

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АДМИРАЛА
Ф.Ф.УШАКОВА»



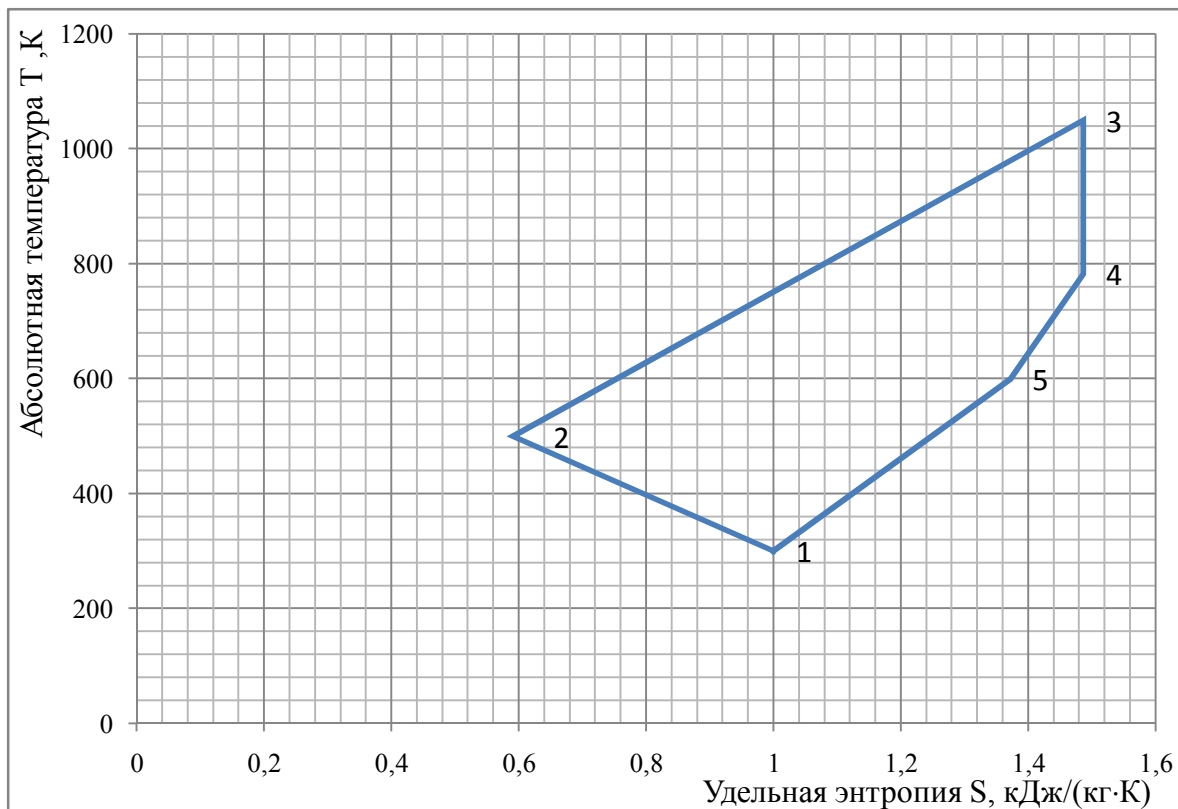
Термодинамический расчет газового цикла

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОСОБИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

«Техническая термодинамика и теплопередача»

по специальности 260205

«Эксплуатация судовых энергетических установок»



НОВОРОССИЙСК 2016

Настоящее методическое пособие содержит практические рекомендации по выполнению термодинамических расчетов и исследований газовых процессов и циклов и используется на лабораторно - практических занятиях.

Может быть использовано курсантами очного и заочного факультета для высшего профессионального и средне профессионального обучения при выполнении контрольных работ, а также старшекурсникам при выполнении курсового проектирования.

В пособие изложены основные методы расчетного определения параметров и свойств газообразных рабочих тел в различных процессах, построения на их основе циклов, расчета характеристик цикла и показателей эффективности судовой энергетической установки (СЭУ). Приведены методические указания и задания для термодинамического расчета газового цикла.

Учебно-методическое пособие разработали:

к.т.н., доцент кафедры «Судовые тепловые двигатели» Герасиди В.В.

к.т.н., доцент Елема В.А.

к.т.н., доцент Шмелев С.Х.

Рецензент:

к.т.н., доцент Полковников А.К.

к.т.н., доцент кафедры «Механика» Чура М.Н.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Судовые тепловые двигатели»

от _____ протокол № _____

Начальник кафедры «Судовые тепловые двигатели»

доцент, к.т.н. _____ Полковников А.К.

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений	4
Введение	5
1. Термодинамические основы расчета циклов	6
2. Исходные данные и варианты к расчетно-графической работе	13
3. Расчет термодинамического газового цикла	19
4. Требования и образец оформления отчета	24
5. Список используемых источников	24
Приложение. Примеры расчета «Термодинамического исследования газового цикла»	25

Список сокращений

ДВС – двигатель внутреннего сгорания
ГТУ – газотурбинная установка
СЭУ – судовая энергетическая установка
СМФ – судомеханический факультет
ТЭУ – теплоэнергетическая установка
РТ – рабочее тело
КПД- коэффициент полезного действия
ТДП – термодинамический процесс
ИГ – идеальный газ
СИ – международная система единиц

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка теплоэнергетических устройств и технологических процессов принадлежит теплотехнике, в теоретическую базу которой входит техническая термодинамика и теплопередача. Наиболее существенную роль в термодинамике играют тепловые процессы, общие законы статики и динамики жидкостей и газов, основные понятия теории теплообмена, законы термодинамики, поэтому знание таких процессов эксплуатировать и проводить техническое обслуживание и ремонт судовых механизмов и оборудования.

Все тепловые машины (тепловые двигатели, теплосиловые установки, компрессоры, холодильные установки) работают по круговым процессам или циклам. Для термодинамического анализа работы таких машин важно знать условия, при которых осуществляется процесс преобразования теплоты в работу. Циклом называют круговой замкнутый процесс, совершающийся в тепловой машине. В термодинамике циклы образуют термодинамические процессы, которые графически изображают в системе координат, например, в системе PV или TS , где по оси абсцисс откладываются, в масштабе соответственно, удельный объем и энтропия, а по оси ординат - абсолютное давление и температура. Таким образом, термодинамический цикл, изображенный графически, представляет собой замкнутую фигуру, состоящую из ряда линий, каждая из которых отражает термодинамический процесс. Точки пересечения линий процессов называют характерными точками цикла. Характерная точка графически изображает конечное состояние газа одного процесса и начальное состояние следующего процесса. Перед выполнением задания необходимо изучить темы: «Параметры состояния газа», «Законы идеальных газов», «Первый и второй законы термодинамики». Студент должен твердо знать физическую сущность параметров состояния, единицы измерения параметров состояния, их связь, понять смысл газовых законов и уметь пользоваться этими знаниями в термодинамических расчетах.

Для приобретения необходимых расчетных навыков курсанты СМФ выполняют практическое задание «Исследование газового цикла». Расчетная часть задания выполняется с помощью настоящего руководства.

Приобретение навыков расчета газовых циклов необходимо при курсовом и дипломном проектировании судовых ДВС и ГТУ, и, главное, в будущей самостоятельной деятельности при анализе состояния и уровня эксплуатации основного оборудования СЭУ и их тепловых схем, при их испытаниях.

1 Термодинамические основы расчета циклов

Более чем 200-летний период создания ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ установок усилиями зарубежных и русских умельцев и ученых, среди которых выделялись: М. Ломоносов, Д. Уатт, И. Ползунов, Д. Джоуль, У. Томсон (Кельвин), Р. Майер, Н. Отто, Р. Дизель и многие другие, позволил получить различные конструкционные решения приведенной принципиальной схемы, которые обладают теми или иными преимуществами, а также разработать научные основы теплотехники.

Каждый тип ТЭУ отличается, прежде всего, родом РТ и принципом действия механизмов преобразования, которые и получили наименование ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

По этим признакам применительно к судовым условиям в порядке распространения, эффективности и удобства использования можно дать следующий перечень:

- 1) двигатели внутреннего сгорания,
- 2) газотурбинные двигатели,
- 3) паротурбинные установки, включая атомные,
- 4) паровые машины,
- 5) реактивные двигатели,
- 6) прямые преобразователи теплоты в электричество.

К теплотехническим устройствам относятся холодильные установки, котлы и другое теплообменное оборудование.

На каких же принципах построены эти установки, как оценить их эффективность, есть ли для нее предел? На это отвечает большая часть лекций и построенных на их основе других занятий.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЭУ определяют долей подведенной теплоты, превращенной в работу, которая получила наименование КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ (КПД).

Если установка имеет мощность N при часовом расходе топлива B , то ее КПД рассчитывается по формуле

$$\eta = 3600N / (BQ_H^P), \quad (1.1)$$

где Q_H^P - теплота сгорания топлива, определяющая его основное качество, кДж/кг.

В числителе приведена секундная работа N , т.е. мощность в кВт, а в знаменателе - тепловая нагрузка горячего источника.

Формула (1.01) может быть рассчитана по любому количеству рабочего тела, например, для M кг так

$$\eta = L / Q_1, \quad (1.2)$$

где L - полученная работа от этого количества рабочего тела; Q_1 - затраченная для этого теплота.

Основные термодинамические величины и их размерности приведены в таблицах 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Основные единицы давления

Наименование величины	Размерность в системе		Коэффициент пересчета
	международной	технической	
Сила взаимодействия Р	Н	кГ или кгс	0,102
Площадь разделяющей поверхности F	м ²	м ²	1,00
Единицы основные	Н/ м ² или Па	кГ/м ²	0,102
Единицы практические	бар или 10 ⁵ Па	кГ/ см ² или ат	1,02
Единицы кратные	МПа, кПа	-	10 ⁴ Па, 10 ³ Па

Таблица 1.2 – Основные единицы работы

Наименование величины и обозначение	Размерность в системе		Коэффициент пересчета
	СИ	технической	
Давление р	Па или Н/м ²	кг/м ²	0,102
Объём V	м ³	м ³	1
Работа L	Н-м или Дж	Кгм	0,102
Удельная работа l	Дж/кг	кГм/кг	0,102

Формула справедлива при использовании Международной системы размерностей СИ, в которой энергия любых видов воздействия измеряется в кДж. В случае использования различных единиц для работы и теплоты, необходимо вводить коэффициент пересчета, получивший для такого случая наименование термического (теплового) эквивалента работы.

Большое удобство в термодинамике создает использование расчетных формул, таблиц свойств и диаграмм состояния для одного килограмма рабочего тела. В этом случае формула определения КПД приобретает вид

$$\eta = l/q_1, \quad (1.3)$$

где l - работа удельная, т.е. полученная от одного килограмма рабочего тела; q₁- подведенная теплота к этому же количеству рабочего тела.

Наименование КПД зависит от вида рассматриваемой работы или мощности.

Наибольшим КПД в рассматриваемых условиях обладают идеализированные циклы, состоящие из, так называемых, ОБРАТИМЫХ процессов, характеризующихся отсутствием бесполезного рассеивания энергии в окружающую среду.

В таком случае работа называется ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ, а КПД - ТЕРМИЧЕСКИМ.

Действительные циклы дают в этих же условиях меньшую работу за счет потерь на трение и теплообмен РТ с окружающей средой.

Работа в этом случае называется ВНУТРЕННЕЙ или ИНДИКАТОРНОЙ. Также называется и КПД

$$\eta_i = l_1/q_1, \quad (1.4)$$

где l_i - удельная работа действительного или необратимого цикла; q_i - подведенная в этом цикле теплота.

Еще меньше будет работа на валу двигателя за счет потерь на трение валов в подшипниках и на привод механизмов, без которых двигатель не работает. В этом случае величины называются ЭФФЕКТИВНЫМИ

$$\eta_e = l_e / q_1, \quad (1.5)$$

где l_e - удельная эффективная работа.

Между величинами КПД имеется связь, которая будет рассмотрена в дальнейшем. Предел на них устанавливает ТЕРМИЧЕСКИЙ КПД.

На практике для оценки эффективности используют другой показатель, который получил наименование УДЕЛЬНОГО РАСХОДА топлива.

Под ним понимают такое количество топлива, которое дает 1 кВт·ч или 3600 кДж рассматриваемой работы и который можно легко определить, используя прибор для измерения мощности N и расходомер топлива для определения часового расхода V . Тогда удельный расход топлива определится как

$$b = V/N, \quad (1.6)$$

Наименование удельного расхода, как и КПД, зависит от вида мощности или работы, которые их определяют.

Между КПД и удельным расходом топлива имеется обратная связь

$$b = \frac{3600}{\eta Q_H^P}, \quad (1.7)$$

Один ТДП отличается от другого условием протекания взаимодействия в нем. Чаще всего условие задают в виде постоянства какой-нибудь ТД- величины, которое записывают, например, как $u = \text{const}$ или вводят непосредственно в наименование процесса.

Особо выделяют процессы, характеризующиеся постоянством следующих величин:

- 1) Изохорный процесс - $v = \text{const}$ или $dv = 0$;
- 2) Изобарный процесс - $p = \text{const}$ или $dp = 0$;
- 3) Изотермический процесс - $T = \text{const}$ или $dT = 0$;
- 4) Процесс без термического воздействия или адиабатный - $q = 0$ или $\delta q = 0$

5) Процессы с постоянной теплоемкостью, $c = \text{const}$, которые для ИГ получили наименование ПОЛИТРОПНЫХ.

Например, совершенство термодинамических процессов в ТЭУ, зависящее от уровня рассеивания энергии на трение рабочего тела о стенки каналов и теплообмен, оценивается внутренним относительным КПД:

$$\eta_{oi} = l_i / l_0 \quad (1.8)$$

Потеря энергии на трение в подшипниках и привод вспомогательных механизмов оцениваются механическим КПД:

$$\eta_m = l_e / l_i \quad (1.9)$$

К относительным КПД относятся также коэффициенты полезного действия отдельных механизмов установки: передач, трубопроводов, гребного вала, гребного винта, котлоагрегата, топок, камер сгорания.

Появляется возможность вычислить эффективный КПД теплового двигателя по формуле

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m, \quad (1.10)$$

Более полный КПД с учетом всех потерь, так называемый абсолютный КПД судовой энергетической установки, вычисляется по выражению

$$\eta_a = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_{ka} \cdot \eta_{mp} \cdot \eta_n \cdot \eta_e, \quad (1.11)$$

где η_{ka} - КПД котла или камеры сгорания, η_{mp} – КПД трубопроводов, η_n - КПД передачи и валопроводов, η_e - КПД винта или пропульсивный КПД.

Относительные КПД определяются в результате расчетов отдельных устройств или выбираются на основании экспериментальных данных.

Если цикл задан, для определения термического КПД необходимо вычислить работу цикла l_0 , подведенную теплоту q_1 .

Работа цикла l_0 может быть вычислена как:

- алгебраическая сумма деформационных работ процессов, составляющих цикл,

$$l_0 = \sum_{i=1}^n l_i, \quad (1.12)$$

- алгебраическая сумма технических работ процессов, составляющих цикл

$$l_0 = \sum_{i=1}^n l_{mxi}, \quad (1.13)$$

- алгебраическая сумма теплоты каждого из процессов, составляющих цикл, или разность подведенной и отведенной теплоты в процессах цикла.

$$l_0 = \sum_{i=1}^n q_i = q_1 - |q_2|. \quad (1.14)$$

Для определения любой из работ или теплоты достаточно знать свойства рабочего тела, характер протекающих процессов и параметры, определяющие их начало и конец, как это будет показано в дальнейшем.

В инженерных расчетах циклов ДВС и ГТУ с достаточностью для практики точностью допускают, что рабочее тело является идеальным газом, а процессы являются политропными.

Большинство характеристик политропных процессов может быть определено с помощью формул, приведенных в таблице 1.3, которая взята из учебника [1], объясняющего их появление и содержание.

Таблица 1.3 - Основные аналитические зависимости для расчетов при политропных процессах

Характеристика, обозначение	Выражение для рассматриваемого процесса					Примечание
	1	2	3	4	5	
1. Наименование процесса	политропный	изохорный	изобарный	изотермический	изоэнтропийный	
2. Условия протекания	$c = \text{const}$	$v = \text{const}$	$p = \text{const}$	$T = \text{const}$	$s = \text{const}, q = 0$	
3. Показатель политропы n	$\frac{l_{\text{TK}}}{l} = \frac{c - c_p}{c - c_v}$	$n_v = \pm \infty$	$n_p = 0$	$n_T = 1$	$n = k$	
4. Теплоемкость c	$\frac{n - k}{n - 1} c_v$	$4187 \frac{j}{\mu}$	$4187 \frac{j + 2}{\mu}$	$\pm \infty$	0	
5. Уравнение процесса в p - v -параметрах	$p v^n = \text{const}$ $p^{1/n} v = \text{const}$			$p v = \text{const}$	$p v^n = \text{const}$ $p^{1/n} v = \text{const}$	
6. Соотношения p - v -параметров	$p/p_0 = (v_0/v)^n$ $v/v_0 = (p_0/p)^{1/n}$			$p/p_0 = v_0/v$	$p/p_0 = (v_0/v)^k$ $v/v_0 = (p_0/p)^{1/k}$	P_0, T_0, V_0 -параметры любого фиксированного состояния, принятого в качестве начального
7. Уравнение процесса в p - T -параметрах	$\frac{T}{p^{(n-1)/n}} = \text{const}$	$\frac{p}{T} = \text{const}$			$\frac{T}{p^{(k-1)/k}} = \text{const}$	
8. Соотношения p - T -параметров	$T/T_0 = (p/p_0)^{(n-1)/n}$ $p/p_0 = (T/T_0)^{n/(n-1)}$	$T/T_0 = p/p_0$			$T/T_0 = (p/p_0)^{(k-1)/k}$ $p/p_0 = (T/T_0)^{k/(k-1)}$	
9. Уравнение процесса в v - T -параметрах	$T v^{n-1} = \text{const}$ $v T^{1/(n-1)} = \text{const}$		$\frac{v}{T} = \text{const}$		$T v^{k-1} = \text{const}$ $v T^{1/(k-1)} = \text{const}$	
10. Соотношение v - T -параметров	$T/T_0 = (p/p_0)^{n-1}$ $v/v_0 = (T/T_0)^{1/(n-1)}$		$v/v_0 = T/T_0$		$T/T_0 = (p/p_0)^{k-1}$ $v/v_0 = (T/T_0)^{1/(k-1)}$	
11. Изменение внутренней энергии Δu	$c_v (T - T_0)$	$c_v (T - T_0)$	$c_v (T - T_0)$	0	$c_v (T - T_0)$	

1	2	3	4	5	6	7
12. Изменение энтальпии Δh	$c_p(T-T_0)$	$c_p(T-T_0)$	$c_p(T-T_0)$	0	$c_p(T-T_0)$	
13. Изменение энтропии Δs	$c \ln \frac{T}{T_0}$	$c_v \ln \frac{T}{T_0}$	$c_p \ln \frac{T}{T_0}$	$R \ln \frac{v}{v_0} = R \ln \frac{p_0}{p}$	0	
14. Теплота q	$c(T-T_0)$	$c_v(T-T_0)$	$c_p(T-T_0)$	$RT \ln \frac{v}{v_0} = RT \ln \frac{p_0}{p}$	0	
15. Деформационная работа l	$\frac{1}{n-1}(p_0 v_0 - pv)$		$p_0(v-v_0)$	$p_0 v_0 \ln \frac{v}{v_0} = RT_0 \ln \frac{p_0}{p}$	$\frac{1}{k-1} p_0 v_0 \left[1 - (p/p_0)^{\frac{k-1}{k}} \right]$	
16. Техническая работа $l_{ТХ}$	$n l = \frac{n}{n-1} RT_0 \left(1 - \frac{T}{T_0} \right)$	$v_0(p_0 - p)$	0	$p_0 v_0 \ln \frac{v}{v_0} = RT_0 \ln \frac{p_0}{p}$	$\frac{1}{k-1} p_0 v_0 \left[1 - (p/p_0)^{\frac{k-1}{k}} \right]$	
17. Первый закон термодинамики	$q = l + \Delta u$ $q = l_{ТХ} + \Delta h$	$q_v = \Delta u$	$q_p = \Delta h$	$q_T = l = l_{ТХ}$	$l = \Delta u, \quad l_{ТХ} = -\Delta$	записано в наиболее удобной форме
18. Доля теплоты, превращенная во внутреннюю энергию α	$\frac{1-k}{n-k}$	0	$1/k$	0	$\mp \infty$	
19. Доля теплоты, превращенная в работу β	$\frac{1-k}{n-k}$	0	$\frac{k-1}{k}$	1	$\mp \infty$	
20. Графическое изображение в p - v -диаграмме	неравнобокая гиперболола (при $n < 1$ положе и при $n > 1$ круче изотермы)	вертикаль	горизонталь	равнобокая гиперболола	неравнобокая гиперболола, круче изотермы	
21. Графическое изображение в T - s -диаграмме	потенциометрические кривые с подкасательной, равной c	То же с подкасательной c_v	То же с подкасательной c_p	горизонталь	вертикаль	

В выбранном интервале температур термический КПД цикла любой сложности не может превысить термический КПД цикла Карно, построенного на максимальной и минимальной температуре, рассматриваемого цикла и называемого предельным. Таким образом, сопоставив термические КПД цикла и предельного цикла Карно возможно оценить степень совершенства процессов цикла и указать пути повышения его эффективности, а также экономии ВЭР.

При анализе циклов, особенно полученных с помощью индикаторных диаграмм, часто используют понятие среднего давления цикла p_o , то есть такого постоянного давления, которое дает ту же работу, что и рассматриваемый цикл при одинаковом изменении объема.

Среднее теоретическое давление цикла определяется как

$$p_o = l_o / (\vartheta_{max} - \vartheta_{min}) \quad (1.15)$$

где ϑ_{max} , ϑ_{min} – максимальный и минимальный удельный объем в цикле.

Применительно к ДВС разница между объемами дает рабочий объем цилиндра $\vartheta_{ц}$, отнесенный к 1 кг рабочего тела. Тогда:

$$p_o = l_o / \vartheta_{ц}, \quad (1.16)$$

Среднее индикаторное давление определяется по выражению:

$$p_i = \eta_{oi} \cdot p_o, \quad (1.17)$$

а среднее эффективное давление:

$$p_e = \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot p_o,$$

(1.18)

Еще большие возможности при анализе циклов дают средне - интегральные температуры процессов. Под этой величиной понимается такая температура изотермического процесса, при котором количество теплоты и изменение энтропии равны таким же величинам, как и для рассматриваемого процесса. Определяется эта температура процесса по выражению

$$T_{cp} = q / (S_k - S_n), \quad (1.19)$$

где q – теплота процесса, рассчитанная по показателям процесса или получения графической обработкой процесса в TS - диаграмме;

S_k, S_n – значение энтропии рабочего тела в начале и в конце процесса.

Термический КПД любого цикла определяется через средне – интегральные температуры подвода и отвода теплоты в цикле как

$$\eta_t = 1 - (T_{cp2} / T_{cpt}), \quad (1.20)$$

Средние температуры в процессах подвода и отвода теплоты во всем цикле определяются при одинаковой разности максимальной S_{max} и предельному значению.

Если учесть, что в работу, возможно, преобразовать только теплоту, подводимую при температурах выше температуры окружающей среды T_a , т.е. имеющую еще эксергию, то в пределе T_{cp2} можно приблизить T_a и найти минимально отводимую теплоту из цикла по условиям второго закона термодинамики.

Возможность использования ВЭР определяется превышением T_{cp2} над T_a , что позволяет оценить ее влияние на термический КПД по формуле

$$\eta_t = (T_{cp2} - T_a / T_{cpt}) \quad (1.21)$$

Описанная методика анализа осваивается на примере расчета или исследования конкретного газового цикла.

2 Исходные данные и варианты к расчетно-графической работе

Исходные данные расчетно-графической работы: изображение газового цикла в PV -диаграмме; рабочее тело - 1кг идеального газа; термодинамические параметры состояния (p, v, T).

В методических указаниях предусмотрено 116 вариантов, различающихся вышеперечисленными исходными данными, приведенными для всех вариантов в таблицу.

Номер варианта студент-заочник выбирает в соответствии с двумя последними цифрами номера зачетной книжки.

Дополнительные указания к расчетно-графической работе:

- Использовать систему СИ
- В начальном состоянии циклов принять: $T_1 = 300 \text{ K}$; $P_1 = 1 \text{ бар}$.
- Теплоту сгорания топлива в расчёте принять: $Q_H^P = 42000 \text{ кДж/кг}$.
- Основным компонентом смеси принять:
 - для нечетных вариантов – воздух ($\mu_1 = 29$);
 - для чётных вариантов – азот ($\mu_1 = 28$).

Таблица 2.1 – Таблица исходных данных

Вариант	Мощность ТЭУ электрическая, кВт	КПД относительный, индикаторный, %	КПД механический, %	Компонент добавочный	Весовая доля основного компонента, %	Давление в характерных точках цикла, бар						Температура в характерных точках цикла, К						Показатели политропных процессов цикла					
						№	N_e	η_{oi}	η_m	Форм-ла	g_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	$n_{1,2}$	$n_{2,3}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		
1	1200	95	82	CO ₂	90	20	30	5	-	-	-	1120	720	600	-	k	-	-	0	-	-		
2	4600	86	84	N ₂ O ₃	75	10	19	5	-	1,5	-	900	-	750	-	k	-	1,3	0	k	-		
3	1100	94	86	CH ₄	55	-	-	30	6,5	1	500	400	-	-	-	k	0	k	1	1,3	-		
4	800	91	89	O ₂	65	18	20	-	14	-	610	750	600	750	600	-	-	k	-	k	-		
5	3000	93	89	CO ₂	90	5	-	-	8	-	530	600	800	-	-	-	0	k	1	k	0		
6	3200	95	87	CO	95	10	17	6	-	1	550	940	720	940	600	-	-	-	±∞	-	-		
7	2600	89	80	CO ₂	85	20	-	1,5	2,8	-	810	940	550	-	-	-	0	-	1	-	-		
8	2500	88	85	N ₂ O ₃	85	10	6	-	-	-	670	-	-	-	-	-	1	k	0	-	-		
9	2000	87	83	N ₂ O ₃	50	32	14	3	-	-	700	-	570	520	-	-	1	-	0	k	0		
10	2400	87	80	N ₂ O ₃	75	2	-	100	20	75	-	650	910	-	910	1	k	-	k	-	-		
11	1500	92	82	CO	60	5	-	100	10	-	450	300	-	600	-	-	0	k	-	-	-		
12	5000	88	86	O ₂	85	3	20	-	20	-	300	650	430	750	-	-	-	k	-	-	-		
13	6200	94	92	CH ₄	80	5	17	-	9	2	400	900	720	900	-	-	-	k	-	1,2	-		
14	300	86	94	O ₂	55	20	10	-	8	-	-	-	640	750	-	k	1	k	-	k	0		
15	3300	94	86	CO ₂	65	10	15	-	4	-	-	950	700	610	-	k	-	1,3	-	k	0		
16	2900	92	90	CH ₄	90	20	40	10	-	-	-	1350	1000	770	400	k	-	-	0	k	-		
17	2200	85	85	CO ₂	65	3	-	10	16	-	490	450	600	950	-	-	0	-	-	1,25	0		
18	200	85	95	CO	75	-	10	-	1,5	-	750	750	550	-	-	k	-	1,25	1	-	-		
19	600	89	91	CH ₄	95	3	30	10	-	-	-	730	520	700	-	1	-	-	0	k	0		
20	500	88	92	CO	70	20	30	10	5	-	650	1050	-	500	-	-	-	k	-	-	-		
21	2300	86	85	CO	80	-	17	-	1	-	560	900	600	-	-	1,2	-	k	1,2	-	-		
22	3800	89	81	CH ₄	70	5	15	-	4	-	-	850	650	-	-	k	-	1,25	1	k	0		
23	5800	92	90	O ₂	85	2	30	20	-	-	-	-	-	780	-	1	1,3	1	k	-	-		
24	400	87	93	N ₂ O ₃	70	10	-	5	8	1	600	1090	-	1090	640	-	±∞	k	-	-	-		
25	4000	87	81	O ₂	90	100	-	50	-	-	900	1020	-	-	-	-	0	k	0	k	-		

Продолжение таблицы 2.1 (часть 2)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
26	3100	94	88	CO ₂	75	-	2	-	17	-	400	300	430	800	-	k	-	k	-	1,2	0
27	3500	92	84	CO	65	10	-	5	1,8	-	-	800	-	-	-	1,25	0	k	1	-	-
28	1900	88	82	O ₂	95	-	10	-	2	-	840	-	690	530	-	k	1	k	-	1,2	0
29	1700	90	80	CH ₄	60	-	8	-	-	-	500	-	800	-	-	k	1	±∞	1,25	0	-
30	5900	90	88	CH ₄	80	2	-	30	16	19	-	720	-	-	700	1	k	1	k	-	-
31	3600	91	83	CO	70	2	-	30	13	-	-	570	770	650	-	1	k	-	-	-	-
32	5260	89	87	N ₂ O ₃	60	20	28	16	10	1	-	1000	800	-	460	1,3	-	-	1	-	-
33	1400	93	83	CO	60	-	-	-	15	-	600	650	700	840	-	k	0	k	-	-	-
34	5600	91	89	O ₂	55	5	5	1,5	1,8	-	460	570	410	500	-	-	-	-	-	1	0
35	900	92	88	O ₂	90	5	-	16	1	-	470	600	760	400	-	-	k	-	-	-	-
36	3700	90	81	O ₂	80	5	3	13	-	-	-	500	750	-	-	k	-	-	1,2	±∞	-
37	4200	86	82	CO	95	5	13	10	2	-	480	700	-	-	360	-	-	1	k	-	0
38	13000	92	93	N ₂ O ₃	50	-	14	5	2	-	600	840	-	-	-	k	-	k	1	k	0
39	2800	91	91	N ₂ O ₃	85	5	14	-	3	-	-	800	620	-	-	k	-	1,3	1	k	0
40	11500	95	94	CO	55	4	6	1,7	-	-	-	620	-	-	-	k	-	1,25	1	0	-
41	3400	93	85	CH ₄	50	10	-	100	19	-	-	450	-	-	370	1,3	0	k	1	k	-
42	19000	89	82	CO ₂	60	10	16	-	3,1	1	-	900	600	-	-	k	-	1,25	1	k	-
43	8400	86	87	CH ₄	55	3	55	27	-	-	-	800	-	-	-	1	-	1	k	0	-
44	1000	93	87	CO ₂	75	-	10	2	-	-	650	-	520	-	-	k	1	-	k	0	-
45	2700	90	90	CO ₂	80	5	10	-	-	-	500	650	760	-	-	-	-	0	1,25	-	0
46	6000	93	91	N ₂ O ₃	70	20	15	-	10	-	-	-	520	750	-	k	1	k	-	k	0
47	3300	88	80	CO ₂	50	2	20	50	18	-	-	670	-	-	670	1	-	k	1	k	-
48	2100	86	84	N ₂ O ₃	55	-	20	6	12	-	600	850	-	850	-	k	-	1,3	-	k	0
49	1300	94	83	CO	80	3	30	10	14	-	-	720	-	660	-	1	-	k	-	1,25	0
50	9000	90	87	O ₂	55	2	10	13	-	30	300	440	-	610	800	-	-	1	k	-	-
51	1800	89	81	N ₂ O ₃	90	5	-	10	5	-	480	500	-	-	-	-	0	k	1	1,3	0
52	700	90	90	CH ₄	85	10	7	-	-	-	500	-	700	760	-	-	1	k	0	1,3	0
53	8500	89	86	CO ₂	65	5	-	30	55	25	480	370	-	900	-	-	0	k	-	1	-
54	4800	87	85	CO ₂	90	5	2	30	-	-	460	300	630	700	-	-	-	-	0	1	k
55	1600	91	81	CH ₄	50	5,5	10	18	33	-	500	-	-	900	-	-	1	k	-	k	0

Продолжение таблицы 2.1 (часть 3)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
56	15000	88	89	CO ₂	90	5	2	30	-	-	460	300	630	700	-	-	-	-	0	1	k
57	20000	91	82	N ₂ O ₃	75	50	20	10	5	1	870	-	-	-	380	-	1	k	1	-	-
58	14000	90	91	CH ₄	80	-	-	20	-	1	840	1100	1100	750	420	k	0	-	1,25	-	-
59	11000	96	93	CO	55	32	16	3	-	-	700	-	600	550	-	-	1	-	0	k	0
60	17500	85	84	CO	85	20	-	1,5	2,8	-	800	940	550	-	-	-	0	-	1	-	-
61	8600	87	86	CO ₂	50	10	-	20	5	-	440	650	-	840	-	-	k	1	-	1,3	0
62	13500	91	92	NO ₂	70	2	30	100	20	75	-	-	1000	-	900	1	1,3	-	k	-	-
63	16000	88	87	N ₂ O ₃	85	5	-	100	10	-	450	300	-	600	-	-	0	k	-	-	-
64	7400	90	92	CH ₄	80	5	-	75	-	10	420	300	750	1100	700	-	0	-	0	-	-
65	12000	94	95	CO	65	5	-	100	10	-	450	300	-	600	-	-	0	k	-	-	-
66	8200	85	88	CO ₂	55	20	-	5	-	-	900	1100	820	680	450	-	0	-	k	-	0
67	10000	95	92	CO ₂	65	30	-	-	-	-	880	1100	-	-	-	-	0	k	0	0	-
68	16500	87	86	O ₂	50	-	40	10	-	-	750	1500	1000	850	-	1,3	-	-	0	k	0
69	18000	88	82	CO ₂	90	20	50	30	20	-	680	1130	950	950	-	-	-	-	-	k	0
70	12500	93	94	O ₂	75	8	14	10	-	-	500	800	-	600	-	-	-	1	k	1,25	0
71	9800	94	91	CH ₄	65	30	50	20	10	-	700	1000	900	-	-	-	-	-	1	k	0
72	6800	93	95	CO ₂	55	-	30	5	-	-	740	1120	720	620	-	k	-	-	0	k	0
73	7000	92	94	N ₂ O ₃	70	8	1,8	-	50	10	480	300	500	-	700	-	-	1,3	±∞	-	-
74	9400	92	83	CH ₄	90	10	20	10	15	-	550	1100	800	1000	600	-	-	-	-	-	0
75	8200	85	88	CO ₂	70	3	-	10	16	-	490	450	-	950	-	-	0	k	-	1,3	0
76	14500	89	90	CO	60	18	20	10	14	-	610	750	600	750	600	-	-	-	-	k	-
77	25000	86	97	N ₂ O ₃	90	2	30	60	-	16	-	630	-	830	-	1	-	±∞	k	1	-
78	18500	86	83	CO ₂	65	5	-	30	55	25	480	370	-	900	-	-	0	k	-	1	-
79	20000	91	83	CH ₄	50	3	-	-	6,5	-	-	400	670	670	450	1,25	0	k	-	-	0
80	7600	89	91	CH ₄	85	30	-	24	3	-	700	1000	-	-	-	-	0	1	k	-	-
81	19500	90	81	N ₂ O ₃	55	32	16	3	-	-	700	-	600	550	-	-	1	-	0	k	0
82	18500	89	81	CO	85	-	30	10	5	-	920	920	700	700	410	k	1	-	1	-	0
83	8000	86	89	O ₂	75	30	20	50	20	3	700	-	900	830	600	-	1	-	-	-	-
84	18500	89	80	O ₂	70	3	-	10	16	-	490	450	-	950	-	-	0	k	-	1,3	0
85	8800	88	85	O ₂	70	3	1,8	-	-	3	450	300	740	900	500	-	-	k	0	-	-
86	17000	86	85	CO ₂	60	10	16	-	3,5	-	-	1000	600	-	-	k	-	1,3	1	k	0

Продолжение таблицы 2.1 (часть 4)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
87	4400	85	83	CH ₄	60	10	16	-	3,5	-	-	1000	600	-	-	k	-	1,3	1	k	0
88	2800	94	83	NO ₂	50	10	7	-	-	-	500	-	700	760	-	-	1	k	0	k	0
89	1500	87	94	CO	70	-	28	16	10	-	700	1000	-	-	-	1,3	-	k	1	1,3	0
90	13000	92	93	CH ₄	60	5	13	10	2	-	480	700	-	-	360	-	-	1	k	-	0
91	7200	91	93	O ₂	85	30	15	5	5	-	-	-	-	580	-	k	1	1,2	-	k	0
92	14000	92	91	CO ₂	50	15	10	2	-	-	-	-	520	-	-	k	1	-	k	0	-
93	8500	89	86	NO	70	2	30	100	20	45	-	-	1000	-	900	1	1,3	-	k	-	-
94	17500	85	84	CH ₄	75	5	17	7	5	-	-	900	-	900	-	1,25	-	k	-	k	0
95	19000	88	80	N ₂ O ₃	95	5	6	40	20	-	500	-	800	-	-	-	1	-	1	1,3	0
96	2600	94	85	N ₂ O ₃	75	10	15	5	4	-	-	950	-	610	-	k	-	1,3	-	k	0
97	19500	90	81	NO ₂	75	5	17	7	5	-	-	900	-	900	-	1,25	-	k	-	k	0
98	1900	87	92	N ₂ O ₃	65	20	15	-	10	-	-	-	520	750	-	1,25	1	k	-	k	0
99	1700	85	93	NO ₂	70	20	10	-	1,5	-	-	-	550	-	-	1,3	1	1,3	1	-	-
100	2400	92	87	O ₂	85	3	20	-	20	-	-	650	430	750	-	1	-	k	-	-	-
101	9000	90	87	NO	70	30	20	50	20	-	-	-	900	830	-	1,2	1	-	-	1,25	0,25
102	8000	94	87	N ₂ O ₃	50	2	10	13	-	-	-	-	-	610	800	1	1,3	1	k	0	-
103	8400	86	87	N ₂ O ₃	55	5	-	10	5	2	480	500	-	-	500	-	0	k	1	-	-
104	9200	91	88	NO	85	-	-	12	-	-	750	1000	-	550	-	k	0	1	-	0	-
105	6600	94	94	N ₂ O ₃	95	10	16	-	10	-	660	-	800	1200	-	-	±∞	k	-	k	0
106	18500	86	83	NO ₂	55	-	30	5	-	-	740	1120	720	600	-	k	-	-	0	k	0
107	7800	87	90	CO	60	2	50	30	-	10	-	870	800	1000	750	1	-	-	0	-	-
108	4400	88	80	O ₂	70	5	5	1,5	1,8	-	460	570	-	500	-	-	-	k	-	1	0
109	18000	87	82	O ₂	50	3	-	-	6,5	-	-	400	670	670	450	1,25	0	k	-	-	0
110	9600	93	90	CO	50	-	20	12	-	-	750	1000	-	550	-	k	-	1	-	-	0
111	4600	89	82	CH ₄	50	-	14	5	3	-	500	800	-	-	-	k	-	k	1	k	0
112	9000	95	88	CO	85	10	20	-	-	10	-	-	750	1200	760	1,3	1	k	0	-	-
113	12000	93	90	NO ₃	55	5	8	-	-	-	-	-	800	440	-	k	1	±∞	-	0	-
114	6400	95	93	NO ₂	80	50	30	10	5	-	-	-	700	-	410	k	1	-	1	-	0
115	18000	90	93	NO	85	10	6	-	-	-	670	-	-	-	-	-	1	k	0	-	-
116	11500	95	94	NO	55	5	3	16	-	-	-	-	500	450	-	1,3	1	-	-	±∞	-

3. Расчет термодинамического газового цикла

Расчеты теоретических циклов начинают с расчетов, составляющих цикла процессов. Газовый цикл комплектуют из определенного набора политропных процессов.

Рассматриваемые процессы газа равновесные, т. е. состоят из равновесных промежуточных состояний, которые характеризуются одинаковым давлением, удельным объемом и температурой. Расчет процессов газового цикла начинается с процесса (1-2).

Уравнение первого закона термодинамики дает возможность исследовать явления, происходящие с газами при изменении его состояния.

В общем виде первый закон термодинамики представляет собой математическое выражение закона сохранения и превращения энергии. Его можно представить в таком виде:

$$q = \Delta u + l,$$

т.е. подведенное к газу тепло расходуется на изменение внутренней энергии газа и на совершение работы.

Изменение энтальпии для термодинамических процессов определяется по формуле

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Превращение работы в теплоту происходит всегда полностью, обратный же процесс превращения теплоты в работу при непрерывном переходе возможен лишь при определенных условиях. Второй закон термодинамики устанавливает условия преобразования тепловой энергии в механическую, определяет направление, в котором протекают процессы, а также максимальное значение работы, которая может быть произведена тепловым двигателем.

Для изучения процессов превращения тепла в работу в тепловых двигателях используют параметр состояния газа – энтропию газа.

В данной работе рассматривается прямой обратимый цикл. Второй закон термодинамики для обратимого процесса имеет вид:

$$dq = T \cdot ds$$

Для вычисления изменения энтропии для термодинамических процессов (кроме адиабатного) используют логарифмические зависимости. В адиабатном процессе изменения состояния газа, в котором $q=0$, энтропия не изменяется.

Если в прямом цикле в процессе расширения к газу подводится тепло в количестве q_1 , а в процессе сжатия от газа тепло отводится в количестве q_2 , то разность $q_1 - q_2 = q_{ц}$ показывает, как теплота исчезает в течение цикла в результате преобразования её в механическую энергию. Так как газ возвращается в первоначальное состояние, изменение внутренней энергии нет $\Delta u = 0$, т.е. в соответствии с первым законом термодинамики:

$$q_{ц} = l_{ц},$$

так как в течение цикла совершена полезная работа. Исчезнувшее тепло $q_{ц}$, затраченное на совершение полезной работы, называется полезным теплом; количества тепла q_1 называется подведенным теплом, а q_2 - отведенным.

Для количественной оценки работы идеального теплового двигателя, в котором отсутствуют потери на трение, пропуски через не плотности, излучение вводится отношение:

$$\eta_T = \frac{q_{ц}}{q_1} = \frac{l_{ц}}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \cdot 100\%$$

называемое термическим коэффициентом полезного действия. Этот коэффициент измеряет количество полезной работы на единицу подведенного тепла.

Изохорный процесс. Уравнение изохоры - $v = \text{const}$.

Для этого процесса связь между термическими параметрами начального и конечного состояний газа выражается законом Шарля

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

В этом процессе все подводимое тепло расходуется на изменение внутренней энергии, так как газ работы не совершает ($l=0$), кДж/кг

$$q_v = \Delta u$$

Изменение энтропии, кДж/(кг·К)

$$\Delta s = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

Изобарный процесс. Уравнение изобары - $p = \text{const}$.

Для этого процесса связь между термическими параметрами начального и конечного состояний выражается законом Гей-Люссака:

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

Работа изменения объема газа, кДж/кг

$$l = p \cdot (v_2 - v_1) \text{ или}$$

$$l = R \cdot (T_2 - T_1)$$

Уравнение первого закона термодинамики для процесса

$$q = \Delta u + l = c_v \cdot (T_2 - T_1) + p \cdot (v_2 - v_1)$$

В изобарном процессе все подводимое тепло расходуется на изменение энтальпии газа, кДж/кг

$$q_p = \Delta h = h_2 - h_1$$

Изменение энтропии, кДж/(кг·К)

$$\Delta s = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

Изотермический процесс. Уравнение изотермы - $pv = \text{const}$

Для этого процесса справедлив закон Бойля – Мариотта. Зависимость между начальными и конечными параметрами:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Работу 1 кг газа можно определить, используя уравнения:

$$l = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right);$$

$$l = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

Внутренняя энергия в изотермическом процессе не изменяется, поэтому $\Delta u=0$.

Количество тепла, сообщаемое газу или отнимаемого от него:

$$q_t = l$$

Изменение энтальпии равно нулю

$$\Delta h = 0$$

Изменение энтропии

$$\Delta s = R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right);$$

$$\Delta s = R \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right).$$

Адиабатный процесс

Адиабатным называется процесс, протекающий без теплообмена между рабочим телом и окружающей средой.

$p v^k = \text{const}$ – уравнение адиабаты, где k – показатель адиабаты:

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k,$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1},$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Количество теплоты для данного процесса $q=0$, тогда уравнение первого закона термодинамики для адиабатного процесса

$$0 = \Delta u + l,$$

следовательно, изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = -l$$

Работа расширения совершается из-за убыли внутренней энергии при сжатии же расходуется на повышение внутренней энергии:

$$l = \frac{1}{k-1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2)$$

или

$$l = \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2)$$

Изменение энтропии $\Delta s=0$.

Политропный процесс

Политропными называются процессы, в которых теплоемкость имеет любое, но постоянное на протяжении всего процесса значение

$pV^n = \text{const}$ - уравнение политропы, где n – показатель политропы

$$n = \frac{c_p - c}{c_v - c},$$

где C – теплоемкость политропного процесса, кДж/(кг·К)

$$c = c_v \cdot \frac{n - k}{n - 1}$$

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n,$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1},$$

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

Работу в политропном процессе можно определить, используя уравнения

$$l = \frac{1}{n-1} \cdot (P_1 \cdot V_1 - P_2 \cdot V_2)$$

или

$$l = \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2),$$

$$l = \frac{k-1}{k-n} \cdot q$$

Количество теплоты, сообщаемого газу или отнимаемого от него, кДж/кг

$$q = c \cdot (T_2 - T_1) = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1)$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

или

$$\Delta u = \frac{n-1}{1-k} \cdot l$$

Изменение энтропии в политропном процессе:

$$\Delta S = c \cdot \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$$

Для всех процессов расчет изменения энтропии можно рассчитать через параметры:

$$\Delta S = c_p \ln (T_k/T_n) - R \ln P_k/P_n$$

Определение массовых изобарной и изохорной теплоёмкостей.

Согласно молекулярно-кинетической теории массовые изобарная и изохорная теплоёмкости (кДж/(кг·К)) зависят от числа степеней свободы атомов в молекуле вещества j и молекулярного веса μ . Они определяются по формулам:

$$c_p = 4187 \cdot (j+2) / \mu,$$

$$c_v = 4187 \cdot j / \mu.$$

Коэффициент Пуассона k находится через отношение изобарной и изохорной теплоёмкостей

$$k = c_p / c_v = (j+2) / j.$$

Число степеней свободы атомов в молекуле вещества j зависит от числа атомов в молекуле и структуры атомов в молекуле (для многоатомных газов).

Можно пользоваться таблицей 3.1, в которой для удобства мольная теплоемкость дана в технической системе единиц, которая выражается в простых цифрах для любого газа одинаковой атомности.

Таблица 3.1 – Мольные теплоемкости идеальных газов по МКТ

Число атомов в молекуле	Примеры газов	Число степеней свободы, j	Теплоемкость, ккал/(кмоль·К)		Коэффициент Пуассона, k
			изохорная, μc_v	изобарная, μc_p	
1	гелий, аргон, криптон	3	3	5	1,67
2	кислород, азот, воздух, угарный газ	5	5	7	1,40
3-4	углекислый газ, двуокись серы	6	6	8	1,333
5 и более	метан углеводороды	7	7	9	1,29

При расчетах газового цикла рекомендуется для многоатомных газов принимать $j = 6$, $k = 1,333$.

Результат расчета термодинамических процессов газового цикла приводится в табл. 3.2

Таблица 3.2 – Расчет термодинамических процессов газового цикла

Параметр / Процессы	l , кДж/кг	Δu , кДж/кг	q , кДж/кг	Δh , кДж/кг	ΔS , кДж/(кг · К)
1 - 2					
2 - 3					
3 - 4					
4 - 5					
5 - 1					

Анализ эффективности цикла выполняется по определению работы цикла

$$l_{\text{ц}} = q_1 - q_2$$

Подведенное количество теплоты (q_1), складывается из положительных численных значений количества теплоты, а отведенное количество теплоты (q_2) наоборот, из отрицательных.

Определение полезно использованного тепла $q_{\text{ц}}$

$$q_{\text{ц}} = l_{\text{ц}}$$

Определение термического к.п.д. газового цикла

$$\eta_{\text{T}} = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \cdot 100\%$$

Проверка правильности расчета газового цикла

Изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии являются функциями состояния и зависят только от начального и конечного состояния процесса, для кругового цикла в целом они будут равны нулю. Поэтому просуммируем Δu , Δh , Δs для цикла. Эти суммы должны быть, примерно, равны нулю. Работа и теплота являются функциями процесса, и они для цикла должны быть, примерно, равны между собой.

Построение термодинамического газового цикла в TS – диаграмме

По оси абсцисс откладываются в масштабе численные значения энтропии, а по оси ординат - температуры. Принимаем точку 1 (начало) на оси абсцисс, но соответствующую для данной точки 1 на оси ординат температуры согласно масштабу. Принимаем S_1 , равное 1 кДж/(кг·К). Последовательно откладываем значения температур и энтропии (ΔS) для каждого процесса, строим замкнутый цикл, полагая, что конец данного процесса, является началом следующего.

4. Требования и образец оформления отчета

В качестве примеров представлено расчёт вариант «Термодинамического исследования газового цикла», которые выполнены согласно требованиям, необходимым для защиты отчета.

В конце отчета необходимо ответить на нижеприведённые контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Как определить показатель политропы, если известны начальные и конечные параметры процесса?
2. Определить конечное давление, если в политропном процессе известны $p_n, T_{n,p}$ и T_k .
3. Как определить параметры совместной точки двух процессов цикла, если известны показатели этих политропных процессов?
4. Нанесите качественно верно политропный процесс отвода теплоты при $n=0,5$ в pV и Ts – диаграммах состояния и укажите, как найти его среднюю температуру.
5. Средняя температура отвода теплоты в цикле $T_{cp2} = 420 K$ в результате утилизация теплоты уменьшилась на 50К. На сколько увеличится термический КПД при неизменной средней температуре подвода теплоты $T_{cp1} = 800K$ и температуре окружающей среды $T_a = 300 K$?
6. Как определить часовой расход топлива, если известен удельный расход топлива и мощность установки?
7. Какие термодинамические величины можно графически представить в pV – диаграмме, если в ней нанесен процесс и цикл?
8. Какие термодинамические величины можно графически представить в Ts – диаграмме, если в ней нанесен процесс и цикл?
9. Определить нормальную плотность смесей воздуха ($\mu=29$) и 30% метана ($\mu=16$).
10. Необходимая индикаторная мощность двигателя $N_i=500$ кВт при $\eta_{oi} = 0,92$. Какая должна быть теоретическая мощность двигателя?

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Елема В.А. Техническая термодинамика и теплопередача для судомехаников» - Новороссийск: НГМА, 2012. -312 с.

Приложение

Пример расчёта

«Термодинамического исследования газового цикла»

Федеральное Агентство морского и речного транспорта
Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение
высшего образования
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АДМИРАЛА Ф.Ф. УШАКОВА»

Факультет «_____»

Кафедра «_____»

УТВЕРЖДАЮ

Преподаватель _____

_____ (дата)

Термодинамическое исследование газового цикла
(вариант № ____)

Выполнил курсант _____ группы

ФИО подпись дата

Задание

Рабочим телом теплоэнергетической установки (ТЭУ) является смесь азота и метана. Цикл установки состоит из политропных процессов.

Задано:

Мощность ТЭУ эффективная, кВт, N_e		17000
КПД относительный, индикаторный, %, η_{0i}		86
КПД механический, %, η_m		85
Компонент добавочный		CH_4
Весовая доля основного компонента, %, g_1		65
Давление в характерных точках цикла, бар,	p_2	20
	p_3	30
	p_4	10
	p_5	5
Температура в характерных точках цикла, К,	T_2	500
	T_3	1050
	T_4	
	T_5	600
Показатели политропных процессов цикла	n_{1-2}	-
	n_{2-3}	-
	n_{3-4}	К
	n_{4-5}	-
	n_{5-6}	

Определить:

- работу цикла;
- изменение внутренней энергии и энтальпии в процессах;
- термический КПД цикла;
- предельно возможный термический КПД в заданном интервале температур;
- средние температуры подвода и отвода теплоты в цикле;
- коэффициент заполнения цикла;
- возможное повышение КПД при полном использовании вторичных энергоресурсов (ВЭР);
- эффективный расход условного топлива;
- массовый и объемный расходы рабочего тела;
- удельный теоретический расход условного топлива.

Графически представить (в масштабе):

- цикл в Ts-диаграмме;

Указать характеристики, имеющие графическое изображение в указанных диаграммах состояния.

1. Расчет свойств.

1.1. Свойства компонентов смеси.

1.01.01 Молекулярный вес азота.

$$\mu_1 = 28$$

1.01.02. Молекулярный вес метана.

$$\mu_2 = 16$$

1.01.03. Степень свободных атомов в молекуле и коэффициент Пуассона азота.

$$J_1 = 5; k_1 = 1,4$$

1.01.04. Степень свободных атомов в молекуле метана.

$$j_2 = 6; k_2 = 1,333$$

1.01.05. Удельная газовая постоянная азота.

$$R_1 = R_\mu / \mu_1 = 8314 / 28 = 296,93 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

1.01.06. Удельная газовая постоянная метана.

$$R_2 = R_\mu / \mu_2 = 8314 / 16 = 519,63 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

1.01.07. Изохорная теплоемкость азота.

$$C_{v1} = 4187 \cdot j_1 / \mu_1 = 4187 \cdot 5 / 28 = 747,68 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

1.01.08. Изохорная теплоемкость метана

$$C_{v2} = 4187 \cdot j_2 / \mu_2 = 4187 \cdot 6 / 16 = 1570,13 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

1.01.09. Изобарная теплоемкость азота.

$$C_{p1} = k_1 \cdot C_{v1} = 1,4 \cdot 747,68 = 1046,75 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

1.01.10. Изобарная теплоемкость метана.

$$C_{p2} = k_2 \cdot C_{v2} = 1,333 \cdot 1570,13 = 2092,98 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

1.02. Свойства смеси.

1.02.01. Удельная газовая постоянная.

$$R = g_1 R_1 + g_2 R_2 = 0,65 \cdot 296,93 + 0,35 \cdot 519,63 = 374,88 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

1.02.02. Молекулярный вес.

$$\mu = R_\mu / R = 8314 / 374,88 = 22,18$$

1.02.03. Нормальная плотность.

$$\rho_H = \mu / 22,4 = 22,18 / 22,4 = 0,99 \text{ кг}/\text{м}^3$$

1.02.04. Изохорная теплоемкость.

$$C_v = g_1 C_{v1} + g_2 C_{v2} = 0,65 \cdot 747,68 + 0,35 \cdot 1570,13 = 1035,54 \text{ Дж/(кг·К)}$$

1.02.05. Изобарная теплоемкость

$$C_p = g_1 C_{p1} + g_2 C_{p2} = 0,65 \cdot 1046,75 + 0,35 \cdot 2092,98 = 1412,93 \text{ Дж/(кг·К)}$$

1.02.06. Коэффициент Пуассона.

$$k = C_p / C_v = 1412,93 / 1035,54 = 1,3644$$

1.02.07. Удельный объем в состоянии принятом за начало отсчета в цикле.

$$v_1 = R T_1 / P_1 = 374,88 \cdot 300 / 10^5 = 1,12 \text{ м}^3/\text{кг}$$

2. Расчет процессов.

2.01. Политропный процесс повышения давления (1-2).

- Параметры процесса: $p_1 = 1 \text{ бар}$; $T_1 = 300 \text{ К}$; $p_2 = 20 \text{ бар}$; $T_2 = 500 \text{ К}$; $n_{1-2} = ?$

- комплекс из показателя политропы (по логарифмическому соотношению pT- параметров)

$$x = \frac{n-1}{n} = \frac{\ln(T_2/T_1)}{\ln(p_2/p_1)} = \frac{\ln(500/300)}{\ln(20/1)} = 0,1705$$

- показатель политропы (из предыдущего комплекса)

$$n_{1-2} = 1/(1-x) = 1/(1-0,1705) = 1,2056$$

- теплоемкость

$$C_{1-2} = \frac{n-k}{n-1} C_v = \frac{1,2056-1,3644}{1,2056-1} 1035,54 = -800 \text{ Дж/(кг·К)} = -0,8 \text{ кДж/(кг·К)}$$

- изменение энтропии

а) по теплоемкости

$$\Delta S'_{1-2} = C_{1-2} \cdot \ln(T_2/T_1) = -800 \cdot \ln(500/300) = -408,7 \text{ Дж/(кг·К)} = -0,408 \text{ кДж/(кг·К)}$$

б) по параметрам

$$\Delta S''_{1-2} = C_p \cdot \ln(T_2/T_1) - R \ln P_2/P_1 = 1412,93 \cdot \ln(500/300) - 374,88 \ln(20/1) = -401,3 \text{ Дж/(кг·К)} = -0,4013 \text{ кДж/(кг·К)}$$

в) расхождение менее 1,82%

- отведенная теплота

$$q_{1-2} = C_{1-2}(T_2 - T_1) = -0,8 \cdot (500 - 300) = -160 \text{ кДж/кг}$$

- изменение энтальпии

$$\Delta h_{1-2} = C_p(T_2 - T_1) = 1412,93 \cdot (500 - 300) = 282600 \text{ Дж/кг} = 282,6 \text{ кДж/кг}$$

- техническая работа процесса

$$l_{mx.1-2} = \frac{n}{n-1} RT_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = \frac{1,2056}{1,2056-1} \cdot 374,88 \cdot 300 \left(1 - \frac{500}{300}\right) = -439700 \text{ Дж/кг} = -439,7 \text{ кДж/кг}$$

-расхождение по 1-му закону термодинамики в форме $q = \Delta h + l_{mx}$.

т.е. $-160 = 282,6 + (-439,7)$ составляет 1,82%

-изменение внутренней энергии

$$\Delta U_{1-2} = C_v(T_2 - T_1) = 1035,54 \cdot (500 - 300) = 207100 \text{ Дж/кг} = 207,1 \text{ кДж/кг}$$

-удельный объем в конце процесса

$$v_2 = RT_2/p_2 = 374,88 \cdot 500 / 20 \cdot 10^5 = 0,937 \text{ м}^3/\text{кг}$$

2.02. Политропный процесс повышения давления (2-3).

-Параметры процесса: $p_2 = 20$ бар ; $T_2 = 500\text{K}$; $p_3 = 30$ бар; $T_3 = 1050\text{K}$; $n_{1-2} = ?$

-комплекс из показателя политропы (по логарифмическому соотношению pT–параметров)

$$x = \frac{n-1}{n} = \frac{\ln(T_3/T_2)}{\ln(p_3/p_2)} = \frac{\ln(1050/500)}{\ln(30/20)} = 1,8298$$

-показатель политропы(из предыдущего комплекса)

$$n_{2-3} = 1/(1-x) = 1/(1-1,8298) = -1,205$$

-теплоемкость

$$C_{2-3} = \frac{n-k}{n-1} C_v = \frac{-1,205-1,3644}{-1,205-1} \cdot 1035,54 = 1206,7 \text{ Дж/(кг·K)} = 1,2 \text{ кДж/(кг·K)}$$

-изменение энтропии

а) по теплоемкости

$$\Delta S'_{2-3} = C_{2-3} \cdot \ln(T_3/T_2) = 1206,7 \ln(1050/500) = 895,3 \text{ Дж/(кг·K)} = 0,8958 \text{ кДж/(кг·K)}$$

б) по параметрам

$$\Delta S''_{2-3} = C_p \ln(T_3/T_2) - R \ln P_3/P_2 = 1412,93 \ln(1050/500) - 374,88 \ln(30/20) = -896,3 \text{ Дж/(кг·K)} = -0,896 \text{ кДж/(кг·K)}$$

в) расхождение менее 0,12%

-подведенная теплота

$$q_{2-3} = C_{2-3}(T_3 - T_2) = 1,2 \cdot (1050 - 500) = 663,7 \text{ кДж/(кг·K)}$$

-изменение энтальпии

$$\Delta h_{2-3} = C_p(T_3 - T_2) = 1412,93 \cdot (1050 - 500) = 777100 \text{ Дж/кг} = 777,1 \text{ кДж/кг}$$

-техническая работа процесса

$$l_{mx.2-3} = \frac{n}{n-1} \cdot RT_2 \left(1 - \frac{T_3}{T_2}\right) = \frac{-1,205}{-1,205-1} \cdot 374,88 \cdot 500 \cdot \left(1 - \frac{1050}{500}\right) = -112,7 \text{ кДж/кг}$$

-расхождение по 1-му закону термодинамики в форме $q = \Delta h + l_{mx}$.
т.е. $663,7 = 777,1 + (-112,7)$ составляет 0,12 %

-изменение внутренней энергии

$$\Delta U_{2-3} = C_v(T_3 - T_2) = 1035,54 \cdot (1050 - 500) = 569500 \text{ Дж/кг} = 569,5 \text{ кДж/кг}$$

-удельный объем в конце процесса

$$v_3 = RT_3/p_3 = 374,88 \cdot 1050 / 30 \cdot 10^5 = 0,131 \text{ м}^3/\text{кг}$$

2.03. Процесс адиабатного расширения (3-4)

-Параметры процесса: $p_3 = 30$ бар; $T_3 = 1050$ К; $p_4 = 10$ бар; $n_{3-4} = k$; $T_4 = ?$

-температура в конце процесса

$$T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 1050 \cdot (10/30)^{\frac{1,3644-1}{1,3644}} = 783 \text{ К}$$

-теплоемкость

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

-изменение энтропии

а) по теплоемкости

$$\Delta S'_{3-4} = 0$$

б) по параметрам

$$\Delta S''_{3-4} = C_p \ln(T_4/T_3) - R \ln(p_4/p_3) = 1412,93 \ln(783/1050) - 374,88 \ln(10/30) = -2,72 \text{ Дж/(кг·К)} = -0,0027 \text{ кДж/(кг·К)}$$

-подведенная теплота

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

-изменение энтальпии

$$\Delta h_{3-4} = C_p(T_4 - T_3) = 1412,93 \cdot (783 - 1050) = -377252,31 \text{ Дж/кг} = -377,25 \text{ кДж/кг}$$

-техническая работа процесса

$$l_{mx.3-4} = \frac{k}{k-1} \cdot RT_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3}\right) = \frac{1,3644}{1,3644-1} \cdot 374,88 \cdot 1050 \cdot \left(1 - \frac{783}{1050}\right) = 374771,78 \text{ Дж/кг} = 374,77 \text{ кДж/кг}$$

-расхождение по 1-му закону термодинамики в форме $q = \Delta h + l_{mx}$.

т.е. $0 = -377,25 + 374,77$ составляет 0,66%

-изменение внутренней энергии

$$\Delta U_{3-4} = C_v(T_4 - T_3) = 1035,54 \cdot (783 - 1050) = -276489,18 \text{ Дж/кг} = -276,49 \text{ кДж/кг}$$

-удельный объём в конце процесса

$$v_4 = RT_4/p_4 = 374,88 \cdot 783 / 10 \cdot 10^5 = 0,2935 \text{ м}^3/\text{кг}$$

2.04. Политропный процесс снижения давления (4-5)

-Параметры процесса: $p_4=10$ бар; $T_4=783$ К; $p_5=5$ бар; $T_5=600$ К; $n_{4-5}=?$

-комплекс из показателя политропы (по логарифмическому соотношению рТ– параметров)

$$x = \frac{n-1}{n} = \frac{\ln(T_5/T_4)}{\ln(p_5/p_4)} = \frac{\ln(600/783)}{\ln(5/10)} = 0,384$$

-показатель политропы(из предыдущего комплекса)

$$n_{4-5} = 1/(1-x) = 1/(1-0,384) = 1,623$$

-теплоемкость

$$\Delta C_{4-5} = \frac{n-k}{n-1} C_v = \frac{1,623-1,3644}{1,623-1} \cdot 1035,54 = 430,3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 0,43 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

-изменение энтропии

а) по теплоемкости

$$\Delta S'_{4-5} = C_{4-5} \cdot \ln(T_5/T_4) = 430,3 \cdot \ln(600/783) = -114,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = -0,114 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

б) по параметрам

$$\Delta S''_{4-5} = C_p \cdot \ln(T_5/T_4) - R \ln P_5/P_4 = 1412,93 \cdot \ln(600/783) - 374,88 \ln(5/10) = -116,3,3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = -0,1163 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

в) расхождение менее 1,5%

-отведенная теплота

$$q_{4-5} = C_{4-5}(T_5 - T_4) = 0,43 \cdot (600 - 783) = -78,75 \text{ кДж}/\text{кг}$$

-изменение энтальпии

$$\Delta h_{4-5} = C_p(T_5 - T_4) = 1412,93 \cdot (600 - 783) = -258600,19 \text{ Дж}/\text{кг} = -258,6 \text{ кДж}/\text{кг}$$

-техническая работа процесса

$$l_{mx.4-5} = \frac{n}{n-1} RT_4 \left(1 - \frac{T_5}{T_4}\right) = \frac{1,623}{1,623-1} \cdot 374,88 \cdot 783 \cdot (1 - 600/783) = 178600 \text{ Дж}/\text{кг} = 178,6 \text{ кДж}/\text{кг}$$

Расхождение по 1-му закону термодинамики в форме $q = \Delta h + l_{mx}$.

т.е. $-78,75 = -258,6 + 178,6$ составляет 1,5%

-изменение внутренней энергии

$$\Delta U_{4-5} = C_v(T_5 - T_4) = 1035,54 \cdot (600 - 783) = -189500 \text{ Дж}/\text{кг} = -189,5 \text{ кДж}/\text{кг}$$

-удельный объём в конце процесса

$$v_5 = RT_5/p_5 = 374,88 \cdot 500 / 5 \cdot 10^5 = 0,375 \text{ м}^3/\text{кг}$$

2.05. Политропный процесс снижения давления (5-1)

-Параметры процесса: $p_5=5$ бар; $T_5=600$ К; $p_1=1$ бар; $T_1=300$ К; $n_{5-1}=?$

-комплекс из показателей политропы (по логарифмическому соотношению pT-параметров)

$$x = \frac{n-1}{n} = \frac{\ln(T_1/T_5)}{\ln(p_1/p_5)} = \frac{\ln(300/600)}{\ln(1/5)} = 0,4307$$

-показатель политропы (из предыдущего комплекса)

$$n_{5-1} = \frac{1}{1-x} = 1/(1 - 0,4307) = 1,756$$

-теплоемкость

$$C_{5-1} = \frac{n-k}{n-1} C_v = \frac{1,756-1,3644}{1,756-1} \cdot 1035,54 = 536,7 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 0,537 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

-изменение энтропии

а) по теплоемкости

$$\Delta S'_{5-1} = C_{5-1} \cdot \ln(T_1/T_5) = 0,537 \cdot \ln(300/600) = -0,372 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

б) по параметрам

$$\Delta S''_{4-5} = C_p \cdot \ln(T_1/T_5) - R \ln P_1/P_5 = 1412,93 \cdot \ln(300/600) - 374,88 \ln(1/5) = -0,376 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

в) расхождение менее 1,1%

-отведенная теплота

$$q_{5-1} = C_{5-1}(T_1 - T_5) = 0,537 \cdot (300 - 600) = -161 \text{ кДж}/\text{кг}$$

-изменение энтальпии

$$\Delta h_{5-1} = C_p(T_1 - T_5) = 1412,93 \cdot (300 - 600) = -423,9 \text{ кДж}/\text{кг}$$

-техническая работа процесса

$$l_{mx.5-1} = \frac{n}{n-1} RT_5 \left(1 - \frac{T_1}{T_5}\right) = \frac{1,756}{1,756-1} \cdot 374,88 \cdot 600 \cdot (1 - 300/600) = 261 \text{ кДж}/\text{кг}$$

расхождение по 1-му закону термодинамики в форме $q = \Delta h + l_{mx}$.

т.е. $-161 = -423,9 + 261$ составляет 1,1%

-изменение внутренней энергии

$$\Delta U_{5-1} = C_v(T_1 - T_5) = 1035,54 \cdot (300 - 600) = -310,6 \text{ кДж}/\text{кг}$$

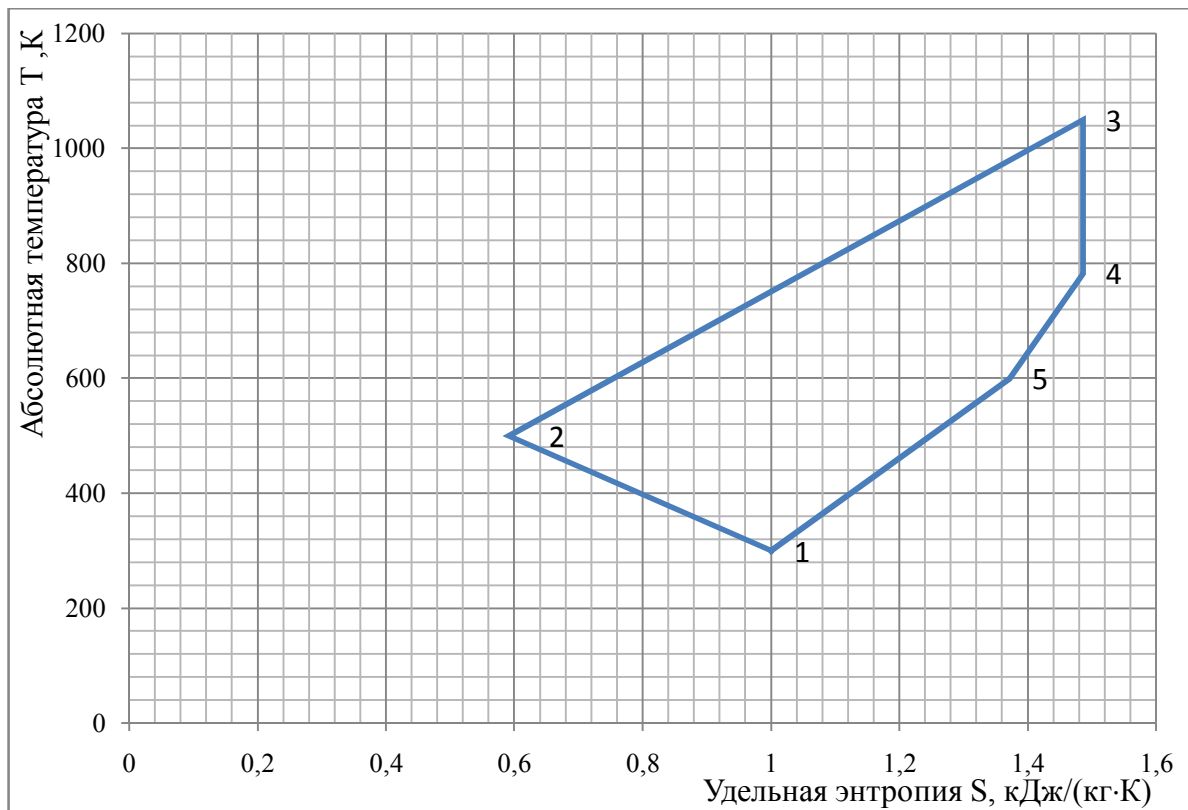
-удельный объем в конце процесса

$$v_1 = RT_1/p_1 = 374,88 \cdot 300 / 10^5 = 1,12 \text{ м}^3/\text{кг}$$

3. Итоговая таблица параметров процессов цикла и их характеристики

Номер состояния	Величины, размерность											Примечание	
	p , бар	T , К	v , м ³ /кг	S , кДж/(кг·К)	n	c , кДж/(кг·К)	Δu , кДж/кг	Δh , кДж/кг	ΔS , кДж/(кг·К)	q , кДж/кг	$l_{тх}$, кДж/кг		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	1	300	1,12	1	1,2056	-0,8	207,1	282,6	-0,409	-160	-439,7	Политропный процесс повышения давления	
2	20	500	0,0937	0,591		-1,205	1,2	569,5	777	0,895	663,7		-112,7
3	30	1050	0,131	1,486	к		0	-276,49	-377,25	0	0	374,77	Процесс адиабатного расширения
4	10	783	0,288	1,486			1,623	0,43	-189,5	-258,6	-0,115	-78,75	178,6
5	5	600	0,45	1,371	1,756	0,537		-310,6	-423,9	-0,372	-161	261	Политропный процесс снижения давления
1	1	300	1,12	0,999		Суммарное значение для цикла		0	0	0,001	263,95	261,97	

4. Цикл в Ts-диаграмме.



5. Определение характеристик цикла.

5.01. Работа цикла

$$l_0 = \sum_{i=1}^n l_{mx(n)} = 263,99 \text{ кДж/кг}$$

5.02. Подведенная теплота в цикле

$$q_1 = \sum q_i (\Delta S > 0) = 663,7 \text{ кДж/кг}$$

5.03. Отведенная теплота в цикле

$$q_2 = \sum q_i (\Delta S < 0) = -399,75 \text{ кДж/кг}$$

5.04. Термический КПД

$$\eta_t = l_0 / q_1 = 263,95 / 663,7 = 0,398$$

5.05. Термический КПД предельного цикла Карно

$$\eta_{tk} = 1 - (T_{min} / T_{max}) = 1 - (300 / 1050) = 0,714$$

5.06. Средняя температура подвода теплоты

$$T_{m1} = q_1 / (S_{max} - S_{min}) = 663,7 / (1,486 - 0,591) = 741,6 \text{ К}$$

5.07. Средняя температура отвода теплоты

$$T_{m2} = |q_2| / (S_{max} - S_{min}) = 399,75 / (1,486 - 0,591) = 446,6 \text{ К}$$

5.08. Коэффициент заполнения цикла

$$\varphi = (T_{m1} - T_{m2}) / (T_{max} - T_{min}) = (741,6 - 446,6) / (1050/300) = 0,393$$

5.09. Возможное повышение термического КПД за счет использования эксергии отведенной теплоты

$$\Delta\eta_t = (T_{m2} - T_0) / T_{m1} = (446,6 - 741,6) / 833,3 = 0,198$$

5.10. Эксергия отведенной теплоты

$$e_2 = |q_2| - T_a \cdot (S_{max} - S_{min}) = 399,78 - 300(1,486 - 0,591) = 131,25 \text{ кДж/кг}$$

5.11. Среднее теоретическое давление цикла

$$p_0 = l_0 / (V_{max} - V_{min}) = 263,95 \cdot 10^{-2} / (1,12 - 0,0937) = 2,57 \text{ бар}$$

6. Определение характеристик ТЭУ

6.01. Теоретическая мощность установки

$$N_0 = Ne / (\eta_{oi} \cdot \eta_m) = 17000 / (0,86 \cdot 0,85) = 23256 \text{ кВт}$$

6.02. Эффективный КПД

$$\eta_{\text{э}} = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m = 0,398 \cdot 0,86 \cdot 0,85 = 0,291$$

6.03. Эффективный удельный расход условного топлива

$$b_0 = 3600 / (\eta_{\text{э}} \cdot Q_H^p) = 3600 / (0,291 \cdot 42000) = 0,295 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)}$$

6.04. Эффективный часовой расход условного топлива

$$B_0 = b_0 \cdot Ne = 0,295 \cdot 17000 = 5008 \text{ кг/ч}$$

6.05. Эффективный удельный расход условного топлива в случае повышения термического КПД

$$b_{0t} = b_0 \cdot \eta_t / (\eta_t + \Delta\eta_t) = 0,295 \cdot 0,396 / (0,398 + 0,198) = 0,07 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)}$$

6.06. Возможная часовая экономия условного топлива

$$\Delta B = (b_0 - b_{0t}) \cdot Ne = (0,295 - 0,07) \cdot 17000 = 3825 \text{ кг/ч}$$

6.07. Часовой массовый расход рабочего тела

$$m = 3600 \cdot Ne / (\eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot l_0) = 3600 \cdot 17000 / (0,86 \cdot 0,85 \cdot 263,95) = 317184 \text{ кг/ч}$$

6.08. Объемный расход тела при нормальных условиях

$$V_0 = m / (3600 \cdot \rho_H) = 317184 / (3600 \cdot 0,99) = 89 \text{ м}^3/\text{с}$$