширения

$$\rho = \frac{P_3}{P_2}$$

На рис. 6 приведена схема ГТУ со сгоранием топлива при постоянном объеме.



1-турбокомпрессор; 2-топливный насос; 3-топливный клапан; 4-воздушный клапан; 5-камера сгорания; 6-газовая турбина; 7-сопловый кран

Рисунок 6 - Схема газотурбинной установки со сгоранием топлива при постоянном давлении

В этой установке сжатый в турбокомпрессоре 1 воздух поступает из ресивера (сосуда большой емкости для выравнивания давления) 8 через воздушный клапан 4 в камеру сгорания 5. Сюда же топливным насосом 2 через топливный клапан 3 подается жидкое топливо. Продукты сгорания, пройдя через сопловой клапан 7, расширяются в сопле 6 и приводят во вращение ротор газовой турбины 9.

Для осуществления периодического процесса горения необходимо подавать воздух и топливо через управляемые клапаны 3 и 4 в определенные периоды времени. Процесс горения производится при закрытых клапанах 7 и 3. Воспламенение топлива происходит от электрической искры. После сгорания топлива давление в камере 5 повышается, открывается сопловой клапан 7 и продукты горения направляются в сопло 6, где и расширяются до конечного давления.

На рис.7 на PV- и TS-диаграммах изображен идеальный цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном объеме.

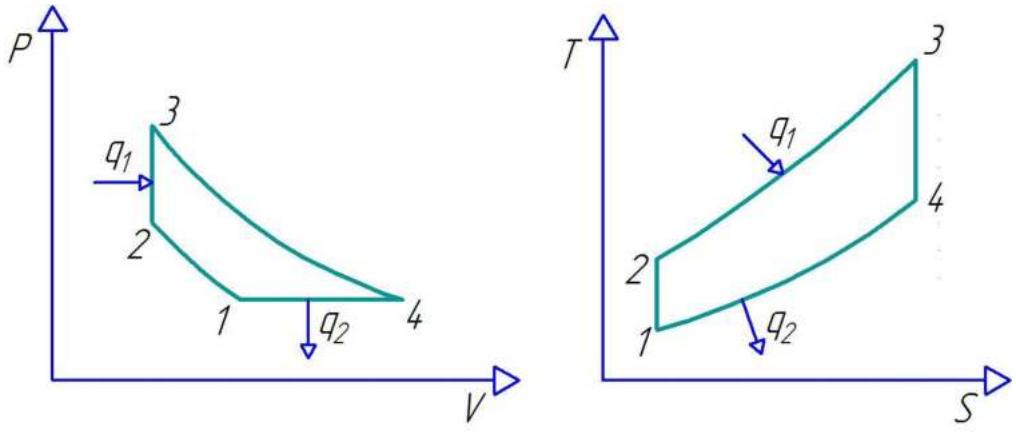


Рисунок 7- Изображение цикла газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном объеме в PV- и TS- координатах

Рабочее тело с начальными параметрами P_1, v_1, T_1 сжимается по адиабате 1-2 до точки 2, давление в которой определяется степенью повышения давления. По изохоре 2-3 к рабочему телу подводится некоторое количество теплоты q_1. Затем рабочее тело расширяется по

адиабате 3-4 до начального давления (точка 4) и возвращается в первоначальное состояние по изобаре 4-1, при этом отводится теплота q_2.

Характеристиками цикла являются:

степень повышения давления в компрессоре

$$\beta = \frac{P_2}{P_1}$$

и *степень добавочного повышения давления*

$$\lambda = \frac{\upsilon_3}{\upsilon_2}$$

1.1.4. Достоинства, недостатки и области применения газотурбинных установок

Главным преимуществом ГТУ является ее компактность. Прежде всего в ГТУ отсутствует паровой котел - сооружение, достигающее большой высоты и требующее для установки отдельного помещения. Связано это обстоятельство, прежде всего с высоким давлением в камере сгорания (1,2—2 МПа); в котле горение происходит при атмосферном давлении и соответственно объем образующихся горячих газов оказывается в 12–20 раз больше. Далее, в ГТУ процесс расширения газов происходит в газовой турбине, состоящей всего 3–5 ступеней, в то время как паровая турбина, имеющая такую же мощность, состоит из 3–4 цилиндров, заключающих 25–30 ступеней. Далее с учетом и камеры сгорания, и воздушного компрессора ГТУ мощностью 150 МВт имеет длину 8–12 м, а длина паровой турбины такой же мощности при трехцилиндровом исполнении в 1,5 раза больше. При этом для паровой турбины кроме котла необходимо предусмотреть установку конденсатора с циркуляционными и конденсатными насосами, систему регенерации из 7–9 подогревателей, питательные турбонасосы (от одного до трех), деаэратор.

Компактность ГТУ позволяет осуществить ее сборку на турбинном заводе, доставить в машинный зал железнодорожным или автодорожным транспортом для установки на простом фундаменте. Паровая турбина поставляется многочисленными узлами и деталями, монтаж как ее самой,

так и многочисленного вспомогательного оборудования, и связей между ними занимает в несколько раз больше времени, чем ГТУ.

ГТУ не требует охлаждающей воды. Как следствие, в ГТУ отсутствует конденсатор и система технического водоснабжения с насосной установкой и градирней. В результате все это приводит к тому, что стоимость 1 кВт установленной мощности газотурбинной электростанции значительно меньше. При этом стоимость собственно ГТУ (компрессор + камера сгорания + газовая турбина) из-за ее сложности оказывается в 3–4 раза больше, чем -стоимость паровой турбины такой же мощности.

Важным преимуществом ГТУ является ее высокая маневренность, определяемая малым уровнем давления (по сравнению с давлением в паровой турбине) и, следовательно, легким прогревом и охлаждением без возникновения опасных температурных напряжений и деформаций.

Однако ГТУ имеют и существенные недостатки, из которых, прежде всего, необходимо отметить меньшую экономичность, чем у паросиловой установки. Средний КПД достаточно хороших ГТУ составляет 37–38 %, паротурбинных энергоблоков – 42–43 %. Потолком для мощных энергетических ГТУ в настоящее время, является КПД на уровне 41–42 %, (а может быть и выше с учетом больших резервов повышения начальной температуры). Меньшая экономичность ГТУ связана с высокой температурой уходящих газов.

Другим недостатком ГТУ является невозможность использования в них низкосортных топлив, по крайней мере, в настоящее время. Она может хорошо работать только на газе или на хорошем жидком топливе, например, дизельном. Паросиловые энергоблоки могут работать на любом топливе, включая самое некачественное.

Низкая начальная стоимость ТЭС по сравнению с ГТУ и одновременно сравнительно низкая экономичность и высокие стоимость используемого топлива и маневренность определяют основную область индивидуального использования ГТУ: в энергосистемах их следует

применять как пиковые или резервные источники мощности, работающие несколько часов в сутки.

1.1.5 Круговые процессы (циклы)

Определим работу и теплоту за цикл

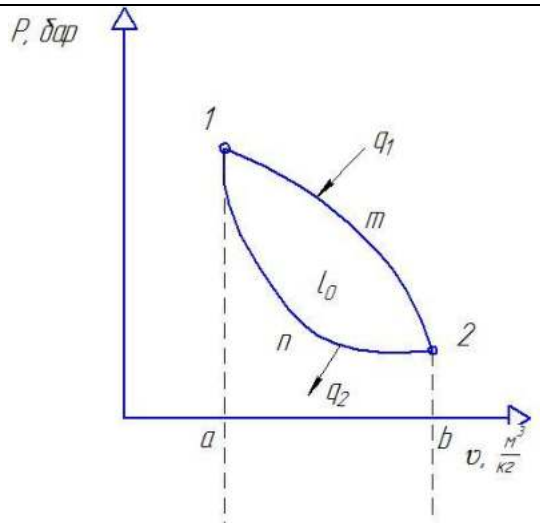


Рисунок 8 – Графическое определение работы за цикл

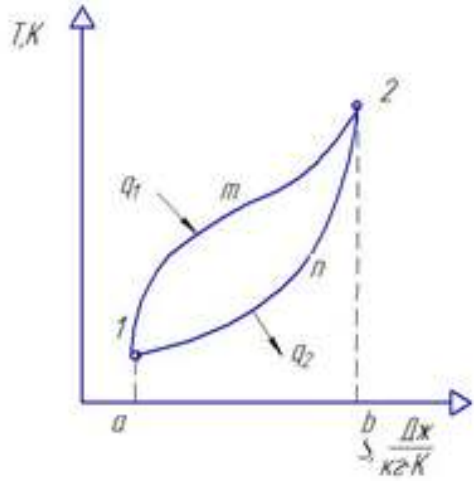


Рисунок 9 – Графическое определение теплоты за цикл

$$\oint dl = \int_1^2 dl + \int_2^1 dl = l_{1-2} - l_{2-1} = l_0$$

$$\oint dq = \int_1^2 dq + \int_2^1 dq = q_1 - / q_2 / = q_0$$

Таким образом, работа за цикл есть площадь внутри контура цикла в Pv координатах

Интеграл по замкнутому контуру от *dq* равен алгебраической сумме подведенной и отведенной теплоты по абсолютному значению. Площадь внутри контура цикла в TS координатах равна полезной теплоте за цикл.

Изменение внутренней энергии за цикл будет равно

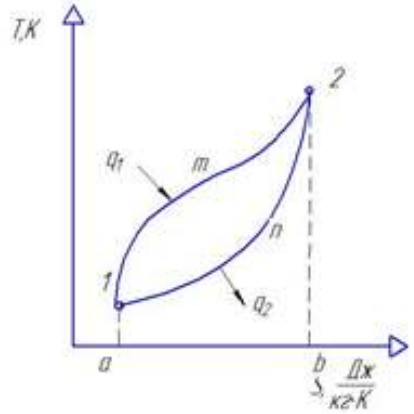


Рисунок 10 – Графическое определение изменения внутренней энергии за цикл

Изменение внутренней энергии в процессе расширения

$$\Delta u_p = C_v(T_2 - T_1)$$

Изменение внутренней энергии в процессе сжатия

$$\Delta u_{сж} = C_v(T_1 - T_2)$$

Таким образом, изменение внутренней энергии за цикл составит

$$\Delta u_p + \Delta u_{сж} = 0\,;\ \oint du = 0$$

Применим 1 закон термодинамики для цикла

$$\oint dq = \oint dl + \oint du$$

Так как $\oint du = 0$, то $\oint dq = \oint dl$

$$q_0 = l_0$$

Таким образом, первый закон термодинамики для цикла гласит.

Вся полезная теплота, равна полезной работе, совершаемой за цикл.

Сущность прямого и обратного термодинамических циклов

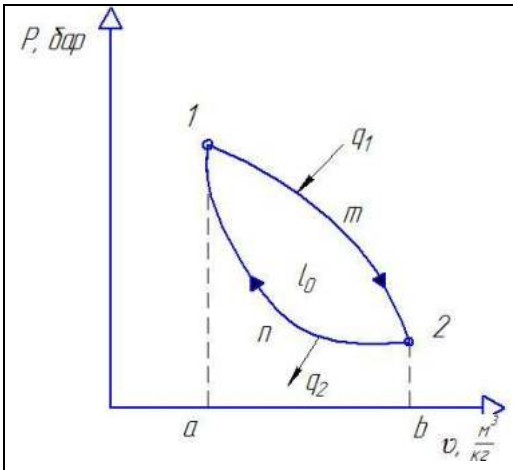


Рисунок 11 – Прямой термодинамический цикл

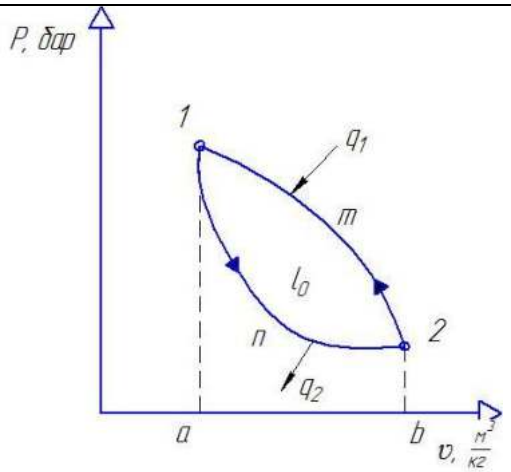


Рисунок 12 – Прямой термодинамический цикл

Работа расширения равна площади фигуры $l_p = fa1m2b$

Работа сжатия равна площади

Работа расширения равна площади фигуры $l_p = fa1n2b$

Работа сжатия равна площади

фигуры $l_{сж} = fa1n2b$ $l_p > l_{сж}$ $l_0 > 0$ Цикл, в котором получается положительная работа, называется прямым термодинамическим циклом. Прямой цикл протекает по часовой стрелке. По прямому циклу работают Двигатели внутреннего сгорания, паровые и газотурбинные установки. Степень использования теплоты в цикле определяется термическим кпд, который представляет отношение количества теплоты, преобразованной в полезную работу к количеству подведенной теплоты. $\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = \frac{q_0}{q_1} = \frac{q_1 - / q_2 /}{q_1} = 1 - \frac{/ q_2 /}{q_1} < 1$	фигуры $l_{сж} = fa1m2b$ $l_p < l_{сж}$ $l_0 < 0$ Цикл, в результате которого работа расходуется, называется обратным термодинамическим циклом. Он протекает против часовой стрелки. По обратному термодинамическому циклу работают холодильные и теплонасосные установки. Совершенство холодильной машины оценивается холодильным коэффициентом, который представляют собой отношение отведенной теплоты к затраченной работе $\varepsilon = \frac{q_1}{l_0} > 1$ В обратном цикле тепло переносится от холодного тела к нагретому и при этом затрачивается работа

1.1.6 Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания

В зависимости от способа подвода теплоты различают 3 термодинамических цикла ДВС;

1. Цикл с подводом теплоты при постоянном объеме (цикл Отто). Характерен для двигателей, работающих на бензине.

2. Цикл с подводом теплоты при постоянном объеме (цикл Дизеля). Характерен для компрессорных двигателей, в которых распыл топлива в цилиндре осуществляется сжатым воздухом. Эти двигатели в настоящее время не находят широкого применения.

3. Цикл со смешанным подводом теплоты при постоянном объеме и давлении (цикл Тринклера) (рисунок 13).

Цикл Тринклера

Процесс 1-2 – адиабатное сжатие рабочего тела. Характеризуется степенью сжатия $\varepsilon = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}$;

Процесс 2-3 –изобарный подвод теплоты q_1'. *Характеризуется степенью повышения давления* $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$;

Процесс 3-4 –изохорный процесс подвода теплоты q_1''. *Характеризуется степенью предварительного расширения* $\rho = \frac{V_4}{V_3}$;

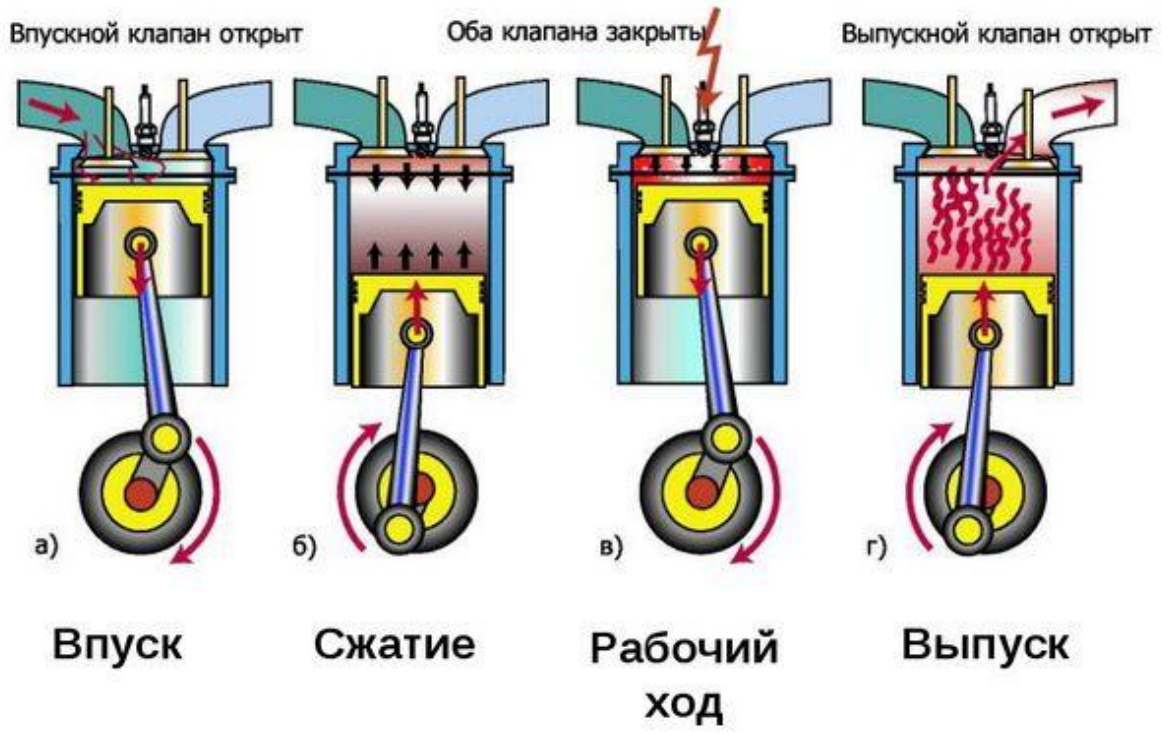


Рисунок 13 – Принципиальная схема четырехтактного дизельного двигателя внутреннего сгорания

Процесс 4-5 – адиабатное расширение рабочего тела;

Процесс 5-1 – изохорный отвод теплоты.

ε, λ, ρ –безразмерные характеристики цикла

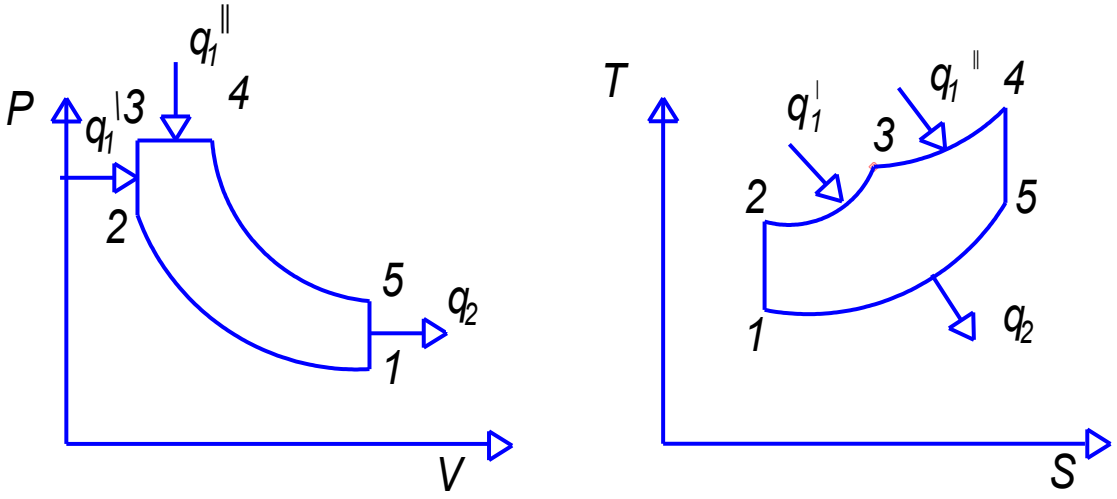


Рисунок 14 – Изображение цикла Тринклера со смешанным подводом теплоты

Термический кпд данного цикла определяется следующим образом через безразмерные характеристики

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda\rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1}\left((\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)\right)} \qquad (1)$$

Таким образом, термический кпд цикла Тринклера возрастает с увеличением степени сжатия ε и степени повышения давления λ и с уменьшением степени предварительного расширения ρ

Цикл Отто

Если на графике цикла Тринклера (рис.14) соединить точки 3 и 5, то получим Цикл Отто с подводом теплоты при постоянном объеме.

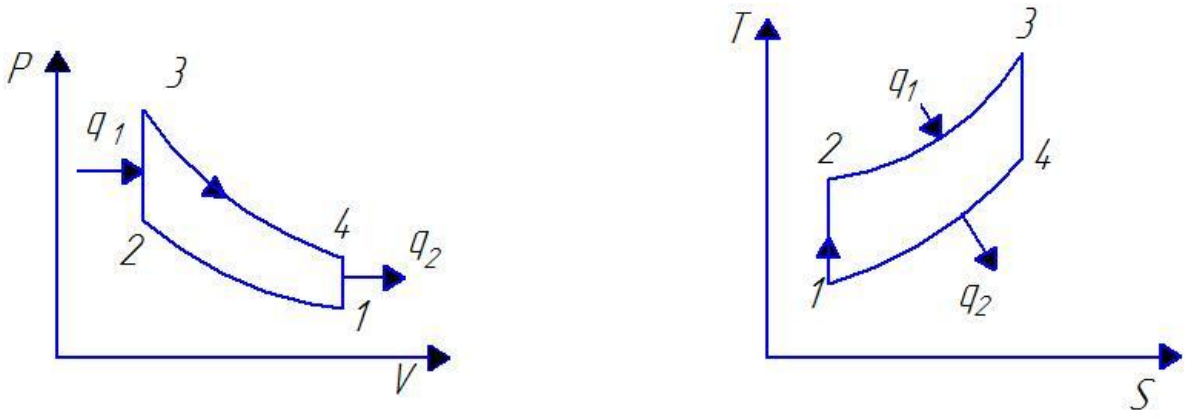


Рисунок 15-Схема работы цикла ДВС с подводом теплоты при V=const

Процесс 1-2 – адиабатное сжатие рабочего тела. Характеризуется степенью сжатия $\varepsilon = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}$;

Процесс 2-3 –изохорный процесс подвода теплоты q_1. Характеризуется степенью повышения давления $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$;

Процесс 3-4 – адиабатное расширение рабочего тела;

Процесс 4-1 – изохорный отвод теплоты.

Термический кпд цикла с подводом теплоты при постоянном объеме определяется следующим образом через безразмерные характеристики

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \qquad (2)$$

Таким образом, термический кпд цикла Отто возрастает с увеличением степени сжатия ε.

Примечание: Так как цикл Отто состоит из двух адиабат и двух изохор, то к нему применим принцип соответствия.

Цикл Дизеля

Если на диаграмме цикла Тринклера (рис.14) соединить точки 3 и 1, то получим цикл Дизеля с подводом теплоты при постоянном давлении (рис.16).

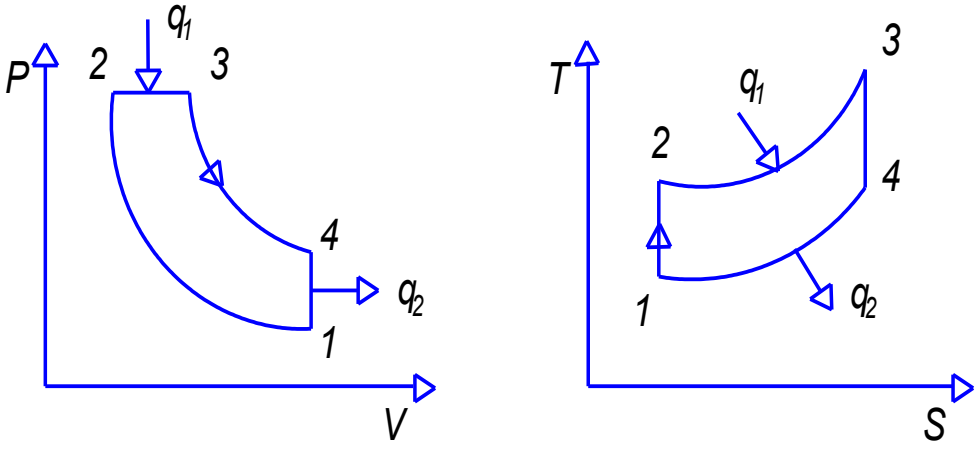


Рисунок 16- Схема цикла работы ДВС с изобарным подводом теплоты

Процесс 1-2 – адиабатное сжатие рабочего тела. Характеризуется степенью сжатия $\varepsilon = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}$ *;*

Процесс 2-3 –изобарный подвод теплоты q_1*. Характеризуется степенью повышения давления* $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$ *;*

Процесс 3-4 – адиабатное расширение рабочего тела;

Процесс 4-1 – изохорный отвод теплоты.

Термический кпд данного цикла с подводом теплоты при постоянном давлении определяется следующим образом через безразмерные характеристики

$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k\varepsilon^{k-1}(\rho - 1)} \qquad (3)$$

Таким образом, термический кпд цикла Дизеля с подводом теплоты при постоянном давлении возрастает с увеличением степени сжатия ε и с уменьшением степени предварительного расширения ρ

Цикл Карно

Особое значение в термодинамике имеет цикл Карно. Это идеальный цикл теплового двигателя, состоящий из двух адиабат и двух изотерм.

Вообрази, что 1 кг идеального газа находится в теплоизолированном цилиндре с подвижным поршнем. Причем рабочее тело может периодически сообщаться то с бесконечно горячим источником, имеющим температуру T_1, то с бесконечно холодным источником, имеющим температура T_2.

В изотермическом процессе все подведенное тепло идет на совершение работы. Однако 2 изотермы не могут образовывать круговой процесс. Если исключить дальнейший теплообмен, то осуществить круговой

процесс можно только путем соединения двух изотерм T_1 и T_2 двумя отрезками адиабат (рис.17).

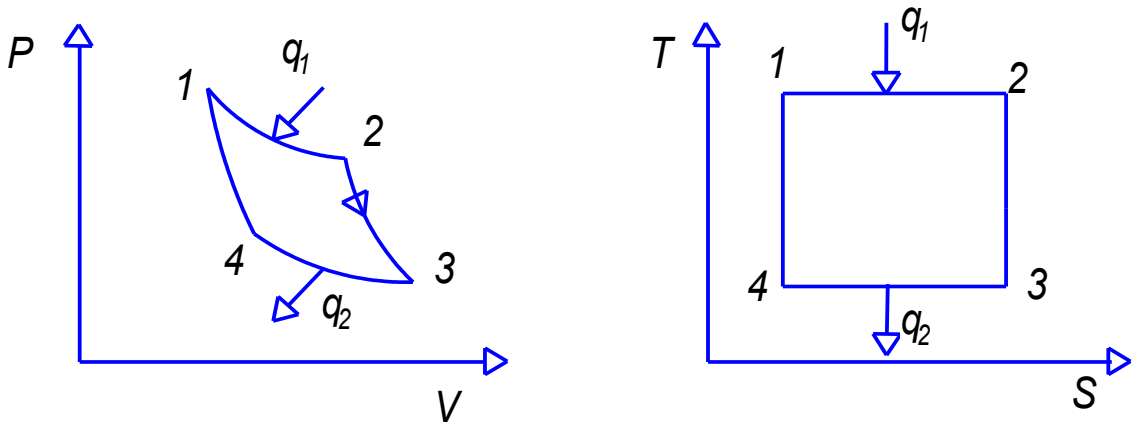


Рисунок 17– Схема цикла Карно

Процесс 1-2 –изотермическое расширение рабочего тела при получении теплоты q_1 от горячего источника с температурой T_1;

Процесс 2-3 адиабатное расширение рабочего тела;

Процесс 3-4 изотермическое сжатие рабочего тела с отдачей теплоты холодному источнику с температурой T_2;

Процесс 4-1–адиабатическое сжатие.

Определим значение термического кпд цикла Карно

$$\eta_t = 1 - \frac{/q_2/}{q_1} = 1 - \frac{RT_2 \ln \frac{\upsilon_3}{\upsilon_4}}{RT_1 \ln \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}} \qquad (4)$$

Так как цикл Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат, то к нему применим принцип соответствия. Из принципа соответствия получаем

$$\upsilon_1 \upsilon_3 = \upsilon_2 \upsilon_4 \Rightarrow \frac{\upsilon_3}{\upsilon_4} = \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}$$

Таким образом, термический кпд цикла Карно будет равен

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (5)$$

Т.е. термический кпд цикла Карно не зависит от природы рабочего тела, а зависит только от температур холодного и горячего теплоисточников.

Примечание: для $t_1=1800^0C$ и $t_2=15^0C$, имеющих место в современных двигателях, осуществление цикла Карно было бы связано с добавлением порядка 3000 *бар* и фантастическими размерами двигателя. В реальных двигателях давление достигает 40-50*атм*.

1.2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЦИКЛА ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

1.2.1. Исходные данные:

-давление $\mathbf{P_1}$ рабочего тела в начале сжатия;

-температура $\mathbf{T_1}$ рабочего тела в начале сжатия;

-степень повышения давления **β**;

-степень добавочного повышения давления **λ**;

-степень предварительного расширения **ρ**.

-рабочее тело 1 кг воздуха.

- газовая постоянная воздуха $R = 287\frac{Дж}{кг \cdot К}$ /1/

- массовая изобарная теплоемкость воздуха $C_p = 1{,}012\frac{кДж}{кг \cdot К}$

-массовая изохорная теплоемкость воздуха $C_v = 0{,}7227\frac{кДж}{кг \cdot К}$

-коэффициент Пуассона k=1.4.

1.2.2. Определяем параметры характерных точек цикла для 1 кг рабочего тела. Давление и температура в точке 1 заданы. Удельный объем находится из основного уравнения состояния идеального газа/1/

$$\upsilon_1 = \frac{RT_1}{P_1}\left[\frac{м^3}{кг}\right]$$

Определяем параметры точки 2. Давление в данной точке определится как

$$P_2 = P_1 \cdot \beta$$

Так как процесс 1-2 – адиабатный, то температуру и удельный объем в точке 2 определяем из уравнений политропных процессов (табл.1)

$$P_1 \upsilon_1^k = P_2 \upsilon_2^k \Rightarrow \upsilon_2 = \upsilon_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{k}} = \upsilon_1 \cdot \left(\frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{k}}$$

$$\frac{T_1^k}{P_1^{k-1}} = \frac{T_2^k}{P_2^{k-1}} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}}$$

Определяем параметры точки 3.

Для цикла с изобарным подводом теплоты

$$P_3 = P_2$$

$$\upsilon_3 = \upsilon_2 \cdot \rho$$

Изобарный процесс подчиняется закону Гей-Люссака. Тогда температура в конце процесса изобарного расширения будет равна

$$\frac{\upsilon_3}{\upsilon_2} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow T_3 = T_2 \frac{\upsilon_3}{\upsilon_2} = T_2 \cdot \rho$$

Для цикла с изохорным подводом теплоты

$$\upsilon_3 = \upsilon_2$$

$$P_3 = P_2 \cdot \lambda$$

Изохорный процесс подчиняется закону Шарля. Тогда температура в конце процесса изохорного подвода теплоты будет равна

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} \Rightarrow T_3 = T_2 \frac{P_3}{P_2} = T_2 \cdot \lambda$$

Определяем параметры точки 4.

Для цикла с изобарным подводом теплоты

Так как данный цикл состоит из двух изобар и двух изохор, то к нему применим принцип соответствия (рис.3)

Тогда

$$P_4 = P_1$$

$$\upsilon_1 \cdot \upsilon_3 = \upsilon_2 \cdot \upsilon_4 \Rightarrow \upsilon_4 = \frac{\upsilon_1 \cdot \upsilon_3}{\upsilon_2}$$

$$T_1 \cdot T_3 = T_2 \cdot T_4 \Rightarrow T_4 = \frac{T_1 \cdot T_3}{T_2}$$

Для цикла с изохорным подводом теплоты

$$P_4 = P_1$$

Температуру и давление в точке 4 находим из уравнений политропных процессов

$$T_3 \upsilon_3^{k-1} = T_4 \upsilon_4^{k-1} \Rightarrow T_4 = T_3 \left(\frac{\upsilon_3}{\upsilon_4} \right)^{k-1}$$

$$P_3 \upsilon_3^k = P_4 \upsilon_4^k \Rightarrow \upsilon_4 = \upsilon_3 \cdot \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{1}{k}}$$

1.2.3. Определяем характеристики процессов

Определяем приращение энтальпии в процессах 1-2, 2-3,3-4,4-1

$$\Delta h_{1-2} = C_P (T_2 - T_1)$$

$$\Delta h_{2-3} = C_P (T_3 - T_2)$$

$$\Delta h_{3-4} = C_P (T_4 - T_3)$$

$$\Delta h_{4-1} = C_P (T_1 - T_4)$$

Примечание: При правильном выполнении расчетов

$$\sum \Delta h = \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4} + \Delta h_{4-1} = 0$$

Определяем изменение внутренней энергии в процессах 1-2, 2-3,3-4,4-1

$$\Delta u_{1-2} = C_v (T_2 - T_1)$$

$$\Delta u_{2-3} = C_v (T_3 - T_2)$$

$$\Delta u_{3-4} = C_v (T_4 - T_3)$$

$$\Delta u_{4-1} = C_v (T_1 - T_4)$$

Примечание: При правильном выполнении расчетов

$$\sum \Delta u = \Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3} + \Delta u_{3-4} + \Delta u_{4-1} = 0$$

1.2.4. Определяем работу и теплоту в цикле

Работа в адиабатном процессе 1-2 определится как/1/

$$l_{1-2} = \frac{R(T_1 - T_2)}{k-1}$$

Так как в процессе 1-2 совершается работа сжатия, то полученная величина должна быть отрицательна.

Определяем работу, совершаемую в процессе 2-3

Для цикла с изобарным подводом теплоты

$$l_{2-3} = R(T_3 - T_2)$$

Так как в процессе 2-3 совершается работа расширения, то полученная величина должна быть положительна.

Для цикла с изохорным подводом теплоты

$$l_{2-3} = 0$$

Определяем работу, совершаемую в процессе 3-4

$$l_{3-4} = \frac{R(T_3 - T_4)}{k-1}$$

Так как в процессе 3-4 совершается работа расширения, то полученная величина должна быть положительна.

Определяем работу, совершаемую в процессе 4-1

$$l_{4-1} = R(T_1 - T_4)$$

Так как в процессе 4-1 совершается работа сжатия, то полученная величина должна быть отрицательна

Определяем теплоту процесса 1-2

$$q_{1-2} = 0, \textit{так как процесс адиабатный}$$

Определяем теплоту процесса 2-3

Для цикла с изобарным подводом теплоты

$$q_{2-3} = C_p(T_3 - T_2)$$

Для цикла с изохорным подводом теплоты

$$q_{2-3} = C_v(T_3 - T_2)$$

Так как теплота в процессе 2-3 подводится, то полученная величина должна быть положительна.

Определяем теплоту процесса 3-4

$$q_{3-4} = 0, \textit{так как процесс адиабатный}$$

Определяем теплоту процесса 4-1

$$q_{4-1} = C_p\left(T_1 - T_4\right)$$

Так как теплота в процессе 4-1 отводится, то полученная величина должна быть отрицательна.

1.2.5. Определяем полезную работу и теплоту за цикл

Определяем полезную работу за цикл

$$l_{пол} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-1}$$

Определяем полезную теплоту за цикл

$$q_0 = q_{2-3} - / q_{4-1} / = q_{4-1}$$

Примечание: При правильном выполнении расчетов в соответствии с первым законом термодинамики для циклов полезная теплота должна быть равна полезной работе, совершенной за цикл, т.е. $q_0 = l_{пол}$.

Для каждого процесса должен выполняться первый закон термодинамики, т.е. $q_1 = l_1 + \Delta u_1$ *и т.д.*

1.2.6. Определяем приращение энтропии

Определяем приращение энтропии в процессе 1-2

$\Delta S_{1-2} = 0,$ так как процесс адиабатный

Определяем приращение энтропии в процессе 2-3

Для цикла с изобарным подводом теплоты

$$\Delta s_{2-3} = C_p \ln \frac{T_3}{T_2}$$

Для цикла с изохорным подводом теплоты

$$\Delta S_{2-3} = C_v \ln \frac{T_3}{T_2}$$

Так как теплота в процессе 2-3 подводится, то полученная величина должна быть положительна

Определяем приращение энтропии в процессе 3-4

$q_{3-4} = 0,$ так как процесс адиабатный

Определяем приращение энтропии в процессе 4-1

$$\Delta S_{4-1} = C_p \ln \frac{T_1}{T_4}$$

Так как теплота в процессе 4-1 отводится, то полученная величина должна быть отрицательна

Примечание: При правильном выполнении расчетов

$$\sum \Delta s = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-3} + \Delta s_{3-4} + \Delta s_{4-1} = 0$$

1.2.7. Определяем термический кпд цикла

$$\eta_t = \frac{q_0}{q_{подв}} = \frac{q_0}{q_{2-3}}$$

Полученную величину сравниваем с термическим кпд цикла Карно, который рассчитывается следующим образом

$$\eta_{tККарн} = 1 - \frac{T\min}{T\max}$$

1.2.8. Строим цикл в *PV*- координатах. Задаемся масштабом, проводим координатные оси и откладываем точки 1,2,3,4. Участки 2-3 и 4-1 соединяем прямой линией. Процессы 1-2 и 3-4 представляют собой степенные функции и для их построения необходимо иметь минимум 5 точек. Поэтому задаемся минимум тремя промежуточными значениями удельных объемов и вычисляем значения давления при этих объемах

Процесс 1-2

$$\upsilon_2 \le \upsilon_x \le \upsilon_1 \qquad P_1 \upsilon_1^k = P_x \upsilon_x^k \Rightarrow P_x = P_1 \cdot \left(\frac{\upsilon_1}{\upsilon_x} \right)^k$$

Процесс 3-4

$\upsilon_3 \le \upsilon_y \le \upsilon_4$ $\qquad P_3\upsilon_3^k = P_y\upsilon_y^k \Rightarrow P_y = P_3 \cdot \left(\frac{\upsilon_3}{\upsilon_y}\right)^k$

Все полученные точки откладываем на графике в *PV*- координатах и соединяем плавными кривыми.

1.2.9. Строим цикл в *TS*- координатах.

Определяем значение энтропии в характерных точках цикла. Принимаем начальное значение энтропии $S_0 = 0\frac{кДж}{кг \cdot К}$.

Задаемся масштабом, проводим координатные оси и откладываем точки 1,2,3,4. Участки 1-2 и 3-4 соединяем прямой линией. Процессы 2-3 и 4-1 представляют собой логарифмические функции и для их построения необходимо иметь минимум 5 точек. Поэтому задаемся минимум тремя промежуточными значениями температур и вычисляем значения приращений энтропий при этих температурах

Процесс 2-3

Для цикла с изобарным подводом теплоты

$$\Delta s_{2-3} = C_p \ln \frac{T_3}{T_2}$$

$$T_2 \le T_x \le T_3$$

$$\Delta S_{2-x} = C_p \ln \frac{T_x}{T_2}$$

Для цикла с изохорным подводом теплоты

$$T_2 \le T_x \le T_3$$

$$\Delta S_{2-3} = C_v \ln \frac{T_x}{T_2}$$

Процесс 4-1

$$T_1 \le T_y \le T_4$$

$$\Delta S_{4-y} = C_p \ln \frac{T_y}{T_4} = 1{,}012 \ln \frac{T_y}{695}$$

Все полученные точки откладываем на графике в *TS*- координатах и соединяем плавными кривыми.

После построения циклов методом параллельного переноса изображаем в PV и TS координатах пучки процессов

1.2.10. По результатам расчетов строим графики трансформации теплоты. Например, для процесса 1-2 теплота q=0, работа сжатия имеет знак (–), изменение внутренней энергии представляет из себя положительную величину. Следовательно, график трансформации энергии имеет вид, представленный на рисунке 18.

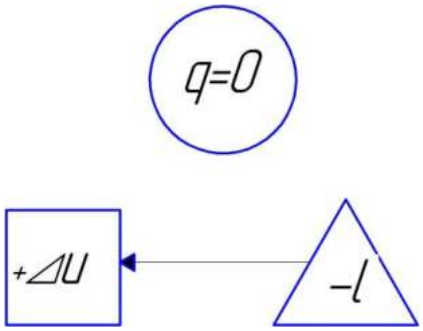


Рисунок 18 –График трансформации энергии для процесса адиабатического сжатия

Графики трансформации энергии для других процессов строятся аналогичным образом с учетом знаков теплоты, работы и изменения внутренней энергии.

1.3 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЦИКЛА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ СО СМЕШАННЫМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

1.3.1 Исходные данные

1. Параметры начальной точки цикла $\boldsymbol{P_1}$, $\boldsymbol{T_1}$,.
2. Безразмерные параметры цикла $\boldsymbol{\varepsilon}$, $\boldsymbol{\lambda}$, $\boldsymbol{\rho}$.

Таблица 2. Назначение цифр шифра

№ цифры	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я
Цикл	P_1	T_1	ε	λ	ρ

Таблица 3. Примеры выбора числовых данных

Шифр	Числовые данные				
60329	Цикл				
	P_1, *бар*	T_1, *К*	ε	λ	ρ
	0,956	323	11,6	1,30	1,90

Рабочее тело – газовая смесь.

Газовая постоянная смеси *Rсм*, коэффициент Пуассона *k*, масовая изобарная теплоемкость *Ср* и массовая изохорная теплоемкость *Cv* .

1.3.2 Определяем параметры *P, V, T* угловых точек цикла

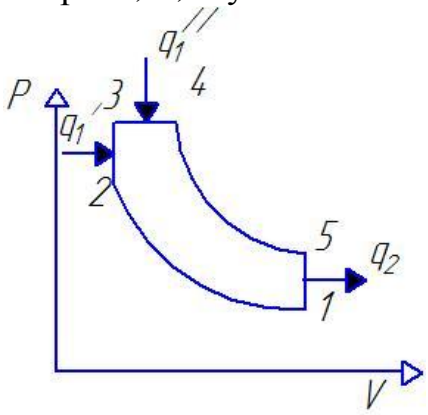


Рисунок 19–Изображение цикла со смешанным подводом теплоты в PV координатах

Точка 1 $P_1\upsilon_1 = RT_1$

$$\upsilon_1 = \frac{RT_1}{P_1}$$

Примечание: При использовании уравнения Клапейрона давление необходимо принимать в Па. Например, если P_1=0,956 бар, то в уранение подставляешь величину $P_1=0{,}956\cdot10^5$ Па

Точка 2. Процесс 1-2–адиабатическое сжатие рабочего тела. Воспользуемся уравнением адиабаты

$$P_1\upsilon_1^k = P_2\upsilon_2^k \Rightarrow P_2 = P_1\left(\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}\right)^k = P_1\varepsilon^k$$

$$T_1\upsilon_1^{k-1} = T_2\upsilon_2^{k-1} \Rightarrow T_2 = T_1\left(\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}\right)^{k-1} = T_1\varepsilon^{k-1}$$

Точка 3. Процесс 2-3 –изохорный подвод теплоты q_1'

$$\upsilon_2 = \upsilon_3$$

$$\frac{P_3}{P_2} = \lambda \Rightarrow P_3 = P_2 \cdot \lambda$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} = \lambda \Rightarrow T_3 = T_2 \cdot \lambda$$

Точка 4. Процесс 3-4–изобарный подвод теплоты

$$P_3 = P_4$$

$$\frac{\upsilon_4}{\upsilon_3} = \rho \Rightarrow \upsilon_4 = \upsilon_3 \cdot \rho$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{\upsilon_4}{\upsilon_3} = \rho \Rightarrow T_4 = T_3 \cdot \rho$$

Точка 5. Процесс 4-5–адиабатное расширение рабочего тела

$$\upsilon_5 = \upsilon_1$$

$$P_4\upsilon_4^k = P_5\upsilon_5^k \Rightarrow P_5 = P_4\left(\frac{\upsilon_4}{\upsilon_5}\right)^k$$

$$T_4\upsilon_4^{k-1} = T_5\upsilon_5^{k-1} \Rightarrow T_5 = T_4\left(\frac{\upsilon_4}{\upsilon_5}\right)^{k-1}$$

Параметры характерных точек цикла заносим в таблицу 4

Таблица 4. Параметры характерных точек цикла

Точка	1	2	3	4	5-
P, бар					
$\upsilon, \frac{м^3}{кг}$					
T, К					

1.3.3. Для построения цикла в PV- координатах определяем параметры промежуточных точек процессов 1-2 и 4-5

Процесс 1-2 $P_1\upsilon_1^k = P_x\upsilon_x^k \Rightarrow P_x = P_1 \cdot \left(\frac{\upsilon_1}{\upsilon_x}\right)^k$

$$\upsilon_2 \le \upsilon_x \le \upsilon_1$$

Таблица 5. Параметры промежуточных точек процесса 1-2

$\upsilon_x, \frac{м^3}{кг}$				
P_x, *бар*				

Процесс 4-5 $P_4\upsilon_4^k = P_y\upsilon_y^k \Rightarrow P_y = P_4 \cdot \left(\frac{\upsilon_4}{\upsilon_y}\right)^k$

$$\upsilon_4 \le \upsilon_y \le \upsilon_5$$

Таблица 6. Параметры промежуточных точек процесса 4-5

P_y, *бар*				
$\upsilon_y, \frac{м^3}{кг}$				

График строится на бумаге формата А4

1.3.7. Определить подведенную q_1, отведенную q_2 и полезную q_0 теплоту.

Подведенная теплота будет равна

$$q_1 = q_1^{/} + q_1^{//} = C_v(T_3 - T_2) + C_p(T_4 - T_3)$$

Примечание: так как теплота подводится, то полученная величина должна быть положительна

Отведенная теплота составит

$$q_2 = C_v(T_1 - T_5)$$

Примечание: так как теплота отводится, то полученная величина должна быть отрицательна.

Полезная теплота составит

$$q_0 = q_1 - / q_2 /$$

1.3.8. Определяем термический КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{/ q_2 /}{q_1}$$

1.3.9. Определяем термический КПД обратимого цикла Карно η_{tk}, осуществляемого в том же интервале предельных температур, что и заданный цикл.

$$\eta_{tKKарн} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{T_1}{T_4}$$

Сравниваем полученные КПД.

Примечание: при правильном выполнении расчетов кпд цикла Карно должно быть выше, чем кпд заданного цикла. Чем ближе величина кпд заданного цикла к величине кпд цикла Карно, тем более совершенен рассматриваемый цикл.

1.3.10. Определяем работу газа в отдельных процессах l_1 и за цикл l_0.

Работа в процессе 1-2

$$l_{1-2} = \frac{R(T_1 - T_2)}{k - 1}$$

Примечание: процесс 1-2-адиабатное сжатие. Работа сжатия должна иметь отрицательный знак. Процессы 3-4 и 4-5 –процессы расширения. Работа должна получиться положительной.

Работа в процессе 2-3

$$l_{2-3} = 0$$

Работа в процессе 3-4

$$l_{3-4} = R(T_4 - T_3)$$

Работа в процессе 4-5

$$l_{4-5} = \frac{R(T_4 - T_5)}{k - 1}$$

Работа в процессе 5-1

$$l_{5-1} = 0$$

Полезная работа за цикл составит

$$l_0 = \sum l_i = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-5} + l_{5-1}$$

Примечание: при правильном выполнении расчетов в соответствии с 1 законом термодинамики для циклов $q_0 = l_0$

1.3.11. Определяем приращение энтропии во всех процессах цикла и вычислить значения энтропии в отдельных точках, задавшись произвольным значением энтропии начальной точки. Значения ΔS и S сводим в таблицу.

Примечание: начальное значение энтропии рекомендуется взять равным

$$S_0 = 0 \frac{кДж}{кг \cdot К}$$

Приращение энтропии будет равно

Процесс 1-2

$$\Delta S_{1-2} = 0$$

Процесс 2-3

$$\Delta S_{2-3} = C_v \ln \frac{T_3}{T_2}$$

Процесс 3-4

$$\Delta S_{3-4} = C_p \ln \frac{T_4}{T_3}$$

Процесс 4-5

$$\Delta S_{4-5} = 0$$

Процесс 5-1

$$\Delta S_{5-1} = C_v \ln \frac{T_1}{T_5}$$

Примечание: для упрощения расчетов приращения энтропии величины теплоемкостей рекомендуется взять в единицах измерения $\frac{кДж}{кг \cdot К}$

Примечание: в процессах 2-3 и 3-4 теплота подводится, в процессе 5-1 теплота отводится. Следовательно, величина приращения энтропии в процессах 2-3 и 3-4 должна быть положительна, а в процессе 5-1 отрицательна.

Примечание: при правильном выполнении расчетов

$$\sum \Delta S_i = \Delta S_{1-2} + \Delta S_{2-3} + \Delta S_{3-4} + \Delta S_{4-5} + \Delta S_{5-1} = 0$$

Параметры угловых точек цикла заносим в таблицу7.

Таблица 7. Параметры характерных точек цикла в TS координатах

Точка	1	2	3	4	5
$T,\ К$					
$S,\ \frac{кДж}{кг \cdot К}$					
$\Delta S,\ \frac{кДж}{кг \cdot К}$					

1.3.12. Для построения цикла в TS-координатах определяем параметры промежуточных точек процессов 2-3,3-4 и 5-1

$$\Delta S_{2-x} = C_V \ln \frac{T_x}{T_2}$$

$$T_2 \le T_x \le T_3$$

Результаты расчетов заносим в таблицу 8

Таблица 8. Параметры промежуточных точек процесса 2-3

$T,\ К$				
$\Delta S_{2-x},\ \frac{кДж}{кг \cdot К}$				
$S = S_2 + \Delta S_{2-x},\ \frac{кДж}{кг \cdot К}$				

$$\Delta S_{3-y} = C_p \ln \frac{T_y}{T_3}$$

$$T_3 \le T_y \le T_4$$

Результаты расчетов заносим в таблицу 9.

Таблица 9. Параметры промежуточных точек процесса 3-4

$T,\ K$				
$\Delta S_{3-y}, \frac{кДж}{кг \cdot К}$				
$S = S_3 + \Delta S_{3-y}, \frac{кДж}{кг \cdot К}$				

$$\Delta S_{5-z} = C_V \ln \frac{T_z}{T_5}$$

$$T_1 \leq T_z \leq T_5$$

Результаты расчетов заносим в таблицу 10.

Таблица 10. Параметры промежуточных точек процесса 5-1

$T,\ K$				
$\Delta S_{5-z}, \frac{кДж}{кг \cdot К}$				
$S = S_5 + \Delta S_{5-z}, \frac{кДж}{кг \cdot К}$				

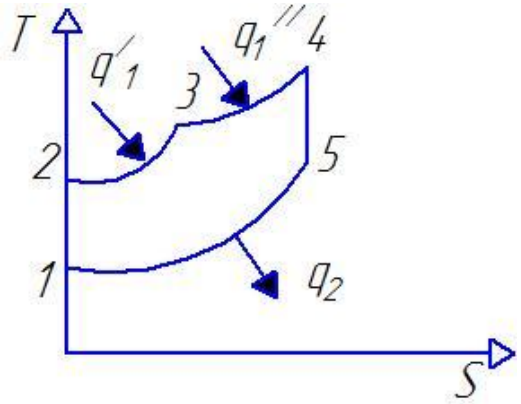


Рисунок 20–Изображение цикла со смешанным подводом теплоты в TS координатах

1.3.13. Определяем масштаб площади в координатах PV.

Измеряем площадь цикла в координатах PV и вычисляем по величине площади работу за цикл l_0'.

1.3.14. Определяем масштаб площади в координатах TS.

Измеряем площадь цикла в координатах TS и вычисляем полезно использованную в цикле теплоту q_0'

1.3.15. Определить величины относительных ошибок:

$$\delta_1 = \frac{l_0 - l_0'}{l_0} \cdot 100\%$$

$$\delta_2 = \frac{q_0 - q_0'}{q_0} \cdot 100\%$$

При правильном выполнении δ_1 и δ_2 находятся пределах ± 5%.

Графики должен быть построены бумаге формате А4. Числовые данные к расчетной работе подбираются из табл.11. по шифру.

Таблица 11 Числовые данные к расчетной работе для расчета цикла

Цикл					
№ п/п	P_1, *бар*	T_1,*К*	ε	λ	ρ
1	0,926	296	9,2	1,15	1,10
2	0,932	299	10,4	1,30	1,20
3	0,938	302	11,6	1,45	1,30
4	0,944	305	12,8	1,60	1,40
5	0,950	308	14,0	1,75	1,50
6	0,956	311	15,2	1,90	1,60
7	0,962	314	16,4	2,05	1,70
8	0,968	317	17,6	2,20	1,80
9	0,974	320	18,8	2,35	1,90
0	0,980	323	20,0	2,50	2,20

1.4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОИЗВОЛЬНОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА

Расчет произвольного термодинамического цикла производится аналогичным образом по процессам в соответствии с формулами, приведенными в таблице 1.

1.5. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ № 1(ЦИКЛ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ)

Рассчитать термодинамический цикл, представленный на рисунке 21. Изобразить на листе формата А1 данный цикл в P-V и T-S координатах, пучки процессов и графики трансформации энергии в каждом процессе.

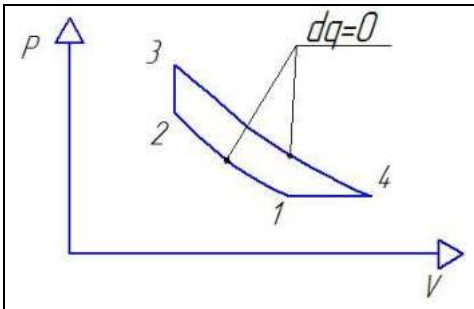


Рисунок 21 – Произвольный термодинамический цикл

P_1=0,956*бар*; T_1=308*K*;

$\frac{P_2}{P_1}=6{,}6;\quad \frac{\upsilon_3}{\upsilon_2}=1{,}45$

Рабочее тело-1кг воздуха

РЕШЕНИЕ

Представленный на рисунке ПР41 цикл соответствует циклу газотурбинной установки с изохорным подводом теплоты

1.5.1. Определяем параметры характерных точек цикла

Точка 1 $P_1\upsilon_1 = RT_1$

$$\upsilon_1=\frac{RT_1}{P_1}=\frac{287\cdot 308}{0{,}956\cdot 10^5}=0{,}916\left[\frac{\frac{Дж}{кг\cdot K}\cdot K}{Па}=\frac{\frac{нм}{кг}}{\frac{н}{м^2}}=\frac{м^3}{кг}\right]$$

Точка 2. Процесс 1-2 – адиабатное сжатие рабочего тела в компрессоре

$$P_2=P_1\cdot\beta=0{,}956\cdot 6{,}6=6{,}31бар$$

$$P_1\upsilon_1^k=P_2\upsilon_2^k\Rightarrow\upsilon_2=\upsilon_1\cdot\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{k}}=\upsilon_1\cdot\left(\frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{k}}=0{,}916\cdot\left(\frac{1}{6{,}6}\right)^{\frac{1}{1{,}4}}=0{,}24\frac{м^3}{кг}$$

$$T_1\upsilon_1^{k-1}=T_2\upsilon_2^{k-1}\Rightarrow T_2=T_1\left(\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}\right)^{k-1}=308\cdot\left(\frac{0{,}916}{0{,}24}\right)^{1{,}4-1}=569{,}29K$$

Точка 3. Процесс 2-3 – изохорный подвод теплоты (горение горюче-воздушной смеси)

$$\upsilon_3 = \upsilon_2 = 0{,}24\frac{м^3}{кг}$$

$$P_3 = P_2 \cdot \lambda = 6{,}31 \cdot 1{,}45 = 9{,}15 бар$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} \Rightarrow T_3 = T_2\frac{P_3}{P_2} = T_2 \cdot \lambda = 569{,}29 \cdot 1{,}45 = 763{,}12 K$$

Точка 4. Процесс 3-4 – адиабатное расширение рабочего тела в соплах и на лопатках турбины

$$P_4 = P_1 = 0{,}956 бар$$

$$P_3\upsilon_3^k = P_4\upsilon_4^k \Rightarrow \upsilon_4 = \upsilon_3 \cdot \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{1}{k}} = 0{,}24 \cdot \left(\frac{9{,}15}{0{,}956}\right)^{\frac{4}{1.4}} = 1{,}2\frac{м^3}{кг}$$

$$T_3\upsilon_3^{k-1} = T_4\upsilon_4^{k-1} \Rightarrow T_4 = T_3\left(\frac{\upsilon_3}{\upsilon_4}\right)^{k-1} = 763{,}12 \cdot \left(\frac{0{,}24}{1{,}2}\right)^{1{,}4-1} = 400{,}87 K$$

Значения параметров характерных точек цикла заносим в таблицу 12

Таблица 12. Параметры характерных точек цикла газотурбинной установки

Точка	1	2	3	4
P, бар	0,956	6,31	9,15	0,956
$\upsilon, \frac{м^3}{кг}$	0,916	0,24	0,24	1,2
T, K	308	526,29	763,12	400,87

Для построения цикла в *PV*- координатах определяем параметры

1.5.2. Определяем характеристики процессов

Определяем показатель политропы

$$n_{1-2} = \frac{\ln\frac{P_1}{P_2}}{\ln\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}} = \frac{\ln\frac{0{,}956}{6{,}31}}{\ln\frac{0{,}24}{0{,}916}} = \frac{-1{,}887}{-1{,}34} = 1{,}4$$

$$n_{2-3} = \frac{\ln\frac{P_2}{P_3}}{\ln\frac{\upsilon_3}{\upsilon_2}} = \frac{\ln\frac{6{,}31}{9{,}15}}{\ln\frac{0{,}24}{0{,}24}} = \frac{-0{,}37}{0} = -\infty$$

$$n_{3-4} = \frac{\ln \frac{P_3}{P_4}}{\ln \frac{\upsilon_4}{\upsilon_3}} = \frac{\ln \frac{9,15}{0,956}}{\ln \frac{1,2}{0,24}} = \frac{2,259}{1,609} = 1,4$$

$$n_{4-1} = \frac{\ln \frac{P_4}{P_1}}{\ln \frac{\upsilon_1}{\upsilon_4}} = \frac{\ln \frac{0,956}{0,956}}{\ln \frac{0,916}{1,2}} = \frac{0}{-0,27} = 0$$

Определяем удельные массовые теплоемкости по формуле

$$C = C_V \frac{n-k}{n-1}$$

$$C_{1-2} = 0,7227\frac{1,4-1,4}{1,4-1} = 0$$

$$C_{2-3} = 0,7227\frac{\infty-1,4}{\infty-1} = 0,7227\frac{кДж}{кг \cdot К}$$

$$C_{3-4} = 0,7227\frac{1,4-1,4}{1,4-1} = 0$$

$$C_{3-4} = 0,7227\frac{0-1,4}{0-1} = 1,012\frac{кДж}{кг \cdot К}$$

Определяем приращение энтропии во всех процессах цикла

$\Delta S_{1-2} = 0, так\ как\ процесс\ адиабатный$

$$\Delta S_{2-3} = C_v \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,7227 \ln \frac{763,12}{526,29} = 0,27\frac{кДж}{кг \cdot К}$$

$\Delta S_{3-4} = 0, так\ как\ процесс\ адиабатный$

$$\Delta S_{2-3} = C_p \ln \frac{T_1}{T_4} = 1,012 \ln \frac{308}{400,87} = -0,27\frac{кДж}{кг \cdot К}$$

Определяем приращение удельной энтальпии в процессах цикла

$$\Delta h_{1-2} = C_p(T_2 - T_1) = 1,012(526,29 - 308) = 220,9\frac{кДж}{кг}$$

$$\Delta h_{2-3} = C_p(T_3 - T_2) = 1,012(763,12 - 526,29) = 239,67\frac{кДж}{кг}$$

$$\Delta h_{3-4} = C_p(T_4 - T_3) = 1,012(400,87 - 763,12) = -366,6\frac{кДж}{кг}$$

$$\Delta h_{4-1} = C_p\left(T_1 - T_4\right) = 1{,}012\left(308 - 400{,}87\right) = -93{,}98\frac{кДж}{кг}$$

Определяем приращение удельной внутренней энергии

$$\Delta u_{1-2} = C_v\left(T_2 - T_1\right) = 0{,}7227\left(526{,}29 - 308\right) = 157{,}76\frac{кДж}{кг}$$

$$\Delta u_{2-3} = C_v\left(T_3 - T_2\right) = 0{,}7227\left(763{,}12 - 526{,}29\right) = 171{,}16\frac{кДж}{кг}$$

$$\Delta u_{3-4} = C_p\left(T_4 - T_3\right) = 0{,}7227\left(400{,}87 - 763{,}12\right) = -261{,}8\frac{кДж}{кг}$$

$$\Delta u_{4-1} = C_v\left(T_1 - T_4\right) = 0{,}7227\left(308 - 400{,}87\right) = -67{,}12\frac{кДж}{кг}$$

1.5.3. Определяем удельную работу и удельную теплоту цикла

$$l_{1-2} = C_{\ v}\left(T_1 - T_2\right) = 0,7227\left(308 - 526,29\right) = -157,76\frac{кДж}{кг}$$

$$l_{2-3} = 0, так\ как\ процесс\ изохорный$$

$$l_{3-4} = C_{\ v}\left(T_3 - T_4\right) = 0,7227\left(763,12 - 400,87\right) = 261,8\frac{кДж}{кг}$$

$$l_{4-1} = R\left(T_1 - T_4\right) = 0,287\left(308 - 400,87\right) = -26,65\frac{кДж}{кг}$$

$$q_{1-2} = 0, так\ как\ процесс\ адиабатный$$

$$q_1 = q_{2-3} = C_{\ v}\left(T_3 - T_2\right) = 0,7227\left(763,12 - 526,29\right) = 171,16\frac{кДж}{кг}$$

$$q_{9-4} = 0, так\ как\ процесс\ адиабатный$$

$$q_2 = q_{4-1} = C_{\ p}\left(T_1 - T_4\right) = 1,012\left(308 - 400,87\right) = -93,98\frac{кДж}{кг}$$

1.5.4. Определяем полезную работу и полезную теплоту

$$l_{пол} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-1} = -157,76 + 261,8 - 26,65 = 77,39\frac{кДж}{кг}$$

$$q_{пол} = q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-4} + q_{4-1}$$

$$q_{пол} = 0 + 171{,}16 + 0 - 93{,}98 = 77{,}18\frac{кДж}{кг}$$

В соответствии с первым законом термодинамики для циклов

$$l_{пол} = q_{пол}$$

$$77{,}39\frac{кДж}{кг} = 77{,}18\frac{кДж}{кг}$$

Результаты расчетов представим в таблице 13.

Таблица 13. Результаты расчета процессов цикла газотурбинной установки

Процесс	n	$C, \frac{кДж}{кг \cdot К}$	$\Delta s\ , \frac{кДж}{кг \cdot К}$	$\Delta h, \frac{кДж}{кг}$	$\Delta u, \frac{кДж}{кг}$	$l, \frac{кДж}{кг}$	$q, \frac{кДж}{кг}$
1-2	1,4	0	0	220,9	157,76	-157,76	0
2-3	–∞	0,7227	0,27	239,67	171,16	0	171,16
3-4	1,4	0	0	-366,6	-261,8	261,8	0
4-1	0	1,012	-0,27	-93,38	-67,12	-26,65	-93,98

1.5.5. Определяем термический кпд цикла

Так как в этом цикле работа расширения больше работы сжатия, то этот цикл относится к прямым термодинамическим циклам. Коэффициентом эффективности таких циклов является термический кпд, который рассчитывается по формуле

$$\eta_t = \frac{q_0}{q_1} = \frac{77{,}18}{171{,}16} = 0{,}45$$

Сравниваем термический кпд данного цикла с кпд цикла Карно

$$\eta_{tКарно} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{308}{763{,}12} = 0{,}6$$

Следовательно, цикл Карно более совершенен, чем рассматриваемый цикл.

1.5.6. Определяем параметры промежуточных точек и построение процессов в PV-координатах.

Для определения параметров промежуточных точек процессов, составляющих цикл, задаемся значениями объемов V_x и вычисляем соответствующие им давления P_x. Полученные результаты сведем в таблицу 14.

Процесс 1-2 $P_1\upsilon_1^k = P_x\upsilon_x^k \Rightarrow P_x = P_1 \cdot \left(\frac{\upsilon_1}{\upsilon_x}\right)^k = 0{,}956 \cdot \left(\frac{0{,}916}{\upsilon_x}\right)^{1.4}$

$\upsilon_2 \le \upsilon_x \le \upsilon_1 \quad 0{,}24 \le \upsilon_x \le 0{,}916$

Процесс 3-4 $P_3\upsilon_3^k = P_y\upsilon_y^k \Rightarrow P_y = P_3 \cdot \left(\frac{\upsilon_3}{\upsilon_y}\right)^k = 9{,}15 \cdot \left(\frac{0{,}24}{\upsilon_y}\right)^{1{,}4}$

$\upsilon_3 \le \upsilon_y \le \upsilon_4 \quad 0{,}24 \le \upsilon_y \le 1{,}2$

Таблица 14. Параметру промежуточных точек процессов 1-2 и 3-4

Процесс	$\upsilon_x, \frac{м^3}{кг}$	P_x, бар
1-2	0,3	4,56
	0,4	3,05
	0,5	2,23
	0,7	1,39
3-4	0,3	6,69
	0,5	3,27
	0,7	2,04
	0,9	1,44

Принимаем масштаб $\mu_p = 0{,}5\frac{бар}{см}$, $\mu_p = 0{,}05\frac{м^3}{кг \cdot см}$

1.5.7. Определяем параметры промежуточных точек и построение процессов в TS-координатах.

Задаемся первоначальным значением энтропии $S_0 = 0{,}2\frac{кДж}{кг \cdot К}$ и определяем значение энтропии в характерных точках цикла. Результаты расчетов представлены в таблице 15.

Таблица 15. Параметры характерных точек цикла в TS-координатах

Точка	1	2	3	4
T, $К$	308	526,29	763,12	400,87
$S, \frac{кДж}{кг \cdot К}$	0,2	0,2	0,47	0,47
$\Delta S, \frac{кДж}{кг \cdot К}$	-0,27	0	0,27	0	-0,27

Для построения цикла в TS-координатах определяем параметры промежуточных точек процессов 2-3 и 4-1. Результаты вычислений приведены в таблице 16.

$$\Delta S_{2-x} = C_v \ln\frac{T_x}{T_2} = 0,7227 \ln\frac{T_x}{526,29}$$

$$T_2 \le T_x \le T_3 \quad 526,29 \le T_x \le 763,12$$

$$\Delta S_{4-y} = C_p \ln\frac{T_y}{T_4} = 1,012 \ln\frac{T_y}{400,8}$$

$$T_1 \le T_y \le T_4 \quad 308 \le T_y \le 400,8$$

Таблица 16. Параметры промежуточных точек процессов 2-3 и 4-1

Процесс	T, К	$\Delta S, \frac{кДж}{кг \cdot К}$	$S, \frac{кДж}{кг \cdot К}$
2-3	550	0,03	0,23
	600	0,09	0,29
	650	0,15	0,35
	700	0,21	0,51
4-1	320	-0,23	0,24
	340	-0,17	0,3
	360	-0,11	0,36
	380	-0,05	0,42

Принимаем масштаб $\mu_T = 25\frac{К}{см}$, $\mu_S = 0,025\frac{кДж}{кг \cdot К \cdot см}$

Используя данный масштаб, строим цикл и пучки процессов в PV- и TS-координатах. Используя данные табл.13, строим графики трансформации теплоты

Графическое изображение рассматриваемого цикла в PV- и TS-координатах представлено на листе графической части работы (рисунок 22)

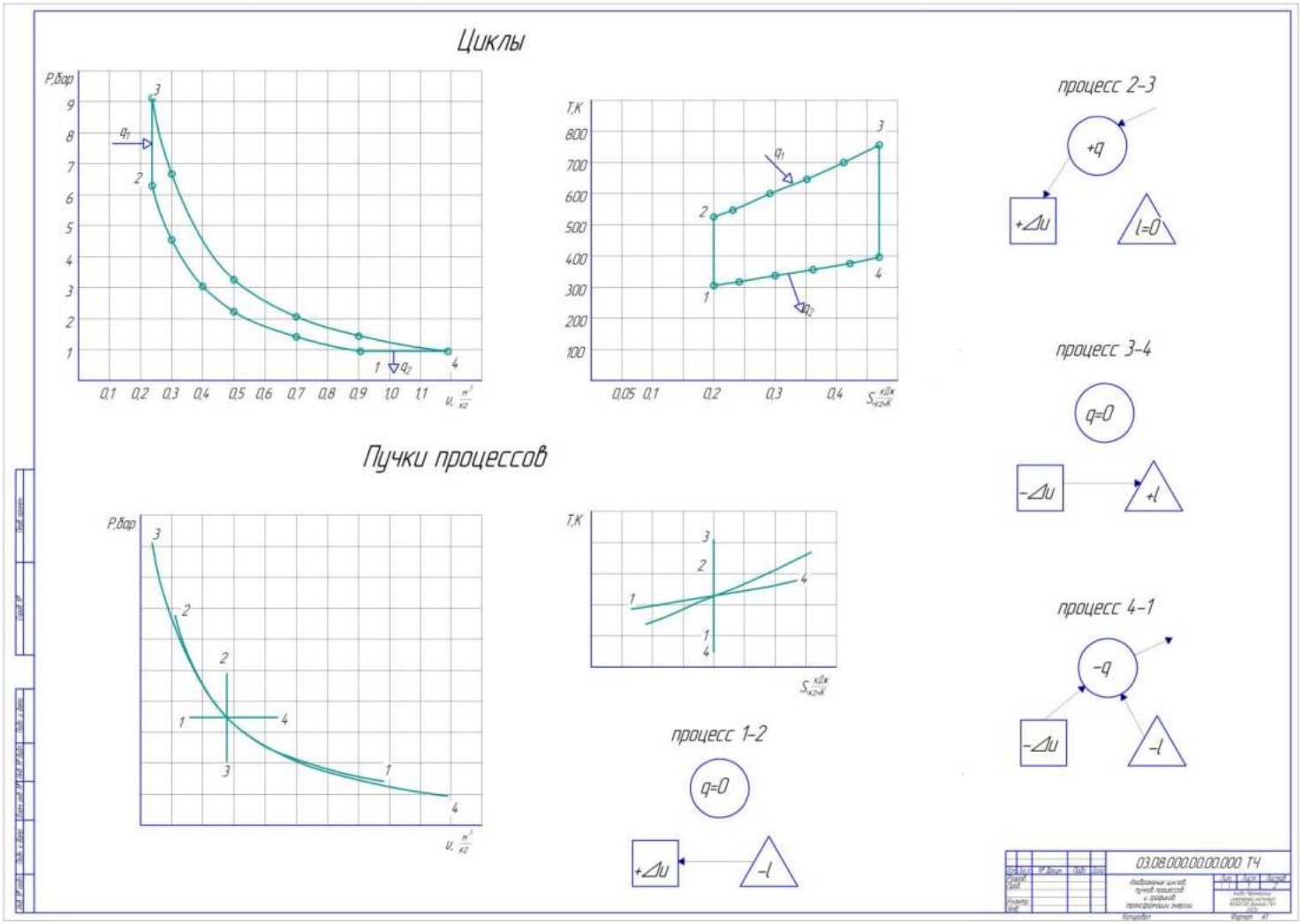


Рисунок 22 – Изображение циклов, пучков процессов и графиков трансформации теплоты для цикла ГТУ с подводом теплоты при постоянном объеме

1.6. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ №1 (ПРОИЗВОЛЬНЫЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ)

Задача 1.6.1. Рассчитать произвольный термодинамический цикл, представленный на рисунке. Изобразить на листе формата А1 данный цикл в P-V и T-S координатах, пучки процессов и графики трансформации энергии в каждом процессе.

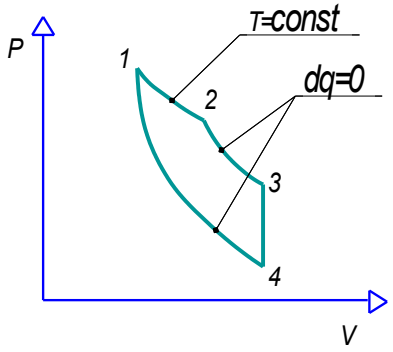


Рисунок 23 – Произвольный термодинамический цикл

P_1=50бар; P_2=18бар; t_1=300^{0}C; υ_3=0,2м^3/кг
Рабочее тело-1кг воздуха

1.6.1. Определяем параметры характерных точек цикла

Точка 1 $P_1\upsilon_1 = RT_1$

$$T_1 = 300 + 273 = 573K$$

$$\upsilon_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 573}{50 \cdot 10^5} = 0{,}0329 \frac{м^3}{кг}$$

Точка 2. Процесс 1-2 – изотермическое расширение

$$T_1 = T_2 = 573K$$

$$P_1\upsilon_1 = P_2\upsilon_2 \Rightarrow \upsilon_2 = \upsilon_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2}\right) = 0{,}0329 \cdot \left(\frac{50}{18}\right) = 0{,}0914 \frac{м^3}{кг}$$

Точка 3. Процесс 2-3 – адиабатное расширение

$$P_2\upsilon_2^k = P_3\upsilon_3^k \Rightarrow P_3 = P_2\left(\frac{\upsilon_2}{\upsilon_3}\right)^k = 18\left(\frac{0{,}0914}{0{,}2}\right)^{1.4} = 6{,}01бар$$

$$T_2\upsilon_2^{k-1} = T_3\upsilon_3^{k-1} \Rightarrow T_3 = T_2\left(\frac{\upsilon_2}{\upsilon_3}\right)^{k-1} = 573\left(\frac{0{,}0914}{0{,}2}\right)^{1.4-1} = 419K$$

Точка 4. Процесс 3-4 – изохорный отвод теплоты

$$\upsilon_3 = \upsilon_4 = 0{,}2\frac{м^3}{кг}$$

$$P_1\upsilon_1^k = P_4\upsilon_4^k \Rightarrow P_4 = P_1\left(\frac{\upsilon_1}{\upsilon_4}\right)^k = 50\left(\frac{0{,}0329}{0{,}2}\right)^{1.4} = 4бар$$

$$T_1\upsilon_1^{k-1} = T_4\upsilon_4^{k-1} \Rightarrow T_4 = T_1\left(\frac{\upsilon_1}{\upsilon_4}\right)^{k-1} = 573\left(\frac{0{,}0329}{0{,}2}\right)^{1.4-1} = 278{,}37К$$

Значения параметров характерных точек цикла заносим в таблицу 17.

Таблица 17. Параметры угловых точек цикла

Точка	1	2	3	4
P, бар	50	18	6,01	4
$\upsilon, \frac{м^3}{кг}$	0,0329	0,0914	0,2	0,2
T, К	573	573	419	278,37

1.6.2. Определяем характеристики процессов

Определяем показатель политропы

$$n_{1-2} = \frac{\ln\frac{P_1}{P_2}}{\ln\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}} = \frac{\ln\frac{50}{18}}{\ln\frac{0{,}0914}{0{,}0329}} = \frac{1{,}021}{1{,}021} = 1$$

$$n_{2-3} = \frac{\ln\frac{P_2}{P_3}}{\ln\frac{\upsilon_3}{\upsilon_2}} = \frac{\ln\frac{18}{6{,}01}}{\ln\frac{0{,}2}{0{,}0914}} = \frac{1{,}097}{0{,}783} = 1{,}4$$

$$n_{3-4} = \frac{\ln\frac{P_3}{P_4}}{\ln\frac{\upsilon_4}{\upsilon_3}} = \frac{\ln\frac{4}{6{,}01}}{\ln\frac{0{,}2}{0{,}2}} = \frac{-0{,}407}{0} = \infty$$

$$n_{4-1} = \frac{\ln\frac{P_4}{P_1}}{\ln\frac{\upsilon_1}{\upsilon_4}} = \frac{\ln\frac{4}{50}}{\ln\frac{0{,}0329}{0{,}2}} = \frac{-2{,}526}{-1{,}805} = 1{,}4$$

Определяем удельные массовые теплоемкости по формуле/1/

$$C = C_V \frac{n-k}{n-1}$$

Тогда

$$C_{1-2} = 0{,}7227 \cdot \frac{1-1{,}4}{1-1} = \textit{не имеет смысла}$$

$$C_{2-3} = 0{,}7227 \cdot \frac{1{,}4-1{,}4}{1{,}4-1} = 0$$

$$C_{3-4} = 0{,}7227 \cdot \frac{\infty-1{,}4}{\infty-1} = 0{,}7227\ \frac{кДж}{кг \cdot К}$$

$$C_{4-1} = 0{,}7227 \cdot \frac{1{,}4-1{,}4}{1{,}4-1} = 0$$

Определяем приращение энтропии для процессов 2-3, 3-4, 4-1 по формуле/1/

$$\Delta s = C \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$\Delta s_{2-3} = 0 \cdot \ln \frac{419}{573} = 0$$

$$\Delta s_{4-1} = 0{,}7227 \cdot \ln \frac{278{,}37}{419} = -0{,}296\ \frac{кДж}{кг \cdot К}$$

$$\Delta s_{4-1} = 0 \cdot \ln \frac{573}{278{,}37} = 0$$

Определяем приращение энтропии для процесса 1-2

$$\Delta s_{1-2} = R \cdot \ln \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} = 287 \cdot \ln \frac{0{,}0914}{0{,}0329} = 293{,}25\ \frac{Дж}{кг \cdot К} = 0{,}294\ \frac{кДж}{кг \cdot К}$$

Определяем приращение удельной энтальпии по формуле

$$\Delta h_{1-2} = C_p \left(T_2 - T_1\right)$$

$$\Delta h_{1-2} = 1{,}012 \cdot \left(573-573\right) = 0$$

$$\Delta h_{2-3} = 1{,}012 \cdot \left(419-573\right) = -155{,}85\ \frac{кДж}{кг}$$

$$\Delta h_{3-4} = 1{,}012 \cdot \left(278{,}37-419\right) = -142{,}32\ \frac{кДж}{кг}$$

$$\Delta h_{4-1} = 1{,}012 \cdot \left(573-278{,}37\right) = 298{,}17\ \frac{кДж}{кг \cdot К}$$

Определяем приращение удельной внутренней энергии

$$\Delta u_{1-2} = 0{,}7227 \cdot (573 - 573) = 0$$

$$\Delta u_{2-3} = 0{,}7227 \cdot (419 - 573) = -111{,}32 \frac{кДж}{кг}$$

$$\Delta u_{3-4} = 0{,}7227 \cdot (278{,}37 - 419) = -101{,}63 \frac{кДж}{кг}$$

$$\Delta u_{4-1} = 0{,}7227 \cdot (573 - 278{,}37) = 212{,}93 \frac{кДж}{кг \cdot К}$$

1.6.3. Определяем удельную работу и удельную теплоту

$$l_{1-2} = RT \ln \frac{P_1}{P_2} = 287 \cdot 573 \cdot \ln \frac{50}{18} = 168012 \frac{Дж}{кг} = 168{,}01 \frac{кДж}{кг}$$

$$l_{2-3} = \frac{R(T_2 - T_3)}{k-1} = \frac{287(573 - 419)}{1.4 - 1} = 110495 \frac{Дж}{кг} = 110{,}5 \frac{кДж}{кг}$$

$$l_{3-4} = 0$$

$$l_{4-1} = \frac{R(T_4 - T_1)}{k-1} = \frac{287(278{,}37 - 573)}{1.4 - 1} = -211397 \frac{Дж}{кг} = -211{,}4 \frac{кДж}{кг}$$

$$q_{1-2} = l_{1-2} = 168{,}01 \frac{кДж}{кг}$$

$$q_{2-3} = 0$$

$$q_{3-4} = 0{,}7227 \cdot (278{,}37 - 419) = -101{,}63 \frac{кДж}{кг}$$

$$q_{4-1} = 0$$

1.6.4. Определяем полезную работу и полезную теплоту

$$l_{пол} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-1} = 168{,}01 + 110{,}5 + 0 - 211{,}4 = 67{,}11 \frac{кДж}{кг}$$

$$q_{пол} = q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-4} + q_{4-1} = 168{,}01 + 0 - 101{,}63 + 0 = 66{,}38 \frac{кДж}{кг}$$

В соответствии с первым законом термодинамики для циклов

$$l_{пол} = q_{пол},\ 67{,}11 \frac{кДж}{кг} \approx 66{,}38 \frac{кДж}{кг}$$

Результаты расчетов представим в таблице 18.

Таблица 18. Результаты расчета процессов цикла

Процесс	n	$C, \frac{кДж}{кг \cdot К}$	$\Delta s, \frac{кДж}{кг \cdot К}$	$\Delta h, \frac{кДж}{кг}$	$\Delta u, \frac{кДж}{кг}$	$l, \frac{кДж}{кг}$	$q, \frac{кДж}{кг}$
1-2	1	Не имеет смысла	0,294	0	0	168,01	168,01
2-3	1,4	0	0	-155,85	-111,32	110,5	0
3-4	∞	0,7227	-0,296	-142,32	-101,63	0	-101,63
4-1	1,4	0	0	298,17	212,93	-211,4	0

1.6.5. Определяем термический кпд цикла

Так как в этом цикле работа расширения больше работы сжатия, то этот цикл относится к прямым термодинамическим циклам. Коэффициентом эффективности таких циклов является термический кпд, который рассчитывается по формуле

$$\eta_t = \frac{q_{пол}}{q_1} = \frac{66,37}{168,01} = 0,395$$

Сравниваем термический кпд данного цикла с кпд цикла Карно

$$\eta_{t\ Карно} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{278,37}{573} = 0,514$$

Следовательно, цикл Карно более совершенен, чем рассматриваемый цикл.

1.6.6. Определяем параметры промежуточных точек и строим цикл в PV-координатах.

Для определения параметров промежуточных точек процессов, составляющих цикл, задаемся значениями объемов V_x и вычисляем соответствующие им давления P_x. Полученные результаты сведем в таблицу 19.

Для процесса 1-2 $P_1\upsilon_1 = P_x\upsilon_x \Rightarrow P_x = P_1 \cdot \left(\frac{\upsilon_1}{\upsilon_x}\right) = 50 \cdot \left(\frac{0,0329}{\upsilon_x}\right)$

$$\upsilon_1 \le \upsilon_x \le \upsilon_2 \qquad 0,0329 \le \upsilon_x \le 0,0914$$

Для процесса 2-3 $P_2\upsilon_2^k = P_x\upsilon_x^k \Rightarrow P_x = P_2 \cdot \left(\frac{\upsilon_2}{\upsilon_x}\right)^k = 18 \cdot \left(\frac{0,0914}{\upsilon_x}\right)^{1.4}$

$$\upsilon_2 \le \upsilon_x \le \upsilon_3 \qquad 0{,}0914 \le \upsilon_x \le 0{,}2$$

Для процесса 4-1 $P_4\upsilon_4^k = P_x\upsilon_x^k \Rightarrow P_x = P_4 \cdot \left(\frac{\upsilon_4}{\upsilon_x}\right)^k = 4 \cdot \left(\frac{0{,}2}{\upsilon_x}\right)^{1.4}$

$$\upsilon_2 \le \upsilon_x \le \upsilon_3 \qquad 0{,}0329 \le \upsilon_x \le 0{,}2$$

Принимаем масштаб $\mu_p = 2{,}5\frac{бар}{см}$, $\mu_v = 0{,}01\frac{м^3}{кг \cdot см}$

Таблица 19. Параметры промежуточных точек процессов цикла в PV-координатах.

Процесс	$\upsilon_x, \frac{м^3}{кг}$	P_x, бар
1-2	0,04	41,12
	0,05	32,9
	0,08	20,56
2-3	0,12	12,3
	0,15	9,00
	0,17	7,55
4-1	0,05	27,85
	0,1	10,56
	0,15	5,98

1.6.7. Определяем параметры промежуточных точек и строим цикл в TS-координатах.

Для построения цикла в TS-координатах задаемся начальным значением энтропии $S_0 = 0\frac{кДж}{кг \cdot К}$.Определяем параметры угловых точек цикла. Результаты расчетов заносим в таблицу 20.

Таблица 20. Параметры угловых точек цикла в TS-координатах

Точка	1	2	3	4
T, $К$	573	573	419	278,37
$S, \frac{кДж}{кг \cdot К}$	0	0,294	0,294	0,002

$\Delta S, \frac{кДж}{кг \cdot К}$	0	0,294	0	-0,296	0

Для определения параметров промежуточных точек процессов, составляющих цикл, задаемся значениями объемов T_x и вычисляем соответствующие им давления ΔS_x. Полученные результаты сведем в таблицу 21

$$\Delta S_{3-x} = C \ln \frac{T_x}{T_3} = 0{,}7227 \ln \frac{T_x}{419}$$

$$T_4 \le T_x \le T_3 \qquad 278{,}37 \le T_x \le 419$$

Таблица 21. Параметры промежуточных точек процессов цикла в TS-координатах.

Процесс	T, К	$\Delta S, \frac{кДж}{кг \cdot К}$	$S, \frac{кДж}{кг \cdot К}$
3-4	300	-0,241	0,053
	350	-0,13	0,164
	400	-0,033	0,261

Принимаем масштаб $\mu_T = 25 \frac{К}{см}$, $\mu_S = 0{,}025 \frac{кДж}{кг \cdot К \cdot см}$

Используя данные таблицы 21, строим графики трансформации теплоты в процессах цикла.

Графическое изображение рассматриваемого цикла в PV- и TS-координатах и графики трансформации теплоты представлены на листе графической части работы (рисунок 24).

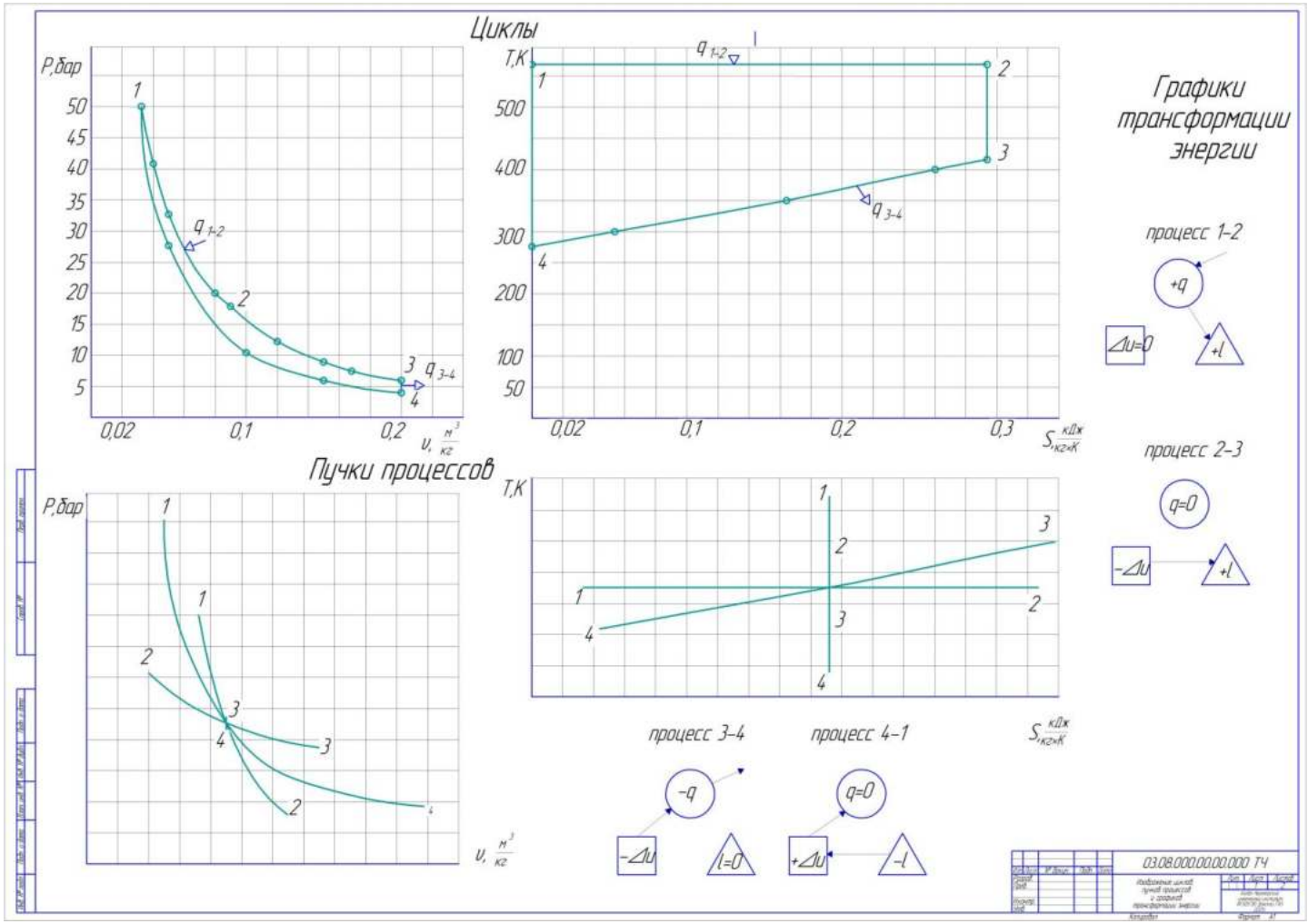


Рисунок 24 – Изображение циклов, пучков процессов и графиков трансформации теплоты для произвольного термодинамического цикла

1.7. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ - ЦИКЛ ДВС СО СМЕШАННЫМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

Задача 1.7.1 Определить параметры рабочего тела в характерных точках идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом тепла (цикл Тринклера), если известны давление P_1 и температура t_1 рабочего тела в начале сжатия. Степень сжатия ε, степень повышения давления λ, степень предварительного расширения ρ заданы.

Определить работу, получаемую за цикл, его термический КПД и изменение энтропии отдельных процессов цикла. За рабочее тело принять воздух, считая теплоемкость его в расчетном интервале температур постоянной.

1.7.2 Исходные данные к расчету

Таблица 22 Исходные данные к расчету

p_1, бар	t_1, °С	Степень сжатия, ε	Степень повышения давления, λ	Степень предварительного расширения, ρ
0,805	42	16,2	1,22	1,62

Рабочее тело – воздух – двухатомный газ

R= 287 Дж/кг·К

k=1,4.

Массовая изохорная теплоемкость

$c_V = \mu c_V/\mu = 20{,}93/28{,}96 = 0{,}7227$ кДж/кг·К.

Массовая изобарная теплоемкость

$c_p = \mu c_p/\mu = 29{,}31/28{,}96 = 1{,}012$ кДж/кг·К.

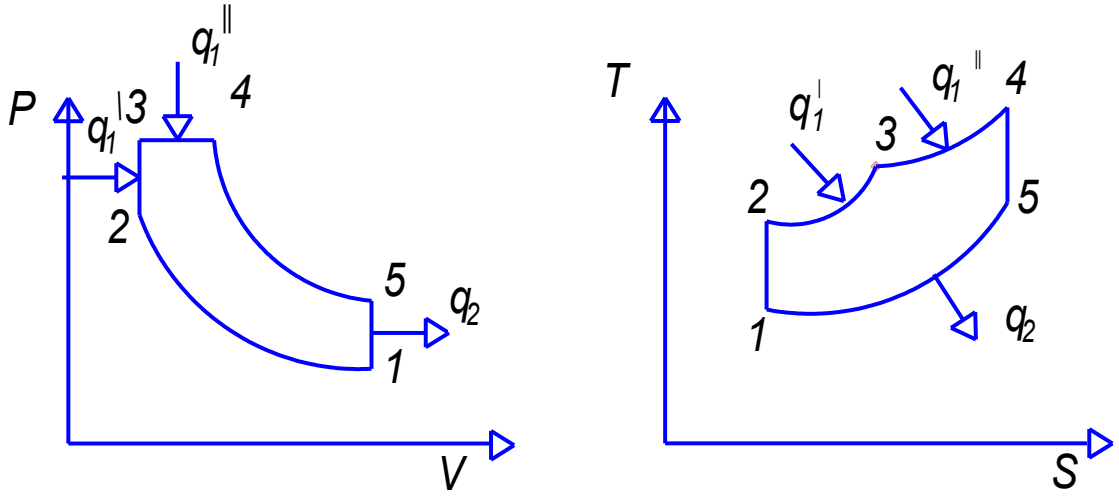


Рисунок 25 – Принципиальная схема цикла Тринклера

РЕШЕНИЕ

1.7.2. Определяем параметры характерных точек цикла

Процесс 1-2 – адиабатное сжатие рабочего тела

Для точки 1 p_1 = 0,805 бар

$T_1 = t_1 + 273 = 42 + 273 = 315$ К.

$$p_1 v_1 = RT_1 \Rightarrow v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 315}{0{,}805 \cdot 10^5} = 1{,}123 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon};\ v_2 = \frac{1{,}123}{16{,}2} = 0{,}069 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$p_1 v_1^{\,k} = p_2 v_2^{\,k} \Rightarrow p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = p_1 \varepsilon^k = 0{,}805 \cdot 16{,}2^{1{,}4} = 39{,}73 \quad \text{бар}$$

$$T_1 v_1^{\,k-1} = T_2 v_2^{\,k-1} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = T_1 \varepsilon^{k-1} = 315 \cdot 16{,}2^{0{,}4} = 959{,}69 \text{ К}$$

Процесс 2-3 – изохорный подвод тепла (горение легких фракций топлива)

$v_2 = v_3 = 0{,}069$ м^3/кг

$p_3 = p_2 \lambda = 39{,}73 \cdot 1{,}22 = 48{,}47$ бар

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_2} T_2 \lambda = 959{,}69 \cdot 1{,}22 = 1170{,}82 \text{ К}$$

Процесс 3-4 – изобарный подвод тепла (горение тяжелых фракций топлива)

$p_4=p_3$=48,47 бар

$v_4=v_3\rho$=0,069·1,62 = 0,112 м^3/кг

$$\frac{T_4}{T_3}=\frac{v_4}{v_3}\Rightarrow T_4=T_3\frac{v_4}{v_3}T_3\rho=1170{,}82\cdot1{,}62=1896{,}73\ \text{К}$$

Процесс 4-5 – адиабатное расширение рабочего тела (рабочий ход поршня)

$v_5=v_1$=1,123 м^3/кг

$$p_4v_4{}^k=p_5v_5{}^k\Rightarrow p_5=p_4\left(\frac{v_4}{v_5}\right)^k=48{,}47\left(\frac{0{,}112}{1{,}123}\right)^{1{,}4}=1{,}92\quad\text{бар}$$

$$T_4v_4{}^{k-1}=T_5v_5{}^{k-1}\Rightarrow T_5=T_4\left(\frac{v_4}{v_5}\right)^{k-1}=1896{,}73\left(\frac{0{,}112}{1{,}123}\right)^{0{,}4}=754{,}29\ \text{К}$$

Процесс 5-1 – изохорный отвод тепла (выброс отработавших газов)

Полученные данные сводим в таблицу 23.

Таблица 23 - Параметры характерных точек цикла

Точка	1	2	3	4	5
p, бар	0,805	39,73	48,47	48,47	1,92
v, м^3/кг	1,123	0,069	0,069	0,112	1,123
T, К	315	959,69	1170,82	1896,73	754,29

Для построения цикла в pv - координатах необходимо найти параметры промежуточных точек процессов 1-2 и 4-5.

Для процесса 1-2

$$p_1v_1{}^k=p_xv_x{}^k\Rightarrow p_x=p_1\left(\frac{v_1}{v_x}\right)^k=0{,}805\left(\frac{1{,}123}{V_x}\right)^{1{,}4}$$

$v_2<v_x<v_1$; 0,069<v_x<1,123

Таблица 24 - Параметры промежуточных точек процесса 1-2

v_x, м^3/кг	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
p_x, бар	23,79	5,11	2,5	1,56	1,1

Для процесса 4-5

$$p_4 v_4^{\,k} = p_y v_y^{\,k} \Rightarrow p_y = p_4\left(\frac{v_4}{v_y}\right)^k = 48{,}47\left(\frac{0{,}112}{V_y}\right)^{1{,}4}$$

$v_4 < v_y < v_5$; $0{,}112 < v_y < 1{,}123$

Таблица 25 - Параметры промежуточных точек процесса 4-5

v_y, м^3/кг	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
p_y, бар	21,52	8,16	4,62	3,09	2,26

1.7.3. Определяем работу, получаемую за цикл

$l_{1\text{-}2} = -\Delta U_{1\text{-}2} = c_V(T_1\text{-}T_2) = 0{,}7227(315\text{-}959{,}69) = -465{,}92$ кДж/кг

Процесс 2-3 изохорный, поэтому $l_{2\text{-}3} = 0$.

$$l_{3\text{-}4} = \frac{R(T_3 - T_4)}{n-1} = R(T_4\text{-}T_3) = 0{,}287(1896{,}73\text{-}1170{,}82) = 208{,}33 \text{ кДж/кг}$$

$l_{4\text{-}5} = -\Delta U_{4\text{-}5} = c_V(T_4\text{-}T_5) = 0{,}7227(1896{,}73\text{-}754{,}29) = 825{,}64$ кДж/кг

Процесс 5-1 изохорный, поэтому $l_{5\text{-}1} = 0$.

Работа, получаемая от цикла, равна

$$l_{\text{цикл}} = \Sigma l_i = l_{1-2} + l_{3-4} + l_{4-5} = -465{,}92 + 208{,}33 + 825{,}64 = 568{,}05 \quad \text{кДж/кг}$$

1.7.4. Определяем полезную теплоту

Процесс 1-2 адиабатный, поэтому $q_{1\text{-}2} = 0$.

$q_{2\text{-}3} = c_V(T_3\text{-}T_2) = 0{,}7227(1170{,}82\text{-}959{,}69) = 152{,}58$ кДж/кг

$q_{3\text{-}4} = c_p(T_4\text{-}T_3) = 1{,}012(1896{,}73\text{-}1170{,}82) = 734{,}62$ кДж/кг

Процесс 4-5 адиабатный, поэтому $q_{4\text{-}5} = 0$.

$q_{5\text{-}1} = c_V(T_1\text{-}T_5) = 0{,}7227(3115\text{-}754{,}29) = -317{,}47$ кДж/кг

Теплота, подведенная к системе, будет равна

$q_{под} = q_{2\text{-}3} + q_{3\text{-}4} = 152{,}58+734{,}62 = 887{,}2$ кДж/кг

Теплота, отведенная от системы, равна

$q_{отв} = q_{5\text{-}1} = -317{,}47$ кДж/кг

Полезная теплота равна

$q_o = q_{под} - |q_{отв}| = 887,2-317,47 = 569,73$ кДж/кг.

В соответствии с первым законом термодинамики

$l_ц = q_o$; следовательно 568,05≈569,73 кДж/кг.

1.7.5. Определяем термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{q_{под} - |q_{отв}|}{q_{под}} = 1 - \frac{|q_{отв}|}{q_{под}} = 1 = \frac{|317,47|}{887,2} = 0,642.$$

1.7.6. Определяем приращение энтропии процессов цикла

Процесс 1-2 адиабатный, поэтому $\Delta S_{1-2} = 0$.

$$\Delta S_{2-3} = c_V \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,7227 \ln \frac{1170,82}{959,69} = 0,143 \quad \text{кДж/кгК}$$

$$\Delta S_{3-4} = c_P \ln \frac{T_4}{T_3} = 1,012 \ln \frac{1896,73}{1170,82} = 0,488 \quad \text{кДж/кгК}$$

Процесс 4-5 адиабатный, поэтому $\Delta S_{4-5} = 0$.

$$\Delta S_{5-1} = c_V \ln \frac{T_1}{T_5} = 0,7227 \ln \frac{315}{754,29} = -0,631 \quad \text{кДж/кгК}$$

Задаемся начальным значением энтропии S_o=0,5 кДж/кг·К и расчетные данные сводим в таблицу 26.

Таблица 26 - Параметры характерных точек цикла в *TS*-координатах

Точка	1	2	3	4	5
T, К	315	959,69	1170,82	1896,73	754,29
$S=S_1+\Delta S$, кДж/кг·К	0,5	0,5	0,643	1,131	1,131
ΔS, кДж/кг·К	-0,631	0	0,143	0,488	0	-0,631

Для построения цикла в *TS*-координатах необходимо найти параметры промежуточных точек процессов 2-3, 3-4, 5-1.

Процесс 2-3

$$\Delta S_{2-x} = c_V \ln \frac{T_x}{T_2} = 0{,}7227 \ln \frac{T_x}{959{,}69}$$

$T_2 < T_x < T_3$; 959,69<T_x<1170,82

Таблица 27 - Параметры промежуточных точек процесса 2-3

T_x, К	1000	1080	1100	1120
ΔS_{2-x}, кДж/кг·К	0,03	0,085	0,099	0,112
$S_x = S_2 + \Delta S_{2-x}$, кДж/кг·К	0,53	0,585	0,599	0,612

Процесс 3-4

$$\Delta S_{3-y} = c_P \ln \frac{T_y}{T_3} = 1{,}012 \ln \frac{T_y}{1170{,}82}$$

$T_3 < T_y < T_4$; 1170,82<T_y<1896,73

Таблица 28 - Параметры промежуточных точек процесса 3-4

T_y, К	1300	1500	1600	1700
ΔS_{3-y}, кДж/кг·К	0,106	0,25	0,32	0,38
$S_y = S_3 + \Delta S_{3-y}$, кДж/кг·К	0,749	0,893	0,963	1,023

Процесс 5-1

$$\Delta S_{5-z} = c_V \ln \frac{T_z}{T_5} = 0{,}7227 \ln \frac{T_z}{754{,}29}$$

$T_1 < T_z < T_5$; 315<T_z<754,29

Таблица 29 - Параметры промежуточных точек процесса 5-1

T_z, К	400	500	600	700
ΔS_{5-z}, кДж/кг·К	-0,458	-0,297	-0,165	-0,053
$S_z = S_5 + \Delta S_{5-z}$, кДж/кг·К	0,673	0,834	0,966	1,078

Графическое изображение рассматриваемого цикла в PV- и TS-координатах и графики трансформации теплоты представлены на листе графической части работы (рисунок 26).

1.8. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЦИКЛА ОТТО

Задача 1.8.1 Определить значения приращения энтропии во всех процессах цикла с изохорным подводом теплоты (цикл Отто), если даны начальные параметры рабочего тела P_1 и V_1, степень сжатия **ε** и степень повышения давления **λ.** Рабочее тело - 1кг воздуха с постоянной теплоемкостью.

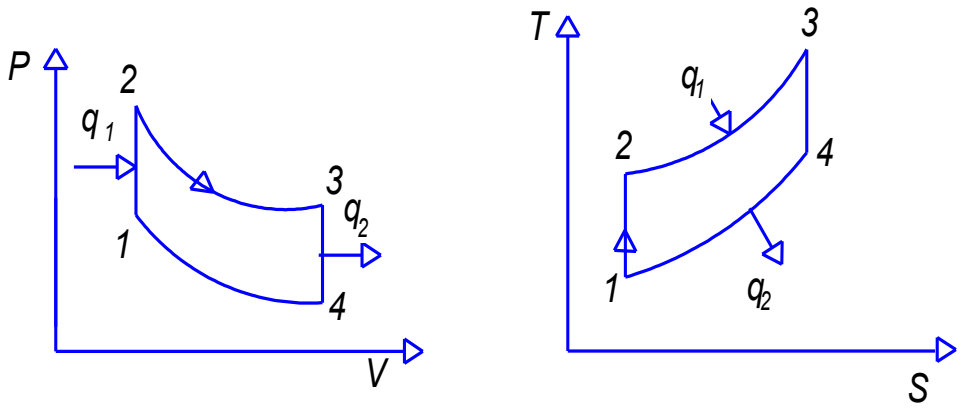


Рисунок 27-Схема работы цикла ДВС с подводом теплоты при V=const

1.8.2 Исходные данные

P_1=0,94бар

υ_1=0,8 м^3/кг

ε=7

λ=1,75

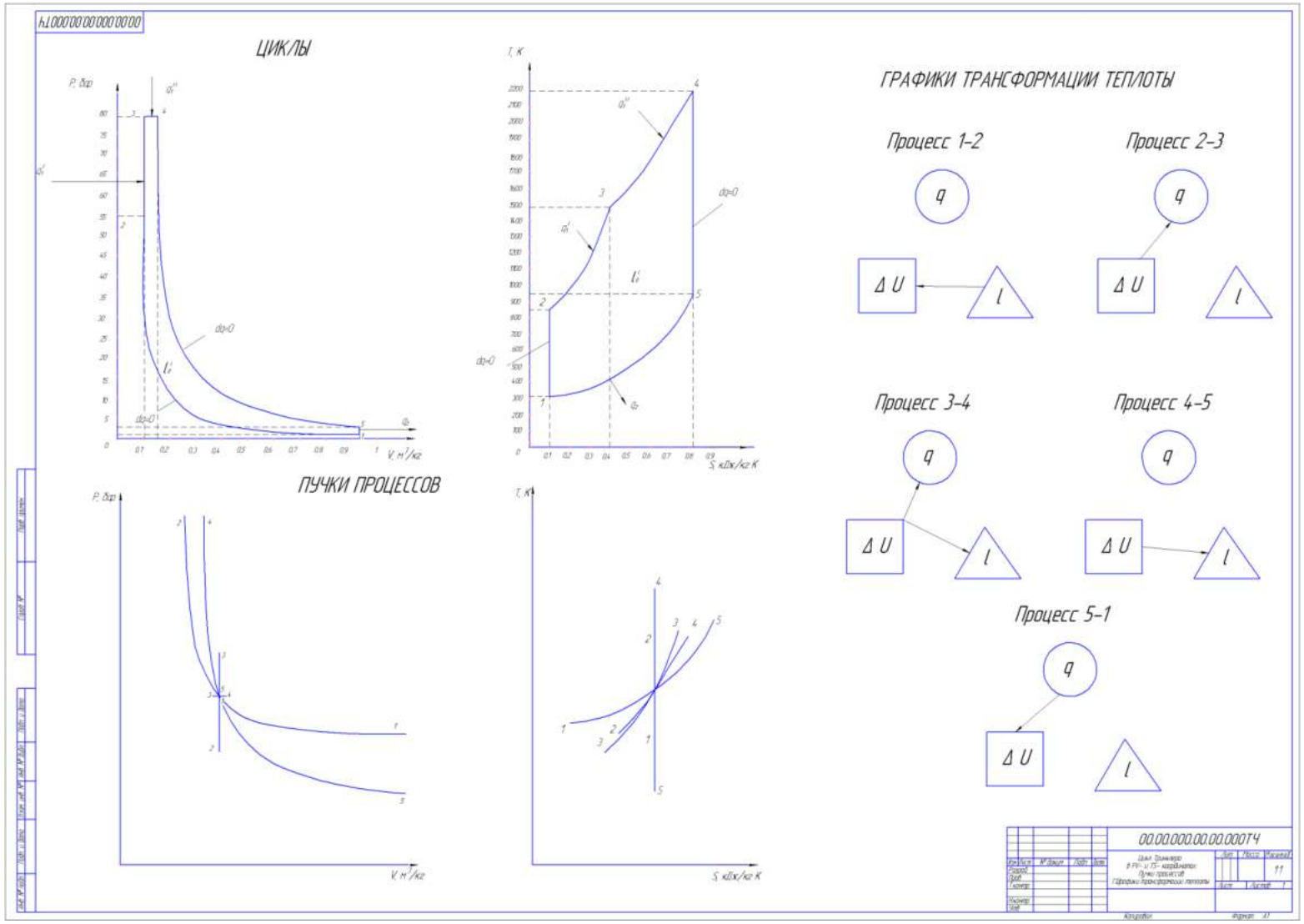


Рисунок 26 - Графическое изображение цикла Тринклера в PV- и TS-координатах и графики трансформации теплоты

РЕШЕНИЕ

1.8.3. Определяем температуру в угловых точках цикла.

В точке 1

$$P_1\upsilon_1 = RT_1 \Rightarrow T_1 = \frac{P_1\upsilon_1}{R} = \frac{0{,}94\cdot 10^5\cdot 0{,}8}{287} = 262K$$

В точке 2

$$T_1\upsilon_1^{k-1} = T_2\upsilon_2^{k-1} \Rightarrow T_2 = T_1\left(\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}\right)^{k-1} = T_1\cdot\varepsilon^{k-1} = 262\cdot 7^{1.4-1} = 570{,}61K$$

В точке 3

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} \Rightarrow T_3 = \frac{T_2P_3}{P_2} = T_2\cdot\lambda = 570{,}61\cdot 1.75 = 998{,}57K$$

В точке 4

$$T_1T_3 = T_2T_4 \Rightarrow T_4 = \frac{T_1T_3}{T_2} = \frac{262\cdot 998{,}57}{570{,}61} = 458{,}5K$$

1.8.3. Определяем приращение энтропии

$\Delta S_{1-2} = 0$, так как процесс адиабатный

$$\Delta S_{2-3} = C_v \ln\frac{T_3}{T_2} = 0.7227\ln\frac{998{,}57}{570{,}61} = 0{,}404\frac{кДж}{кг\cdot К}$$

$\Delta S_{2-3} = 0$, так как процесс адиабатный

$$\Delta S_{4-1} = C_v \ln\frac{T_1}{T_4} = 0.7227\ln\frac{262}{458{,}4} = -0.404\frac{кДж}{кг\cdot К}$$

1.9. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЦИКЛА КАРНО

Задача 1.9.1. 1кг воздуха совершает цикл Карно между температурами t_1 и t_2; наивысшее давление при этом P_1, а наинизшее-P_3. Определить параметры состояния воздуха в характерных точках, работу, термический кпд и количество подведенной и отведенной теплоты.

1.9.2. Исходные данные:

t_1=357^{0}C=630K

t_2=67^{0}C=340K;

P_1=29бар

P_3=1,4бар

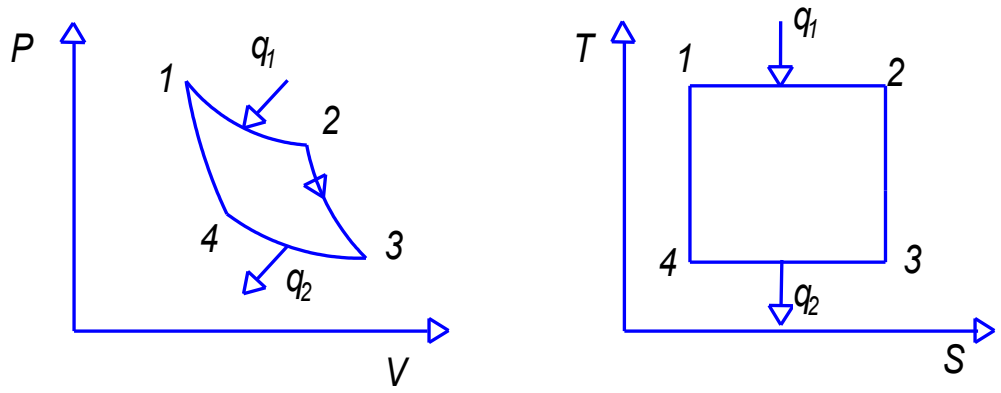


Рисунок 28 - Схема работы цикла Карно

РЕШЕНИЕ

1.9.3. Определяем удельный объем в точке 1

$$P_1\upsilon_1 = RT_1 \Rightarrow \upsilon_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287\cdot 630}{29\cdot 10^5} = 0{,}062\frac{м^3}{кг};$$

1.9.4. Определяем удельный объем в точке 3

$$P_3\upsilon_3 = RT_2 \Rightarrow \upsilon_3 = \frac{RT_2}{P_3} = \frac{287\cdot 340}{1{,}4\cdot 10^5} = 0{,}697\frac{м^3}{кг};$$

1.9.5. Определяем удельный объем и давление в точке 2

$$T_1\upsilon_2^{k-1} = T_2\upsilon_3^{k-1} \Rightarrow T_1^{\frac{1}{k-1}}\upsilon_2 = T_2^{\frac{1}{k-1}}\upsilon_3 \Rightarrow \upsilon_2 = \upsilon_3\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{k-1}} = 0.697\left(\frac{340}{630}\right)^{\frac{1}{1.4-1}} = 0{,}149\frac{м^3}{кг}$$

$$P_2\upsilon_2 = RT_1 \Rightarrow P_2 = \frac{RT_1}{\upsilon_2} = \frac{287\cdot 630}{0.149} = 1213490Па = 12{,}1бар;$$

1.9.6. Определяем удельный объем и давление в точке 4 из принципа соответствия

$$\upsilon_1\upsilon_3 = \upsilon_2\upsilon_4 \Rightarrow \upsilon_4 = \frac{\upsilon_1\upsilon_3}{\upsilon_2} = \frac{0.062 \cdot 0.697}{0.149} = 0.29\frac{м^3}{кг}$$

$$P_1P_3 = P_2P_4 \Rightarrow P_4 = \frac{P_1P_3}{P_2} = \frac{29 \cdot 1.4}{12{,}1} = 3{,}55бар$$

Полученные значения сведем в таблицу 30.

Таблица 30. Параметры характерных точек цикла

Параметр	1	2	**3**	4
P, бар	29	12,1	1,4	3,55
V, м^3/кг	0,062	0,149	0,697	0,29
T, K	630	630	340	340

1.9.7. Определяем термический кпд цикла

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{340}{630} = 0.46$$

1.9.8. Определяем количество отведенной и подведенной теплоты

$$q_1 = RT_1 \ln\frac{P_1}{P_2} = 287 \cdot 650 \cdot \ln\frac{29}{12{,}1} = 163062\frac{Дж}{кг} = 163{,}06\frac{кДж}{кг}$$

$$q_2 = RT_2 \ln\frac{P_3}{P_4} = 287 \cdot 340 \cdot \ln\frac{1{,}4}{3{,}55} = -90796\frac{Дж}{кг} = -90{,}8\frac{кДж}{кг}$$

1.9.9. Определяем совершенную за цикл работу

$$l_{1-2} = q_1 = 163{,}06\frac{кДж}{кг};$$

$$l_{2-3} = \frac{R(T_1 - T_2)}{k-1} = \frac{287(630-340)}{1.4-1} = 208075\frac{Дж}{кг} = 208{,}08\frac{кДж}{кг}$$

$$l_{3-4} = q_2 = -90{,}8\frac{кДж}{кг}$$

$$l_{4-1}=\frac{R(T_2-T_1)}{k-1}=\frac{287(340-630)}{1.4-1}=208075\frac{Дж}{кг}=208{,}08\frac{кДж}{кг}$$

$$l_{цикла}=l_{1-2}+l_{2-3}+l_{3-4}+l_{4-1}=163{,}06+208{,}08-90{,}8-208{,}08=72{,}26\frac{кДж}{кг}$$

1.10. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ПОЛИТРОПНЫЕ ПРОЦЕССЫ»

Задача 1.10.1. Определить конечную температуру углекислого газа массой ***m*=5*кг*** при сообщении ему теплоты ***Q*=150*кДж*** в изобарном процессе, если начальная температура газа составляет $t_1=10^0C$

РЕШЕНИЕ.

Определяем теплоемкость углекислого газа в изобарном процессе по формуле

$$C_p=\frac{\mu C_p}{\mu}=\frac{37{,}68}{44{,}01}=0{,}856\frac{кДж}{кг\cdot К}$$

где $\mu C_p=37{,}68\frac{кДж}{кмоль\cdot К}$ – мольная теплоемкость углекислого газа при постоянном давлении, принимается по данным табл.П.2 приложения Б

$\mu=44{,}01$–молекулярная масса газа, принимается по данным табл. П.2 приложения Б.

Количество теплоты, участвующей в изобарном процессе определится следующим образом

$$Q_p=mC_p(T_2-T_1)=mC_p(t_2-t_1)$$

Из данного выражения определяем искомую конечную температуру газа

$$t_2=\frac{Q_p}{mC_p}+t_1=\frac{150}{5\cdot 0{,}856}+10=35^0C$$

Задача 1.10.2. В герметично закрытом сосуде постоянного объема содержится азот. Какова масса азота, если при его нагревании от $t_1=50^0C$ до $t_2=500^0C$, если к сосуду подведена теплота в количестве $Q_v=700кДж$

РЕШЕНИЕ

Так как процесс протекает при постоянном объеме, то определяем теплоемкость азота в изохорном процессе по формуле

$$C_v = \frac{\mu C_v}{\mu} = \frac{20{,}93}{28{,}026} = 0{,}747 \frac{кДж}{кг \cdot К}$$

где $\mu C_v = 20{,}93 \frac{кДж}{кмоль \cdot К}$ – мольная теплоемкость углекислого газа при постоянном давлении, принимается по данным табл.П.3 приложения В

$\mu = 28{,}026$–молекулярная масса газа, принимается по данным табл. П.2 приложения Б

Количество теплоты, участвующей в изохорном процессе определится следующим образов (табл.1)

$$Q_v = mC_v(T_2 - T_1) = mC_v(t_2 - t_1)$$

Из данного выражения определяем искомую массу газа

$$m = \frac{Q_v}{C_v(t_2 - t_1)} = \frac{700}{0{,}747(500 - 50)} = 2{,}08 кг$$

Задача 1.10.3. При адиабатном расширении воздуха массой m_0**=0,1***кг* его температура уменьшилась на ΔT**=150***К*. Чему равна работа расширения и какое количество теплоты необходимо подвести к такому же количеству воздуха, чтобы получить такую же работу в изотермическом процессе. Показатель адиабаты для воздуха равен ***k=1,4***.

РЕШЕНИЕ

По таблице П.2 приложения Б находим газовую постоянную воздуха

$$R = 287 \frac{Дж}{кг \cdot К}$$

Используя формулы, приведенные в таблице 1, определяем работу расширения в адиабатном процессе, которая будет равна

$$L = \frac{mR(T_1 - T_2)}{k-1} = \frac{mR\Delta T}{k-1} = \frac{0{,}1 \cdot 287 \cdot 150}{1{,}4{,}-1} = 10736 Дж = 10{,}73 кДж$$

В изотермическом процессе величина работы равна величине подведенной теплоты. Следовательно, в изотермическом процессе количество подведенной теплоты будет равно $Q_t = 10{,}73 кДж$

Задача 1.10.4. Определить работу при изотермическом сжатии для **2 кг воздуха,** если начальное давление составляет **P_1=1МПа,** а конечное **P_2=5МПа.** Температура, при которой протекает процесс, равна **Т=300К**

РЕШЕНИЕ

По таблице П.2 приложения Б находим газовую постоянную воздуха

$$R = 287 \frac{Дж}{кг \cdot К}$$

По таблице 1 находим формулу работы для процесса изотермического сжатия

$$L = mRT \ln \frac{P_1}{P_2} = 2 \cdot 287 \cdot 300 \cdot \ln \frac{1}{5} = -277145 Дж = -277{,}145 кДж$$

Знак (–) указывает на то, что совершается работа сжатия

Задача 1.10.5. Определить изменение энтропии азота массой ***m*=3*кг*, ситая** его идеальным газом, в процессе с показателем политропы ***n*=1,2.** Температура газа в процессе изменяется от $t_1 = 100^0 C$ до $t_2 = 300^0 C$.

РЕШЕНИЕ

Так как азот является двухатомным газом, то коэффициент Пуассона составит ***k=1,4*** (табл.П.3 приложения В)

Определяем теплоемкость азота в изохорном процессе по формуле

$$C_v = \frac{\mu C_v}{\mu} = \frac{20{,}93}{28{,}026} = 0{,}747 \frac{кДж}{кг \cdot К}$$

где $\mu C_v = 20{,}93 \frac{кДж}{кмоль \cdot К}$ – мольная теплоемкость углекислого газа при постоянном давлении, принимается по данным табл.П.3 приложения В

$\mu = 28{,}026$–молекулярная масса газа, принимается по данным табл. П.2 приложения Б

Тогда теплоемкость рассматриваемого процесса составит

$$C = C_v \frac{n-k}{n-1} = 0{,}747 \frac{1{,}2-1{,}4}{1{,}2-1} = -0{,}747 \frac{кДж}{кг \cdot К}$$

Приращение энтропии будет равно

$$\Delta S = mC \ln \frac{T_2}{T_1} = 3 \cdot (-0{,}747) \cdot \ln \frac{(300+273)}{(100+273)} = -0{,}962 \frac{кДж}{кг \cdot К} \cdot$$

1.11. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ УСВОЕНИЯ ИЗЛОЖЕННОГО МАТЕРИАЛА

1. Перечислите известные вам параметры состояния термодинамической систем и назовите единицы их измерения.
2. В чем заключается физический смысл энтальпии?
3. В каком процессе работа равна нулю?
4. В каком процессе изменение внутренней энергии равно нулю?
5. Перечислите основные достоинства газотурбинных установок по сравнению с паротурбинными.
6. Назовите области применения газотурбинных установок.
7. Перечислите основные узлы газотурбинных установок.
8. Для цикла какой газотурбинной установки применим принцип соответствия?
9. Как по выданным в задании безразмерным характеристикам определить, цикл какой газотурбинной установки необходимо рассчитать?

2. РАСЧЕТ ЦИКЛА ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

2.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1.1. Основные понятия и определения водяного пара. Водяной пар в тех состояниях, в которых он применяется в теплотехнике, в известной мере приближается по свойствам к реальным газам.

При систематических расчетах для определения параметров пара использование аналитических методов затруднительно. Для таких случаев составлены таблицы зависимости параметров водяного пара в широком интервале температур (1273 К) и давлений (10^8 Па), а также построены диаграммы водяного пара, которые позволяют быстро определять его параметры и решать многие теплотехнические задачи.

Вода в жидком агрегатном состоянии малопригодна в качестве рабочего тела при превращении теплоты в механическую работу. Обычно воду вначале превращают в пар в специальных паровых котлах при постоянном давлении. Для рассмотрения процесса парообразования при постоянном давлении вообразим, что в цилиндр под поршень, нагруженный постоянной силой, помешен 1 кг воды.

Будем нагревать воду в цилиндре, подводя к ней теплоту извне. При неизменной нагрузке на поршень (неизменном давлении) повышение температуры приводит к увеличению удельного объема и энтропии. При некоторой температуре, зависящей от давления, прекратится дальнейшее повышение температуры, несмотря на дальнейшее подведение теплоты. Вода начнет кипеть и интенсивно испаряться. Обозначим состояние воды в момент закипания, *а* (рис. 29)′.

Подводя к цилиндру все большее и. большее количеству теплоты, можно добиться полного превращения всей воды в пар. Состояние рабочего тела при этих условиях обозначим, *а″*.

В процессе парообразования между точками, *а′ и а″* рабочее тело находится одновременно в двух агрегатных состояниях: жидком и

парообразном. При этом, сколько молекул в единицу времени вылетает из жидкости в пространство, занимаемое паром, столько же молекул возвращается из пара в жидкость. Пар, находящийся в динамическом равновесии с жидкостью, из которой он образовался, называется *насыщенным паром*.

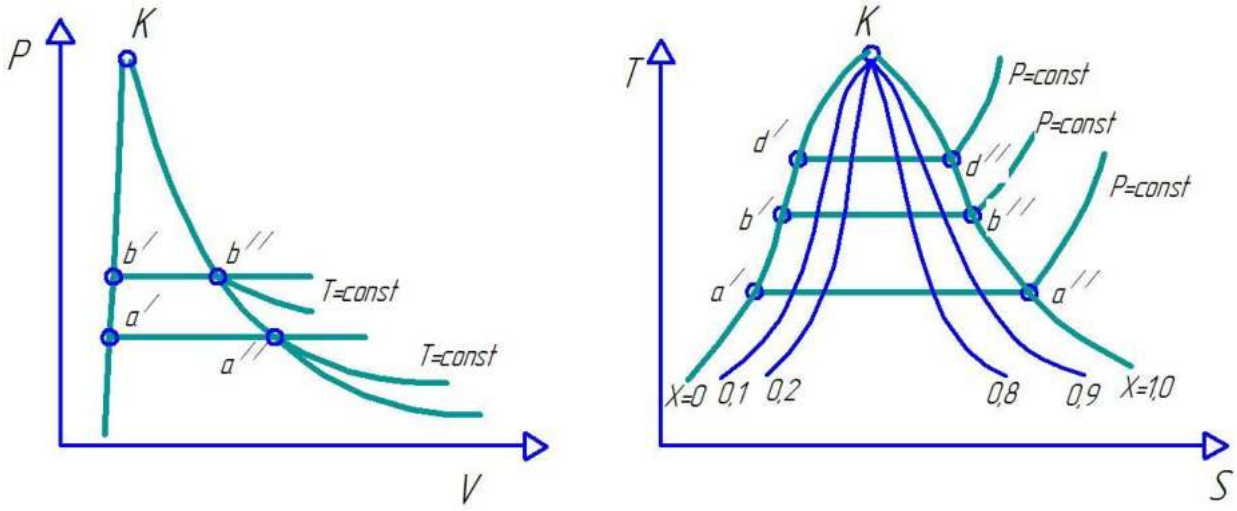


Рисунок 29– Диаграмма водяного пара в *PV* и *TS* координатах

Температура насыщенного пара, равная температуре кипения в точке *a′*, называется *температурой насыщения*.

Точка *a″* соответствует состоянию, когда вся жидкость превратилась в пар. Такой насыщенный пар, в котором не содержится влаги при температуре насыщения *сухим насыщенным паром*.

На участке d'- d'' имеется так называемый влажный пар, представляющий собой смесь кипящей жидкости и сухого пара, причем между жидкостью и паром может не быть резко очерченной границы, а капельки жидкости пронизывают пар во взвешенном виде.

Массовая доля сухого пара во влажном называется *степенью сухости* и обозначается *X*. Доля воды во влажном паре называется *степенью влажности* и равна 1 — X.

С повышением давления вода закипает при более высокой температуре, а объем, занимаемый ею в момент кипения, и энтропия будут также больше. Это состояние обозначим *b′*. По мере подведения теплоты к кипящей воде в

цилиндре образуется влажный пар, который затем превращается в сухой. Это состояние обозначим точкой b''.

Если рассматривать каждый раз процесс парообразования при более и более высоком давлении, то точки, соответствующие состоянию кипения воды, отклоняются вправо относительно друг друга и образуют так намываемую нижнюю пограничную линию 2 со степенью сухости *X=0*. Точки, характеризующие состояние сухого пара, отклоняются влево и образуют верхнюю пограничную кривую *3* со степенью сухости *X=1* .

При некотором давлении точки, обозначенные одним штрихом и двумя штрихами, совпадут в одну точку *К* так, что нижняя и верхняя пограничные кривые сольются в ней. Это значит, что при некотором давлении нет прямолинейного участка перехода жидкости в пар. В точке К жидкость и сухой пар обладают одинаковыми параметрами. Эта точка называется критической, а все параметры, характеризующие рабочее тело в этой точке, называются критическими. Для воды эти параметры будут равны

$$P_{кр} = 221{,}29 \cdot 10^5\ Па; \quad T_{кр} = 647{,}31K; \quad \upsilon_{кр} = 0{,}00326 \frac{м^3}{кг}$$

Пар, у которого температура и удельный объем больше, чем у сухого насыщенного пара, называется *перегретым паром*.

Из рисунка 29 видно, что верхняя и нижняя пограничные кривые разделили диаграмму на три части: слева от нижней пограничной кривой – область жидкого состояния, справа от верхней пограничной кривой – область перегретого пара, а между ними — область влажного пара.

На диаграмму наносят изобары, линии постоянных удельных объемов, а в области влажного пара- линии равных степеней сухости. В области насыщения изобары и изотермы совпадают и изображаются прямыми линиями.

При расчете термодинамических процессов водяного пара наиболее часть пользуются диаграммой водяного пара в *hS* координатах (рис. 30)

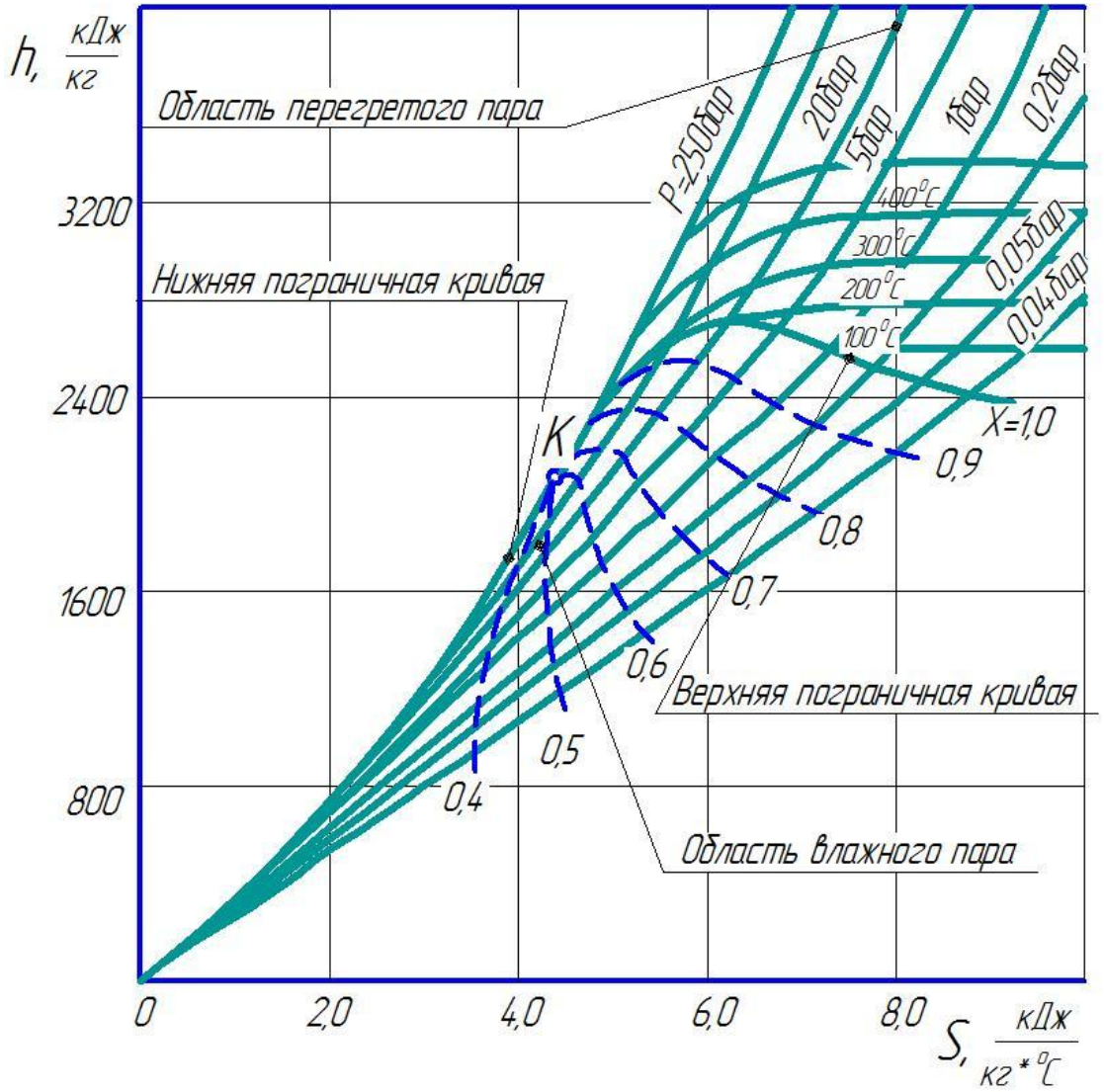


Рисунок 30 –Диаграмма водяного пара в *hS* -координатах

Большим достоинством *hS* - диаграммы. является то, что техническая работа и количество теплоты, участвующие в процессах, изображаются отрезками линий, а не площадями, как это имеет место в *TS* - диаграмме.

При построении *hS* -диаграммы по оси ординат откладывается энтальпия пара, а по оси абсцисс — энтропия. Пользуясь данными таблиц водяного пара, на диаграмму прежде всего наносят пограничные кривые жидкости и пара, сходящиеся в критической точке К. Пограничная кривая жидкости выходит из начала координат, так как в этой точке энтальпию и энтропию принимают равной нулю (рис. 30). Состояние воды изображается точками на соответствующих изобарах, которые практически сливаются с пограничной кривой жидкости.

Линии изобар в области влажного пара являются прямыми наклонными линиями, расходящимися веером от пограничной кривой жидкости.

В области влажного пара наносится сетка линий постоянной степени сухости пара *(x* = const), которые сходятся в критической точке К. Изотермы в области влажного пара совпадают с изобарами. В области перегретого пара они расходятся: изобары поднимаются вверх, а изотермы представляют собой кривые линии, обращенные выпуклостью вверх. При низких давлениях изотермы весьма близки к горизонтальным прямым; с повышением давления кривизна изотермы увеличивается. На диаграмму наносится сетка изохор, которые имеют вид кривых, поднимающихся более круто вверх по сравнению с изобарами.

Обратимый адиабатный процесс в *hS* -диаграмме изображается вертикальной прямой. Поэтому все вертикальные прямые в *hS* -диаграмме представляют собой адиабаты.

В настоящее время при исследовании тепловых процессов в парах пользуются *hS*-диаграммой и таблицами водяного пара, так как они значительно упрощают расчеты.

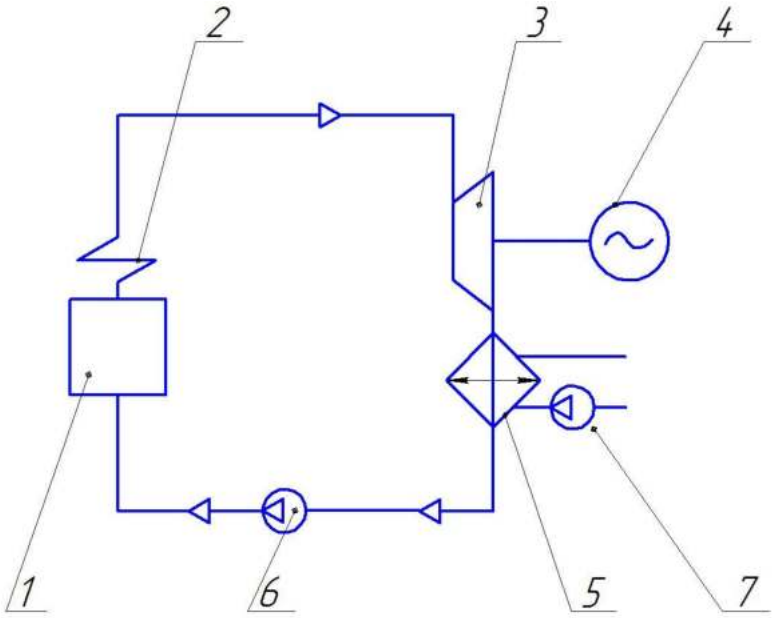
Обычно всю *hS* -диаграмму не выполняют, а вычерчивают только верхнюю часть, что дает возможность изображать ее в более крупном масштабе.

2.1.2. Паросиловые установки

Паросиловая установка состоит из котла 1 (рис. 31*)* с пароперегревателем *2,* паровой турбины *3,* конденсатора *5* и ряда вспомогательных устройств, питательного насоса *6* и циркуляционного насоса *7.*

В паровом котле вода превращается в сухой насыщенный пар, а в пароперегревателе этот пар перегревается до высокой температуры. В паровой турбине пар используется в качестве рабочего тела, воздействующего на рабочее колесо, приводя его во вращение. В кон-

денсаторе отработавший в турбине пар обращается в воду. Для этого циркуляционные насосы перегоняют через него воду из реки или градирни. Питательные устройства предназначаются для подачи образовавшегося конденсата обратно в паровой котел.



1–паровой котел; 2–пароперегреватель; 3–паровая турбина; 4–генератор; 5–конденсатор; 6–питательный насос; 7–циркуляционный насос

Рисунок 31 – Схема паросиловой установки

Для оценки эффективности работы паросиловых установок с термодинамической точки зрения мы ограничимся рассмотрением идеальных термодинамических циклов. Идеальным циклом паросиловой установки является цикл Ренкина, в котором предполагается, что все элементы установки работают идеально, то есть без потерь теплоты.

2.1.3. Цикл Ренкина

На рисунке 32 изображен в диаграммах *PV*, *TS* и *hS* идеальный цикл паросиловой установки, получивший название цикла Ренкина по фамилии шотландского ученого, впервые осуществившего данный цикл.

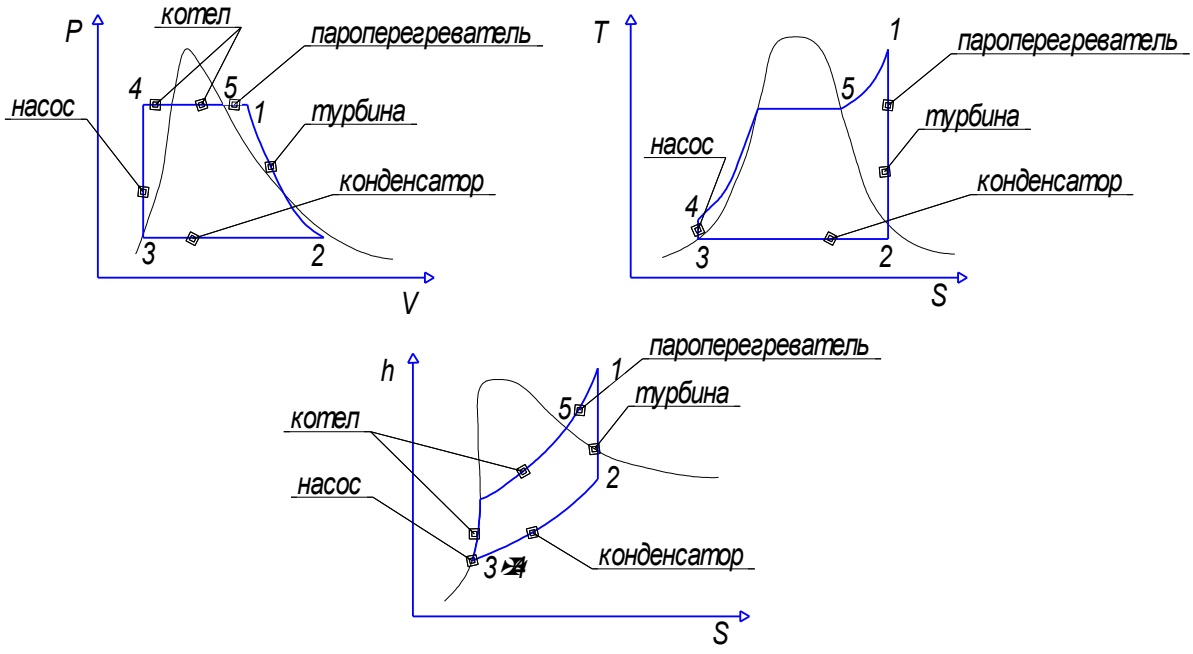


Рисунок 32–Изображение цикла Ренкина на диаграмме водяного пара

В цикле точка 3 изображает состояние конденсата при выходе из конденсатора. Так как конденсат имеет температуру насыщения $T_н$, соответствующую давлению пара в конденсаторе, то точка 3 лежит на нижней пограничной кривой. Процесс сжатия воды в насосе можно считать в силу несжимаемости жидкости и неизменяемости температуры этого процесса изохорным и изотермическим. Конечное состояние воды в результате этого процесса определится давлением P_4 в котле, удельным объемом υ_4 и изобразится в диаграмме *PV* точкой *4*. В диаграмме *TS* точки *3* и *4* совпадают, ибо температура и энтропия воды в результате сжатия в насосе остаются неизменными. Изобарный подогрев воды до кипения, процесс парообразования (линия *4-5)* и перегрева полученного пара (линия *5-1)* осуществляются в котле. Перегретый пар, состояние которого характеризуется точкой *1*, поступает в турбину, где адиабатно расширяется до давления p_2 в конденсаторе (адиабата *1—2).* Конденсация пара, происходящая при неизменном давлении в конденсаторе, изобразится линией *2—3.* Так как объем конденсата,

образовавшегося из пара, значительно меньше объема последнего, то часто объемом воды пренебрегают.

Таким образом

$$P_5 = P_1$$
$$S_1 = S_2$$
$$P_2 = P_3$$

Термический кпд данного цикла определяется по формуле

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$

Величина $\Delta h = h_1 - h_2$ называется *адиабатным теплопадением* или *располагаемым теплоперепадом.* Величина, обратная адиабатному теплопадению $d_0 = \frac{1}{h_1 - h_2}$ называется *удельным расходом пара.*

2.1.4. Способы повышения термического кпд цикла паросиловой установки.

Повышение начального давления расширения (рис.33)

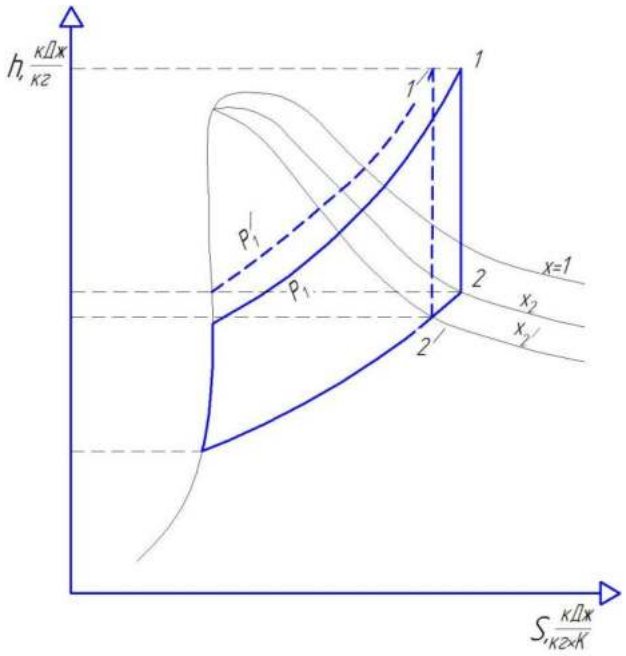


Рисунок 33 – Повышение термического кпд цикла паросиловой установки за счет повышения начального давления расширения.

При увеличении начального давления пара и одном и том же конечном давлении увеличивается адиабатное теплопадение и уменьшается удельный расход пара. Однако при этом резко падает прочность металла, из которого изготовлена паросиловая установка. Поэтому пока широко используется пар с параметрами T_1=820-870К, P_1=100бар.

Следует обратить внимание еще на одно неприятное явление, к которому приводит повышение начального давления пара.

Как видно из рисунка 33, с ростом начального давления и при неизменном конечном давлении растет влажность отработавшего пара при его выходе из турбины. Содержание значительного количества влаги в паре вызывает, с одной стороны, интенсивный износ материала рабочих лопаток турбины, а с другой — потери энергии на трение влажного пара об элементы турбины. По современным требованиям эксплуатации турбин допускается, чтобы содержание влаги в отработавшем паре не превышало 12%.

Повышение начальной температуры пара (рис .34)

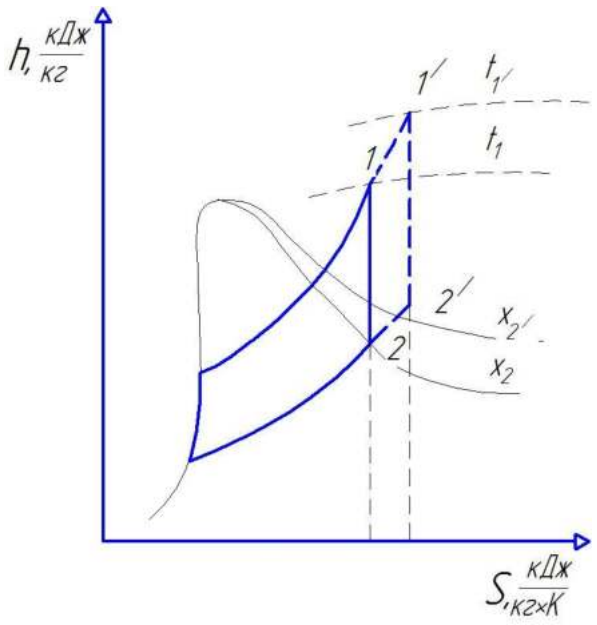


Рисунок 34– Повышение термического кпд цикла паросиловой установки за счет повышения начальной температуры пара.

Как видно из рисунка 34, при повышении начальной температуры и неизменных начальных и конечных давлениях растет адиабатное

теплопадение и уменьшается удельный расход пара. Влажность пара, выходящего из турбины, снижается.

Повышение температуры перегрева пара ограничивается способностью материала, из которого сделаны трубы, выдерживать большие давления при высоких температурах, т.е. конечные параметры пара определяются наличием относительно дешевых жаропрочных материалов.

Понижение конечного давления расширения (рис.35).

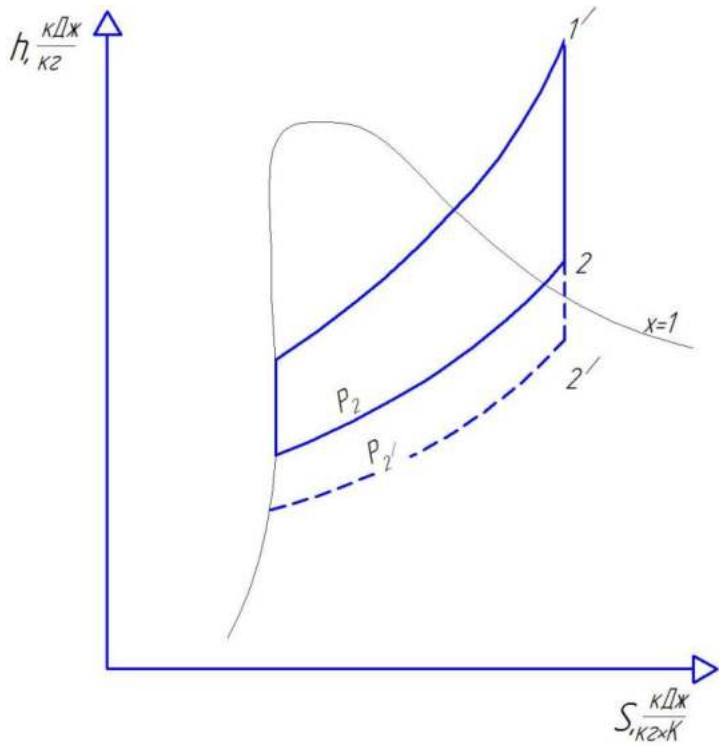


Рисунок 35 – Повышение термического кпд цикла паросиловой установки за счет понижения конечного давления расширения.

Эта мера приводит к увеличению работы и повышению к. п. д. цикла, поскольку разность $h_1 - h_2$ при этих условиях намного превышает незначительное увеличение потребной теплоты для нагрева рабочего тела до первоначального состояния. Но температура, до которой охлаждается отработавший пар, не может быть ниже температуры вещества, охлаждающего этот пар в конденсаторе.

Следует учесть еще, что при снижении давления до очень малых значений резко увеличивается удельный объем пара. что вызывает необходимость резкого увеличения размеров турбины, выходных труб,

конденсаторов и т. д. Это делает турбину громоздкой и металлоемкой. Поэтому установление конечного давления ниже 3960*Па* практически нецелесообразно.

2.2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЦИКЛА ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

2.2.1. Исходные данные:

-для исходного варианта

два параметра точки *5*;

один параметр точки *1*;

один параметр точки *2*

- для варианта с повышением кпд

два параметра точки *5*;

один параметр точки *1*;

один параметр точки *2*

2.2.2. Определяем параметры характерных точек цикла для исходного варианта. Для этого на *hS*-диаграмме водяного пара /3/ по заданным двум параметрам находим точку *5* и определяем давление в точке *5*. Так как процесс перегрева пара происходит при постоянном давлении $P_1 = P_5$, то по давлению и заданному параметру точки *1* находим ее месторасположение на *hS*-диаграмме водяного пара и определяем значение энтропии S_1 и энтальпии h_1, в точке *1*.

Значение энтропии в точках *1* и *2* одинаково. Поэтому по величине энтропии и заданному параметру в точке 2 находим на диаграмме/3/ точку *2* и по этой точке определяем температуру t_2, удельный объем υ_2, степень сухости x_2, энтальпию h_2 и давление конденсации P_2. По таблице 2 /3/ находим удельную энтальпию кипящей при давлении конденсации $P_2 = P_3$. Удельная энтальпия кипящей воды обозначается h'.

Определяем величину адиабатного теплопадения

$$\Delta h_{1вар} = h_1 - h_2$$

Определяем удельный расход пара

$$d_{01вар} = \frac{1}{h_1 - h_2}$$

Определяем величину термического кпд цикла

$$\eta_{t1вар} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$

2.2.3. Определяем параметры характерных точек цикла для второго варианта с повышением кпд в последовательности, изложенной в пункте
По формулам, приведенным в пункте 2.2.2. определяем располагаемый теплоперепад $\Delta h_{2вар}$, удельный расход пара $d_{02вар}$ и термический кпд цикла $\eta_{t2вар}$ для варианта с повышением кпд.

2.2.3. Определяем, на сколько процентов увеличился термический кпд цикла во втором варианте по сравнению с исходным вариантом

$$\Delta\eta_t = \frac{\eta_{t2вар} - \eta_{t1вар}}{\eta_{t1вар}}$$

2.2.4. Представляем схематическое решение задачи. Определяем способ повышения кпд и указываем его недостатки.

2.3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ № 2

Задача 2.3.1. Паросиловая установка работает по идеальному циклу Ренкина. Изобразить схему простейшей паросиловой установки и дать краткое описание ее работы. Представить цикл Ренкина в диаграммах P-V и T-S. Определить, на сколько процентов и за счет изменения какого параметра увеличится к.п.д. цикла во втором варианте по сравнению с первым вариантом. Для обоих вариантов определить адиабатное теплопадение и удельный расход пара.

Определить значения температуры, энтропии, давление и удельного объема перегретого пара и пара, поступающего в конденсатор. Задачу решать с помощью h-s диаграммы. Привести схематичное решение задачи в h-s координатах

Таблица 31. Исходные данные к 1 варианту

№ вар	Параметры пара			
31	выходящего из парового котла		В пароперегревателе	поступающего в конденсатор
	x_5	$t_5, {}^0C$	$t_1, {}^0C$	$\upsilon_2, \frac{м^3}{кг}$
	1	160	1,6	0,03

2.3.1. Определяем параметры пара для 1 варианта, используя h-S диаграмму водяного пара /3/.

На пересечении линии со степенью сухости x=1 и температуры t=160^{0}C находим точку 1 и определяем давление в точке1. Оно составляет P_5=6 бар (рис.36)

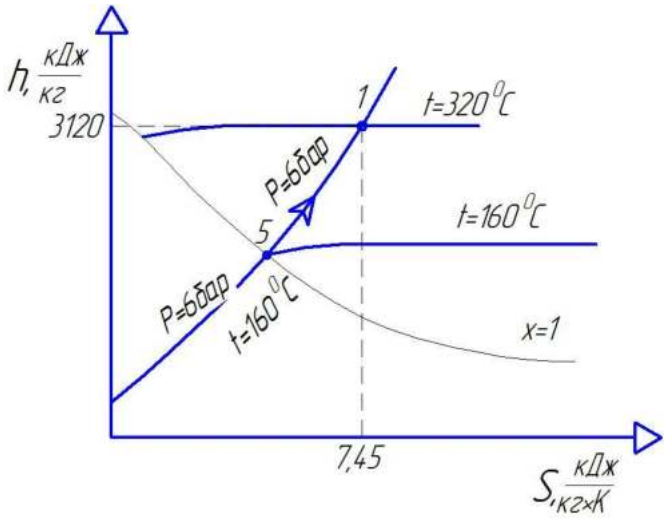


Рисунок 36– Схема к определению точек *5* и *1* для первого варианта

Поднимаемся вверх по линии P=6бар до пересечения с изотермой t=320^{0}C. На пересечении этих двух линий находится точка 1 (рис.36).

Определяем энтальпию и энтропию в данной точке, которые составляют соответственно 3120 и 7,45.

Из точки 1 вертикально вниз опускаемся до пересечения с линией $\upsilon_2 = 10\frac{м^3}{кг}$ ((рис.19). Точку пересечения обозначим цифрой 2 и определим все ее параметры. Давление конденсации составляет P_2=0,12бар

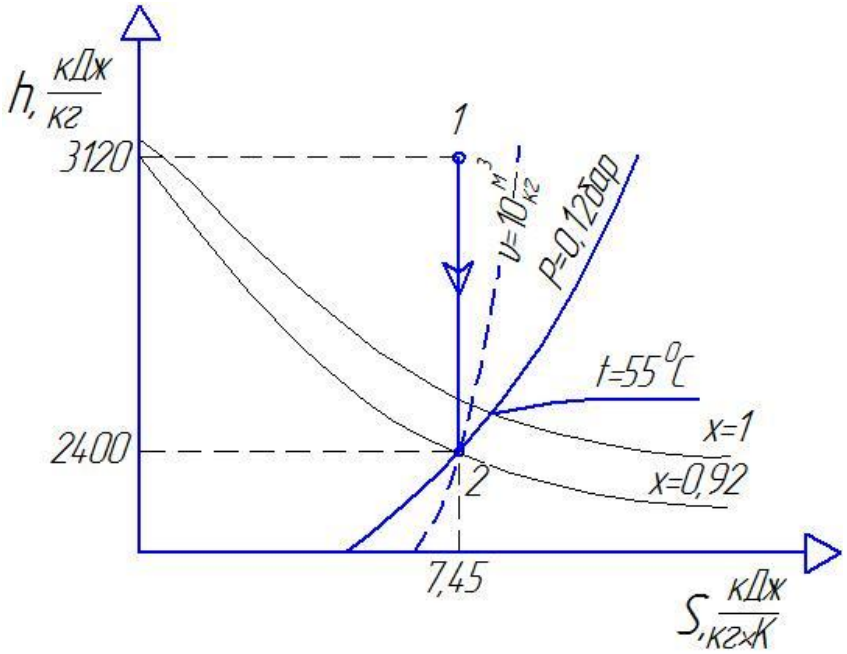


Рисунок 37 – Схема к определению точки *2* для первого варианта

Параметры найденных точек заносим в таблицу 32

Таблица 32. Искомые параметры пара для 1 варианта

Точка	5	1	2
P, бар	6	6	0,12
$\upsilon, \frac{м^3}{кг}$			10
$t, ^0C$	160	320	55
x	1		0,92
$S, \frac{кДж}{кг \cdot К}$		7,45	7,45
$h, \frac{кДж}{кг}$		3100	2400

Используя таблицу термодинамических свойств воды и водяного пара, определяем удельную энтальпию кипящей воды при $P_2 = P_3 = 0{,}1бар$

$$h' = h_3 = 206.94 \frac{кДж}{кг}$$

Определяем адиабатное теплопадение

$$\Delta h_{1вар} = h_1 - h_2 = 3100 - 2400 = 700 \frac{кДж}{кг}$$

Определяем удельный расход пара

$$d_{01вар} = \frac{1}{h_1 - h_2} = \frac{1}{3100 - 2400} = 0{,}00143 \frac{кг}{кДж}$$

Определяем термический кпд цикла для первого варианта

$$\eta_{t1вар} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} = \frac{3100 - 2400}{3100 - 206{,}94} = 0{,}242$$

Таблица 33. Исходные данные к 2 варианту

№ вар	Параметры пара			
31	выходящего из парового котла		В пароперегревателе	поступающего в конденсатор
	$\upsilon_5, \frac{м^3}{кг}$	$t_5, {}^0C$	$t_1, {}^0C$	x_2
	0,2	180	390	0,92

2.3.2. Определяем параметры пара для 1 варианта, используя h-S диаграмму водяного пара

На пересечении линии удельного объема $\upsilon_5 = 0{,}2 \frac{м^3}{кг}$ и температуры t=180^{0}C находим точку 1 и определяем давление в точке1. Оно составляет P_5=10бар (рис.38)

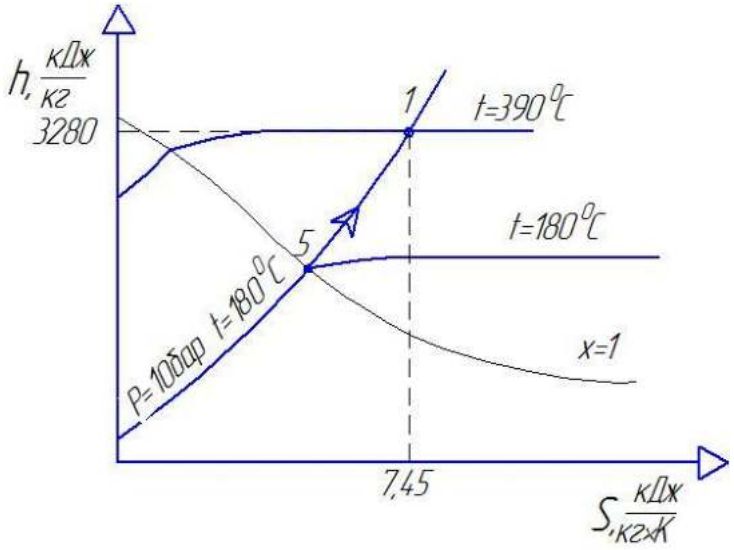


Рисунок 38– Схема к определению точек *5* и *1* для второго варианта

Поднимаемся вверх по линии Р=6бар до пересечения с изотермой t=390^{0}С. На пересечении этих двух линий находится точка 1 (рис.36). Определяем энтальпию и энтропию в данной точке, которые составляют соответственно 3280 и 7,45.

Из точки 1 вертикально вниз опускаемся до пересечения с линией $x = 0{,}92$ ((рис.39). Точку пересечения обозначим цифрой 2 и определим все ее параметры. Давление конденсации составляет P_2=0,12бар

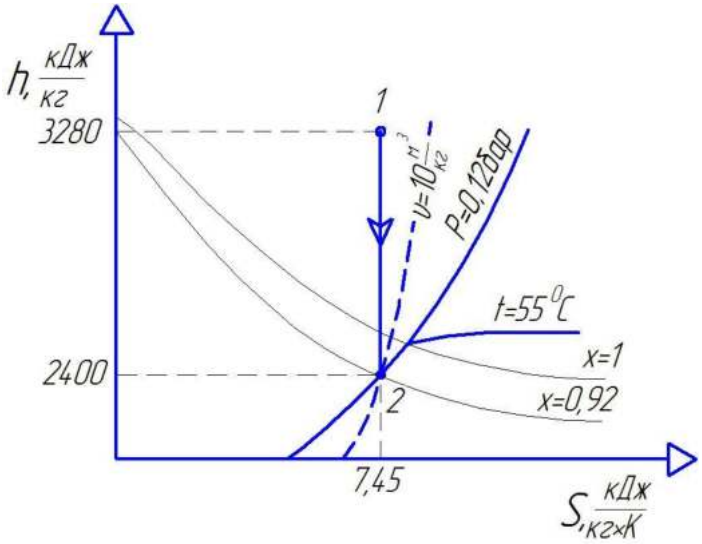


Рисунок 39– Схема к определению точки *2* для второго варианта

Параметры найденных точек заносим в таблицу 34.

Таблица 34. Искомые параметры пара для второго варианта

Точка	5	1	2
P, бар	10	10	0,12
$\upsilon, \frac{м^3}{кг}$	0,2		10
$t, ^0C$	180	390	55
x	1		0,92
$S, \frac{кДж}{кг \cdot К}$		7,45	7,45
$h, \frac{кДж}{кг}$		3280	2400

Используя таблицу термодинамических свойств воды и водяного пара, определяем удельную энтальпию кипящей воды при $P_2 = P_3 = 0{,}12 бар$

$$h' = h_3 = 206{,}94 \frac{кДж}{кг}$$

Определяем адиабатное теплопадение

$$\Delta h_{2вар} = h_1 - h_2 = 3280 - 2400 = 880 \frac{кДж}{кг}$$

Определяем удельный расход пара

$$d_{02вар} = \frac{1}{h_1 - h_2} = \frac{1}{3280 - 2400} = 0{,}00113 \frac{кг}{кДж}$$

Определяем термический кпд цикла для первого варианта

$$\eta_{t2вар} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} = \frac{3280 - 2400}{3280 - 206{,}94} = 0{,}286$$

2.3.3. Определяем величину изменения термического кпд цикла

$$\Delta\eta_t = \frac{\eta_{t2вар} - \eta_{t1вар}}{\eta_{t1вар}} \cdot 100\% = \frac{0{,}286 - 0{,}242}{0{,}242} \cdot 100\% = 18{,}2\%$$

2.3.4. Представляем схематическое решение задачи (рис.40)

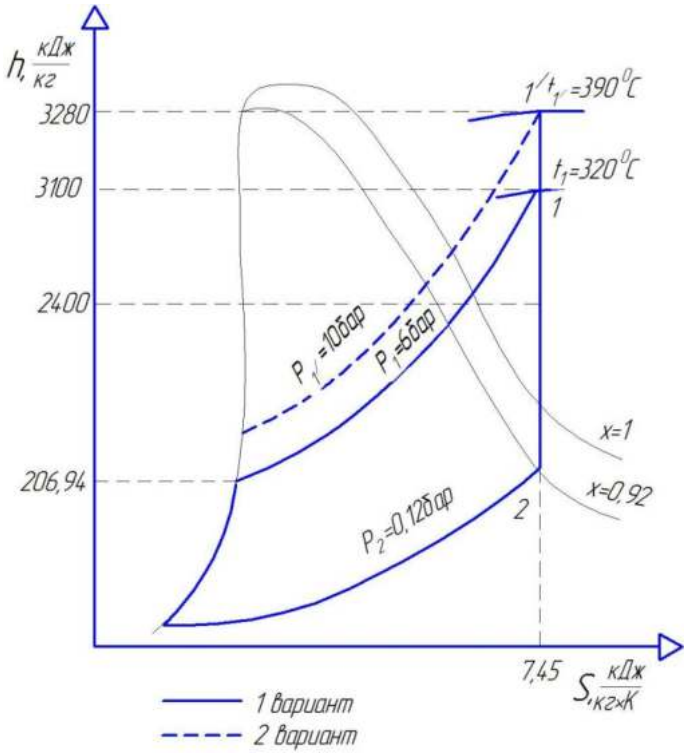


Рисунок 40- Схематическое решение задачи

Однако при использовании данного способа повышения встречаются серьезные трудности, связанные с тем, что при этих условиях резко падает прочность материала, из которого изготовлена паросиловая установка.

2.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ УСВОЕНИЯ ИЗЛОЖЕННОГО МАТЕРИАЛА

1. Перечислите какие параметры водяного пара можно определить с помощью *hS*-диаграммы?
2. Линии какх процессов совпадают в области влажного пара диаграммы?
3. В чем основное достоинство *hS*-диаграммы водяного пара по сравнению с *TS*-диаграммой?
4. Какой процесс в *hS*-диаграмму изображается вертикальной прямой?
5. При каком постоянном параметре протекает процесс парообразования в котле и пароперегревателе?
6. При каком постоянном параметре протекает процесс конденсации водяного пара?
7. При каком постоянном параметре протекает процесс адиабатного теплопадения?
8. Назовите единицы измерения удельного расхода пара.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов, И.В. Стефанюк Е.В.: Теоретические основы теплотехники. Ч. I. Термодинамика. Самара : Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2013. [Электронный ресурс]. – URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=256110

2.Синявский Ю.В Сборник задач по курсу «Теплотехника» СПб.:ГИОРД, 2010г. [Электронный ресурс]– URL: https://e.lanbook.com/book/4907#book_name

3.Оболенский Н. В.,Осокин В. Л. Практикум по теплотехнике. Княгино : НГИЭИ, 2010. [Электронный ресурс]. – URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=430983

4. Быстрицкий Г.Ф. Общая энергетика/Г.Ф. Быстрицкий.- М.; «Академия»,2005.-208с.

5. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара./ С.Л.Ривкин, А.А.Александров.- М.; МЭИ, 2006.-79с

ПРИЛОЖЕНИЯ

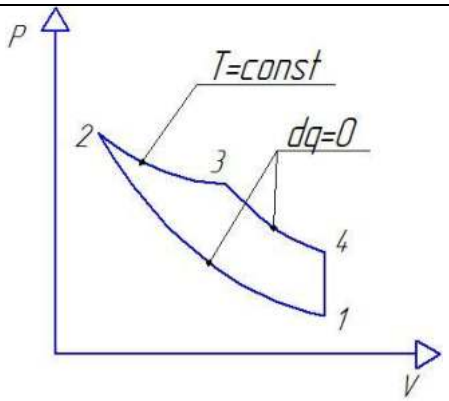
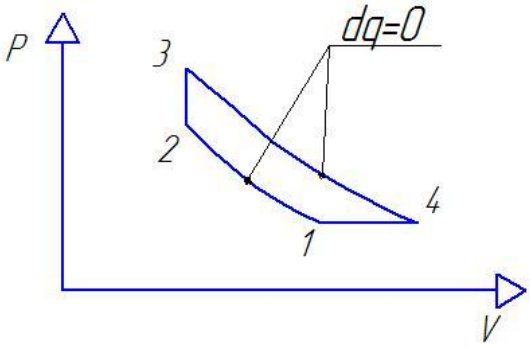
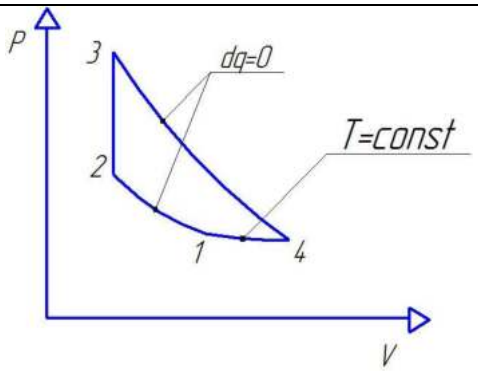
Приложение А

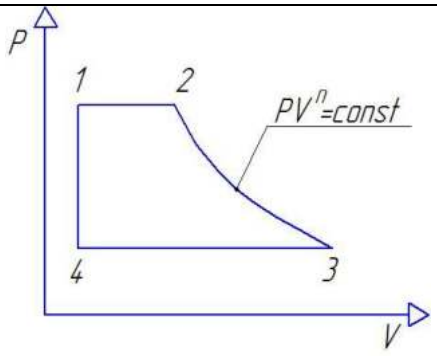
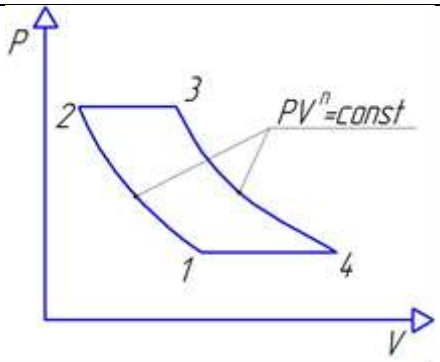
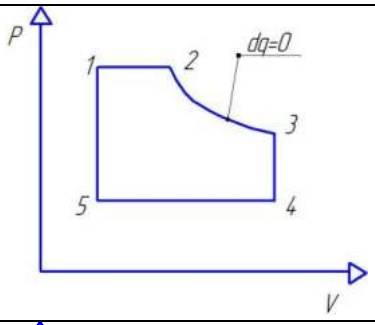
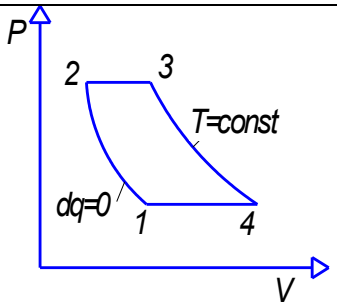
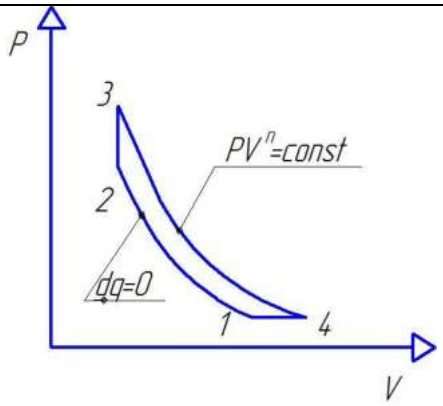
Задания на курсовую работу

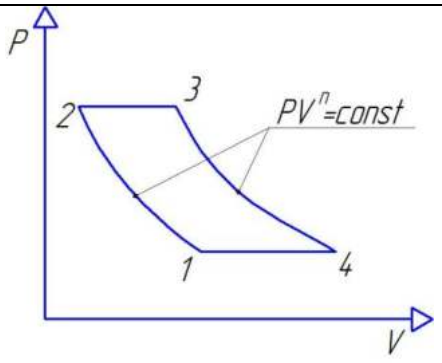
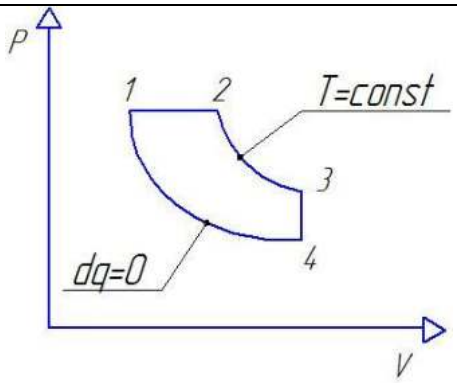
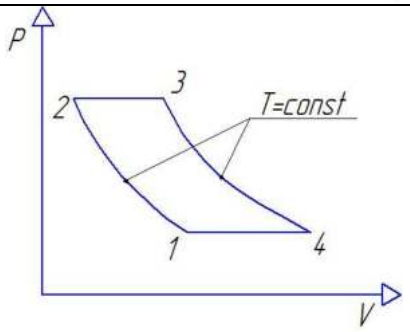
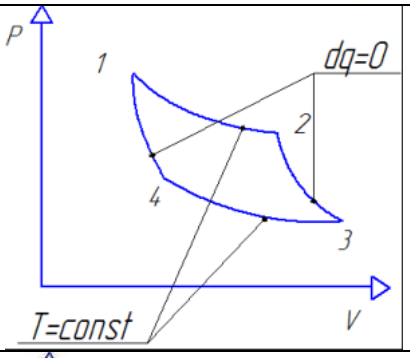
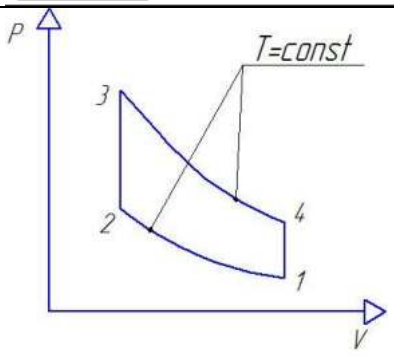
Задача № 1

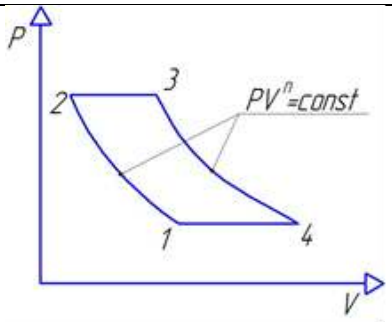
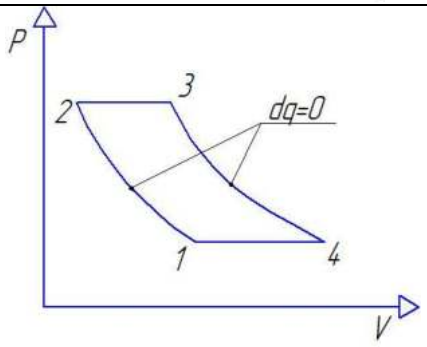
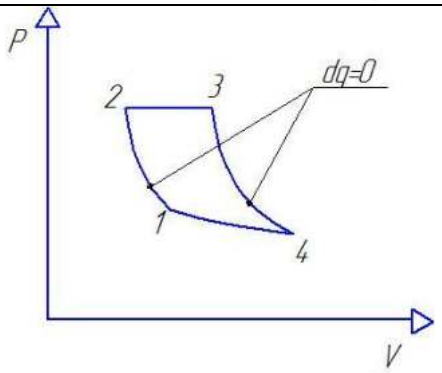
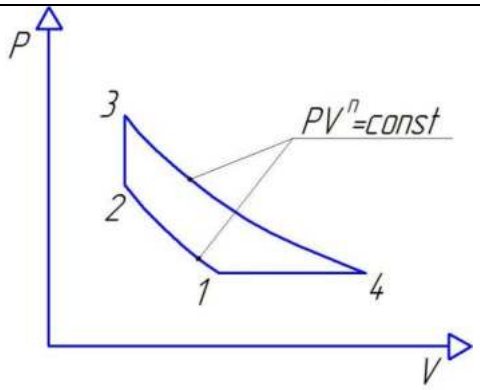
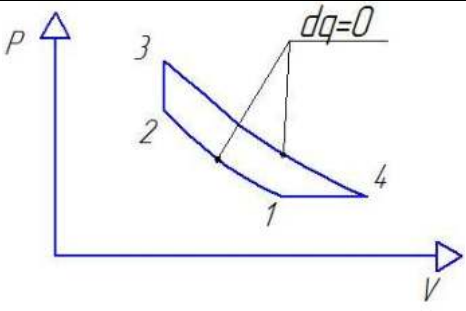
Рассчитать произвольный термодинамический цикл, представленный на рисунке 1. Изобразить на листе формата А1 данный цикл в P-V и T-S координатах, пучки процессов и графики трансформации энергии в каждом процессе.

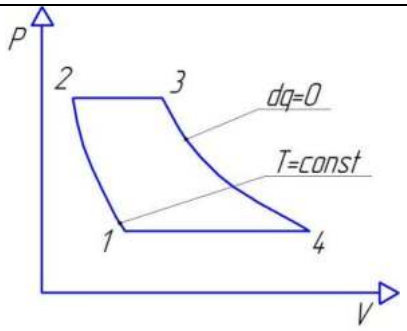
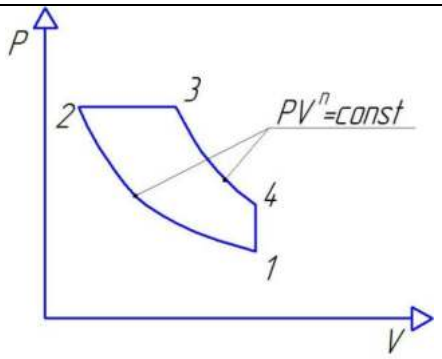
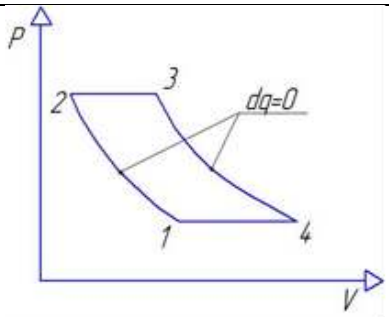
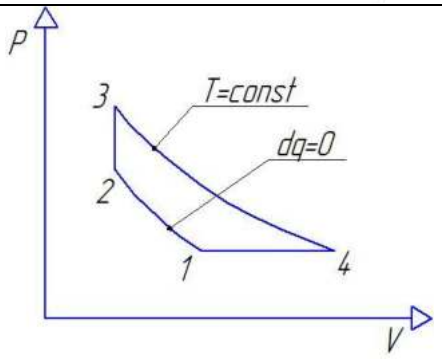
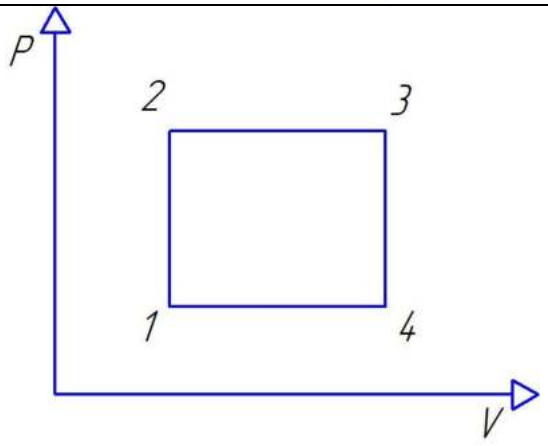
Таблица П1. Исходные данные к задаче №1

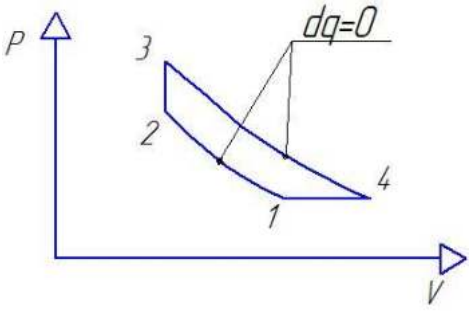
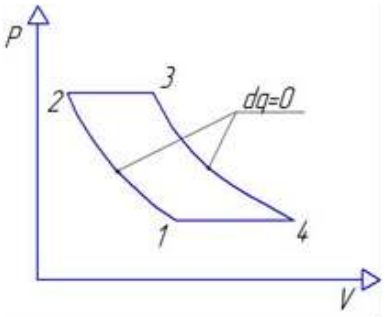
№ вар	Изображение цикла в PV-координатах	Исходные данные
1	2	3
1		P_1=8бар; P_2=20бар; P_3=12бар; $\upsilon_1 = 0{,}12\frac{м^3}{кг}$; рабочее тело-1кг воздуха
2		P_1=2бар; P_2=12бар; t_3=300^0C; $\upsilon_1 = 45\frac{м^3}{кг}$; рабочее тело-1кг воздуха
3		P_1=3бар; P_2=6бар; t_1=30^{0}C; t_3=250^{0}C; рабочее тело-1кг воздуха

1	2	3
4		P_1=35бар; P_2=25бар; t_1=210^{0}C; t_2=300^{0}C; n=1,2; рабочее тело-1кг воздуха
5		P_1=1бар; P_2=5бар; t_1=0^{0}C; t_3=200^{0}C; n=1,3; рабочее тело-1кг воздуха
6		P_1=10бар; P_4=6бар; t_1=250^{0}C; t_2=300^{0}C; $\upsilon_3 = 0{,}2\frac{м^3}{кг}$; рабочее тело-1кг воздуха
7		P_1=3бар; P_2=10бар; t_1=25^{0}C; t_3=250^{0}C; рабочее тело-1кг воздуха
8		P_1=1бар; t_1=0^{0}C; t_2=160^{0}C; t_4=65^{0}C; n=1,3; рабочее тело-1кг воздуха

1	2	3
9		P_1=3бар; P_2=20бар;; t_3=300^{0}C; n=1,3; $\upsilon = 0{,}3\frac{м^3}{кг}$; рабочее тело-1кг воздуха
10		P_1=7бар; t_1=200^{0}C; t_2=300^{0}C; $\upsilon_4 = 0{,}4\frac{м^3}{кг}$; рабочее тело-1кг воздуха
11		P_1=2бар; P_2=20бар; t_1=50^{0}C; t_3=200^{0}C; рабочее тело-1кг воздуха
12		P_1=13бар; P_2=5бар; t_3=17^{0}C; t_1=300^{0}C; рабочее тело –1 кг воздуха
13		P_1=3бар; P_2=8бар; t_1=27^{0}C; t_3=200^{0}C; рабочее тело-1кг воздуха

1	2	3
14		P_1=1,4бар; P_2=10бар; $t_1=20^0$C; q_{2-3}=150кДж/кг; n=1,3; рабочее тело-1кг воздуха
15		P_1=1,2бар; P_2=8бар; $t_1=10^0$C; q_{2-3}=100кДж/кг; рабочее тело-1кг воздуха
16		P_1=7бар; P_2=20бар; $t_3=200^0$c; $\upsilon_1 = 0{,}12\frac{м^3}{кг}$; рабочее тело-1кг воздуха
17		P_1=1,6бар; P_3=25бар; $t_2=150^0$C; $\upsilon_1 = 0{,}5\frac{м^3}{кг}$; n=1,2; рабочее тело-1кг воздуха
18		P_1=0,944 бар; T_1=308К; β=7,6; T_3=962К; рабочее тело-1кг воздуха

1	2	3
19		P_1=4 бар; P_2=10 бар; $\upsilon_1 = 0,3\frac{м^3}{кг}$; t_3=300^{0}C; рабочее тело-1кг воздуха
20		P_1=0,9 бар; P_2=4бар; t_1=30^{0}C; t_3=200^{0}C; n=1,2; рабочее тело-1кг воздуха
21		P_1=0,961 бар; T_1=317К; P_2=6,93бар; $\upsilon_3 = 0,623\frac{м^3}{кг}$; рабочее тело-1кг воздуха
22		P_1=3 бар; P_2=10бар; $\upsilon_3 = 0,3\frac{м^3}{кг}$; t_3=200^{0}C; рабочее тело-1кг воздуха
23		P_1=12бар; P_2=14бар; $\upsilon_1 = 0,08\frac{м^3}{кг}$; t_3=150^{0}C; рабочее тело-1кг воздуха

24		P_1=0,98 бар; $\upsilon_1 = 0{,}936\frac{м^3}{кг}$; β=7,6; λ=1,15 ; рабочее тело-1кг воздуха
25		P_1=0,974 бар; T_1=317К; β=6,8; ρ=2,5; рабочее тело-1кг воздуха

ЗАДАЧА № 2

Паросиловая установка работает по идеальному циклу Ренкина. Изобразить схему простейшей паросиловой установки и дать краткое описание ее работы. Представить цикл Ренкина в диаграммах P-V и T-S. Определить , на сколько процентов и за счет изменения какого параметра увеличится к.п.д. цикла во втором варианте по сравнению с первым вариантом. Для обоих вариантов определить адиабатное теплопадение и удельный расход пара.

Определить значения температуры, энтропии, давление и удельного объема перегретого пара и пара, поступающего в конденсатор. Задачу решать с помощью h-s диаграммы.

Привести схематичное решение задачи в h-s координатах.

Таблица П2. Исходные данные у задаче №2

	Исходные данные для 1 варианта												**Исходные данные для 2 варианта**											
	Параметры пара												Параметры пара											
	выходящего из парового котла					в пароперегревателе			поступающего в конденсатор				выходящего из парового котла					в пароперегревателе			поступающего в конденсатор			
	x_5	t_5, ^{0}C	V_5, м^3/кг	P_5, бар	S_5, Дж/кг град	t_1, ^{0}C	V_1, м^3/кг	S_1, Дж/кг град	t_2, ^{0}C	V_2, м^3/кг	P_2, бар	x_2	x_5	t_5, ^{0}C	V_5, м^3/кг	P_5, бар	S_5, Дж/кг град	t_1, ^{0}C	V_1, м^3/кг	S_1, Дж/кг град	t_2, ^{0}C	V_2, м^3/кг	P_2, бар	x_2
1	1	100					3,5				0,14		1	100					3,5					0,992
2	1	250					0,09				0,5		1	250						7,5			0,5	
3	1	125					1,60				0,03		1	145				490					0,03	
4		118	1					8,2	115					118	1					8,2			0,05	
5		180	0,2					7,5	60					180	0,2					8,0			0,2	
6		185	0,18					7,63	72					215	0,1					7,35			0,35	
7			0,6	3		490				16					0,6	3		490			35			
8			0,24	8				7,2		1,8					0,24	8		380				2,0		
9			0,9	2				7,7		9					0,65	2,8		250					0,16	
10				2,96	7			8			0,35					2,96	7			8		12		
11				28	6,2			7			0,09					28	6,2			7,8		15,5		
12				1,4	7,25			7,95				0,91				7	6,7			7,18				0,818
13	1				6,5	450			200				1				6,5	450						0,96
14	1				6,7	360			50				1				6,7			7,95	50			
15	1				8,27	130						0,99	1				8	130					0,015	

16		180		10			0,35			3				180		10			0,35		65			
17		110		1,4			1,6			40				110		1,4		460						0,998
18		90		0,7			3,5			27,5				120		2		250					0,05	
19			0,6		7		1,2				0,12				0,6		7		1,2						0,95
20			0,20		6,6		0,4					0,96			0,20		6,6	750			50			
21			5		7,75		6				0,07				0,8		7,1	140					0,07	
22		180			6,6		0,26		140					180			6,6		0,26			5		
23		115			7,2		1,6		45					115			7,2		2,0			18,2		
24		165			6,7		0,375				0,45			230			6,2	300						0,845
25		110		1,4				8,2		12				110		1,4				8,2			0,015	

Приложение Б

Таблица П.3. Характеристики газов при нормальных физических условиях

Газ	Химическая формула	Молекулярная масса	Плотность, $\rho, \frac{кг}{м^3}$	Объем одного киломоля, $\mu V, \frac{м^3}{кмоль}$	Газовая постоянная, $R, \frac{Дж}{кг \cdot К}$
Воздух	–	28,96	1,293	22,4	287,0
Кислород	O_2	32,00	1,429	22,39	259,8
Азот	N_2	28,026	1,251	22,4	296,8
Атмосферный азот[1)]	N_2	28,16	(1,257)	(22,4)	(295,3)
Гелий	He	4,003	0,179	22,42	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водород	H_2	2,016	0,09	22,43	4124,0
Окись углерода	CO	28,01	1,250	22,4	296,8
Двуокись углерода	CO_2	44,01	1,977	22,26	188,9
Сернистый газ	SO_2	64,06	2,926	21,89	129,8
Метан	CH_4	16,032	0,717	22,39	518,8
Этилен	C_2H_4	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовый газ	–	11,50	0,515	22,33	721,0
Аммиак	NH_3	17,032	0,771	22,08	488,3
Водяной пар[2)]	H_2O	18,016	(0,804)	(22,40)	(461)
1) Атмосферный азот – уловный газ, состоящий из азота воздуха вместе с двуокисью углерода и редкими газами, содержащимися в воздуха					
2) Приведение водяного пара к нормальному состоянию является условным					

Приложение В

Таблица П.4. Приближенные значения мольных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме

Газы	Теплоемкость, $\frac{кДж}{кмоль \cdot К}$		Коэффициент Пуассона $k = \frac{\mu C_p}{\mu C_v}$
	μC_v	μC_p	
Одноатомные	12,56	20,93	1,67
Двухатомные	20,93	29,31	1,40
Трех– и многоатомные	29,31	37,68	1,29

Учебное издание

Юдаев Игорь Викторович
доктор технических наук, профессор

Токарева Анна Николаевна
кандидат технических наук, доцент

Демченко Мария Станиславовна
кандидат технических наук, доцент

РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Объем ЭИ: 6,25 Мб
Формат ЭИ: Portable Document Format (PDF)

На титульную страницу